מדעי הים והסביבה הימית

עורכת **מִיה אלסר**

לחטיבה העליונה

בהיקף של 5 יחידות לימוד לבחינת הבגרות

הקדשה.

ספר זה מוקדש באהבה לזכרה של **שרה ארנסון**
שהייתה הראשונה לזהות את הצורך, בנתה את המקצוע, היוותה לנו השראה והשאירה את חותמה בלימודי הים.

תודה.

תודה גדולה ל**מוטי אלמוג**, מפקח על החינוך הימי במשרד החינוך, על תרומתך למקצוע מדעי הים ולעזרתך בספר בפרט. כתיבת ספר היא תהליך ארוך ומייגע, אך בזכותך הגענו לרגע המיוחל והצלחנו להשלים את המשימה. תודה על היותך אוזן קשבת ועזרתך, גם כשהסיכוי היה קלוש.

דברים.

מדינת ישראל שוכנת לחופו הארוך של מזרח הים התיכון, מראש הנקרה בצפון ועד לרצועת עזה בדרום, ולה גם שער כניסה דרומי - הים האדום, באילת. הים הוא משאב לאומי חשוב וחיוני למדינה בהיבטים שונים: כלכלי, תזונתי, מסחרי וצבאי. המודעות לשמירה על הים, אוצרותיו וחופיו החלה מקבלת בשנים האחרונות הכרה הן בתמיכתם של גופים שונים ממלכתיים ואזרחיים, התומכים בשמירה על משאבי טבע שונים, בהחלטות ממשלה והן בתכניות ייחודיות של משרד החינוך מגיל הגן ועד לסיום י"ב.
המינהל לחינוך התיישבותי, פנימייתי ועליית הנוער מוביל בגאון את לימודי החקלאות והקיימות בכל רוחב העשייה החינוכית-פדגוגית וערכית במוסדות החינוך במינהל וכן את החקלאות הימית ומדעי הים - בפרט. לאחר שנים של מחסור בחומרי לימוד ומחקר בתחום מדעי הים (ימים בהם כל מורה לימד כהבנתו), אני שמחה לבשר, כי עבודה של צוות מגויס, מיומן ומקצועי הביאה ליצירתו של ספר לימוד מקצועי, שישמש את כלל לימודי מדעי הים בכל בתי הספר בישראל. הספר המקיף נשען על מחקרים שנעשו בארץ ובחו"ל, ידידותי למשתמש וזמין לכל מורה ולכל תלמיד/ה בזמן הלימודים בתיכון ובאקדמיה.
תודה למורים שחלמו, גילו אכפתיות, מסירות וקנאות לתחום, שקראו, ליקטו, סיננו וכתבו יצירה מקצועית וייחודית בדמותו של ספר לימוד המעלה על נס את לימוד מדעי הים, חשיבות ההכרה והשמירה על ערכי הים ואוצרותיו. תודה מיוחדת ל: ירון ביסמוט, מגמת מדעי הים בכפר הנוער 'מבואות ים', יונה לוין ודר' מִיה אלסר, מגמת מדעי הים בכפר הנוער 'קציני ים' בעכו.

בהערכה רבה,

אילנה נולמן

מנהלת המחוז ההתיישבותי, פנימייתי ועליית הנוער

מדעי הים והסביבה הימית

לחטיבה העליונה

בהיקף של 5 יחידות לימוד לבחינת הבגרות

הכותבים

ד"ר דור אדליסט
בית הספר למדעי הים ע"ש ליאון צ'רני, אוניברסיטת חיפה והחוג לניהול משאבי ים, המרכז האקדמי רופין

ד"ר מִיה אלסר
המכון ללימודי ים ע"ש רקנאטי, אוניברסיטת חיפה וביה"ס לקציני-ים, עכו

ירון ביסמוט
ביה"ס 'רמות ים', מכמורת

ד"ר דפנה בן יוסף
ביה"ס לקציני ים, אורט אשדוד

ד"ר טל ברמן
אוקיינוגרף פיסיקאלי

ד"ר תמר גיא-חיים
המכון הלאומי לאוקיינוגרפיה, חקר ימים ואגמים לישראל

ארז ירוחם (M.Sc)
המכון הלאומי לאוקיינוגרפיה, חקר ימים ואגמים לישראל

ד"ר מעין כהן
החוג לציוויליזציות ימיות והמכון ללימודי ים ע"ש רקנאטי, אוניברסיטת חיפה

פרופ' דבי צויקל
החוג לציוויליזציות ימיות והמכון ללימודי ים ע"ש רקנאטי, אוניברסיטת חיפה

פרופ' גיל רילוב
המכון הלאומי לאוקינוגרפיה, חקר ימים ואגמים לישראל, ובית ספר למדעי הים על שם צ'רני, אוניברסיטת חיפה

ד"ר תום שלזינגר
בית הספר לזואולוגיה ומוזיאון הטבע על שם שטיינהרדט, אוניברסיטת תל אביב

ספר הלימוד כולל את כל הנושאים המפורטים בתוכנית הלימודים:
נושאי ההערכה הפנימית וגם הנושאים לבחינת הבגרות החיצונית (סמל שאלון 800381).

בספר מסומנות 'מסגרות העשרה' אשר המידע המורחב בהן **לא ייכלל במבחני הבגרות.**

סימון הפניה להרחבה בנושא וסימון חזרה

עורכת: מִיה אלסר
עיצוב גרפי: סטודיו אורנה כהן
תמונת שער: שמורת טבע חוף גדור. צילום: יונה לוין

יצא לאור במימון:

משרד החינוך - החינוך הימי

משפחת ארנסון

אבינועם גורן

תחום מדעי הים הוא העתיד של מדינת ישראל, בו הים הופך להיות משאב לאומי ושימורו חיוני.

עמותת הבוגרים

הספר מרכז מידע חשוב על נושאי הים, בעיקר בארצנו בה הים מהווה משאב לאומי. אנו בטוחים כי הספר ישמש את הקדטים שעוסקים בתחום הימי במדינה ובעולם.

דליה בן נון

"אך האדם הנשכח מלב הוא מת". להנצחת דמותם של יקירינו האחים משה ומיכאל בן נון, שנהרגו במלחמת יום הכיפורים, זוכרים ומתגעגעים, המשפחה.

חנה ועדינה כהנוב

לזכרו של פרופ' יעקב (יק) כהנוב, בעל מעוף ופורץ דרך בתחום מחקר כלי שיט עתיקים.

יונה לוין

לזכר אבי רב חובל גרא לוין ז"ל, שחייו נגדעו בגיל 47 ב-3 במרץ 1981 עם טביעת המצדה, בה בחר להישאר על גשר הפיקוד ולא לרדת לספינת ההצלה - כמיטב המסורת הימית!

ישראל, תשפ"ב 2022

© כל הזכויות שמורות למינהל לחינוך התיישבותי - החינוך למערכות ימיות
© כל הזכויות על התצלומים שמורות לצלמים

כשבעים אחוזים מפני כדור הלכת שלנו מכוסים במים, אך רק כ- 5% משטח האוקיינוסים נחקר עד היום. האדם עבר דרך ארוכה מהמפגש הראשוני עם הים בחיפוש אחר מזון, שהתפתח למסחר, לגילוי עולמות חדשים וכיום משמש בעיקר כמקור משמעותי למשאבים המשמשים אותנו בחיי היום-יום. כדי שנוכל לשמור על הים כמקור למשאבים השונים וכסביבת חיים משמעותית על פני כדור הארץ, עלינו להכיר ולהבין אותו.

מקצוע 'מדעי הים' נלמד בישראל כבר מעל 20 שנים, במהלכן גיבשנו את תכנית הלימודים, כך שתהיה מקיפה ומספקת ועם זאת מותאמת לרמה של תלמידי תיכון. תוכנית הלימודים במדעי הים פורשת בפני התלמידים את מסעות הגילויים בים מראשיתם, ומציגה בפניהם גם את חזית המחקר הימי כיום. היא כוללת טעימות מכל תחומי המדע: ביולוגיה, ארכיאולוגיה, אקולוגיה, גיאולוגיה, כימיה ופיזיקה וכולם, כפי שבאים לידי ביטוי בסביבה הימית. מכיוון שהים הוא חלק בלתי נפרד מחיינו על פני כדור הארץ, התכנים הנלמדים משתנים ומתעדכנים באופן תדיר והמטרה היא לקשר את החומר הנלמד בכיתה לחיי היום-יום. מטרה זו מקבלת משנה תוקף במיוחד בתקופה זו של שינויי אקלים, בהם מהווים האוקיינוסים שחקן מפתח.

הים נמצא לא רק בסדר חשיבות עולמית, אלא גם ברמה הלאומית: מדינת ישראל, ששנותיה הראשונות התאפיינו בפיתוח 'עם הגב לים' פרסמה לאחרונה את מסמך המדיניות למרחב הימי בישראל, ים תיכון ובו המלצות למדיניות ימית חדשה לישראל. אחת מהמלצות המסמך מסמנת את ההכשרה למקצועות הים כגורם מפתח בפיתוח כלכלי של המרחב הימי ובקשר בין האדם לים.

ספר זה מספק את בסיס הידע להכרות תלמידי התיכון עם האוקיינוסים המכסים את מרבית כדור הארץ שלנו ומהווה קרש קפיצה לחקר והבנה מעמיקים יותר של התפקידים הרבים אותם הם ממלאים בחיינו. אנו תקווה כי תהנו מהקריאה, באותה מידה שתחכימו ממנה.

תוכן העניינים

פתח דבר **005**

פרק 1. האדם והים **008**

1.1 תולדות המחקר האוקיינוגרפי 009

1.2 שיטות מחקר באוקיינוגרפיה 022

פרק 2. התהוות האוקיינוסים **048**

2.1 מבנה כדור הארץ 048

2.2 טקטוניקת הלוחות 062

2.3 אגני האוקיינוסים 072

פרק 3. המים **077**

3.1 מבנה ואפיון מולקולת המים 078

3.2 תכונות המים 083

פרק 4. החיים באוקיינוסים **089**

4.1 היווצרות החיים בכדור הארץ 089

4.2 טקסונומיה - מיון וסיווג היצורים החיים באוקיינוסים 097

4.3 מארג המזון בסביבה הימית 123

4.4 הסתגלות לחיים במים 129

פרק 5. תרבויות ימיות **139**

5.1 שיטות מחקר בארכיאולוגיה ימית 139

5.2 התפתחות כלי שייט 149

פרק 6. אוקיינוגרפיה **162**

6.1 מאפיינים פיזיקליים של מי האוקיינוסים 163

6.2 ההרכב הכימי של מי האוקיינוסים 167

6.3 מחזורים ביוגיאוכימיים 172

פרק 7. הים והאטמוספירה **178**

7.1 תהליכים אטמוספריים 178

7.2 זרמי הים 193

7.3 גלי הים 211

7.4 יחסי הגומלין בין הים לאטמוספירה 231

פרק 8. סביבות החיים בים **252**

8.1 אזור החוף 252

8.2 הים הפתוח 261

8.3 ים עמוק 272

פרק 9. משאבים מן הים 285

9.1 תעשיות חופיות מסורתיות 287
9.2 מזון מהים - דיג וחקלאות ימית 290
9.3 אנרגיה מן הים 300
9.4 מחצבים בקרקעית הים 306
9.5 התפלת מי ים 308
9.6 ביוטכנולוגיה ימית 311
9.7 תיירות חופית וימית 315

פרק 10. גיאומורפולוגיה חופית 318

10.1 גיאומורפולוגיה של החופים 318
10.2 מאפייני החוף הארץ ישראלי הים-תיכוני 330
10.3 הסעת החול לאורך החוף הארץ-ישראלי הים תיכוני 338
10.4 מבנים ימיים לסוגיהם 346
10.5 הגנה על החופים 350

פרק 11. אלמוגים ושוניות אלמוגים 354

פרק 12. הים כמערכת אקולוגית 388

12.1 אקולוגיה מהי? מושגים ועקרונות באקולוגיה 388
12.2 אקולוגיה ימית 397

פרק 13. השפעות אנתרופוגניות על הסביבה הימית 405

13.1 ניצול יתר של אורגניזמים ימיים 406
13.2 פלישות ביולוגיות של מינים אקזוטיים 416
13.3 זיהום ים 429
13.4 הרס בתי גידול 437
13.5 שינוי אקלים גלובאלי 445

פרק 14. שימור מול פיתוח בסביבה הימית 456

14.1 מדע חדש: ביולוגיה של שמירת טבע 456
14.2 מגוון ביולוגי 459
14.3 הכחדות 466

פרק 15. שיקום ושימור הים 487

פרק 16. ישראל והים במאה ה-21 498

16.1 איכות הסביבה בים התיכון ובחופי ישראל 498
16.2 חוקים ואמנות לשימור הסביבה הימית בישראל ובים התיכון 515

1

האדם והים

ירון ביסמוט

צילום: ירון ביסמוט

1.1. תולדות המחקר האוקיינוגרפי

יורדי הים הראשונים

האדם נפגש עם הים לאורך החוף עוד בתקופת הפרה-היסטוריה. המפגש התבטא בניצול בעלי החיים שמצא לאורך החוף כמזון ואחר כך שימשו לו כלים לציד ומאוחר יותר גם למסחר. בשלב מסוים הבינו הדייגים הקדומים שהמזון שמגיע אל החוף מעיד על כמויות גדולות יותר במים העמוקים. הם נעזרו בחומרים קלים כמו גזעי עצים, רפסודות קנים ונאדות עור כדי לצוף ולדוג במים הפתוחים ושם הם גילו לראשונה את אוצרות הים.

עוד היום ניתן לראות גרסאות שונות של כלי שיט כאלה בחלקים שונים של העולם, אם כי הן הולכות ונעלמות במהירות. במקומות רבים בעולם נעשים מאמצים להחיות את המסורת ולשמר את מיומנות הבניה של סירות עתיקות אלה: הקאנו (סירת הכוורת) האינדיאנית (איור 1), הקאיאק האינואיטי ('אסקימואי'), סירות עשויות קליפת-עץ, סירות דמויות סל מעיראק ואירלנד ורפסודות קנים מפרו וסרדיניה.

ככל שהאדם אזר אומץ והעז להיכנס לים העמוק יותר, הוא גילה שלעיתים זה השתלם לו - חזר לחוף עם סל מלא בדגים והיו פעמים שחזר לחוף בשחייה. אירועים כאלה דרבנו אותו ליצור כלי עמיד יותר לתנאי ים גלי. גם סירת הקאנו (כוורת) התפתחה עם הזמן: ככל שהאדם חצב עמוק יותר בגזע העץ, הסירה הפכה קלה יותר, קל היה להוריד אותה למים ולתמרן, לשייט במהירות. כוח הציפה שגדל, אפשר נשיאת מלכודות וציוד דיג (איור 2).

איור 1

בניית סירת כוורת

Mariners Museum)

(and Park

איור 2

רפסודה קדומה עם ציוד דייג (ויקיפדיה)

תקופת הברונזה

תקופה בתולדות הציוויליזציה האנושית שבה היכולת הטכנולוגית המתקדמת ביותר אפשרה ייצור כלים העשויים מארד (ברונזה) - סגסוגת מתכת המתקבלת מעירוב של נחושת עם בדיל. תקופה זו מתוארכת לשנים 3,300-1,200 לפנה"ס.

במקביל לבניית רפסודות משוכללות והדייג באיי פולינזיה הרחוקה (איור 3), התפתחו גם כלי השיט הראשונים בנהרות כמו הנילוס, הפרת והחידקל ונהרות בסין. במורד הזרם היה השייט קל יחסית ואילו במעלה הזרם נהגו לחתור במשוטים ואפילו למשוך את הספינות בחבלים מהגדות. בכל הימים שלחופיהם נוצרו תרבויות מתקדמות (הים התיכון, האוקיאנוס האטלנטי וההודי וחופי סין), עברו ב**תקופת הברונזה** לכל המאוחר, לשימוש בספינות עץ. העץ שימש כחומר הבניה העיקרי לספינות במשך יותר מ-5,000 שנה.

עם התפתחות המסחר, נדרשו בוני הספינות לבנות כלי שיט במינימום השקעה של חומרים ועבודה ועם תכונות מרביות של נפח, מהירות ועמידות בים גלי. בשלב מוקדם, ובוודאי שבתקופת הברונזה, כבר ידעו להניף בד כלשהוא, שתפס את הרוח והניע את הספינה ללא תלות בכוח השרירים. **ספינת המפרש** היא למעשה המכונה היעילה והחשובה ביותר שפיתחו יורדי הים עד המהפכה התעשייתית.

איור 3

דייגים פולינזים קדמונים
(Archaeosoup)

איור 4

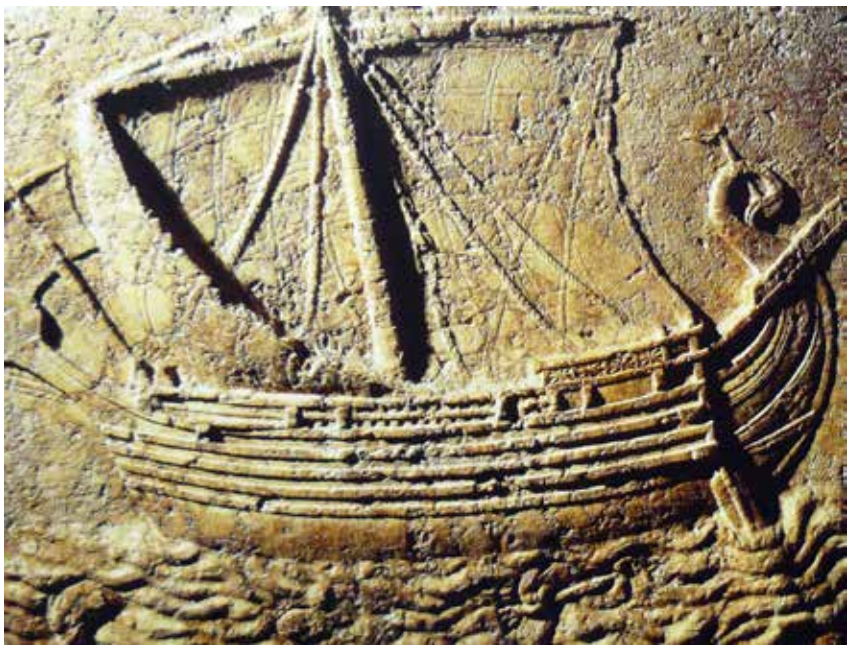
מצרים העתיקה, אור השמש של פרעה צ'אופס (Sueneé Universe)

הספינות המצריות הקדומות (האלף השלישי לפנה"ס) היו חסרות שדרית, והן סבלו מסחיפה רבה (איור 4). ספינות אלה החליפו את סירות הקנים, אך היו בנויות מקורות עץ שיטה, קצרות וחלשות יחסית. כדי להתגבר על הסכנה שבשבירת הספינה כתוצאה מלחץ המים, חגרו אותה בחבל עבה שנמתח בין החרטום לירכתיים. חבל נוסף נמתח לאורך **הלזבזת**, סביב גוף הספינה כולה. התורן עמד על שתי רגלים, שכן הלחץ שלו על גוף הספינה הפריך היה גדול מדי. המפרש היה מלבני, ונעזר בזרוע עליונה ו**מנור** תחתון. שני משוטי הגה גדולים וארוכים, משני צדי הירכתיים, שימשו להיגוי הספינה.

במשך האלף השני לפנה"ס כבר הושפעו המצרים ממסורת בנית הספינות של שכניהם יורדי הים, שלא היו חסרים מקורות עץ לבנית ספינות - **המינואים והפניקים**. חלק מספינות קדומות אלה הגיעו לממדים ניכרים (איור 5). ראיה לכך הוא האובליסק מכרנך שהיה עשוי מגרניט ושקל 400 טון והועבר על גבי רפסודה במורד הנילוס מרחק כ-200 ק"מ מאסואן.

לזבזת
השפה העליונה של דופנות כלי השייט.

מנור
מוט אופקי המשמש לתפיסת השפה התחתונה של מפרש הסירה



איור 5

תגליף של ספינה פניקית על ארון קבורה, המוזיאון הלאומי של ביירות (ויקיפדיה)

המינואים והפניקים

התרבות המינואית נחשבת כעתיקה ביותר באירופה. היא נוצרה לפני כ-5000 שנים (תקופת הברונזה) וכנראה שראשוני האנשים הגיעו לכרתים ולתיֿרה (סנטוריני) מאנטליה. התקדמות משמעותית בתרבות זו התרחשה סביב שנת 2000 לפני הספירה, כשאנשיה החלו לשפר את יכולותיהם בים. **המינואים** היו ימאים מעולים, ובתקופתם היה מסחר מפותח בין חלקיו השונים של הים התיכון המזרחי. בני כרתים עסקו בסחר ימי עם עמים שונים ביניהם המצרים והכנענים, הם סחרו בעיקר בשמנים מהולים עם בשמים ששימשו לרחצה. למעשה, במשך תקופה ארוכה הם היו היחידים בעלי יכולות שיט בים (עד הפניקים) ולכן הארמון קנוסוס לא היה מוגן בחומות שכן לא הייתה תרבות המסוגלת להגיע לאי. ספינותיהם הגיעו לקפריסין, אנטליה, צפון אפריקה וחופי הארץ. התרבות המינואית התפרסמה בעיקר הודות לציורי הקיר (פרסקו) המפורסמים שלה (איור 6), בניית הארמונות (איור 7) ופיתוח כלי שיט שסייעו להם להפליג באגן המזרחי של הים התיכון.

התרבות הגיעה לקיצה במאה ה-15 לפני הספירה, בעקבות התפרצות הר הגעש תיֿרה וגלי הצונאמי שהגיעו בעקבותיו שמחקו בבת אחת את המינואים מהים ומהיבשה. התרבות המינואית והמיקנית שבאה אחריה נחשבות כתרבויות טרום קלאסיות והשפיעו רבות על היוונים בעת העתיקה.

הפניקים היו עם כנעני, אשר ישב במקור, משנת 2,500 לפנה"ס, ברצועת חוף צרה המשתרעת בין רמיתה (לטקייה של היום) בצפון ועד העיר עכו. מאוחר יותר התיישבו גם לאורך מישור החוף הדרומי של ארץ ישראל. אזור זה היווה מרכז סחר ימי בין טורקיה בצפון, דרך קפריסין ועד מצרים בדרום.

איור 6

(מימין) **פרסקו של דייג מהתקופה המינואית, שנת 1650 לפנה"ס לערך** (World History Encyclopedia)

איור 7

(משמאל) **ארמונו של המלך מינוס בקנוסוס, כרתים.** (Viator)

הפניקים היו יורדי ים מובהקים ולהם תפקיד חשוב בהעברת סחורות בין אזורים מרוחקים דרך הים, הם שימשו מעין זרוע ימית לתרבויות הסהר הפורה (אשורים, בבלים ופרסים). בשלב מאוחר יותר ולאחר שיפור יכולותיהם הימיות, הם השתלטו על אזורים באגן המערבי של הים התיכון עד מיצר גיברלטר. הפניקים כבשו לעצמם מקום חשוב בהיסטוריה מפני שידעו היטב להפעיל את כלי השייט שלהם וניצלו זאת לצורך עיסוק בסחר ימי. הם בנו ספינות משוכללות עם תורן ומפרש מרובע וגם ספינות מלחמה בעל איל נגיחה מברזל מתחת לקו המים בחרטום. הפניקים העזו להפליג באוקיאנוס האטלנטי והשתלטו על אזורים נרחבים רחוקים יותר ויש הטוענים שהם הקיפו עם סירותיהם את כל יבשת אפריקה.

מלבד יכולות הניווט בים שהקנו להם את שמם, בלטו הפניקים בהפקת מלח מן הים לצרכי שימור דגים ובשר; הפיקו את צבע הארגמן מחלזונות ימיים, לצביעת מלבושי כוהני דת ומלכים; היו הראשונים לייצר זכוכית מחול ואשלגן חנקתי לבקבוקים אשר שימשו נשות אצולה לאחסון בשמים והמציאו את האלפבית הראשון בעולם המערבי.

התקופה הקלאסית

היוונים ואחריהם הרומאים, הבינו את היתרונות של הים וכלי השייט והחלו בחקירה מדעית של הים. הם בנו סירות משופרות לצורך כיבוש אזורים חדשים, התרחקו משמעותית מרצועת החוף וגילו את גודלו העצום של הים. הם חקרו את תכונות המים (למשל '**חוק ארכימדס**') ובעלי חיים ימיים, בנו כלים לחקר הים כדוגמת פעמון הצלילה של אלכסנדר מוקדון (איור 8), שצלל לבדוק כיצד אויביו הצליחו להטביע חלק מהצי שלו. הידע מוגבל ומעורב בהרבה דמיון, אגדות ואמונות תפלות, כמו זו המתוארת באיור 9.

חוק ארכימדס

חוק הציפה של ארכימדס, הוא חוק פיזיקלי בסיסי בהידרוסטטיקה המסביר מדוע ספינות צפות על-פני המים ואינן שוקעות, כיצד שוקעת הצוללת ומדוע ספינת אוויר מצליחה לרחף באוויר.

איור 8

ציור מהמאה ה-16 המתאר את אלכסנדר הגדול מורד למים בתוך פעמון צלילה (ויקיפדיה)

איור 9

סקילה, מפלצת ים בעלת 6 ראשים מהמיתולוגיה היוונית (newsbox). סקילה וכריבדיס היו מפלצות ימיות מיתיות, שישבו במצר מסינה ומנעו מספינות לעבור. סקילה, בצדו האיטלקי של המצר, הייתה מפלצת שתוארה כנחש בעל שישה ראשים שחוטף מלחים וגורר אותם אל מצולות הים. כריבדיס, בצדה של סיציליה, תוארה כמערבולת אימתנית המטביעה ספינות על יושביהן. כל העובר במצר נאלץ לעבור ליד אחת מהמפלצות

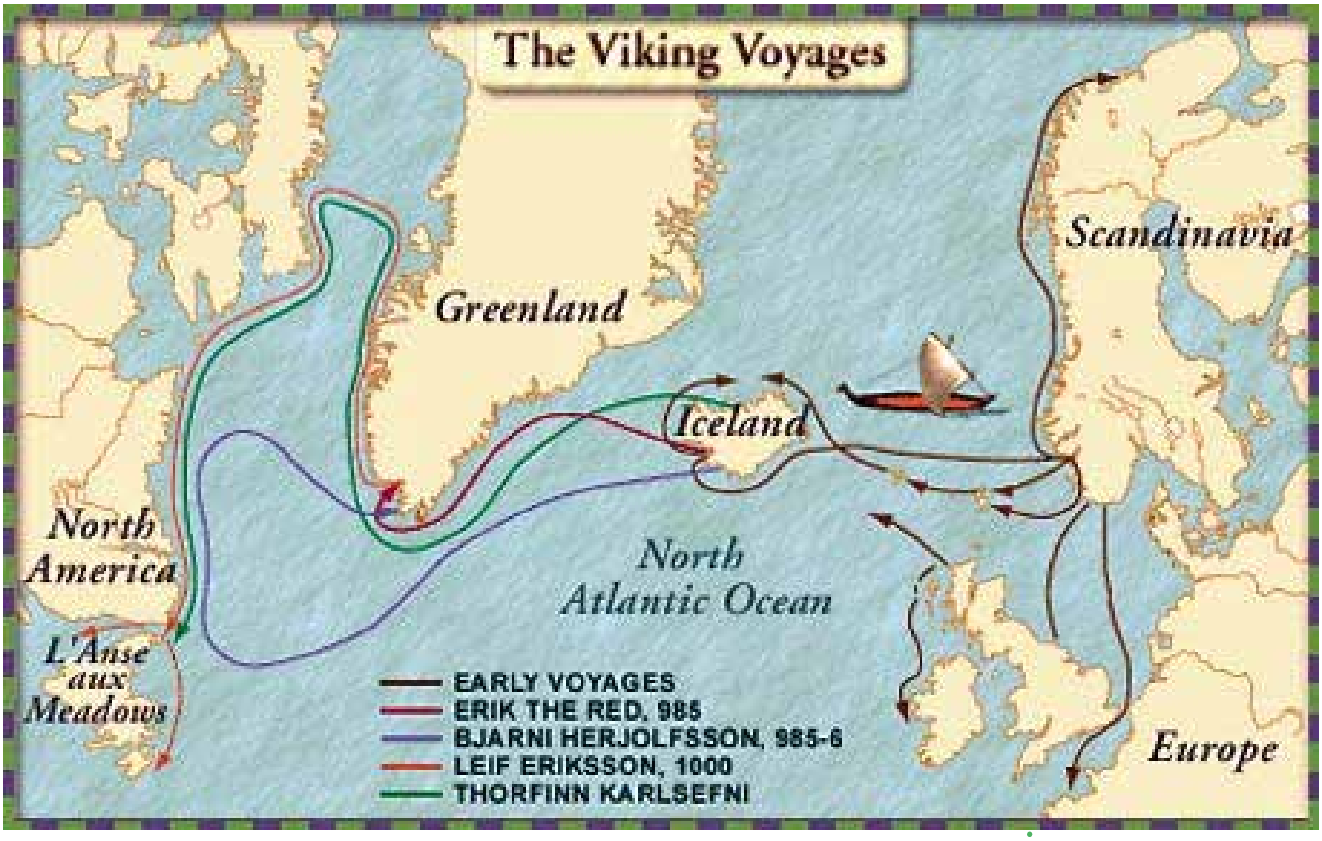
ימי הביניים המוקדמים

המוסלמים שולטים על חלקים ניכרים בים התיכון, ומצד שני באוקיאנוס ההודי ועד גבולות סין. הם מפתחים את המדעים המדויקים ומרחיבים את הניסיון הימי. המוסלמים היו הראשונים שמצאו את הדרך הימית להודו וגילו את המגנט שסלל את הדרך לפיתוח המצפן (איור 10).

איור 10

בעולם המערבי המצפן המגנטי נזכר לראשונה בשנת 1187, בכתביו של הנזיר האוגוסטיני האנגלי, אלכסנדר נֶקָאם. ספרו של נקאם על הטבע, מכיל את התיאור הבא: "הספנים, ברדתם הימה תחת שמים מעוננים, אינם יכולים עוד ליהנות מאור השמש, וכל שכן בעת שהעולם עטוף בצלליה של חשכת הלילה, ואינם יודעים לאיזו רוח מרוחות השמים נוטה ספינתם. לכן הם מצמידים מחט למגנט. אז תחוג המחט ותסתובב במעגל, עד אשר תחדל מתנועתה וחודה יורה היישר אל הצפון".

(Neckam, Alexander. De naturis rerum. London, 1187)



איור 11

מסעותיהם הימיים של מנהיגי הוויקינגים 'אריק האדום', אריקסון ואחרים (WebExhibits)

לקראת שנת 1000 לספירה פיתחו הוויקינגים ספינות מפרש מהירות יותר ועמידות בים גלי. **הוויקינגים** (Viking) היו פיראטים, רובם משבטים מצפון אירופה (נורבגיה / שבדיה / דנמרק של היום) אשר נהגו לערוך פשיטות על חופי צפון ומערב אירופה והאיים הבריטיים מסוף המאה ה-8 עד המאה ה-11. במקביל לכישורי הלחימה שלהם היו הוויקינגים ידועים גם כסוחרים וכמתיישבים. כלי השיט העיקרי של הוויקינגים היה ה'ספינה הארוכה'. הדגם דומה לספינת המשוטים 'גליאה' עם הבדל משמעותי אחד: הספינה התאימה למסע ארוך באוקיינוס. ספינותיהם הארוכות באופן בולט היו בנויות בעיקר מעץ אלון וכללו 40-60 חותרים. לכל ספינה היה תורן בודד ועליו מפרש מרובע עשוי מצמר כבשים, ודפנותיה היו מכוסות מגנים. כל ספינה הייתה זוויתית בשני צדיה כך שיכלה לנוע קדימה ואחורה מבלי להסתובב. הם הפליגו ממדינות סקנדינביה (היום), העזו לחצות את האטלנטי הצפוני והקפוא, כבשו את איסלנד והגיעו עד לצפון אמריקה אך לא נשארו שם (איור 11). הידיעות על תגליותיהם של הוויקינגים ובראשם אריק האדום, לא הגיע למרכז אירופה ולדרומה ולכן הם לא נחשבים למגלי אמריקה.

התפתחות נמלים כגורם להתפתחות הסחר ימי

הגעתו של צוות הספינה עם המטען ליעדו בשלום, לא היה דבר בטוח כלל. לפי כמויות הספינות הטבועות והטרופת שנמצאו עד כה, רבות מן הספינות טבעו בדרך בשל גלי חוף גבוהים, נקלעו לסערות או עלו על שירטון בדרכם לחוף מבטחים. רק עם התפתחות הנמל הקדום, הסחר הימי החל לקרום עור וגידים. הנמלים הבנויים העתיקים ביותר הם נמליהם של **הפניקים**.

נמלים אלה מתוארכים לסוף האלף השני לפנה"ס ותחילת הראשון, כמו נמלי דור ועתלית. מפתיע לגלות, עד כמה מתוחכמת הנדסת הנמלים של הפניקים כבר בראשית הדרך. הקוים האופייניים לנמל הפניקי הם: שוברי גלים ורציפים הבנויים אבני גזית המונחות כראשים (צידן הארוך ניצב לים), המונחים על חצץ. בניה כזו אפשרה להקל בעבודת הימאים, להוריד את הסירות למים, לפרוק מהן סחורות ביתר קלות וכמובן להגן עליהן מפני הגלים. ספינות שלא הספיקו להגיע בזמן לנמל מוגן, נטרפו בגלי הים (איור 12).

היוונים שיכללו את בניית הנמל והפכו אותם למוגנים יותר עבור צי הספינות שלחם. הם הוסיפו, סביב הנמל, מחסנים לצורך אחסון הסחורות המגיעות מן הים או לצורך הפריקה. הרומאים העזו לבנות נמל שלא בתחומי מפרץ מוגן, אחד הקדומים בהם היה **נמלו של הורדוס בקיסריה**, שבנייתו הסתיימה סביב 10 לפנה"ס. שרידיו נמצאים עד היום בקרקעיתו של נמל קיסריה.

איור 12

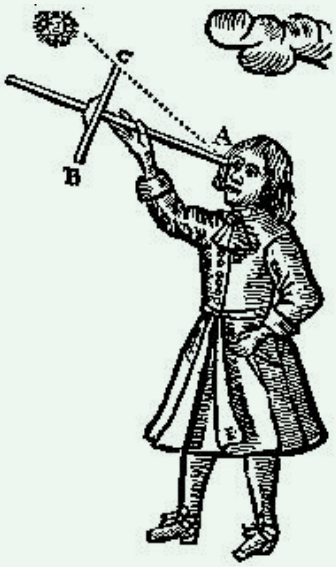
חלק משרידי העץ של הספינה מעגן מיכאל B עם מספר אמפורות (אמיר יורמן)

עידן המגלים והתגליות

ברוח **הרנסנס** וההתפתחויות הכלכליות והמדיניות, החלו שליטי אירופה להתעניין בחקר מרחבי האוקיאנוסים. עד אמצע המאה ה-15, שורטטו מפות ימיות לצורך קביעת נתיבי שייט, הוספה של יבשות חדשות ומיפוי החופים. כל זאת על סמך מידע שנאסף מנתונים גיאוגרפיים מיומני ספינות, מיורדי ים ומדייגים. מפות אלה סייעו לספינות להגיע בבטחה לנמל היעד. כמו כן, הן אפשרו לימאים היכרות עם מפרצים מוגנים ברצועת החוף כדי 'להסתתר' בזמן סערה. בנוסף, פותחו בתקופה זו אמצעי הניווט, כמו המצפן ו'מטה יעקוב' אשר אפשרו הפלגה בבטחה גם כשקו החוף נעלם מעיני המלחים.

'מטה יעקב' הוא מכשיר מדידה המאפשר לקבוע את קו הרוחב הגאוגרפי בים (איור 13). 'מטה יעקב' מעוצב בצורת צלב, הבנוי משני סרגלים, קבוע ונייד. הסרגל הנייד נע לאורך הסרגל הקבוע. הנווט מתבונן בכיוון האופק, ממקם את הקצה התחתון של הסרגל הנייד על קו האופק, ואז מזיז את הסרגל עד שקצהו העליון מתלכד עם השמש. על הסרגל הקבוע ניתן לקרוא את קו הרוחב בו ממוקמת הספינה.

הנווטים שהשתמשו במכשיר זה בתקופות הקדומות כונו "הנווטים העיוורים" שכן לרובם נגרם נזק בלתי הפיך בראייתם, כתוצאה מהתבוננות ישירה בשמש. המכשיר היה בשימושם של אסטרונומים, ימאים ושימש למדידת שטח. המצאתו של המכשיר, במאה ה-14, מיוחסת כנראה לרלב"ג (רבנו לוי בן גרשום). המכשיר שימש מגלי ארצות רבים, בהם ואסקו דה גאמה, פרדיננד מגלן וקולומבוס, והיה בשימוש כארבע מאות שנה עד להחלפתו במכשיר מודרני יותר - הסקסטנט.



איור 13

מטה יעקב (ויקיפדיה)

הרנסאנס

(בצרפתית: Renaissance - "לידה מחדש") הוא שמה של תנועת תחייה תרבותית, פילוסופית ואמנותית שהחלה באיטליה בתקופת ימי הביניים המאוחרים והתפשטה בהדרגה לרחבי אירופה. התנועה נתנה את שמה לתקופה היסטורית שנמשכה בערך מהמאה ה-14 ועד למאה ה-17. לזרם הרנסאנס הייתה השפעה רבה כמעט על כל תחומי החיים אך הוא ידוע בעיקר בשל השפעתו המכרעת על עולם האמנות שבאה לידי ביטוי בתרומות של אדריכלים, פסלים, ציירים ואנשי אשכולות שהבולטים ביניהם היו רפאל, מיכלאנג'לו ולאונרדו דה וינצ'י. מעבר לציוריו המפורסמים, לאונרדו הגאון מילא את פנקסיו בהמצאות שלא הספיק לבנות עד למועד פטירתו (1519), בהן חליפת עור מיוחדת המאפשרת לאמודאים לנשום מתחת למים בעזרת צינור ארוך המחובר לצוללת, מתקן שנבנה כ-300 שנים(!) מאוחר יותר.

צפדינה
מחלה הנגרמת ממחסור חמור בוויטמין C. המחלה הייתה נפוצה במשך מאות שנים, בעיקר בקרב מלחים שלא אכלו פירות וירקות טריים במשך החודשים הארוכים שבילו בלב ים.

מאמצע המאה ה-15, החלו שליטי אירופה לגלות עניין בחקר האוקיינוסים בעקבות נפילתה של קונסטנטינופול (איסטנבול של היום) בידי סולטאן התורכים מוחמד השני, שחסם את הדרך היבשתית למסחר עם הודו והמזרח הרחוק. חיפוש נתיבים ימיים למזרח, השאיפה לגלות עולמות חדשים ואוצרות שינחילו כבוד ועושר לכתר, הובילו לעידן חדש, המכונה 'עידן התגליות'. מדובר על תקופה קצרה של 36 שנה, בין 1486-1522 שבה נערכו מסעות שחוללו מהפכה בידע הגיאוגרפי. התגלו יבשות אמריקה הדרומית והצפונית, נצפה האוקיאנוס השקט והקיפו את כדור הארץ.

- בשנת 1420 הנסיך **הנריקה**, '**הנווט**' מפורטוגל הבין את חשיבות המשלחות לחציית האוקיאנוסים, ייסד מוסד מחקר שמימן הפלגות אל מעבר לאופק הידוע עד אז, בעיקר לאורך חופי אפריקה המערבית. לצורך כך, הוא קיבץ בפורטוגל את מיטב ציירי המפות והקברניטים האיטלקים, במטרה לגלות עולמות חדשים ועשירים, לספחם ולהנחיל כבוד לכתר. על אף שלעולם לא הפליג, הנריקה הורה לשפר את בניית הספינות כך שיהיו עמידות בים גלי לחציית האוקיאנוס והורה לצוותים להשתמש במצפן בהפלגות ארוכות.

יש לזכור שהשייט בים הפתוח היה ארוך במיוחד בשל השימוש במפרשים והתלות ברוח. הפלגות ארוכות הגבירו את הסיכוי של צוות הספינה לחלות במחלות (**צפדינה**, דלקות ועוד), להדביק את שאר המלחים במחלות, להישדד על ידי פיראטים ולהתמודד עם סערות בים שלעיתים הסתיימה באסון. במרבית המקרים, מספר אנשי הצוות שהגיעו לנמל היעד היה קטן ממספרם בנמל המוצא, לעיתים קרוב לאפס. למרות זאת, הימאים ראו ביציאה להפלגה מבחן אומץ ואכן זכו בכבוד רב ובמשכורת נאה לאותה תקופה. בתקופה זו נערכו מסעות לגילוי ארצות ונתיבי שייט חדשים ואלו העיקריים שבהם:

- 1486 - **ברתולומאו דיאז**, הקיף בספינתו את כף התקווה הטובה. בתקופתו של דיאז ובזכותו של הנריקה 'הנווט', הספינות שופרו במידה ניכרת לעומת כלי השייט ששימשו 100 שנים קודם לכן. הן היו מסוגלות להפליג 55 מעלות מהרוח בזכות המפרש המשולש שהותקן על תורן המאסף (תורן אחורי בספינה). שיפור זה בא לידי ביטוי בקיצור משמעותי בימי ההפלגה והגדלת הסיכוי שהצוות יגיע בשלום ליעדו.

- 1492 - **כריסטופר קולומבוס**, יצא למסע שמטרתו הייתה למצוא נתיב סחר ימי להודו בהפלגה מערבה, אולם הגיע במקום למרכז אמריקה ודרומה. מסעותיו של הסוחר הוונציאני מרקו פולו למזרח הרחוק במאה ה-13 ריתקו את קולומבוס. הוא ידע שאם כדור הארץ עגול, חייבת להיות אפשרות להגיע לשם בהפלגה מערבה, בכיוון ההפוך שעשה מרקו פולו. קולומבוס היה משוכנע שדרך זו תהיה קצרה יותר, אך הוא שגה כיוון שבזמנו לא הייתה אפשרות למדוד קווי אורך בצורה מדויקת. לאחר חציית האוקיאנוס האטלנטי והפלגה של חודשיים (איור 14) הוא גילה את האיים הקריביים, קובה והאיטי. עד יומו האחרון, קולומבוס היה משוכנע שהגיע להודו מצידה המזרחי.

איור 14

רפליקה של 'סנטה מריה', ספינת הדגל של כריסטופר קולומבוס שהושקה למים ב-1904. באחד ממסעותיו של קולומבוס לקריביים, ספינתו עלתה על שרטון, העצים לא עמדו בפרץ המים שחדרו מתחת לקו המים והיא נטרפה. לאחר שחקרו מספר איים באזור, הוא חזר לספרד עם ציוותו באוניית הליווי (Wikimedia)

- 1498 - **ושקו דה גאמה**, הקיף את כף התקווה הטובה והגיע להודו דרך הים. המניע של אותן הפלגות היה פשוט ותכליתי, וניתן לתמצות במכתב ענייני מאין כמותו ששולח מלך קליקוט שבהודו למלך פורטוגל בידי ושקו דה גמה בשנת 1498. המכתב בין שני המלכים נותן את התמונה במלוא בהירותה: "בארצנו יש הרבה קינמון וציפורן וזנגביל ופלפל ואבנים טובות, וממך אני רוצה זהב וכסף ופנינים ואריגי ארגמן", דבר המלך ההודי למלך האירופי.
- 1502 - **אמריגו וספוצ'י**, נווט וקרטוגרף מגלה את יבשת אמריקה ומפרסם את תגליתו על העולם החדש.
- 1513 - **ואסקו נונייז דה בלבואה**, כובש וחוקר ספרדי, חצה את פנמה ממזרח למערב עם משלחת מחקר והיה לאירופאי הראשון שצפה באוקיינוס השקט מהפסגות של אזור דריאן (Darien) (איור 15).

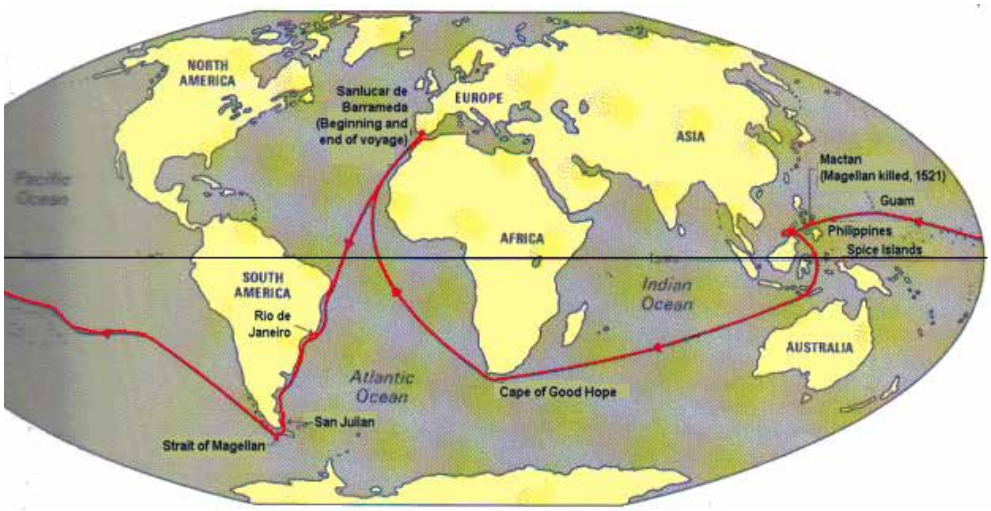
איור 15

אזור דריאן, האזור הצר המחבר בין אמריקה הצפונית לדרומית ומפריד בין האוקיינוס האטלנטי לשקט (Britannica)

איור 16

מיצר מגלן וקצהו הדרומי של דרום אמריקה (אופק עולמי)

- 1519 - **פרדיננד מגלן**, הקיף את כדור הארץ, גילה את המיצר הדרומי בין האוקיאנוס האטלנטי לאוקיינוס השקט (מיצר מגלן, איור 16), הפליג דרכו, חצה את האוקיאנוס השקט, נתן לו את שמו (ראו מסגרת העשרה) וגילה את איי הפיליפינים, שם נהרג על ידי הילידים. מגלן היה הראשון שניסה למדוד את עומק הים על ידי הורדת משקולות (**אנך**), אך לא הצליח בכך. מעבר לחשיבות הקפת העולם, הצוות של מגלן חזר לספרד עם תבלינים יקרים כמו קינמון, ציפורן וזעפרן. במסעותיו (איור 17) הם גילו לראשונה את האלפקות והפינגווינים.



איור 17

מסע התגליות והקפת העולם שערך מגלן עם ציוותו בחמש ספינותיו (משקל ממוצע של 100 טון כל אחת). מתוך 280 אנשי צוות, רק 35 הצליחו להשלים את ההקפה ולחזור בשלום לספרד בשנת 1522. חלק גדול מהם מתו כתוצאה מדלקות חניכיים, רעב ומחלות אחרות. חלק מההוצאות מומנו מהתבלינים שנרכשו בהפלגות ונמכרו במחיר של זהב: גרם ציפורן = גרם זהב (ויקיפדיה, פיטר אוטון). (Good Sea)

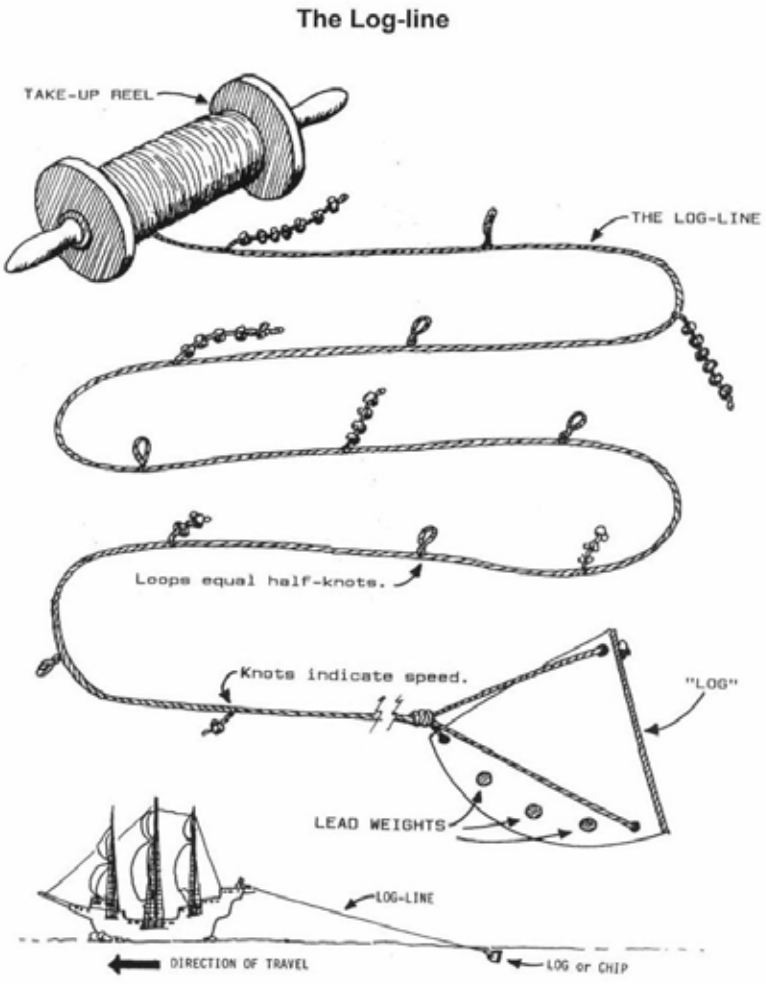
מקור שמו של האוקיינוס השקט

האוקיינוס השקט הוא האוקיינוס הגדול ביותר בכדור הארץ ומכסה כשליש משטחו (32.4%). שטח זה גדול משטח כל היבשות שעל פני כדור הארץ. מגלה הארצות הפורטוגלי פרדיננד מגלן, אשר הגיע לאוקיינוס ב-28 בנובמבר 1520, הוא שכינה אוקיינוס זה "Oceano Pacífico" כלומר שקט, מכיוון שבמרבית נתיב השיט, ממצר מגלן ועד לפיליפינים, היה האוקיינוס שקט. עם זאת, אוקיינוס זה אינו תמיד שקט. סופות טרופיות רבות הולמות באיים שמצויים בו. בארצות שבשולי האוקיינוס ישנם הרי געש רבים, ולעיתים קרובות פוקדות אותן רעידות אדמה. במקרים של צונאמי, נחשול מים המתרומם לגובה רב כתוצאה מרעידות אדמה מתחת לפני הים, נגרמים נזקים כבדים ולעיתים אף הרס ערים שלמות לאורך החופים.

1.2. שיטות מחקר באוקיאנוגרפיה

בתום תקופת התגליות (תחילת המאה ה-16) מספר ההפלגות גדל משמעותית וגבר הביקוש למפות עדכניות ומדויקות יותר כולל מפרצים היכולים לשמש עגינה לספינות. הן הודפסו בכמויות גדולות יותר וכללו את היבשות החדשות והאיים שהתגלו במסעות הגילוי.

חציית האוקיאנוס הצריכה פיתוח של אמצעי ניווט ומדידה מדויקים. בסוף המאה ה-16 המציאו ההולנדים שיטה למדידת מהירות השיוט של ספינות מפרשים על ידי הורדת לוח עץ בצורת רבע עיגול, שהקשת שלו הוכבדה בפס עופרת, כך שיכול היה לצוף במים כשהוא ניצב (איור 18). אל הלוח נקשר חבל מדידה ארוך (log line), ועליו קשרים במרחקים קבועים, שהוכן על סיפון הירכתיים. כדי למדוד את מהירות האונייה, הטילו את לוח העץ למים. הלוח נשאר על מקומו כמעט ללא תנועה בעוד האונייה מתקדמת, ותוך כדי כך הופעל שעון חול והחבל שוחרר למים בהדרגה. את המהירות היחסית חישבו על פי אורך החבל שהשתחרר בזמן שחלף עד התרוקנות השעון. הקשרים נועדו לאפשר מדידה מהירה של אורך החבל ששוחרר למים, היינו הדרך שעברה האונייה. מכאן השם קשר (knot) ליחידות זמן של מהירות בים.



The Log-line in Use

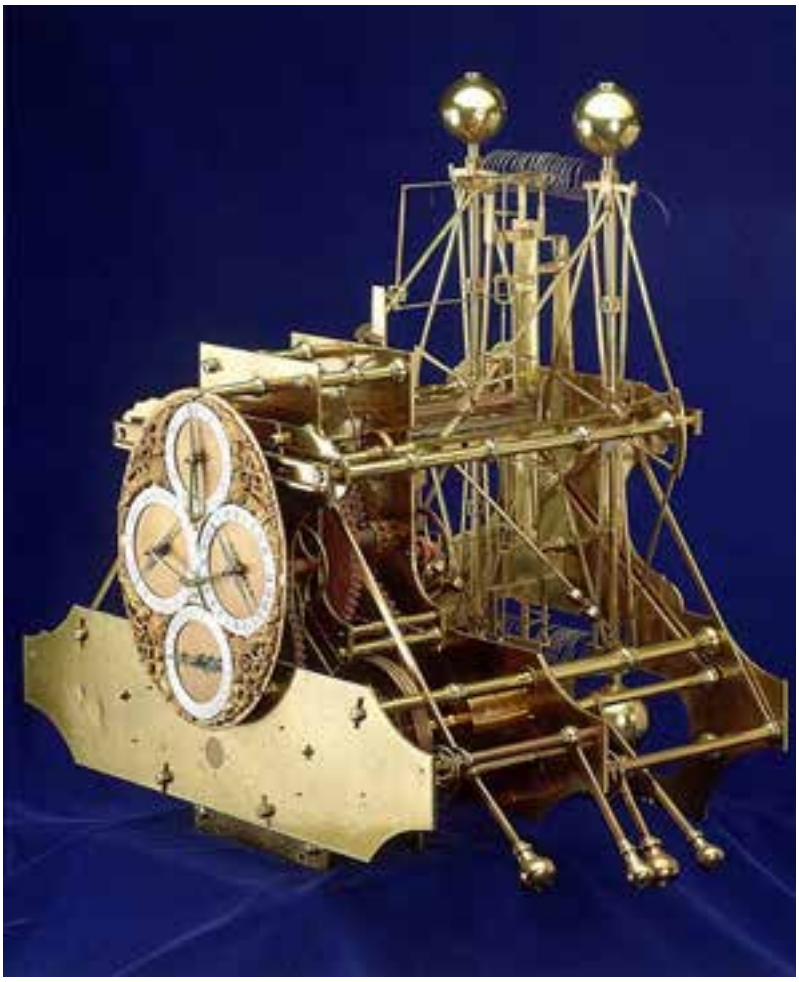
איור 18

מד מהירות ימי קדום (log)

The Pilgrims & Plymouth Colony: (1620

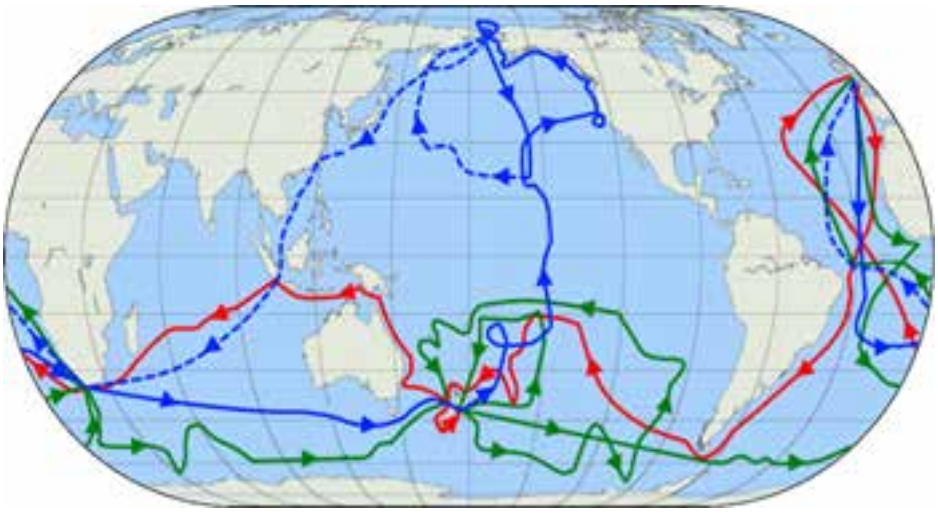
לשם ניווט בים הפתוח (קביעת קו אורך והמהירות) דרוש היה שעון מדויק. ג'ון הֶריסון היה שען בריטי, שתכנן ובנה באמצע המאה ה-18 את הכרונומטר הימי המוצלח הראשון בעולם, שרמת דיוקו הייתה גדולה מספיק למציאת קו האורך בים בהפלגות למרחקים ארוכים (איור 19).

1768-1779 ג'יימס קוק - חוקר בריטי אשר נודע כמומחה בענייני ניווט, שרטוט מפות ואסטרונומיה, שיצא למספר מסעות תגליות שמטרותיהם היו **מחקר מדעי** (איור 20). שעוניו של הריסון היו כבר בידיו של ג'ימס קוק, וב-1768 הוביל קוק משלחת מדעית אל דרום האוקיאנוס השקט כדי לצפות בכוכב הלכת נוגה בחלפו בין השמש לבין כדור הארץ. מאיי טהיטי, שם צפו באירוע, הפליגו בחיפוש אחר היבשת הגדולה. הוא גילה את איי החברה (קבוצת איים געשיים בדרום האוקיינוס השקט הנמצאים תחת שליטת פולינזיה הצרפתית), מיפה את איי ניו זילנד, וחקר את החוף המזרחי של אוסטרליה. במסעו השני (1772-1775) המשיך בחקירת האוקיאנוס הדרומי על הספינה 'רזולושיין', חצה את חוג הקוטב הדרומי, הקיף את יבשת אנטארקטיקה והגיע לקו רוחב 71°10'S. במסעו השלישי ב-1776, יצא לחפש מעבר צפוני מן האוקיאנוס השקט לאוקיאנוס האטלנטי, דרך האוקיאנוס הארקטי, אך נעצר בים ברינג על ידי חומת קרח בגובה 4 מטרים (71°41'N). הוא חזר להוואי, שם ב-4.2.1779 נהרג על ידי ילידים כשניסה להחזיר סירה גנובה.



איור 19

השעון הימי הראשון של ג'ון הריסון (דגם H1)
(המוזיאון הימי הלאומי, לונדון)



איור 20

שלושת מסעותיו של ג'ימס קוק. הראשון מסומן באדום, השני בירוק והשלישי בכחול

המצאת **מנוע הקיטור** במהפכה התעשייתית קיצרה משמעותית את משך ההפלגה של הספינות, חסכה עלויות שכר של ימאים וצמצמה את סיכויי טביעתן. בשנת 1807 הפליגה ספינת הקיטור הראשונה בנהר הדסון, ארה"ב ובשנת 1819 חצתה לראשונה אונייה בשם "סוואנה" המונעת באמצעות קיטור את האוקיאנוס האטלנטי. המנועים הוזנו בתחילה בפחם, ואחר כך בדלק. עוד כמאה שנים עברו עד היעלמותם של המפרשים בספינות הסוחר. בסוף המאה ה-19, החלו לבנות ספינות ממתכת וחומרים סינתטיים, כאשר הברזל והפלדה החליפו את העץ הרבה יותר מהר מהחלפת המפרשים בקיטור.

1820-1855 - האמריקאים החלו תורמים לידע האוקיאנוגרפי. בשל ההגירה ההמונית מאירופה לארה"ב, מספר ההפלגות בין אנגליה לניו יורק גדל משמעותית ושירטוט הזרמים במפה סייע לקברניטים להגיע מהר יותר ליעדם. בסוף המאה ה-18 מיפה **בנג'מין פרנקלין** את זרם הגולף (איור 21) בניסיון להבין מדוע המסע מאמריקה, מזרחה ל**קולוניות** באירופה, מהיר יותר מהמסע בחזרה. בשנת 1847 פרסם האוקיינוגרף **מת'יו מורי** את המפה הראשונה של רוחות וזרמי הים באוקיינוס האטלנטי לאחר שסרק אלפי תרשימים ויומנים של קברניטי אוניות וספינות וקיבץ את המידע שעלה מהם. הוא העריך את כיווניהם ומהירותם של זרמי ים שונים על-פי רמת ההסטה של הספינות ממסלולן הקבוע.

בשנת **1855** פרסם מורי את הספר האוקיאנוגרפי הראשון בעולם בשם: 'גיאוגרפיה פיזית של הים' (Physical Geography of the Sea) שכלל מפות בתימטריות של קרקעית האוקיינוס האטלנטי עד לעומקים של 7,300 מ'. אין ספק שזה היה צעד ראשון וחשוב במחקר האוקיאנוגרפי, צעד שסייע לספינות להפליג למרחקים ללא חשש.

1863-1869 צ'ארלס דארווין יוצא למסע התגליות שלו על גבי הספינה 'ביגל'. אחת ההפלגות החשובות הייתה לאיי הגלפגוס שעליה ביסס את תורת האבולוציה ואחריה כתב את הספר 'מוצא המינים'.

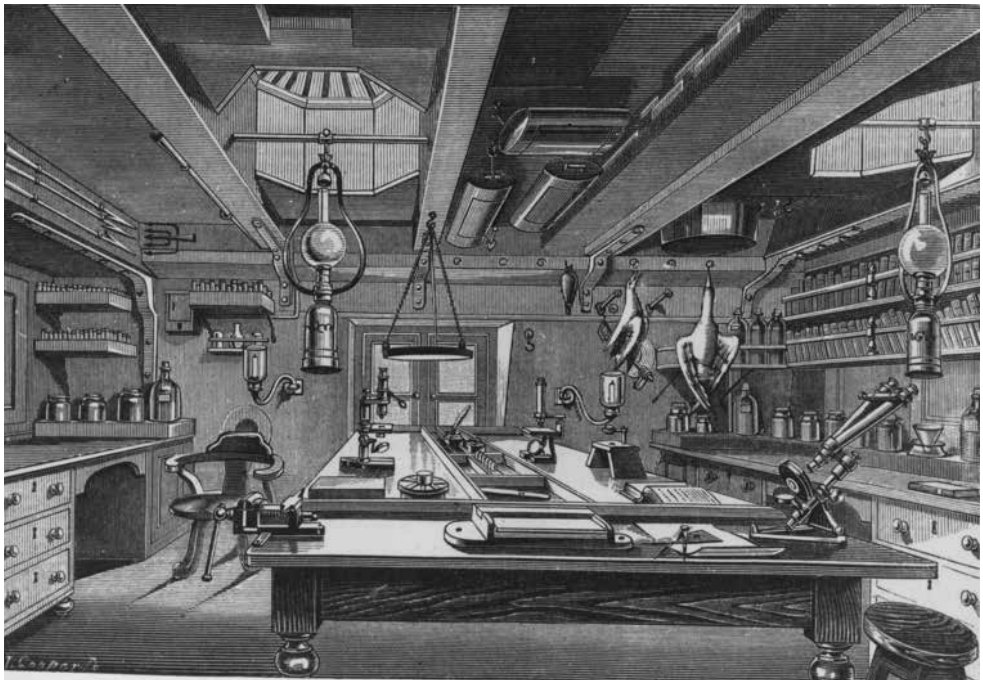
קולוניה
חבל ארץ הנמצא תחת ישות מדינית המרוחקת ממנו גיאוגרפית. חלק ממדינות ארצות הברית, בעיקר אלה שבחוף המזרחי, החלו את דרכן כקולוניות בריטיות.

איור 21

מפת זרם הגולם של בנג'מין פרנקלין (The Electric Ben Franklin)

1873-1876 מסע הצ'לנג'ר - האוקיאנוגרפיה המודרנית החלה למעשה עם מסעה של הצ'לנג'ר (Challenger), ספינת מפרשים וקיטור של בית המלוכה הבריטי, שהיא המפורסמת ביותר בתולדות המחקר האוקיאנוגרפי. המשלחת כללה 243 מדענים ובראשם עמדו ג'ון מארי, אוקיאנוגרף וביולוג ימי קנדי ממוצא סקוטי וצ'ארלס תומפסון, מדען רב תחומי מסקוטלנד. הספינה צוידה במעבדות (איור 22), מיקרוסקופים ומכשור מדעי שתוכנן במיוחד למטרות המשלחת. היא חקרה את האוקיאנוס 3 שנים רצופות ועברה 69,000 מייל ימי. במסעה שהתה ב-362 תחנות אוקיאנוגרפיות ואספה נתונים רבים ומגוונים על מזג האוויר, זרמים עיליים בים, טמפרטורת המים, הרכב המים בעומקים שונים, בעלי חיים ימיים וסלעי המשקע שבים. במהלך המסע נכתבו 29,500 עמודים אשר עובדו בתום 23 שנים ל-50 כרכים המכילים מידע מקיף על כל הנתונים שנאספו.

גלי ההגירה מאירופה לארה"ב גברו והביקוש להפלגות עלה במאות אחוזים ובשנת 1881 בונה חברת הספנות הבריטית 'גיון ליין' ספינה חדישה עם מנוע הקיטור הגדול ביותר שהותקן אי פעם באונייה בשם 'אורגון'. המבערים שלה יצרו 12,000 כוחות סוס שהניעו מדחף עצום בגודל 7 מטרים שדחף את האורגון במהירות שיא של 18 קשרים. באפריל 1884 היא חצתה את האוקיאנוס האטלנטי בשישה ימים בלבד.



איור 22

(למעלה) **צוות ספינת הצ'לנג'ר, 1874** (pinterest)
(למטה) **מעבדה זואולוגית של הצ'לנג'ר** (ניתן להבחין בפוחלצים, מיקרוסקופים ובינוקולר) (UCSanDiego Library Digital Collection)

1896-1893 - פריטיוף ננסן חקר לראשונה את האוקיאנוס הארקטי על גבי ספינת המחקר 'פראם'. הספינה תוכננה כך שתוכל לעמוד בלחץ של גושי הקרח ואכן צפונית לאיי סיביר היא קפאה בתוך מעטה של קרח באוקיאנוס הארקטי. הספינה נסחפה יחד עם הקרחונים עד שפיצברגן ואז הפליגה חזרה לנורבגיה. במסע זה ננסן וצוותו חקרו ודגמו את מי הים בעזרת גליל מיוחד ('בקבוק ננסן') וחזו ביונקים ימיים אנדמיים לאזור. ננסן הוביל את המשלחת שחצתה לראשונה את האי גרינלנד.

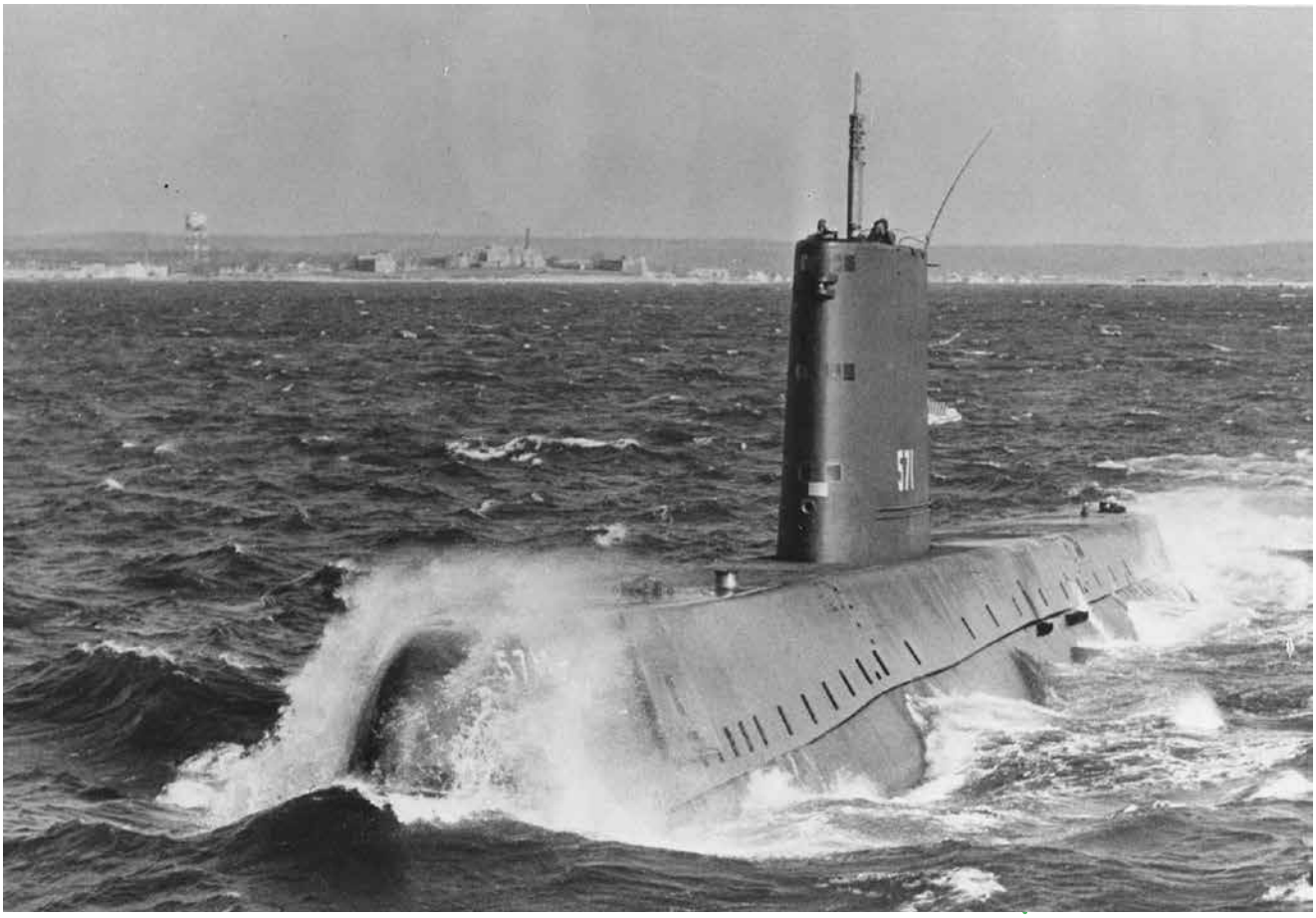
1916-1914 - ארנסט שקלטון, מגלה ארצות בריטי, עמד בראש משלחת מחקר שיצאה לחצות את אנטרקטיקה והצליח להשיב את כל צוות המשלחת בשלום, לאחר שספינתם, ה'אנדיורנס' נכלאה בקרח, התרסקה ושקעה למצולות (איור 23). לבסוף, היה זה רואלד אמונדסן הנורבגי שכבש את הקוטב הדרומי.

איור 23

ארנסט שקלטון בהגיעו ליבשת אנטארקטיקה - ספינת Endurance קיטור ומפרשים תלת תרנים (Britannica)

1927-1925 מסע המטאור - ספינה גרמנית שערכה חקירות מקומיות מעמיקות. המחקר נערך בתחילה בדרום האוקיאנוס האטלנטי שם נלמד האזור באופן יסודי במשך שנתיים. המטאור חצתה את דרום האוקיאנוס האטלנטי יותר מ-12 פעמים ואיסוף הנתונים היה רציף (בכל שעות היממה, בכל מזג אוויר, בכל עונות השנה). נאספו נתונים מ-70,000 קריאות עומק ומדידות אחרות. לצורך מדידת העומק השתמשו במטאור בשיטה האקוסטית (מד הד). בפעם הראשונה התגלה עד כמה מגוונת קרקעית הים: הרים, עמקים, קניונים, מישורים גדולים ועוד.

1958-1957 בשנים אלה נערכו מסעות נוספים בהם נחקרו ביסודיות האוקיאנוס האטלנטי וההודי. באוקיאנוס האטלנטי עסקו אוניה בריטית ושלוש אוניות אמריקאיות בחקירה שיטתית של אוקיאנוס זה מצפון לדרום. הממצא העיקרי ממסעות אלו הוא רכס הרים תת ימי באורך 30,000 ק"מ, שבמרכזו סדק עמוק וארוך במיוחד שממנו בוקע חום ממעבה כדור הארץ. זהו '**רכס מרכז אוקייני**' המהווה גבול בין לוחות טקטוניים בתהליך פתיחה. ממצא זה שינה את התפיסה של הגיאולוגיה התת ימית, מכיוון שהתגלה שגיל הסלעים בהרים הגבוהים הסמוכים לשבר צעיר יותר, וככל שמתרחקים מן הפסגות למדרונות, הסלעים קדומים יותר. מכאן להתפתחות התיאוריה של 'טקטוניקת הלוחות' הייתה קצרה.



איור 24

'נאוטילוס' - כלי השיט הגרעיני הראשון בדרכו לחצות את הקוטב הצפוני תחת כיפת הקרח של האוקיאנוס הארקטי
(NavSource Naval History)

עיקר תוצרי המסע:

- אטלס מודרני שתיאר בצורה יסודית את קרקעית הים (הראשון היה של מתיו מורי).
- גילוי הרכס המרכז אטלנטי, המתנשא 2-3 ק"מ מעל לסביבתו, נמשך לכל אורכו של האוקיאנוס האטלנטי וממוקם בין אירופה וצפון אמריקה ובין אפריקה ודרום אמריקה.

כיום, יש ספינות המונעות בכוח הגרעין, חוסך את תדלוק כלי השייט ופליטה של פחמן. כלי שייט בעל כור אטומי יכול להפליג במשך חודשים ללא עגינה (נושאות מטוסים). האונייה הראשונה המונעת בכוח גרעיני נקראה גם כן "סוואנה", והיא הושקה בשנת 1961. קדמה לה ה"נאוטילוס" (איור 24), הצוללת הראשונה שמונעת בכור גרעיני שייכת לצי האמריקאי, היא הראשונה שהצליחה לחצות את האוקיאנוס הארקטי תחת מעטה של קרח (1958). התפתחות ההנעה של כלי השיט לא פסקה והיום ניתן למצוא צוללות שמונעות במנוע מימן על ידי ריאקציה כימית בין מימן וחמצן הפולטת אנרגיה רבה ללא יצור פחמן מזהם.

כור גרעיני אינו פולט גזי חממה אך עלול להתפוצץ או לדלוף קרינה רדיואקטיבית מיוננת. גם מנוע מימן אינו חף מתאונות קטלניות. כיום מפתחים מנועי מימן לשימוש עתידי בטוח יותר.

כלים ושיטות מדידה אוקיאנוגרפיות - אז והיום

מדידת עומקים

הפלגה בלב ים כרוכה בסיכונים רבים אך כשהספינה חוזרת לכיוון החוף, הסכנה לשלום הצוות לא חלפה עד לקשירתה לרציף. אחת הסכנות לספינה במים הרדודים היא פגיעה בקרקעית או עלייה על שירטון. נתונים על עומק המים לאורך חופי היבשת היו חשובים לכל רב החובל או מחזיק בהגה הספינה. בתחילה נעזרו באיש צוות שאומד את עומק המים בראייה בלבד (עד היום משתמשים בשיטה זו). אחרי כן, החלו לשלשל חבל (מסומן בכל יחידת אורך) המחובר למשקולת עשויה מעופרת כדי לדעת את עומק הקרקעית ('**אנך**'). נתוני עומק הקרקעית היו כה חשובים שהחלו לפתח מכשירים יותר מדויקים.

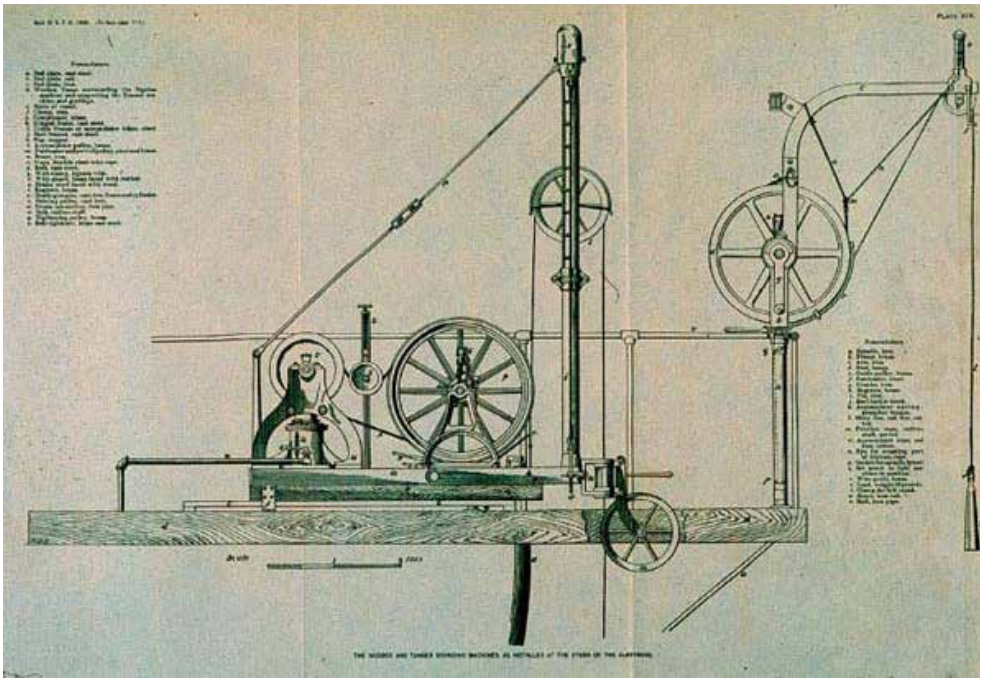
בשנת 1807 תומאס ג'פרסון, נשיאה השלישי של ארצות הברית ומהאבות המייסדים שלה, יזם וחתם על 'חוק הסקר הימי' לאורך חופיה של ארה"ב. כתוצאה מסקרים אלה, נאספו נתונים רבים על גאות ושפל, זרמי גאות ונתוני עומק קרקעית הים לאורך החוף המזרחי. מידע זה הודפס על המפות הימיות וככל ששוכללו מכשירי המדידה, כך יכלו לדייק יותר בנתוני העומק שהודפסו.

מכשיר למדידת עומק על שם סיגסבי (Sigsbee sounding machine)

נקרא על שמו של מפקד ספינת סקר (צ'ארלס סיגסבי), שהחליט בשנת 1874 לשפר את ביצועי מכשיר המדידה הקודם שהומצא על ידי טומסון (Thomson sounding machine) וביצע שינויים בהתאם (איור 25).

איור 25

מדי העומק הראשונים: (מימין) **מד העומק המשוכלל של סיגסבי** (Scripps Institution of Oceanography (Photographs (משמאל) **שירטוט מד העומק של טומסון** (Ocean Exploration)

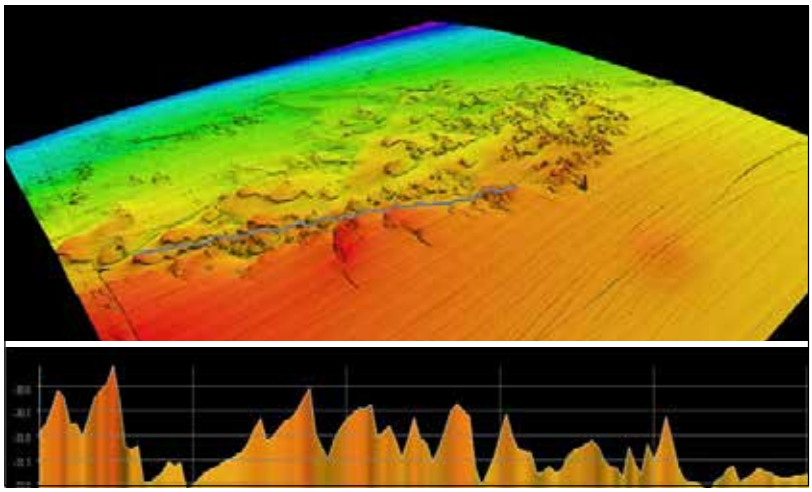


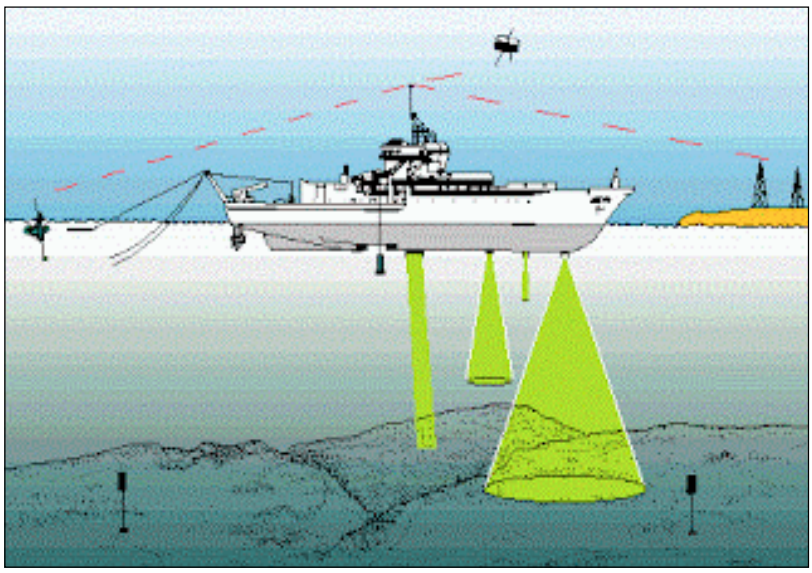
המכשיר המשוכלל היה מדויק יותר (עד לרמה של 1% שגיאה) והרבה יותר מהיר מקודמו. הוא שימש למדידת העומק בספינות למשך 50 שנים הבאות, עד שהומצא 'מד הד' שפועל בעזרת גלי קול. סיגסבי וחבריו פיתחו ושיכללו כלים וציוד נוסף ובשנת 1880 פרסמו ספר שכלל את שיטות המחקר החדשות (Ewing, 1959).

מד הד (echosounder)

השימוש בצוללות במלחמת העולם הראשונה תרם להמצאת ציוד וכלי מחקר אוקיאנוגרפים. המכשיר שהומצא על ידי הגרמנים כולל משדר ומקלט המצויים בתחתית הספינה (ראה 'מטאור'). הנתונים מתקבלים כתוצאה משידור גלי קול מהמכשיר וקליטת גלי הקול המוחזרים מהקרקעית. הזמן הדרוש לקול לחזור למקלט מתורגם לעומק והנתונים מוצגים על המסך כולל תוואי קרקעית הים (איור 26). בתדרים שונים, חודרים גלי הקול גם אל תוך הקרקעית ונותנים מדד לסוג החומר ממנו הקרקע מורכבת (סלע, חול, עצם בולט).

למידע נוסף על ההיסטוריה של מדידת העומקים והשימוש בשיטות הסונאר השונות בקישור הבא.



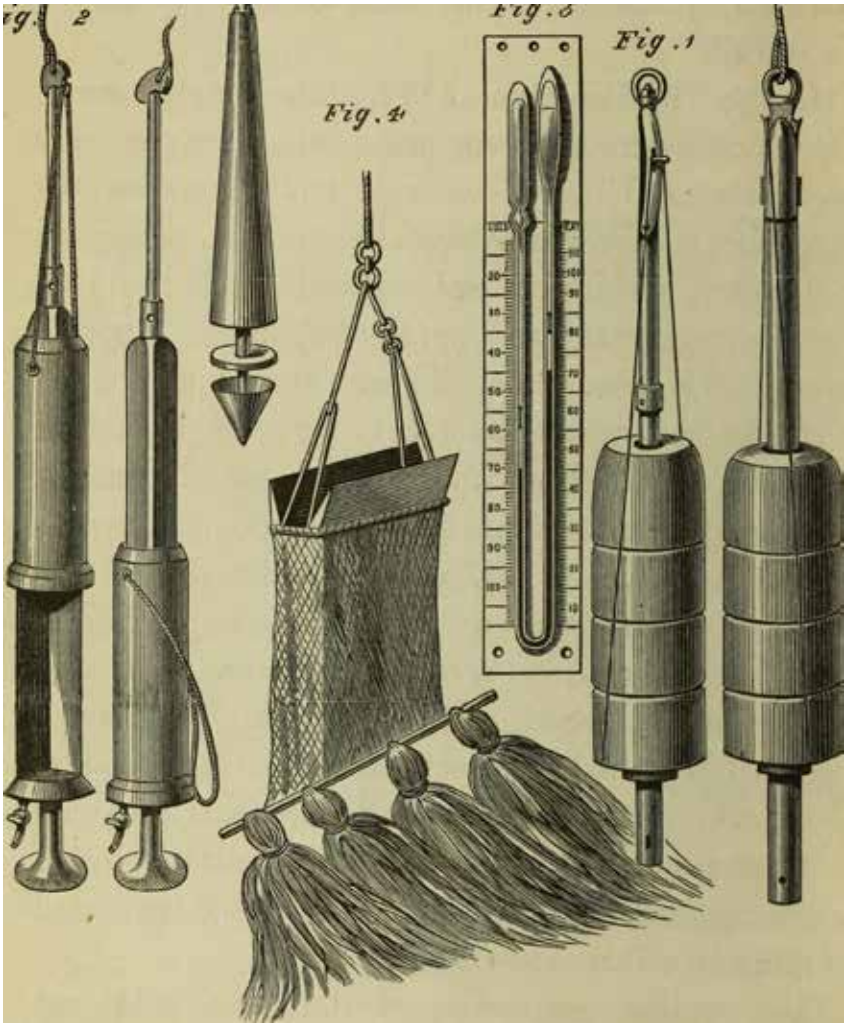


איור 26

(למעלה) **הדמיה של מבנה קרקעית הים באמצעות שימוש במד הד** (למטה) מערכת **המשתמשת בגלי קול תת-מימיים משודרים ומוחזרים כדי לזהות ולאתר עצמים שקועים או למדוד את המרחק מתחת למים. בוועדת האוקיינוס השנייה של האו"ם, שהתקיימה בחודש יוני 2022, עדכנו החוקרים כי כ-10 מיליון קמ"ר של נתונים בתימטריים חדשים נוספו בשנה האחרונה והביאו לכך ש**כרבע מקרקעית כל האוקיינוסים ממופה.

דיגום קרקע

כחלק ממיפוי הקרקעית, נלקחו גם דגימות קרקע שסיפקו נתונים על סוג החומר ממנו מורכבת הקרקעית, החי והצומח עליה ובתוכה, ריכוז חומר אורגני בסדימנטים ובהמשך גם תהליך שיכוב הסדימנטים על הקרקע. בעבר, הדרך לדגום את קרקעית הים הייתה בעזרת משקולת משומנת שהייתה מדביקה חול לשומן. אם המשקולת הייתה נטולת חול, הם היו מחפשים מקום אחר לדגום. במאה ה-19 דיגום הקרקעית היה מפותח יותר. צוות הצ'לנג'ר למשל, השתמש באמצעים שונים כגון שק איסוף. באיור 27 ניתן לראות כלים שונים שדגמו את הקרקעית וכן מד טמפרטורה אשר שמר על טמפרטורת המים גם עם עליית המדחום לסיפון (1876). ספינת הצ'לנג'ר גילתה מינים רבים שלא היו ידועים עד אז. עושר מינים של יצורים, מצביע על מערכת אקולוגית בריאה.



איור 27

שיטות ישנות לדיגום קרקעית הים, מתוך יומני ספינת הצ'לנג'ר

Woods Hole) Oceanographic (Institution

איור 28

דגימות קרקעית שונות שנאספו מאזור הגאות והשפל: סדימנט גס (A) בינוני (B) דק (C) ובוצי (D) עם יצורים החיים בתוכם או בסמוך אליהם
(Aylagas et al., 2016)

כיום משתמשים לדיגום הקרקע במגוון רחב של שיטות וציוד, בהתאם לעומק המים, סוג ונפח הדגימה הנדרשת, עומק שכבת הדיגום הדרושה ומאפייני הקרקע (איור 28). ישנם 3 סוגים עיקריים של כלים לדיגום הקרקע:

כלים ידניים - טכניקה המסתמכת על החדרה ידנית של מכשיר הדגימה לקרקע על ידי צוללן או רובוט (ROV) (איור 29)

איור 29

כלים ידניים לדיגום קרקעית (A) כפות (B) מקדח דלי (C) צינור גלעין ידני (Tuit and Wait, 2020)

איור 30

כף מחפר (University of Maryland, Center for Environmental Science)

מחפרים - כלים המורדים מספינה (איור 30) ומתאימים לדגימות רדודות יחסית (3-30 ס"מ) בעומק הקרקע, בעלות נפח דגימה גדול (0.5-0.75 ל').

צינור גלעין - משמש כאשר נדרש פרופיל אנכי מפורט של השכבות השונות המרכיבות את הקרקע ולעומק רב יותר מהכלים הידניים ומהמחפרים (איור 31). לאנימציה המדגימה את הדיגום בעזרת צינור גלעין לחץ כאן.

איור 31

(מימין) **צינור גלעין ידני** (Elsevier) (משמאל) **שימוש בצינור גלעין בצוללת לא מאוישת (ROV)** (University of Bergen) (למטה) **צינור גלעין מכאני** (OceanInstruments)

דיגום מים

דגימות בעמודת המים חיוניות כדי לקבל 'תמונה' של הגורמים האביוטיים שמצויים בשכבות המים השונות, כגון מליחות, טמפרטורה, לחץ הידרוסטטי וריכוזי מומסים. לשם כך יש צורך בשיטות דיגום שמצליחות לבודד את המים מהעומקים השונים.

'**בקבוק ננסן**' הומצא על ידי פריטיוף ננסן הנורבגי (איור 32). הבקבוק הנקרא על שמו, עשוי מגליל מתכת או פלסטיק, מורד על כבל כשהוא פתוח לכניסת המים מכיוונו התחתון. לאחר שהגיע לעומק הרצוי, מורידים על הכבל משקולת אשר עם פגיעתה בבקבוק היא גורמת להפיכתו ולסגירת מכסה קפיצי הכולא את המים שנאספו בעומק הים. לאחר מכן ומעלים את הבקבוק עם דגימת מים מהעומק הנבחר (איור 33).

איור 32

פריטיוף ננסן ליד ספינת המחקר 'פראם' בדרך לקוטב

איור 33

מלח המחזיק בקבוק ננסן (ויקיפדיה)

איור 34

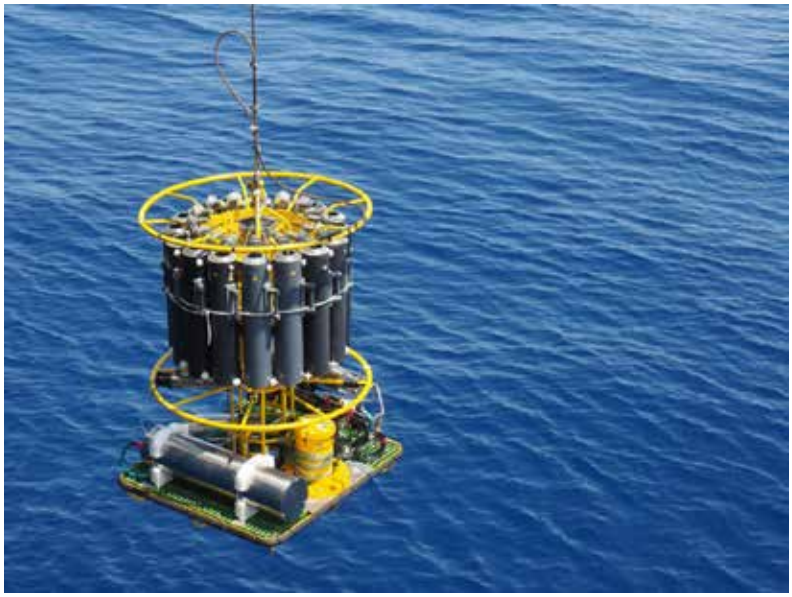
(מימין) **בקבוק ניסקין במצב פתוח** (ויקיפדיה)

איור 35

(משמאל) **'רוזטה' עם 20 בקבוקי ניסקין במצב סגור** (University of Miami)

כיום דוגמים מים בעזרת 'בקבוק ניסקין' אשר פותח מבקבוק ננסן (איור 34). נהוג להוריד בקבוקי ניסקין למים מספינות מחקר, על גבי מתקן מעגלי (רוזטה, איור 35) אשר נושא עליו מספר רב של בקבוקי ניסקין ומאפשר דיגום מים מעומקים שונים בהורדה אחת של המתקן. הפקודה לסגירת הבקבוקים נעשית מהסיפון בעזרת כבל אלקטרוני המחובר למתקן.

מכיוון שנתונים כמו לחץ הידרוסטטי, ריכוז חמצן, מליחות וטמפרטורה עלולים להשתנות עם העומק, ניטור פרמטרים אלו מתבצע בעזרת מכשיר **CTD** (Conductivity, Temperature, Depth) - גליל מתכת המכיל בתוכו חיישנים נפרדים לכל פרמטר ומחובר בכבל נתונים למחשב הספינה. מכשיר ה-CTD מוצמד לרוזטה (איור 36) ובצורה זו יכולים המדענים לעקוב אחר מאפייני המים בזמן אמת.



איור 36

רוזטה משולבת ב-CTD (Conductivity, Temperature, Depth) (STS Sensors)

מעבר לנתונים שמתקבלים מעמודת המים, קיימים גורמים אביוטיים נוספים המשפיעים על הים כמו זרמים. לזרמים יש השפעה מכרעת על נתיבי שייט. מתיו מורי הבין את חשיבות הנושא וחקר אותם לעומק ובשנת 1847 פרסם את מפת זרמי הים של האוקיינוס האטלנטי - כלי עזר שזכה לאהדה בקרב ימאים מכיוון שפענח את סוד האוקיינוסים וקיצר משמעותית את זמני ההפלגה. כיום, למידת הזרמים חשובה גם להבנה של נדידת פלנקטון, פיזור כתמי נפט ועוד. לאורך החוף קיימים גם זרמים שעלולים לגרום לטביעת אנשים כגון זרמי פריצה (rip current).

מדידת זרם

בעבר נהגו למדוד את כיוון ומהירות הזרם בפני המים באמצעות השלכה למים של מצופים המחוברים לחבל, ומעקב אחר תנועתם לצד הספינה. המדידה הייתה איכותית בלבד.

עם התפתחות הטכנולוגיה, החלו אוקיינוגרפים להשתמש ב**מדי זרם מכאניים** שהורדו למים והזרמים היו מסובבים מדחף (רוטור) ומספקים נתונים לגבי מהירות וכיוון הסיבוב.

כיום עובדים עם מכשירים מתוחכמים יותר:

מצופים המצוידים בטכנולוגית **GPS** (Global Position System) או בתקשורת לוויינית, המשדרים נתונים לספינת המחקר או לתחנת חוף ומתורגמים לכיוון הזרם ומהירותו (איור 37). ניתן גם להשקיע מערכים אלו לעומקים מסוימים, לפרקי זמן קבועים מראש, למדידה רציפה וארוכה של זרמי ים. נתוני הזרם והמיקום של המערך ישלחו עם עלייתו לפני המים.

איור 37

מד זרם נסחף

Nutmeg Sailing)

(Society

איור 38

מד זרם אקוסטי (ADCP) (NOAA)

כמו כן, קיים **מד זרם אקוסטי** (**ADCP**, Acoustic Doppler Current Profiler) שנגרר על ידי סירה או מוצב על קרקעית הים (איור 38). מד זרם זה משדר גלי קול המוחזרים על ידי חלקיקים במים. גלי הקול החוזרים מתורגמים על ידי מתמר למהירות תנועת המים. מספר אלומות שמשודרות בו זמנית לכיוונים שונים, יספקו גם את כיוון הזרם.

אוקיאנוגרפים רבים משתמשים גם ב**אנטנות רדיו ורדארים** למדידת זרמי אוקיינוס על פני השטח. בדומה למד ה-ADCP, משתמשות תחנות חופיות אלו באפקט דופלר כדי למדוד את מהירות הזרם, או כדי לקבוע מתי נעים זרמים לכיוון החוף, או ממנו אל עבר הים הפתוח.

דיגום פלנקטון

חברת הפלנקטון ממלאה תפקיד חיוני בהעברת אנרגיה וחומר בסביבה הימית. בשל מיקומם המרכזי במארג המזון הימי, משפיע הפלנקטון ישירות על הביומסה ותהליכי הבקרה מרמת היצרנים ועד טורפי העל ומכאן נובעת החשיבות שבניטורם. ניטור של חברת הפלנקטון כולל ביומסה, שפע, פיזור ומגוון ביולוגי ותפקודי בעמודת המים.

אפקט דופלר

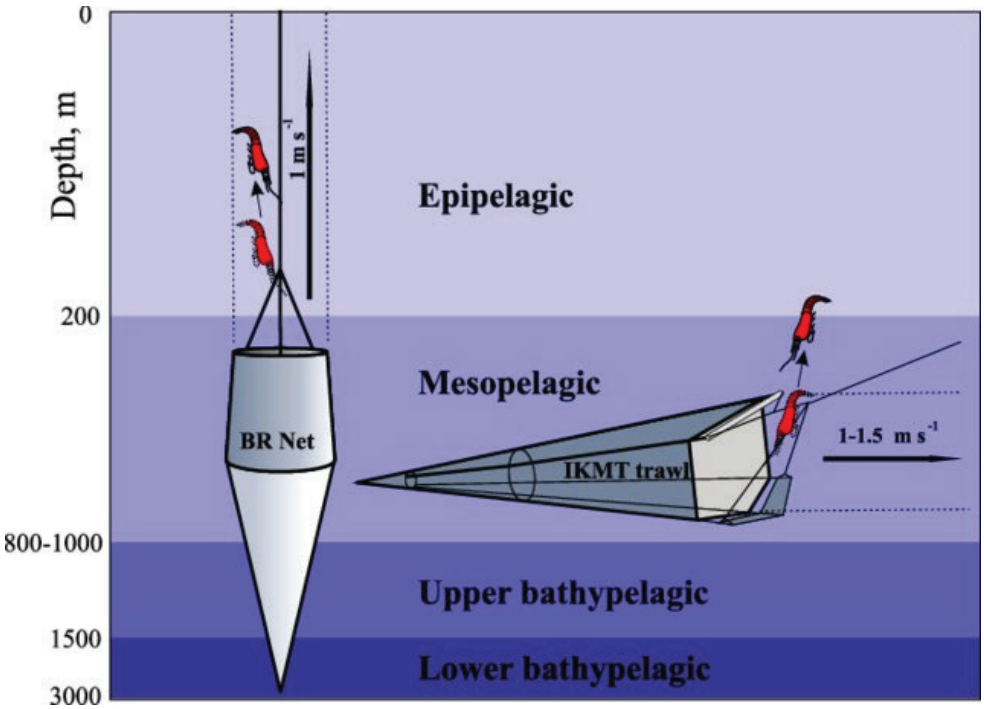
שינוי בתדירות הגל עם השינוי במרחק ממקור ההפרעה, בדומה לשינוי בקול סירנה שאנחנו שומעים ברחוב: אנו שומעים את הצליל מתקרב אלינו בטונים גבוהים, וכשהיא חולפת על פנינו הטונים נהיים נמוכים יותר. התופעה מתרחשת לא רק בגלי קול אלא גם בגלי אור וגלים אלקטרומגנטיים

הדגימות מתבצעות באמצעות רשת מחוררת בעלת כוסית איסוף בקצה. עיני הרשת (החורים) בעלי גדלים שונים בהתאם לגודל האורגניזמים אותם נרצה לנטר (איור 39). פיטופלנקטון (פלנקטון צמחי) נדגם ברשת צפופה יותר מאשר זואופלנקטון (חי). ניתן לגרור רשת פלנקטון בצורה **אופקית**, תוך כדי הפלגה במהירות נמוכה, לדיגום שכבת מים באזור מסוים, או בצורה **אנכית**, עד לעומק מאות מטרים, לדיגום חברת הפלנקטון לעומק עמודת המים בנקודה ספציפית (איור 40). דיגום אנכי מתבצע כאשר ספינת המחקר עומדת במקום.

כיום קיימות טכנולוגיות שונות בשלבי פיתוח, המבוססות על צילום ופענוח תמונה, אשר יאפשרו זיהוי ומדידה של פלנקטון מתחת לפני המים בזמן אמת.

איור 39

רשת פלנקטון באורך 2 מטרים עם גודל חורים 236 מיקרון (כרבע מילימטר)
(Ocean Explorer)

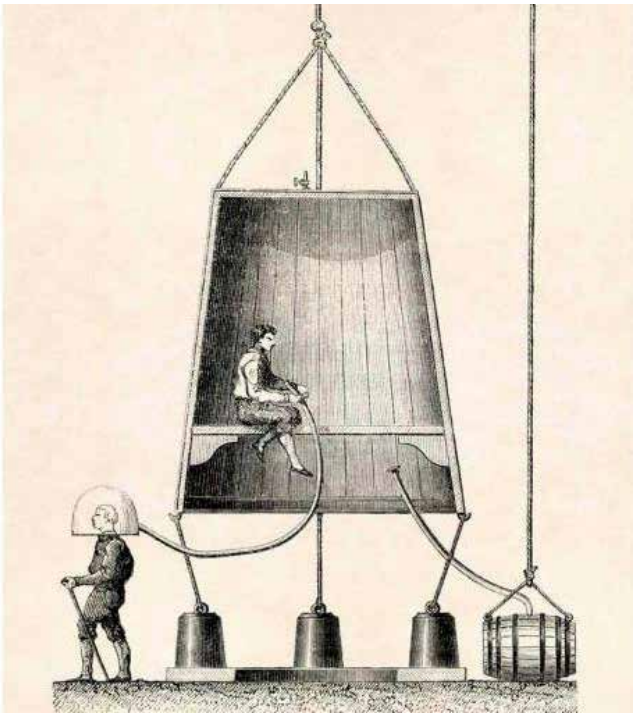


איור 40

גרירה אופקית (מימין) **וגרירה אנכית** (משמאל) **של רשת פלנקטון** (Vereshchaka et al., 2019)

הצלילה ככלי מחקר

הצלילה החופשית קיימת מאז פנה האדם אל הים ואל קרקעית הנהרות כדי לחפש בהם את מזונו ועם התפתחות הציוויליזציה שימשה הצלילה גם לשליית פנינים. בכל השנים הללו נעזר האדם רק בריאותיו לצלילה. כפי שנכתב בתחילת הפרק, האזכור הראשון למכשיר עזר לצלילה מופיע בכתבי אריסטו (332 לפנה"ס), אז צלל לקרקעית אלכסנדר מוקדון, תלמידו של אריסטו, ב**פעמון צלילה**, כשאנשיו מספקים לו אוויר בחביות. השימוש בפעמון הצלילה הפך פופולרי לשם שליית חפצים מן המעמקים ובהמשך גם לצרכים צבאיים. לקראת סוף המאה ה-17 חלה התקדמות משמעותית במחקר של תנאי הלחץ במעמקים והשפעותיהם על הצולל ובשנת 1690 בנה האסטרונום הבריטי המפורסם אדמונד האלי (Halley) פעמון מעץ שצויד במשקולות עופרת ובחביות עם אספקת אוויר טרי. בעזרת הפעמון ירד האלי לעומק של 18 מטר ושהה בו תשעים דקות (איור 41).



איור 41

פעמון צלילה שפותח על ידי אדמונד האלי (ERCH2014)

הצלילה בעזרת הפעמון הצליחה למדי, אבל חוקרים וממציאים רבים ניסו ליצור מכשור מתקדם יותר לצלילה. ב-1715 בנה ג'ון לטברידג' מתקן בצורת גליל באורך 1.85 מ' שבקצהו אשנב זכוכית (איור 42). הגליל יועד לצולל ששכב בתוכו כשפניו מביטות מטה דרך האשנב וידיו נתונות בתוך שרוולים מיוחדים, כדי שיוכל לבצע עבודות שונות. הצולל הורד לקרקעית בצינור כשמפוח מזרים אליו אוויר מפני השטח. לטברידג' ביצע עבודות שונות עם המתקן במקומות שונים בעולם, משך שנים רבות. בעיקר התמחה בצלילות לאוניות טרופות בשירותן של חברות ספנות שונות.

איור 42

מכונת הצלילה של לטברידג' (NOAA)

איור 43

צלילת מכשירים - SCUBA (גל ביסמוט)

הבאה בתור היתה **קסדת הצלילה** שניזונה מאוויר שזרם אליה דרך צינור מפני השטח באמצעות מפוחים, אולם ההתקדמות המשמעותית נעשתה בשנת 1943 כשז'אק קוסטו פיתח עם חבריו המהנדסים את ווסת הצלילה הראשון המאפשר נשימה מתחת למים. חשיפת גופנו לסביבה שהלחץ בה הולך ועולה עם הגדלת העומק, שימוש בתערובת גזים לנשימה מתחת למים, גרימת נזק גופני והתפתחות מחלות צלילה, חשיפה לקור ואיבוד חום גוף, כל אלה מצריכים ידע רב והבנה מעמיקה של המגבלות ותפקוד גופנו מתחת למים. גורמים אלה ואחרים סיכנו את הצוללים והביאו להתפתחות 'רפואת הצלילה' מחד ושיכלול ציוד הצלילה מאידך (איור 43). בעשורים האחרונים, חלה התקדמות משמעותית עם הצטברות הידע והניסיון הרב בנושא. כמו כן, פותחו תאי לחץ משוכללים לצד שימוש ברפואה היפרברית (Hyperbaric).

העומק הממוצע של האוקיינוסים הוא מעל 3,600 מ' ומחקר בסביבה זו המאופיינת בלחץ גבוה, קור קיצוני והיעדר אור, הוביל בסופו של דבר לפיתוח צוללות המחקר אשר מתעדות ואוספות מידע מעמודת המים ומקרקעית האוקיינוסים.

איור 44

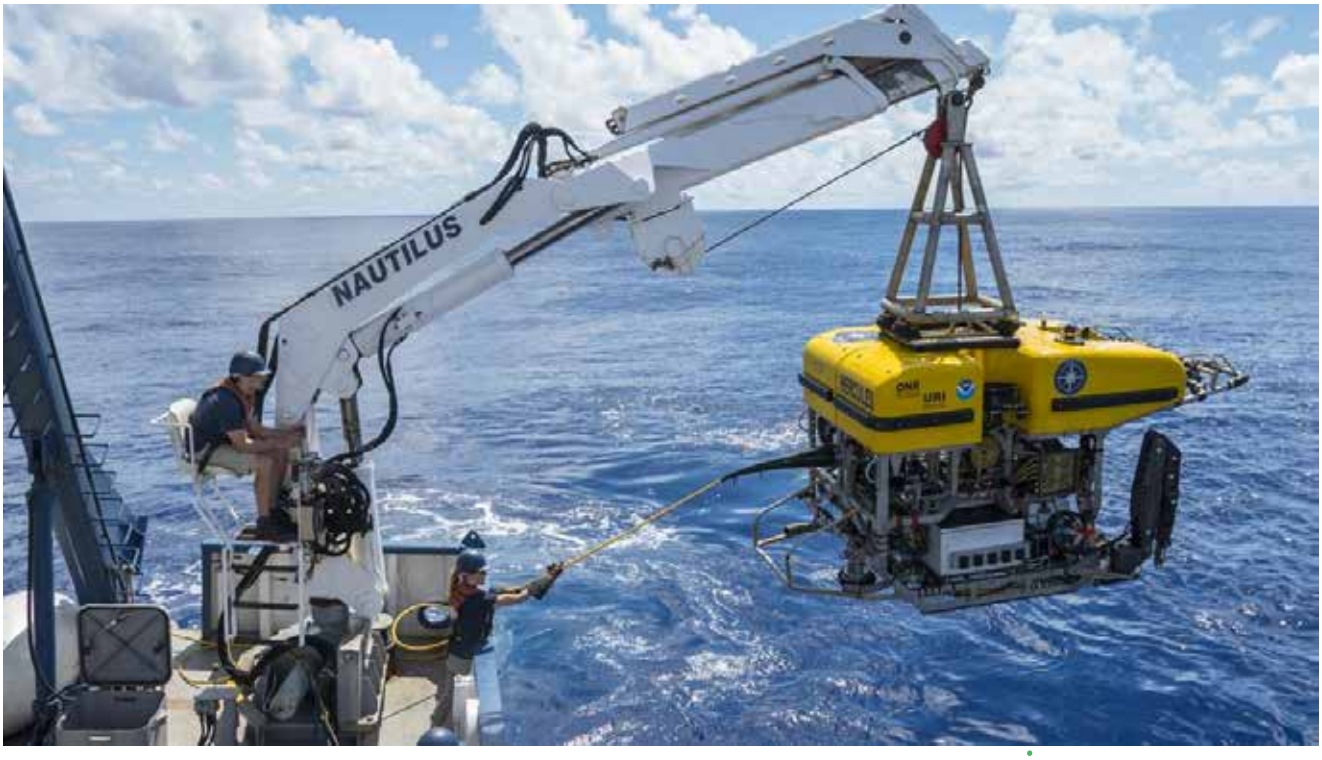
הצלילה המאוישת הראשונה אל שקע מריאנה בוצעה באמצעות הבתיסקף 'טריאסטה' של צי ארצות הברית ב-23.1.1960, הצוללנים היו הקצין דון וולש וחוקר המעמקים המפורסם ז'אק פיקאר. הם הגיעו לעומק של 10,916 מטרים, לחץ המים היה סביב 1,090 אטמוספירות. להפתעתם, גם בעומק העצום התגלו להם יצורים חיים ובהם דגים וחסילונים וכן יצורים פולטי אור. (wikimedia)

כיום פועלים בשירות המחקר הימי שלושה סוגים עיקריים של צוללות:

צוללות מאוישות (HOVs - Human-Occupied Vehicles) - מובילות צוות קטן של מדענים וטייסים ישירות לקרקעית הים למשך זמן מוגבל (איור 44). בדומה לצוללות האחרות, רכבי HOV מצוידים בכלים כגון אורות, מצלמות, חיישנים, זרועות מניפולטור ומכשירי איסוף. עם זאת, HOVs ייחודיים ביכולתם להביא את העיניים והידע של המדען עצמו לעומק של אלפי מטרים מתחת למים כדי לחקור, לצפות, לאסוף דגימות ולערוך מחקר ממקור ראשון (איור 45).

איור 45

צוללת מחקר מאוישת מודרנית (BIRNS)



איור 46

צוללת בלתי מאוישת 'הרקולס' של ספינת המחקר 'נאוטילוס' (Nautilus Live)

צוללות בלתי מאוישות המופעלות מרחוק (ROVs - Remotely Operated Vehicles) - רובוטים תת-מימיים המחוברים לספינת המחקר ומשמשים לסקרים, מחקר ואיסוף תמונות בעמוד המים ובקרקעית הים. הרכבים התת-ימיים מופעלים על ידי צוות מיוחד הממוקם על ספינת המחקר ומרביתם יכולים גם לאסוף דגימות באמצעות זרוע המופעלת על ידי טייס; ניתוח מאוחר יותר של דגימות אלה יכול לחשוף עוד יותר על קרקעית הים (איור 46).

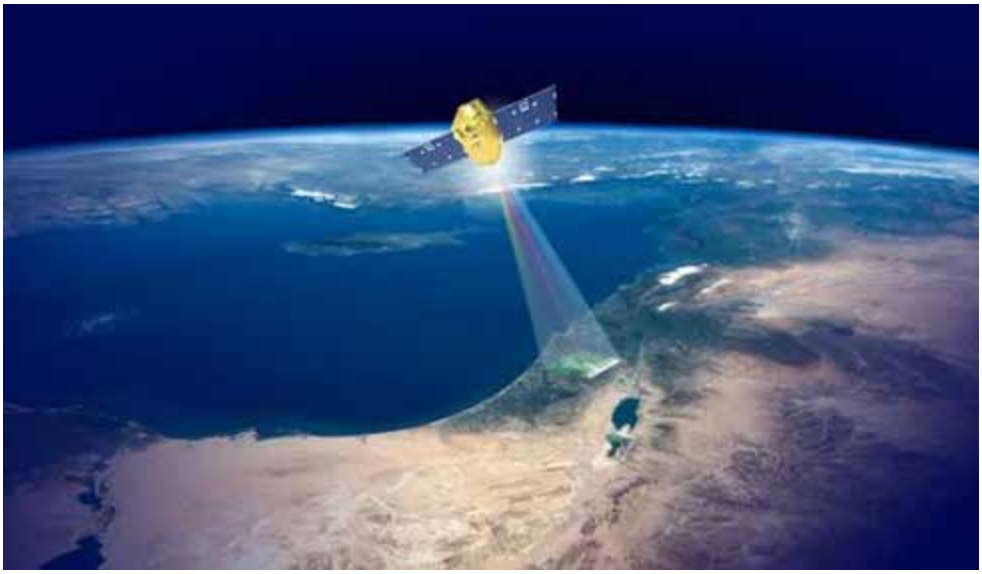
רכבים תת-ימיים עצמאיים (AUVs - Autonomous Underwater Vehicles) - רובוטים מתוכנתים מראש שיכולים להיסחף, לצלול או לגלוש באוקיינוס ללא שליטה בזמן אמת על ידי מפעילים אנושיים (איור 47). רכבי AUV אוספים נתוני חיישנים ברזולוציה גבוהה, המספקים מידע מפורט לחוקרים. לאחר הפריסה, פועלים רכבים אלו בעצמם, מונחים על ידי מסלול מתוכנן מראש, המאפשר למדענים לבצע מחקרים אחרים בזמן שה-AUV סוקר את פני השטח או בעומק האוקיינוס. רובוט זה יכול להגיע לעומק 3,000 מטרים ולצלם את הקרקעית, לגלות אתרי קינון של יצורים ימיים, נביעות גז מתאן (CH_4), פחמן דו חמצני ועוד. כמו כן, ניתן להוסיף לו סונר וחיישנים נוספים.

איור 47

AUV רובוט אוטונומי בעל חיישנים לאיסוף נתונים מעמודת המים (MBARI)

לווייניים

המחקר הימי משתמש גם בנתונים הנאספים בחישה מרחוק באמצעות לווייניים. נתונים אלה מספקים מידע חשוב על האטמוספירה והאוקיאנוסים, אשר כידוע יש להם השפעה הדדית אלה על אלה. לדוגמא, התפתחות של סופה טרופית מעל אוקיאנוס מסוים ואזהרת תושבי אזורי החופים הסמוכים. כמו כן, לווייניים יכולים לאתר ריכוזי כלורופיל בים (מעידים על יצרנות ראשונית מוגברת), כתמי נפט שמתקרבים לחופים ולהתריע בהתאם. ב-2017 סוכנות החלל הישראלית הייתה שותפה בשיגור הלוויין 'ונוס' המסייע באיסוף נתונים סביבתיים עקב משבר האקלים (איור 48). לווייניים משמשים גם להעברת נתונים בזמן אמת ממדים סיסמיים בקרקעית הים (איור 49), המתריעים על רעידות אדמה אשר עלולות להוביל לגלי צונאמי.



איור 48

לוויין ונוס, ניטור אחר שינויים סביבתיים על ידי רזולוציה ספקטראלית (סוכנות החלל הישראלית)

איור 49

הנחת סייסמומטר על קרקעית הים (Physics Today)

ניתן לקרוא עוד ולהתעדכן בשיטות המחקר הימי השונות באתר NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)

מקורות לפרק זה

Aylagas, E., Mendibil, I., Borja, A and Rodríguez-Ezpeleta, N. 2016. Marine Sediment Sample Pre-processing for Macroinvertebrates Metabarcoding: Mechanical Enrichment and Homogenization. Frontiers in Marine Science 3: 203.

Chavez, F.P., M. Min, K. Pitz, N. Truelove, J. Baker, D. LaScala-Grunewald, M. Blum, K. Walz, C. Nye, A. Djurhuus, R.J. Miller, K.D. Goodwin, F.E. Muller-Karger, H.A. Ruhl, and C.A. Scholin. 2021. Observing life in the sea using environmental DNA. Oceanography, 34(2): 102-119.

Ewing, M. 1959. “Significance of the Worzel Deep Sea Ash”. Proceedings of the National Academy of Sciences. 45 (3): 355–361.

Tuit, C. B. and Wait, A. D. 2020. A review of marine sediment sampling methods. Environmental Forensics. 21(3-4): 291-309

Vereshchaka, A. L., Lunina, A. A. and Sutton, T. T. 2019. Assessing Deep-Pelagic Shrimp Biomass to 3000 m in The Atlantic Ocean and Ramifications of Upscaled Global Biomass. Scientific Reports 9(1), 1-11.

Zollner F. and Johannes, N. 2019. Leonardo: The complete paintings and drawings, Taschen.

אוטון, פ. 2010. מסעות ששינו את העולם, נהרי א., עורך מהדורה עברית, מטר הוצאה לאור בע”מ

אלעזרי, י. 2017. תולדות העולם בציטוטים, הוצאת כנרת זמורה-דביר.

אקרמן, ג. 2000. מבט חדש על האוקיינוסים. נשיונל גיאוגרפיק 112-29:89.

ארנסון, ש. 1995. הים המכותר, משרד הבטחון.

בן אברהם, צ. 1985. שיטות המחקר בים, שם, עמ’ 34-25.

גלילי, א. תירוש, ר. 2009. שביל הרכס בעתלית, מדריך סיור על רכס הכורכר בעתלית. בהוצאת עמותת כחול וירוק לאיכות הסביבה.

הרמן, צ. 1985. הים ומעמקיו, הוצאת הקיבוץ המאוחד, החבל הימי לישראל

כהן, י ופופר, ד (ע’). 1996. ”בפתח הקורס”, אוקיאנוגרפיה, יחידה 1 - האדם והים. האוניברסיטה הפתוחה.

להן, י., אמיתי, י. ואפרתי, ש. 2013. ניטור לווייני של הים התיכון. הוד הים (2014), עורכת נגה סטמבלר, עמ’ 90-77.

מטבייביץ', פ. 2001. הפלגה ים תיכונית, ידיעות אחרונות ואוניברסיטת תל אביב.

רבן, א. 1987. כלי-שיט טבועים ומטעניהם, ארכיאולוגיה ימית- פרקי מבוא, אוניברסיטה משודרת.

שביט, י. 2004. אנתולוגיה ים תיכונית, ידיעות אחרונות ואוניברסיטת תל אביב.

מקורות מידע נוספים

אתר הטבע היפה בישראל, שפתיחתו לציבור "עלולה לפגוע בביטחון המדינה" / משה גלעד, הארץ 10.7.2016

2. היסטוריה במעמקים: הספינות העתיקות שטבעו מול חופי ישראל / נטע נסים, ynet 4.6.2021

3. ההיסטוריה של הצלילה, אתר ההתאחדות הישראלית לצלילה

4. https://www.noaa.gov/

5. https://www.loc.gov/item/08004241/

6. https://www.marinebio.org/creatures/tools/

7. https://www.marinetech.haifa.ac.il/ocean-instruments

8. https://oceanexplorer.noaa.gov/technology/technology.html

9. https://www.space.gov.il/

10. https://davidson.weizmann.ac.il/online/maagarmada/physics

11. https://celebrating200years.noaa.gov/rarebooks/deep_sea/gallery.html

2

התהוות האוקיאנוסים

מתוך ספר הלימוד 'כדור הארץ והסביבה'

2.1 מבנה כדור הארץ

מערכת השמש, שכוכב הלכת כדור הארץ הוא חלק ממנה, נוצרה לפני כ-4.6 מיליארדי שנים. מקורה של מערכת השמש ב**ערפילית** קדומה שחלקיה המוצקים החלו להתנגש אלה באלה ולהתלכד. בשלב מסוים החלה הערפילית להסתובב סביב עצמה ולהידחס סביב מרכז הכובד שלה עד שהפכה ל**כוכב** המייצר כמויות אדירות של אנרגיה - השמש. סביב השמש נותרו גופים גדולים של חומר, המורכבים משאריות האבק והגז של הערפילית. **כוח הכבידה** גרם לגופים אלה להתלכד וליצור גושי חומר גדולים, שהלכו ונדחסו עוד ועוד. גושי חומר אלה הפכו ל**כוכבי הלכת** ו**לירחים** המקיפים את השמש. אחד מגושי החומר הפך לכוכב הלכת ארץ. כיצד? לפני כ-4.6 מיליארדי שנים, גוש החומר הראשוני, שהיה מורכב מתערובת של חומרים שונים וביניהם ברזל בשיעור גבוה, עבר תהליכי דחיסה שגרמו להתחממותו ולהתכתו, והטמפרטורה הממוצעת שלו הייתה 1,000°C. בהמשך התעצם כוח הכבידה, תהליכי ההתכה, הדחיסה וההתחממות גברו, וכחצי מיליארד שנים אחר כך עלתה הטמפרטורה הממוצעת שלו לכ-1,500°C. אחרי חצי מיליארד שנים נוספות עלתה עוד הטמפרטורה - לכ-2,000°C. בשלב זה החלו לשקוע אל החלק הפנימי של כדור הארץ ההולך ונוצר החומרים הכבדים (ובעיקר הברזל, שמשקלו הסגולי גבוה), ואל חלקו החיצוני של הכדור זרמו החומרים הקלים יותר.

בסופו של תהליך ההיווצרות של כדור הארץ התקרר חלקו החיצוני והפך לקרום מוצק; חלקו הפנימי, הגלעין, נותר לוהט; וברווח שבין הגלעין לבין הקרום נוצרה המעטפת. תהליך זה של התהוות כדור הארץ, שבו התחולל מעבר מתערובת אחידה (הומוגנית) ראשונית לכדור בעל מבנה של 3 שכבות שבו החומרים הכבדים שוקעים פנימה, מכונה "תהליך ההפרדה" ("דיפרנציאציה"). רבים מן החוקרים סוברים שהדיפרנציאציה היא התהליך החשוב ביותר בהיסטוריה של כדור הארץ.

השכבות הבונות את כדור הארץ שונות מאוד זו מזו בתכונות הכימיות והפיזיקאליות שלהן - בהרכב החומרים, בטמפרטורות, במצב הצבירה וכדומה. ומכיוון שהמערכות בטבע נוטות להגיע לשיווי משקל, מתרחשים בתוך כדור הארץ, בין השכבות השונות, תהליכים דינאמיים של הסעה של חום וחומר, ותוך כדי כך נפלטת ונקלטת במערכת אנרגיה רבה.

ערפילית
ענן גדול של אבק וגז, שמקורם בכוכבים אשר סיימו את מהלך חייהם. בחלק מן ערפיליות, הנקראות "ערפיליות כהות", נוצרים מן האבק והגז כוכבים חדשים.

כוכב
גוף שמימי עשוי גזים לוהטים, הפולט אור ואנרגיה הנוצרים בתוכו. השמש, לדוגמה, היא כוכב.

כוח הכבידה (כוח המשיכה)
הכוח הקיים בין כל שני גופים חומריים בטבע. כוח הכבידה תלוי מרחק בין הגופים ובמסה, כלומר בכמות החומר שלהם.

כוכב לכת
גוף שמימי המקיף את השמש ומחזיר את אור השמש המגיע אליו.

ירח
גוף המקיף כוכב לכת והקשור אליו בגלל כוח הכבידה הקיים על פני כוכב הלכת.

מגמה

חומר מותך הנמצא עמוק מתחת לפני השטח ומכיל חומר סלעי מותך, אדי מים וגזים.

תהליכים פנימיים אלה - הם המסיעים את ה**מגמה**, החומר הסלעי המותך, אל עבר החלקים החיצוניים של כדור הארץ, והם היוצרים את השינויים העצומים המתחוללים על פני כדור הארץ מאז היווצרותו ועד היום.

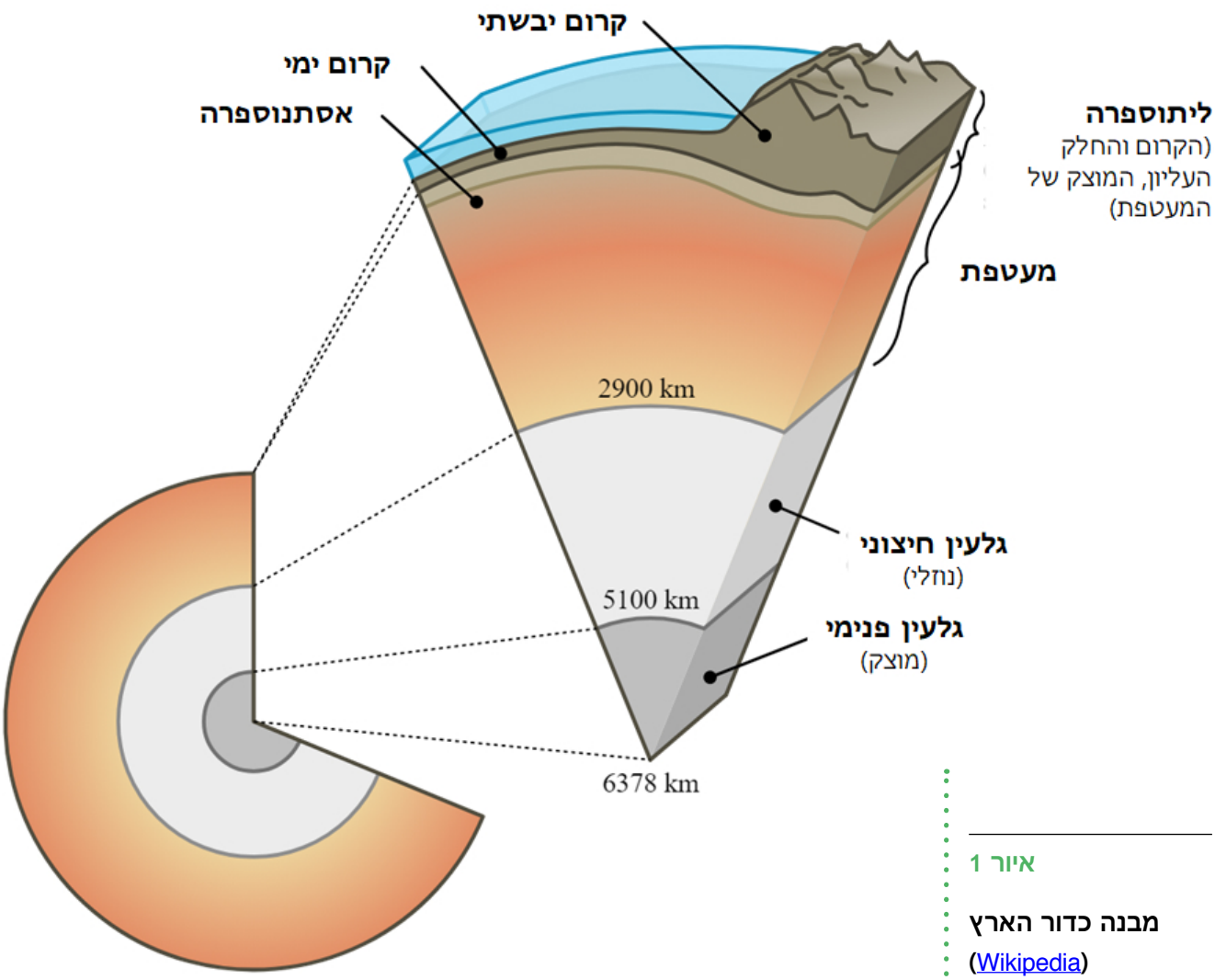
כדור הארץ, שהרדיוס שלו הוא 6,370 ק"מ, נחלק כאמור לשלוש שכבות עיקריות:

א. הקרום, הבנוי בעיקר מיסודות קלים (צורן, חמצן ואלומיניום) ועוביו מגיע ל-70 ק"מ.

ב. המעטפת, הבנויה בעיקר מיסודות כבדים יותר (צורן, חמצן, ברזל ומגנזיום) ועובייה כ-2,900 ק"מ.

ג. הגלעין, הבנוי בעיקר מיסודות כבדים (ברזל וניקל) ועוביו כ-3,300 ק"מ.

מתוך מידע רב שהצטבר ממחקרים שנעשו בשנים האחרונות, מתקבלת חלוקה מפורטת יותר של כדור הארץ (איור 1).



איור 1

מבנה כדור הארץ
(Wikipedia)

הליתוספרה

הליתוספרה (ביוונית, ליתוס - סלע, ספרה - כדור) היא החלק החיצוני, המוצק, של כדור הארץ, הכולל את קרום כדור הארץ וכן את החלק העליון, המוצק, של המעטפת העליונה. עובייה של הליתוספרה - 100-70 ק"מ.

הליתוספרה, הבנויה מסלעים, מורכבת בעיקר מהיסודות צורן, חמצן ואלומיניום, והטמפרטורה הממוצעת השוררת בה נעה מ-18°C בפני השטח ועד 3,000°C-1,500°C, בהתאם לעובי הקרום.

מבחינים בין 2 סוגי ליתוספרה:

- **ליתוספרה יבשתית**, הבונה את יבשות העולם ועובייה 150-50 ק"מ. היא קלה ועבה יחסית ומורכבת ברובה מסלעי גרניט, שהיסודות העיקריים המרכיבים אותם הם קלים (בעיקר צורן וחמצן).
- **ליתוספרה ימית (אוקיינית)**, המרכיבה את קרקעית האוקיינוסים ועובייה 15-5 ק"מ. היא כבדה ודקה יחסית ומורכבת בעיקר מסלעי בזלת, שהיסוד העיקרי המרכיב אותם הוא יסוד כבד (ברזל). מאז התגבשותו של קרום כדור הארץ - סלעים שוקעים ומצטברים ללא הרף על היבשות וגם על קרקעית האוקיינוסים.

הרחבה על הסלעים המרכיבים את הליתוספרה, בהמשך הפרק.

המעטפת

המעטפת נחלקת ל-3 שכבות:

- **אסתנוספרה (ביוונית, אסתנו - רופף, ספרה - כדור)** - שכבה של מגמה, חומר סלעי מותך וצמיגי הזורם באיטיות. עובייה כ-250 ק"מ. הטמפרטורה של המגמה באסתנוספרה מגיעה עד 1,200°C.
- **החלק העמוק של המעטפת העליונה** - שכבה המורכבת מחומר סלעי וצמיגי ועובייה כ-300 ק"מ. הטמפרטורות בחלק זה של המעטפת מגיעות עד 2,500°C.
- **המעטפת התחתונה** - שכבה צפופה, מוצקה וכבדה יותר מן המעטפת העליונה. הטמפרטורה בחלק זה של המעטפת מגיעה עד 4,500°C. עובייה כ-2,200 ק"מ.

הגלעין

הגלעין נחלק לשתי שכבות:

- **גלעין חיצוני**, נוזלי, שעוביו כ-2,200 ק"מ.
- **גלעין פנימי**, מוצק, שעוביו כ-1,250 ק"מ והוא מגיע עד מרכזו של כדור הארץ - במרחק 6,378 ק"מ מפניו.

הטמפרטורה השוררת במרכז הגלעין מגיעה עד למעלה מ-6,000°C.

תוך כדי סיבובו של כדור הארץ סביב צירו, הגלעין החיצוני המותך מתחכך בגלעין הפנימי המוצק. התוצאה היא שנוצרים זרמים חשמליים ונוצר שדה מגנטי עצום בממדיו. השדה המגנטי של כדור הארץ חשוב בכמה תחומים: הוא יוצר סביב כדור הארץ את ה**מגנטוספרה** - תופעה החוסמת את החלקיקים המסוכנים של רוח השמש (שטף של חלקיקים טעונים הנפלט מן השמש) ולא מאפשרת להם לחדור לאטמוספרה; הוא מסייע בניווט (בעזרת המצפן); מחקרים מעידים כי הוא מסייע גם לציפורים למצוא את דרכן במסלולי הנדידה הארוכים שלהן.

השדה המגנטי עובר דרך מרכז כדור הארץ ויש לו שני קטבים - האחד באוקיינוס הקרח הצפוני, והשני ליד אנטארקטיקה. כאשר מגמה פורצת מחלקו הפנימי של כדור הארץ אל פני השטח והיא מתקשה והופכת לסלע בזלת - חלק מהמינרלים המרכיבים אותה, אלה המכילים כמות גדולה של ברזל, יסתדרו בתוך הסלע על פי השדה המגנטי של כדור הארץ (כמו מסמרים המצויים סמוך למגנט). דגימות של סלעי בזלת שנאספו בכל רחבי העולם מצביעות על הממצא הבא: השדה המגנטי של כדור הארץ מתהפך כל פרק זמן מסוים - לעתים תוך מאות-אלפי שנים, ולעתים תוך מיליוני שנים. התוצאה היא שבתקופות מסוימות השדה המגנטי מצביע על הצפון (כמו בימינו) אבל בתקופות אחרות הוא מצביע על הדרום. החוקרים אינם יודעים להסביר מדוע הקוטב המגנטי מתהפך. תחום המחקר העוסק בתכונות המגנטיות של כדור הארץ ובהיפוכי הקטבים של השדה המגנטי נקרא **פלאומגנטיזם.**

מקורות החום של כדור הארץ

ראינו שככל שמעמיקים מקרום כדור הארץ לעבר הגלעין, הטמפרטורות עולות. לעלייה זו של הטמפרטורות קוראים "מפל החום" (הגרדיינט הגאותרמי). מהידע שהצטבר לגבי הטמפרטורה בעומקים שונים בקרום כדור הארץ מסתבר כי כל 100 מ' הטמפרטורה עולה ב-3°C בממוצע. מכאן אפשר להסיק שבעומק של כ-100 ק"מ, הטמפרטורה היא כ-3,000°C. בטמפרטורה כזו כל הסלעים ניתכים - הופכים ממוצקים לנוזלים. בחלק הפנימי של המעטפת ובגלעין הטמפרטורה עולה בקצב איטי יותר, ושם הטמפרטורות נעות בין 4,000°C ל-6,000°C.

עדויות לגבי החום הרב השורר בחלקיו הפנימיים של כדור הארץ מתקבלות מהחומרים הפורצים ממעמקיו: המעיינות החמים, ה**גייזרים** וכן הלבה הלוהטת, שמקורה במגמה הפורצת מלועותיהם של הרי הגעש או מתוך סדקים הקיימים בליתוספרה. גם העובדה שכשמעמיקים אל תוך מכרות עמוקים או לתוך בורות קידוח החום עולה, מעידה על כך. החום המתפשט מן המעמקים אל הליתוספרה גורם למגמה שבתוך כדור הארץ לנוע ולזרום וליצור בתוך כך תהליכים דינאמיים, המעצבים את פניו וגורמים לתופעות טבע רבות.

שני מקורות יוצרים את החום השורר בתוך כדור הארץ:

א. חום הגלעין - כאמור, בתהליך היווצרותו של כדור הארץ גרם כוח הכבידה לתנועת החומרים הכבדים לעבר חלקיו הפנימיים של כדור הארץ. ברגע שהחומר נעצר במעמקי הגלעין - אנרגיית התנועה שיצר כוח הכבידה הפכה לאנרגיה של חום, וזהו מקורו של החום העצום השורר בתוך כדור הארץ.

מגנטוספרה
אזור סביב כדור הארץ שקיימות בו תופעות המושפעות מקיומו של השדה המגנטי של כדור הארץ.

פלאומגנטיזם
תחום המחקר העוסק בתכונות המגנטיות של כדור הארץ (מיוונית: פלאו - עתיק).

גייזר
נביעה של מים חמים וקיטור המצויים בשכבות העמוקות של קרום כדור הארץ, בקרבת גוש מגמתי לוהט. כתוצאה מהתחממותם הם מתפרצים מדי פעם אל פני השטח בזרם חם וחזק.

ב. **התפרקות רדיואקטיבית** - בגלעין ובמעטפת של כדור הארץ מצויה כמות גדולה של יסודות כימיים רדיואקטיביים. אלה הם יסודות כימיים לא יציבים, שהאטומים שלהם עוברים שינוי, מתפרקים והופכים לאטומים של יסוד אחר (שהמוכר שבהם הוא האורניום). תהליך התפרקותם של היסודות האלה יוצר אנרגיה רבה, ההופכת לאנרגיה של חום. בגלעין ובמעטפת מתרחשים תהליכים אלה ללא הפסק ובכמות רבה, וכך נוצר בהם חום רב.

התפרקות רדיואקטיבית
תהליך המתרחש ביסודות כימיים לא יציבים ובו אטומים של יסודות אלה עוברים שינוי, מתפרקים והופכים לאטומים של יסוד אחר. תהליך ההתפרקות יוצר אנרגיה רבה.

'מאבקי כוח' בין מוצק לנוזל בכדור הארץ

מה קובע את מצבי הצבירה השונים של החומרים המרכיבים את הקרום, המעטפת והגלעין של כדור הארץ? מצבי הצבירה השונים נקבעים על ידי 3 גורמים והיחס ביניהם: עוצמת הלחץ שהחומרים נתונים בו, גובה הטמפרטורה של החומרים וההרכב המינראלי שלהם.

ככל שמעמיקים אל תוך כדור הארץ כן גובר הלחץ המופעל על החומרים הבונים אותו. העלייה בלחץ גורמת לחומר נוזלי להידחס ולהפוך לצמיגי, ולאחר מכן למוצק. אלא שככל שמעמיקים אל תוך הכדור כן עולה גם הטמפרטורה של החומרים, ולעלייה זאת יש השפעה הפוכה - כתוצאה ממנה חומר מוצק הופך לצמיגי, ובהמשך הוא הופך לנוזלי. ולפיכך, קיים במעמקי כדור הארץ מעין 'מאבק' בין הטמפרטורה לבין הלחץ על קביעת מצב הצבירה של החומרים. אל אלה מצטרף, כאמור, הגורם השלישי - ההרכב המינראלי של החומרים: כדור הארץ אינו אחיד בהרכבם של החומרים הבונים אותו - בחלקיו החיצוניים החומר הסלעי עשיר בצורן והוא ניתך בטמפרטורה של כ-1,000°C, ואילו בחלקיו הפנימיים החומר הסלעי עשיר בברזל, והוא ניתך בטמפרטורה של כ-4,000°C.

מהו, אם כן, מצב הצבירה של החומרים בחלקיו השונים של כדור הארץ? במעטפת התחתונה יש ללחץ השפעה מכרעת והחומר המרכיב אותה הוא מוצק. במעטפת העליונה, הקרובה יותר לקרום כדור הארץ, הלחץ יורד, וכאן יש לטמפרטורה השפעה מכרעת ובגלל החום הגבוה מתקבל חומר צמיגי.

באזורים הקרובים לקרום הלחץ יורד עוד יותר ועקב החום החומר הוא נוזלי, וזהו מצב הצבירה של **הלבה** המתפרצת אל פני כדור הארץ מהרי געש או מסדקים שבקרום. על פני כדור הארץ, כאשר הלחץ על החומרים הוא רק של מעטפת האוויר הסובבת אותו והטמפרטורות נמוכות - החומר הופך למוצק, לסלע. בגלעין המצב שונה - החומר המרכיב את הגלעין החיצוני עתיר בברזל ושונה מהחומר המרכיב את הקרום ואת המעטפת. הטמפרטורה הגבוהה השוררת בשכבה זאת גורמת להתכת החומרים המרכיבים אותה והיא מצויה במצב נוזלי על אף הלחץ הגבוה. בעומק רב יותר, בגלעין הפנימי, הטמפרטורה כמעט אינה עולה יותר, ואילו הלחץ ממשיך לעלות, ועל כן החומר הברזילי הופך למוצק.

לבה
חומר שמקורו במגמה הרותחת העולה אל פני השטח בעת התפרצות געשית (וולקנית).

סלעי כדור הארץ

קרום כדור הארץ מורכב מסוגי סלע שונים, והסלעים לסוגיהם הם התשתית שעליה מתקיימים החיים על פני כדור הארץ. הסלעים משמשים כלי מרכזי להבנת העבר וההווה של כדור הארץ, ולשם כך בודקים את הרכבם, את תכונותיהם ואת דרכי היווצרותם.

הסלעים מורכבים ממינרלים. ה**מינרל** הוא **חומר אנאורגני** הבנוי מ**תרכובת** של יסודות כימיים. מצב הצבירה שלו מוצק והוא נוצר בתהליכים טבעיים. היסודות המרכיבים את המינרל מסודרים בגבישים - יחידות קטנות בעלות מבנה קבוע וצורה קבועה (למשל: קובייה, מעוין, פירמידה). יש מינרלים המורכבים מיסוד כימי אחד (למשל היהלום, המורכב מהיסוד פחמן) ויש מינרלים המורכבים משני יסודות או יותר (כמו מלח הבישול, המורכב מאטומים של נתרן וכלור [NaCl], הקוורץ, המורכב מצורן וחמצן, או הקלציט, המורכב מסידן, פחמן וחמצן).

כל **גביש** של כל מינרל בנוי מיסודות כימיים - אחד או יותר. ה**יסוד הכימי** הוא יחידת החומר הטבעי הקטנה ביותר שאי אפשר לפרקה באמצעים כימיים. החומרים הבונים את הליתוספרה של כדור הארץ מורכבים מכ-100 יסודות כימיים.

בין היסודות, המינרלים והסלעים מתקיים, אם כן, הקשר הבא: היסודות מרכיבים את המינרלים, והמינרלים מרכיבים את ה**סלעים**. לדוגמה: היסודות הכימיים סידן, פחמן וחמצן יוצרים את המינרל קלציט ($CaCO_3$) וזה יוצר את סלע הגיר.

יש סלעים המורכבים ממינרל אחד - למשל, סלע הצור, המורכב מהמינרל קוורץ (SiO_2) ויש סלעים המורכבים מכמה מינרלים - למשל, סלע הגרניט, המורכב מהמינרלים קוורץ, פצלת השדה ונציץ (מיקה).

מבחינים בשלוש קבוצות של סלעים, לפי תהליך היווצרותם:

- **סלעי יסוד** (סלעים מגמתיים)
- **סלעי משקע** (סלעים סדימנטריים)
- **סלעים מותמרים** (סלעים מטמורפיים)

סלעי יסוד

מקורם של סלעי היסוד הוא במגמה המצויה בעומק הליתוספרה או במעטפת העליונה. המגמה היא סלע מותך, במצב נוזלי, המצוי בלחץ מתחת לסלעי הקרום, ועל כן היא נדחפת ללא הרף כלפי מעלה, אל פני כדור הארץ. מגמה שמתפרצת דרך סדקים ונקודות חולשה אל פני כדור הארץ ומתקררת במהירות, יוצרת את "**סלעי הפרץ**" (הנקראים גם "**סלעים וולקניים**", על שם וולקן, אל האש והנפחות במיתולוגיה הרומית). מגמה שעולה, מצטברת בעומק הקרום ומתקררת לאט לאט, יוצרת את "**סלעי התהום**" (הנקראים גם "סלעים פלוטוניים",על שם פלוטו, אל השאול במיתולוגיה היוונית).

מינרל
חומר טבעי, אי-אורגני, בעל הרכב אחיד, מוצק, הבנוי במבנה גבישי קבוע. הסלעים של כדור הארץ מורכבים ממינרל אחד או מצירוף של מינרלים שונים.

חומר אנאורגני (אי-אורגני)
חומר שמקורו אינו בעולם החי והצומח, והוא אינו מכיל את היסודות פחמן ומימן, הקשורים זה בזה בקשר כימי.

תרכובת
חומר הבנוי משני יסודות או יותר, הקשורים ביניהם בקשר כימי בהרכב קבוע וביחס קבוע של כמויות. לתרכובת יש תכונות כימיות משל עצמה, השונות מהתכונות של מרכיביה.

גביש
מבנה אחיד של אטומים הערוכים בסדר קבוע.

יסוד כימי
יחידת החומר הקטנה ביותר שאינה ניתנת לפירוק באמצעים כימיים. היסודות מתרכבים ביניהם ויוצרים את כל סוגי החומרים.

סלע
חומר טבעי קשה המורכב מגבישים של מינרלים מסוג אחד או יותר.

א. סלעי פרץ

סלעי הפרץ, כשמם כן הם: אלה הם סלעים שמקורם במגמה הלוהטת הפורצת אל פני השטח בהתפרצויות געשיות, מתקררת במהירות כשהיא באה במגע עם האטמוספרה של כדור הארץ, ומתגבשת לסלע. קצב התקררותם של סלעי הפרץ הוא מהיר, כך שלגבישי המינרלים אין די זמן לגדול. סלעי הפרץ מאופיינים בגבישים קטנים, על כן במבט העין קשה בדרך כלל להבחין בגבישי המינרלים המרכיבים אותם, אך אפשר לראותם באמצעות מיקרוסקופ. המגמה הפורצת מהרי הגעש יוצרת סוגים שונים של סלעי פרץ. הנפוץ שבהם הוא **סלע הבזלת** (איור 2), המכיל מינרלים עשירים בברזל. סלעי הבזלת הם בדרך כלל כהים. לעתים הסלע אחיד ומלא, ולעתים מצויים בו חללים קטנים שהכילו גזים שהתנדפו. הבזלת משמשת לבנייה באזורים שבהם היא נפוצה.

איור 2

סלע בזלת

(SandAtlas)

ב. סלעי תהום

רק לעתים רחוקות המגמה פורצת אל פני כדור הארץ; על פי רוב המגמה מתקררת ומתגבשת לאט במעמקי כדור הארץ. כך נוצרים סלעי התהום - המכונים כך משום שהם נוצרים במעמקי כדור הארץ. בגלל ההתקררות האיטית - תהליך הגיבוש של סלעים אלה הוא איטי, ולכן גבישי המינרלים מרכיבים אותם הם גדולים יחסית ואפשר לראותם בעין.

איור 3

סלע גרניט

(Geology page)

סלע התהום הנפוץ ביותר הוא **סלע הגרניט** (איור 3), העשיר בצורן - סלע בהיר המורכב מכמה סוגי מינרלים, ולכן הוא בעל כמה גוונים. הגרניט הוא סלע קשה המשמש כאבן לבניין או כמשטח לעבודה ולציפוי בבתים רבים.

סלעי משקע

סלעי המשקע הם סלעים המורכבים מחומרים המצויים על פני כדור הארץ. הם נקראים גם "סלעים סדימנטריים" (סדימנט, בלעז - משקע). סלעי המשקע מכסים את סלעי היסוד הבונים את ליתוספרה של כדור הארץ בכיסוי דק, והם הסלעים הנפוצים ביותר על פני השטח (איור 4): הם תופסים 75% מפני השטח של היבשות, ואילו סלעי היסוד והסלעים המותמרים נחשפים רק ב-25% הנותרים של פני השטח. לעומת זאת סלעי המשקע מהווים רק 5% מכלל נפח הסלעים בליתוספרה ואילו סלעי התהום והסלעים המותמרים מהווים 95% מכלל נפחם.

איור 4

סלעי משקע:
פצלים (Shale)
אבן חול (Sandstone)
אבן גיר (Limestone)
קונגלומרט (Conglomerate)
ארקוזה (Arkose)
גבס (Gypsum)
(Pinterest)

כיצד נוצרים סלעי המשקע?

תהליכים שונים המתרחשים על פני כדור הארץ גורמים לבליה ולפירוק של הסלעים, ולהובלת חומרי הבליה שנוצרו. כוח הכבידה הוא הגורם לחומרים שונים המצויים על פני כדור הארץ, כמו שברי סלעים, חלקיקי חול ושאריות בעלי חיים וצמחים, לשקוע ולהצטבר על פניו. החומרים השונים שוקעים באוקיינוסים ועל פני היבשות, ואז מתקיים תהליך המלכד אותם והופך אותם לסלע מוצק.

התהליך הזה כולל שני מנגנונים:

א. **מנגנון דחיסה**, המתרחש כאשר חומרי המשקע (הסדימנטים) מצטברים וקוברים תחתיהם את שכבות המשקע הקודמות, ומפעילים עליהן לחץ מכאני. באוקיינוסים מופעל על החומרים ששקעו בקרקעית גם משקלו של עמוד המים שמעליהם. הלחץ המופעל על המשקעים גורם לסחיטת המים המצויים בין גרגריהם, והם נדחסים ומתקשים.

ב. **מנגנון מילוט** (מהמילה מלט), המתרחש כאשר תמיסות שונות חודרות אל בין גרגרי החומר השוקע, מתגבשות שם וגורמות להתקשות החומר. התמיסות הנפוצות הן תמיסות גיריות, תמיסות ברזיליות ותמיסות צורניות.

את סלעי המשקע מאפיינות שתי תופעות ייחודיות:

1. **שיכוב** - כל סלעי המשקע מצטברים ונערמים בשכבות, בצורה אופקית (איור 5), על קרקעית הים או על שטחים נמוכים ומישוריים ביבשה. השכבות העתיקות הן השכבות התחתונות, והשכבות הצעירות מונחות מעליהן.
שכבות סלעי המשקע מונחות על סלעי היסוד שכדור הארץ כולו בנוי מהם, ומכסות אותם. עובייה של שכבת סלעי משקע יכול לנוע מכמה מילימטרים ועד

איור 5

שיכוב אופקי בסלעים
(Sciencing)

כמה עשרות מטרים, ועוביין של כל שכבות סלעי המשקע נע מכמה עשרות מטרים ועד כמה קילומטרים, לדוגמה:

עוביים של סלעי המשקע באזור אילת הוא כמה מאות מטרים, במכתש רמון כ-4 ק"מ, באזור אשקלון כ-7 ק"מ, ובים התיכון - למעלה מ-13 ק"מ. השיכוב של הסלעים נשמר גם כאשר הסלעים אינם אופקיים עוד בגלל תהליכי קימוט, או כאשר השכבות אינן רצופות בגלל תהליכי שבירה.

2. מאובנים - בסלעי המשקע אפשר למצוא מאובנים - שרידיהם של בעלי חיים וצמחים קדומים, שנשתמרו בסלעים: שלדים, צדפות וקונכיות, הפרשותיהם וסימני עקבותיהם של בעלי חיים, חלקי צמחים, זרעים ואבקות צמחים ועוד. הענף העוסק בחקר המאובנים נקרא "**פלאונטולוגיה**" (מיוונית: פלאו - עתיק; אונטה - יצורים). כיצד נוצרים המאובנים? ומדוע הם מכונים בשם זה?

כמות גדולה במיוחד של מאובנים מצטברת בשכבות הסלע השוקעות בים. הים עשיר בבעלי חיים בעלי שלדים פנימיים וחיצוניים (כמו קונכיות), שרובם מורכבים מגיר ומיעוטם - מתחמוצת הצורן. לאחר שהם מסיימים את מחזור חייהם, בעלי החיים הימיים מצטברים על קרקעית הים ונקברים תחת משקעים נוספים. במרוצת השנים הם מתאבנים (הופכים לאבן או סלע), אך צורתם נשמרת. לכן סלעי המשקע הימיים הם מקור חשוב למגוון מאובנים - שיני כרישים, עצמות דגים, אלמוגים, צדפות וקונכיות, שבלולים ויצורים מיקרוסקופיים למיניהם. בסלעי המשקע השוקעים על פני היבשה אפשר למצוא מאובנים של עלים, גזעים, אבקות צמחים, חרקים, וכן עצמותיהם של בעלי חיים ענקיים (כמו דינוזאורים או ממותות) או עקבות שלהם. כמותם של המאובנים המצויים בסלעים היבשתיים קטנה מכמותם של המאובנים המצויים בסלעים הימיים, מפני ששרידיהם של בעלי החיים השוקעים ביבשה עוברים תהליך פירוק מהיר יותר מזה שעוברים השרידים השוקעים על קרקעית הים, וזאת בגלל תהליכי הבליה והסחיפה המתרחשים ביבשה. מאובנים של בעלי חוליות יבשתיים (עצמות או שיניים) אפשר למצוא בסלעים ששקעו על פני היבשה, אך יצורים שאין להם שלד חיצוני או פנימי, כגון

פרוקי רגליים למיניהם (זבובים, יתושים ושאר מיני חרקים), משתמרים כמאובנים לעתים רחוקות בלבד - בדרך כלל בתוך שרף של עץ שהתאבן. בעלי חיים אלה עשויים מחומר אורגאני המתפרק במהירות בנוכחות חמצן. רק בתהליכים מהירים של הקפאה או של קבורה מהירה תחת בוץ, כאשר נמנע מגע עם חמצן, הם נשמרים.

את המאובנים אפשר למצוא בסלעים בכמה צורות השתמרות:

- דפוסים של קונכיות (מצידן הפנימי או מצידן החיצוני), עלים של צמחים, טביעות רגל או סימני זחילה של בעלי חיים, שהוטבעו בסלע הרך ואחר כך התמלאו בבוץ שהתקשה והפכו לחלק מן הסלע.
- חללים פנימיים של שבלולים או של קונכיות, שהתרוקנו מבעלי החיים החיים בתוכם התמלאו בחומר אחר, השומר על צורתה של התבנית הפנימית או של התבנית החיצונית שלהם.
- השתמרות של בעל החיים או של הצמח המקורי. לדוגמה, חרקים שהשתמרו בשרף עצים שהתאבן (ענבר).

חלק ניכר מסלעי המשקע נוצרים בימים והם מורכבים מחומרים שונים השוקעים בים וכן משלדים של בעלי חיים. בים מצוי שפע של בעלי חיים, ולאחר מותם שלדיהם שוקעים על פני הקרקעית ומצטברים, ומתחולל בהם תהליך של מילוט וליכוד על ידי תמיסות, עד שנוצרים סלעי משקע חדשים. לדוגמה: בים רדוד, שהטמפרטורות שלו גבוהות יחסית והאור חודר אליו, ישקעו סלעי גיר העשירים במאובנים של בעלי חיים גדולים, יחסית; לעומת זאת בעומק הים, מקום שם קר וחשוך, ישקעו סלעי הקירטון העשירים במאובנים של בעלי חיים מיקרוסקופיים, שסביבת המחיה שלהם היא האוקיינוס הפתוח.

נכיר כמה סלעי משקע הנפוצים בסביבה החופית והימית:

- **הקונגלומרט** - הקונגלומרט מורכב מגרגירים גדולים יחסית מ- 2 מ"מ ועד כמה עשרות ס"מ, שמקורם בסלעים אחרים שהתבלו. חלקי הסלע שנותרו לאחר תהליך הבליה נישאים על ידי המים הזורמים בנחלים ובנהרות. חלקי סלע אלה, הנקראים חלוקי נחל, שוקעים ומצטברים בדרך כלל באפיקיהם של הנהרות והנחלים - במקומות שבהם זרימתם של המים נחלשת, או בחופי הים ובמניפות הסחף הנרחבות - כשזרם המים מגיע לאזור מישורי. אם חלקי הסלע המרכיבים את הקונגלומרט מעוגלים, הדבר מעיד על הסעה לאורך תוואי ארוך ועל התנגשויות רבות בקרקעית הנחל או הנהר, אשר עיגלו את פינותיהם. אם חלקי הסלע מזוותים הדבר מעיד על הסעה לאורך תוואי קצר יחסית, ואז הסלע נקרא ברקציה.
- **אבן החול** - אבן החול היא בינונית-גרגר. גודל גרגיריה נע בין 0.06 מ"מ ל-2 מ"מ. אבן החול מורכבת בעיקר מהמינרל קוורץ, ששיעורו בסלע זה עשוי להגיע ל-90%. מקורו של החול שבאבני החול הוא בסלעי הגרניט: המינרלים של סלעי הגרניט מתפרקים בתוך תהליך הבליה וההסעה, ונותרים רק גרגירי הקוורץ הקשים. אבן החול הצבעונית במכתשים שבנגב ובאזור אילת (למשל, בעמודי שלמה), המכונה "אבן חול נובית", מורכבת רובה ככולה מגרגירי קוורץ

שיכוב צולב
שיכוב האופייני בעיקר לאבני חול, ובו שכבות דקות ערוכות בנטיות שונות. זאת כתוצאה מהשקעה על ידי רוח או מים, שפעלו בכיוונים שונים בתקופות שונות.

סביבת השקעה
אזור מסוים על פני כדור הארץ שסלע משקע שוקע בו, למשל: ים רדוד או ים עמוק, אגם או מישור מדברי.

שמקורם בסלעי הגרניט של אילת ושל סיני. הגרגירים של אבני החול נישאים בדרך כלל על ידי הרוח באזורים היבשתיים והיבשים, או מובלים על ידי הנהרות וגלי הים. הם שוקעים ומצטברים בגלונים (רכסים נמוכים שגובהם עד כמה סנטימטרים) ובדיונות (רכסים שגובהם עד כמה עשרות מטרים). באבני החול קיימת תופעה מעניינת הנקראת "**שיכוב צולב**" - שכבות דקות הנוטות בזווית חדה זו אל זו. הנטייה והעובי של כל אחת מהשכבות מעידים על הכיוון ועל העוצמה של הרוחות או של זרם המים בעת שנוצרה השכבה. כאשר נוצרה השכבה הבאה, כיוון הרוח ועוצמתה היו שונים. החול, שהוא תוצר הבליה של אבן חול, משמש לייצור זכוכית והוא מהווה מרכיב חשוב בחומרי בנייה.

- **הכורכר** - הכורכר, סלע בינוני-גרגר, הנוצר כתוצאה מהתאבנותם של החולות באזורי החופים. גרגיריו עשויים ברובם מקוורץ, והחומר המלכד אותם הוא תמיסות גירניות שהתקשו וליכדו את גרגירי החול לכדי סלע קשה. לעתים הכורכר מכיל גם שברי צדפים. הכורכר מוכר לנו מחופי הים התיכון בישראל.

- **סלע הגיר** - סלע הגיר בנוי מהמינרל קלציט. הוא נוצר בים רדוד יחסית, ומורכב בעיקר משרידים של בעלי חיים ימיים גדולים למדי. חלק מסלעי הגיר קשים מאוד והם משמשים כאבני בניין וכחומר גלם לחומרי בניין אחרים.

- **הדולומיט** - הדולומיט הוא סלע ממוצא ימי, הדומה במראהו לסלע הגיר אך הוא קשה יותר ממנו. ההבדל העיקרי ביניהם הוא שבמינרלים המרכיבים את הדולומיט מצויים אטומים של מגנזיום יחד עם אטומים של סידן.

- **הקירטון** - הקירטון בנוי אף הוא מהמינרל קלציט, אך **סביבת ההשקעה** שלו היא בים עמוק. הקירטון מורכב, רובו ככולו, ממצבור של קליפות ושלדים של בעלי חיים מיקרוסקופיים, והוא סלע רך.

- **סלע הצור** - מנגנון ההיווצרות של הצור אינו ברור באופן מלא. רוב המדענים סוברים כי הצור שוקע ונוצר בים עקב שקיעתם של אצות ושל בעלי חיים חד תאיים ששלדיהם הזעירים בנויים מתחמוצת הצורן. תהליך נוסף היוצר את הצור נקרא "צירור" - החלפה של סלע גירי באטומים של צורן וחמצן שמקורם בסלעים עשירים בצורן (כמו הגרניט ואבני החול), שהתבלו ושקעו בים. הצור מופיע בצורת שכבות דקות, עדשות, עורקים וגידים שונים בתוך שכבות קירטון, גיר ודולומיט. לעתים מופיע סלע הצור גם בצורת שכבות עבות. אבני הצור הקשות נשברות בצורת מדרגות מעוגלות, ולכן אפשר לעצב אותן ככלי עבודה קשיחים וחדים. מסיבה זאת הן שימשו בהיסטוריה הקדומה כחומר גלם לכלים שונים כמו סכינים, קרדומים וכלי קרצוף, שבהם השתמש האדם הקדמון.

- **החוואר** - החוואר הוא סלע מעורב הבנוי מכמויות משתנות של חרסית וחומר גירני (גיר או קירטון). הוא נוצר בסביבת השקעה ימית, צבעו בהיר, חום-צהבהב, ובמגע עם מים הוא נעשה אטום. משום כך הוא משמש כאקוויקלוד העוצר את חלחול מי התהום.

סלעים מותמרים (מטמורפיים)

הסלעים המותמרים הם תוצר של תמורה שהתרחשה בסלעי יסוד או בסלעי משקע. (הם נקראים גם סלעים מטמורפיים; מטמורפוזה - התמרה, שינוי צורה). לרוב התמורה שהביאה להפיכת הסלע לסלע מותמר מתרחשת בתנאים של חום גבוה ולחץ רב. אירועים של לחץ וחום גבוהים מתרחשים בעיקר באזורים שקיימת בהם התנגשות בין לוחות טקטוניים. את הסלעים המותמרים מאפיין סידור מיוחד של המינרלים - בטורים או בלוחות: מאחר שהסלעים נתונים ללחץ חזק, המינרלים מסודרים כך שציר האורך שלהם ניצב לכיוון הלחץ (איור 6).

נציין 3 סוגים של סלעים מותמרים נפוצים:

- **סלע הצפחה** (שיסט), שהמינרלים שלו מסודרים בצורת עלעלים או דפים דקים - תוצאה של התמרת חרסיות
- **הקוורציט**, שמקורו באבני החול
- **השיש**, שמקורו באבני גיר

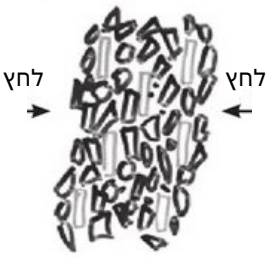
דוגמה להתמרה כתוצאה מטמפרטורה גבוהה הם הסלעים באתר המנסרה (גבעה שמכוסה כולה בעמודי אבן מרובעים שנראים כמו ערמת לוחות עץ בנגרייה) שבמכתש רמון (איור 7). סלעי קוורציט אלה, מקורם באבני חול שהיו סמוכים למחדר וולקני לוהט מעומק האדמה. אבני החול עברו התמרה ותוך כדי ההתקררות נוצרו המנסרות.

איור 6

סידור מינרלים בסלע - לפני התמרה ואחריה (כדור הארץ והסביבה)

א. סידור המינרלים הרגיל

ב. סידור המינרלים בניצב לכיוון הלחץ



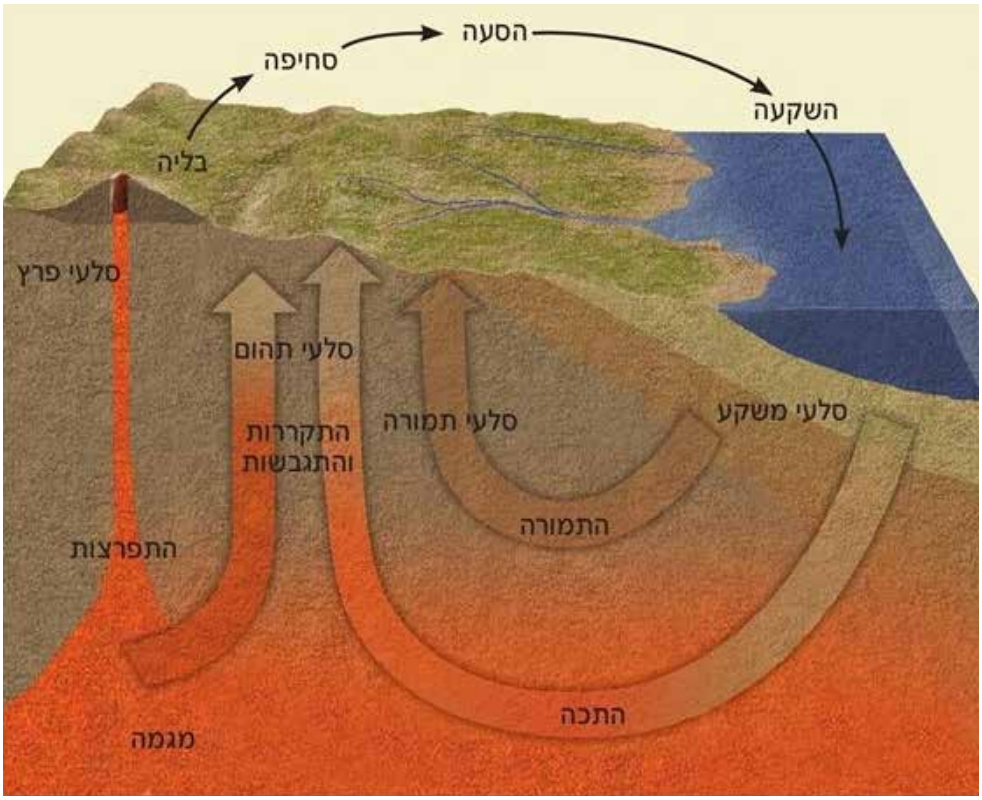
איור 7

אתר המנסרה (מיה אלסר)

מחזור הסלעים

החומרים המרכיבים את הסלעים שעל פני כדור הארץ הם אותם החומרים שהרכיבו את הסלעים הקדומים, אלה שהיו על פניו מאז היווצרותו. אך למרות שהחומרים המרכיבים אותם אינם משתנים - הסלעים עצמם משתנים כל העת. במשך מיליוני שנים הסלעים נתונים לשינויים חוזרים ונשנים והופכים לסלעים אחרים, בתהליך המכונה "מחזור הסלעים":

הסלעים למיניהם - סלעי המשקע, סלעי היסוד, הסלעים המותמרים - כולם עשויים לשקוע אל מעמקי כדור הארץ עם הלוח הטקטוני שהם מצויים עליו, ואז הם ניתכים, הופכים למגמה, ועשויים להופיע שוב על פני כדור הארץ כסלעי יסוד; שם, על פני השטח, הסלעים השונים עוברים תהליכים של בליה ופירוק ותהליכים של סחיפה והסעה על ידי מים, רוחות, קרחונים ועוד, ואז הם מושקעים כסלעי משקע במקום אחר. ושם, שוב - הם עשויים להשתנות, לשקוע למעמקי כדור הארץ, וחוזר חלילה (איור 8). במהלך התרחשות התהליכים במחזור הסלעים, מתרחשים מעברים בין המערכות השונות הבונות את כדור הארץ: הגאוספרה, האטמוספרה, ההידרוספרה והביוספרה.



איור 8

מחזור הסלעים בטבע
(כדור הארץ והסביבה)

מעבדת שדה לזיהוי סלעים

עם המידע שצברנו עד כה על סוגי הסלעים הבונים את קרום כדור הארץ, נלמד לזהות את הסלעים הנפוצים בישראל. לצורך זה נשתמש בשיטות "עממיות" ונבצע בדיקות שדה. (הגאולוגים המקצועיים עורכים, כמובן, בדיקות מעבדה מורכבות ומשוכללות יותר).

החומרים הדרושים לזיהוי הסלעים:
דוגמאות של הסלעים הנפוצים בישראל: גיר, קירטון, דולומיט, צור, אבן חול, כורכר, גרניט, בזלת.
פטיש (רצוי פטיש גאולוגי), מסמר, ציפורן האצבע, שבר של זכוכית, זכוכית מגדלת, בקבוקון קטן של חומצה מלחית מהולה.

טיפ! בטבע הסלעים מכוסים בציפוי של אבק או של קרום, הנוצר בגלל המגע הממושך שלהם עם אוויר ומים. על כן, כדי לזהות את הסלע יש לשבור אותו ולבדוק דוגמה "טרייה", שלא הייתה במגע עם חומרים אלה.

ועוד **טיפ!** צבעו של הסלע אינו מרמז חד משמעית על זיהויו, מאחר שרוב הסלעים מופיעים בגוונים שונים (כך הגיר, הצור, אבן החול, החרסית).

הזיהוי ייעשה על פי כמה נתונים: דרגת הקשיות של הסלע, מידת העיסתיות שלו, תגובתו לחומצה מלחית מהולה, וסימנים נוספים.

א. דרגת הקשיות של הסלע - בבדיקה של מאפיין זה של סלע מסוים, נבדקת דרגת הקושי של כל אחד מהמינרלים המרכיבים את הסלע. השקלול של דרגת הקושי של כל המינרלים הוא הקובע את דרגת הקושי של הסלע. בבדיקת השדה יתאפיין כל סלע לפי 3 דרגות קשיות: רך, בינוני, קשה. הבדיקה תיעשה על ידי חריצת הסלע בעזרת כלים שונים:

- **סלע רך** - ייחרץ על ידי ציפורן האצבע (שדרגת הקושי שלה הוא עד 2.5 ב**סולם מוס**). דוגמאות: גבס, קירטון.
- **סלע בדרגת קושי בינונית** - ייחרץ על ידי מסמר רגיל (שדרגת הקושי שלו היא 5)או על ידי זכוכית (שדרגת הקושי שלה היא 6). דוגמאות: סוגים שונים של גיר או דולומיט.
- **סלע קשה** - יחרוץ את הזכוכית ואת הפטיש הגאולוגי. לדוגמה: גרניט.

הסלעים הגרגריים (אבן החול, למשל) מתפוררים, ולכן אי אפשר להשתמש בחריצה כשיטה לבדיקת הקשיות שלהם. אפשר לעשות זאת על ידי גריסה בשיניים: אם הגרגירים אינם נגרסים בין השיניים - זוהי עדות לכך שדרגת הקושי שלהם גבוהה, וסביר שאלה הם גרגירי קוורץ.

ב. מידת העיסתיות של הסלע
הסלעים המכילים חרסית סופחים מים. לפיכך, אם דוגמת הסלע נדבקת ללשון (מאחר שהמינרלים המרכיבים אותה סופחים את הרוק) - סימן הוא שזוהי חרסית. אפשרות אחרת היא לבדוק את מידת העיסתיות המתקבלת כאשר מרטיבים את הסלע: מידת עיסתיות גבוהה מעידה על תכולה גבוהה של חרסיות בסלע; מידת עיסתיות נמוכה מעידה על מעט חרסיות בסלע; וכאשר הסלע אינו עיסתי כלל, זוהי עדות לכך שהוא אינו מכיל חרסיות כלל.

ג. תגובה לחומצה מלחית מהולה
החומצה המלחית (HCl 3%) היא תרכובת העשויה ממימן ומכלור, אשר בבואה במגע עם המינרל קלציט, המכיל סידן, היא יוצרת תסיסה ובעבוע של בועות גז. הסלעים המכילים קלציט - הגיר והקירטון - תוססים במגע עם חומצה מלחית.

ד. סימנים נוספים
טעם מלוח של דוגמת סלע מעיד על כך שזהו מלח בישול; דוגמת סלע שרוסקה לאבקה ונמשכת למגנט מעידה על כך שזהו סלע המכיל מינרלים ברזליים.

סולם מוס

השיטה המקובלת לבדיקת רמת הקושי של מינרלים היא על פי סולם קשיות שנערך על ידי המינרלוג והגאולוג הגרמני פרידריך מוס. לפי סולם זה, רמת הקשיות של המינרל מתבטאת במידת ההתנגדות שלו לחריצה על ידי מינרל אחר. סולם מוס כולל 10 מינרלים, שהרך שבהם מסומן בדרגה 1, והקשה שבהם - בדרגה 10. על פי הסולם הזה הקלציט, למשל, יחרוץ את הגבס, שהוא רך ממנו, והגבס יחרוץ את המינרל טלק.

2.2 טקטוניקת הלוחות

תנועת הלוחות הטקטוניים

לאורך ההיסטוריה של האנושות תהו חוקרים רבים כיצד התרוממו רכסי הרים עצומים בגודלם כמו רכס הרי ההימלאיה או רכס הרי האלפים, וכיצד הגיעו לפסגותיהם קונכיות מאובנות שהים הוא סביבת המחייה שלהן. מדוע רעידות האדמה והתפרצויות הרי הגעש מתרחשות דווקא באזורים מסוימים כמו איי האוקיינוס השקט (יפן, אינדונזיה, הפיליפינים), או אזור מערב אמריקה הדרומית (פרו, מקסיקו, גואטמלה, צ'ילה)? ומדוע אין רעידות אדמה באזורים אחרים? איך ייתכן שנמצאו עקבותיהם של קרחונים אדירי ממדים במדבר סהרה החם, או סימנים לקיומם של יערות-עד באלסקה הקרה?

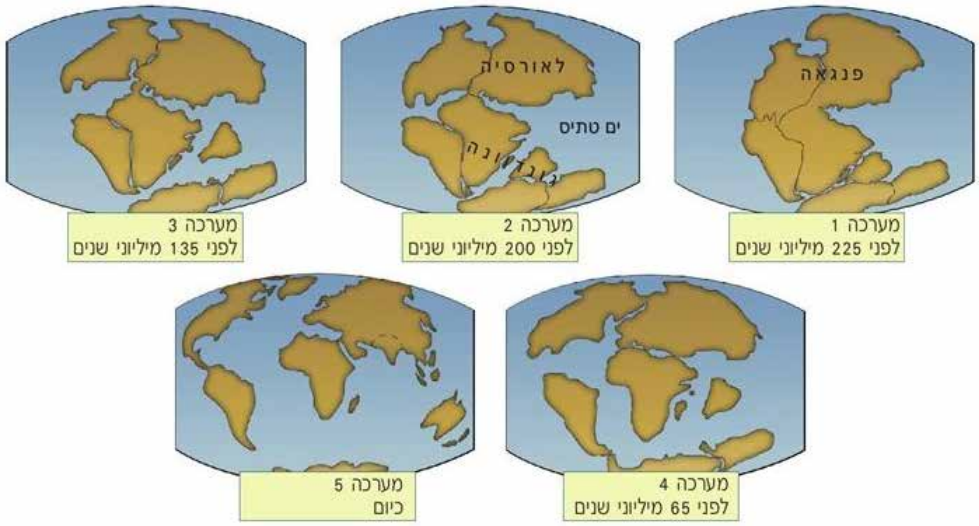
נסקור את התפתחותו של המחקר המדעי בנושא, ואת התאוריה המקובלת כיום - תאוריה המספקת את התשובות לשאלות הרבות הנוגעות לתופעות שצוינו ולרבות אחרות.

תאוריית נדידת היבשות

לאורך שנות קיומו של המחקר הגאולוגי הייתה חסרה תאוריה כוללת שתסביר את המתרחש על פני כדור הארץ ותמצא קשר בין התופעות שתוארו כאן ועוד רבות אחרות. בשנות ה-20 של המאה העשרים ניסח חוקר גרמני בשם אלפרד וגנר תאוריה המציעה הסבר אחד לשאלות אלה. הוא טען כי היבשות כפי שאנחנו מכירים אותן כיום על פני כדור הארץ היו בעבר הרחוק, לפני מיליוני שנים, יבשת-על אחת גדולה, פנגאה (ביוונית: פן - הכול, גאה - אלת האדמה במיתולוגיה היוונית) והיא התפרקה לכמה יבשות אשר במשך הזמן נעו ושינו את מיקומן. וגנר טען כי היבשות ממשיכות לנוע גם כיום. כאשר משחזרים לאחור את "נדידת היבשות" ו"מקרבים" את היבשות זו לזו, מתקבל "תסריט" של נדידת היבשות בחמש מערכות, כפי שמתואר באיור 9.

איור 9

נדידת היבשות
על פי וגנר
(כדור הארץ והסביבה)



מערכה 1: יבשת-על אחת - פַּנְגֵאָה, ואוקיינוס אחד.
מערכה 2: שתי יבשות-על - לַאוּרַסְיָה וגוֹנְדְוָנָה, ואוקיינוס טֶתִיס.
מערכה 3: התרחקות יבשות אמריקה זו מזו, היווצרות האוקיינוס האטלנטי והאוקיינוס ההודי; הודו ניתקת.
מערכה 4: התרחבות האוקיינוס האטלנטי והתרחקות האמריקות מאירופה ומאפריקה; הודו פונה צפונה; אפריקה מתקרבת לאירופה.
מערכה 5: אוסטרליה נפרדת מאנטארקטיקה; תת-היבשת הודו מתנגשת באסיה; נוצרות 5 היבשות של ימינו.

איור 10

עדויות לנדידת היבשות

1. קיימת התאמה בין צורתו של החוף המערבי של יבשת אפריקה וצורתו של החוף המזרחי של יבשת דרום-אמריקה.

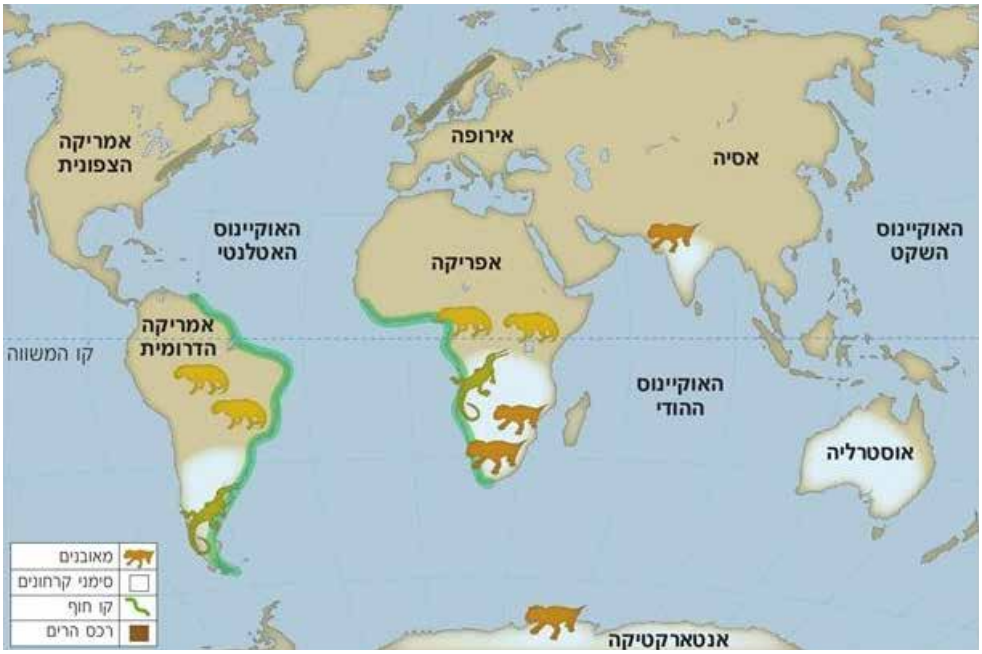
2. ביבשות שכיום מפריד ביניהן אוקיינוס נמצאו מאובנים שמקורם באותם בעלי חיים יבשתיים.

3. באזורים שחלקם סמוך לקו המשווה נמצאו סימנים לקיומם של קרחונים.

4. קיימת המשכיות של רכסי הרים ושכבות סלעים בשתי יבשות מרוחקות.

בנוסף, שני הכתמים המאורכים הכהים - בצפון מערב אירופה ובמזרח אמריקה הפונית, צריכים להתאים לצבע במקרא שמסמן 'רכס הרים'.

(כדור הארץ והסביבה)



את התאוריה שלו, שכונתה "תאוריית נדידת היבשות", בנה וגנר על סמך כמה עובדות מעניינות שצדו את עינו (איור 10). מדענים רבים סירבו לקבל את התאוריה המהפכנית של נדידת היבשות מפני שוגנר וחבריו לא הצליחו להסביר איך היבשות הגדולות והכבדות יכולות להתפצל ולנוע ממקום למקום. תורתו של וגנר נגנזה, אך כמו מהפכות אחרות בהיסטוריה של המדע - גם זו שהציע וגנר תססה במשך שנים רבות. עם השנים השתכללו כלי המחקר, נערכו עוד ועוד תצפיות, ובסופו של דבר נאספו עדויות חדשות על המתרחש בליתוספרה של כדור הארץ.

כבר בשנים 1872-1876 גילו חוקרים בריטים כי בקרקעית שבמרכז האוקיינוס האטלנטי מתרומם רכס הרים תת-ימי גבוה מאוד. גילויים חדשים על טיבו של הרכס הלכו והצטברו, ומאז מלחמת העולם השנייה התגלו באוקיינוס השקט ובאוקיינוס ההודי רכסים דומים. כן התברר כי במרכזם של כל הרכסים האלה מצוי בקע עמוק, וכי הבקע הוא קו של פתיחה בליתוספרה של כדור הארץ והחומר החודר דרכו הולך ומרחיק את יבשות העולם אלה מאלה.

מחקרים מאוחרים יותר גילו כי קיימת סימטריה משני צידיו של כל אחד מהרכסים: בדיקת גילם של הסלעים משני הצדדים הראתה כי כאשר מתרחקים ממרכז הרכס אל שני הצדדים, גילם של הסלעים עולה בהתאמה. כך קורה גם בבדיקת ההיפוך של הקטבים המגנטיים של כדור הארץ - כאשר סקרו מדענים את קרקעית האוקיינוס האטלנטי, הם גילו כי משני צידיו של הרכס המרכז-אוקייני נמדדים כיווני מגנטיות זהים בסלעים בני אותו הגיל (איור 11).

איור 11

הסימטריה בגיל ובכיוון השדה המגנטי משני צידיו של רכס מרכז אוקייני (כדור הארץ והסביבה)

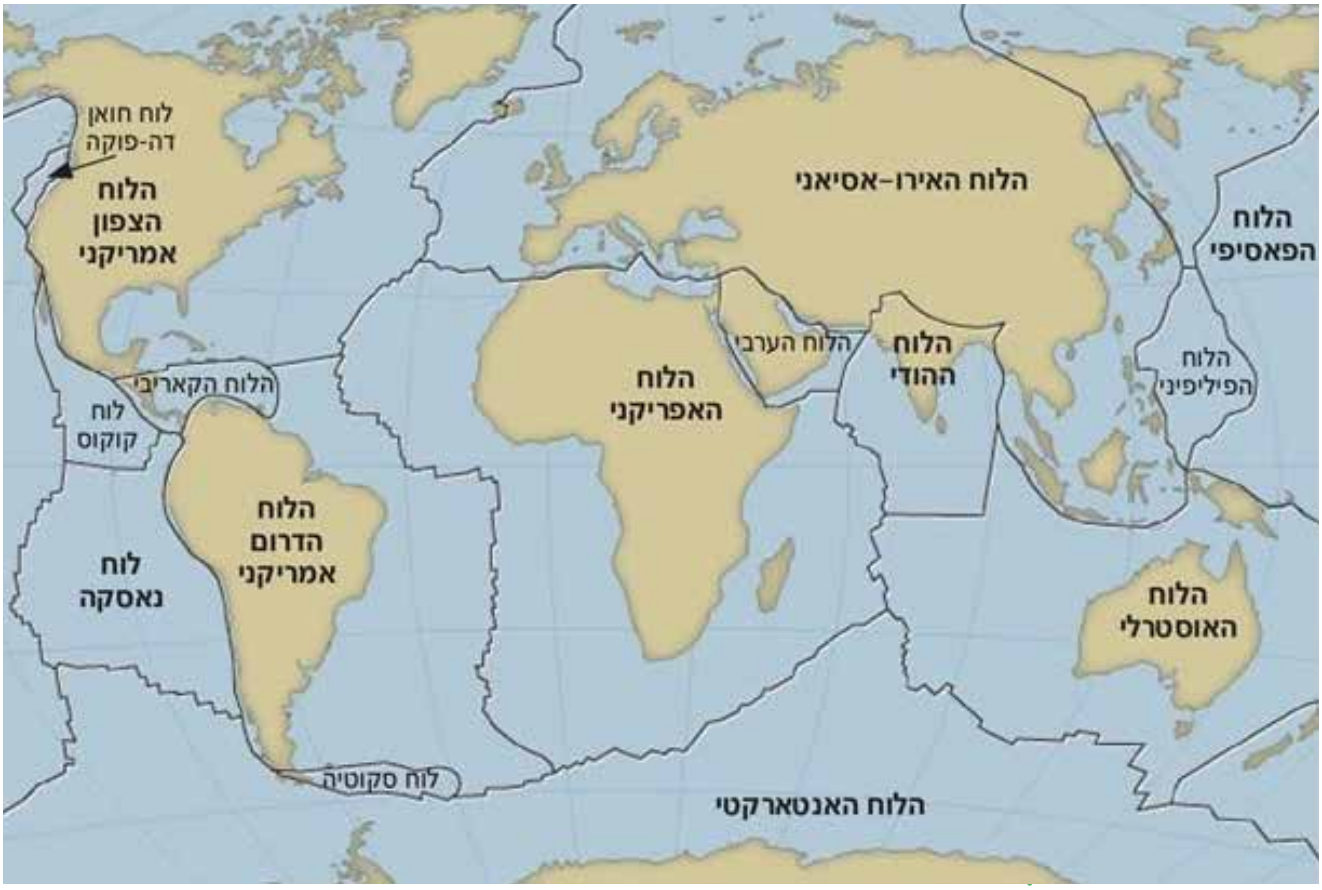
הסימטריה של גיל הסלעים, והסימטריה בכיווני המגנטיות בסלעים משני צידיו של הרכס, סיפקו הוכחה לכך שהליתוספרה האוקיינית החדשה, העולה במרכז הרכס, דוחפת את הקרקעית שמשני צידי הרכס באופן סימטרי ומרחיקה את היבשות זו מזו. וגנר טען כבר בראשית המאה ה-20 כי היבשות נעות. כיום, לאחר שהצטברו עדויות אלה ואחרות, מסתבר כי לא רק היבשות נעות כפי שסבר וגנר - גם הליתוספרה המצויה מתחת לאוקיינוסים נעה, והליתוספרה של כדור הארץ כולו נחלקת ללוחות טקטוניים הנעים ללא הרף זה ביחס לזה.

הלוחות הטקטוניים

הליתוספרה כולה - קרום כדור הארץ והשכבה המוצקה שמתחתיו - נחלקת ללוחות המכונים "לוחות טקטוניים". רוב הלוחות מורכבים מליתוספרה יבשתית וליתוספרה אוקיינית (לוח "מעורב") ומיעוטם מורכבים מליתוספרה אוקיינית בלבד. מחקרים רבים מראים כי בליתוספרה קיימים סדקים ושברים רבים, המהווים קווי גבול בין הלוחות השונים (איור 12).

מספר הלוחות המרכיבים את הליתוספרה הוא 15, בהם 7 לוחות גדולים ו-8 לוחות קטנים, שמתרחשות ביניהם תנועות שונות. מערכת התנועות המתקיימת בין הלוחות מכונה "**טקטוניקת הלוחות**". הלוחות נעים בתנועה איטית זה ביחס לזה, בקצב של סנטימטרים בודדים בשנה והתופעות הנוצרות בגבולות שבין הלוחות מושפעות מכך שהליתוספרה האוקיינית היא דקה וכבדה ואילו הליתוספרה היבשתית היא עבה וקלה. תנועת הלוחות הטקטוניים היא איטית, אמנם, אך יש לה השפעה רבה על השינויים המתחוללים על פני כדור הארץ ועל קיומם של אירועים קיצוניים כרעידות אדמה והתפרצויות געשיות.

טקטוניקת הלוחות
מערכת התנועות של הלוחות המרכיבים את הליתוספרה (קרום כדור הארץ והשכבה העליונה של המעטפת), זה ביחס לזה. מערכת התנועות שבין הלוחות מסבירה רבות מן התופעות הגאולוגיות המתרחשות על פני כדור הארץ.



איור 12

הלוחות המרכיבים את הליתוספרה של כדור הארץ
(כדור הארץ והסביבה)

א. עיינו במפת הלוחות (איור 12) ורשמו את הלוח הטקטוני שאליו משתייכת כל אחת מהמדינות הבאות: ישראל, ספרד, הודו, אוסטרליה, ברזיל, מכסיקו, ערב הסעודית, בריטניה.

ב. ציינו לגבי כל לוח האם הוא מכיל ליתוספרה יבשתית, ליתוספרה אוקיינית או את שתיהן.

זרמי הערבול (קונבקציה) במעטפת

במעטפת העליונה קיימים זרמי ערבול - זרמים שיש להם השפעה רבה על המתרחש בליתוספרה של כדור הארץ. כיצד נוצרים זרמים אלה? מקור החום של כדור הארץ הוא בגלעין, וככל שמתרחקים

ממנו הטמפרטורה יורדת בהדרגה. במעטפת העליונה הסלעים נוזליים למחצה, צמיגיים וחמים. הסלעים הצמיגיים והחמים עולים כלפי מעלה בדומה לתבשיל חם בתוך סיר המונח על אש הכיריים.

במהלך עלייתם, ככל שהם מתקרבים לליתוספרה - הסלעים החמים מתקררים והם נוחתים חזרה מטה, למעמקים. כשהסלעים המתקררים מגיעים למטה הם מתחממים שוב, עולים כלפי מעלה, מתקררים ויורדים שוב - וחוזר חלילה. כך נוצרים במעטפת תאי זרימה, הנקראים "זרמי ערבול". זרמי הערבול האלה, הם היוצרים את התנועה בין הלוחות הטקטוניים המרכיבים את הליתוספרה.

זרמי ערבול (קונבקציה)
תאי זרימה במעטפת של כדור הארץ. בכל תא כזה עולה חומר חם ממעמקי המעטפת, וכשהוא מתקרב לליתוספרה הוא מתקרר ונוחת חזרה, מתחמם ועולה וחוזר חלילה. זרמי הערבול הם הגורמים ללוחות המרכיבים את הליתוספרה לנוע.

סוגי התנועות בין הלוחות

תנועת הלוחות גורמת לכך שהיבשות והאוקיינוסים משנים ללא הרף את מקומם ואת צורתם, והיא מלווה בהתרחשותן של תופעות שונות, חלקן דרמטיות ביותר, כמו רעידות אדמה והתפרצויות געשיות. התנועה של הלוחות השונים נמשכת זמן רב מאוד - מיליונים רבים של שנים - והיא מתרחשת גם בימינו. נמנה את שלושת סוגי התנועות בין הלוחות, ואת התופעות הקשורות אליהם.

1. פתיחה והתרחקות

תהליך של פתיחה בין הלוחות הטקטוניים והתרחקות שלהם זה מזה מתרחש כאשר המגמה לוהטת, שמקורה בחומר הסלעי החם המצוי באסתנוספרה, עולה בין שני תאי ערבול. המגמה העולה פורצת דרך סדקים הקיימים בליתוספרה היבשתית של כדור הארץ. כשחומרי המגמה המותכים והלוהטים באים במגע עם פני השטח הקרים של כדור הארץ - הם מתגבשים, הופכים לסלעים מוצקים ויוצרים רכס ארוך של **הרי געש**. במשך מיליוני שנים, במהלך התפרצויות חוזרות ונשנות, נוצרים עוד ועוד סלעים כאלה ברכס הרי הגעש. סלעים אלה יוצרים ליתוספרה בזלתית חדשה, ששטחה הולך ומתרחב.

הליתוספרה החדשה, דקה וכבדה - מפרידה בין שני חלקי היבשת שדרכה חדרה, ודוחקת אותם לשני הצדדים. עם השנים תוצף במים המגיעים מהאוקיינוס הקרוב. זהו תהליך של פתיחה והתרחקות, היוצר שתי יבשות נפרדות וביניהן אוקיינוס ההולך ומתרחב. במרכז האוקיינוס מצוי רכס הרי געש הנקרא "**רכס מרכז-אוקייני**" (איור 13).

זהו תהליך ההתהוות של האוקיינוסים (פרק 2.3), תהליך שבסופו נוצרו האוקיינוסים הקיימים כיום - אוקיינוסים שבמרכזם רכסים ארוכים וגבוהים של הרי געש פעילים. תהליך היווצרות של אוקיינוס חדש מתרחש, למשל, בים סוף.

הר געש

הר ובו לוע שדרכו פורצת אל פני השטח לבה שמקורה במגמה לוהטת ממעמקי המעטפת. הלוע מוקף בסוללה של הסלעים אשר התגבשו לאחר ההתפרצות.

איור 13

פתיחה והתרחקות בקרום כדור הארץ (כדור הארץ והסביבה)

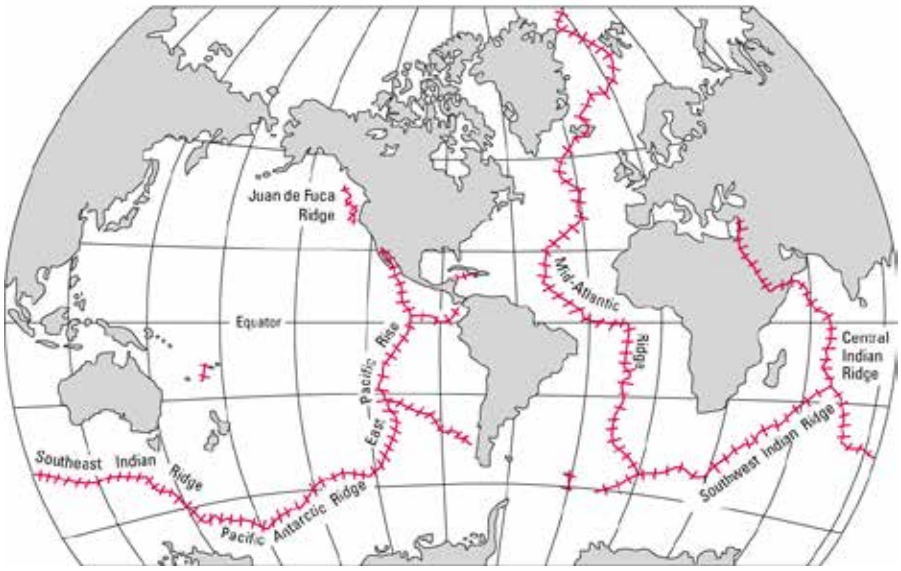
א. לבה פורצת דרך סדקים בקרום היבשת

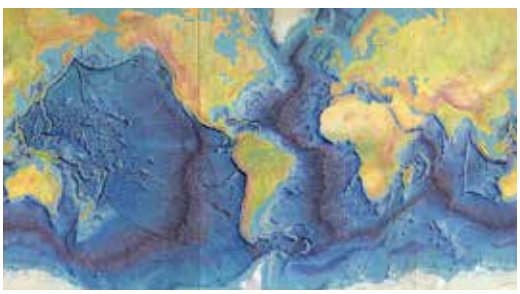
ב. אוקיינוס חדש נוצר

ג. האוקיינוס ממשיך להתרחב, ובמרכזו - רכס מרכז אוקייני

רכסים מרכז-אוקייניים קיימים מתחת לפני המים באוקיינוס האטלנטי, באוקיינוס ההודי ובאוקיינוס השקט (איור 14). אורכם הכולל של כל הרכסים המרכז-אוקייניים בעולם הוא כ-70,000 ק"מ (אורך הגדול פי כמה מסך אורכם של כל רכסי ההרים הקיימים על פני היבשה, וכמעט כפול מהיקפו של כדור הארץ!). שטחם הכולל הוא כ-20% משטחו של כדור הארץ! רוחבו של כל רכס מרכז-אוקייני מגיע למאות ואף לאלפי ק"מ, והוא מתנשא לגובה 2,000-3,000 מ' מעל לקרקעית הים. במקומות מסוימים הרכס המרכז-אוקייני גבוה עד כדי כך שהוא צץ מעל לפני המים בצורת אי. כאלה הם, למשל, איסלנד או האיים האזוריים.

הלוחות הטקטוניים מתקרבים זה לזה, שוקעים זה מתחת לזה, ובתוך כך הם נלחצים, מתנגשים ונדחסים. כיצד קורה הדבר? כדור הארץ אינו משתנה בנפחו ובממדיו, ועל כן, כאשר באזורי הרכסים המרכז-אוקייניים נוצרת ליתוספרה חדשה (כפי שראינו בסעיף הקודם) - באזורים אחרים, שבהם זרמי הערבול של המגמה זורמים כלפי מטה, הלוחות הטקטוניים מתקרבים זה לזה. ההתקרבות בין הלוחות - גופי סלע אדירי ממדים, היא רבת עוצמה, והיא יוצרת תהליכי דחיקה ודחיסה, קימוט של סלעים, והתרוממות של רכסי הרים גבוהים ושרשרות איים המתרוממות מתוך מעמקי האוקיינוסים. תהליכים אלה מתרחשים במשך מיליוני שנים, וגם כיום אזורי ההתקרבות מאופיינים ברעידות אדמה ובהתפרצויות של הרי געש. רעידות האדמה מתרחשות בשל החיכוך החזק שנוצר כאשר לוח אחד שוקע מתחת ללוח אחר. הרי הגעש נוצרים כשהליתוספרה האוקיינית השוקעת נתקלת באסתנוספרה החמה, מתחממת וניתכת, וחלקים מותכים עולים ופורצים אל פני כדור הארץ כהרי געש.





איור 14

רכסים מרכז אוקייניים. (למעלה) **תפוצה עולמית של רכסים מרכז אוקייניים** (למטה) **מפה של מארי ת'ארפ וברוס הייזן, מצוירת על ידי היינריך ברן (1977), המציגה את תבליט קרקעית האוקיינוסים, עם מערכת הרכסים המרכז-אוקייניים** (Wikiwand)

איור 15

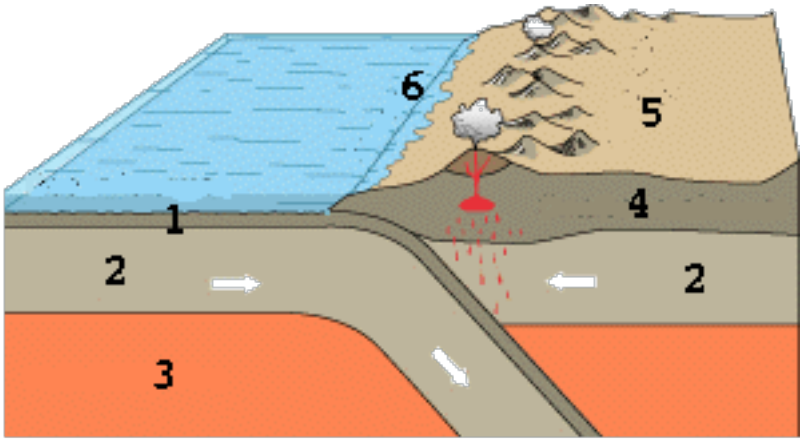
השלבים של התנגשות תת-היבשת ההודית באסיה ויצירת הרי ההימלאיה (כדור הארץ והסביבה)

2. התקרבות

קיימים שלושה טיפוסים אפשריים של גבולות התקרבות:

א. התקרבות לוחות יבשתיים - כאשר שני לוחות יבשתיים מתנגשים זה בזה התנגשות חזיתית נוצרות שרשרות הרי קימוט. כך נוצרו שרשרות ההרים הגדולות בעולם וקשתות האיים. הרי ההימלאיה ורמת טיבט נוצרו למשל, כאשר תת היבשת ההודית התנגשה ביבשת אסיה ונדחקה תחתיה (איור 15). אזור זה עדיין מתרומם כל שנה ב-5 ס"מ. גם הרי האלפים והרי הפירנאים נוצרו מהילחצות איטליה וחצי האי האיברי אל אירופה.

ב. התקרבות לוח אוקייני ולוח יבשתי - מרבית הלוחות מורכבים מליתוספרה אוקיינית ומליתוספרה יבשתית. כאשר לוח שבצדו יש ליתוספרה ימית, מתנגש בלוח שבצדו יש ליתוספרה יבשתית, הלוח הימי הצפוף והכבד יותר נוחת אל מתחת ללוח היבשתי (איור 16). תהליך זה נקרא "**הפחתה**", שכן מסה של סלעים מהקרום נגרעת, מופחתת ממנו. במקום הנחיתה נוצרת תעלה עמוקה הנקראת **תעלה אוקייאנית**. בזמן הנחיתה נוצר חום רב ולחץ, בשל החיכוך בין שני הלוחות, הגורמים להתכה איטית של הלוח שיהפוך להיות חלק מהאסתנוספרה. קצב ההתכה איטי הרבה יותר מקצב הצניחה של הלוח הכבד ולכן נוצר לפעמים מצב שהפלטה נמצאת במצב קשיח עד לעומקים של 700 ק"מ, וגורמת לרעידת אדמה. האנרגיה האצורה בחיכוך כזה מתפרקת לעתים בצורה של רעידת אדמה.



איור 16

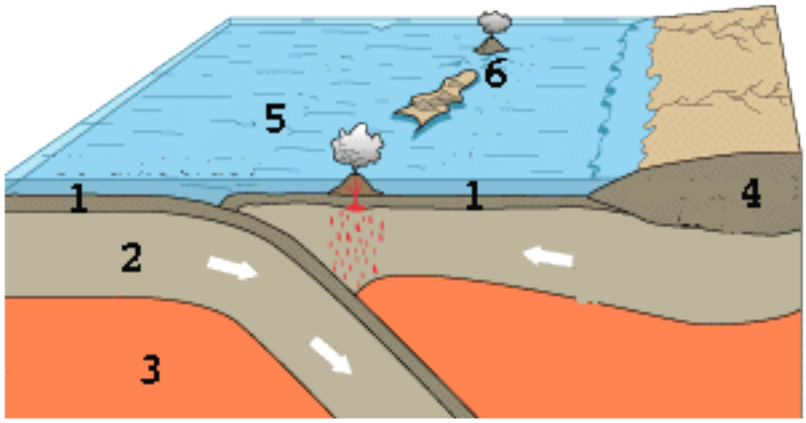
גבול התקרבות בין לוח אוקייני ללוח יבשתי (Wikiwand)

1 - קרום אוקייני
2 - ליתוספרה
3 - אסתנוספרה
4 - קרום יבשתי
5 - קשת וולקנית
6 - תעלה אוקיינית

הרי הגעש נוצרים כשהליתוספרה האוקיינית השוקעת נתקלת באסתנוספרה החמה, מתחממת וניתכת, וחלקים מותכים עולים ופורצים אל פני כדור הארץ כשורה של הרי געש הנקראת **קשת וולקנית.**

דוגמאות: לוח נסקה נדחק מתחת ליבשת אמריקה הדרומית וכך נוצרו הרי האנדים. לוח האוקיינוס השקט, למשל הבנוי מסלעים כבדים יחסית, נדחק בקצהו אל מתחת ללוח האמריקאי ונוצרה תעלה.

ג. התקרבות לוחות אוקייניים - גם בהתכנסות שני לוחות אוקייניים מתפתחת תעלת הפחתה. לוח אחד מתכופף אל מתחת האחר ומופחת חזרה אל תוך המעטפת. נחיתת הלוח התחתון מייצרת כוחות גזירה אשר גורמים למשיכת הלוח העליון גם הוא אל תוך כדור הארץ (בדומה לשקע המתפתח סביב סכין המוחדרת לצנצנת דבש). מרכיבים נדיפים הנפלטים מהלוח הנוחת (בעיקר מים) גורמים לירידת טמפרטורת ההתכה בלוח העליון. המגמה הנוצרת בלוח העליון מתרוממת מעלה ומתפרצת בשורה של הרי געש. הרי הגעש המבצבצים מעל פני המים הופכים לאיים. שורת איים כזו הסמוכה לאזור הפחתה נקראת **קשת איים.**



איור 17

גבול התקרבות בין לוחות אוקייניים (Wikiwand)
1 - קרום אוקייני
2 - ליתוספרה
3 - אסתנוספרה
4 - קרום יבשתי
5 - תעלה אוקיינית
6 - קשת איים

איור 18

טבעת האש

(כדור הארץ והסביבה)

קשתות האיים באוקיינוס השקט

סביב האוקיינוס השקט מצויים גבולות בין כמה לוחות שמתרחשות ביניהם התנגשות ודחיסה בלתי פוסקות. בגלל הפעילות הנמרצת של רעידות אדמה והרי געש באזור זה, הוא מכונה "**טבעת האש**" (איור 18).

במערב האוקיינוס השקט מצויות כמה שרשרות איים שצורתן צורת קשת, המהוות חלק מטבעת האש. קשתות האיים הללו נוצרו באזור זה שכן שם שוקע הקרום האוקייני מתחת לשולי היבשת השקועה מתחת לפני הים. לקשתות האיים יש מאפיינים משותפים:

- לכולן צורת קשת, ומכאן כינויין. צידה הקמור של הקשת פונה לאוקיינוס וצדה הקעור פונה ליבשת, הרחוקה מן הקשת מרחק של כמה מאות קילומטרים.

- בצידן הקמור של קשתות האיים יש תהומות או תעלות עמוקות, היוצרות שקעים עמוקים לאורך אלפי קילומטרים. כך, למשל, בין יפן לפיליפינים נוצר **שקע מריאנה** - שקע שעומקו כ-11,000מ' מתחת לפני הים.

- קשתות האיים הן אזורים של רעידות אדמה תכופות, ומנתונים שנאספו באזורים אלה עולה שמוקדי הרעידות הולכים ומעמיקים ככל שמתרחקים מן האיים, או מן האוקיינוס ומתקרבים ליבשת הסמוכה אליהם.

- בקשתות האיים מתרחשת פעילות געשית ערה ואינטנסיבית, והרי הגעש באזורים אלה פעילים מאוד.

'טבעת האש'

כינוי לאזור הנמצא משני עבריו של האוקיינוס השקט והמתאפיין בפעילות וולקנית מרובה. פעילות זו באה לידי ביטוי ברעידות אדמה ובהתפרצויות תכופות של הרי געש. מרבית רעידות האדמה והתפרצויות הרי הגעש בעולם מתרחשים בטבעת האש.

3. החלקה

בתהליך ההחלקה שני לוחות טקטוניים מחליקים זה לצד זה, בצורה אופקית, לאורך עשרות עד מאות קילומטרים, כלומר שבר תזוזה אופקי.

שברי התזוזה האופקית הגדולים בעולם הם: שבר סן אנדראס בקליפורניה, שבו שני גושים נעים לכיוונים שונים לאורך כ-400 ק"מ; השבר הצפון אנטולי בטורקיה, שהתנועה בין שני צידיו מסתכמת גם היא בכ-400 ק"מ; בקע הירדן (חלק ממערכת השבר הסורי אפריקני), מצוי בין הלוח האפריקני והלוח הערבי - ולאורכו חלה תזוזה אופקית בין הלוחות. למעשה, שני הלוחות נעים צפונה, אולם הלוח הערבי, ממזרח לשבר, נע במהירות רבה יותר, בכ-4 מ"מ לשנה. התוצאה היא שהלוח הערבי זז למרחק של 105 ק"מ צפונית ללוח האפריקני.

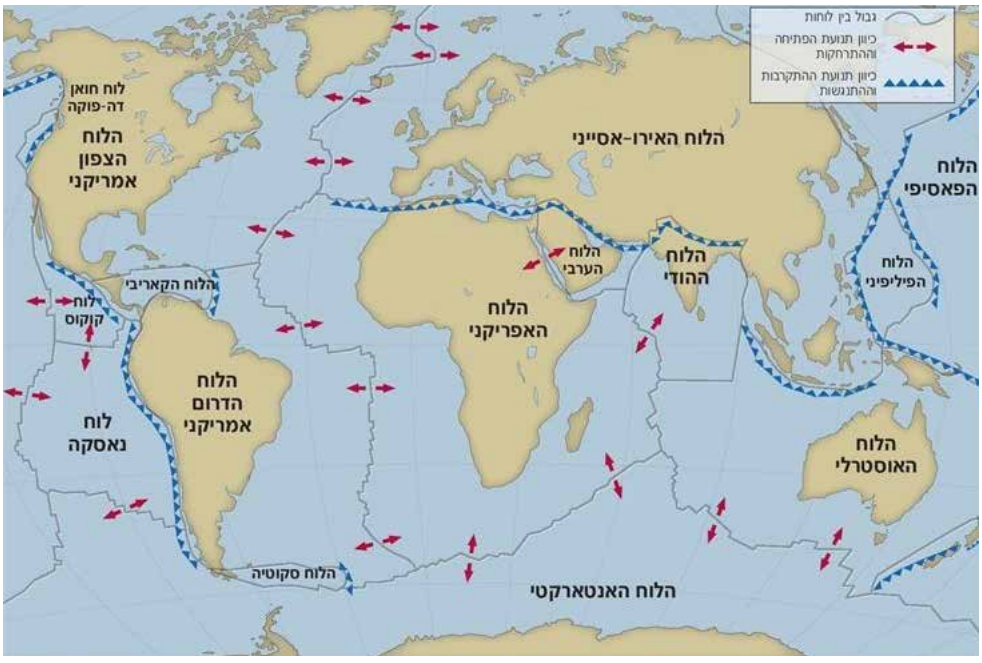
גם ברכסים המרכז אוקייאנים ניתן לראות כי אינם רצופים, אלא קטועים ע"י שברים המסיטים את הכס לאורכם. אלו **שברי הטרנספורם** (שברים המחברים שני גבולות אחרים של לוחות). מבחינה גיאומטרית, מוסט הרכס האמצע אוקייאני לאורך שברים אלו ימינה או שמאלה, אך מגמת כיוונו הכללי נשמרת, כלומר מרכיב התנועה העיקרי הוא אופקי.

קצב תנועתם של הלוחות

ראינו שגיל הסלעים משני צידיו של רכס מרכז אוקייני הוא זהה. כאשר בודקים שני גושי בזלת בני אותו הגיל משני צידי הרכס, ומודדים את המרחק ביניהם, אפשר לחשב את קצב פתיחת האוקיינוס, הלוא הוא קצב תנועת הלוחות.

מסתבר שקצב התנועה של הלוחות ברכס מרכז אוקייני הוא מהיר - 10 ס"מ בשנה. בשברי ההחלקה הקצב שונה: התנועה על שבר סן אנדראס ועל השבר הצפון אנטולי בטורקיה היא בקצב של 2.5 ס"מ בשנה, ובשבר הסורי-אפריקני הקצב הוא 0.5 ס"מ בשנה. באזורי ההתנגשות הקצב גבוה יותר - באינדונזיה, למשל, נמדדה נחיתת הלוח בקצב של 30 ס"מ בשנה!

לסיכום: הלוחות הטקטוניים המרכיבים את שטח הפנים של כדור הארץ, נעים בכיוונים (איור 19) ובקצבים שונים. לסרטון המסכם את הנלמד בפרק זה לחץ כאן.



איור 19

הלוחות הטקטוניים וסוגי התנועות השונים בינהם (כדור הארץ והסביבה)

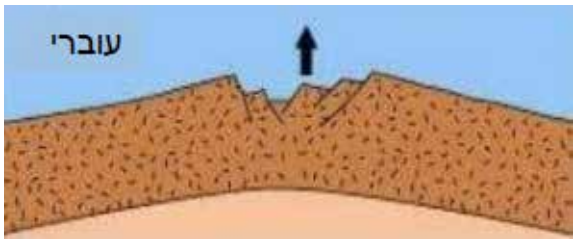
2.3 אגני האוקיינוסים

מבנה אגני האוקיינוסים משתנה ללא הרף בקצב גיאולוגי. היבשות נעות על פני כדור הארץ בקצב של סנטימטרים ספורים לשנה, על גבי הלוחות הטקטוניים. במקומות אחדים מתבקעות היבשות לשניים ובבקע הנוצר, הולך ומתפתח ים חדש ההופך ברבות השנים לאוקיאנוס של ממש. במקומות אחרים האוקיאנוס הולך ומצטמצם והיבשות שבשוליו הולכות ומתקרבות זו לזו, עד אשר הן מתנגשות ונלחצות זו לזו, מתקמטות ובונות שרשרת הרים, כך שצורתם וגודלם של כל האגנים המוכרים לנו כיום משתנים באופן רצוף.

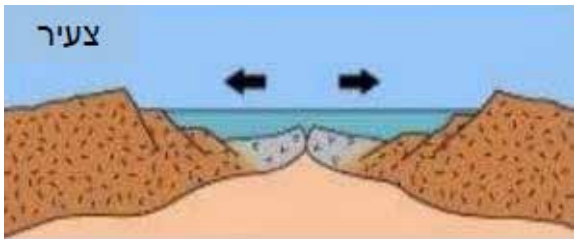
תנועת הלוחות אינה הסיבה היחידה לשינויים. סיבה נוספת היא הרבדת משקעים: סחופת המוסעת מן היבשות אל האגנים האוקיאניים, שוקעת בשולי היבשות. מדפי היבשה עצמם מתבלים או נחתכים על ידי ערוצים תת-ימיים, דרכם מוסעת הסחופת אל האוקיינוס העמוק. באוקיינוס העמוק מצטרפים משקעים פלאגיים (ימיים) לסחופת שמקורה ביבשה, ומכסים את התבליט המקורי.

אנו יכולים לחזות את מחזור החיים של כל אגן אוקייני בנפרד: "הולדת" אגן בבקע ראשוני, התרחבות לגודל מירבי, בהמשך הצטמצמות האגן ולבסוף סגירתו באופן מוחלט, על פי המתואר בשלבים 1-6 (מקור: Deep Ocean Facts) ובטבלה 1:

1. **שלב עוברי** - זרם חדש של מגמה לוהטת מתחיל לזרום מגג הגלעין, דרך המעטפת והאסתנוספרה אל בסיס הליתוספרה. כאשר זרם כזה פוגע בבסיס הליתוספרה מתחת ליבשת קיימת, הוא גורם בשלב הראשוני להתרוממות של היבשת בשיעור של קילומטרים אחדים, ויוצר על פני השטח רכס מוארך. יחד עם התרוממות הרכס, חלה בבסיסו התכה של חלקה התחתון של הליתוספרה, ההולכת ומדקקת כתוצאה מהתגובה למפגש עם זרם המגמה. עם הגעת זרם המגמה לבסיס הליתוספרה, הופך הזרם האנכי לאופקי, דבר המוסיף על התרוממות היבשת, גם היווצרות בקע עמוק בציר הרכס המוארך. היווצרות הבקע הזה מלווה בהדקקות נוספת של הליתוספרה, שחוזקה התערער כתוצאה ממאמצי המתיחה המכנים בקרבת פני השטח מצד אחד, ומתגובה לתהליכים הכימיים המתרחשים במעמקים בין החומר המגמתי העולה לבין סלעי הליתוספרה מצד אחר.



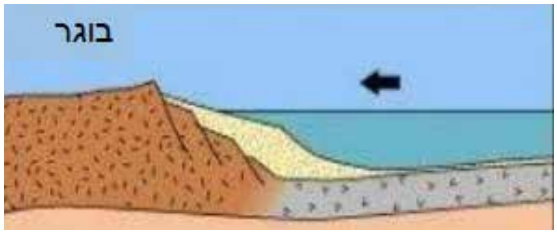
2. **אוקיינוס צעיר** - בשלב מסוים מתדקק קרום כדה"א עד כדי כך שחלק מהחומר של המעטפת העליונה מתחיל לפרוץ אל פני השטח בסדרה של הרי געש. בתהליך עליית המגמה נפרדים ממנה הגזים (בעיקר פחמן דו-חמצני, אדי מים וגופרית) והחלק הנותר נקרא לבה. הלבה פורצת אל פני השטח, מתמצקת ויוצרת קרום בזלתי חדש במקום בו נבקע הקרום היבשתי. קרום זה הוא דק יחסית ובעל **משקל סגולי**



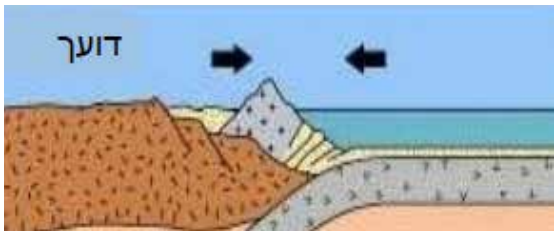
משקל סגולי
המשקל של 1 סמ"ק (סנטימטר מעוקב) של חומר. לכל חומר - משקל סגולי שונה. ההשוואה בין החומרים השונים נעשית בתנאי לחץ וטמפרטורה אחידים.

גבוה ומהווה את ראשיתו של הקרום האוקיאני. רציפות בזרימת זרם המגמה אל בסיס הרכס תביא גם לשקיעת הבקע המצוי במרכז הרכס עד להצפתו במי-ים. סחופת מהיבשה מתחילה להגיע לאגן ולבנות את אזורי שולי היבשה. האגן הצעיר הוא צר ביותר והסחופת המוסעת מן היבשות עשויה לכסות, בתחילה את כל שטח קרקעיתו. עם התרחבות האגן מתחיל להיווצר אזורים הרחוקים מן השוליים במידה כזו שאספקת הסחופת אליהם, מן היבשות אינה רציפה, אלו הם אזורי הקרקעית העמוקה של האוקיינוס.

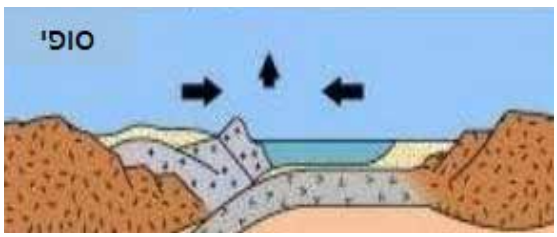
3. **אוקיינוס בוגר** - בשלב מאוחר יותר תתחיל הפעילות הוולקנית להיות רציפה ותמידית ולאט לאט יתחיל להצטבר בלב הבקע המוצף במי הים קרום ימי בזלתי של כדה"א. קרום בזלתי זה ממשיך להתפתח ולהצטבר, תוך שהוא מתמגנט לסירוגין בכיוון נורמאלי והפוך וממשיך לדחוף את שוליו היבשתיים הלאה ממרכז האוקיינוס המתהווה. האגן הימי החדש הולך וגדל עד כדי יצירת אוקיאנוס של ממש עם רכס התפשטות וולקני במרכזו ובקע במרכז הרכס.



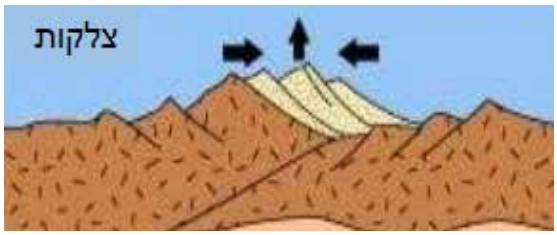
4. **אוקיינוס דועך** - בשלב זה מתחילים להתפתח גבולות הפחתה בהיקף האוקיינוס, בקטע אחד/בקטעים אחדים. בשלב זה שיעור ההתרחבות נטו של האגן, הוא שיעור ההתפשטות ברכס פחות שיעור ההפחתה בתעלות. עם התפתחות אזורי ההפחתה, קטן שיעור ההתרחבות ובהמשך עשויה אף להתחיל הצטמצמות של האגן. מאחר שנפח כדור הארץ ושטח פניו נשארים קבועים, אזי התרחבות האוקיינוס במקום אחד מחייבת פיצוי על ידי יצירת אזור הפחתה באזור אחר, כך שהיווצרות אוקיינוס מתרחב מובילה לשינויים בתנועת הלוחות, ולהיווצרות גבולות הפחתה. האוקיינוס השקט מצטמצם: הרכס שבו אמנם מתפשט במהירות אולם, הוא מוגבל משלושת צדדיו בגבולות הפחתה, וקצב ההצטמצמות בגבולות אלה עולה על קצב ההתפשטות ברכס המזרח פסיפי.



5. **שלב סופי** - הים התיכון הוא אוקיינוס המצוי בשלב האחרון של חייו, כאשר הלוח האפריקני נוחת מתחת ללוח האירופאי. ההתנגשות בין שני לוחות אלה כבר יצרה, עד כה שרשרות הרים ביבשת אירופה - האלפים, הפירנאים והאפנינים. כמו כן נוצרו קשתות איים פעילות בצפון מזרח הים התיכון (איי יוון), שם מתכלה שארית הקרום האוקייני של הים התיכון.



6. צלקות (קימוט) - השלב השישי יתרחש כאשר ייבלע הקרום האוקייני של הים התיכון כליל והגוש של יבשת אפריקה יתנגש בגוש היבשתי של אירופה. גם הרי ההימלאיה נוצרו בצורה כזו: יבשת הודו, שהיתה מחוברת בעבר לאנטרטיקה, ניתקה ממנה, נעה במהירות צפונה, התנגשה באסיה ובנתה באזור ההתנגשות את הרי ההימלאיה. אזור התנגשות זה פעיל עדיין והרי ההימלאיה ממשיכים לגדול, כיוון שהודו עדיין נעה כלפי אסיה. מהאוקיינוס שנסגר בין יבשות הודו ואסיה נותר רק שריד יחיד - "צלקת" - קו אינדוס, שבהרי ההימלאיה, שהוא אזור ה"תפר" שבין שתי היבשות. הופעתו בדרך כלל כחריץ, שבו "נצבט" חומר אוקייני, כגון בזלת ומשקע ים עמוק.



טבלה 1. דוגמאות לאוקיינוסים בשלבי התפתחות שונים

שלב	דוגמאות	סוג התנועה העיקרי	קווי תבליט מאפיינים
1. עוברי	עמקי ביקוע במזרח אפריקה	התרוממויות ומתח בקרום	עמקי ביקוע
2. צעיר	ים סוף, מפרץ קליפורניה	השתפלות והתרחבות	ימים צרים עם חופים מקבילים ושקע אמצעי לאורכם.
3. בוגר	האוקיינוס האטלנטי	התרחבות	אגן אוקייני עם רכס אמצע אוקייני פעיל.
4. דוגר	האוקיינוס השקט	הצטמצמות	תעלות, קשתות איים ושרשרות הרים צעירים בשוליים מסביב לאגן.
5. סופי	הים התיכון	הצטמצמות והתרוממויות	שרשרות הרים צעירים בשולי היבשות הסמוכות
6. צלקות	קו האינדוס בהרי ההימלאיה	הצטמצמות והתרוממויות	שרשרות הרים צעירים בשולי היבשות המתנגשות

למרות שלכל אחד מהימים והאוקיינוסים יש מבנה ומאפיינים ייחודיים לו, נהוג לחלק אותם לשלושה חלקים עיקריים בצורה שיוצרת מכנה משותף (איור 26):

1. **שולי היבשת** (continental margin) - תחום המעבר שבין הים ליבשה. מתחלק לשלושה:

- **מדף היבשת** (continental shelf) - אזור בעל שיפוע מתון יחסית (כאחד לאלף) שהולך ומעמיק בהדרגה.
מדף היבשת הוא אזור בעל עניין רב מאוד מבחינת ניצולו הכלכלי, מכיוון שעומקו אינו רב והתנאים ששררו בו אפשרו היווצרות מינרלים רבים ובמיוחד נפט. מתוך כך ברור מנין העניין הרב שמגלות מדינות שונות בהיבטים המשפטיים הקשורים במדף היבשת.

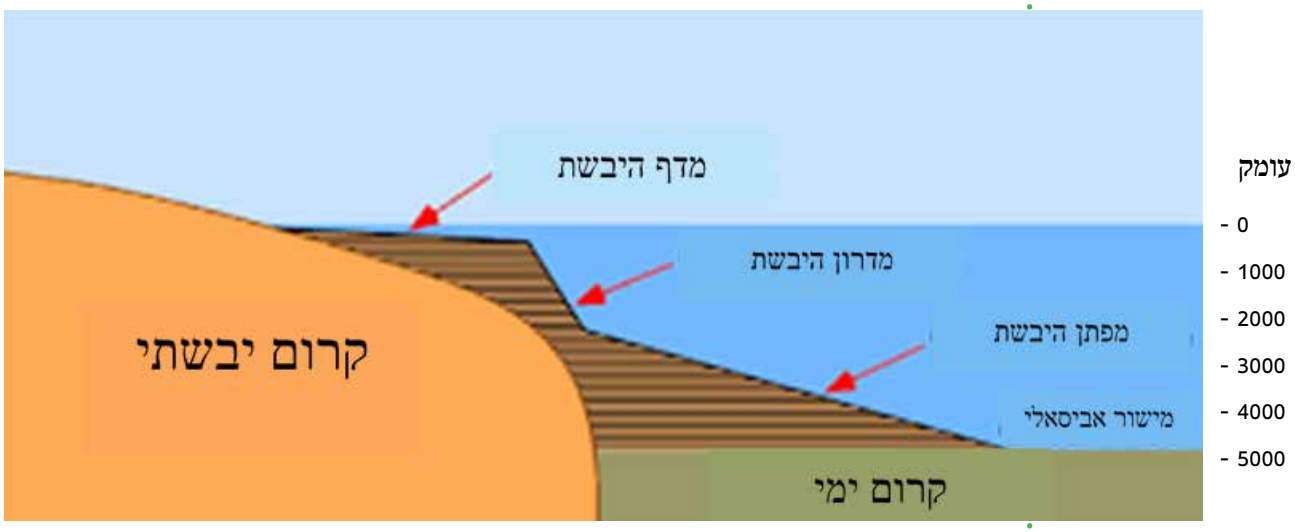
רוחבו של מדף היבשת משתנה ממקום למקום. יש בעולם מדפים אדירים, מאות ואלפי קילומטרים רוחבם. מדפי היבשת הגדולים בעולם נמצאים ליד ניו-פאונדלנד, בצפון מזרח אמריקה הצפונית, באלסקה והרחב שבהם משתרע לאורך 1210 ק"מ מול חופי סביר, רוסיה, באוקיינוס הארקטי. לעומת זאת, יש מקומות שבהם מדף היבשת כמעט ואינו קיים ואז ישנו מעבר ישיר מקו החוף לשיפוע היבשת. רוחב מדף היבשת הים-תיכוני של ישראל משתנה מ-50 ק"מ מול אשקלון והוא הולך וצר לכדי כ-20 ק"מ באזור חוף הכרמל. מול ראש הנקרה רוחב מדף היבשת מצטמצם ל-3 ק"מ בלבד והוא נעלם לחלוטין מול טריפולי בלבנון.

המעבר בין מדף היבשת לשיפוע היבשת הינו חד למדי. לנקודת המעבר בין המדף למדרון, בה השיפוע משתנה בצורה חריפה, קוראים **נקודת השבירה של המדף** (shelf break). נקודה זו יכולה להימצא בעומקים שבין 50-350 מ'.

- **מדרון היבשת** (continental slope) - שיפוע תלול (נע בין 1:6 ל 1:40) בסופו של מדף היבשה. יש מקומות בהם המדרון ממש אנכי, מצוקי. ככל שהטופוגרפיה צעירה יותר, היא תלולה יותר (ים סוף לדוגמא). לעתים חרוץ המדרון בערוצים, המהווים המשך לאפיקי נהרות גדולים, או בקניונים תת-ימיים.

איור 26

מבנה האוקיינוסים



- **מפתן היבשת** (continental rise) - שטח מישורי (שיפועים הנעים בין 1:50 ל-1:700), הנוצר מהדרדרות חומרים ממדף היבשת לאורך המדרון ומשתרע בין מדרון היבשת לקרקעית הים העמוקה.

2. **קרקעית הים העמוקה** (ocean basin floor) - קרקעית הים העמוקה תופסת כשליש משטחם של האוקיינוס האטלנטי והאוקיינוס ההודי וכשלושת-רבעי משטחו של האוקיינוס השקט. קרקעית הים העמוקה מתחלקת לשני סוגים:

   - קרקעית המעמקים המישורית, שהיא חלקה. השיפועים הנמדדים בה הם בין 1:1000 ל-1:5000 ואף יותר, כלומר מתונים במידה כזו שניתן להשוותם לרצפה המצויה ברוב הבתים. המישורים העמוקים הללו, הקרויים **המישורים האביסליים** (abyssal plains), מצויים בעקר באוקיינוס האטלנטי, אחדים באוקיינוס ההודי ומעטים מאוד באוקיינוס השקט.

   - **התרוממויות** שונות הקיימות בים (ocean rise), כגון רכסים שונים, הרים ימיים, רמות ותצורות אחרות.

3. **מערכת הרכסים המרכז-אוקיאניים** (mid-ocean ridges) - בכל אוקיינוס, בדרך כלל באמצעו, נמשך רכס רחב שמדרונותיו מתונים והוא מתנשא לגובה של 2-2.5 ק"מ מעל מישורי האוקיינוס. לעיתים בולטים הרכסים מעל לפני המים, כמו במקרה של איסלנד. בשיא הרכס קרועים סדקים ארוכים אשר לבה לוהטת פורצת דרכם מידי פעם ומתמצקת לבזלת. הרכס המרכז-אוקייני בנוי כולו מסלעי בזלת. באוקיינוס האטלנטי ממוקם הרכס במרכז האוקיינוס ונמצא במרחק שווה מן היבשות שמצדדיו. אורכו הכללי מגיע לכ-70,000 ק"מ, גובהו כ-2-3 ק"מ מעל סביבתו ורוחבו מאות ואלפי ק"מ. זו למעשה שרשרת ההרים הגדולה ביותר על פני כדור הארץ. רכסים אלו אינם לגמרי המשכיים, כי אם מוסטים על ידי מערכת של שברים הקרויים 'שברי העתק' או **'שברי טרנספורם'**.

מקורות לפרק זה

סביר, ב., פלכסר, ע., יאיר, י., גינת, ח. ושטסל, ז. 2010. כדור הארץ והסביבה, ספר לימוד בגאוגרפיה ופיתוח סביבה. משרד החינוך, המזכירות הפדגוגית.

3

המים

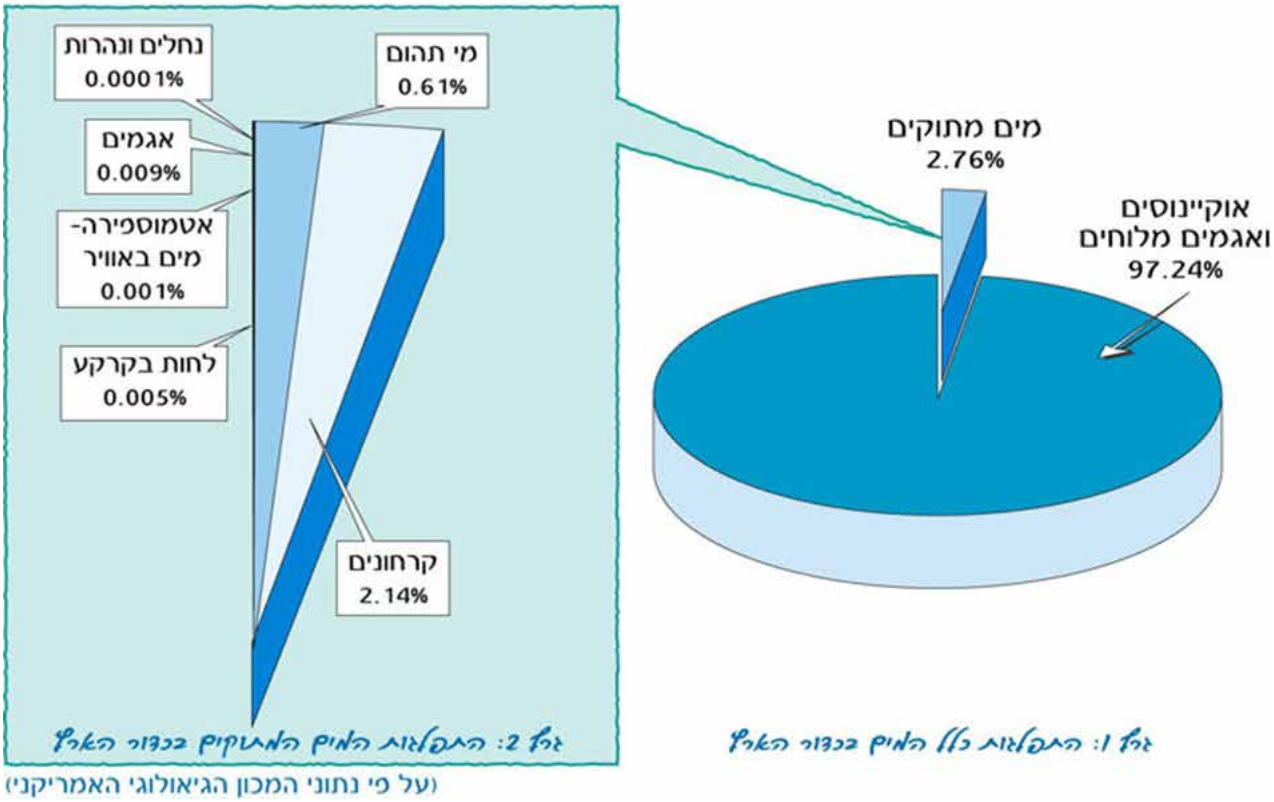
מִיה אלסר

המים הם אחד החומרים השכיחים ביותר בטבע, הם מרכיב חיוני בכל תא חי ונחוצים לקיומם ולפעילותם של כל היצורים החיים. אצל האדם, למשל, מהווים המים כ-60% ממשקל גופו. כמות המים כה גדולה בעולמנו משום שהם תרכובת יציבה ביותר של שניים משלושת המרכיבים השכיחים ביותר במערכת השמש, מימן וחמצן. כ-97% מהמים שעל פני כדור הארץ הם מים מלוחים המצויים באוקיינוסים ובימים המכסים כשני שליש משטח כדור הארץ. שאר המים, כ-3%, הם מים מתוקים, אשר רובם מצויים בקרחונים או נאגרים במי תהום (המגיעים עד לעומק של 4 ק"מ מתחת לפני הקרקע) (איור 1).

המים על פני כדור הארץ נמצאים ב[מחזוריות מתמדת] - מתאדים אל האטמוספרה, יורדים כמי גשמים, זורמים כמי נגר למי תהום ומקווי מים, מתאדים אל האטמוספרה וחוזר חלילה.

איור 1

התפלגות המים בכדור הארץ



3.1 מבנה ואפיון מולקולת המים

על מנת להסביר את מבנה מולקולת המים, נעבור בתחילה על מספר מושגי יסוד:

אטום - החלק הקטן ביותר של החומר שעדיין שומר על תכונותיו. האטום מורכב מגרעין ומספר משתנה של קליפות. בגרעין נמצאים **פרוטון ונויטרון** האחראים למסה של האטום. ה**אלקטרונים** מסודרים ב'קליפות' (רמות אנרגיה) מסביב לגרעין והם אחראים, ביחד עם הפרוטונים, למטען החשמלי של האטום (איור 2א). היסודות הכימיים נבדלים זה מזה במספר הפרוטונים בגרעין. מספר זה קבוע ומהווה את מספרם בטבלה המחזורית (איור 2ב). כיום ידוע על 118 יסודות שנצפו ונחקרו, אך רק 94 מהם הם טבעיים וניתן למצוא אותם על פני כדור הארץ.

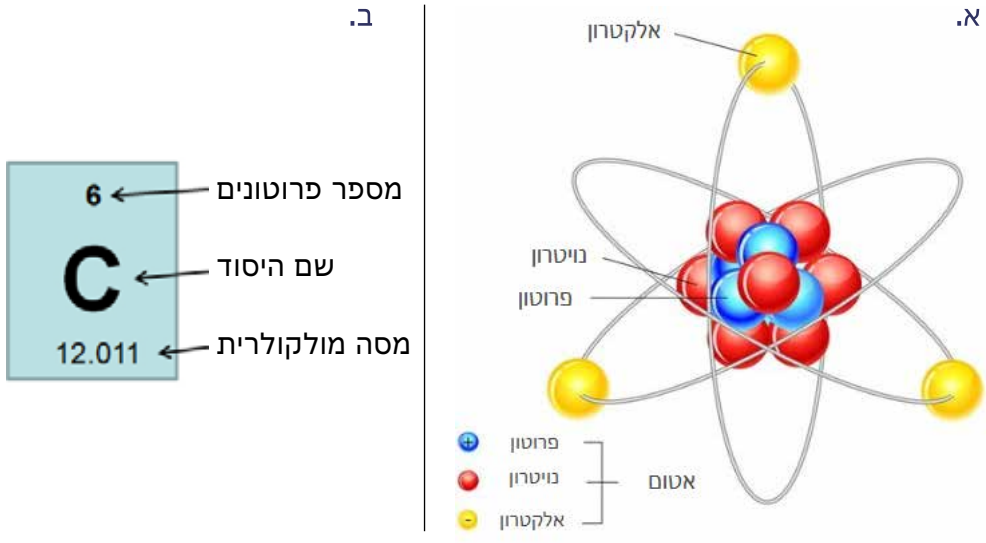
בניגוד לפרוטונים, מספר האלקטרונים משתנה מקליפה לקליפה ובין היסודות השונים. מספר האלקטרונים בכל אחת מהקליפות מוגבל. האטומים יציבים כאשר גרעיניהם מוקפים בקליפות מלאות של אלקטרונים, אשר מסודרים בדרך כלל בזוגות. הקליפה הראשונה, הפנימית ביותר, יכולה להכיל זוג אחד בלבד של אלקטרונים. החל מהקליפה השנייה ועד לאחרונה, האטום יהיה במצב היציב ביותר, כאשר יהיו 8 אלקטרונים באותה רמה. קבוצת הגזים האצילים הם דוגמה ליסודות יציבים, אשר מכילים 8 אלקטרונים בקליפה החיצונית שלהם. כתוצאה מכך הם ממעטים להשתתף בתגובות כימיות, ומכאן שמם.

פרוטון
חלקיק הנמצא בגרעין האטום ונושא יחידה יסודית אחת של מטען חשמלי חיובי.

נויטרון
חלקיק הנמצא בגרעין האטום, חסר מטען חשמלי.

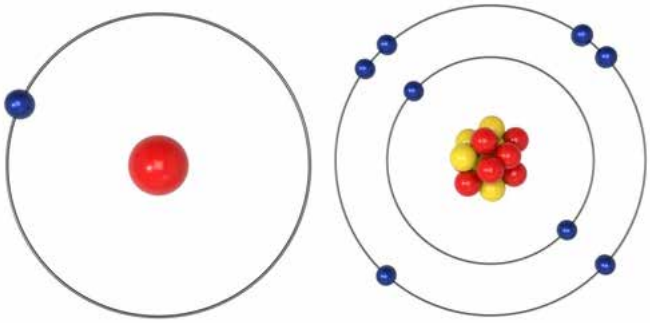
אלקטרון
חלקיק הנמצא על קליפות האטום, המקיפות את הגרעין. נושא יחידה יסודית אחת של מטען חשמלי שלילי.

יסוד כימי
חומר המורכב מחלקיקי אטומים מסוג אחד בלבד. לא ניתן לפרק את היסוד או להרכיב יסוד אחד מיסוד שני.



איור 2

כל יסוד בטבע מאופיין באטומים שכולם בעלי מספר פרוטונים מסוים המיוחד לאותו יסוד.
(א) **מבנה האטום.**
(ב) **סימון יסוד כימי, כפי שמופיע בטבלה המחזורית**



איור 3

(מימין) **אטום חמצן**,
(משמאל) **אטום מימן**

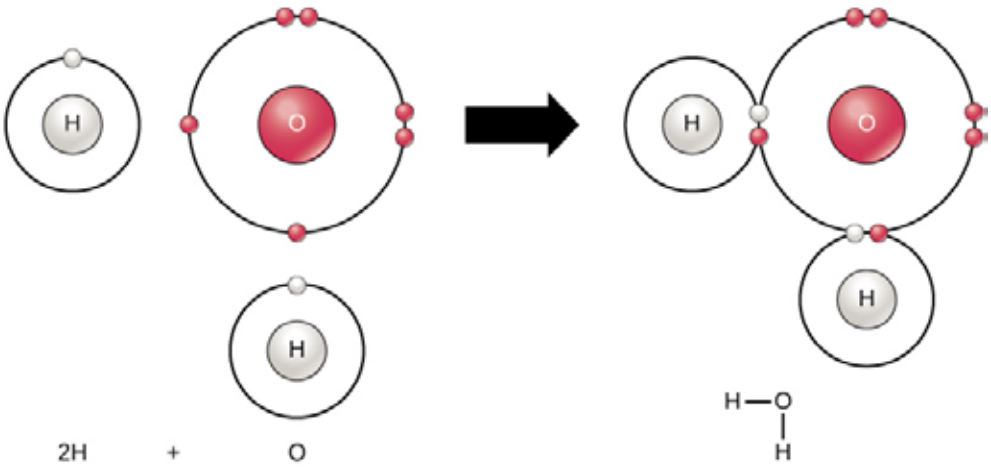
מולקולה
קבוצות של אטומים המחוברים יחד בקשר כימי. למולקולה אין בדרך כלל מטען חשמלי, משום שסך המטענים החיוביים והשליליים מתאזן.

קשר קוולנטי
קשר כימי שנוצר בין שני אטומים, שמשתפים ביניהם אלקטרונים הנמצאים בקליפתם החיצונית. אם כל אטום משתף אלקטרון בודד, הקשר מוגדר קשר יחיד; אם כל אטום משתף שני אלקטרונים, זהו קשר כפול; ואם כל אטום משתף שלושה אלקטרונים, הקשר הוא קשר משולש. כשמציירים מבנה של מולקולות נהוג לצייר קשר כימי כקו (קו בודד לקשר בודד, קו כפול לקשר כפול וכן הלאה)

מולקולת המים מורכבת מאטום חמצן ומשני אטומי מימן (H_2O). לאטום החמצן יש 2 אלקטרונים בקליפה הפנימית ו-6 אלקטרונים בקליפה החיצונית ולכל אטום מימן יש סה"כ אלקטרון אחד (איור 3).

בגרעין המימן יש מטען חיובי אחד - פרוטון אחד - ולכן יש באטום המימן בדרך כלל אלקטרון אחד, וכך הקליפה הראשונה אינה מלאה. לחמצן יש שמונה אלקטרונים: שניים בקליפה הראשונה ורק שישה בשנייה (איור 4). בכדי להתייצב, זקוק אטום החמצן לשני אלקטרונים נוספים ואילו אטום המימן זקוק לאלקטרון אחד.

כאשר שני אטומים, עם אלקטרונים יחידים (לא מזווגים), קרובים מספיק, הם יכולים 'לשתף' אלקטרונים כדי להשלים את הקליפות ולהיות יציבים. תוצאת שיתוף זה הוא קשר כימי הנקרא '**קשר קוולנטי**'. כאשר שני אטומים של מימן ואטום אחד של חמצן חולקים זוגות אלקטרונים (איור 4), יהיו הקליפות של שלושת האטומים מלאות וכתוצאה מכך תהיה מולקולת המים שנוצרה, יציבה.



איור 4

היקשרות אטום חמצן לשני אטומי מימן, לבניית מולקולת מים

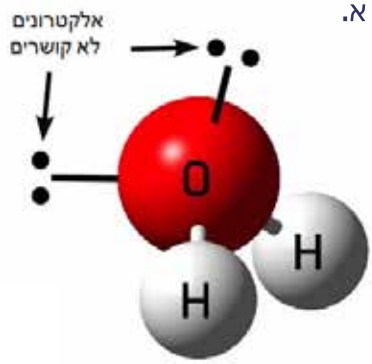
האלקטרונים במולקולת המים נעים ללא הרף בין האטומים, אך מכיוון שלאטום החמצן יש זיקה גבוהה לאלקטרונים (ערך **אלקטרושליליות** גבוה), הוא מושך את האלקטרונים הקושרים בכוח משיכה חזק מאוד, יותר מכוח המשיכה שמפעיל אטום המימן והאלקטרונים משרים סביבו שדה חשמלי שלילי. גרעינו הזעיר של אטום המימן והמטען החיובי המתרכז בו (פרוטונים) משרה סביבו שדה חשמלי חיובי. כך שלמרות שהמטען החשמלי הכולל הוא אפס, נוצרים במולקולת המים שני קטבים חשמליים - אטום המימן הוא הקוטב החיובי, ואטום החמצן הוא הקוטב השלילי. מכאן שכל אחד משני אטומי המימן קשור לאטום חמצן ב**קשר קוולנטי-קוטבי**. האלקטרונים המשותפים לאטומים נקראים **אלקטרונים קושרים**.

גם אלקטרונים שנמצאים בקליפה החיצונית של האטומים ואינם משתתפים בקשר כימי (**אלקטרונים לא קושרים**), עדיין משפיעים על מבנה המולקולה. הם מפעילים זה על זה כוח דחייה חשמלי ומסוגלים לדחות ולהרחיק אטומים אחרים (איור 5א). כוחות הדחייה בין המטענים השונים של האלקטרונים הקושרים לאלקטרונים הבלתי קושרים יוצרים זווית של 104.5° בין האלקטרונים הקושרים (איור 5ב).

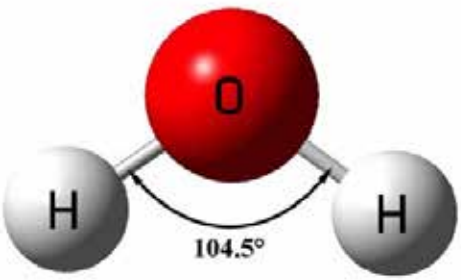
אלקטרושליליות

ערך המתאר את היכולת היחסית של אטום מסוים למשוך אליו אלקטרונים בקשר קוולנטי. ערך זה הוא קבוע לאטום מסוים והוא ניתן לחיזוי על פי מיקומו בטבלה המחזורית: ככל שמספר האלקטרונים החסרים לאטום להשלמת קליפתו החיצונית נמוך יותר, ערך האלקטרושליליות של האטום גבוה יותר.

א.

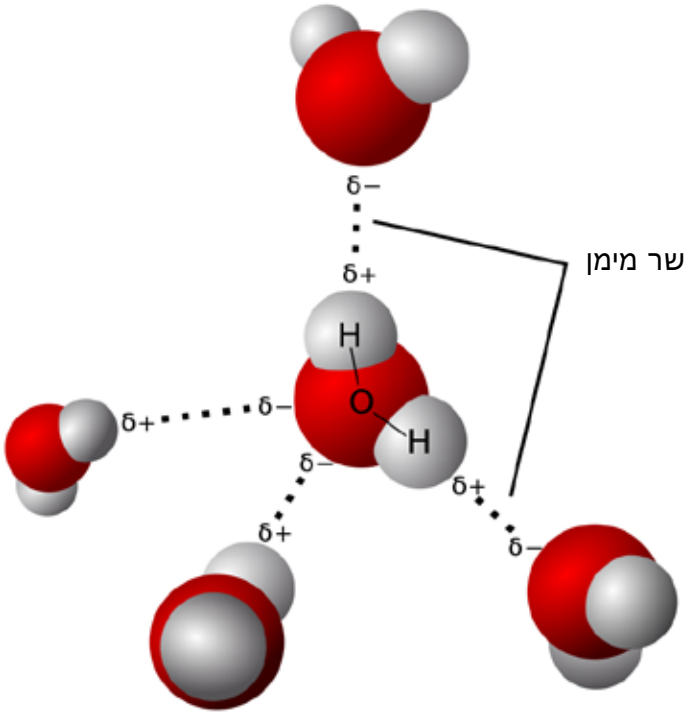


ב.



איור 5

האלקטרונים הלא-קושרים מפעילים כוחות דחייה ויוצרים זווית של 104.5° בין האלקטרונים הקושרים



איור 6

קשר מימן בין מולקולות מים
(ויקיפדיה)

אם כך, סביב כל מימן במולקולת המים נוצר מטען חיובי צפוף וחזק וסביב אטום החמצן, מטען שלילי. כלומר, לכל מולקולת מים יש 4 מוקדי משיכה חשמליים (2 זוגות של אלקטרונים (-) לא קושרים של החמצן ושני מימנים (+)) שימשכו לנקודות חשמליות מנוגדות להן במולקולות מים נוספות, בצורה כזו שכל מולקולת מים תוקף ב-4 מולקולות מים נוספות (איור 6). משיכה זו יוצרת קשר הנקרא **קשר מימן**.

חשוב לציין כי משיכה בין-מולקולרית באמצעות קשרי מימן לא פוגעת בקשר הקוולנטי-קוטבי שבין אטום המימן לאטום החמצן בתוך המולקולה עצמה, משום שקשרי המימן חלשים מהקשרים הקוולנטים הקיימים בין האטומים המרכיבים את המולקולה.

קשר מימן

קשר כימי קוטבי בין מולקולות מימן לאטומי חנקן (N), פלואור (F) או חמצן (O), בעלי ערך אלקטרושליליות גבוה. הקשר נוצר כתוצאה ממשיכה בין מטענים חלקיים נגדיים ונחשב כקשר בין-מולקולרי חזק.

ניסוי - המים הם בעלי מטען חשמלי

ציוד

- ברז מים רגיל שאפשר לפתוח בזרם מים דק
- בלון מנופח או סרגל מפלסטיק
- שיער או סוודר מצמר

מהלך הניסוי

- נפתח את ברז המים לזרם דק
- נשפשף את הבלון או את סרגל הפלסטיק בשיער של אחד התלמידים או בסוודר / כובע צמר
- נקרב את הבלון לזרם המים ונתבונן

הסבר

כל מולקולת מים מכילה דו-קוטב (דיפול) חשמלי: מטען חשמלי שלילי חלקי סביב אטום החמצן ומטען חשמלי חיובי חלקי ליד כל אטום מימן.

שפשוף של הבלון בשיער או צמר, גורם להיווצרות חשמל סטטי - אלקטרונים מחומר אחד "נתלשים" ועוברים לחומר השני, דבר שיוצר מטען חשמלי בשני החומרים. כשמקרבים למים בלון מגומי או מוט פלסטיק טעון בחשמל סטטי (בדרך כלל פלסטיק נטען בעודף של אלקטרונים, ולכן מטענו שלילי), אטומי המימן החיוביים בכל מולקולת מים נמשכים אליו וכתוצאה מכך זרם המים כולו נמשך ומוטה לעבר מוט הפלסטיק.

חשוב: אם קילוח המים הדק מתגבר והופך לזרם חזק, כוחות המשיכה החשמליים כבר לא מצליחים להתגבר על מסת המים הזורמים ולא נראה יותר הטיה של הזרם, לכן חשוב שזרם המים מהברז יהיה חלש, אחרת הניסוי לא יצליח.

מקור: מכון דוידסון

3.2 תכונות המים

מבנה מולקולת המים והקשרים בין המולקולות, מקנים למים תכונות המייחדות אותם כסביבת חיים:

1. נקודות היתוך ורתיחה גבוהות

בתהליכי היתוך ורתיחה של חומרים (איור 7), מושקעת אנרגיה בפירוק קשרים בין מולקולות במעבר בין מצב צבירה מוצק לנוזלי או מנוזל לגז ועל כן **טמפרטורות ההיתוך** ו**הרתיחה** תלויות בחוזק כוחות המשיכה בין חלקיקי הנוזל.

בין כל שתי מולקולות שונות בטבע פועלים כוחות **ואן-דר-ואלס** בעוצמות שונות. ככל ש**המסה המולרית** של חומר גדולה יותר, כוחות ואן-דר-ואלס חזקים יותר ובעקבות כך גם נקודת הרתיחה של החומר גבוהה יותר.

המים הם יוצאי דופן: למים מסה מולרית נמוכה יחסית (18 גרם/מול), אולם נקודת הרתיחה שלהם (100°C) גבוהה במידה ניכרת מזו של תרכובות רבות שהמסה המולרית שלהם גדולה משל המים. הסיבה לכך נובעת מהעובדה שבין מולקולות המים פועלים, פרט לכוחות ואן-דר-ואלס, גם קשרי מימן שעוצמתם חזקה הרבה יותר.

בנקודת הרתיחה עוברים המים ממצב צבירה נוזלי לגז. מעבר זה כרוך בשבירת קשרי המימן הרבים הקושרים בין מולקולות המים במצב נוזלי. קשרי המימן חזקים פי 10 מכוחות ואן-דר-ואלס והאנרגיה שיש להשקיע כדי לשבור אותם גדולה יותר.

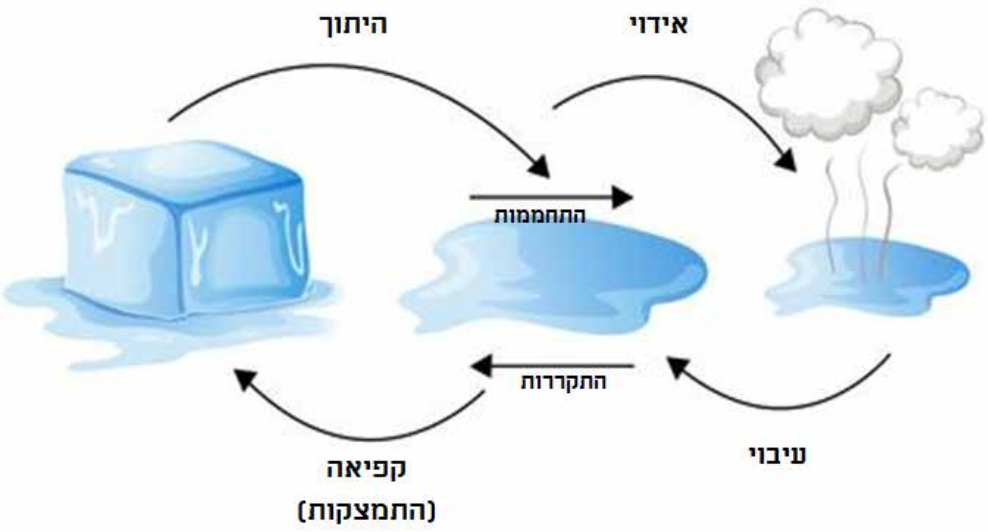
מספר קשרי המימן הולך ופוחת עם עליית הטמפרטורה, אך גם בנקודת הרתיחה של המים (100°C) עדיין קיימים קשרי מימן רבים. רק במצב הצבירה הגזי, מולקולות המים מרוחקות מאוד זו מזו, כך שקיום קשרי המימן כמעט ואינו אפשרי.

גם נקודת ההיתוך של המים (הטמפרטורה שבה הופך הקרח לנוזל) גבוהה מאוד וגם במקרה זה בגלל קשרי המימן. במים במצב מוצק (קרח) קיימים מספר רב של קשרי מימן בין המולקולות וכדי להפוך את הקרח למים, יש להשקיע אנרגיה גבוהה כדי לנתקם.

טמפרטורת היתוך
הטמפרטורה שבה נוזל שמתקרר מתגבש למוצק, ולחלופין מוצק שמתחמם ניתך לנוזל, בלחץ נתון.

טמפרטורת רתיחה
הטמפרטורה שבה משתנה מצב הצבירה של חומר מנוזל לגז בלחץ נתון.

מסה מולרית
מסה של מול (יחידת מידה המגדירה כמות חומר על פי מספר חלקיקים) אחד של חלקיקים. נמדדת ביחידות גרם/מול.



איור 7

שינויים במצבי הצבירה במים

2. חום סגולי גבוה

חום סגולי של חומר הוא כמות האנרגיה הדרושה כדי להעלות את הטמפרטורה של גרם אחד של חומר במעלת צלזיוס אחת, או כמות האנרגיה שפולט גרם אחד של החומר כאשר הוא מתקרר בשיעור מעלה אחת. ככל שהתנועה של המולקולות חופשית יותר, יש להשקיע פחות אנרגית חום כדי להעלות את טמפרטורת החומר. כלומר, ככל שכוחות המשיכה הבין מולקולריים חלשים יותר, כך החום הסגולי של החומר קטן יותר. במים, הכוחות הבין מולקולריים חזקים בשל הצירוף של קשרי מימן וכוחות ואן-דר-ואלס, ועל כן חומם הסגולי הוא מהגבוהים ביותר מכל החומרים הידועים לנו (4.2 ג'ול/גרם°C).

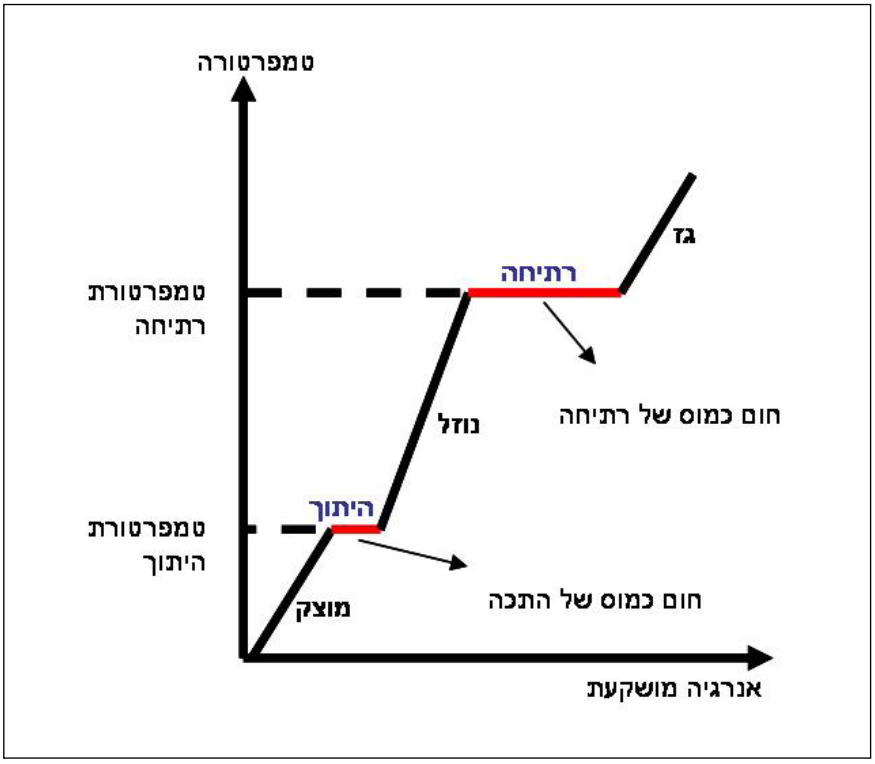
3. חום כמוס

חום כמוס הוא כמות האנרגיה המושקעת או הנפלטת בשינוי מצב צבירה של 1 גר' חומר, ללא שינוי בטמפרטורה. נחלק את החום הכמוס של המים לחום אידוי וחום היתוך (איור 8).

חום ההיתוך של המים הוא כמות האנרגיה הדרושה כדי להתיך גרם אחד של קרח למים, בטמפרטורה של 0°C. חום ההיתוך של המים שווה ל-80 קלוריות או 334 ג'ול.

חום האידוי של המים הוא כמות האנרגיה הדרושה כדי לאדות גרם אחד של מים לאדים, בטמפרטורה של 100°C. חום האידוי של מים שווה ל-540 קלוריות או 2,230 ג'ול.

חום האידוי של המים גבוה מחום ההיתוך, מכיוון שמספר קשרי המימן הניתקים בתהליך האידוי רב יותר ממספר קשרי המימן הניתקים בתהליך ההיתוך.

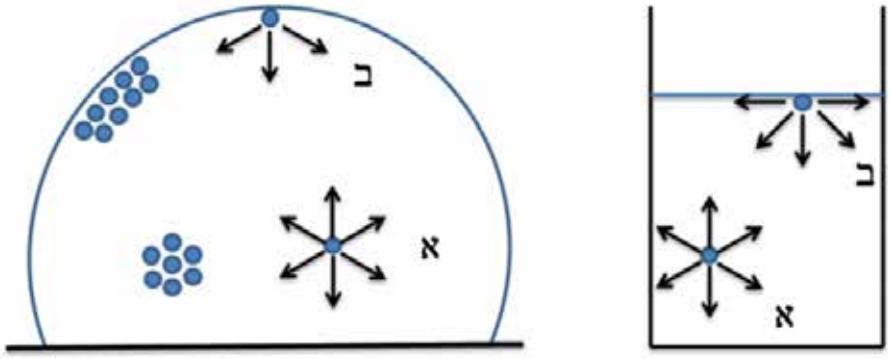


איור 8

חום כמוס

(מכון דוידסון)

איור 9. כוחות משיכה בין מולקולות מים בפני השטח ומתחתם
(מכון דוידסון)



קוהזיה
(cohesion)
הכוחות המתקיימים בין אטומים/מולקולות דומים.

אדהזיה
(adhesion)
הכוחות המתקיימים בין אטומים/מולקולות שונים.

4. מתח פנים של המים גבוה במיוחד

מתח הפנים הוא כוח הפועל בנוזל ונוצר על ידי כוחות משיכה בין מולקולות הנוזל: המולקולות הנמצאות מתחת לפני השטח של הנוזל נמשכות במידה שווה על ידי המולקולות הנמצאות מכל עבריהן (**קוהזיה** - איור 9א), ואילו מולקולות הנמצאות על פני השטח של הנוזל נמשכות רק על ידי מולקולות הנמצאות לידן או מתחתן (**אדהזיה** - איור 9ב).

במים, קשרי המימן בין המולקולות חזקים יותר מכוחות המשיכה הבין-מולקולריים הפועלים ברוב החומרים ועל כן מתח הפנים בהם גבוה ומקנה לטיפות המים צורה כדורית (איור 10א). מתח הפנים של המים הוא גם הגורם ליצירת מעין קרום המתוח על פניהם ויכול לשאת את משקלו של חרק קטן (איור 10ב). מתח הפנים של המים יורד עם עליית הטמפרטורה, בשל שבירת חלק מן הקשרים הבין-מולקולריים.

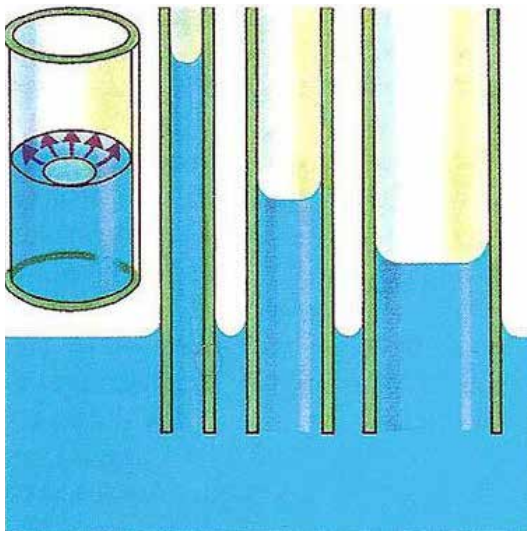
איור 10
מתח הפנים של המים כפי שבא לידי ביטוי בטבע: (א) **מים נאספים בצורת טיפות על עלה.** (ב) **חרק נע על הקרום הנוצר בפני המים**

5. נימיות (קפילריות)

תופעת הנימיות (capillary action) מתארת את היכולת של נוזלים "לטפס" במעלה צינורות דקים. תכונה זו אופיינית לנוזלים קוטביים שונים וסיבתה בקיום מתח הפנים. ניתן לראות תופעה זו כאשר מתבוננים בכוס מלאה בחלקה בנוזל, שולי פניו של הנוזל מתרוממים ויוצרים מעין שפה מוגבהת הנצמדת אל דפנות הכוס, או כאשר מתבוננים בנוזל העולה אט-אט במעלה צינורית דקה. מקור תופעה זו הוא בשני סוגי כוחות: האחד הוא הכוחות הבין-מולקולריים שבנוזל עצמו (**קוהזיה**), והשני, כוחות המשיכה בין המולקולות הקוטביות של הנוזל לבין המולקולות של דפנות הכלי (**אדהזיה**). כוחות אלו נוצרים כאשר הכלי עשוי חומר בעל מולקולות קוטביות, והם מאפשרים את עליית הנוזל לאורך פניו של הכלי. מולקולת הזכוכית למשל, מכילה אטומי חמצן רבים, היוצרים קוטב שלילי במולקולה. כאשר כלי זכוכית צר מאוד מכיל מים, אטומי המימן (הקטבים החיוביים) במולקולות המים נמשכים אל אטומי החמצן שבזכוכית כדי ליצור קשרי מימן. לפיכך מולקולות המים הנמצאות בשולי הנוזל נצמדות לדפנות הכלי ופני המים הנמתחים מקבלים צורה קעורה (איור 11). בשל קשרי המימן המקשרים את מולקולות המים בינן לבין עצמן נמשכות גם שאר מולקולות הנוזל כלפי מעלה, והמים עולים לאורך פניו של הכלי. המים נמשכים כלפי מעלה, לאורך דפנות הכלי עד לגובה שבו משקלם של המים שעלו, שווה לנטיית המים להימשך אל משטח הזכוכית. ככל שהכלי צר יותר או הצינורית דקה יותר המים עולים גבוה יותר, גם כי שטח המגע בין דפנות הכלי לבין המים גדל, וגם כי המספר היחסי של מולקולות המים בכלי קטן יותר.

6. אנומליה של המים

ברוב החומרים, כאשר החומר עובר ממצב צבירה נוזלי למוצק, צפיפותו עולה. המים במצב מוצק (קרח) קלים מן הנוזל. זוהי אחת מהתכונות הפיזיקליות המבדילות את המים מחומרים אחרים. מים קרים הם אמנם צפופים יותר, אלא שרק עד טמפרטורה של 4°C (וליתר דיוק עד ל-3.98°C). בטמפרטורה זו צפיפות המים היא הגבוהה ביותר. כאשר ממשיכים ומקררים את המים מטמפרטורה זו ועד להפיכתם לקרח, צפיפותם הולכת וקטנה ונפחם גדל. מצב זה, המוגדר כ"**אנומליה של המים**", מסביר מדוע הקרח צף על פני המים בניגוד לחומרים אחרים שבהם המוצק שוקע בנוזל. גם תכונה מיוחדת זו היא תוצאה של קשרי המימן הקיימים



איור 11

ככל שהכלי צר יותר או הצינורית דקה יותר המים עולים גבוה יותר, מכיוון ששטח המגע בין דפנות הכלי לבין המים גדל

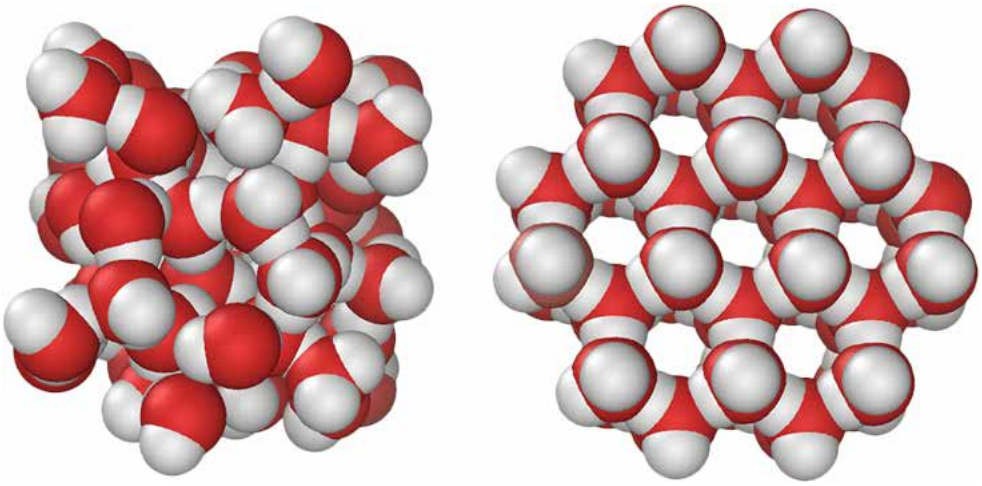
בין מולקולות המים: מספר קשרי המימן הנוצרים בין מולקולות המים הוא פונקציה של המרחק בין המולקולות ולכן הוא מושפע משינויים בטמפרטורה ובלחץ. כאשר מים נמצאים במצב צבירה נוזלי (נאמר בטמפרטורת החדר) האנרגיה הקינטית של כל מולקולה ומולקולה (שנובעת ממהירות המולקולות) חזקה מספיק בכדי להתגבר על הכוחות הבין-מולקולריים ששואפים להחזיק את המולקולות במקום, והמולקולות יכולות לנוע: להחליק אחת על גבי השנייה ולזרום ממקום למקום. ככל שטמפרטורת המים יורדת, אנרגית התנועה של המולקולות קטנה. המולקולות מתקרבות זו לזו, ולכן הקשרים בין המולקולות מתרבים ומתחזקים וצפיפות המים גדלה. כאמור, תהליך זה נמשך רק עד לטמפרטורה של 4°C. מנקודה זו ואילך המולקולות מסתדרות בסידור מרחב אופטימלי, שבו נוצרים קשרי מימן קבועים שמספרם מרבי (איור 12). החללים הרבים שבגביש הקרח הם הגורמים לגדילה נכרת בנפח המים בעת קפיאתם ולתכונת האנומליה של המים.

חימום הקרח מנתק קשרי מימן רבים, מולקולות המים מתקרבות זו לזו וצפיפותן עולה. המבנה הגבישי המרווח של הקרח נשבר והנפח קטן. תהליך זה נמשך עד לטמפרטורה של 4°C. מנקודה זו ככל שהטמפרטורה עולה, האנרגיה הקינטית של המולקולה מתגברת על הנטייה שלהם להיות קרובות זו לזו, ואז צפיפות המים הולכת וקטנה והמרחק בין המולקולות הולך וגדל.

7. המים כממס

תמיסה היא תערובת של שני חומרים או יותר ואחד מהחומרים הוא נוזל. התמיסה מורכבת מחומר **ממס** וחומר **מומס**. כדי שיתרחש תהליך המסה של מומס בממס צריכים להתקיים שני תנאים:

1. הכוחות הפועלים בין החלקיקים בממס ובמומס צריכים להיות דומים באופיים.
2. כוחות המשיכה בין חלקיקי הממס לבין חלקיקי המומס צריכים להיות חזקים יותר מהכוחות הפועלים בין החלקיקים בכל אחד מהחומרים בנפרד.



איור 12

(משמאל) **מולקולות מים צפופות במצב צבירה נוזלי וטמפרטורה נמוכה.** (מימין) **מולקולות מים מצב צבירה מוצק (קרח) בסידור מרחב אופטימלי** (Wikimedia)

הכוחות הפועלים בין מולקולות המים הקוטביות הם קשרי מימן, שהם כוחות משיכה חשמליים. כדי שחומר ימס במים, חלקיקי החומר המומס צריכים להיות גם קשורים ביניהם בכוחות משיכה חשמליים, כלומר הם צריכים להיות קוטביים או **יוניים.**

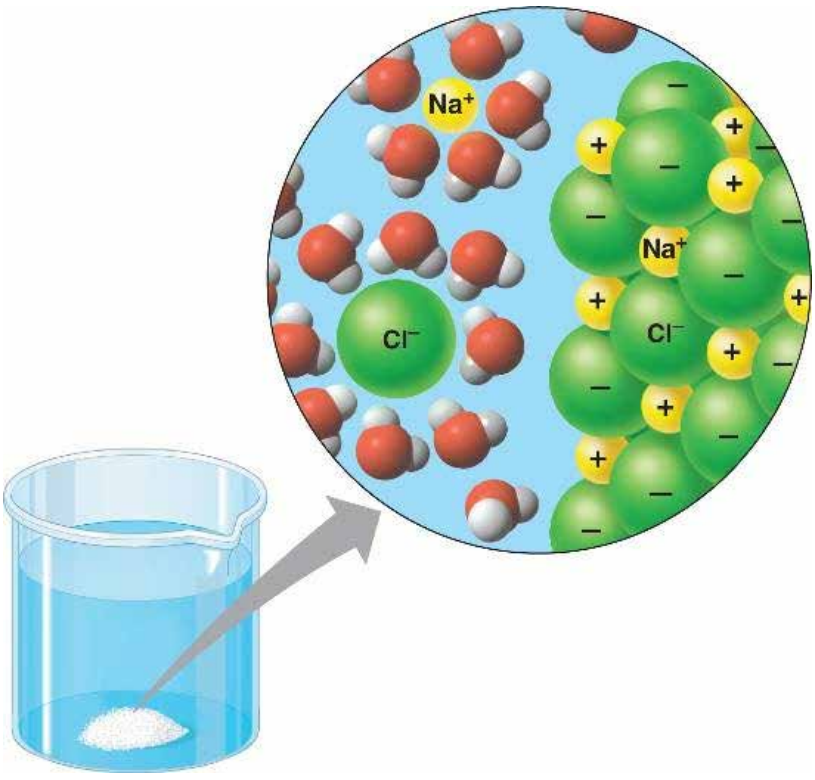
כאשר הכוחות החשמליים הנוצרים בין מולקולות המים לבין מולקולות המומס (או יוני המומס) חזקים יותר מקשרי המימן של המים ומכוחות המשיכה הפועלים בין חלקיקי המומס, אז מתרחש תהליך ההמסה.

בעת ההמסה, מפוזרים חלקיקי הממס והמומס במבנה אקראי, כך שכל קוטב שלילי של חלקיק המומס מוקף על ידי מספר קטבים חיוביים של מולקולות המים, וכל קוטב חיובי של חלקיק המומס מוקף על ידי מספר קטבים שליליים של מולקולות המים (איור 13).

בחומר בלתי קוטבי המולקולות מוחזקות בינן לבין עצמן בכוחות ואן-דר-ואלס, ואלה הכוחות היחידים הפועלים בין מולקולות החומר לבין מולקולות המים. כוחות אלו חלשים יותר מקשרי המימן המחזיקים את מולקולות המים, כלומר כוחות המשיכה בין מולקולות המים לבין מולקולות המומס חלשים יותר מכוחות המשיכה בין מולקולות המים בינן לבין עצמן, ועל כן החומר הבלתי קוטבי לא יתמוסס במים. דוגמאות לכך הם יוד בנוי ממולקולות בלתי קוטביות, ועל כן מסיסותו במים נמוכה מאוד לעומת מלח הבישול (Na^+Cl^-) המתמוסס היטב במים.

קשר יוני

קשר הנוצר בין **קטיון** (אטום שמסר אלקטרונים ומטענו החשמלי הוא חיובי) לבין **אניון** (אטום שקיבל אלקטרונים ומטענו החשמלי הוא שלילי), במטרה לאזן את המטענים החשמליים של שניהם. חזק הקשר תלוי בגודלם ובמטענם של היונים.



איור 13

המסת מלח בישול (Na^+Cl^-) במים

4

החיים באוקיינוסים

ארז ירוחם

4.1 היווצרות החיים בכדור הארץ

היווצרות כדור הארץ והאוקיינוסים

על פי התיאוריה המקובלת ביותר כיום, כדור הארץ (כמו יתר הכוכבים במערכת השמש) נוצר על ידי התלכדות של גזים, אבק, שברי סלעים וחלקיקים אחרים בחלל, לכדי כדור. חומרים אלו כללו בעיקר יסודות כימיים כגון מימן, הליום, פחמן, חנקן וגופרית. בתהליך ממושך זה שהחל, על פי ההערכות, לפני 4.6-4 מיליארד שנים ונמשך כ-600 מיליון שנה, פני כדור הארץ התקררו והתמצקו: בתחילה, הגיעה הטמפרטורה על פני כדור הארץ לכ-2000 מעלות צלזיוס (על פי מחקר שערכה נאס"א, סוכנות החלל האמריקאית, בשנת 2014) וכדור הארץ הפך לכדור סלעי, מותך ולוהט. השכבה החיצונית של הכדור התקררה בהדרגה והסלע המותך התמצק. תקופה זו אופיינה בפעילות געשית אינטנסיבית שפלטה לפני השטח ולאטמוספירה הקדומה חומרים נוספים שנוצרו בתנאי הלחץ הגבוה והחום הרב השורר בשכבות הפנימיות של הכוכב. בנוסף לכך, בתקופה זו הייתה צפיפות גרמי שמים כגון אסטרואידים וכוכבי שביט גבוהה בהרבה מכפי שהיא כיום, וכוכבי הלכת במערכת השמש היו שרויים למעשה "תחת הפגזה" כבדה מצידם. התנגשויות אלו העשירו את כדור הארץ הקדום ביסודות וחומרים נוספים, כשההשערה הרווחת היא שעיקר המים המצויים בכוכבנו כיום, הגיעו בדרך זו. האטמוספרה בתקופה זו כללה בעיקר אדי מים, חנקן (המרכיב העיקרי באטמוספרה גם כיום) ופחמן דו חמצני, אך גם כמויות קטנות של גופרית, מתאן ואמוניה. חמצן חופשי, המשמש לנשימת יצורים חיים, היה ככל הנראה נדיר ביותר באטמוספירה באותם ימים. המשך התקררות הכדור הובילה לכך שמרבית **אדי המים** התעבו, כלומר עברו למצב צבירה נוזלי והצטברו במקומות הנמוכים על פני כדור הארץ - להלן האוקיינוסים הקדומים. נוכחות מים במצב נוזלי הינם תנאי הכרחי לקיום חיים, והימצאותם הבלעדית בכדור הארץ (על פי ההערכות) נחשבת לסיבה העיקרית לכך שמדובר בתופעה ייחודית לעולמנו - לפי הידוע עד כה.

אדי מים

מים במצב צבירה של גז.

ומה היה לפני כל זה? על תיאוריית "המפץ הגדול"

בעבר (החל מימי אריסטו), שיערו אסטרונומים כי היקום הוא סטטי, אינסופי ולא משתנה כלל. אולם, במהלך המאה ה-19 ותחילת המאה ה-20, תצפיות אסטרונומיות (שנעשו באמצעות ציוד אופטי שהשתכלל מאוד בתקופה זו) הוכיחו מעל לכל ספק כי היקום מתרחב והגלקסיות מתרחקות זו מזו. המסקנה הבלתי נמנעת מכך, היא שבעבר הן היו קרובות יותר אחת לשנייה וככל שנלך אחורה בזמן כך היקום יהיה קטן יותר ויותר - עד למצב שבו כל החומר ביקום מרוכז בנקודה אחת, שקרויה גם הנקודה הסינגולרית. "המפץ הגדול" הוא למעשה הרגע שבו החלה נקודה זו להתרחב (השם "המפץ הגדול" ניתן לתיאוריה זו בלעג על ידי פיזיקאי שהתנגד לה, אך למעשה לא מדובר בפיצוץ אלא בהתרחבות). החומר ביקום הקדום לא התפשט באופן אחיד, ואיזורים מסויימים היו צפופים וכבדים יותר מאיזורים אחרים. עקב כוחות הכבידה חומר רב יותר החל להתלכד סביב אותם איזורים וכך נוצרו הגלקסיות. **חשוב לציין - שמאז שנהגתה התיאוריה (לפני כ-100 שנה) התווספו עדויות והוכחות רבות לנכונותה.** פרטים נוספים ניתן למצוא באתר מכון דוידסון.

ראשית החיים

שאלת מקור החיים על פני כדור הארץ הייתה ועודנה אחת התעלומות הגדולות ביותר שנותרו לא פתורות. ההסבר המדעי המקובל ביותר כיום הוא **תיאוריית "המרק הקדמוני"** - חומרים שונים שהיו מצויים במימי האוקיינוס הקדום החלו להתחבר זה לזה ליצירת **תרכובות אורגניות** גדולות ומורכבות יותר - מולקולות על בסיס פחמן ומימן הנוטות להגיב עם הסביבה וליצור קשרים עם חומרים נוספים. מבין אלו חשוב לציין 4 קבוצות עיקריות:

1. **חומצות גרעין** - נקראות גם נוקלאוטידים. מולקולות על בסיס פחמן, חנקן וזרחן שמהוות אבני בניין ל-**DNA** ו-**RNA**: החומר התורשתי של כל היצורים החיים.
2. **חומצות אמינו** - מולקולות על בסיס פחמן וחנקן שמהוות אבני בניין לחלבונים - מולקולות האחראיות לעיקר תפקודי התא החי (לדוגמא: בנייה ופירוק של מולקולות אחרות והובלת חומרים הכרחיים כגון חמצן).
3. **חומצות שומן** - מולקולות על בסיס פחמן שמהוות אבני בניין לשומנים. מהוות בסיס ליצירת קרום התא - מעטפת החוצצת בין התא לסביבתו ומגנה עליו מהפרעות ואיומים חיצוניים.
4. **סוכרים (פחמימות)** - מולקולות על בסיס פחמן המשמשות בעיקר להפקת אנרגיה ואגירתה, אך גם לבניית רקמות (בעיקר בצמחים).

תחת לחצים פיזיקליים כגון חום, ברקים וקרינת שמש, אבני בניין אלו (נקראות גם **מונומרים** - חומצות גרעין, אמינו ושומן) החלו להתחבר זו לזו ליצירת מולקולות גדולות ומורכבות יותר (נקראות גם **פולימרים** - RNA+DNA, חלבונים ושומנים). על פי תיאוריה זו, מולקולות RNA (שרשרת בודדת של חומצות גרעין) החלו להתלכד לטיפות, לספוג חומרים מהסביבה ולשכפל את עצמן באופן ספונטני. בהמשך, מולקולות אלו החלו "לשתף פעולה" עם מולקולות מקבוצות אחרות: חלבונים סייעו להן להשתכפל מהר יותר ולספוג חומרים מהסביבה בצורה יעילה יותר, בעוד ששומנים התלכדו סביבם ליצירת קרום שסייע בהגנה מפני איומים חיצוניים (קרינת שמש למשל). טיפות מוצלחות יותר (כאלו שספגו חומרים מהסביבה והתמודדו עם לחצים סביבתיים כגון קרינה ויובש ביעילות רבה יותר) השתכפלו בקצב מהיר יותר וכך הפכו לנפוצות יותר. בהמשך, מבנה טיפות אלו הפך ליותר ויותר מורכב (לדוגמא: נוספו שכבות נוספות למעטפת השומנית והחומר התורשתי התרכז באזור ספציפי) - עד שנוצר התא הראשון.

תרכובות אורגניות
(נקראות גם "חומר אורגני", כיוון שבעבר חשבו שקיימות רק ביצורים חיים) הן מולקולות המכילות אטומי פחמן ומימן. לאטומי הפחמן נטייה בולטת במיוחד ליצור קשרים עם אטומים אחרים - אטומי פחמן נוספים או יסודות שונים, וכך ליצור מולקולות גדולות ומורכבות במיוחד. למולקולות אלו תפקיד מרכזי כאבני הבניין של יצורים חיים.

DNA
(DeoxyriboNucleic Acid)
חומצה דאוקסיריבונוקלאית; מולקולת ענק של חומצת גרעין הבנויה כשרשרת נוקלאוטידים. כל המידע התורשתי הדרוש לבניית החלבונים בתא אצל כל האורגניזמים הידועים, מחיידקים ועד בני אדם, מוצפן במולקולת DNA אחת או יותר, המאורגנות במבנה של סליל כפול, ורצף הנוקליאוטידים בהן ייחודי לכל אורגניזם.

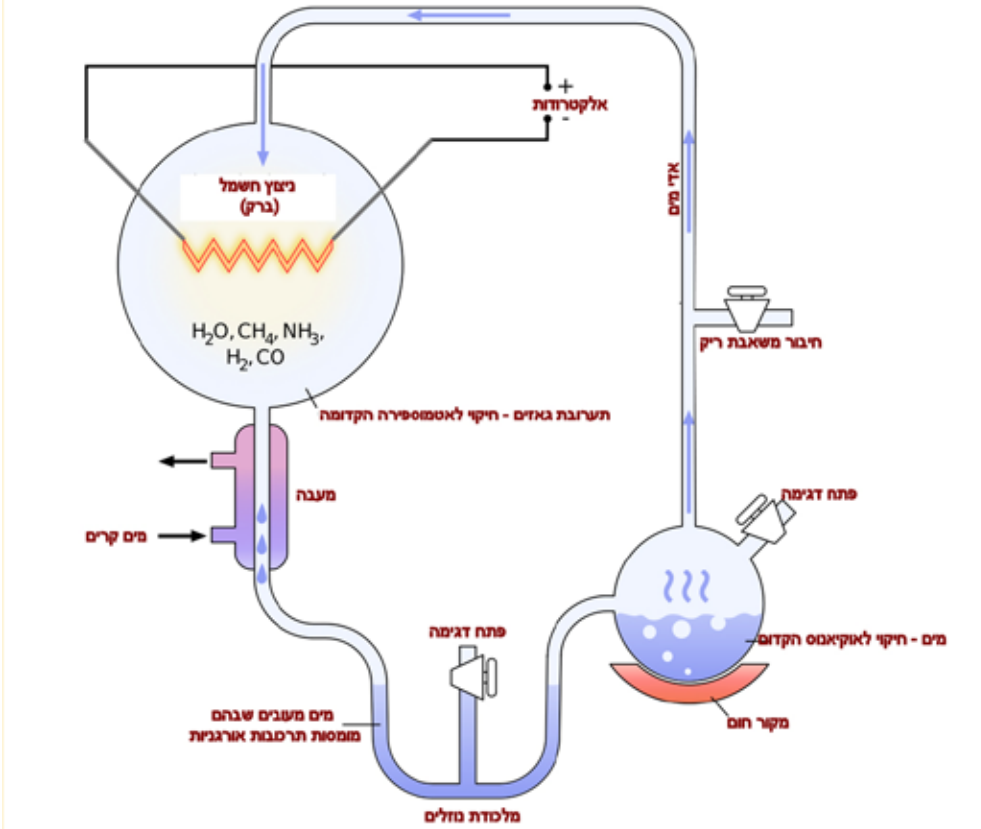
RNA
(RiboNucleic Acid)
חומצה ריבונוקלאית; מולקולה פולימרית, המורכבת מיחידות של נוקלאוטידים. ל-RNA תפקיד מרכזי במגוון תהליכים ביולוגים, בתהליכי תורשה, ביטוי ותרגום של המידע הגנטי. בחלק מהנגיפים הגנום כולו מקודד במולקולות RNA.

חיזוק משמעותי לתיאוריה זו התקבל מניסוי מילר ויורי (1952): בניסוי מעבדה זה, החוקרים חיקו את התנאים ששררו באוקיינוס הקדום, באמצעות תמיסה שהרכבה הכימי דומה להרכבו המשוער, והפעילו לחצים סביבתיים ששררו אז כגון חום, קרינה וחשמל (מפגיעת ברקים). בתמיסה הסופית נוצרו באופן ספונטני מולקולות אורגניות כגון חומצות גרעין, אמינו ושומן (איור 1).

היווצרות התא היצרן (אוטוטרופי) הראשון

התאים הראשונים בכדור הארץ היו **צרכנים (הטרוטרופים)**, כלומר צורכים את חומרי המזון ההכרחיים לקיומם מהסביבה (הטרו - אחר, טרופ - תזונה). מקור התזונה העיקרי של תאים אלו באוקיינוסים הקדומים היה מולקולות אורגניות שכאמור, נוצרו באופן ספונטני. אולם, קצב היווצרות מולקולות אורגניות באופן ספונטני הוא איטי למדי ועד מהרה חומרי המזון הפכו למשאב מוגבל שזמינותו נמוכה ביותר. תחת תנאי רעב אלו, החלו להיווצר תאים **אוטוטרופים** - תאים המייצרים את מזונם בעצמם (אוטו - עצמי). אורגניזמים אלו משתמשים במקורות אנרגיה שונים על מנת לפרק תרכובות פחמן אנ-אורגני זמינות (כגון פחמן דו-חמצני) ולהופכם לתרכובות פחמן אורגני (כגון סוכרים, חלבונים או שומנים), הדרושות לשלל תפקודי התא. יכולת זו היא בלעדית לאורגנזימים אוטוטרופיים. את האורגניזמים האוטוטרופיים ניתן לחלק לשתי קבוצות עיקריות:

1. **כימו-אוטוטרופיים** - תאים אלו מפיקים אנרגיה על ידי פירוק תרכובות גופרית,חנקן וברזל, ומנצלים אותה לצורך ייצור פחמן אורגני. כיום, יצורים חד תאיים אלו קיימים בעיקר בסביבות קיצוניות בעומק הים או מתחת לאדמה.



איור 1

תרשים מערך הניסוי של מילר ויורי משנת 1952 (ויקיפדיה)

2. **פוטו-אוטוטרופיים** - אורגניזמים המנצלים את אנרגיית השמש לצורך ייצור פחמן אורגני. יצורים אלו (בעיקר צמחים וחיידקים) נפוצים ביותר כיום באזורים אליהם מגיע אור שמש - על פני האדמה או בים.

מעריכים כי התאים האוטוטרופיים הראשונים התפתחו לפני כ-2-2.5 מיליארד שנים. בתחילה, תאים אלו השתמשו בגופרית המצויה במימן גופרתי (H_2S) לצורך הפקת אנרגיה. אולם, תרכובת זו נדירה יחסית על פני כדור הארץ, ובמהרה התפתחו תאים המסוגלים להשתמש בתהליך זה בתרכובת נפוצה ביותר - מים. תאים אלו משתמשים באנרגיית השמש כדי "לחבר" מספר מולקולות מים (H_2O) ופחמן דו חמצני (CO_2) יחדיו על מנת ליצור מולקולת סוכר פשוטה (גלוקוז - $C_6H_{12}O_6$), כשחמצן חופשי (O_2) נפלט כתוצר לוואי.

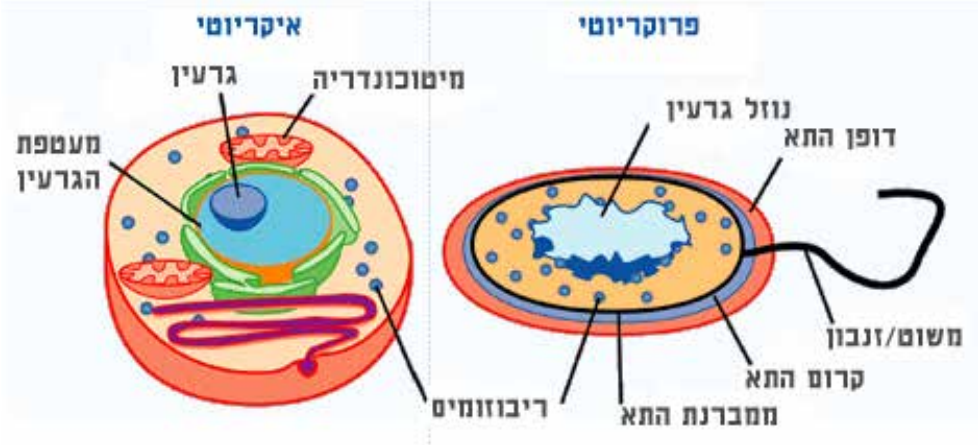
עקב הזמינות הגבוהה של אנרגיית אור, מים ופחמן דו חמצני בכדור הארץ, אורגניזמים פוטו-אוטוטרופיים הפכו לנפוצים ביותר, דבר שהוביל לעלייה ניכרת בריכוז החמצן באטמוספירה. לשינוי זה התלוו מספר השלכות משמעותיות על כלל החיים בכדור הארץ:

1. כלל החיים בכדור הארץ עד תקופה זו היו אל-אווירניים (**אנ-אירוביים**), כלומר - תאים שהפיקו אנרגיה ממזונם ללא צורך בחמצן. הצטברות החמצן באטמוספירה הובילה להיעלמותם הכמעט מוחלטת - למעט באזורים מעוטי חמצן.

2. התפתחות אורגניזמים אווירניים (**אירוביים**), המשתמשים בחמצן לצורך הפקת אנרגיה. שימוש בחמצן לתהליך זה מאפשר הפקת אנרגיה רבה יותר באופן משמעותי - פי 15-16 יותר מאשר הפקת אנרגיה ללא חמצן! על פי מדענים העוסקים בתחום, התייעלות זו אפשרה ליצורים החיים להתפתח לרמת מורכבות גבוהה הרבה יותר.

3. הצטברות החמצן באטמוספירה הובילה גם ליצירת שכבת האוזון - גז המורכב משלושה אטומי חמצן (O_3) אחת מתכונותיו של גז זה היא בליעה של הקרינה האולטרה סגולה המגיעה מהשמש. קרינה זו הרסנית ליצורים חיים עקב הנזק שהיא גורמת למולקולות DNA. היווצרות שכבת האוזון, אפשרה ליצורים החיים לצאת מהים אל פני היבשה.

בנוסף לכך, שגשוגם של האורגניזמים היצרנים (אוטוטרופיים) הגדילה משמעותית את זמינות המזון (פחמן אורגני) באוקיינוס הקדום, דבר שהוביל במקביל לשגשוגם של אורגניזמים צרכנים (הטרוטרופיים) שניזונו מהם.



איור 2

השוואה בין מבנה תא פרוקריוטי לתא אאוקריוטי. חשוב לציין שבדרך כלל תאים אאוקריוטיים גדולים בהרבה, והשוואה זו אינה מדויקת מבחינת קנה המידה (ויקיפדיה)

היווצרות התא האאוקריוטי

התאים הראשונים שהתפתחו בכדור הארץ היו בעלי טיפוס מבני פשוט יחסית: לתאים מטיפוס זה כמעט ואין **אברונים פנימיים** (למעט **ריבוזומים** - האברונים שבהם מיוצרים חלבונים), החומר התורשתי (DNA) אינו מרוכז באזור מוגדר והפקת האנרגיה מתרחשת באמצעות אנזימים המקובעים לקרום התא. על כן, תאים מטיפוס זה נקראים **פרוקריוטים** - חסרי גרעין.

התייעלות הפקת אנרגיה הובילה להתפתחות תאים גדולים ומורכבים יותר, הנקראים **אאוקריוטים** - בעלי גרעין. תאים אלו גדולים יותר ובעלי מבנה פנימי מורכב בהרבה (איור 2): החומר התורשתי מרוכז באזור מוגדר, מוקף קרום, שנקרא **גרעין**, שמהווה מרכז בקרה של התא כולו. הפקת האנרגיה נעשית נעשית באברון ייעודי הנקרא **מיטוכונדריה**, וקיים מערך שלם אברונים נוספים המתמחים בתפקודים שונים המסייעים לתא בתפקודו. יציבות התא נשמרת על ידי מבנה שלדי מסועף העשוי סיבי חלבון אלסטיים (לרוב קולגן).

אברונים
הם חלקים מהתא בעלי תפקידים ספציפיים המוקפים בקרום. הם בעלי צורה אופיינית והם מצויים בציטופלסמה (נוזל התא).

פרוקריוטים
הם יצורים מיקרוסקופיים בעלי תא יחיד חסר גרעין טבעי, כלומר החומר התורשתי אינו שמור באזור מוגדר. הם תאים קטנים יותר מתאים אאוקריוטים וקוטרם אינו עולה בדרך כלל על 2 מיקרו מטר.

אאוקריוטים
הם יצורים תאיים בעלי גרעין (בו מרוכז החומר התורשתי) ואברונים, המהווים על-ממלכה במיון עולם הטבע. הם כוללים מגוון גדול של אורגניזמים, ובהם חד-תאיים כמו פרוטוזואה, ריריות, אצות ופטריות חד-תאיות וכן את הממלכות של הרב-תאיים: פטריות, צמחים ובעלי חיים בהם גם בני אדם. לדעת חלק מהמדענים, תאים אאוקריוטים הופיעו בכדוה"א עוד בטרם החל להצטבר חמצן באטמוספירה, אולם רק לאחר שהחל תהליך זה הפכו תאים אלו לדומיננטיים.

אנדו-סימביוזה בראשית החיים

התאים האאוקריוטים הראשונים הופיעו בכדור הארץ לפני 2-1.6 מיליארד שנים, כשעל פי ההשערה הרווחת בקהילה המדעית, תאים אלו התפתחו כתוצאה משורה של הטמעות תאים פרוקריוטיים זה בתוך זה בתהליך הנקרא **אנדו-סימביוזה** (אנדו - בתוך, סים - ביחד, ביוזה - חיים): חלק מהתאים הגדולים יותר ניזון על ידי בליעת תאים קטנים יותר, ובמקרים נדירים ביותר התאים שנבלעו לא עוכלו, אלא החלו "לשתף פעולה" עם התאים המאחסנים - ביצעו פעולות בתוך התא (שאותם הם ביצעו ביעילות רבה יותר מאשר התאים המאחסנים) בתמורה להגנה ולאספקת מזון. לתאים המשולבים היה יתרון ברור על תאים אחרים, סיכויי הישרדותם והתרבותם עלו משמעותית וכך הם הפכו לנפוצים יותר ויותר. להשערה זו תימוכין רבים: לאברון המיטוכונדריה למשל, יש DNA נפרד משל התא עצמו (כולל בתאי הגוף שלנו!), שדומה מאוד ל-DNA של חיידקים מסויימים (תאים פרוקריוטים). בנוסף, ישנם מינים מסויימים של יצורים חיים אשר נוהגים לאכול יצורים אחרים, לספוג חלק מתאיהם ולהשתמש בהם בעצמם - תופעה הנקראת קלפטו-פלסטיה: למשל, מינים מסויימים של חשופיות ימיות נוהגות לאכול יצורים ממערכת הצורבים כגון אלמוגים או הידרוזואות, לספוג את התאים הצורבים שמשמשים את הנטרף לצורך הגנה בשלמותם (יתר רקמות הנטרף מעוכלות), להעבירם לאברונים ייעודיים על גב החשופית ולהשתמש בהם להגנה עצמית. במקרים אחרים, חשופיות צמחוניות שניזונות מאצות אינן מעכלות את הכלורופלסטים שבתאי האצה (האברונים שמייצרים סוכר בתהליך הפוטוסינתזה), מעבירות אותן לרקמות ייעודיות בגבן ונהנות מתוצרי הפוטוסינתזה בעצמן. תהליך זה (ספיגת כלורופלסטים) תועד גם במינים מסויימים של ריסניות (חד תאיים אאוקריוטים).

היווצרות אורגניזמים רב תאיים

כלל היצורים החיים בכדור הארץ הקדום היו חד תאים עצמאיים. אולם, בערך בתקופה שבה הופיעו לראשונה תאים אאוקריוטים, התפתחו גם האורגניזמים הרב תאיים הראשונים - יצורים שכוללים מספר רב של תאים נמצאים בצמידות זה לזה, חולקים גנום משותף ומשתפים פעולה יחדיו. בין היתרונות של אורח חיים זה: התמודדות טובה יותר עם כוחות פיזיים כגון זרמים תת ימיים (מניעת היסחפות בזרם), יכולת השגת מזון יעילה יותר (כולל היכולת לצמוח לגובה, על מנת לספוג יותר קרינת שמש - במקרה של צמחים) והיכולת לפתח סביבה פנימית שעמידה להשפעות חיצוניות כגון התייבשות.

התפתחות יצורים רב תאיים התרחשה בנפרד במספר קבוצות (כגון צמחים, פטריות ובעלי חיים), כשקבוצה של חד תאיים ממין מסויים החלה לאמץ אורח חיים מושבתי באופן עונתי או קבוע, שבו התאים צמודים זה לזה. לאורך הזמן תאים מסויימים במושבה החלו להתמיין לתפקידים שונים, באופן אקראי או בהתאם ליתרונות היחסיים שמיקומם במושבה העניקו להם - למשל, תאים שמסוגלים להשיג יותר מזון (כאלו שממוקמים כנגד הזרם במושבות חד תאים מסננים, או כאלו שממוקמים גבוה יותר במושבות חד תאים פוטוסינתטיים,

כך שמסוגלים לקלוט יותר קרינת שמש) עברו התמיינות לתאי תזונה; תאים שממוקמים בצמידות לקרקעית (במושבות צמודות מצע) עברו התאמה להיאחזות במצע, בעוד שתאים אחרים במושבה עברו התאמה לייצור גופי רבייה (כגון נבגים) או סילוק תאים פולשים.
חשוב לציין שגם כיום קיימים מינים רבים של חד תאיים (פרוקריוטים ואאוקריוטים) אשר מקיימים אורח חיים מושבתי, עם רמות התמיינות שונות של תאי המושבה - בחלק מהמושבות ישנה התמיינות למספר טיפוסי תאים שונים, ובחלק כל התאים זהים זה לזה לחלוטין. ההגדרה מהו בעל החיים הרב תאי הראשון עודנה שנויה במחלוקת, אולם על פי רוב מתייחסים לספוגים - מערכה של חסרי חוליות מימיים, כאל בעלי החיים הרב תאיים הראשונים.

המפץ הקמבריוני

אבן דרך משמעותית נוספת בהתהוות החיים היא המפץ הקמבריוני, לפני -500 580 מיליון שנים. במהלכו, עלה קצב היווצרות המינים החדשים עלה משמעותית בהשוואה לתקופות קדומות יותר והמגוון הביולוגי בכדור הארץ החל להידמות לזה הקיים כיום. בעלי החיים שהתפתחו בתקופה זו, פיתחו מאפיינים והתאמות כגון:

אורח חיים חופשי - לראשונה הופיעו יצורים שאינם צמודי מצע ומסוגלים לנוע כנגד הזרמים.

- **סימטריה דו צידית** - סידור מערכות הגוף מסביב לציר סימטריה מרכזי
- **צפליזציה** - התפתחות מערכת עצבים מרכזית בקדמת הגוף - ראש
- **צלום** - חלל גוף פנימי המכיל את איברי הגוף הפנימיים
- **מערכות חישה** מפותחות כגון עיניים

4.2 טקסונומיה - מיון וסיווג היצורים החיים באוקיינוסים

מהי טקסונומיה?

טקסונומיה היא ענף מחקר המשמש למיון ושיוך האורגניזמים השונים בעולמנו לקבוצות היררכיות (בעלות מדרג), על בסיס תכונות ומאפיינים משותפים, כלומר, על פי מידת הדמיון או השוני בינהם. הצורך "לקטלג" את החי והצומח מסביבנו קיים עוד משחר האנושות, כשהישרדות הפרט והקבוצה תלויה ביכולת לענות על שאלות כגון: איזה צמח יכול לשמש למרפא ומאכל ואיזה רעיל ויש להימנע ממנו? או איזה יתושים מעבירים מחלות קטלניות ואיזה יתושים רק מהווים מטרד?

בעבר, מיון זה לא נעשה על בסיס מערכת חוקים סדורה ושיטתית, ולמעשה, כל מדען מיין את עולם הטבע כראות עיניו. היעדר השיטתיות הקשתה מאוד על שיתוף מידע בין חוקרים שונים וצבירתו על ידי העברה מדור לדור. מצב זה השתנה במאה ה-18, כשהבוטנאי (חוקר צמחים) השבדי קארל לינאוס הציע את שיטת המיון המדעית הראשונה, שממנה התפתחה הטקסונומיה המודרנית. על פי שיטה זו, כלל היצורים החיים ממוינים לקבוצות במערך היררכי (מדורג) אחיד:

צילום: עוז אלסר

רמת המיון הנמוכה ביותר היא **מין**. על פי ההגדרה המקובלת, מין הוא קבוצה של יצורים חיים המקיימים בינהם קשרי רבייה, כלומר, מסוגלים להעמיד צאצאים פוריים.

מעל רמה זו נמצא **סוג**. לדוגמא: מיני החתולים הגדולים אריה, טיגריס, יגואר, נמר ונמר שלג מהווים את הסוג פנתר. המינים בסוג זה מאופיינים בין היתר בתיבת קול גדולה ומבנה גולגולת שטוח ביחס לסוגי חתולים אחרים.

הרמה שמעל, נקראת **משפחה**. לדוגמא: משפחת החתוליים כוללת בתוכה את סוגי החתולים הבאים: פנתר (שהוזכר קודם), חתול (סוג שכולל גם את המין חתול בר, שממנו בוית חתול הבית), ברדלס, פומה, קרקל, שונר ועוד כ-7 סוגים נוספים. משפחה זו מאופיינת, בין היתר, בסידור שיניים ייחודי הכולל 30 שיניים בדיוק וטופרים נשלפים בעלי מבנה ייחודי.

הרמה הבאה נקראת **סדרה**. לדוגמא: משפחת החתוליים נכללת בתוך סדרת הטורפים ביחד עם 17 משפחות נוספות, בינהן - כלביים, נמייתיים, דוביים, ראקוניים, בואשיים, סמוריים וצבועיים. גם בני סדרה זו מאופיינים במבנה גולגולת וסידור שיניים ייחודיים.

הרמה הבאה נקראת **מחלקה**. לדוגמא: סדרת הטורפים נכללת במחלקת היונקים, שכוללת 27 סדרות נוספות, בינהן - פרימטים (קופים וקופי אדם), מכרסמים, לוויתנאים, קנגרואים, בעלי חדק (פילים), שפנאים, ארנבאים ועטלפאים. בעלי החיים במחלקת היונקים מאופיינים על ידי קיומן של בלוטות חלב, להזנת הצאצאים על ידי האם, ולרוב הם מכוסי שיער (פרווה).

בשם המדעי של מין האורגניזם המילה הראשונה מציינת את סוגו והשניה את מינו.
למשל המדוזה ממין **חוטית נודדת**, שנקראת בלועזית ***Rhopilema nomadica***.
כאשר מתייחסים רק לסוג, נהוג לכתוב זאת בלעז כך: ***Rhopilema sp.***

הטרוטרופים
אורגניזמים הצורכים את מזונם (חומר אורגני) מהסביבה בכדי להתקיים.

אוטוטרופים
אורגניזמים המייצרים את מזונם בעצמם - חומר אורגני על בסיס פחמן, המשמש להפקת אנרגיה ובניית הגוף/תא. בתהליך זה מנוצל פחמן אנאורגני (כגון הפחמן דו חמצני שבאוויר) תוך כדי שימוש במקורות אנרגיה חיצוניים.

הרמה הבאה נקראת מערכה. לדוגמא: מחלקת היונקים נכללת בתוך מערכת המיתרנים שכוללת בין היתר גם את המחלקות דגי גרם, דגי סחוס, דו חיים, זוחלים ועופות. מערכה זו (שכוללת גם מחלקות של חסרי חוליות) מאופיינת על ידי הימצאות צינור עצבי חלול ("חוט שדרה") ומיתר אלסטי (לשמירה על ייצוב תוך כדי תנועה) באזור הגב וחריצי זימים באזור הלוע.

הרמה הגבוהה ביותר נקראת ממלכה. לדוגמא: מערכת המיתרניים נכללת בממלכת בעלי החיים, שכוללת למעלה מ-30 מערכות נוספות, בינהן - רכיכות, פרוקי רגליים, קווצי עור וספוגים. כלל המינים בממלכה זו הינם אורגניזמים רב תאיים, אאוקריוטיים ו**הטרוטרופיים**.

בימיה הראשונים של הטקסונומיה המודרנית (במאות ה-18-19), ההשערה הרווחת הייתה שכלל היצורים החיים מחולקים לשתי ממלכות בלבד: בעלי חיים וצמחים. אולם, בעקבות הידע המדעי שהצטבר מאז והעמקת ההיכרות עם עולם הטבע, עודכנה חלוקה זו מספר פעמים והתווספו ממלכות נוספות. על פי החלוקה העדכנית ביותר (2015) קיימות כ-7 ממלכות, הנבדלות זו מזו במאפיינים בסיסיים ביותר ברמה התאית, כמו: טיפוס התא של האורגניזם - פרוקריוטי לעומת אאוקריוטי, נוכחות דופן תא והרכבה ואופי התזונה - הטרו לעומת **אוטו טרופי**. הממלכות הן: בעלי חיים, צמחים, פטריות, כרומיסטה (ממלכה הכוללת את מרבית האצות), פרוטוזואה (חד תאיים אאוקריוטיים), בקטריה וארכיאה (חד תאיים פרוקריוטים קדומים).

דוגמאות נוספות למיון מינים שונים, ב**טבלה 1**.

רמה טקסונומית	הומו ספיינס ("האדם הנבון")	צב ים ירוק	תמנון החוף	חסנית מצויה (אולווה)
ממלכה	בעלי חיים	בעלי חיים	בעלי חיים	צמחים
מערכה	מיתרניים	מיתרניים	רכיכות	אצות ירוקיות
מחלקה	יונקים	זוחלים	ראש רגלאיים	חסניות
סדרה	פרימטים	צבים	תמנונאים	חסניתאים
משפחה	הומנידיים ("קופי אדם")	צבי ים	תמנוניים	חסיניתיים
סוג	הומו	צב ים	תמנון	חסנית
מין	ספיינס	צב ים ירוק	תמנון החוף	חסנית מצויה

חשוב לציין שבנוסף לרמות הטקסונומיות שפורטו למעלה, קיימות חלוקות משנה נוספות. לדוגמא: המחלקות דגי גרם ודגי סחוס משויכות יחד לעל-מחלקת דגים בעוד שסרטנים קצרי בטן ממוינים ל-100 משפחות המקובצות יחדיו לתת-סדרת סרטנים קצרי בטן (שכלולה בתוך סדרת סרטנים מעשירי רגל).

בעבר, מיון היצורים החיים התבסס בעיקר על מאפיינים מורפולוגיים ואנטומיים, אך כיום הולך וגובר השימוש בשיטות הבודקות את הקוד הגנטי (רצף חומצות הגרעין המרכיבות את סליל ה-DNA) של אורגניזמים שונים. מידע נוסף לגבי טקסונומיה ניתן למצוא באתר היוזמה לטקסונומיה בישראל.

צמחים ואצות בים

באופן מסורתי שויכו האצות לממלכת הצמחים, עקב טבעם המשותף - אורגניזמים **פוטו-אוטוטרופים**, המייצרים את מזונם באמצעות אנרגיית האור בתהליך הפוטוסינתזה. אולם, מחקרים טקסונומיים עדכניים גורסים כי ההבדלים בין מרבית קבוצות האצות לצמחים יבשתיים, עמוקים מידי מכדי לכלול אותם בממלכה משותפת, וכיום הן משויכות לממלכות נפרדות. על אף זאת, חשוב לציין שתחת המונח "אצות" מקובל כיום לכלול את עיקר האורגניזמים האוטוטרופים החיים במים - החל מחיידקים פוטוסינתטיים (ציאנובקטריה או אצות כחוליות) דרך חד תאיים אאוקריוטיים ועד אצות רב תאיות (מאקרו אצות). עשבי הים - קבוצה של צמחים יבשתיים שעברה התאמה לאורח חיים תת ימי, אינם נחשבים לאצות.

ישנם מספר הבדלים משמעותיים בין צמחים יבשתיים לאצות, העיקריים שבהם:

מבנה - גופם של צמחים יבשתיים מורכב ממספר רקמות נבדלות זו מזו, המרכיבות איברים ומערכות גוף שונות (כגון שורשים, עלים, גבעול ופרחים) בעוד שגוף האצה פשוט יותר ומורכב כולו מרקמה אחת הנקראת **טאלוס**. גם אם קיימים איברים ייעודיים (כמו למשל שלפוחיות ציפה באצות חומיות) הם בנויים מרקמת הטאלוס.

ספיגה - צמחים סופגים מים וחומרי הזנה דרך השורשים ופחמן דו חמצני (לתהליך הפוטוסינתזה) דרך העלים. אצות לעומתם, סופגות את כל החומרים הדרושים להם דרך כל דופן גוף האצה.

מערכת הובלה - לצמחים מערכת הובלה מורכבת - צינורות ההולכה עצה ושיפה, בעוד שלאצות אין מערכת הובלה כלל, וכל תא סופג ומייצר לעצמו את החומרים הדרושים לו או מקבל אותם מתאים סמוכים בפעפוע (דיפוזיה).

פיגמנט פוטוסינתזה - צמחים יבשתיים משתמשים בשני סוגים של מולקולות קוצרות אור: כלורופיל וקרטנואידים. אצות משתמשות במגוון רחב יותר של חומרים, בינהם פיקובילינים - פיגמנטי אור המותאמים לסביבה חשוכה יחסית כמו למשל בעומק הים או כאשר המים עכורים.

מערכת רבייה - לצמחים מערכת רבייה מורכבת הכוללת איברים ייעודיים (פרחים) ומגנוני הפצה מגוונים. מערכת הרבייה באצות פשוטה יותר, ולרוב כוללת הופעה אקראית של גופיפי רבייה על גבי גוף האצה.

האצות השונות נבדלות זו מזו בהיבטים רבים כגון: אורח החיים - **פלנקטוני** (מרחף במים) או **בנטוני** (צמוד לקרקעית), פיגמנט פוטוסינתזה (מולקולה לוכדת אור אשר נמצאת בבסיס תהליך הפוטוסינתזה), מבנה דופן תאי האצה ובחומרי התשמורת (מחסן האנרגיה שבתאי האצה).

פוטו-אוטוטרופים
אורגניזמים אוטוטרופים המשתמשים באנרגיית אור לצורך ייצור מזונם.

טאלוס
הרקמה היחידה המרכיבה את גוף האצה (באצות רב תאיות).

פיגמנט פוטוסינתזה
מולקולה בעלת יכולת ספיגת אור, כשאנרגיית חלקיקי האור (פוטונים) הפוגעים בה משמשת לייצור סוכר בתהליך הפוטוסינתזה. פיגמנט הפוטוסינתזה הנפוץ ביותר הוא הכלורופיל.

איור 3

אצות חומיות בחוף הישראלי: (מימין) **אזנית** (מיה אלסר), (משמאל) **סרגסון** (wikipedia)

מערכת האצות החומיות

מאפיינים עיקריים - כוללת כ-2,000 מינים ונחשבת לקבוצת האצות בעלות המבנה המורכב ביותר: לחלק מהמינים בקבוצה זו ישנם התאמות של הטאלוס לתפקודים שונים כגון איבר דמוי גבעול ואיברים דמויי שלפוחיות ציפה. הן הגדולות יותר מבין האצות: ישנן מינים של אצות חומיות שגדלים עד לגובה 30 מטר ומשקל של 300 ק"ג לפרט בודד! מינים אלו, שתפוצתם מוגבלת לאזורים שבהם המים קרים ועשירים בחומרי הזנה יוצרים יערות תת ימיים עבותים הנקראים יערות קלפ (Kelp), על שם האצות היוצרות אותם.

בחוף הישראלי (איור 3) - גם באזורנו אצות חומיות מהוות מרכיב עיקרי במרבדי האצות שבמים רדודים. אצות מהסוג ציסטנית (*Cystoseira sp.*) וסרגסום (*Sargassum sp.*) יוצרות מרבדים עונתיים (בעיקר בתקופת האביב) שיכולים להגיע לגובה של יותר ממטר. מינים נפוצים נוספים הם אוזנית (*Padina pavonica*) ונפוחית מצויה (*Colpomenia sinuosa*) והאצה זרחנית תכולה (*Stypopodium schimperi*) אשר רעילה למאכל בעלי חיים ובני אדם.

מערכת האצות האדומיות

מאפיינים עיקריים - כוללת כ-6,000 מינים שנפוצים בעיקר באזורים החמים בכדור הארץ. הכלורופלסטים של אצות מקבוצה זו כוללים פיגמנטים כחולים (פיוציאנין) ואדומים (פיקוביליניים), וזאת בניגוד למרבית הצמחים (והאצות) שמכילים בעיקר פיגמנט ירוק (כלורופיל). פיגמנטים אלו מסוגלים לספוג אור ירוק (אור באורכי גל בינוניים), שמוחזר על ידי הכלורופיל. תכונה זו מעניקה לאדומיות יתרון בסביבות חשוכות יחסית כגון עומק הים ומים עכורים. חלק ממיני האצות במערכה זו (סדרת האלמוגיתאים) משקיעות שלד גירני מסיבי ולכן נחשבים לבוני שונית.

בחוף הישראלי (איור 4) - באזורנו קיים מגוון גבוה מאוד של אדומיות - בתת כרית ניתן למצוא מרבדים של האצות אספרגון (*Asparagopsis taxiformis*) וגלקסאורה (*Galaxaura rugose*, מין מהגר מים סוף) ושל האצות הגירניות אלמוגנית מצויה (*Ellisolandia elongata*) וגנית מאדימה (*Jania rubens*). באזור הכרית נפוצים

איור 4

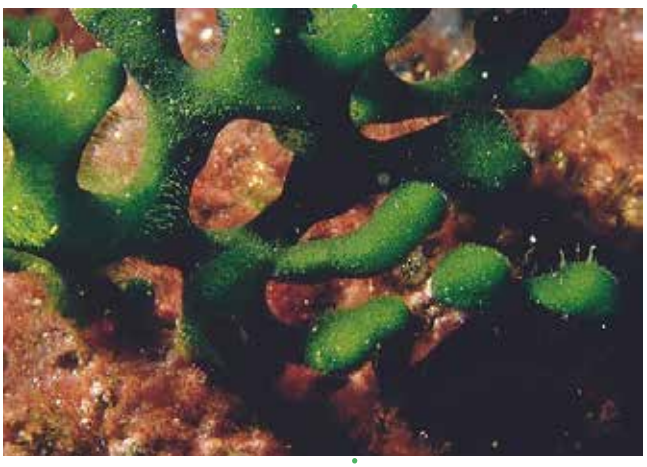
אצות אדומיות בחוף הישראלי: (מימין) **אספרגון מסועף** (wikipedia). (משמאל) **אלמוגנית מצויה** (רחלי עינב)

הסוגים פטמית (*Laurencia sp.*), ענפית (*Hypnea sp.*) ותולענית (*Nemalion sp.*), בעיקר באזורים החשופים למפץ גלים חזק במיוחד (קצה טבלת הגידוד).

מערכת האצות הירוקיות

מאפיינים עיקריים - כוללת כ-8,000 מינים (קבוצת האצות הגדולה ביותר), מרביתם חיים במים מתוקים. בסביבה הימית ניתן למצוא אצות ירוקיות בעיקר באזורי כרית או מים רדודים. על פי ההשערה הרווחת, כל צמחי היבשה בכדוה"א התפתחו מקבוצה זו. ירוקיות וצמחי יבשה חולקים מספר תכונות מרכזיות כגון: הרכב פיגמנטי פוטוסינתזה דומה (מתבסס על כלורופיל a, נותן יתרון בסביבות בעלות עוצמת אור חזק), דופן התא מורכבת בעיקר מתאית וחומר התשמורת העיקרי הוא עמילן.

בחוף הישראלי (איור 5) - במים הרדודים שבאזורנו התבססו מספר לא מבוטל של מיני אצות ירוקיות מהגרות. הבולטים שבהם מינים מהסוגים קודיון (*Codium Sp.*) ושלוחית (*Caulerpa sp.*). מאזור הכרית ראוי להזכיר את האצה חסנית, שמכסה את שטחי המסלע החופיים בסוף עונת החורף ובאביב.



איור 5

אצות ירוקיות בחוף הישראלי: (מימין) **קודיון** (משמאל) **אלמוגנית מצויה** (רחלי עינב)

פיטופלנקטון

מאפיינים עיקריים - פיטופלנקטון הוא שם כללי לכל האורגניזמים האוטוטרופים בסביבות מימיות, אשר אינם מחוברים לקרקעית אלא מרחפים במים (מכאן שמם: פיטו - צמח, פלנקטון - מרחף במים). כמעט כל המינים בקבוצה זו הינם חד תאיים. לחלקם אמצעי ציפה (כגון בועיות גז) או תנועה מוגבלת (כגון שוטונים) המאפשרים להם להישאר בקרבת פני המים, באזורים אליהם חודר מספיק אור בשביל לקיים את תהליך הפוטוסינתזה, ולהימנע משקיעה לאזורים עמוקים יותר השרויים בחושך תמידי. לחלק ממיני הפיטופלנקטון שלד קשיח העשוי מגיר או צורן (סיליקון). שלדים אלו שוקעים לקרקעית הים לאחר שהתא מת, והצטברותם יוצרת סלעי משקע כגון סלעי גיר או צור. בנוסף, כ-50% מהחמצן באטמוספירת כדור הארץ מיוצר על ידי פיטופלנקטון.

קבוצות מרכזיות -

- **דינופלגלטים (Dinoflagellata)** - חד תאים אאוקריוטים הנקראים גם שוטונאים. בעלי שוטון ארוך (מכאן שמם) המשמש לתנועה. חלק מהמינים בקבוצה זו הינם מיקסוטרופים - גם מייצרים מזון בעצמם באמצעות פוטוסינתזה - בדומה לפוטו-טוטוטרופים אחרים וגם צורכים אותו מהסביבה - בדומה להטרוטרופים. חלק ממיני השוטונאים מפרישים רעלים המסוכנים לבעלי החיים ולאדם. פריחת הדינופלגלטים יוצרת תופעה הנקראת '**גאות אדומה**', אשר עלולה לגרום לנזק סביבתי רב. עוד על התופעה ניתן לקרוא בקישור הבא.
- **אצות צורניות (Diatomaceae)** - חד תאים אאוקריוטים בעלי קופסית שלד קשיחה עשויה צורן (סיליקון). מינים רבים בקבוצה זו חיים במושבות דמויות שרשראות או טבעות.
- **קוקוליטופורים (Cocolithophore)** - חד תאים אאוקריוטיים בעלי שלד עגול עשוי לוחיות גיר.
- **אצות כחוליות (Cyanobacteria)** - נקראות גם ציאנובקטריה. חד תאיים פרוקריוטיים (שייכים לממלכת בקטריה)הנפוצים ביותר בים. חלק מהמינים חיים במושבות. בין האצות הכחוליות הבולטות חשוב לציין את האצה ספירולינה (Spirulina) המשמשת למאכל ונחשבת למזון על.

גאות אדומה

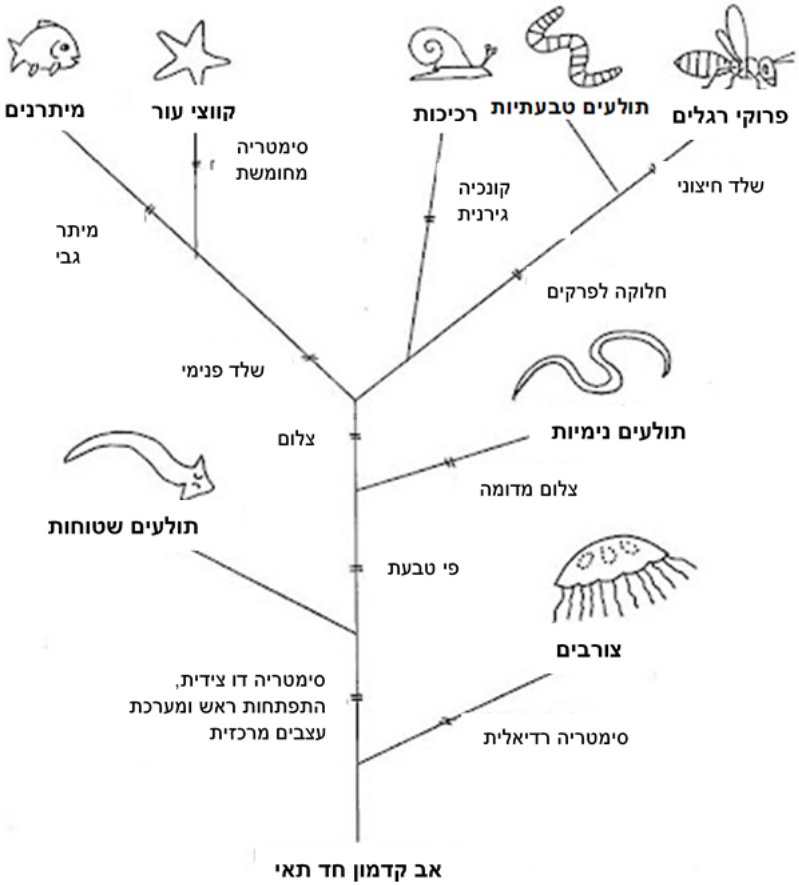
פריחת אצות חד תאיות מקבוצת הדינופלגלטים, אשר צובעת את המים באדום. האצות הללו פורחות באזורים שונים באוקיינוסים, בעיקר קרוב לחופים ומשחררות למים חומרים רעילים.

בעלי החיים בים

בעלי חיים הינם אורגניזמים אאוקריוטיים, רב תאיים והטרו-טרופיים (צורכים את מזונם מהסביבה, בדרך כלל ניזונים על אורגניזמים אחרים). בנוסף, מרביתם ניידים ובעלי כושר תנועה אקטיבית לפחות בחלק ממחזור חייהם, וגופם מרושת במערכת עצבית - רשת המאפשרת תיאום והעברת מידע באמצעות אותות חשמליים. בעולמנו תועדו עד היום כ-1.5 מיליון מינים (ועל פי הערכות קיימים כ-7 מיליון) של בעלי חיים בעלי מגוון עצום של צורות וגדלים הנפוצים בכל רחבי כדור הארץ. בעלי חיים אלו מקיימים אינטראקציה מורכבת עם סביבתם והאורגניזמים האחרים שנמצאים בה, ויוצרים מארגי מזון מורכבים במערכות האקולוגיות השונות. חשוב לציין שלכל אחת ממערכות בעלי החיים ישנה נציגות בסביבה הימית, כשבחלקן כל המינים חיים בים בלבד (קווצי עור למשל).

איור 6

עץ התפתחות בעלי החיים, הכולל את המאפיינים השונים בכל ענף



מערכת הספוגים

מאפיינים עיקריים - הספוגים נחשבים לבעלי החיים הקדומים יותר: אומנם הם אורגניזמים רב תאיים, אך שלא כמו יתר בעלי החיים, תאי גופם אינם מאורגנים **ברקמות אמיתיות** ומערכות גופם לא מסודרות סביב ציר סימטריה - נחשבים **א-סימטריים.** בעלי חיים אלו צמודי מצע (למעט בשלב הפגית - זחל בעלי חיים ימיים) וניזונים על ידי סינון חלקיקים אורגניים (כולל חיידקים) מתוך המים שבסביבתם. תאי גופם יוצרים מערכת מסועפת של תעלות וחללי סינון, הנתמכת על ידי מחטי שלד עשויות מגיר, צורן, או סיבי חלבון הנקרא **ספונג'ין.** מערכת זו מחוברת לסביבה באמצעות מספר רב של נקבוביות בדופן גוף הספוג, דרכם מתבצע סינון המזון. לגוף הספוג יש צורה מעונפת, גושית או מרפדת (עוטפת את המצע הקשיח).

נכון להיום מוכרים למדע כ-10,000 מיני ספוגים, הנפוצים בסביבות מימיות - מים מלוחים (ימים ואוקיינוסים) ומים מתוקים (אגמים ונהרות).

קבוצות מרכזיות - הספוגים ממוינים לארבע מחלקות שונות, בהתאם לסוג השלד המאפיין אותם:

- **צורניים (Demospongiae)** - מחלקת הספוגים הגדולה ביותר, כוללת למעלה מ-90% ממיני המערכה. השלד כולל מחטים עשויות צורן (סיליקון) או סיבי ספונג'ין (יכולים להופיע יחד).

רקמות אמיתיות
תאי הגוף של אורגניזמים רב תאיים לרוב מאורגנים ברקמות: התאים צמודים זה לזה כשהם מקובעים בשכבה ג'לטינית ומתאפשר חילוף חומרים ומעבר אותות כימיים וחשמליים בין תאי הרקמה.

א-סימטריים
מערכות הגוף של אורגניזמים רב תאיים לרוב מסודרות בדפוס מסוים הנקרא סימטריה. לדוגמא: בעלי חיים צמודי מצע מאופיינים בד"כ בסימטריה מעגלית (רדיאלית), שבה מערכות הגוף מסודרות במעגל, בעוד שבעלי חיים ניידים מאופיינים על ידי סימטריה דו צדדית, שבה מערכות הגוף מסודרות סביב ציר סימטריה מרכזי.

ספונג'ין
מודיפיקציה של חלבון קולגן - חלבון מבני (בעל תפקיד בבניית תאי הגוף) היוצר סיבים אלסטיים.

איור 7

(מימין) **ספוגים צורניים.** (משמאל) **ספוגי זכוכית** (wikipedia)

- **גירניים (Calcarea)** - המינים במחלקה זו חיים בעיקר במים רדודים ומגיעים לגודל קטן יחסית (קטנים מ-10 ס"מ). השלד כולל מחטי גיר ללא סיבי ספונג'ין.
- **קשיחניים (Homoscleromorpha)** - המחלקה הקטנה ביותר במערכה זו. שלדם של ספוגים קשיחניים מורכב ממחטים צורניות וסיבי ספונג'ין המונחים על מצע גירני, היוצר מעטה קשיח סביב הספוג.
- **זכוכיתיים (Hexactinellida)** - חיים בעומק הים ובעלי צורת גליל. לספוגי זכוכית מחטי של צורניות מסיביות שהתאחו ליצירת גליל.

בחוף הישראלי - בעומק הים (100-200 מטר) מול חופי ישראל (בעיקר מול אזור השרון, רכס הכרמל ואכזיב) קיימות שוניות ספוגים - אזורים שבהם הספוגים (ממספר רב של מינים) חיים בצפיפות ויוצרים מבנה המספק מחסה לאורגניזמים רבים נוספים (בדומה לשונית אלמוגים). באזורים רדודים בים התיכון הישראלי ספוגים נפוצים בעיקר בבתי גידול קריפטיים (נסתרים) כגון מערות, נקיקים, מתחת לאבנים וכו', אולם קיימים מספר מינים שניתן לפוגשם גם בשטח פתוח כגון אקסינלה (*Axinella sp.*) - ספוג כתום בעל צורה מעונפת או סרחן (*Ircinia fasciculata*) - ספוג שחור בעל צורה גושית. חשוב לציין שקיימים ספוגים גם במקווי המים המתוקים בישראל כמו הכנרת.

איור 8

ספוגים בחוף הישראלי. (מימין) ***Axinella sp.*** (wikipedia). (משמאל) ***Sarcotragus spinosulus*** (עמית אלסר)

מערכת הצורבים

מאפיינים עיקריים - למינים במערכה זו יש תאים צורבים - תאים ייחודיים בעלי מנגנון הזרקת ארס ומשמשים בעיקר לציד טרף והגנה מטורפים. לצורבים **סימטריה רדיאלית** כשמבנה גופם הבסיסי הוא **הפוליפ** - יצור דמוי גבעול שבקצהו העליון זר זרועות ציד מסביב לפתח פה. פי טבעת חסר - שאריות המזון נפלטות מפתח הפה. הפוליפ הוא צמוד מצע אך לרוב בעל יכולת תנועה (החלקה על המצע). צורת גוף נוספת לצורבים, שמאפיינת אורח חיים חופשי ומנותק מהמצע, היא המדוזה. בניגוד לפוליפ, פתח הפה וזר הזרועות של המדוזה פונים כלפי מטה ונמצאים בבסיסו של גוף דמוי פעמון. במינים רבים ממערכה זו מחזור החיים כולל גם שלב מדוזה וגם שלב פוליפ. למיני צורבים רבים אורח חיים מושבתי. מרבית הצורבים טורפים, כשחלקם מתקיימים גם בזכות עודפי המזון המיוצרים על ידי אצות שיתופיות (זואוקסנטלות) החיות בתוכם (הרחבה בנושא בפרק האלמוגים).

קבוצות מרכזיות - מערכה זו מחולקת לארבע מחלקות, אלו המרכזיות:

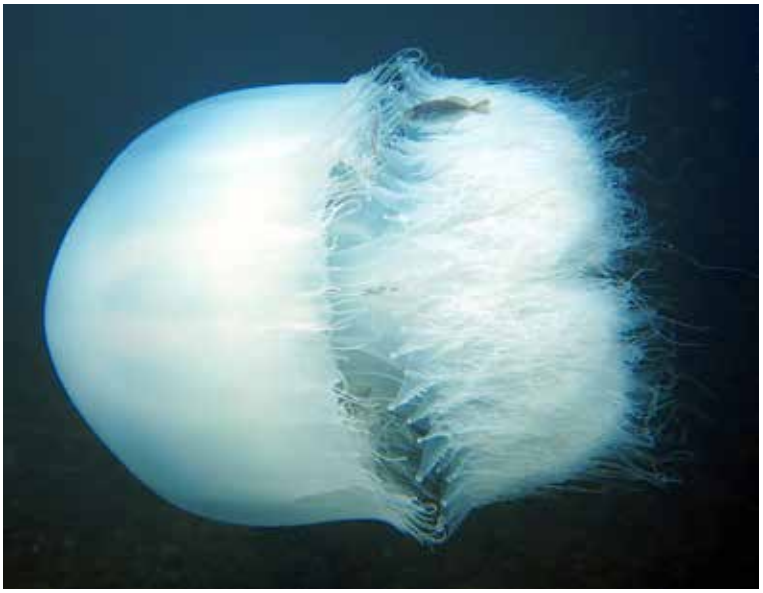
- **הידרתיים** - מחלקה מגוונת ביותר מבחינת אורחות החיים: חלק מההידרתיים חיים במושבות וחלק יחידאים, חלקם צמודי מצע (צורת הפוליפ), חלקם חופשיים (צורת המדוזה) וחלקם גם וגם (בשלבים שונים של החיים). בנוסף, ניתן למצוא מינים ממחלקה זו גם במים מתוקים וגם בים.
- **מדוזות סוכך** - בשונה מהידרתיים, מחלקה זו כוללת מינים יחידאים בלבד, החיים רק בסביבה הימית. חלק מהמינים במחלקה זו מגיעים לגדלים מרשימים ביותר: מינים מסוימים מגיעים לאורך של עשרות מטרים ולמשקל של מאות ק"ג!
- **אלמוגים** - האלמוגים הם צמודי מצע בלבד (ללא שלב מדוזה). מחלקה זו כוללת, בין השאר, את סדרות האלמוגאים (רובם מושבתיים ובעלי שלד גירני קשיח) ושושנות הים (יחידאים ללא שלד קשיח). בעלי שלד גירני קשיח יוצרים שוניות נרחבות במים הרדודים באזורים הטרופיים בכדוה"א - שוניות האלמוגים. חיים בסביבה הימית בלבד.

בחוף הישראלי - שונית האלמוגים האילתית היא הצפונית ביותר בעולם, והתנאים הייחודיים בה מאפשרים קיום מגוון ביולוגי גבוה עם אחוז גבוה של **מינים אנדמיים** (כ-30%). מהים התיכון ראוי להזכיר את גני אלמוגי העומק ששוכנים בעומקים 400-800 מטר וכוללים מושבות בנות מאות ואף אלפי שנים. בנוסף, מדי קיץ מגיעים לחופינו נחילי ענק של מדוזות מהמין חוטית נודדת (*Rhopilema nomadica*) (איור 9), המהווים מטרד למתרחצים בים ואף עלולים לגרום נזק לתשתיות ימיות.

סימטריה רדיאלית
ארגון מערכות הגוף במעגל, מסביב לנקודה מרכזית. מאפיין בעלי חיים נייחים או בעלי יכולת תנועה מוגבלת וללא מערכת עצבים מרכזית.

פוליפ
מבנה הגוף של בעלי חיים צמודי מצע ממערכת הצורבים.

מינים אנדמיים
מינים שתפוצתם מוגבלת לאזור גיאוגרפי מצומצם יחסית.



איור 9

חוטית נודדת (***Rhopilema nomadica***) (עמית אלסר)

מערכת החיטחביים

מאפיינים עיקריים - חסרי חוליות מושבתיים וצמודי מצע. חלקם בעלי צורה מרפדת אך ישנם מינים היוצרים מושבות מעונפות. ניזונים מסינון חלקיקי מזון מהמים באמצעות איבר ייחודי דמוי רשת הנקרא **לופופור (lophophore)** (איור 10). איבר זה משמש גם כאיבר הנשימה העיקרי של המינים במערכה זו. בעלי שלד חיצוני קשיח העשוי גיר או כיטין (רב סוכר קשיח). עד כה, הוגדרו כ-4,000 מינים של חיטחביים בעולם, החיים באזורים סלעיים בכל הסביבות המימיות - בים ובמים מתוקים.

בחוף הישראלי - החיטחב הבולט והשכיח בחופי ישראל הוא הנקבובית (*Watersipora spp.*), היוצר מושבות מרפדות בצבע חום-כתום באזורי המים הרדודים.

איור 10

חיטחב עם לופופור שלוף (wikipedia)

מערכת התולעים הטבעתיות

מאפיינים עיקריים - מערכה של חסרי חוליות בעלי צורה מוארכת. בני קבוצה זו כוללים מערכות גוף מורכבות כגון מערכת הפרשה (איברים דמויי כליות פזורים לאורך הגוף), מערכת הובלה (כולל איברים דמויי לב להזרמת נוזל דם) ומערכת עצבים הכוללת ריכוז עצבים בקדמת הגוף המשמשים לבקרה ותיאום (מוח). גופם של תולעים טבעתיות בנוי מסדרה של פרקים (סגמנטים) המופרדים במחיצה. צינורות העיכול, כלי דם ועצב עוברים דרך כל סגמנטי התולעת. חלק מהסגמנטים זהים זה לזה בעוד שחלק עברו התמחות לתפקודים ספציפיים כגון תנועה, לכידת מזון או חישה וכוללים איברים מותאמים לכך. כמו למרבית בעלי החיים, לתולעים טבעתיות **סימטריה דו-צידית**.

קבוצות מרכזיות - מערכה זו מחולקת ל-3 מחלקות:

- **עלוקות** - מרבית המינים במחלקה זו הינם טפילים הניזונים מדם בעלי חיים אחרים שחיים בבתי גידול של מים מתוקים.
- **דל זיפיות** - מרבית המינים במחלקה זו חיים (מחופרים) בסביבות יבשתיות או מים מתוקים וניזונים מסינון חומר אורגני מתוך המצע. המין המוכר ביותר מקבוצה זו הוא השלשול.
- **רב זיפיות** - הקבוצה הגדולה והמגוונת בתולעים טבעתיות. כמעט כל המינים ימיים, לרוב בנתונים אך גם פלנקטונים. בכל סגמנט בגופן יש שתי בליטות מכוסות זיפים העשויים כיטין (רב סוכר קשיח) הנקראות **פרה-פודיה (Parapodia)**. עיקר החמצן שתולעים רב זיפיות נושמות נספג דרך איבר זה. הרב זיפיות נחלקות לשתי קבוצות - ישיבות וחופשיות. התולעים הישיבות ניזונות לרוב מסינון חלקיקי מזון מהמים על ידי איברים דמויי רשת או ליקוטו מהמצע באמצעות בחנינים ייעודיים. לצרכי הגנה, לתולעים אלו יש במקרים רבים שלד חיצוני קשיח (עשוי גיר או חלקיקי חול שבעל החיים מדביק לעצמו) או שהן מתחפרות במצע. התולעים החופשיות ניזונות בדרך כלל על ידי טריפה או ליקוט חומר אורגני.

בחוף הישראלי - תולעים רב זיפיות מהוות רכיב משמעותי בחברה האקולוגית הן בים התיכון והן בים סוף. בין המינים הבולטים: התולעת החופשית זכוכיתית אדומת זימים (*Hermodice carunculata*) (איור 11), מין טורף המסוגל להגיע לאורך של 30 ס"מ, והתולעת הישיבה נרתיקנית שכיחה (*Dasychone lucullana*),

סימטריה דו-צידית

ארגון מערכות הגוף מסביבו לציר סימטריה מרכזי, כך שצד שמאל זהה כמעט לחלוטין לצד ימין. מרבית בעלי החיים הניידים ובעלי מערכת עצבים מרכזית מאופיינים בסימטריה זו.

פרה-פודיה (Parapodia)

רגל מדומה. לפרה-פודיה תפקידים רבים - תנועה, נשימה, חישה והגנה.

איור 11

זכוכיתית אדומת זימים (איתי גריסרו)

איור 12

סרטן חולון החוף *Ocypode cursor*; (wikipedia) **חי בחול וחייב לשמור את הזימים שלו רטובים על מנת לנשום. הוא חופר בעזרת רגליו מחילות עמוקות המתמלאות במים, שם הוא מסתתר במשך היום. בלילה הוא יוצא אל החוף ומלקט את מזונו - סרטנים ויצורים ימיים קטנים הנפלטים מהים**

הקרויה על שם נרתיק הריר שהיא מפרישה לצרכי הגנה מטורפים, ואליו היא מתכנסת כאשר יש איום בסביבתה. מין זה נפוץ באזור הכרית ובמים הרדודים וניזון על ידי סינון המים.

מערכת פרוקי הרגליים

מאפיינים עיקריים - המערכה הגדולה ביותר בעולם הטבע - עד היום הוגדרו למעלה מ-1.13 מיליון מינים של פרוקי רגליים, יותר מכל המינים האחרים יחדיו! גופם עטוי שלד חיצוני קשיח העשוי כיטין ומחולק לפרקים שכל אחד מהם נושא זוג גפיים פרוקות (מכאן שמם). פרוקי הרגליים הנפוצים ביותר בכדוה"א הם החרקים - מחלקה שכוללת כמיליון מינים. אולם, כיוון שמחלקה זו נפוצה בעיקר בסביבות יבשתיות, וכמעט ללא נציגות בסביבה הימית, נתמקד בפרק זה בפרוקי הרגליים הדומיננטיים בים - סרטנים. המינים בתת מערכה זו מאופיינים בגפיים דו-סעיפיות (גפיים מפוצלות לשני סעיפים) שהתמחו לבצע שלל תפקידים: הליכה, שחייה, לכידת מזון, אכילה, ניקוי הגוף, חישה, רבייה, הזרמת מים על גבי הזימים ועוד. אצל מרבית הסרטנים הזימים (איברי הנשימה) ממוקמים בין רגלי הבטן. עם גדילתם, משילים הסרטנים את השלד החיצוני הקשיח: השכבה הפנימית של השלד מעוכלת על ידי הסרטן ולאחר מכן השכבה החיצונית מתרופפת ונושרת. תהליך זה יכול לחזור על עצמו מספר רב של פעמים במהלך חייהם של סרטנים - כתלות בקצב הגידול של בעלי חיים אלו.

איור 13

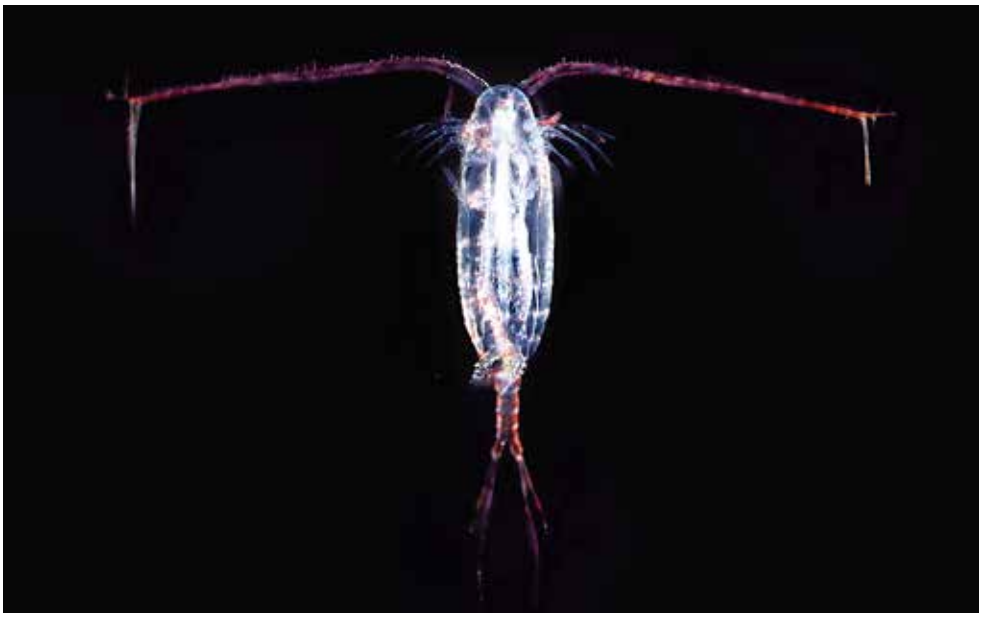
סרטנים עילאיים פלנקטוניים. (מימין) **סרטן מסדרת ה-*Amphipoda*.** (משמאל) **סרטן מסדרת ה-*Euphausiacea*.** (קריל). מתוך עבודת הדוקטורט של מיה אלסר

איור 14

(מימין) **בלוטי ים על גבי לוויתן.** (משמאל) **ברווזוני ים** (wikipedia)

קבוצות מרכזיות - תת מערכת הסרטנים כוללת 4 קבוצות דומיננטיות:

- **סרטנים עילאיים** (**Malacostraca**)- המחלקה הגדולה והמגוונת ביותר (כוללת 16 סדרות). בעלי חשיבות אקולוגית ומסחרית (לתעשיית הדיג) רבה. בתוכה: סרטנים קצרי בטן, ארוכי בטן (חסילונים), לובסטרים, סרטני נזיר, קריל, סרטני גמל שלמה ושטצדאים (אמפיפודים). למחלקה זו נציגים פלנקטוניים רבים בים, המשמשים מזון חשוב לליוויתני המזיפות (איור 13).
- **זיפרגליים** (**Cirripedia**) - תת מחלקה זו כוללת את בלוטי הים וברווזוני ים (איור 14). סרטנים אלו צמודי מצע בבגרותם, וניזונים על ידי סינון חלקיקי מזון מהמים באמצעות גפיים מותאמות.
- **שטרגליים** (**Copepoda**) - מרבית המינים בתת מחלקה זו הם פלנקטוניים (מרחפים בגוף המים) וניזונים על ידי סינון. נמצאים בתחתית מארג המזון של מערכות אקולוגיות ימיות רבות ומהווים מקור מזון חשוב למינים רבים של טורפים. הסרטנים בקבוצה זו מאופיינים בשני אנטנות גדולות המחוברות מאזור הראש ומשמשות לשחייה (איור 15).



איור 15

שטרגל (wikipedia)

איור 16

דפניה (Daphnia) - סרטן זעיר בגודל כ-3 מ"מ שחי במים מתוקים. ניזונה מסינון יצורים זעירים כמו אצות חד תאיות וחיידקים

- **סרטנים מסננים (Branchiopoda)** - מחלקה זו נקראת גם סרטנים ירודים (איור 16). סרטנים אלו ניזונים על ידי סינון, ולמרות שניתן למצוא אותם בכל בתי הגידול המימיים, הם דומיננטיים במיוחד במקווי מים עונתיים כגון שלוליות חורף.

בחוף הישראלי (איור 17) - גם בחופי ישראל קיים עושר רב של מיני סרטנים בכל בתי הגידול המימיים וביבשה. בין המינים הבולטים: באזור הכרית נפוצים סרטנים קצרי הבטן כגון סלען זיפני (*Eriphia verrucosa*, טורף), שיישן משורטט (*Pachygrapsus marmoratus*, צמחוני) וחולון החוף (*Ocypode cursor*, ניזון מרקבובית) (איור 12). שני המינים הראשונים חיים בחופים סלעיים בעוד שהאחרון חי בחופים חוליים, במחילות שאותן הוא חופר. באזור הכרית נוכל למצוא גם בלוטי ים מהמין בלוטון מצוי (*Chthalmus stellatus*), המכסים את הסלעים שמעל קו המים בצפיפות גבוהה. מאזור התת כרית נזכיר את המינים המהגרים שייט כחול (*Callinectes sapidus*), סרטן קצר בטן טורף היוצר התקבצויות גדולות בתחילת הסתיו, והחסילון פנון יפני (*Marsupenaeus japonicus*), שחי באזורי מצע חולי וניזון מרקבובית. שני המינים הללו נידוגים בכמויות גדולות על ידי צי הדיג הישראלי ולהם חשיבות מסחרית רבה.

איור 17

סרטנים נפוצים בחופי ישראל, (מימין לשמאל) **שיישן משורטט, סלען זיפני** (wikipedia) **וכפן גושמני** (עמית אלסר)

איור 18

רכיכות, מחלקת חלזונות. (מימין) **חשופית מסדרת ארנבי הים, *Aplysia dactylomela*** (אורי גלילי). (משמאל) **חילזון מהמין סטרומבוס מקושט (*Conomurex persicus*), מין פולש בחופי הים התיכון בישראל** (wikipedia)

מערכת הרכיכות

מאפיינים עיקריים - המערכה השנייה בגודלה (מבחינת מספר מינים) בממלכת החי, ונחשבת למגוונת ביותר בה. הרכיכות מאופיינות בקונכייה עשויה גיר, חיצונית בדרך כלל, המופרשת על ידי איבר בשם **גלימה**: קיפול של דופן גוף באזור הגבי, בעל מראה דמוי גלימה. המרווח שנוצר בין איבר זה לגוף בעל החיים נקרא **חלל הגלימה**. עיקר האינטראקציות של רכיכות עם מי הים שסביבם - חילופי גזים, חישה כימית (ריח) והפרשה - נעשות בתוך חלל הגלימה, שם ממוקמים הזימים, איברי החישה ופתחי מערכת ההפרשה. איבר ייחודי נוסף שקיים ברכיכות הוא המשננת (**רדולה**). איבר זה נראה כסרט שיניים זעירות, משמש לגירוד מזון ועשוי כיטין. למרבית הרכיכות רגל שרירית אחת, שבאמצעותה הם נעים ונאחזים במצע.

קבוצות מרכזיות - מיני הרכיכות ממוינים ל-7 מחלקות שונות, הגדולות שבהן:

- **חלזונות** (איור 18) - המחלקה הגדולה ביותר במערכת הרכיכות. החלזונות נפוצים בסביבות מימיות (מים מתוקים + ים) אך גם ביבשה. למרבית החלזונות קונכייה גדולה ומפותלת (ספירלית), אולם לחלקם אין קונכייה כלל (חשופיות) ולאחרים קונכייה פנימית מנוונת (ארנבוני ים).
- **צדפות** (איור 19) - רכיכות אלו מאופיינות בקונכייה **דו-קשוותית** ואורח חיים ישיב. הן ניזונות באמצעות שאיבת מים לתוך גופם וסינון חלקיקי המזון על ידי הזימים, שעברו התאמה ללכידת מזון בנוסף לתפקידם בנשימה. חיות בסביבות מימיות בלבד.
- **ראש רגלאיים** - במחלקה זו, שכוללת דיונונים, תמנונים ונאוטילוסים (איור 20), חסרי החוליות מגיעים לשיא הן מבחינת גודל (דיונוני ענק מגיעים לאורך של 15 מטר) והן מבחינת גודל המוח ומורכבות מערכת העצבים (נחשבים לתקשורתיים ולאינטליגנטיים בין חסרי החוליות). בעלי מספר רב של זרועות (8-90, בהתאם למין) שהתפתחו מהרגל השרירית. תמנונים מותאמים לחיים בבתי גידול קריפטיים (נסתרים) כגון סדקים ונקיקים וגופם אינו כולל קונכייה כלל בעוד שדיונונים מותאמים לחיים בים הפתוח ובעלי קונכייה פנימית

קשווה

קונכיית הצדפות בעלת שני חלקים, הנקראים קשוות.

איור 19

רכיכות, מחלקת צדפות. צדפת ענק (שרון קגן)

איור 20

רכיכות - נציגים מהקבוצות המרכזיות של מחלקת ראש רגלאיים, (מימין) **נאוטילוס** (wikipedia), (באמצע) **דיונון** (איתי גריסרו). (משמאל) **תמנון** (חנן קגן)

למטרות איזון וייצוב. נאוטילוסים גם חיים בים הפתוח ובעלי קונכייה חיצונית ספירלית המשמשת בעיקר להגנה. כל המינים במחלקה טורפים הלוכדים את מזונם בעזרת הזרועות. חיים בסביבות ימיות בלבד.

- **רב לוחיתיים (כיטונים)** - הרכיכות במחלקה זו מאופיינים בקונכייה בעלת 8 לוחיות החופות זו על זו (איור 21). קונכייה זו מעניקה לבעל החיים גמישות והתאמה למבנה הסלע וכך מתאפשרת היצמדות חזקה למצע. כמעט כל המינים במחלקה זו ניזונים מאצות וחיים באזור הכרית בלבד.

בחוף הישראלי - מבין הרכיכות במזרח הים התיכון בולטים במיוחד החלזונות הוורמטידיים (חלזונות דמויי תולעת וצמודי מצע) - שלשולן משולש (*Vermetus triquetrus*) (איור 22) וצינוריר בונה (*Dendropoma petraeum*).
הקונכיות של חלזונות אלו מחוברות בחוזקה למצע, ונותרות כך גם לאחר שבעל החיים מת. כתוצאה מהתיישבות חוזרת ונשנה של מינים אלו לאורך זמן רב, נבנות שוניות סלעיות מרשימות - טבלאות הגידוד. בתת כרית שבחוף הים התיכון

איור 21

רכיכות, מחלקת רב-לוחיתיים. כיטון ענק (*Acanthopleura Haddoni*), ים סוף (יונה לוין)

הישראלי, צדפות פולשות כגון שדרנית (*Spondylus spinosus*), בונות שוניות סלעיות תת ימיות באופן דומה.

מערכת קווצי העור

מאפיינים עיקריים - מערכה זו כוללת את המחלקות כוכבי ים, קיפודי ים, מלפפוני ים, נחשוני ים וחבצלות ים. לבעלי חיים אלו מספר מאפיינים ייחודיים, בינהם: סימטריה מחומשת - מרבית מערכות הגוף של קווצי עור בוגרים מחולקות לחמש (מבחינה חיצונית סימטריה זו בולטת בכוכבי ים ונחשוני ים בלבד). עוד מאפיין ייחודי הוא מערכת המים - מערכת זו, שתפקידיה העיקריים הם תנועה ואכילה, מורכבת מסדרה של צינורות הובלה, שלתוכה נשאבים מי ים ומוזרמים לרגלים דקיקות שנקראות רגלי מים ונעות בעיקר באמצעות לחץ מים, ולא בכוח שרירים. סביב פתח הפה ישנן רגלי מים מעובות ומפותחות יותר שמשמשות לאכילה. בנוסף לאלו, לקווצי עור יש שלד גירני פנימי, לרוב בצורת לוחיות, ואין מערכת עצבים מרכזית. חיים בסביבות ימיות בלבד.

איור 22

החילזון הורמטידי שלשולן משולש

קבוצות מרכזיות -

- **כוכבי ים** (איור 23) - בעלי דיסק מרכזי שממנו יוצאות חמש (או יותר) זרועות. מרביתם טורפים (בד"כ בעלי חיים צמודי מקום כגון צדפות או אלמוגים), ניזונים באמצעות הוצאת הקיבה מהגוף ועיכול חיצוני של הטרף. חילופי גזים (נשימה) מתרחשים דרך דופן רגלי המים ודרך שלפוחיות ייעודיות הבולטות מצידם העליון.

איור 23

קווצי עור, מחלקת כוכבי ים. (מימין) **כוכב ים על הקרקעית.** (משמאל) **רגלי מים שלופות מקצה זרוע של כוכב ים** (wikipedia)

איור 24

קווצי עור, מחלקת קיפודי ים. מימין: נזרית ארוכת קוצים. משמאל: איבר התזונה 'פנס אריסטו' (Wikipedia)

פנס אריסטו

הוא איבר תזונה ייחודי לקיפודי ים, הכולל מערכת של חמש לסתות עשויות מלוחות סידן ומחוברות על ידי שרירים. הקיפוד משתמש באיבר זה לגירוד אצות מסלעים ומשטחים אחרים.

- **קיפודי ים** (איור 24) - מרביתם בעלי צורה כדורית ועטויים קוצים. בעלי חיים אלו צמחוניים הניזונים מאצות אותם הם מכרסמים באמצעות איבר תזונה ייחודי הנקרא **פנס אריסטו.** בעלי שלד דמוי קופסית המורכב מלוחיות שלד מאוחות. נושמים באמצעות שלפוחיות הנמצאות בצידם התחתון מסביב לפתח הפה. חשוב לציין שלחלק קטן מקיפודי הים (מסדרת הקיפודים האי-רגולריים) צורה פחוסה, חיים מחופרים בתוך החול וניזונים מסינון חומר אורגני מתוך החול.
- **מלפפוני ים** (איור 25) - בעלי צורת דמוית גליל מאורך. ניזונים מחומר אורגני אותו הם מלקטים או מסננים מתוך המצע. שלדם מורכב מלוחיות שלד מיקרוסקופיות והם נושמים באמצעות זים פנימי. בעלי מנגנוני הגנה מטורפים ייחודיים: חלק ממלפפוני הים מפרישים חוטי דבק (נקראים חוטי קוביה) בשעת איום, בעוד שאחרים יכולים לפלוט את מערכות הגוף הפנימיות בכדי ליצור הסחת דעת שתרחיק טורפים.

איור 25

קווצי עור, מחלקת מלפפוני ים: (מימין) ***Bohadschia sp.*** **במפרץ אילת, מזדקף על מנת לפזר את זרעו במים למרחקים** (גל אביתר); (משמאל) **פתילה שחורה (*Synaptula reciprocans*) באכזיב, מתנייד ממקום למקום בעזרת התכווצויות גליות ופיתול של הגוף. לפתילה בחנינים המקיפים את הפה, בעזרתן הוא מלקט את מזונו מהקרקעית. מהגר מים סוף, נמצא לרוב על קרקע עם חצץ ואבנים** (עמית אלסר)

איור 26

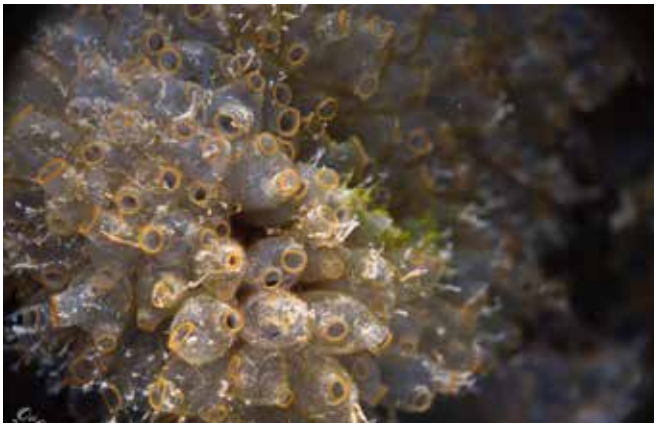
(מימין) **נחשון ים**, (משמאל) **חבצלת ים** (wikipedia)

- **נחשוני ים** (איור 26) - בעלי דיסק מרכזי שממנו יוצאות זרועות המורכבות מלוחיות שלד מסיביות ופרוקות (לרוב 7-5 זרועות). תזונתם מגוונת: ישנם מינים טורפים, בעוד שאחרים מסננים או מלקטים חומר אורגני. נחשוני הים חסרי פי טבעת ופסולת מזון מוצאת דרך פתח הפה. נושמים באמצעות שלפוחיות פנימיות בתוך הדיסק מרכזי.
- **חבצלות ים** (איור 26) - המחלקה העתיקה במערכת קווצי העור - מאובנים ראשונים מלפני 570 מיליון שנה. בעלות מספר רב של זרועות מנוצות המסודרות סביב פתח הפה. ניזונות על ידי ליקוט וסינון חלקיקי מזון מגוף המים. חלק מהמינים ישיבים (צמודים למצע באמצעות גבעול ארוך, וחלק בעלי יכולת תנועה מוגבלת.

בחוף הישראלי (איור 27) - בחוף הים התיכון בישראל קווצי עור יחסית נדירים בהשוואה לאזורים אחרים בעולם, אולם צפיפותם הולכת ועולה ככל שעומק המים עולה. ראוי לאזכור הוא כוכב הים המהגר כוכבון ננסי (*Asterina burtoni*). רק פולשים זכרים ממין זה התבססו בחופנו והם מתרבים ברבייה אל-מינית על ידי חלוקת הגוף לשניים. קיפוד הים הסגול (*Paracentrotus lividus*), שבעבר היה נפוץ ביותר בחופינו נעלם כמעט לחלוטין בעשרות השנים האחרונות.

איור 27

(מימין) **קיפוד ים סגול**, (משמאל) **כוכבון ננסי** (wikipedia)



איור 28

אצטלנים מושבתיים: (מימין) **אצטלן כתום (*Botrylloides sp.*), אצטלן מושבתי בו הפריטים שקועים בשורות מקבילות בטוניקה (גלימה) משותפת** (מיה אלסר). (משמאל) **אצטלן פולש מים סוף *Ecteinascidia thurstoni*** (אורי גלילי)

מערכת המיתרנים

מאפיינים עיקריים - מערכה זו כוללת שלוש תת מערכות: שתיים מתוכן הן קבוצות של חסרי חוליות (נקראות מיתרני ראש ומיתרני זנב), והקבוצה השלישית היא בעלי החוליות, קבוצה גדולה ומגוונת ביותר הכוללת גם את היונקים, ואותנו בתוכם. בעלי החוליות הם כיום בעלי החיים הנפוצים והדומיננטיים ברוב המערכות האקולוגיות בכדור הארץ. למינים במערכה זו מספר מאפיינים:

1) מיתר גבי אלסטי, שעל שמו קרויה מערכה זו, ומשמש לתמיכה וייצוב לבעלי חיים ניידים, תוך כדי מתן גמישות (וזאת בניגוד לשלד חיצוני קשיח שיש למרבית חסרי החוליות).

2) צינור עצבי גבי המשמש להעברת אותות חשמליים ממערכת בעצבים המרכזית (מוח) ליתר חלקי הגוף. צינור זה, שנקרא גם **חוט שדרה**, לרוב עובר בתוך או צמוד למיתר הגבי האלסטי.

3) חריצי זימים באזור הלוע המאפשרים נשימה דרך פתח הפה.

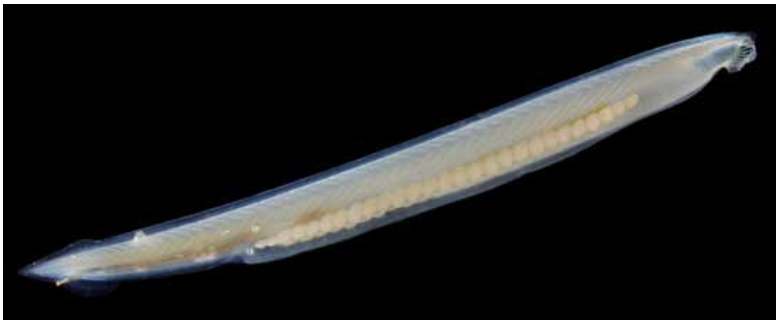
חשוב לציין שבמרבית בעלי החוליות, מאפיינים אלו מתנוונים במהלך שלבי החיים הצעירים (ההתפתחות העוברית במקרה של יונקים).

קבוצות מרכזיות -

1. **תת מערכת מיתרני הזנב** - קבוצה של חסרי חוליות הניזונים מסינון ומאופיינים במעטה גוף ג'לטיני קשיח העשוי מרב-סוכר שנקרא טוניצין. כוללת מחלקה אחת של בעלי חיים צמודי מצע (בשלב חייהם הבוגר) - אצטלנים (Ascidiacea) (איור 28), ושתי מחלקות פלנקטוניות: טליציאה (Thaliacea, סלפות) ולארווציאה (Larvacea). חיים בסביבות ימיות בלבד.

2. **תת מערכת מיתרני הראש** - נחשבים לאב הקדמון של בעלי החוליות ונקראים גם דמויי-דגים. חסרי חוליות בעלי צורה מאורכת, מיתר גבי ואיבר דמוי עמוד שדרה (איור 29). קבוצה זו כוללת 2 משפחות בלבד. מרבית המינים חיים בסביבת הקרקעית החולית. ניזונים על ידי סינון חלקיקי מזון ופלנקטון מהמים.

3. **תת מערכת בעלי החוליות** - מאופיינת בעמוד שדרה המורכב מחוליות שהחליף או התווסף למיתר הגב, ובמערכת עצבים מרכזית מפותחת ביותר.



איור 29

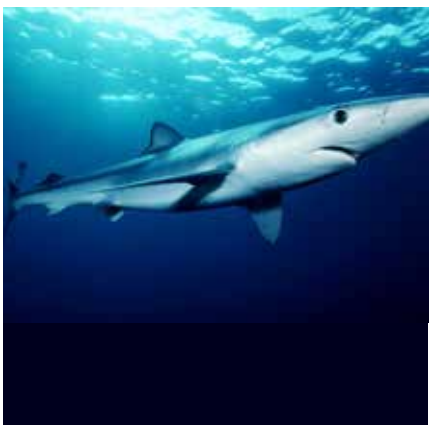
מיתרני ראש - מיתרן ממשפחת Branchiostomatidae (Naturalista)

קבוצה זו כוללת מחלקה אחת של בעלי חיים אקווטיים (חיים במים בלבד) - דגים, מחלקה אחת אקווטית למחצה - דו חיים, ושלוש מחלקות של בעלי חיים שהותאמו לחיים ביבשה - זוחלים, יונקים ועופות. במחלקות אלו ישנן קבוצות של בעלי חיים שעברו התאמה מחודשת לחיים בים - זוחלים ימיים (כגון נחשי ים, צבי ים), יונקים ימיים (כגון אריות וכלבי ים, ליוויתנים ודולפינים), ועופות ימיים (כגון פינגווינים). תת מערכת בעלי החוליות כוללת את המחלקות הבאות:

דגי סחוס (איור 30) - מיתרנים ימיים (שייכים לעל מחלקת הדגים, ביחד עם דגי גרם) אלו מאופיינים ב[שלד עשוי סחוס] - רקמת חיבור סיבית וצפופה, הגמישה יותר אך קשיחה פחות מעצם (גרם). עורם מכוסה בקשקשים זעירים אך קשיחים ביותר. בעלי מערכות חישה מתקדמות ביותר שכוללות גם חישה חשמלית - יכולת לחוש זרמי חשמל במערכות עצבים של בעלי חיים אחרים. מערכת חישה זו מאפשרת לכידת טרף בתנאי חוסר ראות (בעומק הים או במים עכורים). דגי הסחוס מאופיינים גם במערכת רבייה מפותחת ביותר - אצל מרביתם ההפריה פנימית, ומינים רבים משריצים ולדות חיים. כל המינים במחלקה זו טורפים. במחלקה זו שלוש סדרות מרכזיות: **כרישאים** - דגי סחוס המותאמים לאורח חיים פלגי (בים הפתוח). בעלי צורת גוף מוארכת והידרודינמית. **בטאים** - דגי סחוס המותאמים לחיים על גבי הקרקעית. צורת גופם שטוחה ופיהם נמצא בצידם התחתון, פונה אל הקרקעית. **כימרות** - הסדרה הקטנה ביותר במחלקה זו ונחשבת גם לקדומה ביותר. דגים אלו קטנים במימדם ביחס לכרישים ולבטאים. חיים לרוב בעומק הים. מידע נוסף, באתר כרישים בישראל ובדף הפייסבוק שלהם.

איור 30

דגי סחוס. (מימין) **כימרה (wikipedia). אמצע: כריש כחול *Prionace glauca*. (שמאל) חשמלן** (אורי גלילי)



איור 31

דגי גרם בחוף הים התיכון הישראלי (מימין למטה ונגד כיוון השעון) **מורנה ים תיכונית (*Muraena helena*), סיכן משוייש (*Siganus rivulatus*) דקר הסלעים (*Epinephelus marginatus*) וקיפון גדול ראש (*Mugil cephalus*), נקרא גם בורי** (wikipedia)

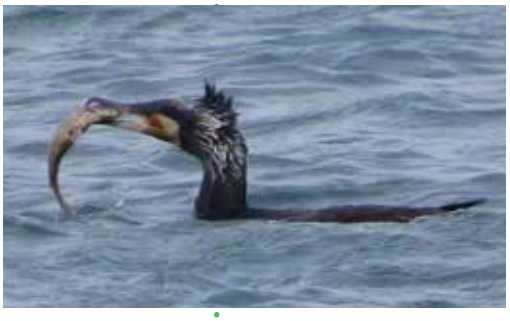
דגי גרם (איור 31) - קבוצה מגוונת ביותר, שנציגיה נפוצים בכל בתי הגידול האקווטיים, ולהם חשיבות אקולוגית ומסחרית רבה (עוד על חשיבותם המסחרית של הדגים בפרק משאבים מן הים). דגי גרם מאופיינים בשלד עשוי גרם, הדומה בהרכבו לשלד חולייתנים אחרים כגון יונקים. עורם מכוסה קשקשים חופים - קשקשים דמויי לוחית המכסים אחד את השני. זימיהם מכוסים בלוחית עצם שטוחה הנקראת **מכסה זימים (אופרקולום)**. בפתיחה וסגירה של מכסה הזימים, מזרימים דגים אלו מים טריים על פני הזימים וכך מייעלים מאוד את חילופי הגזים ותהליך הנשימה. זאת, בניגוד לכרישים, שזימיהם אינם מכוסים ועליהם להישאר בתנועה בשביל לנשום. איבר נוסף שמייחד את דגי הגרם הוא שלפוחית הציפה. שלפוחית זו, מתמלאת בגז על פי הצורך ומסייעת לדג לשמור על ציפה מאוזנת ושליטה בעומק. מבין קבוצות דגי הגרם ראוי להזכיר את סדרת הדקראים (Perciformes), מהגדולות והמגוונות בממלכת בעלי החיים. קרוב ל-50% מכלל מיני דגי הגרם נכללים בסדרה זו, מחולקים ל-151 משפחות שונות!

זוחלים (איור 32) - המיתרנים הראשונים שהותאמו לחיים על היבשה ומכוון שכך, הם נושמי ריאות. נפוצים בכל רחבי כדור הארץ, למעט באזורי הקטבים. גופם מכוסה שכבה אטומה של קשקשים חלבוניים קשיחים, בעלי הרכב דומה לשערות ולציפורניים. כיסוי זה מספק הגנה כנגד התייבשות, קרינת שמש וגורמי פגיעה חיצוניים נוספים. התאמה חשובה נוספת לחיים ביבשה היא ציפוי הביצים במעטפת קשיחה עשויה סידן - קליפה. סדרות הזוחלים המרכזיות הן: **תנינאים** (Crocodilia) - זוחלים טורפים מימיים למחצה (לוכדים את מזונם

איור 32

זוחלים ימיים (מימין למטה ונגד כיוון השעון) **איגואנת ים**, **נחש ים**, **תנין ים**, **צב ים** (wikipedia)

במים, אך מבלים את עיקר זמנם ביבשה) הנפוצים באזורים החמים בכדור הארץ. מרביתם חיים במים מתוקים ומיעוטם בים, כשהבולט שבהם הוא תנין הים מאוסטרליה (*Crocodylus porosus*), המגיע לאורך 7 מטרים. **צבים** (Testudines) - זוחלים המאופיינים בשריון קשיח המכסה את גבם ואת גחונם. חיים בבתי גידול יבשתיים, במים מתוקים ובים. בסביבה הימית הם מהווים את קבוצת הזוחלים הנפוצה ביותר - תפוצתם משתרעת במרבית הימים הטרופיים והסובטרופיים. הרכב תזונתם משתנה בהתאם למין הצב ולעיתים גם בהתאם לשלב ההתפתחותי והוא נע בין אצות לחסרי חוליות. למרות היותם נושמי אוויר, הם מסוגלים לצלול לעומק מאות מטרים בעצירת נשימה. צבי הים הם סוליטריים (חיים כיחידים) ונפגשים בים רק בעונת הרבייה כדי להזדווג. ההפריה היא פנימית ובמהלך עונת הרבייה תזדווג הנקבה עם מספר זכרים. כחודשיים לאחר ההזדווגות עולות הנקבות על החופים לצורך הטלת הביצים בגומות חפורות בחול. בכל תטולה עשויות להיות ביצים ממספר זכרים שונים. עוד על צבי הים בישראל ניתן לקרוא בפרק 16.1. **לטאות** (Lacertilia) - קבוצת הזוחלים הגדולה והמגוונת ביותר - למעלה מ-6000 מינים, חלקם טורפים וחלקם צמחוניים. כולם יבשתיים, למעט מין אחד - איגואנת הים מאיי הגלפגוס (*Amblyrhynchus cristatus*). **נחשים** (Serpentes) - זוחלים טורפים חסרי גפיים. בעלי יכולת חישת חום המאפשרת לראות עצמים חמים (כגון יונקים או עופות הבעלי דם חם) גם בחשיכה. בעלי חוש ריח מפותח במיוחד. מרבית מיני הנחשים יבשתיים, אולם קיימים מספר נחשים המותאמים לחיים בים ונפוצים באוקיינוסים השקט וההודי.



איור 33

עופות ימיים. (משמאל) **פינגווין**, (למעלה) **שקנאי**, (wikipedia) (למטה) **קורמורן** (מיה אלסר)

עופות (איור 33) - המחלקה הצעירה ביותר במערכת המיתרנים, אשר חבריה עברו התאמות המאפשרות להם לעוף באוויר: גופם עטוי נוצות המגדילות את שטח הכנף, עצמות חלולות להפחתת משקל ומקור קל במקום שיניים. בדומה ליונקים, שומרים העופות על חום גוף קבוע. בדומה לזוחלים, העופות מטילי ביצים, אולם בשונה מהם, מרבית המינים מטפלים בצאצאים עד הגעה לבגרות. חלק ממיני העופות משיגים את מזונם במים מתוקים או בים ופיתחו התאמות מיוחדות לצורך כך, כגון נוצות צפופות שמרוחות בחומר שומני היוצר שכבה אטומה למים וקרום שחייה בין אצבעות הרגלים שמייעל את יכולת השחייה והצלילה. אלו נקראים גם עופות מים או ים. מבין הסדרות המרכזיות במחלקת העופות, שכוללות עופות ימיים, חשוב להזכיר את **השקנאיים** (Pelecaniformes) - עופות המתמחים בטריפת דגים קטנים החיים בלהקות ומאופיינים במקור ארוך דמוי שק המאפשר להם ללכוד כמות גדולה של דגים; **סולתאים** (Suliformes) - סדרה הכוללת עופות המתמחים בלכידת דגים בצלילה כגון קורמורנים (Phalacrocoracidae); **פינגווינאים** (Spheniscidae) - המינים בסדרה זו מותאמים במיוחד לחיים בים - מוערך שהם מבלים כמחצית מהזמן בחייהם בים. עופות אלו איבדו את יכולת התעופה. חיים בחצי הכדור הדרומי בלבד, בעיקר באזור אנטרטיקה.

יונקים - בעלי חוליות נושמי אוויר, בעלי טמפרטורת גוף קבועה, נמוכה מעט משל בני האדם ($36.7^{0}C$ אצל דולפינים) וכסות גוף פרוותית אצל יונקים שמחלקים את זמנם בין הים ליבשה. היונקים הימיים פיתחו שורה של התאמות לחיים בים: צורת גוף הידרו דינמית, גפיים דמויי סנפירים, שמירה על חום גוף באמצעות שכבת שומן תת-עורי עבה או פרווה צפופה ושומנית. יכולת לסגור את הנחיריים בשעת צלילה ומנגנונים פיזיולוגיים המאפשרים עצירת נשימה לזמן ממושך יותר. התאמות משמעותיות נוספות הקיימות רק אצל סדרת הלוויתנאים, אשר חבריה מבלים את **כל** זמנם במים, הם שינוי מקום פתח הנשימה (נחיריים) לחלק העליון של הגולגולת שמאפשר נשימה רצופה

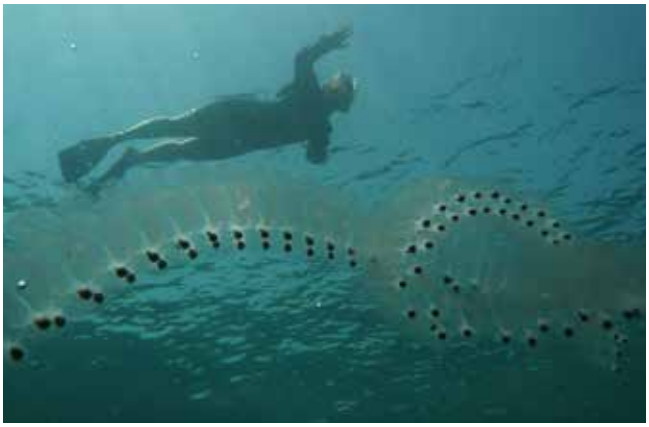
איור 34

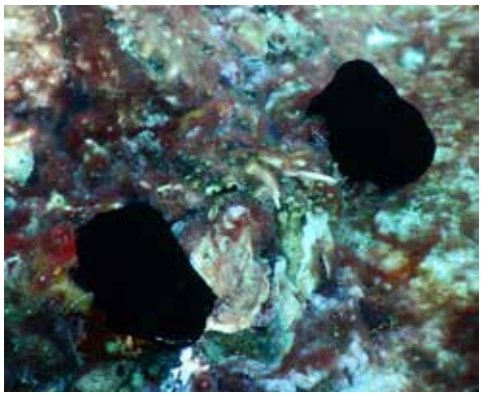
אמא וגור של דולפינן מצוי (*Tursiops truncates*) מול חופי אשקלון (מיה אלסר)

גם תוך כדי שחייה, ושינה עם מוח פעיל למחצה, דבר המאפשר המשך נשימה במהלכה.

היונקים הימיים מתחלקים ל-4 סדרות:
סנפירגליים - כוללת את כלבי הים, אריות הים, פילי הים וסוסי הים. טורפים אלו מבלים את עיקר זמנם על היבשה באזור החוף ומוצאים את מזונם בים.
סירנות - קרויות גם תחש או פרות ים. בעלי חיים צמחוניים אלו ניזונים בעיקר מעשבי ים וחיים באזורים טרופיים בעלי מים חמימים.
טורפים יבשתיים - למרות שמה של סדרה זו, חלק מהמשפחות השייכות אליה כוללות נציגים ימיים - דובי קוטב ולוטרות ים, המוצאים את מזונם בים.
לוויתנאים - סדרה זו מחולקת לשתי קבוצות עיקריות - הראשונה, ליוויתני שיניים, שכשמם כן הם, כולם בעלי שיניים לחיתוך מזונם (בעיקר דגים וראש רגלאיים). כוללים דולפינים, שהם קטנים מ-4 מטר ולוויתנים, שהם גדולים מ-4 מטר, כשליוויתן השיניים הגדול ביותר הוא הראשתן שמגיע לאורך מירבי של 14 מטר ויכול לצלול לעומק של 1,500 מטר! הקבוצה השנייה, לוויתני המזיפות, מאופיינת במינים חסרי שיניים, כשבמקומן מערכת לוחות קרניים (חומר חלבוני הדומה לחומר שממנו עשויות שערות וציפורניים) ושערות הקרויות מזיפות ומשמשות לסינון בעלי חיים קטנים מהמים. אלו הם בעלי החיים הגדולים ביותר בעולמנו. הגדול שבהם, הלוויתן הכחול, מגיע לאורך 30 מטר ולמשקל 160 טון - זהו בעל החיים שאי פעם התקיים בכדור הארץ!

עוד על היונקים הימיים לחופי ישראל באתר דלפיס ובדף הפייסבוק שלהם.





איור 35

מיתרנים בים התיכון הישראלי: (מימין) **הבטאי גיטרן מובהק *Rhinobatos*) (*rhinobatos*** (אורי גלילי). (משמאל) **מושבת סלפה מהמין *Thalia democratica*** (wikipedia). (למטה) **האצטלן נאדן שחור (*Phallusia nigra*)** (עמית אלסר)

מיתרניים בחוף הישראלי (איור 35) - מבין המיתרנים הבולטים באזורנו, חשוב להזכיר את התקבצויות הרבייה במים רדודים של בטאים מהסוגים גיטרן (*Rhinobatos spp.*), מחבטן (*Taeniura spp.*), אברתן (*Rhinoptera spp.*) וטריגון (*Dasyatis spp.*) בעונת האביב, ואת התקבצויות כרישי הסנפירתן (*Carcharhinus plumbeus*) ועפרורי (*Carcharhinus obscurus*) בסמיכות לתחנות הכוח הגדולות (חדרה ואשקלון) בעונת החורף. חופי ישראל החוליים מהווים אתר הטלה חשוב לצבי ים חומים (*Caretta caretta*) וירוקים (*Chelonia mydas*) במזרח הים התיכון, עם מאות הטלות בשנה. מיתרני זנב בולטים הם מיני האצטלנים הפולשים הרדמניה מומוס (*Herdmania momus*) ונאדן שחור (*Phallusia nigra*) שנפוצים בחופים סלעיים ומיני הסלפות שיוצרים נחילים צפופים בסוף עונת החורף ותחילת האביב.

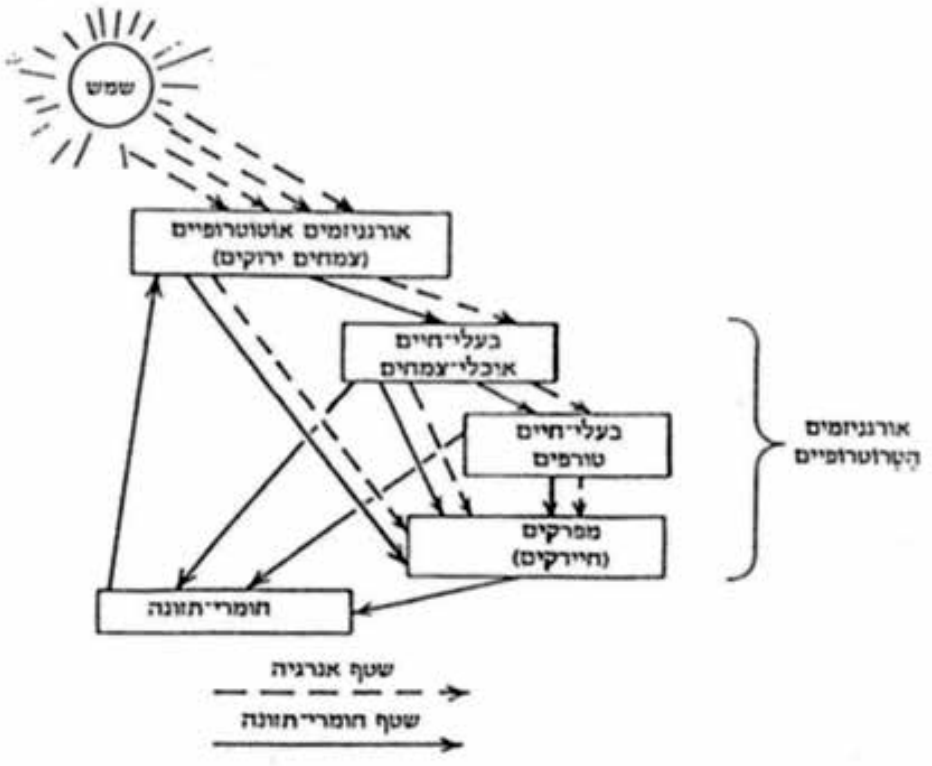
4.3 מארג המזון בסביבה הימית

כל יצור חי קולט מסביבתו את הדרוש לו לקיום, גדילה ורבייה - חומר לבניית תאי ורקמות הגוף, ואנרגיה לביצוע כלל פעולות החיים השונות. כתוצאה מכך, כל יצור חי משפיע, מעצם קיומו, על יתר היצורים החיים במערכת האקולוגית שבה הוא נמצא: באופן ישיר, למשל על ידי צריכתם כמקור מזון או היותו מקור מזון להם, או באופן עקיף, בתגובת שרשרת. מארג המזון הוא תיאור של סך כל **קשרי הגומלין הטרופיים** במערכת האקולוגית, או במילים אחרות - מי אוכל את מי. זהו מרקם של זרימת אנרגיה וחומרים בין הסביבה לבין היצורים שבמערכת ובין היצורים לבין עצמם. חומר ואנרגיה במערכת האקולוגית עוברים דרך מארג המזון לפי הסכימה הבאה (איור 36).

מארג המזון כולל מספר רמות תזונה, הנקראות גם **רמות טרופיות**, וכל אחת מהן היא שלב בגלגול החומר. רמת התזונה של פרט או אוכלוסייה נקבעת על פי מיקומם במארג המזון, כלומר, את מי הם אוכלים ועל ידי מי הם נאכלים:

1. **היצרנים** - זוהי רמת התזונה הראשונית, נקראים גם **אוטוטרופים** (אוטו - עצמי, טרופי - הזנה). היצרנים מייצרים לעצמם את מזונם, כלומר, מייצרים חומר אורגני מחומר אנ-אורגני, תוך רתימת מקורות אנרגיה חיצוניים לתהליך זה. היצרנים הנפוצים בעולם הם **פוטו-אוטוטרופים** - יצורים המשתמשים באנרגיית אור שמקורה בשמש לייצור המזון - צמחים בסביבות יבשתיות ואצות בסביבות מימיות. הרוב המוחלט של היצורים החיים בכדור הארץ תלוי במזון המיוצר על ידי קבוצה זו. בתהליך זה, אנרגיית אור משמשת לייצור חומר אורגני על בסיס פחמן (סוכר), המשמש להפקת אנרגיה ולבניית תאי ורקמות הגוף. התגובה הכימית המתרחשת בתהליך זה מתוארת בנוסחה הבאה (איור 37).

איור 36. תיאור גרפי של מארג מזון



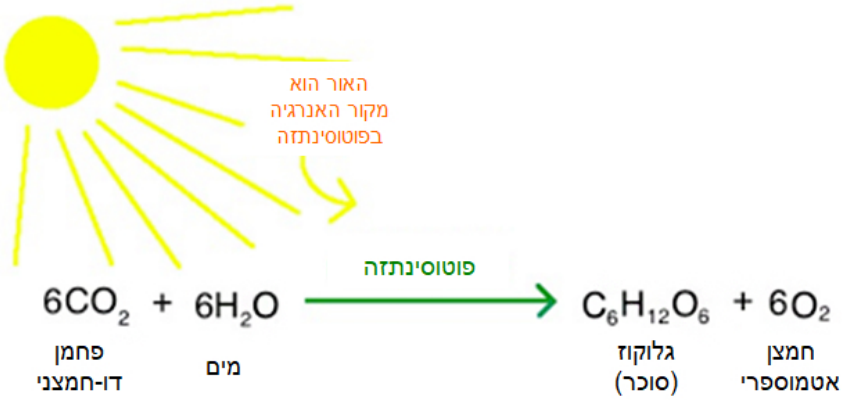
קשרי גומלין טרופיים

אינטראקציות בין יצורים חיים המבוססות על תזונה.

רמה טרופית

רמת הזנה המייצגת את מיקומו של אורגניזם בשרשרת המזון. המילה 'טרופי' נגזרת מהמילה היוונית trophē ומשמעה אוכל או אכילה.

איור 37: תהליך הפוטוסינתזה



פוטוסינתזה מתבצעת על ידי צמחים יבשתיים, אצות וקבוצות מסויימות של חד תאים וחיידקים. היצורים הפוטו-אוטוטרופים תלויים באור השמש, מקור האור העיקרי במערכת השמש, ומוגבלים בתפוצתם לאזורים בהם הוא קיים בשפע. בנוסף לאור, **הגורם המגביל** את גדילתם הוא זמינות **חומרי הזנה (נוטריינטים)**. אלו הם מולקולות על בסיס חנקן וזרחן, חומרים המצויים בכמות קטנה יחסית בטבע, ומהווים מרכיב מרכזי בייצור חלבונים וחומצות גרעין (חומר תורשתי - DNA+RNA) - חומרים הכרחיים לכלל תפקודי החיים (כגון תחזוקה, גדילה ורבייה).

חשוב לציין, באזורים שאליהם לא מגיע אור שמש (כגון מעמקי הים או בטן האדמה) קיימים יצרנים **כימו-אוטוטרופים**: יצורים חד תאיים (בעיקר חיידקים) המפיקים אנרגיה על ידי פירוק תרכובות גופרית,חנקן וברזל, ומנצלים אותה לצורך ייצור מזון. תהליך זה פחות יעיל משמעותית בהשוואה לפוטוסינתזה, וכמות החומר האורגני המיוצר בתהליך כימוסינתזה נחשבת לזניחה יחסית.

2. צרכנים, הם יצורים חיים הניזונים מחומרים אורגניים הנוצרים על ידי יצרנים ראשוניים. הצרכנים מחולקים לרמות משנה:

א. צרכנים ראשוניים - אורגניזמים הניזונים ישירות מיצרנים (צמחים ואצות), בעיקר בעלי חיים צמחוניים כגון אנטילופות בסביבות יבשתיות או קיפודי ים בסביבה הימית, אך גם קופפוד פלנקטוני הניזון מאצות חד תאיות (פיטופלנקטון) הוא צרכן ראשוני.

ב. צרכנים שניוניים - אורגניזמים הניזונים מצרכנים אחרים - בעיקר בעלי חיים טורפים, כגון זאבים בסביבות יבשתיות או כרישים בסביבות ימיות. רמה זו מחולקת למספר רמות ביניים (שנקראות גם צרכנים שלישוניים, רביעוניים וכן הלאה) בהתאם לאופי התזונה של בעלי החיים השונים: אלו שתזונתם מתבססת יותר על בעלי חיים צמחוניים ימוקמו ברמות הזנה נמוכות יותר, בעוד שאלו שתזונתם מתבססת יותר על טורפים אחרים ימוקמו ברמות הזנה גבוהות יותר. בעלי החיים ברמת ההזנה הגבוהה ביותר (נמצאים בראש שרשרת המזון) ואין להם טורפים, נקראים טורפי-על.

ג. מפרקים - אורגניזמים הניזונים מ**חומר אורגני מת** בתהליך זה החומר האורגני נצרך ומפורק לחומרים אנאורגניים. לדוגמא, פחמן אורגני מפורק

גורם מגביל
הינו משאב או משתנה סביבתי (כגון טמפרטורה) הדרוש לאורגניזם מסויים בשביל לגדול ולהתרבות ומצוי בחוסר בבית גידולו.

חומר אורגני מת
שאינו חלק מיצור חי, כגון שיירי אצות או צמחים, פגרים והפרשות של בעלי חיים המצויים בשלבי פירוק שונים. נקרא גם רקבובית או דטריטוס.

לפחמן דו חמצני וחנקן אורגני מפורק לאמוניה, שבתורם נצרכים מחדש על ידי היצרנים וחוזר חלילה. האורגניזמים ברמת הזנה זו מחולקים ל-3 קבוצות עיקריות:

- **מפרקים**: קבוצה זו כוללת חיידקים ופטריות המפרקים את מזונם באמצעות עיכול חוץ תאי - הפרשת חומצות ואנזימי עיכול המפרקים את החומר האורגני מחוץ לתא. בסיום תהליך זה תוצרי הפירוק (חומרי ההזנה) נספגים בתאי המפרקים.
- **אוכלי רקבובית**: קבוצה זו כוללת אורגניזמים (בעיקר בעלי חיים אך גם חד תאים) המעכלים את החומר האורגני המת בתוך גופם. בינהם ניתן למצוא תולעים, פרוקי רגליים ומלפפוני ים.
- **אוכלי נבלות**: בעלי חיים טורפים, שעברו התמחות בצריכה של חומר אורגני שמקורו ב[בעלי חיים מתים], כדוגמת הנאוטילוס.

בנוסף, מינים רבים של בעלי חיים הם **אוכלי כל**, כלומר, ניזונים מצמחים, בעלי חיים וחומר אורגני מת בהתאם לזמינות המזון המקומית. דוגמאות לאוכלי כל: על היבשה בולטים יונקים כגון חזירי בר, דובים (למעט דובי קוטב) וקופים כגון שימפנזים ובבונים, אך גם עופות כגון עורבים. בסביבה הימית, אוכלי כל בולטים כוללים בעיקר דגי שונית כגון אובלד שחור זנב (*Oblada melanora*).

חשוב לציין, שבתהליך זה אוכלוסיות הצרכנים השונים מווסתים את גודל אוכלוסיות המינים שמשמשים להם כמקור מזון, ומהווים גורם בקרה חשוב זו על זו - לדוגמא, בהיעדר בעלי חיים צמחוניים, אוכלוסיות הצמחים יגדלו עד לניצול מירבי של משאבי האור וחומרי ההזנה. לחילופין, בהיעדר טורפים שתזונתם מתבססת על בעלי חיים צמחוניים, יגדלו אוכלוסיות הצמחוניים ללא שליטה על חשבון מזונם - הצמחים.

שרשרת מזון ופירמידת מזון

היחסים הפשוטים ביותר במארג המזון, מתוארים בצורה סכמטית של שרשרת, שבה כל חוליה ניזונה מהחוליה שמתחתיה. שרשרת מזון בסיסית שכזו אפשר לתאר כך:

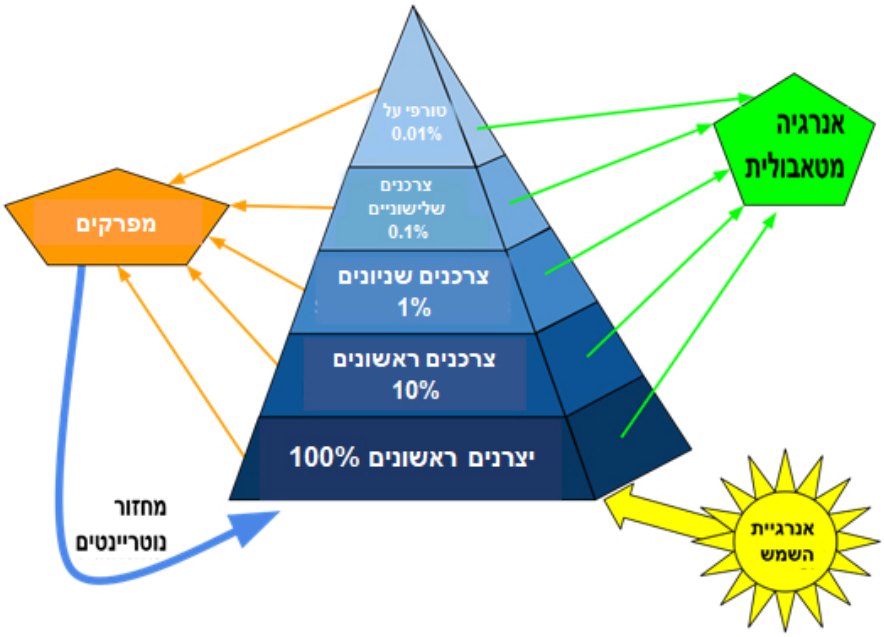
אצות > קיפודי ים > דגים טורפים > כרישים

כשהחצים מציינים מעבר חומר ואנרגיה מרמת הזנה אחת לשנייה, ולמעשה "מגולגלים" במעלה שרשרת המזון. בדרך כלל רוב האנרגיה שמקורה במזון מנוצלת על ידי היצורים החיים בתהליכים של חילוף חומרים. כתוצאה מכך, רק חלק קטן מהחומר שנאכל, מנוצל לבניין גופם של בעלי החיים וכמות החומר והאנרגיה העוברת מרמת תזונה אחת לזו שמעליה, הולכת וקטנה עם העלייה ברמת התזונה, וכך גם המשקל הכולל (**ביומסה**) של היצורים החיים בכל רמה טרופית: משקלם הכולל של כלל היצרנים הראשוניים (צמחים ואצות) עולה משמעותית על משקלם הכולל של כלל הצרכנים הראשוניים, שמשקלם הכולל גדול משמעותית מזה של צרכנים שניוניים, שמשקלם גדול מזה של צרכנים שלישוניים וכן הלאה. מארג מזון המשקלל לתוכו גם את כמותם של היצורים

ביומסה

כמות החומר האורגני החי, במקום וזמן נתון.

פירמידת המזון

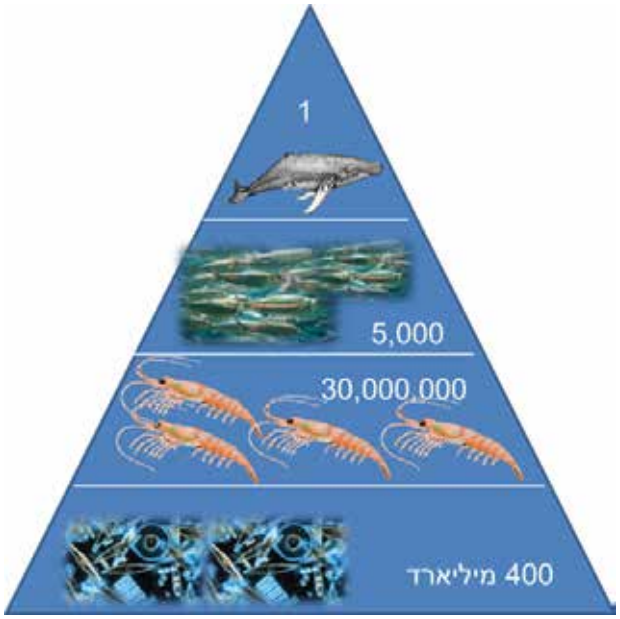


איור 38

פירמידת מזון. הקומות השונות בפירמידה מייצגות את רמות ההזנה השונות. החומר שעובר במארג המזון מפורק וממוחזר על ידי מפרקים, בעוד שהאנרגיה שעוברת במארג המזון לרוב מנוצלת כאנרגיה מטאבולית - אנרגיית חום, המשמשת לתפקודים שונים של האורגניזמים השונים. האחוזים מציינים את כמות אנרגיית שמש המוטמעת בכל רמה. מעובד מתוך Wikipedia.com

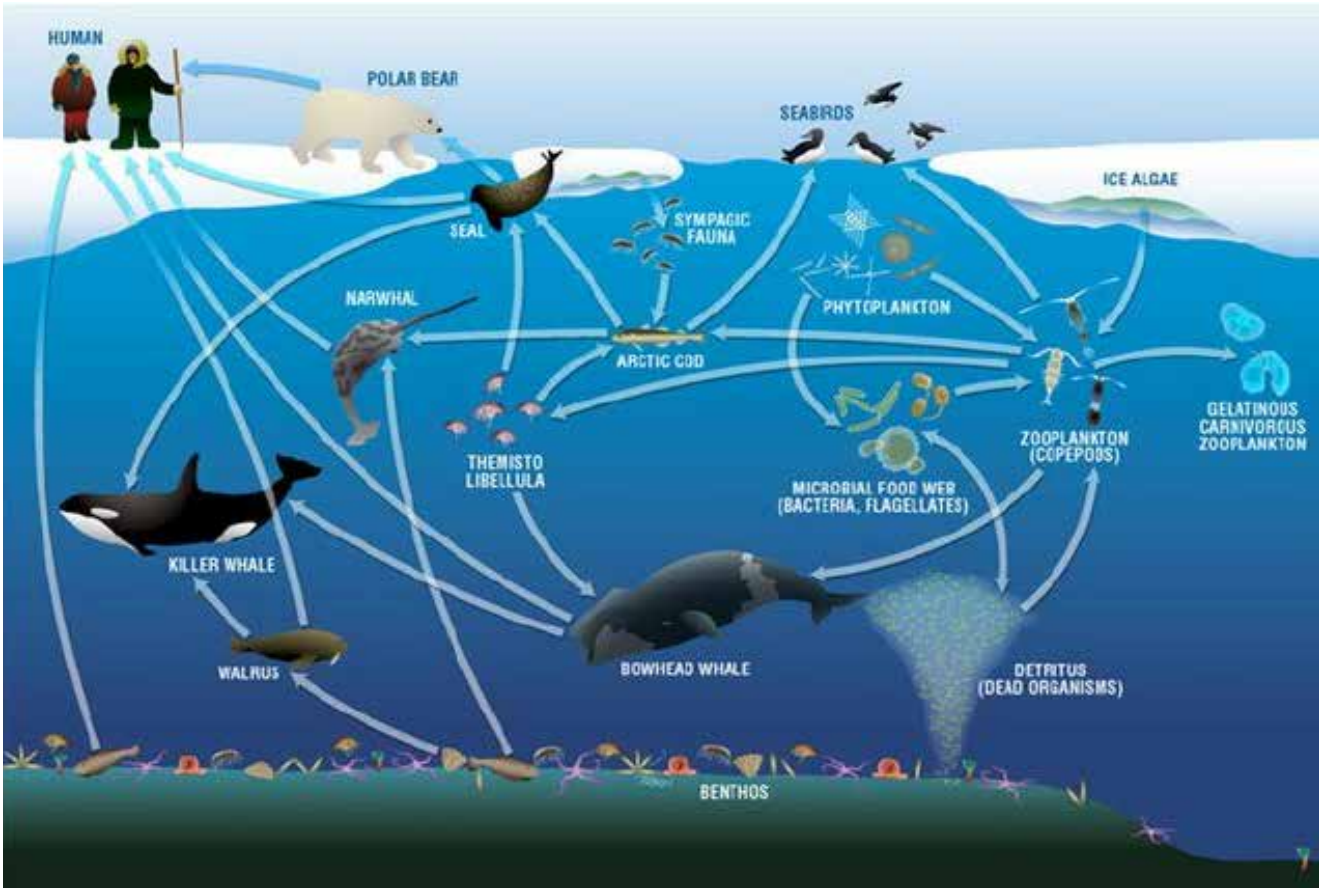
החיים או את האנרגיה האצורה בכל רמת הזנה, הוא דמוי פירמידה מכיוון שהרמה הנמוכה ביותר היא גם הגדולה ביותר והגבוהה ביותר היא הקטנה ביותר (איור 38).

המחשה טובה למעבר חומר ואנרגיה במעלה שרשרת המזון, מגיעה ממעקב אחר מקורות המזון של לוויתן גדול סנפיר אחד: יונקים ימיים ממין זה, מסוגלים לאכול יותר מ-5000 דגי מליח (הרינג) בארוחה אחת. כל מליח מצידו ניזון ממספר דומה של סרטנים זעירים כל יום, שבקיבתו של כל אחד מהם ניתן למצוא למעלה ממאה אלף אצות צורניות (חד תאיות)! כלומר, לוויתן גדול סנפיר אחד בגודל בינוני זקוק לכ-4 טריליון (4,000,000,000,000) אצות צורניות בכל יום בכדי לכלכל עצמו (איור 39).



איור 39

פירמידת מזון של לויתן גדול סנפיר (*Megaptera novaeangliae*)



איור 40

יצוג סכמטי של מארג מזון של בית הגידול הארקטי באזור קנדה. (משמאל לימין) **מעבר ממערכת אקולוגית חופית לים פתוח.** (Philippe Archambault)

יציבות מארג המזון והשפעת האדם

כיוון שמרבית היצורים החיים ניזונים ממגוון יצורים חיים אחרים ובמקביל נאכלים על ידי יותר מצרכן אחד, המערכות האקולוגיות בטבע כוללות מספר רב של שרשראות מזון, הקשורות זו לזו ויוצרות יחדיו את מארג המזון (איור 40). ככל שמארג זה יותר מורכב - כולל יותר שרשראות הכוללות יותר מינים ויותר רמות הזנה שונות - כך הוא יציב יותר: אם נפגעים חלק ממרכיביו, תופסים מינים אחרים את מקומם במארג. במידה ולא, עלולה להיות עלייה משמעותית בגודל אחד ממרכיבי המארג על חשבון מרכיבים אחרים, יציבות מארג המזון עלולה להיפגע והמערכת האקולוגית יכולה לצאת מאיזון . על פי רוב, תופעה זו לא מתרחשת באופן טבעי וקשורה לפעילות האדם. המחשה טובה לעיקרון זה מגיעה מהים הקאריבי (מערב האוקיינוס האטלנטי), שם נצפתה ירידה חדה בגודל אוכלוסיית קיפוד ים מהסוג נזרית (*Diadema antilarum*) בתחילת שנות השמונים של המאה ה-20. אוכלוסיית הקיפודים נפגעה מ**פתוגן**, שהתפשטותו מיוחסת לאירוע התחממות מים קיצוני בשנת אל ניניו. באזורים מוגנים מדיג, שבהם התקיימו אוכלוסיות בריאות של דגים צמחוניים, להיעלמות קיפודי הנזרית לא הייתה השפעה כלל - צמחוניים אחרים נהנו מהירידה בתחרות על משאב המזון והשפעתם גברה, כך שמארג המזון, כמו גם המערכת האקולוגית כולה, נותרו ללא שינוי משמעותי. לעומת זאת, באזורים שבהם התקיים דיג לא מבוקר, נעלמו מרבית הדגים הצמחוניים וצמחוניים נוספים כדוגמת חילזון המאכל queen conch והקיפודים היוו את הגורם המווסת האחרון של הצמחייה הימית.

פתוגן

אורגניזם כגון חיידק, וירוס, פטרייה וטפיל, אשר פלישתו לגוף האדם עלולה לחולל מחלה.

כתוצאה מהיעלמותם, החלו לגדול אצות ללא שליטה במרבית אזורי החוף בים הקריבי. באזורים הטרופיים בעולם, האצות מתחרות עם אלמוגים על שטחי מחייה, וגדילת יתר של אצות עלולה לגרום לגדילתן על גבי האלמוגים עצמם ולהוביל למותם עקב הסתרת השמש ומניעת אספקת מזון. תופעה זו התרחשה גם עקב היעלמות בעלי החיים הצמחוניים מהים הקריבי, דבר שהוביל להרס שוניות האלמוגים המקומיות, המאפיינות אזור זה.

4.4 הסתגלות לחיים במים

המים כסביבת חיים

הסביבה התת ימית שונה לחלוטין מהסביבה היבשתית, וזאת בשל מאפייניו השונים של התווך המימי:

מאפיינים פיזיקליים

א. **צפיפות וצמיגות** - בסביבה הימית, מולקולות המים צפופות בהרבה ממולוקולות הגז השונות המרכיבות את האוויר באטמוספירה. כתוצאה מכך המים מהווים תווך צמיג ("סמיך") בהרבה מהאוויר, היוצר חיכוך והתנגדות עם כל העצמים שמצויים בתוכם. התנגדות זו מקשה על תנועתיות בתוך המים ומרבית בעלי החיים הניידים בסביבות אלו בעלי מבנה גוף **הידרו-דינמי**. בנוסף, צמיגיות המים מאטה משמעותית את קצב שקיעת חלקיקים שונים לעבר הקרקעית ומאפשרת לזרמי הים לשאת כמות גדולה יותר של חלקיקים כבדים יותר למרחק רב יותר בהשוואה לזרמי אוויר (רוח).

ב. **לחץ הידרוסטטי** - שכבת מים בעובי של 10 מטרים מפעילה לחץ בעוצמה של אטמוספרה אחת - הלחץ שמפעיל האוויר בגובה פני הים. כך, בעומק 20 מטר מתחת לפני המים מופעל לחץ בעוצמה של 3 אטמוספרות (פי 3 מאשר על היבשה), בעומק 50 מטר מופעל לחץ בעוצמה של 6 אטמוספרות ובנקודה העמוקה ביותר בכדוה"א - תחתית תהום מריאנה שבאוקיינוס השקט, כ-11,034 מטר מתחת לפני הים - מופעל לחץ בעוצמה של 1072 אטמוספרות!

ג. **חדירות אור** - אור השמש נבלע בהדרגה בשכבה העליונה של מי הים, עד להיעלמות מוחלטת - בעומק של עד 1000 מטר (איור 41). אולם, אור בכמות

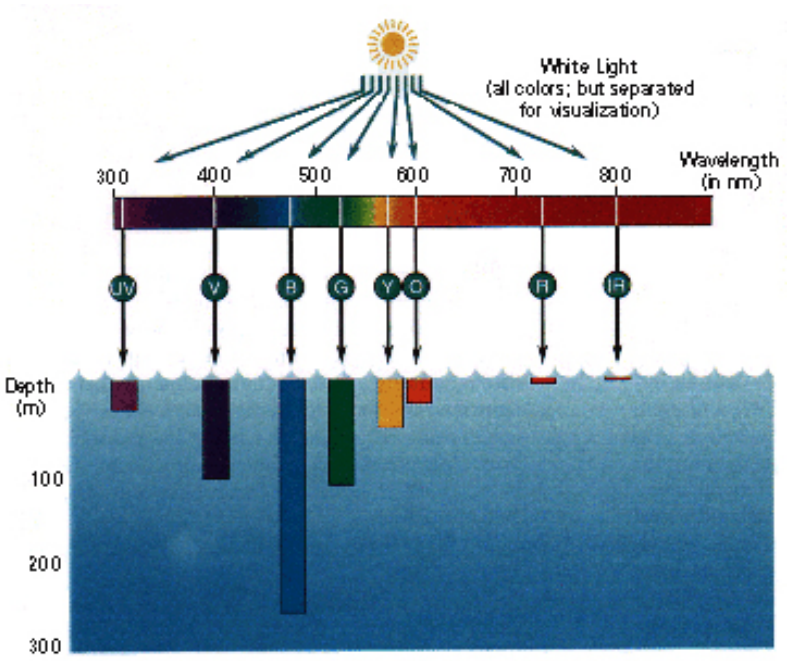
מבנה הידרודינמי

צורה דמוית גליל ללא בליטות (בדומה לצורת טורפדו), המפחיתה למינימום את החיכוך בזמן תנועה.

חדירת האור למים

אור אדום נבלע בעומקים 10-20 מטר, אור כתום נבלע בעומק של כ-50 מטר ואור סגול נבלע בעומק של כ-70 מטר.

איור 41. עומקי בליעת אור באורכי גל שונים (wikipedia)



מספקת לביצוע פוטוסינתזה (1% מהאור שמגיע לפני הים) חודר על פי רוב עד לעומק של 200 מטר, כתלות בצלילות המים (במים עכורים האור נבלע בעומקים רדודים בהרבה). **האור שחודר למים** אינו נבלע באופן אחיד - בעוד שאור באורכי גל קצרים ("אור סגול") ואורכי גל ארוכים ("אור אדום") נבלעים בעומקים רדודים יחסית, אורכי גל בינוניים ("אור כחול") מגיעים לעומק רב יותר.

ד. קיבול חום - למים **קיבול חום** גבוה במיוחד. עקב כך, משרעת הטמפרטורות באזורים ימיים נמוכה בהשוואה לאזורים יבשתיים סמוכים ומשתנה פחות לאורך היממה והשנה.

מאפיינים כימיים

מים הם מהחומרים הממסים הטובים בטבע, ומסוגלים להכיל כמויות גדלות של גזים ומוצקים מומסים.

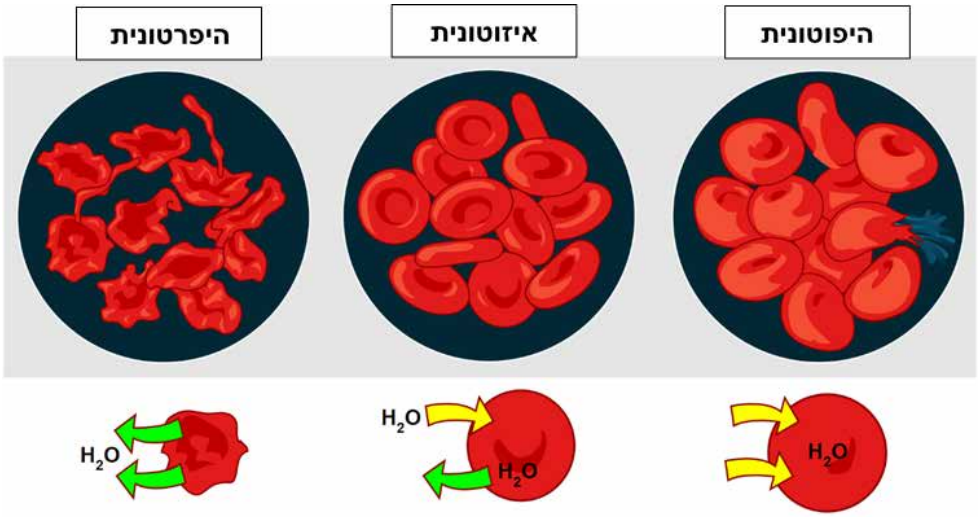
א. מסיסות גזים - גזים מתמוססים במי הים בעיקר על ידי פעפוע (דיפוזיה) מהאטמוספירה או כתוצר לוואי של תהליכים ביולוגיים כגון פוטוסינתזה (שבמהלכו נפלט חמצן) או נשימה (שבמהלכו נפלט פחמן דו חמצני). חשוב לציין שישנו קשר הפוך בין טמפרטורת המים למידת מסיסות גזים בתוכם - ככל שהטמפרטורת המים עולה כך יורדת מסיסות הגזים בם.

ב. מסיסות מוצקים - בנוסף לגזים, מי הים מכילים מוצקים במצב מומס, כגון מינרלים ומתכות אך גם חומרים אורגניים שונים. שיעור המליחות (כמה גרם מלח מצוי בליטר מים) נקבע על פי ריכוזם של חומרים אלו במים -

- מים נחשבים למתוקים במידה וריכוז הכלור בהם נמוך מ-0.5% - מרבית המעיינות, נהרות ואגמים נכללים בקטגוריה זו.
- מים מלוחים במידה וריכוז הכלור גבוה מ-2% - מי הימים והאוקיינוסים, כמו גם חלק קטן ממקווי המים היבשתיים, עונים על הגדרה זו.
- מים מליחים הם מים שריכוז הכלור בהם נע בין שני ערכי סף אלו (0.5%-2%). ניתן למצוא מים מליחים בעיקר בנקודות המפגש בין מים מלוחים ומתוקים, כגון שפכי נהרות.

מולקולות המים ינועו מאזור שבו ריכוז המומסים נמוך לאזור שבו ריכוז המומסים גבוה. ככל שהפרש הריכוזים בין שתי תמיסות שונות גבוה יותר, כך מעבר מולקולות המים יהיה מהיר יותר. כאשר בין שתי התמיסות מפריד קרום חדיר למים (כגון קרום תא), תנועת מולוקולות המים בין שתי התמיסות מפעילה לחץ על הקרום הנקרא גם **לחץ אוסמוטי**. כשתא חי נמצא בסביבה שבה ריכוז המלחים נמוך מבתא עצמו (נקרא גם **סביבה היפוטונית**), מים שואפים להיכנס פנימה לתוכו. כשתא חי נמצא בסביבה שבה ריכוז המלחים גבוה מבתא עצמו (**סביבה היפרטונית**), מים שואפים לצאת מהתא אל הסביבה. במצב שבו ריכוז המלחים זהה בתא ובסביבתו (**סביבה איזוטונית**), ישנו מעבר מקביל של מולקולות מים בין התא לסביבה, או שאין תנועת מים כלל (איור 42).

קיבול חום
תכונה פיזיקלית מדידה של חומרים, המלמדת כמה אנרגית חום יש להשקיע על מנת להעלות את הטמפרטורה של החומר או כמה אנרגית חום משתחררת מהחומר כאשר הטמפרטורה שלו יורדת.



איור 42

השפעות לחץ אוסמוטי על תאים חיים (wikipedia)

נהוג לחלק את היצורים הימיים לשתי קבוצות עיקריות, על פי התאמתם לסביבת החיים שלהם:

1. יצורים בנתוניים אלה הם היצורים החיים סמוך לקרקעית הים, עליה או בתוכה והם מכונים **בנתוס.** יש בינהם יצורים המתחפרים במצע כדוגמת תולעים וצדפות; יש הצמודים אל הסלעים כדוגמת ספוגים וצורבים שונים ויש החיים על פני הקרקעית או מעליה והנעים בחופשיות (ואף ובמהירות) כדוגמת סרטנים ודגים.

2. יצורים פלאגיים החיים בגוף המים ומכונים **פלאגוס.** הם מתחלקים לשתי קבוצות עיקריות לפי כושר תנועתם:

א. **פלנקטון** - יצורים המוגבלים בכושר תנועתם כנגד זרמים אופקיים, המרחפים בגוף המים ונסחפים עם הזרמים. רוב האורגניזמים הפלנקטוניים זעירים בגודלם, אולם חלקם יכולים להגיע לגדלים מרשימים ביותר, כמו מדוזות, שהגדולות שבהן מגיעות לקוטר של למעלה ממטר. הפלנקטון כולל:

- **פיטופלנקטון** - אורגניזמים פוטוסינתטיים הכוללים, בעיקר אצות חד תאיות, כגון צורניות ושוטוניות. מהווים למעלה מ 99% מכלל הצמחים בים .
- **זואופלנקטון** - בעלי חיים חד תאיים ורב תאיים קטנים, המחולקים לשני סוגים עיקריים:

- הולופלנקטון (פלנקטון תמידי) - אורגניזמים הנמצאים כל חייהם בפלנקטון.

- פלנקטון זמני (מרופלנקטון) - פגיות (לארוות) של יצורים גדולים יותר, שרבים מהם אינם פלנקטוניים כבוגרים.

שתי הקבוצות הנ"ל כוללות מגוון רחב של בעלי חיים שונים כגון סרטנים, צורבים, רכיכות ותולעים. עוד על הפלנקטון בפרק 8.2.

ב. **נקטון** - בעלי חיים המסוגלים לנוע באופן עצמאי ובמהירות ואינם תלויים בתנועתם בזרמים שבים. יש בהם שמסוגלים לנדוד למרחקים גדולים. קבוצה זו כוללת דיונונים, דגים, זוחלים ויונקים ימיים .

חשוב לזכור שבעלי חיים רבים עוברים במהלך חייהם מצורת חיים אחת לצורת חיים אחרת: בשלב הפגית (לארווה), מרבית בעלי החיים הימיים, כולל דגי גרם, הם פלנקטוניים ומרחפים עם הזרמים עד הגעתם לבגרות, שלאחריה מינים רבים הופכים לבנתונים (עוברים לחיות בסביבת הקרקעית) או נקטונים (נשארים בעמודת המים אך מפתחים יכולת שחייה עצמאית כנגד הזרם).

98% מן המינים הימיים קשורים לקרקעית הים, ורק 2% חיים בגוף המים. יתכן שהסיבה לכך היא שגוף המים היא סביבת חיים אחידה למדי ולכן לא התפתחו בו מינים רבים, ואילו קרקעית הים מגוונת ביותר במצעיה ותנאיה ויש בה שפע של בתי-גידול ליצורים רבים.

התאמות יצורים חיים לסביבה הימית

א. **התאמות לפוטוסינתזה תת ימית** - בעוד שאור הינו משאב המצוי בזמינות גבוהה ויציבה על גבי היבשה, חדירותו למים נמוכה בהרבה, ותלויה במידת עכירותם (ראה סעיף קודם בתחילת פרק זה). על כן, אורגניזמים ימיים המבצעים פוטוסינתזה (אצות) נעזרים בפיגמנטי פוטוסינתזה (מולקולות קוצרות אור הנמצאות בבסיס תהליך זה), המותאמים לספיגת אור בתנאים חשוכים יחסית. פיגמנטים אלו, הנקראים **פיקובילינים**, מותאמים לספוג אור באורכי גל בינוניים (ירוק וכחול), המסוגלים לחדור לעומק הרב ביותר ביחס לאורכי גל אחרים, ומאפשרים לאצות לייצר מזון גם בתנאים החשוכים המצויים מתחת למים - אצות רב תאיות תועדו בעומקים של עד 300 מטר!

ב. **כסות גוף** - בעלי חיים יבשתיים נאלצים להתמודד עם יובש וקרינת שמש. על כן, בעלי חיים יבשתיים פיתחו מעטה גוף ("עור", אפידרמיס בלעז) יחסית עבה וקשיח - בכדי למנוע חדירת קרני שמש פנימה והתאדות של מים החוצה מתוך גופם. לעומת זאת, בעלי חיים ימיים אינם מוגבלים בזמינות מים וקרינת שמש אינה מהווה איום משמעותי בעבורם. על כן, מעטה הגוף של מינים מימיים רבים הינו דק מאוד ואפילו ג'לטיני. בניית ותחזוק מעטה גוף שכזה מצריכה פחות משאבים מבעל החיים, ומאפשרת לו להשקיע יותר בגדילה ורבייה. חושב לציין כי ישנם בעלי חיים רבים ישנו מעטה גוף קשיח, כגון שריון, קונכייה או קשקשים, אולם אלו משמשים בעיקר להגנה מטורפים או מגורמי פגיעה פיזיים אחרים (מפץ גלים למשל).

ג. **נשימה** - למרות שריכוז החמצן המומס במים נמוך משמעותית מבאוויר (במים פי 30 פחות מבאוויר!), ספיגת חמצן לצרכי נשימה בסביבה המימית מצריכה התאמות פחות משמעותיות מאשר על גבי היבשה: חילופי גזים (ספיגת חמצן ופליטת פחמן דו חמצני) בין רקמות הגוף לסביבה מחייב סביבה לחה. זו הסיבה לכך שאיברי הנשימה של בעלי חיים יבשתיים ממוקמים בתוך בעל החיים, שם נשמרת לחות תמידית. לעומת זאת, הסביבה התת מימית אינה מוגבלת בהיבט זה. בעלי חיים בעלי כיסוי גוף דק או ג'לטיני, כגון צורבים או חלק מהתולעים, מסוגלים לבצע חילופי גזים דרך כל המעטה החיצוני

איור 43

זימים. (מימין) **זימי דג טונה** (wikipedia). (משמאל) **זימי חשופית** (אורי גלילי)

של גופם שבא במגע עם המים ולכן במקרים רבים הם חסרי איברי נשימה כלל. לעומתם, לבעלי חיים גדולים ומורכבים יותר, שלהם דרישות אנרגטיות גבוהות יותר, כגון פרוקי רגלים, רכיכות ודגים פיתחו איברי נשימה יעילים יותר, המותאמים לחילופי גזים בסביבה ימית - זימים. על פי רוב, יהיו הזימים בעלי מבנה דומה בבעלי החיים השונים, המזכיר צורת מסרק: שורות של שלוחות רקמתיות דקיקות (נקראות גם **עלעלי זימים** או **Filaments** בלעז) המקובעות לציר מעובה וקשיח. מים טריים, עשירים בחמצן, מוזרמים באופן אקטיבי (על ידי איברים ייעודיים כגון מכסה הזימים בדגי גרם ורגלי הבטן בסרטנים), או פסיבי (באמצעות זרמי הים) על גבי שלוחות אלו שעשירות בכלי דם עניים בחמצן ועשירים בפחמן דו חמצני. כיוון שחילופי הגזים בין כלי הדם שבזימים לבין המים שמסביבם מתרחש בכל השטח שבו יש מגע בין עלעלי הזימים למים , מבנה הזימים דמוי המסרק, שמגדיל מאוד שטח הפנים של איבר זה, מייעל מאוד את קצב התהליך.

בעלי חיים ימיים נושמי אוויר (באמצעות ריאות), כמו יונקים ימיים, עופות וצבי ים, שוהים במים בעצירת נשימה. הם פיתחו התאמות ייחודיות בכדי לאפשר להם לצלול לעומק רב לזמן ממושך: בעלי חיים אלו מאופיינים בריאות המסוגלות לקרוס בעומקים גדולים ולהתנפח מחדש עם העלייה לפני השטח. בנוסף, רקמות גופם עשירים בחלבונים קושרי חמצן כגון מיוגלובין (בשרירים) והמוגלובין (בדם) המאפשרים את אגירתו והולכתו לצרכי חילוף חומרים והפקת אנרגיה בזמן עצירת הנשימה. בנוסף, פיתחו יונקים ימיים '**תגובת צלילה**': סדרה של שינויים בלב ובכלי הדם, שבהם קצב הלב יורד לפעימות מעטות לדקה. במהלך תגובת הצלילה כמות מסוימת של דם עדיין מגיעה לאיברים כגון הלב והמוח, שאינם יכולים לשרוד ללא חמצן, בעוד שמעט מאוד (אם בכלל) דם מוזרם לאיברים אחרים, שיכולים להסתדר טוב יותר ללא חמצן. תגובת הצלילה עוזרת לשמר את החמצן הזמין ולהאריך את משך הזמן שהלווייתן יכול לעצור את נשימתו. תגובת הצלילה מסייעת גם להפחתת כמות החנקן שנקלט ברקמות האחרות, וכך עוזרת להקטנת הסיכון שייווצרו בועות בזמן שהלווייתן עולה לפני השטח.

ד. **התמודדות עם לחץ אוסמוטי** - ריכוז המלחים בגוף היצורים הימיים והמימיים שונה מסביבתם - נמוך מריכוז המלח במי ים וגבוה מריכוז המלח במים מתוקים. בכדי לשמור על מאזן נוזלים ומלחים תקין בגוף, התפתחו התאמות לבתי הגידול השונים. דגי מים מתוקים למשל, שמתמודדים עם עודפי מים בגופם, מפרישים כמויות גדולות של שתן מדולל. דגים אלו מאופיינים בכליה (האיבר האחראי על מערכת ההפרשה) מפותחת ביותר. דגי ים לעומתם, שמתמודדים עם חוסר מים בגופם, מפרישים שתן מרוכז המכיל כמות גדולה של מלחים. בנוסף, מינים ימיים רבים מוציאים מלחים מגופם באופן אקטיבי, באמצעות חלבונים ייעודיים הנקראים '**תעלות יונים**'. על פי רוב, חלבונים אלו ממוקמים על גבי קרומי התאים בזימי הדג. דגים המסוגלים לחיות בטווח מליחויות רחב, כגון דגי סלמון (החיים בצעירותם במים מתוקים ובבגרותם בים) או דגי בורי (חיים בשפכי נהרות), בדרך כלל בעלי התאמות לשני המצבים (עודף מים בבתי גידול של מים מתוקים ועודף מלחים בבתי גידול של מי ים), ומסוגלים להפעילם בעת הצורך.

ה. **תנועה וציפה** - בכדי להקל על התנועה בתוך התווך הצמיגי של המים, מבנה גופם של מרבית בעלי החיים הניידים בים דמוי גליל מוארך - צורה הידרודינמית המפחיתה למינימום את החיכוך עם המים בעת התנועה. בעלי חיים אלו לרוב מייצרים דחף על ידי הנעת איברים שטוחים דמויי משוט כדוגמת סנפירים במקרה של דגים ויונקים ימיים או רגליים ייעודיות במקרה של חלק מהסרטנים (איור 44) כגון משפחת השייטים. חריגים בהיבט זה (מנגנון יצירת דחף להנעה), הם הראש רגלאיים (תמנונים ודיונונים). המינים במחלקה זו נעים בעיקר באמצעות יצירת סילון - מילוי חלל הגלימה במים והזרמתם בלחץ גבוה דרך פתח צר הנקרא סיפון ליצירת דחף מהיר בכיוון הנגדי להזרמת המים.

לדגים, ישנו איבר ייעודי המאפשר שמירה על עומק רצוי בעמודת המים - **שלפוחית ציפה.** זוהי שלפוחית מלאה בגז (שמקורו בתהליכי חילוף חומרים בגוף בעל החיים), שנפחו נשלט על ידי הדג וכך מאפשר לו לשמור על מידת ציפה רצויה ושליטה בעומקו. שלפוחית הציפה יעילה רק בעומקים הרדודים. במעמקי הים, הלחץ הרב השורר שם יגרום לצמצום משמעותי בנפח הגז ולכן חלק ממיני הדגים החיים בעומקים אלו שולטים על ציפתם באמצעות שמן שנפחו כמעט ואינו מושפע משינויי לחץ. בדגים אלו, השומן מרוכז בדרך כלל בכבד, והשליטה בציפה נעשית באמצעות איבר זה. מבין הדגים שמשתמשים בשומן לצורך איזון

תעלה יונית

חלבון ממברנלי חלול שמוליך יונים (אטומים טעונים) בין שני צדי הממברנה. בניגוד למוליכי יונים אחרים, כמו נשאים (טרנספורטרים) או משאבות, התעלה מוליכה את האטומים באופן פסיבי. היא יוצרת את השער והיונים זורמים דרכו עצמאית לפי מפל הריכוזים או מפל המטענים.

איור 44

סרטן ממין שייט כחול, בעל רגלי חזה שטוחות המותאמות לשחייה (זוג אחורי) (wikipedia).

במים חשוב להזכיר את דגי הסחוס (כרישים ובטאים) ודגים מהסוג לטימריה - קבוצת דגים קדומים ("**מאובנים חיים**") שהתגלתה בשנת 1938.

גם ליצורים פלנקטוניים ישנן התאמות המאפשרות להם לשלוט על עומקם. יכולת זו חשובה במיוחד לפיטופלנקטון, שחייב להישאר בשכבות המים העליונות בכדי לספוג מספיק אור לתהליך הפוטוסינתזה. עוד על הפלנקטון בפרק 'ים פתוח'.

מאובן חי

אורגניזם אשר זהה או כמעט זהה למאובנים שלו מתקופות גיאולוגיות קודמות, כלומר כמעט לא חל שינוי במבנהו ומאפייניו. לרוב שייך לקבוצה שמרבית המינים בה נכחדו.

ו. **היצמדות למצע** - יצורים ימיים רבים חסרי כל כושר תנועה בשלב חייהם הבוגר. בכדי שאלו יישארו צמודים למצע באזור הרצוי להם מבחינת תנאים ביוטיים וא-ביוטיים, פותחו התאמות שיאפשרו זאת. חלק מצמודי המצע, כגון אלמוגים, מפרישים גיר המחבר אותם למצע הקשיח. בעוד שאחרים, כמו בלוטי ים, מפרישים דבקים ביולוגיים חזקים ביותר בכדי להיצמד למצע. מנגנון היצמדות נוסף, המשמש חלק ממיני הצדפות, הוא סיבים חלבוניים הנקראים חוטי ביסוס המשמשים להיעגנות במצע.

ז. **תזונה בים** - יכולתם של המים לשאת כמויות גדולות של חלקיקים, בינהם גם חלקיקי מזון (פלנקטון או חומרים אורגניים אחרים) מאפשרת קיומם של אסטרטגיות תזונה שאינן קיימות על גבי היבשה: בעלי חיים רבים בעלי איברי לכידת מזון דמויי רשת, המאפשרים סינון של אותם חלקיקים אכילים. אסטרטגיית תזונה זו, הנקראת סינון, מאפשרת את קיומם של מרבית בעלי החיים צמודי המצע, שכן אופיים הנייח מגביל את אפשרויות השגת המזון העומדות לרשותם. אולם, גם חלק מבעלי החיים הניידים בים כגון דגים ולוויתנים ניזונים בדרך זו.

בחלק מבעלי החיים, כגון דגים, צדפות או אצטלנים איבר הסינון התפתח מהזימים - לאיבר זה צורה המזכירה רשת, ומים מוזרמים דרכו לצורך נשימה, כך שהתאמתו לצרכי תזונה פשוטה יחסית. בבעלי חיים כגון בלוטי ים, ברווזוני ים ותולעים נרתיקניות, איבר הסינון התפתח מהרגליים. במקרים אחרים, כגון חי טחביים (איבר סינון הקרא לופופור), התפתח איבר סינון ייעודי לצורך מטרה זו. המחשה לאסטרטגיית תזונה זו ניתן למצוא בקישור הבא.

ישנם אמצעי לכידת מזון נוספים שייחודיים לסביבה הימית, בינהם:

- תאים צורבים: תאים ייחודיים למערכת הצורבים, ומאפשרים הזרקת רעלנים ואנזימי עיכול לגופו של הטרף והצמדתו לזרועות הטורף, כפי שמודגם בסרטון הבא.
- לכידת טרף באמצעות זרם חשמלי: דגים מסויימים (בעיקר מינים של צלופחים ובטאים) מסוגלים להמם את טרפם באמצעות זרם חשמלי אותו הם יוצרים. הסרטון הבא מדגים את השימוש בשימוש בזרם חשמלי במים.

ח. **חישה** - ראשית, יש להתייחס להבדלים בשימוש היצורים בחושים השונים, הנובעים מההבדלים בין התווך האווירי למימי: גלי הקול נעים במים מהר יותר ובתדרים מסוימים גם למרחקים גדולים מאשר באוויר ולכן חוש **השמיעה** מנוצל בצורה אחרת במים; יש הבדל בין התמוססות ונשיאת מולקולות **ריח** באוויר ובמים; צפיפות המים משפיעה על חדירות האור וכתוצאה מזה, על

איור 45

איבר קו צד.
(מימין) **בדג זהב.**
(משמאל) **בדג**
ברקודה (wikipedia)

הראייה של היצורים הימיים. מלבד החושים המוכרים לנו יותר, חלק מבעלי החיים הימיים מאופיינים במספר חושים נוספים:

- **חישת תנועת מים** - קיימת בדגים, באמצעות איבר הנקרא **איבר קו צד** (איור 45). איבר זה ממוקם במרכז הדג ולכל אורכו (מהראש עד הזנב), כולל שורה של תאים המלאים בחומר ג'לטיני רגיש לרטט (ויברציות), שבאמצעותם הדג מסוגל לחוש בתנודות מים מכל עברו. כך מסוגלים הדגים לחוש טורפים המתקרבים מהצד מבעוד מועד, או לתאם תנועה עם יתר דגי הלהקה.

- **חישה חשמלית** - חישה ייחודית לדגי סחוס (כרישים ובטאים), נעשית באמצעות איבר בחרטום הכריש הנקרא **אמפולות לורנציני**. באמצעות איבר זה, דגי הסחוס מסוגלים לחוש בשדות החשמליים המפיקים יצורים חיים (עקב האותות החשמליים המועברים במערכת העצבים) ולאתרם, גם כאשר אלו מחופרים בתוך החול או כאשר המים עכורים מאוד.

ט. רבייה - יצורים ימיים ומימיים מאופיינים גם באסטרטגיות רבייה שונות מאשר יצורים יבשתיים. עקב הקושי בשמירה על סביבה לחה על פני היבשה, ההפרייה - מיזוג של תא ביצה עם תא זרע - מתרחשת כמעט תמיד בתוך גוף בעל החיים (לרוב בתוך הנקבה). לעומת זאת, בעלי חיים רבים במים מתרבים באמצעות הפרייה חיצונית - שחרור תאי המין לים הפתוח, שם מתרחשת ההפרייה וההתפתחות העוברית. אלו נקראים גם "**משחררים**" או broadcasters בלעז. מי הים, שמסוגלים לשאת חלקיקים למרחקים גדולים מאוד (ראה סעיף קודם בתחילת פרק זה), מהווים אמצעי הפצה יעיל ביותר של העוברים המתפתחים. כך, יצורים חסרי יכולת תנועה כגון אלמוגים או ספוגים, מסוגלים להפיץ את צאצאיהם במרחבי הימים והאוקיינוסים, למרות שכבוגרים הם חסרי יכולת תנועה,או בעלי יכולת תנועה מוגבלת מאוד. בעלי חיים אלו, מגדילים את סיכויי המפגש בין תאי המין על ידי שחרור מתואם של כלל הפרטים באוכלוסייה בו זמנית. סנכרון זה מתבצע באמצעות תנאים סביבתיים הנקלטים על ידי כלל האוכלוסייה (כגון טמפרטורת המים, משך שעות האור ביממה או מופע הירח), ומיועד להתבצע במועד שבו סיכויי השרידות של הצאצאים הוא הגבוהה ביותר - לרוב בתקופה שבה היצע המזון לפגיות הוא הגבוה ביותר ו\או לחץ טריפה נמוך יותר. חשוב לציין כי חלק

אמפולות לורנציני
איברי חישה מיוחדים הנקראים אלקטרורצפטורים, קולטנים חשמליים, המקשרים למעין רשת נקבוביות בעור המלאות חומר דמוי ג'ל. אופן פריסת הנקבוביות בעור ייחודית לכל מין וניתן להבחין בהן כנקודות כהות על העור. הן מספקות לדג חוש המסוגל לאתר שדות אלקטרומגנטיים כמו גם שינויים בטמפרטורה

משחררים
(broadcasters)
בעלי חיים המתרבים על ידי שחרור תאי מין (זרעים וביציות) למים, שם מתרחשת ההפריה וההתפתחות העוברית.

מדגירים
(brooders)
בעלי חיים המתרבים באמצעות שחרור עוברים שהודגרו בתוך בעל החיים. לרוב ההפריה מתרחשת על ידי שחרור תאי זרע למים וקליטתו לתוך הגוף של פרטים אחרים מאותו מין.

מחסרי החוליות הימיים (כולל חלק מצמודי המצע), מבצעים הפרייה פנימית, על ידי קליטת תאי זרע המופרשים למים, ושחרור העוברים לאחר ההפרייה. אלו נקראים גם "**מדגירים**" או brooders בלעז. אסטרטגיית רבייה זו, שבה העובר מתפתח מחוץ לגוף האם, נקראת גם אוביפריה, והיא הנפוצה ביותר בסביבה הימית. אולם, קיימות גם אסטרטגיות רבייה נוספות: אובוויויפריה, שבה הביצים מודגרות בתוך גוף האם (ללא אספקת חומרי מזון תוך כדי ההתפתחות) ומושרצים צאצאים חיים, מאפיינת דגים מסויימים כגון סוסוני ים. ויויפריה, שבה הצאצאים מתפתחים בגוף האם (תוך אספקת חומרי מזון) ונולדים בתום ההתפתחות העוברית - בדומה ליונקים. אסטרטגיית רבייה זו קיימת בסביבה הימית בחלק מדגי הסחוס.

הבדל נוסף במאפייני הרבייה בים לעומת היבשה, הוא היעדר הטיפול בצאצאים. הרוב המוחלט של בעלי החיים המימיים, אינם מטפלים בצאצאיהם - למעט יונקים ודגים ממשפחת האמנוניים (הנפוצים גם בישראל) שחריגים בהיבט זה.

מקורות לפרק זה

Anderson, K. (2019) **Fish Ecology** ,**Evolution, and Exploitation: A New Theoretical Synthesis**. Princeton University Press.

Ruppert, E. E., Fox, R. & Barnes, R. D. (2003) **Invertebrate Zoology: A Functional Evolutionary Approach**, 57. Seventh Edition.

Valentine, J. (2004) **On the Origin of Phyla**. University of Chicago Press

Herron, J. & Freeman, S. (2014) **Evolutionary Analysis.** 5th Edition, Pearson publishing

Evans, D. H. and Claiborne, J. B. (2005) **Physiology of fishes**. 3rd Edition, CRC press

סטמבלר, נוגה (2014). **הוד הים: יציבות ושינוי במערכות הימיות של ישראל.** הוצאת מט"ח.

עינב, רחלי (2004). **אצות החוף של ישראל.** בהוצאת אוניברסיטת בר אילן.

פישלזון, לב (1991). **החי והצומח של ארץ ישראל, כרך 4, החיים במים.** הוצאת משרד הבטחון.

פרבולוצקי, אבי ופולק, גד (2001). **אקולוגיה: התאוריה והמציאות הישראלית.** הוצאת כרטא.

קליין, רמי (2012). **לצלול אל המסתורין: עולמם המופלא של חסרי החוליות הימיים.** בהוצאת המרכז האקדמי רופין.

רביב, ורדה (1991). **החי והצומח של ארץ ישראל, כרך 9, צמחים חסרי פרחים.** הוצאת משרד הביטחון.

שוסטר, איילת וחובריה (2009). **אקולוגיה: אנרגיה וחומרים; אקולוגיה, גנטיקה ואבולוציה.** הוצאת האוניברסיטה הפתוחה.

5

תרבויות ימיות

דבי צויקל ומעין כהן

הים התיכון היווה במשך אלפי שנים אמצעי קשר בין העמים השונים ששכנו לחופיו, ועל כן עשיר בשרידים עתיקים שהותירו אחריהן תרבויות קדומות. שרידים אלה מתעדים פרקים ואירועים חשובים בהיסטוריה האנושית, החל בתרבויות החוף מהתקופה הניאוליתית (תקופת האבן החדשה, 6,500-9,500 לפסה"נ) ועד ימינו אנו. חמישה עשורים של מחקרים ארכאולוגיים תת-ימיים וחופיים בישראל הביאו לחשיפה של אתרים מסוגים שונים: יישובים פרהיסטוריים שהוצפו על-ידי הים, ערי חוף עתיקות, נמלים ומעגנים, ספינות טרופות ומטעניהן. אתרים ארכאולוגיים אלו מהווים עדות חומרית לפעילות האדם לאורך החופים כמו למשל מסחר, דיג וקרבות ימיים, והם בעלי תרומה משמעותית ורבת ערך להבנת ההיסטוריה האנושית באזורינו.

לנמל נדרש גוף מים עמוקים, מוגן מפני גלי הים הפתוח ומסערות, אשר אפשר לספינות סוחר עגינה בטוחה בקרבת החוף ואשר נבנו בו מתקנים בחוף לטעינת ספינות ולפריקתן. אולם, חוף הים של ישראל מאופיין בתוואי כמעט ישר, ללא מפרצים, כפים או איים המאפשרים מחסה לכלי שיט. כתוצאה מכך, לאורך החוף הישראלי ניתן למצוא מעגנים לכלי שיט קטנים (למשל דור/טנטורה) או נמלים מלאכותיים (כמו עכו, עתלית וקיסריה). לפיכך, השרידים הארכאולוגיים על קרקעית הים ולחופיו הם נכסי תרבות בעלי ערך רב, המלמדים על יחסי הגומלין שבין האדם לים, ומהווים נדבך חשוב ועלום בהיסטוריה של אגן הים התיכון בכלל, ושל ישראל בפרט. בפרק זה נתמקד בסוג אחד של אתר ארכאולוגי - ספינה טרופה ומטענה, ונציג שיטות שונות לביצוע מחקר ארכאולוגי תת-ימי ואת ההתפתחות בבניית כלי שיט.

5.1 שיטות מחקר בארכאולוגיה ימית

הארכאולוגיה (מיוונית: ארכאיוס - עתיק) היא ענף מדעי המבקש לתאר תמונה של התרבות החומרית בזמן ובמקום מסוים. חפירה ארכאולוגית יבשתית מתבצעת בסטרטיגרפיה, כלומר בשכבות (מלטינית: סטראטום - שכבה), שיטת עבודה וניתוח נתונים שמטרתה לחשוף מכלולי מבנים וחפצים שהתקיימו בפרק זמן אחד, לבודדם ולהבחין בינם ובין אלה מהקבוצה המוקדמת או המאוחרת לאותה שכבה. בשיטה זו אנו יכולים לקבוע את הכרונולוגיה היחסית של מרכיבי האתר. בחפירה ארכאולוגית תת-ימית המצב הוא שונה, מכיוון שהספינה הקבורה תחת החול מהווה מכלול חד-זמני וחד-תקופתי של תרבות חומרית, אשר נותר במעמקי הים ללא מגע יד אדם. ההתייחסות לספינה הטרופה היא כאל '**קפסולה של זמן**' - רגע אחד בהיסטוריה שבו הספינה שקעה, וברגע זה, כל מה שהתקיים בכלי השיט הטבוע חדל לתפקד: הספינה אינה נשמרת במצב בו הפליגה בים, אלא כמכלול של חלקי עץ שבתוכו נמצא המטען שנשאה בזמן שקיעתה (כולל חפצי הצוות,

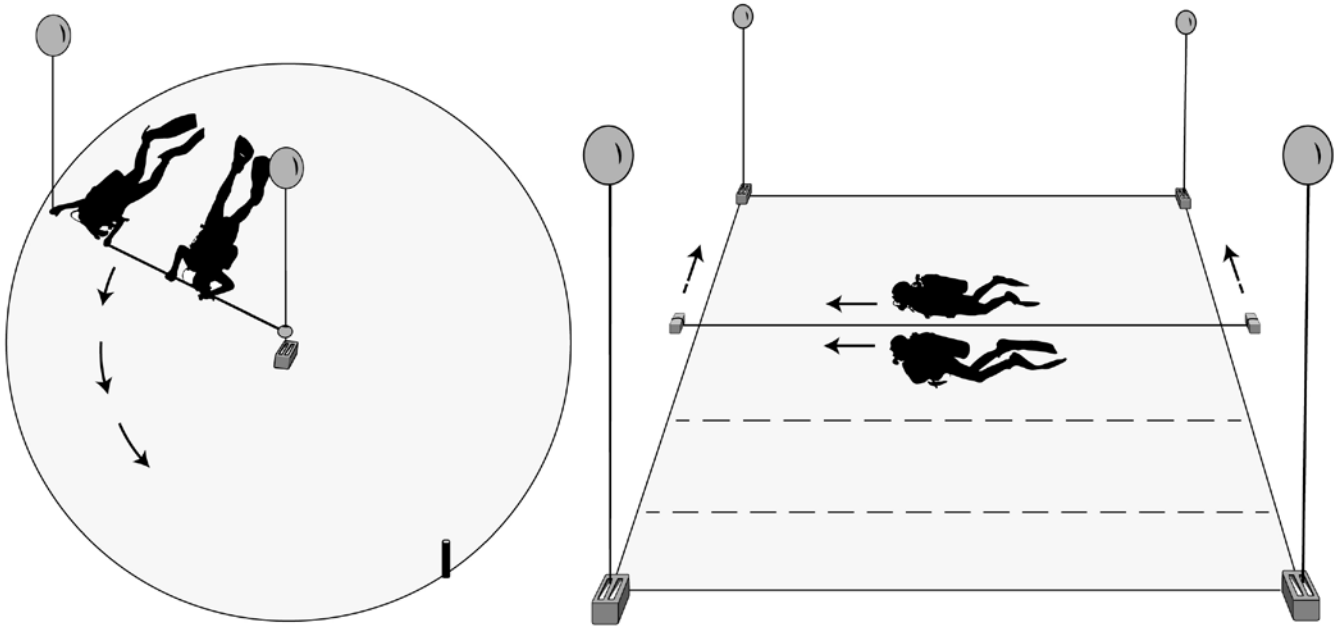
קפסולה של זמן

מכלול חלקי העץ ומטענה של הספינה ששקעה ברגע נתון אחד בהיסטוריה. מרגע שקיעת הספינה, שרידיה לא הופרעו מעולם, ולפיכך מספקים מבט מדויק אל אותה התקופה.

כלי עבודה, מזון ועוד). לאחר שקיעתה, הספינה מכוסה בחול ובאבנים המגנים על חלקי העץ שלה ועל מטענה מחדירה של חמצן (סביבה אנארובית), וכך מונעים התפרקות והרס של הממצא. הסביבה הימית הינה סביבה יציבה מבחינה כימית, ובדרך כלל הנזק הרב ביותר לספינה נעשה בצורה מכאנית על ידי תנועות הגלים והחול על קרקעית הים. אם הממצאים קבורים היטב בחול, הם יכולים לשרוד זמן רב בים, ובמקרים כאלו נמצאו חלקים רבים מגוף הספינה ומטענה (ראו בהמשך).

ריכוז של ממצאים - חפצים שאינם שייכים באופן טבעי לסביבה הימית כמו למשל שבר כלי חרס, אבן שאינה אופיינית לאזור, מטבע עתיק, או חלקי עץ המבצבצים מתחת לכיסוי החול, עשויים לרמז לנו כי מדובר באתר בו נמצאים שרידי כלי שיט. ממצאים אלו מהווים עדות אילמת לספנות ולקשרי מסחר בים התיכון בתקופות קדומות. לעיתים מדובר בגילוי מקרי, כמו למשל קנקנים שנמשו מן הים על ידי דייגים שהעלו אותם ברשתותיהם. הבעיה העיקרית במקרה זה היא שלא ניתן לאתר את מיקומם המדויק של הקנקנים מכיוון שרשת הדיג נגררה לאורך מרחק רב (10-15 ק"מ) טרם הועלתה לסיפון. איתור השרידים הארכאולוגים מתחת למים הינה פעולה מוגבלת, בעיקר בשל תנאי הראות ומגבלת זמן צלילה. בים, עלול הסוקר לפסוח על ממצא ארכאולוגי מבלי לזהותו גם ממרחק של עשרות סנטימטרים בלבד. בנוסף, שרידים שונים יעטו צמדת ים וממצאי מתכת אף יעברו תהליכי קורוזיה וצורתם תהיה שונה מזו המקורית. ביצוע חפירה ארכאולוגית תת-ימית היא משימה קשה, התלויה בים ובתנאי מזג האוויר, וכרוכה בעלות כספית גבוהה. מסיבות אלה, עלינו לוודא תחילה את מקומו של כלי השיט.

השלב הראשון יהיה פניה לרשות העתיקות לצורך קבלת רישיון לביצוע סקר ארכאולוגי באתר. לאחר קבלת הרישיון ניתן לבצע סקר חישה מרחוק של תת-קרקעית הים באמצעים טכנולוגיים (Sub-bottom profiler) או לבצע **צלילת חיפוש וסקר**, המצריכה מוכנות מבחינת הגדרת המטרות והציוד המתאים. שיטות הסקירה הינן רבות ומגוונות (איור 1), אך בכולן יש לזכור את כללי ההתנהגות



איור 1

שיטות לביצוע צלילת חיפוש וסקר: סקירה במקביל (מימין) **וסקירה מעגלית** (משמאל) (ס. עד)

והבטיחות הבסיסים ולשמור עליהם; חשוב להקפיד על קשר עין בין הצוללים המחפשים את הממצא, לבין עצמם, ובינם לבין תורן הבטיחות שנמצא מעל פני המים. תורן הבטיחות אחראי על פעולת המשאבה ועל בטיחות הצוללים, והוא זה שיעניק להם סיוע ראשוני במקרה חירום. בנוסף יש לקבוע זמנים קבועים ומוגדרים בהם עולים הצוללים אל פני המים תוך ניהול רישום מדויק על היבשה להגברת יעילות החיפוש.

השיטה המקובלת היא **סקירה מעגלית**, שהינה אמצעי יעיל ומהיר לשטח מצומצם (איור 1). השיטה מתאימה למצב בו קרקעית פני הים שטוחה, ומתבצעת בצורה מעגלית מהמרכז כלפי חוץ. מצוף עם משקולת (סינקר) מהווה את מרכז המעגל, ואליו מחוברת גלגלת סקירה אשר נמתחת עד לקצה אזור החיפוש. הצוללים המשתתפים בסקר מתמקמים לאורך החבל במרחק קבוע זה מזה, תוך שמירה על טווח ראיה, ומתקדמים במעגלים שקוטרם הולך וגדל מסביב למצוף הסימון. בכל קטע, היקף שטח הסקירה גדל וקצהו מסומן על ידי מצוף עם משקולת. הרדיוס של כל קטע נקבע על ידי תנאי הראות ומספר הצוללים, וכיוונו נקבע בהתאם לזרם ולתנאי הים. כאשר אחד הצוללים מאתר ממצא, אנו מסמנים את המקום בעזרת מצוף ומשקולת, ומיקומו נרשם באמצעות GPS ותכווני חוף, כדי שנוכל לחזור למקום המדויק. השימוש בתכווני חוף אפשרי בראות טובה, כלומר, שניתן לראות בעין, ללא משקפת, עזרי ניווט כמו מגדלור, מבנה בולט ביבשה, ארובה, אנטנה או אפילו עץ בולט במידה שמיקומו קרוב לחוף. ניתן לקחת אזימוט לשני עזרי ניווט על החוף במטרה שיהיו בזווית של כ-90 מעלות זה לזה, או ליצור קו ישר שעוברות דרכו שלוש נקודות: שני עזרי ניווט והמיקום שלנו בים; ככל שיהיו יותר תכווינים, רמת הדיוק תהיה גבוהה יותר.

בשלב הבא עלינו לבצע בשטח **סקר דיקורים** בצלילה כדי לאמת את קיומה של ספינה טרופה מתחת למעטה החול (איור 2). ניתן ללמוד על הרכב הקרקעית

איור 2

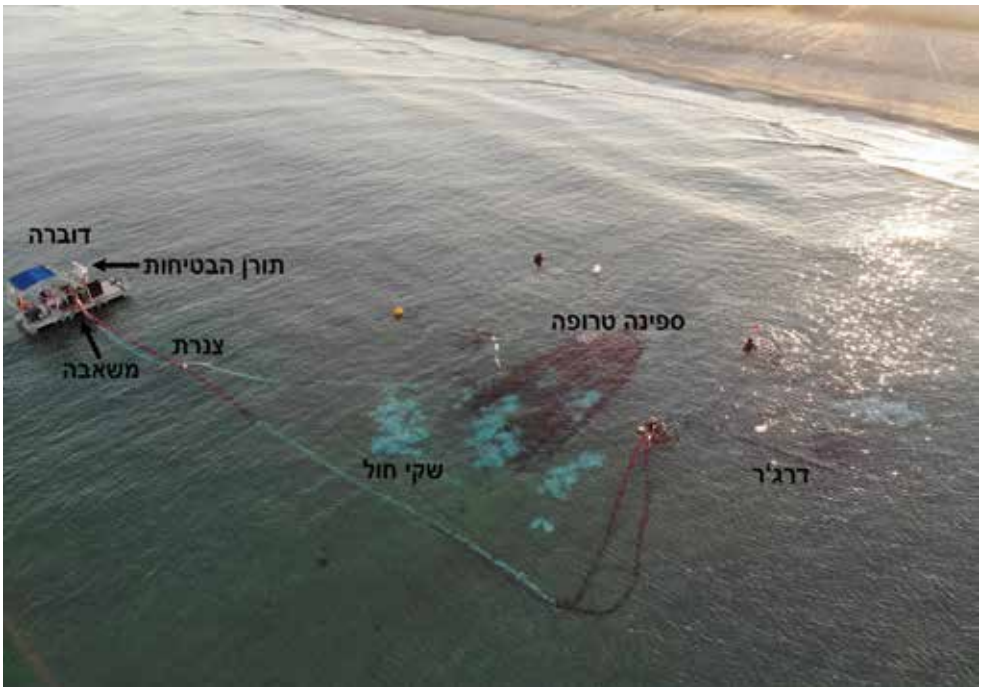
ביצוע סקר דיקורים בצלילה: (מימין) **שני צוללים נועצים את צינור המתכת בקרקעית** (א. יורמן); (משמאל) **תורן הבטיחות על הסירה אחראי על פעולת המשאבה ועל בטיחות הצוללים** (ס. עד)

ולקבל מידע חשוב נוסף מהדיקורים, כמו למשל עומק שכבת החול, סוג השכבה שמתחת לחול (חרסית, סלע אם), ממצאים ארכאולוגיים נוספים (לדוגמה אבני בנייה), עדויות לשינויים במפלס ים, אירועים גיאולוגיים ועוד. הצוללים פורסים על הקרקעית שני חבלים מקבילים הקשורים בקצותיהם למשקולת. חבלים אלו נשארים קבועים במקומם בעת ביצוע הדיקורים. בין החבלים המקבילים נמתח חבל נוסף בניצב להם. החבל הניצב הוא נייד, ומאפשר תזוזה לאורך שני החבלים הנייחים. מקובל לסמן את החבלים מראש במרחקים קבועים, בהתאם לגודל השטח הנסקר, למשל כל 1 מטר, כך שניתן יהיה למקם את הדיקורים בסימונים לאורך החבל הנייח. לאחר שפריסת החבלים הושלמה, שני צוללים נועצים צינור מתכת חלול בקרקעית; זרם מים המוזרם דרך הצינור משמש כמקדח החודר לתוך הקרקעית, עד שהוא נתקל בגוף קשה כמו אבנים או צדפים, או בחומר אורגני (עץ, חבל). בעת הוצאת הצינור נוצרת גומה קטנה בקרקעית; אם קיים חומר אורגני בתת-הקרקע, הוא יצוף. צולל שלישי בודק את תכולת הגומה, ורושם את התוצאה - 'עץ', 'אבן', 'חול', על לוח רישום, ואז עוברים הצוללים אל נקודת הדיקור הבאה לאורך החבל. המרחק בין נקודת דיקור אחת לזו שאחריה תלוי ברמת הפירוט (רזולוציה) שנרצה לעבוד בה: מידע ראשוני על גודל/שטח הממצא ולפעמים גם הרכב הקרקע יכולים להכתיב את המרחק. לאיתור כלי שיט טבוע, המרחק המקובל בין הדיקורים הוא 1-2 מטר. כך אנו בודקים את השטח וממפים את תחום האתר העומד להיחפר. הדיקורים מבוצעים לעומק של 2 עד 4 מטרים בקרקעית הים, כתלות באורך הצינור (לעיתים אנו מגיעים לעומקים גדולים יותר). זוהי משימה מורכבת, וקצב הדיקורים תלוי במיומנות הצוללים, בתנאי הים ובתנאי הקרקעית.

בהסתמך על תוצאות הדיקורים אנו צריכים להחליט האם יש עדויות המרמזות על קיומה של ספינה טרופה באתר (למשל, רצף של תוצאת 'עץ' בגומות הדיקורים) והאם אנו מעוניינים לחפור אותה. כעת ניתן לפנות לרשות העתיקות בבקשה לרישיון חפירה באתר, ובמקביל לגייס את הכספים הדרושים לביצוע החפירה התת-ימית והמחקר. מטרת החפירה התת-ימית היא לחשוף את שרידי כלי השיט על תכולתו, לתעדו באתרו ולהמשיך את המחקר במעבדה ובארכיון. עונת חפירה נמשכת שלושה עד ארבעה שבועות ומתקיימת פעם או פעמיים בשנה. המשלחת מורכבת מצוות המחקר ומקבוצה של צוללים מתנדבים. יום העבודה מחולק למשמרות, כאשר בכל משמרת יש קבוצת צוללים במים, תורן בטיחות בסירה/דוברה (ראו לעיל), ותורן חוף שאחראי על רישום הצוללים בעת כניסתם למים ויציאתם חזרה לחוף.

כדי שנוכל לחפור מתחת למים, אנו נעזרים במשאבה, המספקת את כוח השאיבה. המשאבה מונחת על סירת דיג או על גבי דוברה ייעודית, ועגונה בקרבה לאתר החפירה, בהתאם לתנאי הים והרוח. על הדוברה נמצא תורָן בטיחות האחראי על תפקוד תקין של המשאבה וסיוע לצוללים במקרה חירום. צינורות כיבוי אש מתחברים אל המשאבה בקצה אחד, ואל גליל מתכת ארוך הנקרא דרג'ר (Dredger), בקצה האחר. לתוך הדרג'ר נדחסים מי-ים מהמשאבה הנמצאת מעל פני המים (איור 3). עם הזרקת המים אל הדרג'ר נוצר 'אפקט ונטורי', שבו מים המגבירים את מהירות תנועתם יוצרים תת לחץ (ואקום), וכאשר נחבר צינור גמיש שבקצהו ראש חפירה אל צידו של הדרג'ר, ייווצר כוח היניקה שבעזרתו

נשאב את החול המכסה את השרידים הארכאולוגים (איור 4). החול שנשאב על ידי החופרים נפלט בקצהו הרחוק של הדרג'ר, וחשוב למקם את פתח הפליטה בהתאם לזרם, כדי למנוע מצב שבו כל מה שאנו שואבים חוזר אלינו וממלא את האתר בחול. בחפירה של אתר פרהיסטורי תת-ימי (כמו למשל הכפר הנאוליתי בעתלית), מקובל להרכיב על פתח הפליטה רשת לסינון ממצאים. בצורה זו, ממצאים עדינים וקטנים כמו גלעיני זיתים או ראשי חיצים, נתפסים ברשת ואינם נפלטים למרחק רב מהאתר. בעת סינון הרשת בחוף נשלפים הממצאים העדינים ומועברים לשימור ולהמשך מחקר.



איור 3

מבט על של אתר הספינה הטרופה מעגן מיכאל B. ניתן לראות את הדוברה ועליה תורן הבטיחות; את הצינורות היוצאים מהמשאבה ומתחברים אל הדרג'רים; ואת שקי החול שנועדו להגן על הספינה עם סיום עונת החפירה (ר. לוינסון)

איור 4

צולל חושף את מטענה של הספינה הטרופה דור C. הצולל אוחז בידו צינור גמיש שבקצהו ראש חפירה (א. יורמן)

איור 5

מסגרת מתכת להגנה על הספינה הטרופה דור 2006 (פ. פייפרמן)

בעת חפירה של כלי שיט טבוע, נבחר לעיתים להתקין מסגרת מתכת סביב לאתר, על מנת למזער את מגע הצוללים עם הממצא העדין (איור 5). למעשה, כל עוד חלקי העץ של הספינה והממצאים מכוסים בחול, הם מוגנים מבליה ומהתפרקות, משום שמעטה החול מונע חדירה של חמצן. כתוצאה מהשהות ארוכת השנים בסביבה הימית, הממצאים האורגניים: חלקי העץ של הספינה, חפצים שונים עשויים מעץ (גלגלת, כף לאכילה, מסרק) או מסיבים (מפרש, סל, מחצלת), הם רוויי-מים (Waterlogged) - כלומר, רכים ושבירים, וללא מים יתייבשו ויתפוררו לאבק. ממצא רווי מים מהווה אתגר בשימור משום שהוא עובר שינוי סביבתי ניכר בזמן משייתו מן הים: מסביבה אנארובית וחשוכה לסביבה אירובית ומוארת. קיימים גורמי בלייה רבים, בעיקר כימים וביולוגים, ודרגת הפרוק של ממצא מהים גדולה משל ממצא שמקורו באתר ביבשה. כל נגיעה לא מבוקרת עלולה לגרום להתפרקות הממצא, ולכן הוצאתו מהים צריכה להיעשות בבקרה.

במקביל להתקדמות חשיפת כלי השיט, עוסק צוות המחקר בתיעוד הממצאים: שרטוט הספינה ותכולתה בקנה מידה (איור 6), מדידה, צילום סטילס (איור 7) וצילום וידאו. חלק מן התמונות וצילומי הוידאו עוברים עיבוד ליצירת דגם ממוחשב בתלת-ממד, המסייע לדייק את שחזור הספינה. עלינו לתעד בדיוק המרבי האפשרי את מיקומו במרחב של כל פרט, בין אם זהו חלק של כלי השיט ובין אם זהו פריט מטען או חפץ של אחד מאנשי צוות הספינה, כדי שנוכל לנסות ולשחזר את הספינה המקורית, תכולתה, חיי היום-יום בה, ואולי אף את האירוע שהוביל לשקיעתה. לפיכך, כל חלק שנחשף בספינה מסומן באות ובמספר סידורי. כמו כן,

איור 6

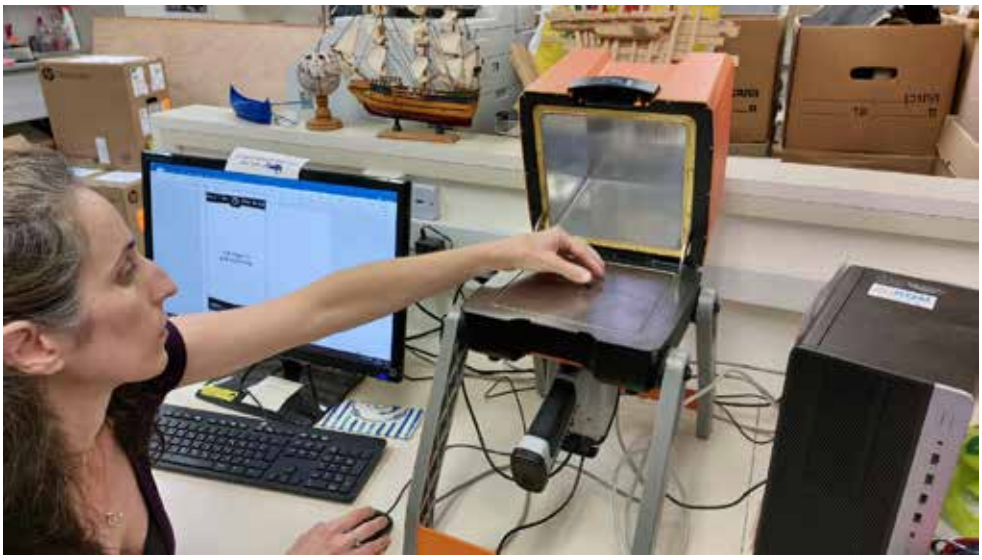
צולל משרטט את הספינה הטרופה דור C (ג'. ווילאמס)

איור 7

צילום ממצאים בקנה מידה בספינה הטרופה דור 2006. הצלם מתאים את גודל קנה המידה לגודל הממצא אותו הוא מצלם. ניתן לראות את מסגרת המתכת המשמשת להגנה על אתר הספינה (פ. פייפרמן)

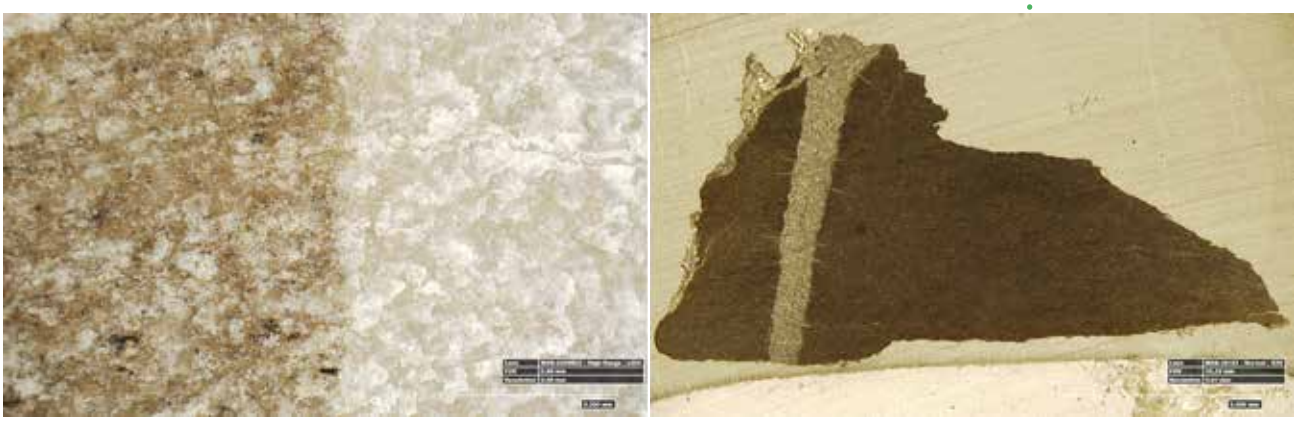
נלקחות דגימות מכל רכיב בספינה ומכל ממצא עץ לזיהוי מיני העצים מהם נעשו. רק לאחר השלמת התיעוד של הממצאים באתרם, ניתן להוציאם מהים להמשך מחקר ולשימור. כל ממצא מקבל מספר קטלוגי בהתאם לסוגו, למשל, כלי חרס, שרידי מזון, ממצאי מתכת, ממצאי עץ, אבנים ועוד, נארז בזהירות ומועבר למעבדת השימור או המחקר.

במעבדת המחקר הממצאים ממוינים וכל ממצא מתועד, נמדד ונשקל. בדיקות המעבדה לעיתים מתבצעות בסיוע של מעבדות מחקר ו/או חוקרים מישראל ומחו"ל. סוג הממצא מתווה את המשך אופן המחקר אודותיו. לדוגמה, ממצא העשוי חומר אורגני נלקחת דגימה לזיהוי הסיבים ממנו הוא עשוי; וממצא מתכת



איור 8

בדיקת מטבע עתיק באמצעות מכשיר XRF (ד. גל)



איור 9

מבט תחת אור מקוטב על שקף של אבן שנמצאה בספינה הטרופה ממגדל הזבובים, עכו: (מימין) **השקף בהגדלה פי 20.** (משמאל) **השקף בהגדלה פי 350. ניתן לראות את המאפיינים המינרלוגים של האבן** (מ. כהן)

נבדק באמצעות מכשיר XRF (X-Ray Fluorescence) (איור 8). זוהי שיטת בדיקה לא הרסנית המבוססת על עירור רמות אנרגיה אטומיות בחומר באמצעות מקור אנרגיה חיצוני כגון קרן רנטגן (X-Ray). הבדיקה בשיטה זו מאפשרת לבחון את היסודות הכימיים המרכיבים את הממצא. ממצא אבן או כלי חרס נבדקים באמצעות פטרוגרפיה - שיטה הלקוחה מתחומי הגיאולוגיה והמינרלוגיה, ועיקרה בדיקת שקפים תחת מיקרוסקופ מקטב כדי לספק מידע אודות ההרכב המינרלי של הממצא. במחקר פטרוגרפי-מיקרוסקופי מתבצעת הגדרה של האבן או החרס בהסתמך על המאפיינים הגיאולוגיים והמינרלוגים שלהם: קושי, צבע, סוג המינרלים ומופעם בשקף (איור 9). הזיהוי של מינרל בשקף באמצעות מיקרוסקופ מקטב מבוסס על בדיקת מכלול של תכונותיו האופטיות, בשני מצבים לפחות: באור מקוטב מישורית ובין מקטבים מצטלבים, ובשלב הבא נעשית השוואה בין הנתונים בשקף לנתונים של מינרלים שונים המוצגים בטבלאות שפורסמו; מכאן נוכל להציע מה המקור הגיאוגרפי של האבן או של החומר ממנו יוצר הכלי.

שיטות לתיארוך הספינה וממצאיה

מעצם היותה של הספינה הטרופה 'קפסולה של זמן', אנו יכולים להניח כי זיהוי ממצא (למשל קנקן, עוגן, מטבע) מן המכלול ותיארוכו, עשוי לשמש עדות לזמנם ולשיוכם התרבותי של יתר הממצאים בכלי השיט ושל הספינה עצמה. אולם, בהתייחסות לתיארוך הממצאים יש לנקוט בזהירות, היות שידועים מקרים בהם ממצאים שונים היו באופן משמעותי עתיקים יותר מהספינה עצמה; למשל, בספינה הטרופה המכונה 'מעגן מיכאל B', אשר מתוארכת למאות השביעית עד השמינית לסה"נ, נמצאו מטבעות נחושת המתוארכות למאה הרביעית לסה"נ. מטבעות מסוג זה היו בשימוש מהמאה הרביעית ועד המאה השביעית לסה"נ.

1. **טיפולוגיה** - בשיטת ה**טיפולוגיה** מזהים מאפיינים טכנולוגיים וצורניים על מנת לתארך את הממצאים השונים, כמו למשל קנקן, עוגן (איור 10). בשלב הראשון אנו ממיינים את הממצאים לקבוצות על פי מכנה משותף רחב, ולאחר מכן מדייקים את הסיווג. שימוש בשיטה זו מסתמך על קיומו של מאגר נתונים עשיר.

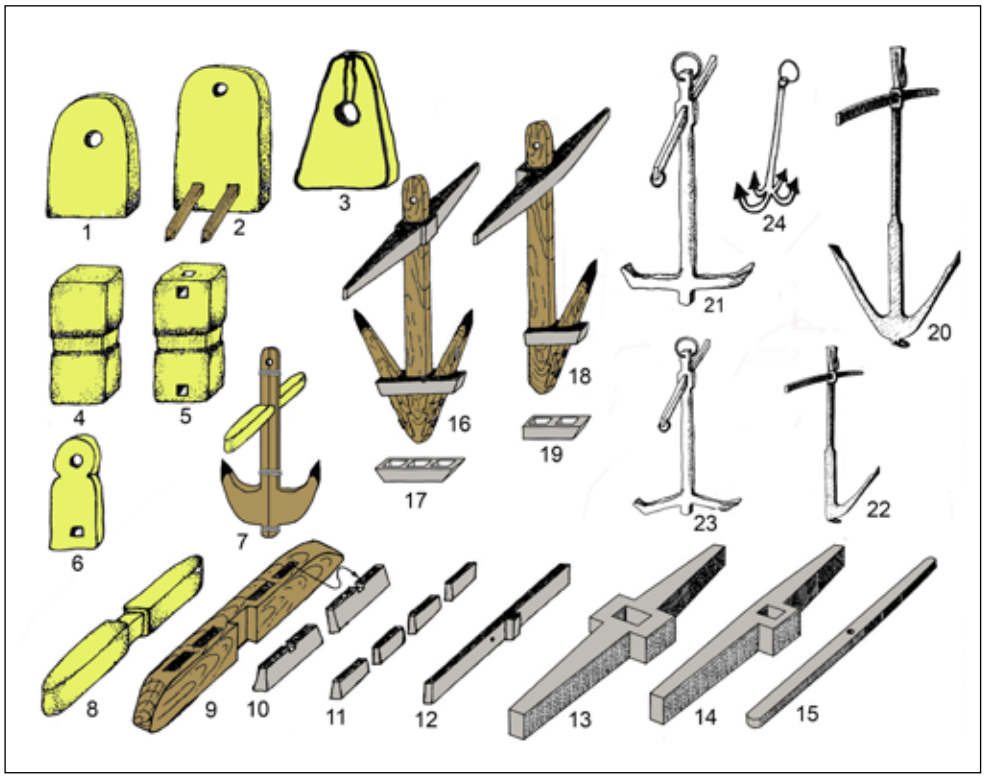
2. **פחמן 14** - השיטה נקראת כך משום השימוש ב**איזוטופ** פחמן 14. תהליך ספיגת הפחמן נעצר כמעט לחלוטין עם כריתתו של העץ או מותו של בעל החיים, ומאותו הרגע קצב הדעיכה של פחמן 14 הוא קבוע. באמצעות קביעת היחס באטמוספירה בין פחמן 14 לאיזוטופים היציבים של פחמן (12 ו-13) ניתן לחשב את גילם של שרידים אורגניים כמו למשל עץ, חבל, מזון ועצמות, מרגע שמתו ונקברו. אולם, בתיארוכם של ממצאים אורגניים בני פחות מ-300 שנה, יתקבלו מספר טווחי גיל, ולכן יש צורך במידע נוסף לביסוס תיארוך שהתקבל מבדיקת פחמן 14 כאשר המדובר בכלי שיט מהמאה השבע עשרה ואילך (התקופה העות'מאנית באזורינו).

טיפולוגיה

תורת המיון על פי טיפוס ותיארוכו ביחס לממצאים אחרים. בשיטה זו מתבצע זיהוי מאפיינים טכנולוגיים וצורניים המאפשר את תיארוך הממצאים השונים.

איזוטופ

איזוטופים של יסוד כימי הם אטומים בעלי אותו מספר אטומי, אך בעלי מסה שונה הנובעת ממספר שונה של נויטרונים בגרעין. האיזוטופים בעלי תכונות כימיות זהות לאטום הרגיל, אך קצב הפירוק (דעיכה) שלהם עולה עם העלייה במספר האטומי.



איור 10

סוגי עוגנים שנמשו מהים בישראל: צהוב = אבן, חום = עץ, אפור = עופרת, שחור/לבן = ברזל (א. גלילי)

איור 11

חתך של עץ ארז: ניתן לראות את טבעות הגדילה ותיארוכן (ב. לורנצן)

3. דנדרו-כרונולוגיה - שיטה זו מבוססת על טבעות הגדילה בעצים המתווספות לגזע בקצב קבוע של טבעת אחת בשנה. ניתן לדעת את גיל העץ על ידי ספירה פשוטה של הטבעות מההיקף החיצוני פנימה (איור 11). אולם, עוביין של הטבעות מושפע מתנאי האקלים והסביבה ולכן דרושה מומחיות רבה בזיהוי הטבעות. תיארוך באמצעות טבעות עצים (**דנדרו-כרונולוגיה**) אפשרי במרבית מיני העצים, אם קיים רצף של טבעות היוצר בסיס נתונים כרונולוגי עד לתקופה בה נכרת העץ. החשיבות אינה טמונה בגודל חלק העץ הנבדק, אלא במספר הטבעות שהוא מכיל. בעץ ארכאולוגי הנשלח לבדיקה, מספר הטבעות המזערי הדרוש הוא 50, אולם רצוי שיהיו 100 טבעות לפחות, כך שהתיארוך יהיה מדויק ככל הניתן.

דנדרו-כרונולוגיה

שיטה לחישוב גיל עצים המבוססת על ספירת טבעות הגדילה המתווספות לגזע בקצב קבוע של טבעת אחת בשנה

5.2 התפתחות כלי שיט

מבנה כלי שיט

הצורך לחצות נהרות וימים כדי לעבור ממקום אחד למשנהו וכדי להעביר סחורות, הוביל את האדם לכניסה לים. אמצעי הציפה העתיק ביותר היה עורות בעלי חיים, אשר מולאו בעשב יבש ונקשרו היטב, כך שניתן היה לצוף עליהם; אמצעי עזר נוסף היה שימוש ברפסודות. הקאנו הוא כלי השיט הראשון המבטא את כניסת האדם לים. סוגים שונים של ספינות קאנו, עשויות מקנים (איור 12) או מגזע עץ (איור 13), נמצאו במקומות שונים בעולם, כאשר הקאנו העתיק ביותר נמצא בהולנד ומתוארך לשנת 6300 לפסה"נ.

במאה התשיעית לפסה"נ החל להופיע **איל הנגיחה** (Ram) - בליטה בחרטום הספינה, המורכבת ממעטפת ברונזה על מבנה מעץ, ואשר ממוקמת מתחת לקו המים. הימצאותו מעידה על קיומן של ספינות מלחמה, אשר היו צריכות להיות חזקות מספיק בכדי שיוכלו לספוג את השפעת הנגיחה בספינת האויב. מטרתו של איל הנגיחה הייתה גרימת נזק מבני בדופן ספינת האויב, כלומר, הוצאת ספינת האויב מכלל פעולה, אם לזמן קצר עד לתיקון הנזק או לצמיתות במקרה של טביעה או פגיעה אנושה אחרת. בנוסף לנזק המבני, עשויה הייתה להיות פגיעה

איור 12

סירת קנים, אתיופיה (מ. שפירא)

איור 13

סירת קאנו מהאי וונואטו, האוקיינוס השקט (ר. שפירא)

איור 14

איל הנגיחה מעתלית: (מימין) **בעת משייתו מהים (צילום: רשות העתיקות);** (משמאל) **שחזור ספינת מלחמה מהתקופה ההלניסטית הנושאת בחרטומה איל נגיחה - כפי שמוצג במוזיאון הימי הלאומי** (א. גלילי); (למטה) **איל הנגיחה מעתלית מוצג במוזיאון הימי בחיפה** (א. גלילי)

בימאים עקב ההלם הנוצר מפעולת הניגוח. המידע לגבי רכיב מכריע זה בלוחמה הימית היה ידוע רק ממקורות כתובים, עד לשנת 1980, אז התגלה במפרץ הצפוני בעתלית איל נגיחה עשוי ברונזה (איור 14). האיל נמצא כשחלקי העץ של חרטום הספינה שנשאה אותו עדיין מחוברים אליו, אך שרידים נוספים של הספינה לא נמצאו. משקל איל הנגיחה מעתלית הוא כחצי טון ואורכו כ-2 מ'. הוא מעוטר בתבליטים שונים: צלצל עם שלושה חודים, זוג מפלצות ים, צמד קסדות מלחמה ונחש כרוך על מקל (קדוקאוס - סמל הקשור לרפואה). סמלים המסמלים מזל היו חלק מפולחן יורדי הים והם נועדו לשמור על הספינה ועל נוסעיה מסכנות הים. בהסתמך על בדיקות שונות, בהן סגנון העיטורים, תוארך איל הנגיחה למחצית הראשונה של המאה השנייה לפסה"נ (203-155 לפסה"נ). איל הנגיחה מוצג כיום במוזיאון הימי הלאומי בחיפה וחלקי העץ שנמצאו בתוכו שומרו וממתינים לשחזור חרטום הספינה והצגתו במוזיאון. כמאתיים שנים לאחר מכן, סביב המאה השביעית לפסה"נ, הופיעו עדויות על כלי שיט עם שתי שורות של חותרים, הידוע בכינויו 'בירמה'. ספינות אלו נועדו ללחימה, היו מסוגלות להגיע למהירות גבוהה יותר והיו בעלות יכולת תמרון טובה יותר.

החל מהספינה הטרופה הקדומה ביותר מן הים התיכון הידועה היום, הספינה מאולבורון (Uluburun) שבדרום תורכיה, המתוארכת לסוף המאה הארבע עשרה לפסה"נ, ועד אמצע האלף הראשון לסה"נ, נבנו כלי שיט בשיטה הנקראת 'ציפוי תחילה'. בשיטה זו נבנו כלי השיט על בסיס **לוחות הגוף**, ואלה הקנו לגוף הספינה את צורתה ואת חוזקה. לאחר הנחת ה**שדרית**, שהיא הקורה האורכית המרכזית

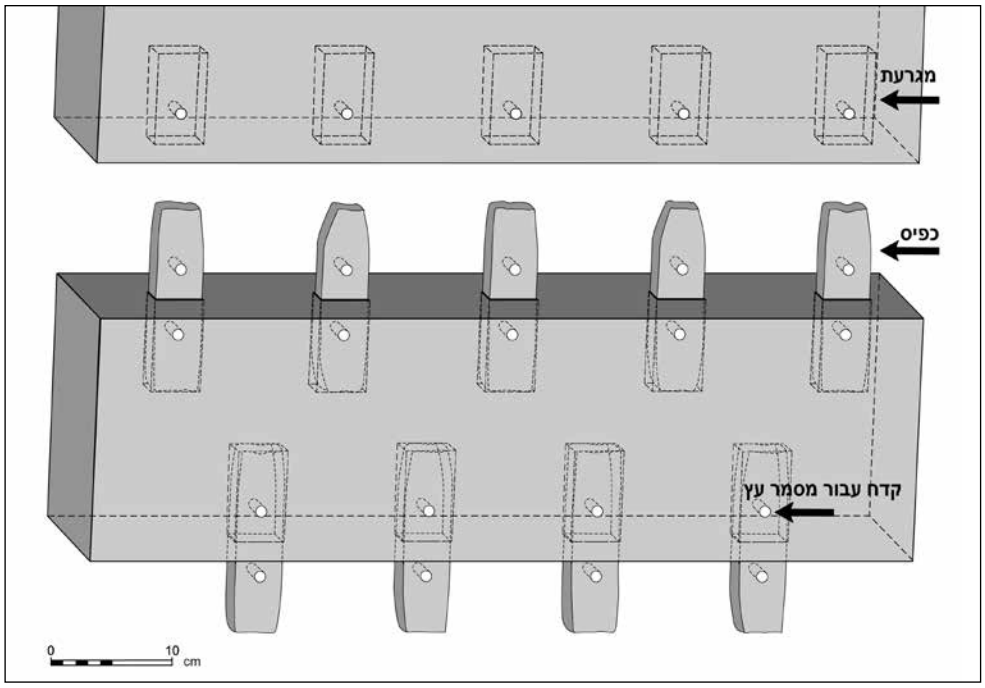
לוחות גוף
לוחות הציפוי, גוף הספינה.

שדרית
הקורה האורכית המרכזית בתחתית כלי השיט, מהקנה לעצה. מכונה 'עמוד השדרה' של הספינה. לעיתים קיימת מגרעת בשדרית להתאמת הלוח הראשון.

בתחתית כלי השיט, חוברו אליה **מוטות הקצה** - רכיבי עץ אנכיים המחוברים בקצותיהם התחתונים לשדרית הספינה - קנה ב**חרטום** ועצה ב**ירכתיים**. בשלב הבא הלוח הראשון של הספינה חובר לשדרית ולמוטות הקצה, הלוח השני חובר אל הלוח הראשון, והלוחות הבאים חוברו זה לזה, עד שהושלמה המעטפת החיצונית של כלי השיט, הציפוי, שהיווה את הגוף. הלוחות חוברו זה לזה בתפירה (ראו בהמשך) או על ידי כפיסי עץ, שהוכנסו לתוך מגרעות בלוחות סמוכים וננעלו במקומם על ידי מסמרי עץ (**חיבורי כפיסים במגרעות**; איור 15 וסרטון 1). רק לאחר השלמת גוף הספינה הוכנסו הצלעות - חיזוקי הרוחב, והן חוברו אל הלוחות במסמרי מתכת, בדרך כלל עשויים נחושת, או במסמרי עץ.

תפירה מוגדרת כחיבור לוחות הגוף של כלי שיט תוך שימוש בחבלים. הלוחות מהם עוצבו דפנות כלי השיט, חוררו, ודרך החורים הושחלו חבלים שחיברו את החלקים. לתפירה ולפרטיה צורות שונות, הן מבחינת חלקי כלי השיט שנתפרו והן מבחינת הפרטים הטכניים בהם יושמה. לכאורה, השיטה נראית משונה, אך מתברר שבשיטה זו נבנו כלי שיט זמן ארוך יותר מכל שיטה אחרת. העדות הקדומה ביותר לכלי שיט אשר נבנה תוך שימוש בתפירה, היא הספינה של פרעה חופו, המתוארכת לשנת 2650 לפסה"נ והמוצגת כיום במוזיאון גיזה שבמצרים. קיימות עדויות ארכאולוגיות נוספות מאותה תקופה ועדויות ויזואליות (איקונוגרפיה) המקדימות אותה, והמתארות בניית כלי שיט תוך שימוש בתפירה.

הבנייה בתפירה איננה קשורה לסוג מסוים של כלי שיט; כלי שיט תפורים ידועים מהים התיכון, ממצרים, מיבשת אפריקה, מהאוקיינוס ההודי ומהימים הסמוכים, מתת היבשת ההודית, מהמים הפנימיים באירופה, מבריטניה, מסקנדינביה, מסיביר, מדרום מזרח אסיה, מהאוקיינוס השקט, ומהחוף המערבי של אמריקה. חבלי התפירה נעשו מכל חומר מצוי וזמין שהתאים למטרה זו כמו למשל שורשים, ענפים, קליפות עצים, קליפות במבוק, סיבי צמחים, סיבי עצים, סיבי קוקוס, צמר, שיער, גידים, מעיים, רצועות עור ומזיפות. למרות שתפירה היא שיטת חיבור



איור 15

חיבור שני לוחות ספינה בשיטת 'ציפוי תחילה' על ידי כפיסים נעולים במגרעות
(ס. עד).
לצפיה בסרטון 1

מוט קצה
רכיב עץ אנכי המחובר בקצהו התחתון לשדרית הספינה והמהווה את המשכה כלפי החרטום או הירכתיים. מוט הקצה בחרטום מכונה קנה ובירכתיים קרוי עצה. לעיתים מוטות הקצה הורכבו ממספר רכיבים.

חרטום
החלק הקדמי בכלי שיט.

ירכתיים
החלק האחורי בכלי שיט.

חיבורי כפיסים במגרעות (סין וגרז)
שיטה לחיבור לוחות גוף זה לזה על ידי כפיסי עץ, שהוכנסו לתוך מגרעות בלוחות סמוכים וננעלו במקומם על ידי מסמרי עץ.

איור 16

סירה תפורה על שפת הים בגואה, הודו. פרטי התפירה מופיעים בהגדלה (ד. מירקין)

הלוחות העתיקה ביותר, היא לא נחשבה לשיטת הבנייה הטובה ביותר, וכאשר נוכח המציאות נדרשו כלי שיט טובים יותר, או כאשר התנאים הכלכליים אפשרו זאת, נעשה שימוש בשיטת בנייה אחרת. עם זאת, בנייה בתפירה לא פסקה גם לאחר המעבר לבנייה בשיטות אחרות ובמספר אזורים, כמו למשל באיי האוקיינוס השקט, בהודו ובחצי האי ערב, התפירה נהוגה גם בימינו (איור 16).

במהלך האלף הראשון לסה"נ חל שינוי הדרגתי במבנה כלי השיט בים התיכון והם החלו להיבנות על בסיס הצלעות, בשיטה המכונה 'צלעות תחילה' (איור 17). על פי שיטה זו, לאחר בניית השדרית וחיבור מוטות הקצה, מוסמרו הצלעות אל השדרית. תחילה נקבעו אלו מהן שעיצבו את צורת גוף כלי השיט, ולאחר מכן הוספו צלעות נוספות. לפעמים כל הצלעות חוברו לשדרית לפני חיבור לוחות הגוף (איור 18). הלוחות חוברו אל הצלעות במסמרים קטנים, בדרך כלל עשויים מברזל. בשיטה זו רכיבי שלד הספינה - בעיקר הצלעות, אבל גם רכיבים אורכיים כמו **שדרון** ו**לזבזת**, הם שהקנו לכלי השיט את צורתו ואת חוזקו. נ. הלפמן הדגים בסרטון בניית כלי שיט בשיטת 'צלעות תחילה' (Frame-based-video).

השינוי בשיטת הבנייה נמשך כ-1,000 שנה, והתפתח בצעדים קטנים ובצורה שונה ממקום למקום ומכלי שיט אחד למשנהו. משמעות התהליך הייתה שינוי יסודי בגישה לגוף כלי השיט: במקום לתכנן אותו ולהעניק לו את חוזקו מתוך ראייה אורכית והבנה אורכית, על בסיס הלוחות, הפכה תפיסת המבנה לתפיסה רוחבית, שנסמכה על הצלעות. המעבר שינה את סדר הבנייה, כך שלא ניתן היה עוד לעצב את גוף כלי השיט תוך כדי בניית הלוחות ולשנותו אם התעורר צורך. הצלעות, בעיקר הצלע המרכזית, הראשונה, הן שקבעו את צורת הגוף. בשיטה זו, שבה חוברו לוחות הציפוי אל הצלעות, שכבר היו במקומן, צריך היה לדעת מראש את צורת הצלעות. מאחר שכללים מתמטיים וגאומטריים לעיצוב הצלעות פותחו רק בתחילת המאה החמש עשרה לסה"נ, נזקקו בוני כלי השיט לשיטות אחרות,

שדרון
קורה אורכית בתוך כלי השיט, מעל הצלעות ובמקביל לשדרית, נמשכת מהקנה לעצה. בתחתית השדרון קיימות מגרעות להתאימו לצלעות שעליהן הוא מונח

לזבזת
לוח גוף עבה שנועד להקנות חוזק אורכי לדפנות כלי השיט ולהגן עליו מפני פגיעות צד

איור 17

בניית ספינה על בסיס 'צלעות תחילה' במספנה לחוף הים השחור, תורכיה (ד. צויקל)

איור 18

סירה הנבנית 'צלעות תחילה' ביוון: ניתן לראות את השדרית, הקנה והעצה (מוטות הקצה), והצלעות (ד. צויקל)

שהתבססו על ניסיון של שנים, תוך היעזרות בפסי עץ ארוכים (לייסטים). לשיטה החדשה, המבוססת על הצלעות, היו יתרונות בולטים: הבנייה הייתה פשוטה יותר; המיומנויות שנדרשו מבעלי המקצוע היו גבוהות פחות; והתחזוקה של כלי השיט והתיקונים היו מורכבים פחות.

נהוג לתאר התפתחות זו על פי השינויים בפרטי חיבורי הלוחות ובפרטי חיבורי

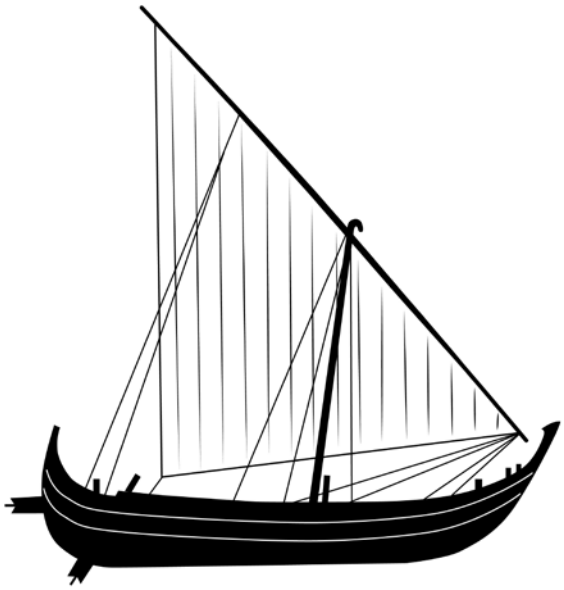
הכפיסים במגרעות. לדוגמה, לפני השינוי היו חיבורי הלוחות סמוכים זה לזה, כפיסי העץ התאימו במדויק למגרעות שאליהן הוכנסו וננעלו במקומם בעזרת מסמרי עץ. במהלך השנים הלכו חיבורי הלוחות והתרחקו זה מזה, הכפיסים תפסו רק חלק מהמגרעות, ובשלב מתקדם הם לא ננעלו עוד למקומם במסמרי עץ, דבר שחייב צלעות כדי להבטיח שהלוחות לא יינתקו זה מזה. עד לאחרונה, מקובל היה לחשוב שכלי השיט הראשון אשר נבנה כולו בשיטת 'צלעות תחילה' הוא הספינה הטרופה מסרצ'י לימני (Serçe Limanı) שבדרום תורכיה, המתוארכת לשנת 1025 לסה"נ. אולם, משנת 1994, עם התחלת החפירות הארכאולוגיות התת-ימיות בלגונה של דור, החלו להצטבר עדויות על כך שהשינוי הושלם כ-500 שנה קודם לדעה הרווחת. חדשות אלה עוררו מחלוקת בקרב חוקרי כלי השיט של העת העתיקה, והשינוי בשיטת בניית כלי שיט היה ועודנו אחד מנושאי המחקר והדיון המעניינים ביותר בקרב החוקרים.

מפרש בכלי שיט

העדויות הארכאולוגיות של ספינות טרופות בים התיכון הן רבות, ובמהלך חמישים השנים האחרונות התגלו ונחקרו בצורה יסודית מאות כלי שיט. למרות כמות הספינות, שרידי מפרש הינם ממצא ארכאולוגי נדיר, והממצא הארכאולוגי של חלקי מערך החיבל (גלגלות לסוגיהן וחבלים) הוא מועט. ישנם ממצאי עץ של חלקי מערך המאפשרים להסיק מידע על תורן הספינה ומפרשה. למשל, הימצאות טבעות צמצום יכולה להצביע על שימוש במערך מפרש מרובע, שניתן היה לצמצם אותו בעזרת חבלי צמצום העוברים בטבעות אלו. חבלים נעשו מסיבי צמחים שונים כמו פאפירוס, קנבוס ופשתן. בספינה ממעגן מיכאל למשל (ראו בהמשך) נמצאו חבלים בקטרים שונים העשויים מצמח אגמון החופים.

אולם, מרבית הידע הקיים אודות שימוש במפרשים מסוגים שונים נשאב מעדויות ויזואליות (איקונוגרפיה) ומעדויות היסטוריות. תיאורים היסטוריים של מפרשים בעת העתיקה הם מקור מידע לגבי צורת המפרשים, חומרי הגלם מהם נעשו, ואף לגבי צבעיהם. בים התיכון, בד המפרש בעת העתיקה נעשה כנראה מפשתן, ועליו חיזוקים של רצועות עור בפינות, בקצוות ובחיזוקים האופקיים של המפרש, שאליהם נתפרו טבעות הצמצום. בדרך כלל בד המפרש היה בצבע לבן, אך לעתים הוא נצבע בצבעים שונים בהתאם לייעודו; למשל, צבע ארגמן כדי לציין ספינת מלכות או ספינת שר צי, שחור לציון אבלות, ירוק־ים או כחול להסוואה, וצבעים אחרים לנוי.

המפרש המרובע הופיע לראשונה באלף הרביעי לפסה"נ במצרים העתיקה. עדויות ויזואליות מצביעות על כך שסביב 1,200 לפסה"נ, מפרש מרובע יחיד המתוח בקצהו העליון על זרוע (Yard) וקצהו התחתון משוחרר, היה סוג המפרש המקובל. בתנאי רוח חזקים היו המלחים מצמצמים את המפרש או מקפלים אותו באמצעות מערך החבלים וטבעות הצמצום. מקובל שהמפרש המרובע היה בשימוש בים התיכון עד בערך אמצע האלף הראשון לסה"נ, אז נכנס לשימוש גם **המפרש הלטיני**, אשר התאפיין בצורת משולש (איור 19). הדעה הרווחת בקרב חוקרים היא שהשינוי ממפרש מרובע למפרש לטיני אפשר מהירות הפלגה גבוהה יותר וביצועים טובים יותר אל מול הרוח. עם זאת, המפרש הלטיני קשה לתפעול, דורש



איור 19

ספינה נושאת מפרש לטיני (ס. עד)

צוות גדול יותר, והוא פחות יעיל מהמפרש המרובע בכיוון מורד הרוח. אי לכך, המפרש המרובע המשיך להיות בשימוש עד לשלהי עידן המפרש.

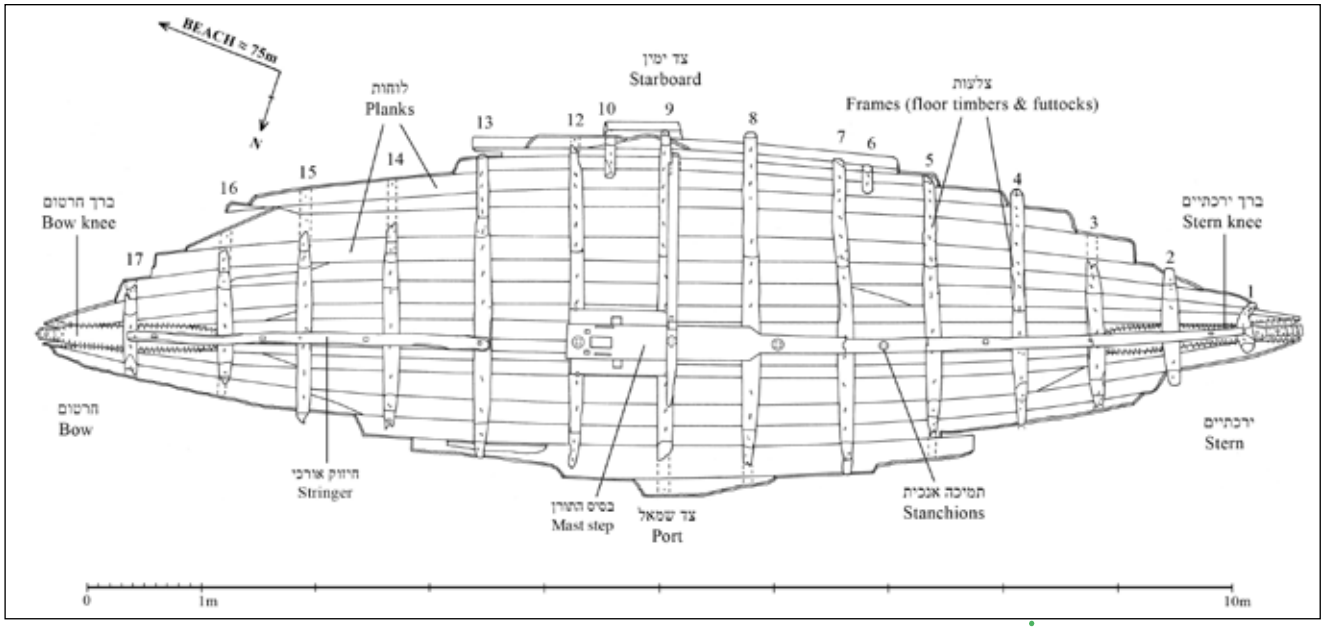
הספינה העתיקה ממעגן מיכאל - שלהי המאה החמישית לפסה"נ

הספינה העתיקה ממעגן מיכאל נתגלתה בשנת 1985, במרחק של כ-70 מ' מחוף הים הסמוך לקיבוץ, על ידי אמי אשל, חבר הקיבוץ. הספינה נמצאה במים רדודים בעומק 1.5 מ' ומתחת לשכבת חול בעובי של כ-1.5 מ', כשחרטומה פונה לכיוון החוף. בדיקה ראשונית של הממצאים העלתה כי המדובר במפרשית סוחר עתיקה, שאורכה המשוער כ-14.4 מ' ובעלת **דחי** של 22.9 טון. הספינה, שהייתה חדשה, הפליגה אל החוף בשלהי המאה החמישית לפסה"נ (שנת 400 לפסה"נ). חפירת הספינה וממצאיה ארכה שלוש עונות, בשנים 1988-1989, ובוצעה על ידי צוות של ארכאולוגים ימיים מן הארץ ומחו"ל, ובסיוע צוות המכון ללימודי ים ע"ש ליאון רקנאטי. בראש הפרויקט עמד ד"ר אלישע לינדר, מייסד המכון ללימודי ים והחוג לציוויליזציות ימיות באוניברסיטת חיפה. בראש צוות החפירה עמד ג'יי רוסלוף מאוניברסיטת טקסס A&M. את השימור, המחקר, ושחזור הספינה במוזיאון הוביל פרופ' יעקב כהנוב מהמכון ללימודי ים ע"ש ליאון רקנאטי.

בנוסף על היותה עתיקה במיוחד, הספינה ממעגן מיכאל הינה יוצאת דופן בעיקר מבחינת השתמרותו המושלמת כמעט של חלקה התחתון: אורך הממצא 11.15 מ', רוחבו 3.11 מ' ועומקו 1.5 מ'. מגוף הספינה שרדו השדרית ו**תת השדרית**, חלקי 14 צלעות, 12 לוחות גוף בצד ימין ו-7 לוחות גוף בצד שמאל, **בסיס התורן**, ורכיבים פנימיים שונים (איור 20). הספינה בעלת חתך רוחב בצורת 'כוס יין' (איור 21) ונבנתה בשיטת 'ציפוי תחילה', בה לוחות הגוף חוברו במערכת צפופה של כפיסים, שהוכנסו למגרעות בלוחות הסמוכים וננעלו למקומם באמצעות מסמרי עץ. בנוסף, נתפרה הספינה בחבלים בחרטום ובירכתיים. צלעות הספינה, אשר הוכנסו אל הגוף שנבנה קודם לכן, חוברו אל הלוחות במסמרי נחושת שכופפו פעמיים, כלומר, המסמרים הוכנסו דרך הלוחות ודרך הצלעות, וכופפו על פני הצלעות פעם אחת ואז פעם נוספת, כך שקצה המסמר ננעץ בתוך הצלע שאליה הוכנס. חלקי

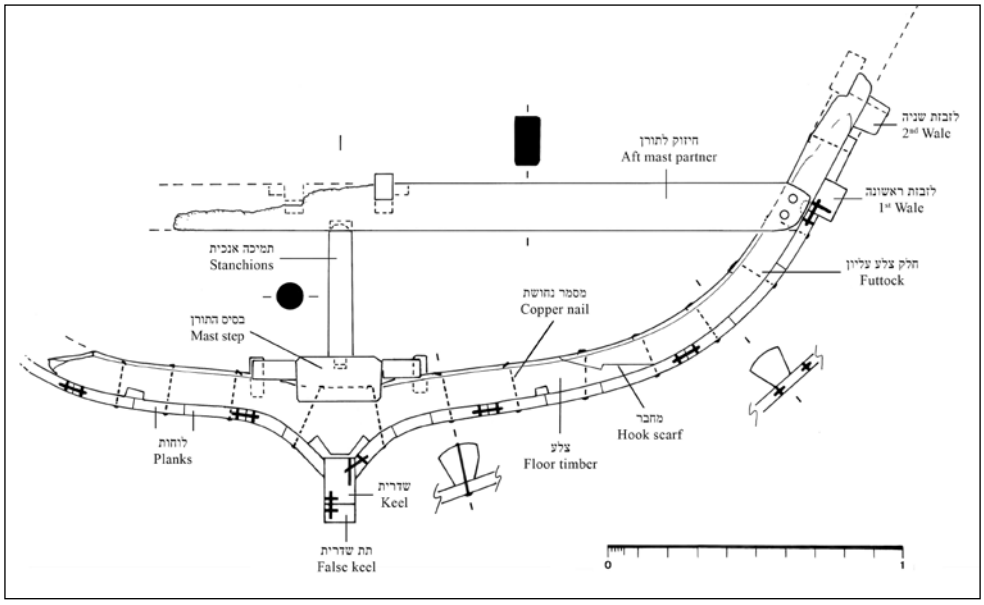
דחי
משקל נפח המים שכלי שיט דוחק כאשר הוא טעון במלואו. הדחי שווה למשקל כלי השיט, מאחר שגוף דוחק מים שמשקלם שווה למשקלו.

תת-שדרית
קורה אורכית המחוברת לחלקה התחתון של השדרית כדי להגן עליה, להוסיף יציבות לכלי השיט ולהקטין את הסטייה שלו.



איור 20

הספינה העתיקה ממעגן מיכאל: מבט על (ג'. רוסלוף)



איור 21

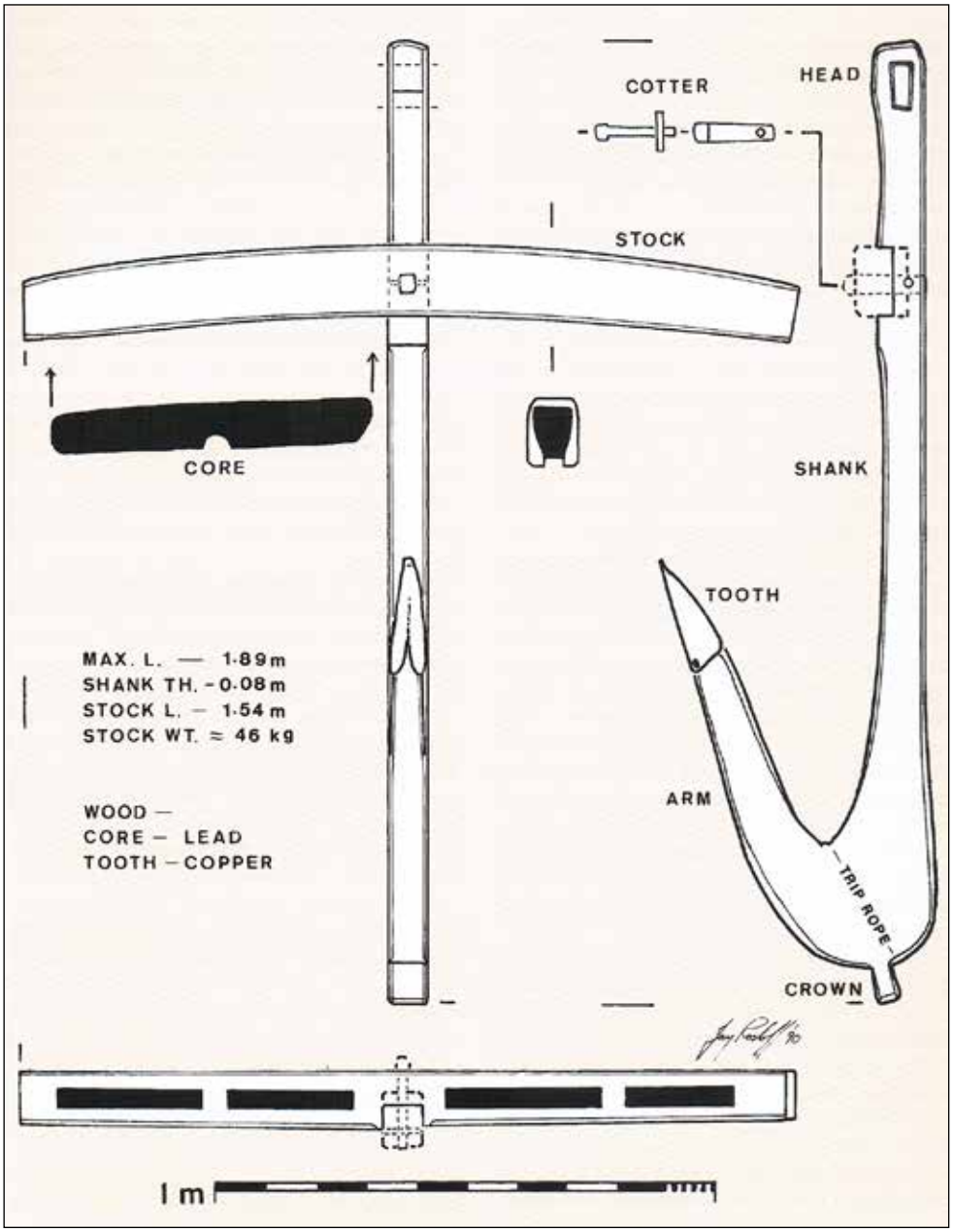
חתך הרוחב בצורת 'כוס יין' (ג'. רוסלוף)

הגוף והממצאים נבנו מ-13 מינים שונים של עצים מאזור מזרח הים התיכון, אך רובו של גוף הספינה נבנה מעץ אורן קפריסאי עם כמה רכיבים מעץ אלון.

בספינה נמצאו 12.5 טון אבנים, רובן צפחה כחולה והיתר אבני בזלת, אשר הונחו על מצע של זרדי עץ; ייתכן כי שימשו כחלק ממטען הספינה או מהנֵטֶל (Ballast) שלה. מקור אבני הצפחה מהאי אביה (ליד אתונה), בעוד שמקור הבזלת מקפריסין. בקרבת החרטום נתגלה עוגן יחיד במינו, בעל זרוע בודדת ועשוי מעץ אלון. על הכתר שבתחתית העוגן ובעין שבראשו נמצאו החבלים אשר שימשו להטלתו ולמשייתו (איור 22). בין הממצאים נתגלו גם שרידי מזון; כ-70 כלי חרס (צלחות, קערות, פכיות - כלי קיבול קטן לנוזלים), ששימשו כנראה את הצוות בחיי היום-יום. מקור הכלים בעיקר בקפריסין ו/או הלבנט, אך אחדים מהם ממזרח יוון (אסיה הקטנה). נמצאו גם סל כלי העבודה של הנגר, אשר כלל מקדחות קשת,

בסיס תורן

מגרעת בשדרון או קורת עץ עבה המונחת על הצלעות ואשר נעשו בה מגרעות לרבות מגרעת מרכזית שנועדה כתושבת לעקב התורן.



איור 22

עוגן הספינה העתיקה ממעגן מיכאל. ניתן לראות את העין בראש העוגן (Head), הכתר (Crown) בתחתיתו, ואת מיקומו של חבל האמיר (Trip rope), אשר שימש להרמת העוגן ביתר קלות או לחילוצו במקרה שהעוגן נתקע בקרקעית (ג'. רוסלוף)

סרגלים שונים, מסמרי עץ וכפיסים מוכנים לשימוש; חבלים בקטרים שונים עשויים מצמח אגמון החופים; מטיל עופרת; וקופסאות עץ אשר שימשו כנראה לתמרוקים. הממצאים מסייעים בשחזור חיי היום-יום בספינה, אך אינם מאפשרים לקבוע באופן חד-משמעי את מוצא הספינה או את הנמלים בהם עגנה, היות שבאופן טבעי כלים וחפצים נסחרו והועברו ממקום למקום.

שימור ושחזור הספינה ממעגן מיכאל

לאחר שהספינה ממעגן מיכאל נחפרה וכל ממצאיה ותכולתה הוצאו, פורק גוף הספינה לחלקים במהלך החפירה התת-ימית. חלקי העץ הובאו אל ברכות מים מתוקים בחוף, ולאחר מכן הועברו למעבדת השימור באוניברסיטת חיפה. השדרית, שאורכה 8.26 מ', הוצאה מהים בשלמותה והונחה בתוך מכל שנבנה במיוחד לשם הוצאתה ושימורה (איור 23). העץ היה רווי מים (Waterlogged), והשיטה שנבחרה הייתה שימור ב-100% פוליאתילן גליקול 3350 (PEG). תהליך השימור של חלקי הספינה נמשך שבע שנים (איור 24) ובסופו הם הועברו למוזיאון הכט באוניברסיטת חיפה, לאגף מיוחד שנבנה עבור הספינה. הספינה הורכבה מחדש בשיטת 'ציפוי תחילה' במשך שלוש שנים, תוך תהליך יסודי של תיעוד ומחקר, ומאז יוני 2002 היא מוצגת במוזיאון הכט. בשנת 2006, בעקבות תרומות נדיבות שהתקבלו למטרה זו, נבנתה לספינה תמיכה חדשה, המתאימה לתצוגת קבע במוזיאון. קווי המתאר של הספינה מיוצגים באמצעות מוטות מתכת דקים, המאפשרים למבקרים במוזיאון לקבל מושג כיצד נראתה הספינה המקורית (איור 25 וסרטון 3).

השלב האחרון בפרויקט מחקר רב שנים זה והגשמת חזונו של ד"ר לינדר היה בניית רפליקה (תעתיק) בעלת כושר שיט לספינה ממעגן מיכאל; בכך הושלם מחקר ייחודי, שהחל עם גילוי הספינה העתיקה. זהו הפרויקט הראשון מסוגו בישראל וחשיבותו המרכזית היא הבנייה, הלכה למעשה, של ספינה מהעת העתיקה בהתבסס על נתונים ארכאולוגים, תוך שימוש בטכנולוגיה עתיקה ומסורת בניית כלי שיט בת 2,400 שנה. בניית הרפליקה הייתה פרויקט מחקר ובראשו עמד פרופ' כהנוב מהמכון ללימודי ים ע"ש ליאון רקנאטי באוניברסיטת חיפה. בפרויקט השתתפו חוקרים, נגרים, בני נוער, סטודנטים ומתנדבים והבנייה התבצעה בבית הספר לקציני ים בעכו. הנחת העבודה הייתה כי רק ביצוע הבנייה בפועל יאפשר ללמוד לראשונה על הבעיות והאתגרים איתם התמודדו בוני הספינה, החל מבחירת העצים המתאימים, מועד כריתתם, עיצוב חלקי הספינה, כיפוף הלוחות והתאמתם, יצירת חיבורי כפיסים במגרעות (איור 26), שחזור התורן והמפרש.

חיפוש העצים המתאימים נעשה על ידי צוות הרפליקה בשיתוף קרן קיימת לישראל, ולאחר הכריתה הועברו העצים לניסור ראשוני במנסרת 'אקליפטוס' שבאזור התעשייה של טבריה. העצים המנוסרים הובלו לסדנה בעכו, שם הנגרים

איור 23

(מימין) **הוצאת השדרית מהים** (ד. שיאון)

איור 24

(משמאל) **שימור חלקי הספינה העתיקה** (נ. קשטן)

איור 25

הספינה המורכבת מוצגת במוזיאון הכט, אוניברסיטת חיפה
(א. יפרמוב)
[לצפיה בסרטון 3]

איור 26

יצירת מגרעות באחד מלוחות הגוף של הספינה תוך שימוש בכלים מסורתיים
(א. יפרמוב)

עיצבו את חלקי העץ והתאימו אותם לתפקידם בספינה, למשל: לוחות ארוכים וישרים לציפוי הגוף, ענפים מעוקלים לצלעות וכדומה. מעצם הגדרת הבנייה כרפליקה, כל שלב הסתמך על הממצא הארכאולוגי וחייב היה להיות זהה לו; בשונה מבוני הספינה המקורית, לנגרים של הרפליקה לא היה חופש פעולה והיה עליהם להיות נאמנים לממצא המקורי. לפירוק גוף הספינה המקורית לחלקים בסיום החפירה הייתה משמעות רבה בהיבט המחקרי של כלי השיט - כל חלקי העץ של הספינה שורטטו עד לרמת סיבי העץ; כל פרטי הגוף נחקרו, נלמדו ותועדו הודות לגישה הפשוטה והישירה אל הרכיבים. הנתונים שנאספו במהלך שימור הספינה והרכבתה מחדש היו הבסיס עליו הסתמכו בוני הרפליקה.
במקומות בהם לא שרד עץ, נעשתה הבנייה על סמך שחזור הספינה, שנעשה בהסתמך על מחקר של מקורות ארכאולוגיים וויזואליים בני התקופה. ההתמודדות עם בניית חלקי הספינה השונים הייתה מאתגרת והציבה בעיות שעל פתרונן שקד הצוות באמצעות מחקר, בניית דגמים, והתייעצות עם מומחים מהארץ ומחו"ל.

בניית הספינה נמשכה כשנתיים וחצי ומידותיה הן 16.6 מ' אורך מקנה לעצה ו-4.3 מ' רוחב (איור 27). הספינה הורדה לים במספנות ישראל ב-16 בדצמבר 2016 ונגררה למעגן הדיג שביט (הקישון) בחיפה, כשהמטרה היא השטת הספינה ומחקר מעשי של יכולות ההפלגה שלה בים. במשך כשבועיים הוכנה הספינה לקבלת כושר שיט ממשרד התחבורה; ההכנות כללו בדיקת בוחן משרד התחבורה לציוד הנדרש וניסויי הטיה לבדיקת יציבותה של הספינה. לאחר קבלת כושר שיט ביצע צוות הרפליקה סדרת הפלגות ניסוי במפרץ חיפה (איור 28). מטרת הפלגות אלו הייתה לתרגל את אנשי הצוות בהפעלת המפרש המרובע, הגאי המשוט ובביצוע

איור 27

הספינה עם סיום הבניה בנובמבר 2016
(א. יפרמוב)

איור 28

הספינה מעגן מיכאל II בעת הפלגת הבכורה שלה בדצמבר 2016
(א. יפרמוב)

תמרוני ימאות של הגררות, התקשרות ועגינה. השקתה הרשמית של הספינה התקיימה ב-17 במרץ 2017 במעגן שביט ובמהלך הטקס הוענק לספינה שמה הרשמי - מעגן מיכאל II.

במקביל להפלגות קצרות בתחום מפרץ חיפה, החל צוות הספינה לצאת להפלגות לאורך חופי ישראל. ההפלגה הראשונה בסדרה, מחיפה ליפו ובחזרה, התקיימה בחודש אוגוסט 2017. ההפלגה ליפו, מרחק של כ-53 מיילים ימיים, ארכה כ-19 שעות במהירות ממוצעת של שלושה קשרים. ההפלגה חזרה לחיפה נעשתה בשלושה מקטעים: יפו-הרצליה; הרצליה-חדרה; וחדרה-חיפה, אשר גם בהם הייתה המהירות הממוצעת שלושה קשרים. בהפלגה זו התנסה הצוות בהפעלת הספינה למשך פרק זמן ארוך, תוך שמירה על שגרת הפלגה, ניהול משמרות והתמודדות עם מצבי ים משתנים. ההפלגה חזרה צפונה בעזרת מפרשים בלבד מאמתת את השערת החוקרים על אפשרות הפלגה לאורך החוף הישראלי בתקופת הקיץ, גם נגד הרוח הצפון-מערבית השלטת. לאחר שהצוות צבר ניסיון בהפלגות ארוכות, ביום שני, 26 בנובמבר 2018, יצאה מעגן מיכאל II להפלגה ללימסול שבקפריסין עם צוות של שישה איש. שתי יכטות ליוו את הספינה במהלך הפלגתה. הספינה מפליגה בעזרת מפרש מרובע אחד בגודל של 60 מ"ר, אשר מאפשר להפליג ברוחות גביות עד רוחות צד ואינו מתאים להפלגה נגד הרוח, ולכן ההפלגה לקפריסין נועדה לקדם את ההבנה של יכולות השיט נגד כיוון הרוח השלטת בעת העתיקה. סך הפליג הכל צוות הרפליקה מרחק של 183.9 מייל ב-74 שעות ובמהירות ממוצעת של 2.5 קשר. המהירות המקסימלית הייתה 6.8 קשר. הספינה חזרה למעגן הקישון בחיפה ב-25 בדצמבר 2018.

מקורות לפרק זה

Casson, L., 1995 (new edition), Ships and Seamanship in the Ancient World, Princeton University Press, Baltimore and London.

Kahanov, Y., 2011, Ship reconstruction, documentation, and in situ recording, in A. Catambis, B. Ford and D.L. Hamilton (eds), The Oxford Handbook of Maritime Archaeology, 161–181. Oxford University Press, Oxford.

Steffy, J.R., 1994, Wooden Ship Building and the Interpretation of Shipwrecks, Texas A&M University Press, College Station.

גלילי, א., ארנסון, ש., ורוזן, ב., 2021, ארכיאולוגיה ימית בחיפה ובחוף הכרמל, בתוך: דר, ש. (עורך), "כרמל בים יבוא" מחקרים ארכיאולוגיים והיסטוריים של ההר ומרגלותיו, החברה לחקירת ארץ ישראל ועתיקותיה, ירושלים: 161-210.

כהנוב, י., 2011, כלי שיט עתיקים בלגונה של דור (טנטורה) ומשמעויותיהם, קתדרה, 134: 5-24.

6

אוקיינוגרפיה

מִיה אלסר

אוקיינוגרפיה היא ענף בין-תחומי העוסק בתהליכים הכימים, הפיזיקלים, הגיאולוגים והביולוגים המתרחשים באוקיינוסים. ניתן לתאר את האוקיינוס כמפעל ביוגיאוכימי לייצור וייצוא חומר אורגני, פירוק, מחזור ושקיעת חלקיקים לעומק האוקיינוס. לגורמים פיזיקלים כגון אור וערבוב עמודת המים יש השפעה מכרעת על קצב היצרנות הראשונית ואספקת חומרי הזנה. יחסי הגומלין בין האורגניזמים השונים המרכיבים את מארג המזון בים, מכתיבים את התפקוד של המערכת הביולוגית כממחזרת חומר אורגני בפני השטח או כמייצאת חומר ארגני לים העמוק ולסדימנט.

בפרק זה נלמד על תכונות המים באוקיינוסים, הרכבם ומחזורים ביוגיאוכימים אשר הופכים את האוקיינוסים למערכת אקולוגית משמעותית לחיים על פני כדור הארץ.

צילום: מִיה אלסר

6.1 מאפיינים פיזיקליים של מי האוקיינוסים

כל אגן אוקייני מתאפיין בכמויות מים, מליחות וטמפרטורה שונים, ואלו קובעים את צפיפותם ומשפיעים על משטר הזרימה, כפי שיפורט בפרק הבא.

מליחות

כפי שלמדנו בפרק 3, המים הם ממס מעולה ומי הים מהווים תמיסה בה מומסים מרבית היסודות המופיעים בטבע. המים המגיעים אל האוקיינוסים ממי **נגר** עילי וממי תהום, מכילים בתוכם **יונים**, רובם **קטיונים**, שמקורם בהמסת מינרלים הבונים את הסלעים בים וביבשה. ה**אניון** נפוץ ביותר במי הים הוא הכלוריד (Cl^-) ומקורו בפליטה של גזים מעומק כדור הארץ. יונים אלו מרכיבים את המלחים בים וריכוזם מגדיר את **מליחות** מי הים. מליחותם של מים מוגדרת כריכוז סך כל המלחים המומסים בהם וערכה הממוצע באוקיינוסים הוא כ-35 גרם מלח בכל ליטר מים, כלומר 3.5%. את ערכי המליחות נוהגים לבטא באלפיות (פרומיל - ‰), כלומר המליחות הממוצעת של הים היא 35‰.

מליחות מי-הים משתנה בין האוקיינוסים ובהתאם לעומק שכבת המים:

1. **אקלים**: ערכי המליחות בשכבת המים העליונה תלויים בראש ובראשונה בהפרש שבין כמות המשקעים האטמוספריים ונגר המגיעים אל הים, לבין כמות המים המתאדים ממנו.

   - המליחות עשויה לרדת ליד מוצאי נהרות גדולים או באזורים של משקעים מרובים.

   - באזורי קווי רוחב נמוכים, לעומת זאת, גוברת ההתאדות, והשפעתה עשויה להעלות את המליחות בשכבת המים העליונה. תופעה זו בולטת במיוחד בלגונות, במפרצים ובאגנים ימיים סגורים למחצה, שחילוף המים בינם לבין הים הפתוח מוגבל למדי.

   - באזורי קווי רוחב גבוהים, מליחות המים תלויה במצב הקרחונים: המליחות תעלה עם היווצרות קרחונים ותרד עם הפשרתם.

2. **עומק** - בעומקים של 1,000 מ' ויותר ערכי המליחות קבועים לרוב, בכל קווי הרוחב ועומדים על ערכים של 34.5-35‰.

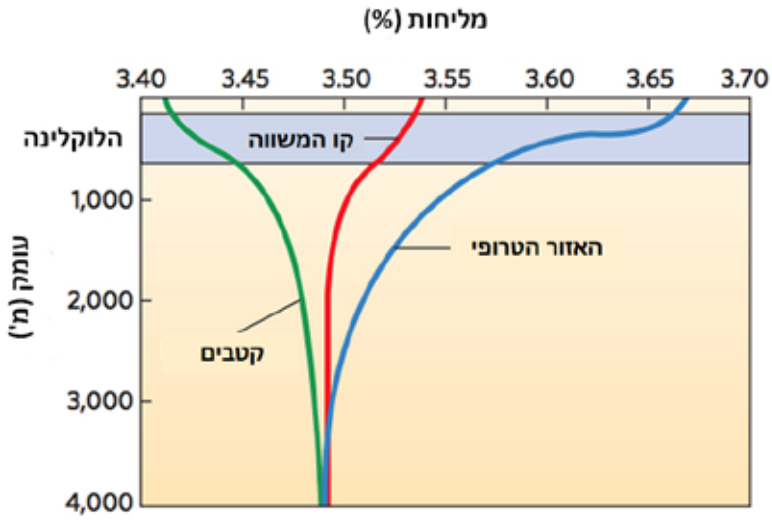
3. באזורים בהם קיים הבדל ניכר בין מליחות שכבת המים העליונה, המושפעת מהאקלים, לבין גוף המים העיקרי והעמוק, קיים אזור מעבר, שבו משתנה המליחות בשיעור ניכר עם ההעמקה. אזורים אלו מכונים **הלוקלינה** (איור 1).

מי נגר
מי נגר הם מים זורמים על פני הקרקע. נהוג לחלק את מי הנגר לשני סוגים עיקריים: נגר בסיס - מי מעיינות, ונגר עילי - מי גשמים או שלגים הנותרים על פני הקרקע. כאשר הקרקע רוויה במים, המים לא יכולים לחלחל בה והם זורמים על פניה.

יון
אטום או מולקולה הנושאים מטען חשמלי, כיוון שמספר האלקטרונים בהם שונה ממספר הפרוטונים. **קטיון** הוא אטום בעל מטען חשמלי חיובי ואילו **אניון** - אטום בעל מטען חשמלי שלילי.

מליחות
בעבר מדדו את מליחות המים על פי ריכוז יוני הכלור במים, אולם כיום מקובל לקבוע את המליחות בשיטה נוחה ומדויקת יותר - ע"י מדידת המוליכות החשמלית של מי-הים.

הלוקלינה
אזור המעבר בין המים הרדודים לעמוקים, בו משתנה מליחות המים בשיעור ניכר, תוך ירידה קטנה יחסית בעומק המים.



איור 1

שינויים במליחות המים בין שכבת המים העליונה למים העמוקים, באזורים גיאוגרפים שונים. האזור הטרופי בכחול, קו המשווה באדום ואזור הקטבים בירוק. אזור המעבר - הלוקלינה, צבוע באפור

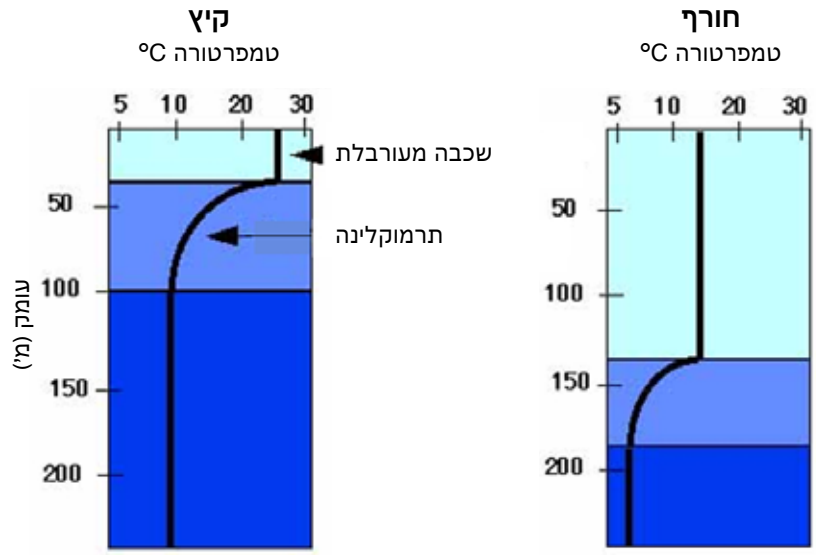
טמפרטורה

בפרק 3 למדנו על החום הסגולי והחום הכמוס הגבוהים של המים. השילוב בין השניים במי האוקיינוסים, גורם לכך שלאוקיינוסים יכולת 'אגירת חום' (**קיבול חום**) גבוהה מאוד. בזכות החום הסגולי הגבוה של המים, יכולים האוקיינוסים לקלוט או לפלוט כמות גדולה מאוד של חום, תוך שינוי קטן בלבד בטמפרטורה. כך גם כמות האנרגיה הגדולה הנצרכת ונפלטת בתהליכי אידוי וקפיאה של מי האוקיינוסים (חום כמוס). קיבול החום הגבוה מאפשר לאוקיינוסים לאגור אנרגיה ביעילות רבה ולמזג את הטמפרטורה על פני כדור הארץ.

המקור העיקרי של חום מי-הים הוא אנרגיית השמש, והטמפרטורה של שכבת המים העליונה נקבעת במישרין על ידי **שטף האנרגיה** המגיע אל פני הים. שטף האנרגיה משתנה בין עונות השנה, שעות היום, דרגת העננות ומידת החזרת הקרינה מפני המים לאטמוספירה (עולה ככל שהמים שקטים יותר). הגורם החשוב ביותר הקובע את שטף האנרגיה הוא המיקום הגיאוגרפי, על פי קווי הרוחב: שטף הקרינה הוא מרבי כאשר קרני השמש פוגעות בפני כדור הארץ בזווית של 90° (**זנית**). לכן, שטף הקרינה הממוצע הגבוה ביותר הוא באזור קו המשווה, והוא הולך ויורד עם העלייה בקווי הרוחב. טמפרטורת המים בפני הים הנקבעת, בעיקר, על ידי שטף הקרינה, תהיה גבוהה ביותר באזור קו המשווה ותלך ותרד עם העלייה בקווי הרוחב.

קרינת השמש, נבלעת ברובה בשכבה הדקה העליונה של המים, אולם מים חמים מצויים גם מתחת לשכבה זו הודות לערבול המים על ידי הרוחות, הגלים והזרמים. עובייה של שכבת המים המעורבלת עשוי להגיע עד 200 מטרים ועומקה והטמפרטורה שלה ישתנו עם הרוחות, הגלים ועונות השנה (איור 2).

שטף אנרגיה
כמות האנרגיה הנקלטת ביחידת שטח במשך יחידת זמן.

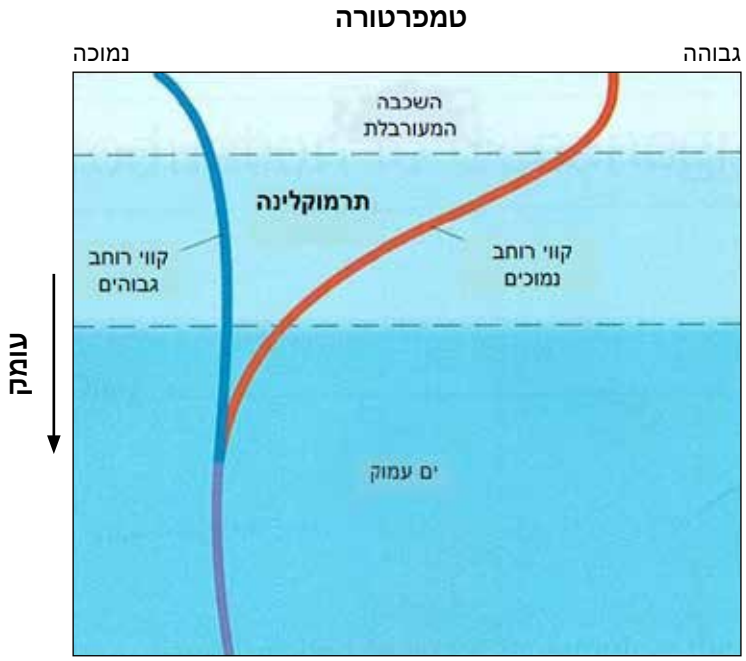


איור 2

עומק השכבה המעורבלת גדל בדרך כלל בחורף (מימין) **עם התגברות הרוחות**

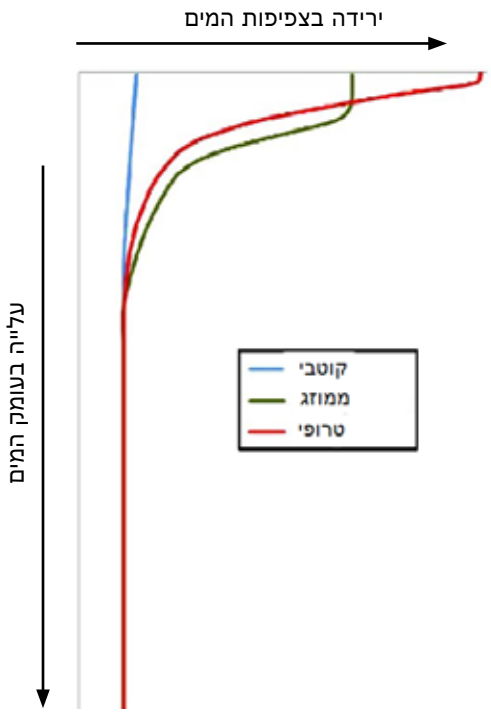
בדומה להלוקלינה, קיים מתחת לשכבה המעורבלת אזור מעבר תרמי בו משתנה הטמפרטורה בשיעור ניכר עם ההעמקה. אזור זה נקרא **תרמוקלינה**, שם יורדות הטמפרטורות בבת אחת עד שמתייצבות בטמפרטורה של כ-5°C. עובי התרמוקלינה ועומקה משתנים מאזור לאזור. באזורים הטרופים התרמוקלינה קבועה למחצה, ואילו באזורים הממוזגים התרמוקלינה משתנה (מעמיקה בקיץ). בקטבים, שבהם הטמפרטורה כמעט שאינה משתנה עם העומק, התרמוקלינה רדודה מאוד או לא קיימת (איור 3). מתחת לתרמוקלינה, מעומק של כ-1,000 מ' ועד הקרקעית, הטמפרטורה יורדת בהדרגה מ-5°C עד 0.5°C-1.5°C לערך. טווח צר זה של טמפרטורות נשמר בעמקי האוקיינוס כל עונות השנה, משום שהוא נקבע על ידי הטמפרטורה של מים קרים, השוקעים באזורי הקטבים ומתפשטים בכל האוקיינוסים.

תרמוקלינה
אזור מעבר, מתחת לשכבה המעורבלת, בו יורדת טמפרטורת המים בשיעור ניכר, תוך ירידה קטנה יחסית בעומק המים.



איור 3

שינויים בטמפרטורת המים בין שכבת המים העליונה למים העמוקים, באזורים גיאוגרפים שונים. קווי רוחב נמוכים באדום ואזור הקטבים בכחול. אזור המעבר - תרמוקלינה, צבוע בתכלת



איור 4

הבדל תיאורטי בין שינויים בשכבת הפיקנוקלינה בקווי רוחב קוטביים, ממוזגים וטרופיים (Haywood et al., 2016)

פיקנוקלינה
אזור מעבר, מתחת לשכבה המעורבלת, בו משתנה צפיפות המים בשיעור ניכר ויוצרת הפרדה בין המים העליונים לתחתונים. להפרדה זו השפעות ביולוגיות חשובות על האוקיינוס.

צפיפות

צפיפות מי-הים עולה עם ירידת הטמפרטורה שלהם ו/או עם עלייה במליחותם. המים ניתנים מעט לדחיסה, ולכן מותנית צפיפותם גם בלחץ שהם נתונים בו. בשכבת המים העליונה השפעת הלחץ זניחה, והצפיפות נקבעת בראש ובראשונה על ידי הטמפרטורה והמליחות של המים. מתחת לתרמוקלינה, בעומק שהטמפרטורה והמליחות כמעט אינם משתנים עוד, חשיבותו של הלחץ כגורם בקביעת הצפיפות הולכת וגדלה. כלומר, צפיפות מי-הים גדלה עם העומק, אך לא באופן אחיד. בקווי רוחב נמוכים ובינוניים, בערך בעומק שבו מצויות ההלוקלינה והתרמוקלינה, חלה עלייה חדה בצפיפות המים והשכבה שבה היא חלה מכונה **פיקנוקלינה** (pyknos = צפיפות ביוונית) (איור 4).

באוקיינוסים, יצופו שכבות מים שצפיפותן נמוכה מצויות מעל שכבות מים שצפיפותן גבוהה יותר. מצב זה מכונה **שיכוב יציב** (stratification) והוא אופייני לקווי רוחב נמוכים, בהם שכבת המים העליונה מתחממת וצפיפותה יורדת. אם צפיפות המים של השכבה העליונה תעלה, ישקעו המים של שכבה זו וייווצר ערבול. תופעת הערבול שכיחה בעיקר באזורי הקטבים כפועל יוצא של התקררות המים כתוצאה ממגע ישיר עם הקרח ומרוח קרה הנושבת מעברו, ועליית מליחות המים סמוך למקום ההיווצרות של קרח, שבמהלכה נפרדים המלחים מן המים הקופאים. מים אלו, שצפיפותם גבוהה, שוקעים לעומק הים ומתחילים לנוע לכיוון קו המשווה. זרמי קרקעית אלו עשירים יחסית בחמצן, כיוון שמקורם בפני הים, ושם הם היו בשיווי משקל עם החמצן שבאטמוספרה. גם בקווי רוחב נמוכים עלולה להיווצר שקיעת מים כתוצאה מאידוי גבוה אשר יעלה את צפיפות המים. תופעה זו עשויה להתגבר עוד יותר בהשפעת רוחות עזות.

6.2 ההרכב הכימי של מי האוקיינוסים

מלבד המלחים, מומסים במי הים גם גזים ותרכובות **אורגניות** ומרחפים בהם חלקיקים הן ממקור אורגני והן ממקור אנאורגני. מקורם של חומרים אלו בבליה של סלעי קרקעית הים, סחף מהיבשה, האטמוספירה ותהליכים כימים וביולוגים בים כגון פוטוסינתזה, נשימה ופירוק. מקובל לחלק את היסודות המומסים בים, על פי ריכוזיהם, לשתי קבוצות עיקריות: מומסים ראשיים ומומסים משניים, כאשר הגבול הכמותי לחלוקה הוא שרירותי: 1 מ"ג לליטר.

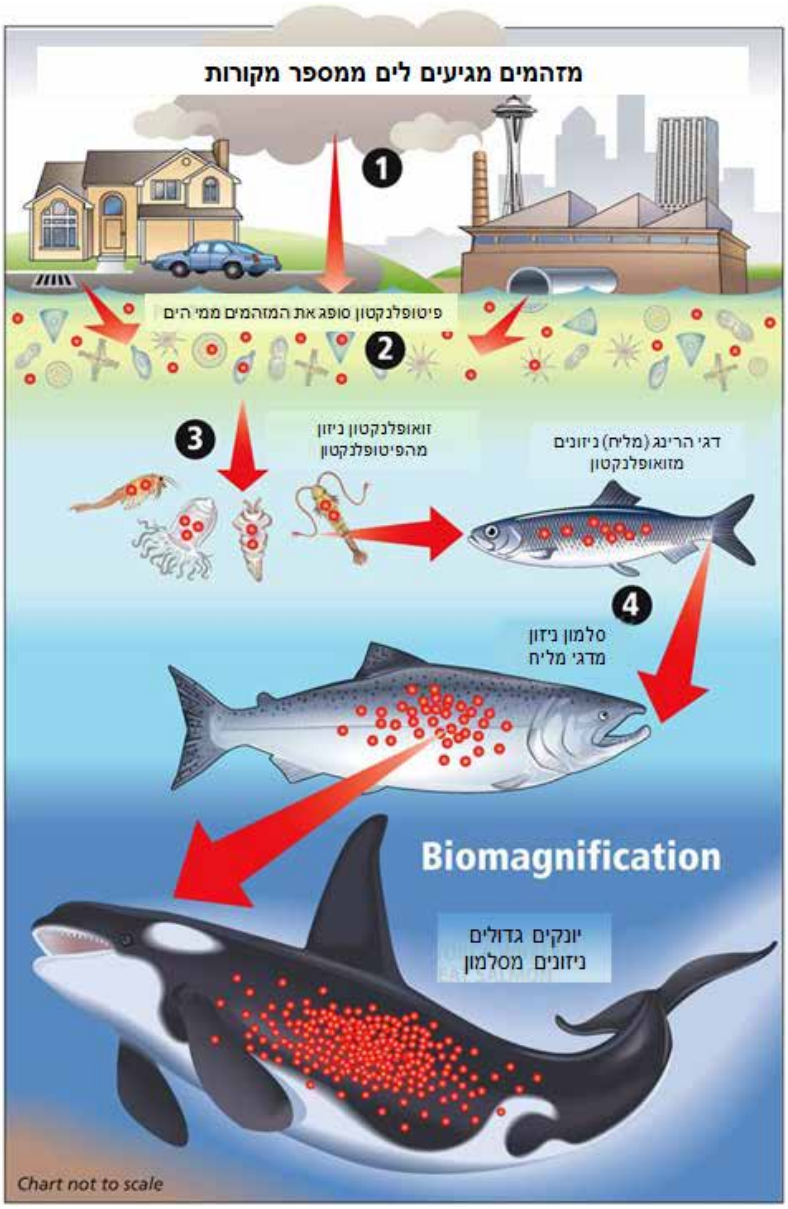
היסודות הראשיים הם יסודות שריכוזם במי הים עולה על 1 מיליגרם לליטר. על יסודות אלו נמנים: כלור (55%), נתרן (30.6%), מגנזיום, גופרית, סידן, אשלגן, ברום, פחמן, סטרונציום, בור ופלואור. יסודות אלו מהווים יחדיו כ-99% ממשקל היסודות המומסים במי הים. שאר היסודות המומסים במי הים הם **משניים**, אשר ריכוזם נמוך מ-1 מ"ג לליטר.

ההבדלים בריכוזי היסודות השונים נובעים מהשוני בריכוזם על פני כדור הארץ, ממידת מסיסותם ומידת פעילותם בתהליכים כימיים וביולוגיים בים. ריכוזו של כל אחד מהיסודות הראשיים בים הוא קבוע, בעוד שריכוזיהם של המרכיבים המשניים נמוכים ומשתנים בהתאם למקום, לעומק ולזמן. הריכוז הקבוע נשמר על ידי האיזון בין קצב כניסת היסודות לים וקצב הרחקתם מהים בדרכים שונות (משקעים, ביולוגיה, זיהומים ועוד). יוצאים מן הכלל בקבוצת היסודות הראשיים מבחינת ריכוזם הקבוע הם **הסידן והפחמן**, יסודות שפעילותם גבוהה בסביבה הימית, אך הכמות המשתתפת בתהליכים אלו קטנה יחסית לכמותם הגבוהה במי הים.

בקבוצת היסודות המשניים נמצא את **יסודות קורט** (elements trace), יסודות המצויים בריכוזים זעירים במי-הים, ובינהם: נחושת, אבץ, עופרת, מנגן, קדמיום, כספית, ניקל וכסף. קבוצה זו כוללת חלק ניכר מן המתכות הכבדות שנכנסו לאוקיינוסים כתוצאה מפעילות האדם. ריכוזם נמוך לא משום שריכוזם נמוך בסלעי יבשה ובמימי נהרות, אלא בעיקר בשל פעילותם הגבוהה במי-הים. מיני רכיכות עשויים לרכז בגופם יסודות קורט בריכוזים הגבוהים פי 10^6 מריכוזם במי-הים בתהליך הנקרא **הגברה ביולוגית** (Bioaccumulation) (איור 5).

תרכובת אורגנית
תרכובת כימית המכילה אטומי פחמן (C) ומימן (H) הקשורים זה לזה.

הגברה ביולוגית
גידול בריכוז רעלים שונים עם העלייה בשרשרת המזון.



איור 5

הגברה ביולוגית

כאשר משווים את הפעילות היחסית של יסודות שונים באוקיינוס מקובל להשתמש במונח 'זמן שהות'. מונח זה מבוסס על ההנחה שבאוקיינוסים שורר מצב עמיד, כלומר קצב כניסת מרכיב לים מתאזן על ידי קצב הרחקתם ממי הים. על סמך הנחה זו מוגדר **זמן השהות** של יסוד כזמן הממוצע שבו מרכיב מסוים נמצא בים, כלומר: משך הזמן מכניסת מרכיב מסוים (מלחים, יסודות וכו') ועד יציאתו. באופן כללי, למרכיבים הראשיים במי הים יש זמן שהות ארוך. זמן השהות של נתרן הוא הארוך ביותר - כ-10^8 שנים - והוא מתקרב לגיל הנאמד של האוקיינוסים - 10^9 שנים. לעומתם, לרוב המרכיבים המשניים זמן שהות קצר - פחות מ-10^3 שנים.

גזים מומסים במי הים

האוקיינוס הוא מאגר אדיר של מים, שמימיו מתערבבים באופן מחזורי ושפניו נמצאים במגע מתמיד עם האטמוספרה. שיווי משקל דינאמי שורר בין המים לאטמוספרה. גזים שונים מומסים במי הים, והמקור העיקרי לגזים אלו הוא האטמוספרה. רק חלק מזערי מהגזים המומסים במי-ים מקורו בהתפרצויות געשיות, בתהליכים ביולוגיים או בהתפרקויות רדיו-אקטיביות בגוף המים. גזים בגבול האטמוספרה והים מתנהגים על פי חוקי הדיפוזיה שבין נוזל לגז - מעבר מריכוז גבוה לנמוך עד לשיווי משקל - ולכן הגזים המומסים בפני הים מצויים, בדרך כלל, בשיווי משקל עם הגזים שבאטמוספרה, בהיעדר תהליכים אחרים. כך למשל, ידוע כי האוקיינוס קולט חלק מהפחמן הדו-חמצני הנפלט לאטמוספרה כתוצאה משרפת דלק, ובאופן דומה קולטת האטמוספרה, על ידי דיפוזיה מפני הים, את עודף החמצן שהאצות פולטות בתהליך הפוטוסינתזה.

שלושת הגזים הבאים מצויים באוקיינוסים בכמויות שונות וביחסים שונים מאשר באוויר, בשל פעילותם בתהליכים רבים באוקיינוס:

טבלה 1. ריכוז הגזים העיקריים באוויר שאנו נושמים ובמי הים

	אוויר	מים
חנקן	78%	11%
חמצן	21%	5%
***פחמן דו-חמצני**	0.04%	46%

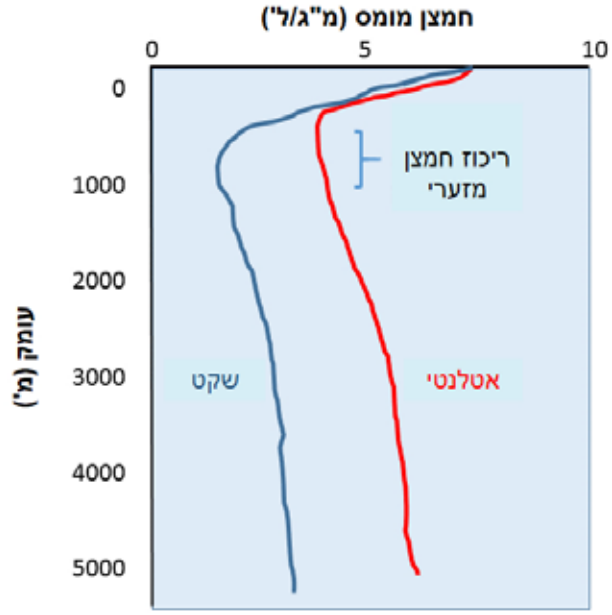
*הריכוז הגבוה של פחמן דו-חמצני במי הים בהשוואה לריכוזו באטמוספרה נובע ממסיסותו הרבה של גז זה במים.

ריכוזי הגזים במים עשויים להשתנות במידה ניכרת עם העומק (המסיסות גדלה עם הלחץ), הטמפרטורה (המסיסות גדלה עם ירידת הטמפרטורה) ורמת הפעילות הביולוגית.

החמצן (O_2)

אנחנו נושמים חמצן, שמקיף אותנו מכל עבר כ-21% מהאטמוספרה היא חמצן. החמצן הוא יסוד פעיל מאוד מבחינה כימית ומשתחרר בטבע בעיקר כתוצר לוואי של תהליך הפוטוסינתזה. אצות ופיטופלנקטון אחראים למעל 50% מהחמצן הנפלט כיום לאטמוספרה בתהליכי פוטוסינתזה המתרחשת בשכבת המים העליונה בנוכחות אור שמש. ריכוז החמצן משתנה בעמודת המים (איור 6), במקביל לשינויים בטמפרטורה, קצב הפוטוסינתזה והלחץ האטמוספרי:

- ה**אזור האאופוטי** שכבה בה השילוב בין אור ונוטריינטים, גורם לכך שריכוז החמצן שפולטות האצות והפיטופלנקטון בתהליך הפוטוסינתזה, גדול מריכוז החמצן שצורכים היצורים הנושמים. בנוסף, נדחס חמצן מבועות אוויר הנוצרות ממשברי הגלים ונדחף לעמודת המים. השילוב בין שני תהליכים אלו מתבטא בכך שלעיתים עמודת המים העליונה (עד לעומק של 200 מ') נמצאת ב**על רוויה** - מצב שבו ריכוז חומר בתמיסה גבוה מריכוזו בה במצב של שיווי משקל, באותם תנאים נתונים. משמע, מי הים רווים בחמצן ולא ניתן להמיס בהם חמצן נוסף.



איור 6

ריכוזי חמצן בעמודות המים באוקיינוס האטלנטי ובאוקיינוס השקט (Quora)

- בעומקים שבין 200-500 מ', מצטמצם היחס בין החמצן הנפלט לחמצן הנצרך. האור הולך ודועך, מספר הצמחים יורד, וכמות החמצן המופרשת על ידם למים הולכת ומתמעטת, עד שכמות החמצן הנפלט בפוטוסינתזה משתווה לכמות החמצן הנצרך בנשימה או בתהליכי חמצון על ידי חיידקים. העומק שבו מושג שוויון זה מכונה **עומק הקומפנסציה** (פיצוי).
- בעומקים שבין 500-1000 מ' מגיע המחסור בחמצן לשיאו, עם התמעטות יצורי הפיטופלנקטון והתגברות תהליכי פירוק פגרי בעלי חיים וצמחים השוקעים מהשכבות העליונות, הצורכים גם הם חמצן, בנוסף לתהליכי הנשימה. בעומקים אלו **ריכוז החמצן מזערי**.
- בעומקים גדולים מ-1,000 מ', אחוז החמצן במי האוקיינוסים הולך ועולה, בשל זרמים קרים רווים בחמצן, שמקורם בשכבת המים העליונה של הימים הארקטיים. הטמפרטורות הנמוכות והלחץ הגבוה בעומקים אלו מגבירים את מסיסות החמצן.

ישנם גורמים נוספים המשפיעים על רמת החמצן במים:

מיקום גיאוגרפי: מסיסות גזים במים יורדת עם עליית הטמפרטורה ולכן ריכוז החמצן במים יהיה גבוה יותר בקווי רוחב גבוהים ונמוך בקווי רוחב נמוכים.

מבנה האגן הימי: באגנים חצי סגורים, דוגמת הים השחור, המבודדים ממערכת זרמי העומק על ידי סף מוגבה בפתחם, ייווצר חוסר בחמצן בכל העומקים שמתחת לשכבה שבה נוצל החמצן עד תומו.

התחממות מי הים כתוצאה משינויי האקלים מפחיתה את מסיסות החמצן במים ויוצרת הפרדה בין השכבה העליונה של המים למים העמוקים יותר. כך נמנע הערבוב של המים ופחות חמצן חודר מהאטמוספרה לשכבות המים הדלות בחמצן. האיום המיידי הוא על אזורי החמצן המזערי המתרחבים וצפויים להתרחב אף יותר.

פחמן דו-חמצני (CO_2)

פחמן הוא היסוד הרביעי בשכיחותו ברחבי היקום. הוא נמצא באטמוספרה, בצמחים, בבעלי חיים, בסלעים, במעמקי האוקיינוס ובבטן האדמה. אבני היסוד של כל יצור חי - חלבונים, סוכרים, שומנים, DNA ו-RNA - הן שרשרות ארוכות של אטומי פחמן הקשורים בעיקר לאטומי מימן, חמצן וחנקן. ריכוזו של גז זה גבוה במי הים פי 15-30 מאשר באוויר והוא נמצא בשחלוף מתמיד בין האטמוספרה לים. הים נמצא בתת רוויה של פחמן דו-חמצני ולכן לאורך זמן יוכל לספוח ולהשקיע את עודפי הפחמן הדו-חמצני שנמצא באטמוספרה. פעולת השחלוף מושפעת מהרוחות, מהטמפרטורה ומתנועת הגלים: הוא זורם מהימים החמים אל האוויר ומשם, דרך האוויר חזרה אל מי הים הקרים.

גז זה מצוי בים ובאטמוספרה באופן טבעי: הוא נפלט בתהליכי נשימה ופירוק של יצורים חיים ובשריפות של חומרים אורגנים. בעשרות השנים האחרונות עלה ריכוזו האטמוספרי עקב פעילות האדם: שרפת דלקים פוסילים כגון נפט, גז ופחם מחד ומאידך ביאור יערות אשר מצמצם את פעילות הפוטוסינתזה ועקב כך את צריכת הפחמן הדו-חמצני.

חנקן (N_2)

החנקן הוא יסוד חשוב ביותר בגוף החי - הוא מרכיב במולקולות החלבון ובחומצות הגרעין. אך למרות שהחנקן מהווה כ- 78% מהאטמוספרה, רוב האורגניזמים אינם מסוגלים לנצל את מאגר החנקן העצום שבאוויר. הבעיה היא שהחנקן שבאטמוספרה נמצא במצב צבירה גזי (N_2) שרוב רובם של הצמחים ושל שאר היצורים החיים אינם מסוגלים להשתמש בו, משום ששני אטומי החנקן קשורים זה לזה בקשר כימי חזק מאוד.

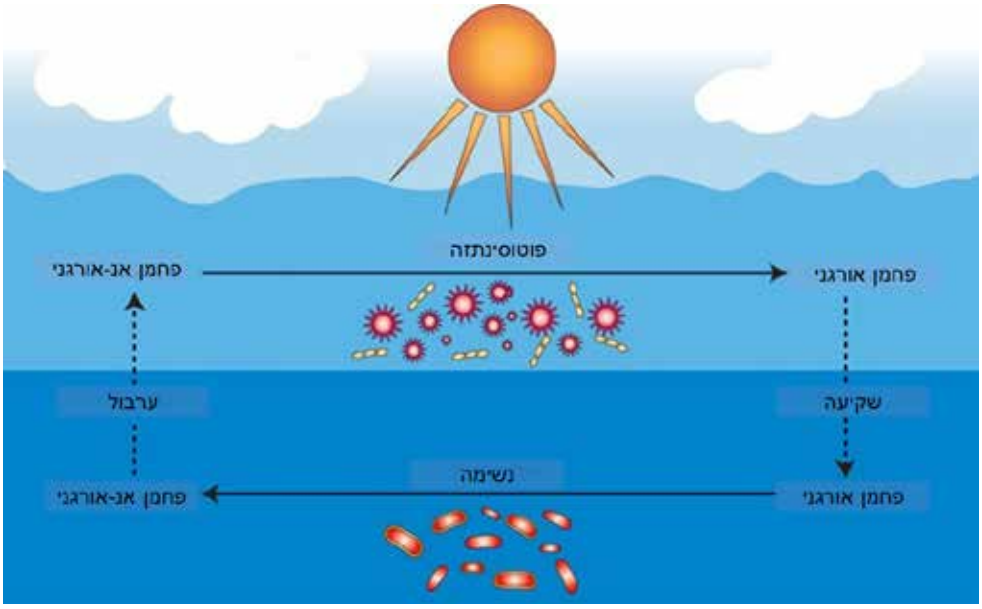
הפחמן והחנקן מחליפים צורה ומצבי צבירה כאשר עוברים, באמצעות פירוק ויצירה של קשרים כימיים, בין המאגרים השונים שבהם הם נמצאים על פני כדור הארץ.

6.3 מחזורים ביוגיאוכימיים

מחזור ביוגיאוכימי מתאר מצב שבו יסודות כימיים נעים בין הביוספירה (תאים חיים) לליתוספירה, לאטמוספירה ולהידרוספירה של כדור הארץ. גם אטומי פחמן וחנקן, מהיסודות העיקריים שמהם בנויים כל היצורים החיים, נעים במעגלים דומים בין פני השטח של כדור הארץ לאטמוספרה ובחזרה דרך צמחים, חיידקים ובעלי חיים. אך מהם התהליכים המניעים מחזורים אלו? איך חנקן עובר מהאטמוספרה ל-DNA של כל חיידק ובן אנוש? איך פחמן פושט צורה ולובש צורה, במעבר בין האטמוספירה לצמחים ולקונכיות? וכיצד מעשי אנוש משפיעים על מחזורי הטבע?

מחזור הפחמן באוקיינוסים

הפחמן עובר בין מאגרים שונים בכדור הארץ באמצעות פירוק ויצירה של קשרים כימיים, בתהליכים שחלקם מהירים ואחרים איטיים יותר. התהליך הנפוץ ביותר בו משתתף הפחמן הוא תהליך הפוטוסינתזה בו לוקחים הצמחים פחמן דו-חמצני (CO_2) מהאטמוספרה, מים (H_2O) ואנרגיה מהשמש, וממירים אותם לסוכר גלוקוז ($C_6H_{12}O_6$) ולחמצן (O_2). את החמצן הצמחים פולטים בחזרה לאטמוספרה ובסוכר הם משתמשים כדי לייצר את החלבונים, השומנים וה-DNA הנחוצים להם. הפחמן הפך כעת למרכיב של רקמות צמח, והמולקולות הפחמניות השונות יכולות לשמש להפקת אנרגיה בצמחים עצמם, או לחלופין, בתהליכי הנשימה של בעלי חיים שאכלו את הצמחים. לאחר שהמולקולות שהפחמן הגיע אליהן ישמשו להפקת אנרגיה, ישוב וימצא את דרכו לאטמוספרה כפחמן דו-חמצני בתהליך הנשימה וריקבון של הפרשות ושל גוף היצור החי אחרי מותו. תהליכים אלו מתרחשים בדרך כלל בסקאלות זמן של כמה ימים או חודשים, ועוברים בהם כמאתיים מיליארד טונות של פחמן מדי שנה (איור 7). חלק מהפחמן שמגיע לים שוקע בקרקעית ונקבר שם למשך מיליוני שנים, וכך נמנע המגע הישיר בין הפחמן לאטמוספירה.



איור 7

מחזור הפחמן באוקיינוסים (Geoscience Nature): פיטופלנקטון לוכד פחמן אנאורגני מפני השטח של האוקיינוס ובתהליך הפוטוסינתזה הופך אותו לפחמן אורגני. כאשר הפיטופלנקטון מת, הם שוקעים בעמודת המים ונושאים עימם את הפחמן האורגני למעמקים. חיידקים וזואופלנקטון מפרקים את הפחמן ששקע והופכים אותו בחזרה לפחמן אנאורגני, אשר חלקו משתחרר בחזרה לאטמוספירה

כאשר צמחים מתים מבלי שנאכלו, הם עשויים להפוך בסופו של דבר לסלע, לנפט או לגז טבעי (תלוי בתנאי הסביבה) בתהליך הנמשך מיליוני שנים. הפיכת צמחים לסלע משקע או לדלק היא אחת הדרכים שבהן פחמן עובר בין מאגרים שונים בקצב של 100-200 מיליון שנה ועוברים בו 10-100 מיליון טונות של פחמן כל שנה. הפחמן המסולק לקרקעית והופך לסלע אינו זמין יותר לתהליכים השונים ומביא לסילוק של פחמן חופשי מהאוקיינוס ומהאטמוספירה.

כדי שהפחמן יהיה זמין שוב, עליו להשתחרר מהסלע, כאשר התהליך הנפוץ ביותר בטבע הגורם לשחרור פחמן מהסלעים הוא תהליך ההמסה. תהליך טבעי נוסף בו משתחרר פחמן מהסלעים לאטמוספרה הוא בהתפרצויות של הרי געש. כיום הרי געש משחררים 130-380 מיליון טונות פחמן דו-חמצני בשנה. לשם השוואה, פליטות פחמן עקב פעילויות של האדם משחררות לאטמוספרה למעלה מ-30 מיליארד טונות פחמן דו-חמצני בשנה - פי 100-300 מהרי געש.

הפחמן הדו-חמצני המומס במים משפיע גם על רמת החומציות. חומציות מודדים ביחידות pH, המתבססות על ריכוז יוני מימן (H^+) המשתחררים למים. ככל שריכוז יוני המימן במים גבוה יותר, כך רמת החומציות גבוהה יותר ומדד ה pH נמוך יותר (איור 8).

CO_2 מגיב עם מי הים ויוצר חומצה פחמתית (חומצה קרבונית) בתהליך הבא

$$H_20 + CO_2 \leftrightarrow H_2CO_3$$

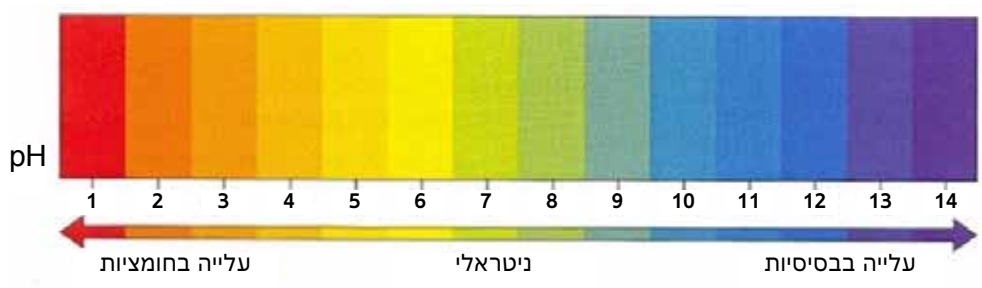
החומצה הקרבונית (H_2CO_3) מתפרקת מיד ליון ביקרבונט

$$(H_2CO_3 \rightarrow H^+ + HCO_3^-)$$

שמתפרק מצידו לקרבונט

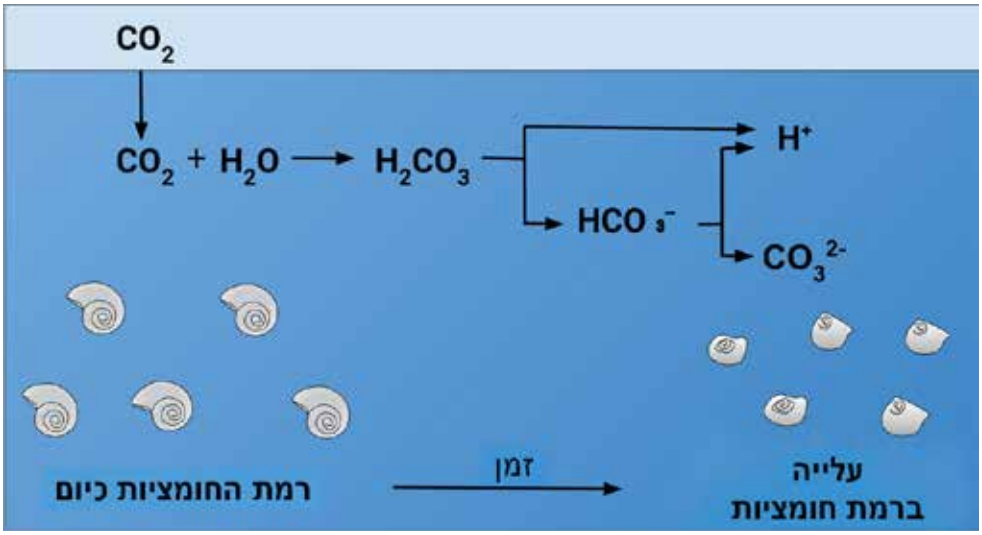
$$(HCO_3^- + H^+ \leftrightarrow CO_3^{-2} + 2H^+)$$

ומשחרר למים יוני מימן ובכך ומעלה את החומציות (מוריד pH). לפי ההערכה, מאז תחילת המהפכה התעשייתית ירד ה-pH של הים מ-8.25 ל-8.14, כלומר הפך פחות בסיסי ויותר חומצי.



איור 8

סולם ה-pH. מקובל להגדיר תמיסה בעלת ערך pH נמוך מ-7 כתמיסה חומצית ותמיסה שערך ה-pH גבוה מ-7 כתמיסה בסיסית. כאשר ה-pH הוא 7, מוגדרת התמיסה כניטראלית



איור 9

השפעת החמצת האוקיינוסים על תהליכי השקעת שלד גירני (Wikipedia)

במצב בריא, משתמשים יצורים ימיים משקיעי שלד גירני (אלמוגים, פלנקטון, רכיכות) ביון הקרבונט יחד עם סידן ליצירת גיר, פחמת הסידן (קלציום קרבונט) בתהליך הבא:

$$CO_3^{-2} + Ca^{+2} \rightarrow CaCO_3$$

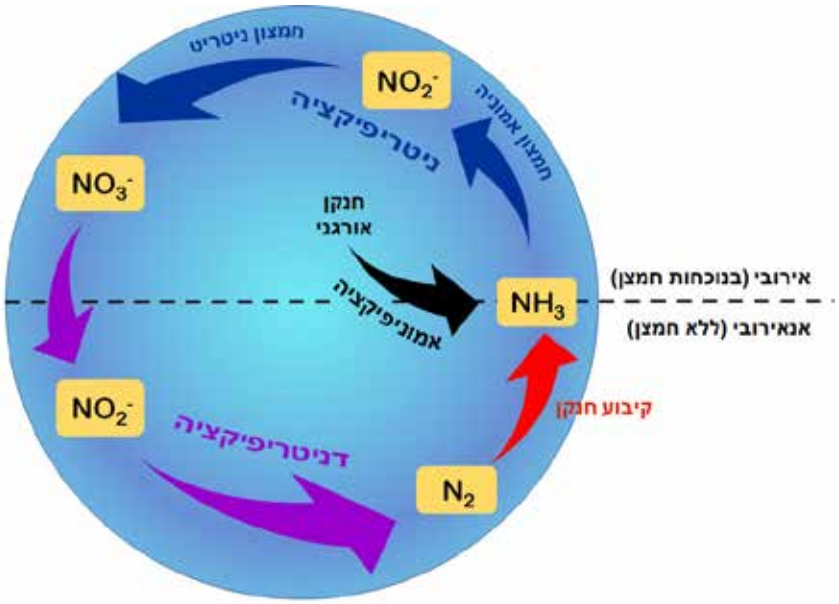
אך עם העלייה בריכוז הפחמן הדו-חמצני, מביאה החומציות הגוברת להתמוססות הגיר המשמש להשקעת שלד גירני (איור 9). מדענים צופים כי שינויים כימיים אלו יחלישו שלדי אלמוגים קיימים ויגרמו להאטה בקצב גדילה של שוניות, ויפגעו ברכיכות ואצות גירניות, אשר מהווים מרכיב מרכזי בשרשרת המזון. לתרחישים אלו עלולות להיות השפעות על המבנה והמגוון הביולוגי באוקיינוסים.

מחזור החנקן באוקיינוסים

החנקן הוא יסוד כימי אל מתכתי החיוני לחיים: הוא מצוי בכל החלבונים, בחומצות הגרעין האחראיות על הקידוד הגנטי בגופנו, ובמולקולות אורגניות אחרות, כמו כלורופיל. למרות שחנקן נמצא בשפע באטמוספירה כמולקולה גזית (N_2), הוא אינו נגיש בצורה זו לרוב האורגניזמים, מה שהופך את החנקן למשאב נדיר ולעתים קרובות מגביל את היצרנות הראשונית במערכות אקולוגיות רבות. באיור 10 ניתן לראות את השינוי המחזורי שעובר החנקן כאשר אורגניזמים שונים משתמשים בו לצמיחה ובמקרים מסוימים, לאנרגיה.

1. כדי שחנקן יהיה זמין לייצור חלבונים, DNA ותרכובות ביולוגיות חשובות אחרות, יש להמיר אותו תחילה לצורה כימית אחרת - אמוניה (NH_3). תהליך המרת N_2 לחנקן זמין ביולוגית נקרא **קיבוע חנקן**. גז N_2 הוא תרכובת יציבה מאוד בשל חוזק הקשר המשולש בין אטומי החנקן, והוא דורש כמות גדולה של אנרגיה כדי לשבור את הקשר הזה. כתוצאה מכך, רק קבוצה נבחרת של אורגניזמים פרוקריוטים מסוגלת לבצע תהליך צורך אנרגיה זה - אצות כחוליות בסביבה המימית וחיידקים נוספים, המצויים בשורשי צמחים ביבשה. למרות שרוב קיבוע החנקן מתבצע על ידי פרוקריוטים, חלק מהחנקן יכול להתקבע באופן אביוטי על ידי ברק או תהליכים תעשייתיים מסוימים, כולל שריפה של דלקים מאובנים.

איור 10. השלבים העיקריים במחזור החנקן (מעובד מתוך Bernhard, 2010)



2. **ניטריפיקציה (חינקון)** היא התהליך הממיר אמוניה ל**ניטריט** (NO_2) ולאחר מכן לניטראט (NO_3) ומהווה שלב חשוב נוסף במחזור החנקן העולמי. רוב הניטריפיקציה מתרחשת באופן אירובי ומתבצעת אך ורק על ידי יצורים פרוקריוטים.

3. **דניטריפיקציה** היא התהליך הממיר ניטריט לגז חנקן, ובכך מסלק מהמערכת חנקן זמין ביולוגי ומחזיר אותו לאטמוספירה. מולקולת החנקן (N_2) הוא התוצר הסופי של דניטריפיקציה.

4. כאשר אורגניזם מפריש פסולת או מת, החנקן ברקמותיו הוא בצורה של חנקן אורגני (כמו חומצות אמינו, DNA). אורגניזמים פרוקריוטים שונים מפרקים את הרקמה ומשחררים חנקן אי-אורגני בחזרה למערכת האקולוגית כאמוניה בתהליך המכונה **אמוניפיקציה**. לאחר מכן האמוניה הופכת זמינה לספיגה על ידי צמחים ומיקרואורגניזמים אחרים לצמיחה.

מלבד החנקן האטמוספרי, ישנם **מקורות נוספים לתרכובות חנקן במים**:

- הפרשות בעלי חיים במים ומחוצה להם
- הזרמת ביוב לא מטופל, בעיקר ביוב ביתי או ביוב המכיל פסולת חקלאית
- מי גשמים השוטפים שדות, שטופלו בדשנים כימיים, המגיעים אל מקווה המים
- מי גשמים המגיעים ממשקים חקלאיים שיש בהם דירים, רפתות ולולים

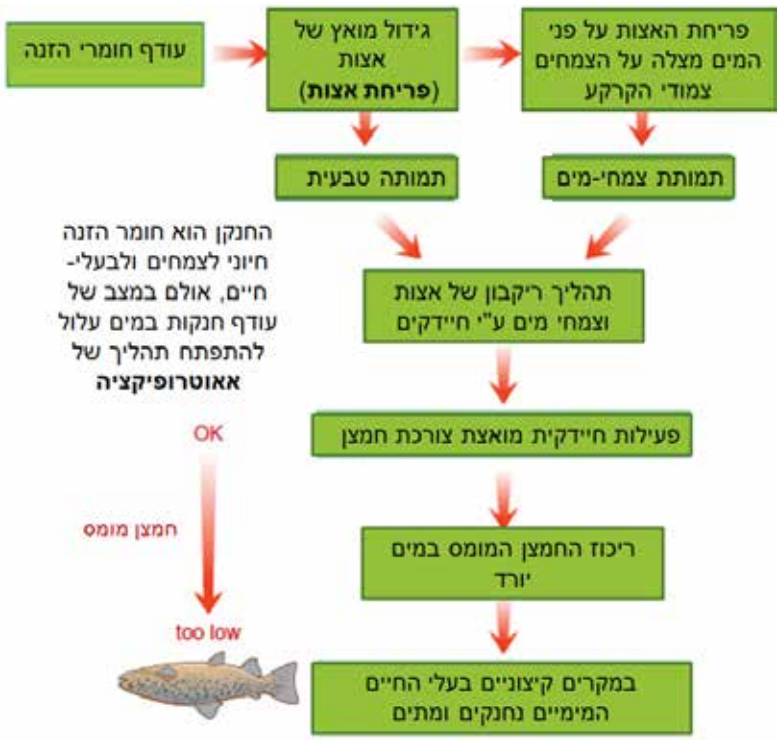
החנקן בצורתו כאמוניה או כניטראט הוא חומר הזנה חיוני לצמחים ולבעלי-חיים, אולם במקרים מסוימים עלול לגרום עודף חנקות במים לפריחת אצות - עלייה מהירה בריכוז של מין אצות מסוים או מספר מינים.

אאוטרופיקציה - העשרת יתר בחומרי הזנה

במקווי מים סגורים, ותיקים - בהם ריכוז החומרים האורגניים גבוה במיוחד, או כאלו שהועשרו בתרכובות חנקן וזרחן עקב זיהום אנתרופוגני, מתרחשת תופעה הקרויה אאוטרופיקציה.

עודף החומר האורגני גורם לעכירות המים, הם קולטים יותר חום, הטמפרטורה שלהם עולה ובעקבות זאת יורד ריכוז החמצן המומס בהם. בנוסף, מביאה העלייה בריכוז נוטריינטים לעליה בכמות הפיטופלנקטון אשר מוזן מהן. עלייה בכמות הפיטופלנקטון מביאה את המערכת האקולוגית למצב של חוסר איזון אשר בסופו ישנה צמיחת אצות מוגברת, אשר פירוקן בסיום חייהן מוביל לחוסר חמצן במקור המים. חוסר החמצן מקשה על אורגניזמים נוספים להתקיים וישנה תמותה גדולה של אורגניזמים. בנוסף, גידול האצות מתרחש בחלק העליון של מקור המים ולכן אנרגיית השמש אשר מהווה מקור אנרגיה לכלל האורגניזמים, נחסמת גם היא. מקורות החנקן והזרחן יכולים להיות שפכים, דשן חקלאי, צואה של חיות ושקיעה של חלקיקי אבק אטמוספרי המוסעים עם הרוח.

איור 11. אאוטרופיקציה במקווי מים



מקורות לפרק זה

Bernhard, A. 2010. The Nitrogen Cycle: Processes, Players, and Human Impact. Nature Education Knowledge 3(10):25

Laffoley, D. and Baxter, J.M. 2019. Ocean deoxygenation: Everyone's problem-Causes, impacts, consequences and solutions. Gland: IUCN. DOI: 10.2305/IUCN.CH.2019.13

Morello, E. B., Haywood, M. D. E., Brewer, D., Apte, S., Asmund, F., Kwong, Y. and Darren, D. 2016. The Ecological Impacts of Submarine Tailings Placement. In book: Oceanography and Marine Biology An Annual Review V54. DOI: 10.1201/9781315368597-7

ביגמן, ל. 2019. מחזורים בטבע. מכון דוידסון, הזרוע החינוכית של מכון ויצמן למדע.

גודוביץ', י. ואוריון, נ. 2002. אפקט החממה, מחזור הפחמן ומערכות כדור הארץ. מכון ויצמן למדע.

רילוב, ג. וטרבס, ח. 2010. השפעות שינוי אקלים גלובלי על מערכות אקולוגיות ימיות: תמונת מצב עולמית והשלכות על הסביבה הימית בישראל. אקולוגיה וסביבה, 1: 65-57.

שפירא, ט. 2015. הנהרות ומחזור הפחמן. מכון דוידסון, הזרוע החינוכית של מכון ויצמן למדע.

7

הים והאטמוספירה

7.1 תהליכים אטמוספריים

מתוך ספר הלימוד 'כדור הארץ והסביבה'

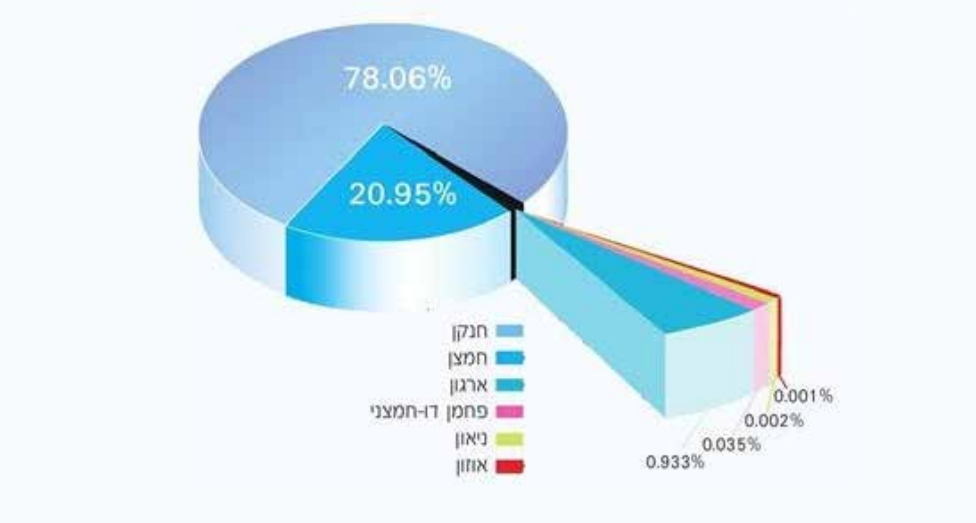
האטמוספרה

האטמוספרה היא מעטפת גזים המקיפה את כדור הארץ, ונשארת צמודה לפני השטח שלו בשל כוח הכבידה. תערובת הגזים המרכיבה את המעטפת הזאת נקראת "אוויר" והיא זו המאפשרת את קיומם של חיים על פני כדור הארץ, בזכות שני תהליכים המתרחשים בה:

א. מניעת הבריחה של אנרגיית השמש המגיעה אל פני כדור הארץ, חזרה לחלל. אילו החום שמקורו באנרגיית השמש, היה נפלט מפני כדור הארץ אל החלל, היו נוצרים הבדלים קיצוניים בין היום ובין הלילה וטמפרטורה ממוצעת נמוכה. תנאים אלה, ללא הגנת האטמוספרה, לא היו מאפשרים את קיום החיים על פני כדור הארץ. זאת בדומה למתרחש על פני הירח חסר האטמוספרה, שהטמפרטורה השוררת בו במשך היום גבוהה מאוד, וזו השוררת בלילה היא נמוכה מאוד.

ב. סינון ובליעה של הקרינה האולטרא-סגולה (UV) המסוכנת של השמש, והקרינה המגיעה מרחבי החלל.
עיקר המסה של האטמוספרה נמצאת ב-12-15 הק"מ הקרובים לפני כדור הארץ וכמעט כל תופעות מזג האוויר שאנו מכירים מתרחשות בחלק הזה של האטמוספרה. זה אומר שהקיום האנושי כולו, לרבות מטפסי ההרים שמגיעים לפסגות הגבוהות בעולם, וגם כל ממלכת החי, לרבות הציפורים המגביהות עוף, כולם היו ויהיו תמיד ברצועה הדקה הזאת. בגובה שמעל ל-12 ק"מ מפני כדור הארץ תערובת הגזים הופכת דלילה יותר ויותר והופכת לריק הקיים בחלל. מקובל להגדיר את הגבול בין האטמוספרה ובין החלל החיצון בגובה של 100 ק"מ מפני כדור הארץ, אם כי עד גובה של 500 ק"מ מעל לפני השטח קיימות עדיין מולקולות אוויר, שריכוזן נמוך ביותר.

איור 1. הגזים העיקריים המרכיבים את האטמוספרה



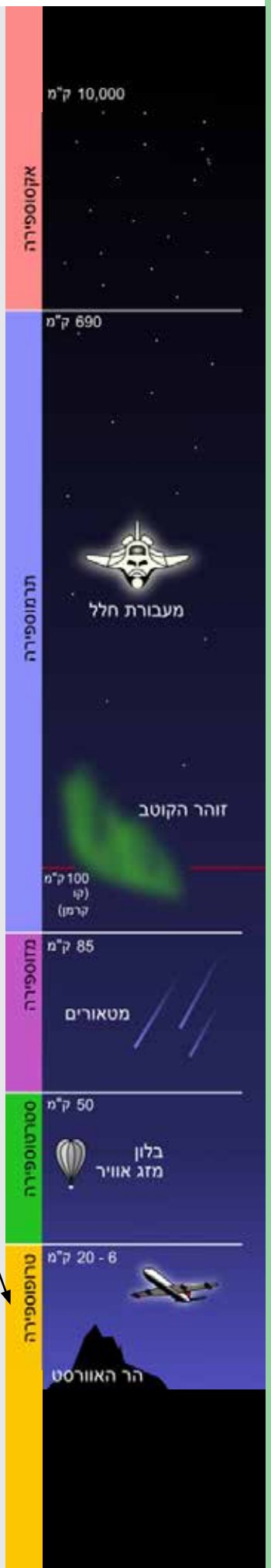
הרכב האטמוספרה

האוויר שאנו נושמים היום מורכב בעיקר מן הגזים חנקן (N_2) - 78.08% וחמצן (O_2) - 20.95% וכן ארגון (Ar) - 0.93% ופחמן דו חמצני (CO_2) - 0.038%. נוסף על הגזים האלה יש באוויר עוד גזים רבים, בריכוז זעיר, המכונים "מרכיבי עקבה" (מן המילה "עקבות", לציין כמויות זעירות, פחות מאלפית האחוז). אלה הם תחמוצות חנקן וגופרית, אוזון, אדי מים, מתאן ותרכובות אורגאניות נדיפות שונות, שריכוזן קטן מאוד (איור 1). ריכוזם של אדי המים באוויר, שהם התנאי להיווצרות משקעים, אמנם קטן מאוד אך הוא משתנה במרחב ובזמן כל העת.

שכבות האטמוספרה

נוהגים לחלק את האטמוספרה של כדור הארץ לכמה שכבות - על פי העוצמה של לחץ האוויר וצפיפות האוויר, ועל פי השינויים בטמפרטורה. חשוב לזכור כי לא ניתן להבחין בשכבות האטמוספרה מפני שהיא רציפה מפני השטח של כדור הארץ ועד לחלל. כן יש לדעת כי עובי השכבות של האטמוספרה אינו אחיד בקווי הרוחב השונים, והוא משתנה גם בעונות השנה השונות. לפניכם החלוקה המקובלת לפי השינויים בטמפרטורה (איור 2). מידע נוסף בסרטון 'המסע לקצה של האטמוספרה'.

איור 2. שכבות האטמוספרה



אקסוספרה השכבה הגבוהה ביותר, מרוחקת כ-10,000 ק"מ מפני כדור הארץ. השכבה דלילה במיוחד ומכילה מולקולות של מימן ההולכות ומתנדפות לחלל. צפיפות האוויר בשכבה זו כה נמוכה עד שאין כל משמעות לשינויי הטמפרטורה. היא נמשכת לגובה של מאות קילומטרים ובהדרגה נעלמת אל החלל.

תרמוספרה - השכבה בגובה שבין 85-500 ק"מ מעל לפני השטח של כדור הארץ. בהיעדר הגנה מקרינת השמש, הטמפרטורה בשכבה זו יכולה להגיע גם ל-1,700°C. בשכבה הזאת תמצאו את זוהר הקוטב, את תחנת החלל הבינלאומית והמון לוויינים. התרמוספרה גדלה וקטנה בממדיה לסירוגין, בהשפעת הפעילות המתרחשת בשמש: בשנים שבהן יש יותר **כתמי שמש**, העוצמה של קרינת השמש גדלה, ואז התרמוספרה מגיעה לגובה של 1,000 ק"מ.
בחלקה התחתון של התרמוספרה (80-300 ק"מ מעל לפני השטח של כדור הארץ) נמצאים ריכוזים גבוהים של חלקיקים הטעונים במטען חשמלי (יונים), שמקורם במגנטוספרה, השדה המגנטי שסביב כדור הארץ. התוצאה היא שבשכבה זו - **היונוספרה**, האוויר הופך להיות מוליך חשמל. שכבת היונוספרה היא גם המקום שבו מתרחשת תופעת **זוהר הקטבים**: היונים פוגעים במולקולות החמצן והחנקן שביונוספרה ומעוררים אותן. כתוצאה מכך נפלט מהן אור בצבעי אדום, ירוק וסגול, בצורה של מעין וילונות ענקיים של אור, המרחפים בגובה עצום מעל לקרקע. מיקומו של זוהר הקטבים תלוי בקווי השדה המגנטי של כדור הארץ, שמרוכזים באזור הקוטב הצפוני והדרומי.

מזוספרה - השכבה בגובה שבין 50-85 ק"מ מעל לפני השטח של כדור הארץ. בשכבה זאת הטמפרטורה יורדת בחדות עד כמעט 90°C מתחת לאפס, והאוויר נעשה דליל מאוד. מטאורים המגיעים מן החלל מתכלים עם כניסתם למזוספרה, בערך בגובה 85 ק"מ: המטאורים מגיעים מהחלל במהירות עצומה, והחיכוך שלהם עם מולקולות האוויר שבמזוספרה (למרות דלילות האוויר) יוצר חום גבוה, הגורם להתכלותם.

סטרטוספרה - השכבה בגובה שבין 15-50 ק"מ מעל לפני השטח של כדור הארץ. בשכבה הזאת הטמפרטורה עולה באיטיות ככל שעולים בגובה, עקב נוכחותו של גז **האוזון**, הבולע את הקרינה העל-סגולה מן השמש ותוך כדי כך ממיר אותה לאנרגיית חום ומחמם את סביבתו. זוהי שכבה יציבה, ולכן חומרים כמו חלקיקי אבק געשי, המועפים בעוצמה רבה לגובה רב, נלכדים בה לתקופות ארוכות ויכולים להישאר בה למשך כמה שנים. הטמפרטורה בפסגת הסטרטוספרה היא כ-0°C.

טרופוספרה - השכבה המשתרעת מפני השטח של כדור הארץ ועד לגובה של 17-8 ק"מ. בכל 100 מטרים של עלייה לגובה, הטמפרטורה יורדת ב-0.6°C בממוצע - בגלל הירידה בצפיפות הגזים, ובשל התרחקות ממקור החום הנובע מפליטת קרינת החום התת-אדומה מפני כדור הארץ. מרבית העננים, המשקעים, הסופות ושאר תופעות מזג האוויר המוכרות לנו, מרוכזות בשכבה הזאת.
בפסגת הטרופוספרה הטמפרטורה היא כ-54°C מתחת לאפס.

כתמי שמש

אזורים על פני השמש שמתרחשות בהם מערבולות מגנטיות עצומות. הטמפרטורות בכתמי השמש נמוכות יחסית לסביבה, והפרש הטמפרטורות גורם לכך שהאזור נראה כמו כתם כהה יותר מסביבתו.

קרינת השמש

האנרגיה המגיעה מהשמש לכדור הארץ באופן מתמשך ובכמות עצומה מניעה ומחוללת את מערכת הזרימה העולמית של הרוחות, את ההבדלים בין עונות השנה, את תופעות מזג האוויר, ואפילו את המערבולות והזרמים באוקיינוסים.

מקורה של אנרגיית השמש הוא בתהליכים גרעיניים המתרחשים בתוך השמש. בתהליכים אלה מתרחשים שינויים במבנה הבסיסי של האטומים של יסודות מסוימים, ונוצרות אנרגיות בעלות עוצמה אדירה. השמש, כמו כוכבים רבים מסוגה, פולטת את האנרגיה שלה בצורת קרינה המתפשטת ומתקדמת בחלל בגלים הנעים במהירות האור - מהירות של כ-300,000 ק"מ בשנייה. הקרינה נפלטת מן השמש באורכי גל שונים. כלל אורכי הגל של הקרינה הנפלטת מהשמש נקרא בשפה המדעית בשם "**הספקטרום האלקטרומגנטי**" (איור 3). רוב האנרגיה נפלטת מן השמש ב**קרינה קצרת גל**, קרינה אנרגטית מאוד, הנמצאת בתחום האולטרא-סגול ו**בתחום האור הנראה.** העין שלנו אינה מסוגלת לראות את כל הספקטרום האלקטרומגנטי, והאור שאנו רואים הוא רק חלק קטן ממנו. ה**קרינה ארוכת הגל**, הנמצאת בתחום התת-אדום (אינפרה אדום) ובתחום גלי המיקרו וגלי הרדיו, היא קרינה פחות אנרגטית והיא מורגשת כקרינת חום.

כ-51% של האנרגיה המגיעה מן השמש עוברים באטמוספרה ללא הפרעה ומגיעים אל פני השטח של כדור הארץ, נבלעים בהם ומחממים את קרקע היבשות ואת מי האוקיינוסים. אנרגיה זאת מומרת לחום והיא נפלטת חזרה אל האטמוספרה ודרכה אל החלל, בצורת קרינת חום ארוכת גל (קרינה תת-אדומה, אינפרה אדומה).

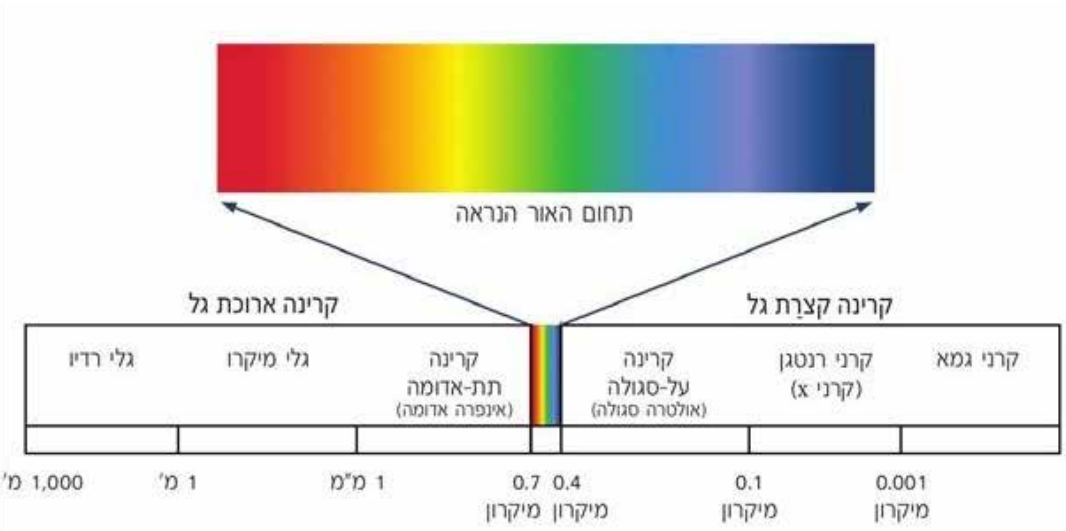
הספקטרום האלקטרומגנטי
כלל אורכי הגל של הקרינה הנפלטת מהשמש.

קרינה קצרת גל
קרינה הנמצאת בתחום אורכי גל שהם קצרים מ-0.4 מיקרון. זוהי קרינה אנרגטית ביותר, ולכן היא נחשבת למסוכנת.

תחום האור הנראה
קרינה הנמצאת בתחום אורכי הגל שבין 0.4-0.7 מיקרון והיא נראית לעין האנושית.

קרינה ארוכת גל
(קרינה תת-אדומה, אינפרה-אדומה, קרינת חום)
קרינה שאי אפשר לראותה בעין האנושית, והיא נמצאת בתחום אורכי הגל הארוכים מ-0.7 מיקרון, ועד 1 מ"מ. קרינה זאת מורגשת כחום הנפלט מעצמים שונים בהתאם לטמפרטורה שלהם, אולם האנרגיה הכוללת שלה נמוכה.

איור 3. הספקטרום האלקטרומגנטי

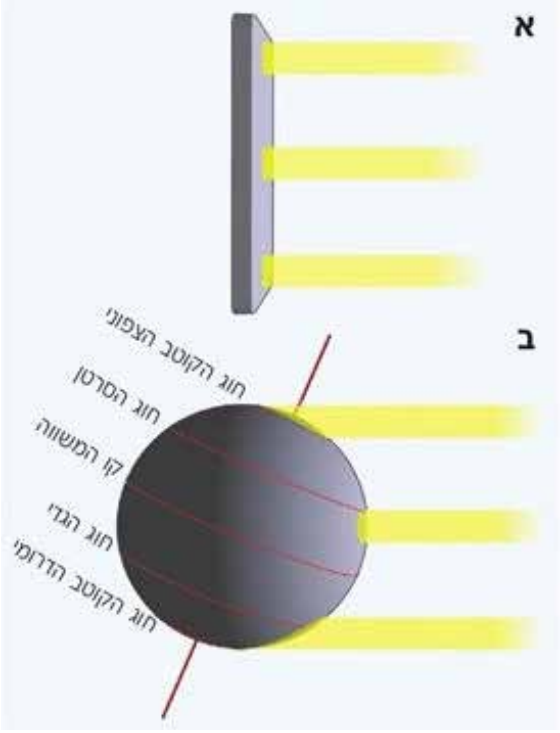


מיקרון = מיליונית המ"מ.
ככל שאורך הגל של הקרינה קצר יותר, כך יש לקרינה אנרגיה רבה יותר. לקרינת הרנטגן (קרינת X) לדוגמא, שהיא בעלת אורך גל קצר, יש אנרגיה גבוהה ביותר.

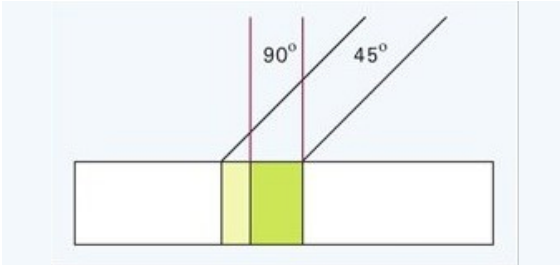
זנית
מצב שבו קרינת השמש נמצאת בזווית ישרה אל פני הקרקע.

קרינת השמש מושפעת מן המבנה הכדורי של כדור הארץ - כדור הארץ הוא כמעט עגול (הוא פחוס מעט בקטבים: היקפו סביב קו המשווה הוא 40,077 ק"מ, ובאזורי הקטבים, מקוטב אל קוטב, בקווי האורך צפון-דרום - 40,009 ק"מ). אילו לא היה כדור הארץ כדור, אלא משטח ישר, זווית הפגיעה של קרני השמש בקרקע הייתה זהה בכל נקודה ונקודה (איור 4א). אבל כדור הארץ הוא כדורי, לכן באזור קו המשווה קרני השמש פוגעות בפני הקרקע של כדור הארץ בזווית גדולה יותר, קרובה ל-90° ואילו באזורי הקטבים קרני השמש פוגעות בפני הקרקע בזווית קטנה (חדה) יותר (איור 4ב). כלומר, סך כל **שטף האנרגיה** (כמות האנרגיה ליחידת זמן ושטח) המגיע מהשמש לפני כדור הארץ משתנה בין קווי הרוחב: כאשר קרני השמש פוגעות בפני הקרקע בזווית של 90° (**זנית**) כמות מסוימת של אנרגיה מגיעה ליחידת שטח בגודל מסוים. לעומת זאת, כאשר זווית הפגיעה קטנה יותר (למשל 45°), אותה כמות אנרגיה מתפזרת על פני שטח גדול יותר, והתוצאה היא שכמות האנרגיה שמגיעה לכל יחידת שטח פוחתת (איור 5).

כלומר, ככל שזווית הפגיעה של קרני השמש בפני השטח של כדור הארץ גדולה יותר, כן דרכן של הקרניים באטמוספרה קצרה יותר, וחלק גדול יותר מהן מגיע ללא הפרעה לפני השטח ומחמם אותם. ועוד: ככל שהדרך שהקרינה עוברת היא



איור 4
הזווית בין קרני השמש ובין פני כדור הארץ



איור 5
כמות האנרגיה ליחידת שטח בזווית פגיעה של 90° ושל 40°

איור 6. מאזן האנרגיה בין קו המשווה לקטבים

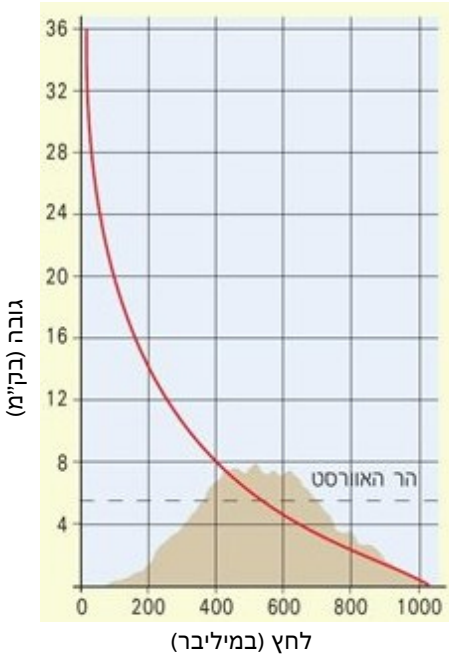
קצרה יותר, חלק קטן יותר ממנה נבלע או מתפזר (בגלל פגיעה בעננים ובאבק) בדרכו לקרקע. גם אורך היום משפיע: ככל שיש יותר שעות אור כך כמות הקרינה המגיעה לקרקע גדולה יותר.

ולכן, בקווי רוחב נמוכים הנמצאים סמוך לקו המשווה, שטף האנרגיה המגיע מהשמש הוא מקסימלי. ככל שעולים בקווי הרוחב לכיוון הקטבים, שטף האנרגיה הולך ופוחת. לעומת זאת, שטף האנרגיה הנפלט מפני כדור הארץ לאטמוספירה, הוא פחות או יותר אחיד. כתוצאה מכן יש עודף קרינה נכנסת בקווי רוחב נמוכים ועודף קרינה נפלטת בקווי רוחב גבוהים (איור 6).

ההבדלים בשטף האנרגיה המתקבלת מהשמש על פני כדור הארץ, מובילים להבדלים בלחץ האוויר וליצירת רוחות:

לחץ אוויר ורוחות

לחץ האוויר הוא משקל "עמוד" האוויר הלוחץ על יחידת שטח נתונה. בסיסו של עמוד האוויר הוא בגובה פני השטח וראשו - בפסגת האטמוספרה. ככל שעמוד האוויר גבוה יותר, הלחץ שהוא מפעיל על פני הקרקע גדול יותר (איור 7). וכך, בפסגות ההרים לחץ האוויר נמוך יותר מן הלחץ בגובה פני הים. למשל, בגובה של 1.5 ק"מ מעל פני הים - לחץ האוויר נמוך ב-15% בהשוואה לערכו בגובה פני הים, ובגובה של 5 ק"מ - הוא יורד למחצית מערכו בגובה פני הים. עם הירידה בלחץ האוויר יורדת גם צפיפות האוויר, כלומר, ככל שמגביהים האוויר נעשה דליל יותר. זאת הסיבה לכך שכאשר מטפסים על פסגות הרים גבוהות, יש להיעזר בבלוני חמצן.



איור 7

ירידת לחץ האוויר באטמוספרה עם העלייה בגובה

את לחץ האוויר מודדים באמצעות מכשיר הנקרא ברומטר, ומבטאים אותו בשתי יחידות מידה: האחת נקראת **בר** (או באלפית הבר, הנקראת מיליבר) והשנייה היא **פסקל** - 100,000 פסקל = 1 בר (100 פסקל, הנקראים גם הקטופסקל = מיליבר). לפיכך ההקטופסקל והמיליבר הן יחידות כמעט זהות. שתי היחידות משמשות במפות של חיזוי מזג האוויר. בגובה פני הים לחץ האוויר הממוצע הוא כ-1 בר (1,013 מיליבר או הקטופסקל).

ההבדלים בלחץ האוויר בגבהים שונים יכולים להסביר כמה תופעות מוכרות. למשל: כשנוסעים ממקום גבוה למקום נמוך (מירושלים לים המלח, לדוגמה), מרגישים לעתים לחץ באוזניים. תופעה זאת מתרחשת כי בראשית הנסיעה הלחץ בתוך האוזן שווה ללחץ שמחוץ לאוזן, אבל ככל שיורדים לעבר ים המלח, כלומר למקום נמוך יותר, שלחץ האוויר בו גדול יותר, הלחץ החיצוני על האוזן גדל, בעוד שהלחץ בתוך האוזן נשאר עדיין נמוך כשהיה.

על מפת לחץ האוויר

כדי לעקוב אחר הפריסה הגאוגרפית של ערכי לחץ האוויר, החזאים נעזרים במפות לחץ אוויר. במפות האלה משורטטים קווים שווי לחץ, הנקראים "איזוּבָרים". הם נקראים כך כי הם מחברים את המקומות שבהם לחץ האוויר שווה. כשמסתכלים על מפות לחץ האוויר, אפשר לראות שיש בהן אזורים שבהם לחץ האוויר גבוה לכן הם נקראים "**רמות ברומטריות**" ואזורים אחרים, שבהם לחץ האוויר נמוך לכן הם נקראים "**שקעים ברומטריים**". מערכות השקעים הברומטריים והרמות הברומטריות נמצאות בתנועה מתמדת ומשתנות ללא הרף, ותנועתן גורמת לשינויים במזג האוויר.

שקע ברומטרי ואפיק ברומטרי

שקע ברומטרי הוא, כאמור, אזור של לחץ אוויר נמוך, ו**אפיק ברומטרי** הוא שלוחה של לחץ אוויר נמוך היוצאת ממרכז השקע הברומטרי. בדרך כלל, באזורים של לחץ אוויר נמוך, האוויר נשאב ומתכנס מכל הכיוונים שסביב השקע אל מרכזו, ומשם הוא עולה למעלה ומתקרר. כאשר האוויר מכיל אדי מים, נוצרים בשקע עננים ומשקעים. באזורים שיש מעליהם שקעים ברומטריים האטמוספרה אינה יציבה, ולכן מזג האוויר משתנה תכופות ואינו יציב. במפות הסינופטיות מקובל לסמן שקע ברומטרי באות L (בעברית - ש). מסרטטים שקע ברומטרי כמערכת של מעגלים, זה בתוך זה, שבמרכזם הלחץ הנמוך ביותר (איור 8).

בר, מיליבר
בר היא יחידת המידה של לחץ האוויר. אלפית הבר היא מיליבר. בגובה פני הים לחץ האוויר הוא כ-1 בר, או ליתר דיוק - 1,013 מיליבר.

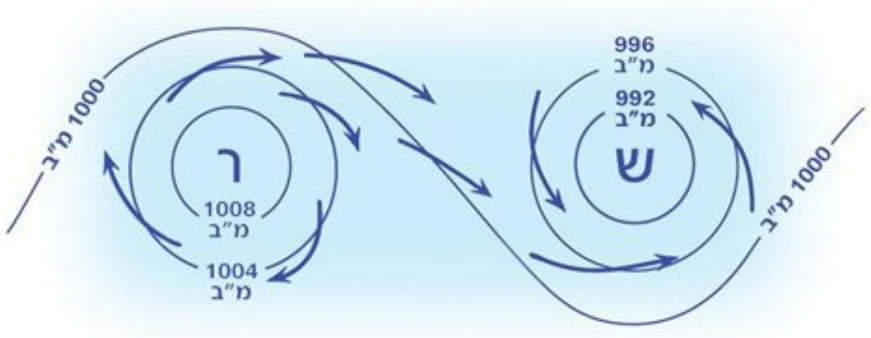
פסקל, הקטופסקל
יחידת לחץ זהה בערכה לבר ולמיליבר בהתאמה.

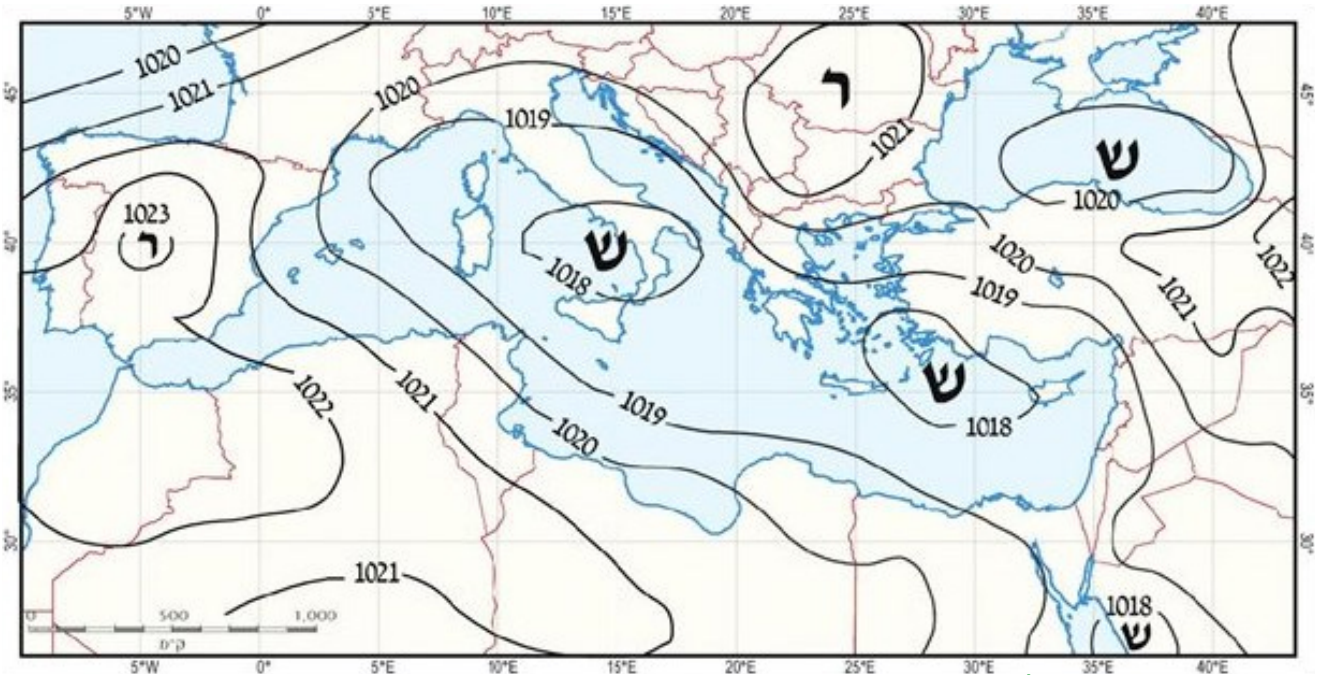
רמה ברומטרית
אזור של לחץ אוויר גבוה.

שקע ברומטרי
אזור של לחץ אוויר נמוך.

איור 8

כיוון תנועת הרוח מרמה ברומטרית אל עבר שקע ברומטרי





איור 9

מפת לחץ האוויר בגובה פני הים, מעל לים התיכון, בעונת החורף

רמה ברומטרית ורכס ברומטרי

הרמה הברומטרית היא, כאמור, אזור של לחץ אוויר גבוה. שלוחה של לחץ אוויר גבוה, היוצאת ממרכז הרמה, היא **רכס ברומטרי**. בדרך כלל באזורים של לחץ אוויר גבוה האוויר מתבדר (זורם בהדרגה החוצה) משיא הרמה, יורד כלפי מטה, שוקע באיטיות, מתכווץ, מתחמם ומתייבש ומדכא התפתחות של עננים וירידת משקעים. באזורים שיש מעליהם רמה ברומטרית, האטמוספרה יציבה ומזג האוויר כמעט אינו משתנה והוא נותר יציב - לא נוצרים עננים ולא יורדים משקעים. במפות הסינופטיות מקובל לסמן רמה ברומטרית באות H (בעברית - ר). מסרטטים רמה ברומטרית כמערכת של מעגלים, זה בתוך זה, שבמרכזם הלחץ הגבוה ביותר (איור 9).

הרוח, כיוונה ועוצמתה

האטמוספרה היא דינאמית, והאוויר זורם בה כל העת ממקום למקום. תנועת האוויר נקראת **רוח**. אפשר לומר, בהכללה, שהאוויר נע תמיד ממקום שיש בו יותר אוויר (לחץ האוויר בו גבוה יותר) למקום שיש בו פחות אוויר (לחץ האוויר בו נמוך יותר). תופעה זאת נובעת מן הנטייה של התהליכים בטבע ליצור איזון ושיווי משקל. אם כך, אפשר להגדיר רוח גם כמעבר של אוויר מאזור של רמה ברומטרית או רכס ברומטרי לאזור של שקע ברומטרי או אפיק ברומטרי.

מהירותה של הרוח משתנה, מסנטימטרים בודדים לשעה ועד מאות קילומטרים בשעה. האוויר הנע מן הרמות הברומטריות לעבר השקעים הברומטריים מושפע מן האזור על פני כדור הארץ שמעליו הוא עובר - **גוש אוויר** העובר מעל לאוקיינוס מקבל לחות, וגוש אוויר (נפח של אוויר השונה בתכונותיו מהאוויר בסביבתו, לדוגמה בטמפרטורה שלו או בתכולת הלחות שלו) העובר מעל ליבשה מתחמם ומתייבש. כאשר גוש אוויר עובר לאזור אחר על פני כדור הארץ, הוא משפיע

רכס ברומטרי
שלוחה של לחץ אוויר גבוה.

גוש אוויר
נפח של אוויר השונה בתכונותיו מהאוויר בסביבתו, לדוגמה בטמפרטורה שלו, או בתכולת הלחות שלו.

בתכונותיו על האזור הזה, ולכן רוח הבאה מאזור מדברי תביא אתה יובש ואבק, ורוח הבאה מן הים תביא אתה לחות. בשל כך מקובל להגדיר את כיוון הרוח ככיוון שממנו היא נושבת. כלומר, רוח דרום-מערבית נושבת מכיוון דרום-מערב, ורוח צפון-מזרחית נושבת מצפון-מזרח.

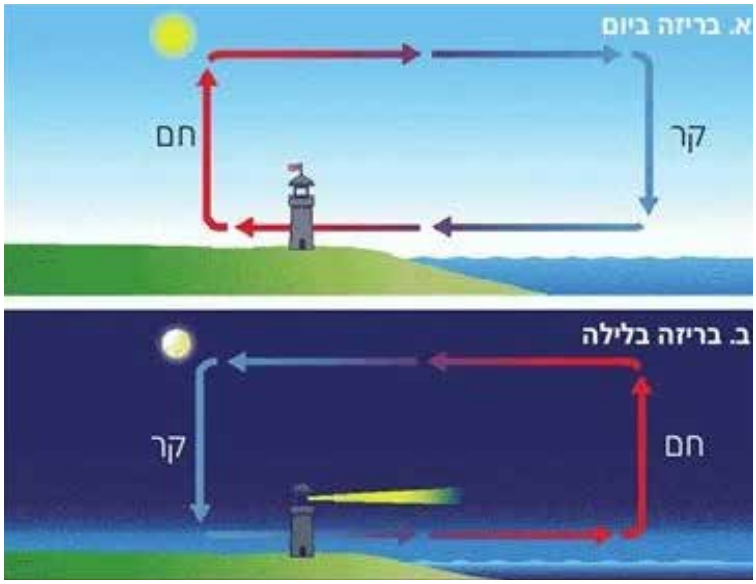
עוצמת הרוח מושפעת מכמה גורמים:

- **ההפרש בלחץ האוויר בין הרמה הברומטרית לשקע הברומטרי ביחס למרחק ביניהם** - ככל שההפרש הזה גדול יותר, הרוחות באזור שמעליו מתרחש המעבר מן הרמה הברומטרית לעבר השקע הברומטרי תהיינה חזקות יותר. עוצמת הרוח מושפעת גם מן המרחק בין השקע לרמה - הפרש לחצים גדול על פני מרחק קצר יגרום לנשיבת רוחות חזקות, בעוד שהפרש זהה על פני מרחק גדול יגרום לרוחות חלשות.
- **האופי של פני השטח ועוצמת החיכוך המופעל על האוויר הזורם על פני השטח** - פני השטח שהרוח נושבת מעליהם מאטים את זרימתה. משטחים מחוספסים, למשל משטחים בנויים באזורים עירוניים, גורמים לרוח להתערבל, ומאטים את נשיבתה; ואילו משטחים חלקים, למשל פני הים, מאטים פחות את משב הרוח.
- **גובה מעל לפני השטח** - ככל שעולים בגובה ומתרחקים מפני השטח, עוצמת החיכוך פוחתת ועוצמת הרוח מתחזקת. זוהי הסיבה לכך שבדרך כלל הרוח בהרים חזקה יותר מבמישור. לכן מקימים את טורבינות הרוח ליצירת אנרגיה בגובה של כמה עשרות מטרים מעל פני השטח.

כיוון הרוח מושפע ממערכת לחצי האוויר, וגם מסיבוב כדור הארץ סביב צירו. האוויר אינו נושב בקו ישר מהלחץ הגבוה אל הלחץ הנמוך אלא במסלול קשתי - סיבוב כדור הארץ סביב צירו מסיט את כיוון זרימת האוויר בגלל כוח קוריוליס. בגלל כוח זה הרוחות מוסטות ונעות במקביל לאיזוברים: בחצי הכדור הצפוני הרוחות בשקע ברומטרי זורמות נגד כיוון השעון וברמה ברומטרית - עם כיוון השעון, וההיפך בחצי הכדור הדרומי. כדי להבין את התופעה של הסטת המסלול של משב הרוח, דמו את מסלול הטיסה של מטוס הממריא מתל אביב למוסקבה, שתי ערים היושבות כמעט על אותו קו אורך. למתבונן על המפה מסלול הטיסה נראה כקו ישר שכיוונו צפון. אבל מכיוון שבזמן הטיסה כדור הארץ ממשיך להסתובב, מסלולו בפועל של המטוס הוא קשתי. כך קורה גם עם הרוחות: בגלל סיבוב כדור הארץ הן נושבות מרמה ברומטרית לשקע ברומטרי במסלולים קשתיים. כדאי לדעת שהשפעתו של כוח קוריוליס היא הגדולה ביותר בקטבים ואינה קיימת בקו המשווה.

כוח קוריוליס

כוח הגורם לגופים הנעים בחצי הכדור הצפוני לסטות ימינה, ואילו בחצי הכדור הדרומי - לסטות שמאלה, בגלל סיבוב כדור הארץ סביב צירו. כוח זה, הקרוי על שמו של מתמטיקאי ופיזיקאי צרפתי שפעל בתחילת המאה ה-19, נקרא גם "אפקט קוריוליס" (מפני שהוא אינו כוח אמיתי).



איור 10

מערך הרוחות הקבועות באזור החוף

רוחות נושבות כתוצאה מהפרשי לחצים מקומיים ועולמיים. מבין הרוחות המקומיות, **נתמקד ברוח המאפיינת את אזורי החוף**:

בריזה

בריזה היא רוח המאפיינת אזורי חוף, בעלת מחזוריות קבועה מדי יממה. כזו היא רוח הבריזה הימית - רוח חופים הנושבת בשעות היום מן הים אל היבשה, ובלילה בכיוון ההפוך - מן היבשה לעבר הים (איור 10). מחזור הפעילות של הבריזה מושפע מן ההבדל בקיבול החום בין היבשה לים - היבשה מתחממת מהר ומתקררת מהר, ואילו הים מתחמם לאט ומתקרר לאט. הבדלי הטמפרטורה בין הים ובין היבשה גורמים להבדלים בלחץ האוויר על פניהם, והם אלה שמניעים את הרוח.

הבריזה ביום - במשך היום האוויר שמעל ליבשה החמה מתחמם, מתפשט, ועולה כלפי מעלה, ומתחתיו נוצר לחץ נמוך. באותה עת מעל לים, שהוא עדיין קריר, האוויר יורד, ולחץ האוויר על פניו גובר. ההבדלים האלה גורמים לאוויר קריר לנשוב מן הים לעבר היבשה. בריזת היום מתחילה בשעה 9:00 בבוקר בערך. במהלך היום הבריזה מתעצמת, והיא מגיעה לשיאה בשעות אחר הצהריים המוקדמות.

הבריזה בלילה - בערב, לאחר שקיעת השמש, המצב מתהפך - היבשה מתקררת במהירות, ונוצר מעליה לחץ אוויר שהוא גבוה מלחץ האוויר מעל לים, המתקרר באיטיות. אז מתחילה זרימת אוויר מן היבשה לכיוון הים.

תבנית הזרימה הגלובאלית

ההבדלים בעוצמה של קרינת השמש המגיעה לאזורים שונים על פני כדור הארץ גורמים לחוסר איזון בסיסי בחלוקת האנרגיה על פני השטח - כאמור, לאזור קו המשווה מגיעה קרינה בעוצמה גבוהה, ולקטבים מגיעה קרינה בעוצמה נמוכה יותר ובשל כך, קיים במשך השנה עודף באנרגיה באזור קו המשווה, בעוד שבקטבים נוצר גירעון באנרגיה. קרינת השמש הנקלטת באזור קו המשווה בעוצמה רבה

במשך כל השנה הופכת לקרינת חום המחממת את האוויר הסמוך לפני הקרקע וגורמת לעליית אוויר חם ולח. התנועה האנכית של האוויר החם כלפי מעלה יוצרת לחץ אוויר נמוך, שהאוויר סביבו מתכנס לתוכו ומתרומם בגושי אוויר גדולים. האוויר החם נע בגובה מקו המשווה צפונה ודרומה לעבר קווי הרוחב הגבוהים. שינויים שחלים במהלך זרימתו של האוויר גורמים להיווצרות מערכת עולמית של זרימת רוחות ושל זרמים באוקיינוסים, מערכת היוצרת מבנה כמעט סימטרי של תאי זרימה משני צדיו של קו המשווה. למערכת הזאת יש חשיבות רבה בקביעת אזורי האקלים הראשיים על פני כדור הארץ.

תאי זרימת האוויר במערכת העולמית

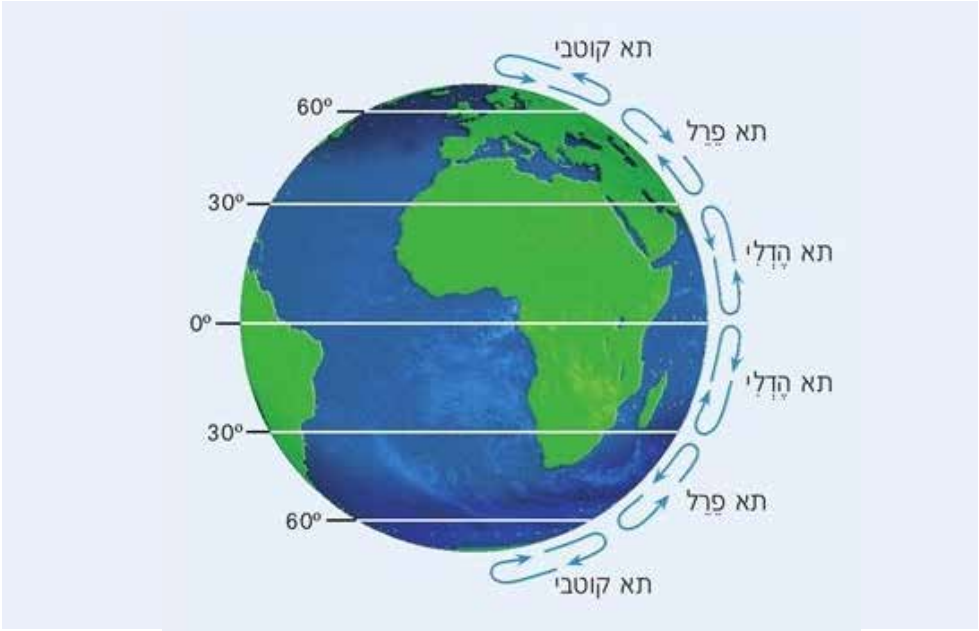
מטאורולוגים הציעו דגמים שונים לתיאור מערכת הזרימה העולמית ולהיווצרותם של אזורי האקלים השונים. כיום מקובלת החלוקה שהציע ויליאם פרל, מטאורולוג אמריקני. פרל סרטט בשנת 1855 דגם הכולל שלושה תאים של זרימת אוויר באטמוספרה - תא הדלי, תא פרל ותא קוטבי - בכל אחד משני חצאיו של כדור הארץ (איור 11). האוויר בתאי הזרימה האטמוספריים האלה זורם בכיוון אחד סמוך לפני השטח, ובכיוון ההפוך הוא זורם בגובה רב.

תאי הזרימה האטמוספריים הם תאי ערבול - תאי **קונבקציה**, שבהם האוויר עולה כלפי מעלה, מתקרר, שוקע אל פני השטח, מתחמם שנית, עולה - וחוזר חלילה.

קונבקציה
הסעה אנכית של חום על ידי תנועה של חומר - מוצק, נוזל או גז. באטמוספרה מתרחשת תנועה אנכית של אוויר, ובמעמקי כדור הארץ מתרחשת עלייה של מגמה.

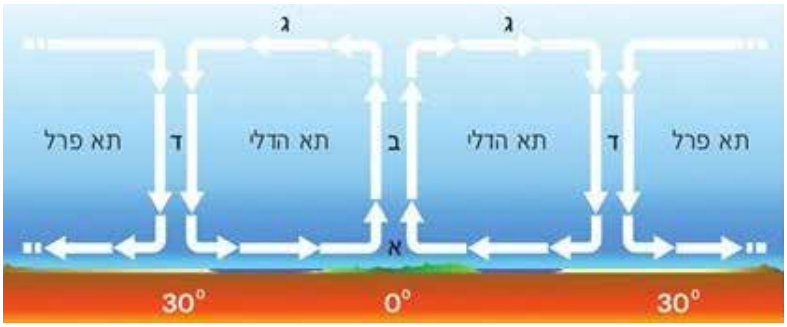
תאי הדלי

זוג התאים הראשון, הסמוך לקו המשווה, האחד מצפון לו והאחר מדרום לו, נקראים תאי הדלי (איור 12) על שמו של המדען הבריטי ג'ורג' הדלי, שהניח את דבר קיומם כבר בשנת 1735. בתאי הזרימה האלה האוויר החם והלח באזור קו המשווה מתרומם, והתנועה האנכית שלו כלפי מעלה יוצרת שקעים ברומטריים



איור 11

זרימת אוויר במערכת העולמית לפי הדגם של פרל



איור 12

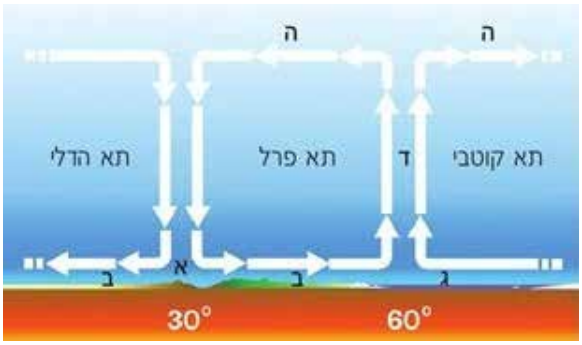
תא הדלי משני צידיו של קו המשווה

ולחץ אוויר נמוך **(א)**, הנקראים "שקעים טרופיים" ("שקעים משווניים"). האוויר מתכנס אל אזור הלחץ הנמוך, מתחמם ועולה **(ב)**. האוויר העולה מתקרר, ובהגיעו לרום הוא פונה לעבר קטבים בשני חצאי הכדור, הצפוני והדרומי **(ג)**. בדרכו דרומה או צפונה, האוויר שוקע ויורד חזרה אל פני השטח בקו הרוחב 30° **(ד)**.

בהגיעו אל פני השטח, האוויר מתחמם שוב, מתייבש, ויוצר בין קווי הרוחב הבינוניים אזור של לחץ אוויר גבוה, הנקרא "הרמה הסובטרופית". רמה זאת יוצרת את רצועת המדבריות העולמית שבין קווי רוחב 20°-30°.

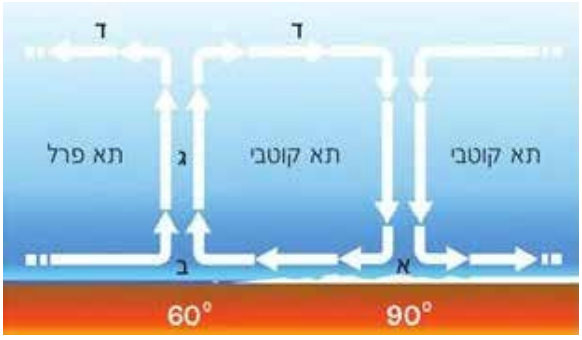
תאי פרל

זוג התאים השני משתרע בין קווי הרוחב 30°-60° בערך בחצי הצפוני ובחצי הדרומי של כדור הארץ (איור 13). תאים אלה נקראים על שמו של המטאורולוג ויליאם פרל - תאי פרל. בתא פרל, האוויר ששקע והתייבש מגיע אל פני כדור הארץ בקו הרוחב 30° **(א)** ומשם הוא זורם סמוך לפני הקרקע - חלקו זורם חזרה לקו המשווה (כחלק מתא הדלי) וחלקו זורם לכיוון קו הרוחב 60° **(ב)**. האוויר הזורם לכיוון קו הרוחב 60° פוגש בדרכו אוויר קר וכבד, הזורם מאזורי הקטבים סמוך לפני הקרקע **(ג)**. בגלל ההתנגשות בין האוויר החם ובין האוויר הקר נוצרות חזיתות חמות וקרות וחלה התרוממות של האוויר. התרוממות האוויר גורמת לירידת לחץ האוויר סמוך לקרקע, ונוצרים שקעים ברומטריים חזיתיים. האוויר שעולה מתקרר שוב ככל שהוא מתרחק מפני הקרקע **(ד)**. גושי האוויר שעלו והתקררו מתפצלים - חלקם זורמים בגובה חזרה לכיוון קו הרוחב 30° וחלקם זורמים בגובה לכיוון הקטבים **(ה)**.



איור 13

תא פרל, בין תא הדלי והתא הקוטבי. מערך זהה קיים בשני חצאי כדור הארץ



איור 14

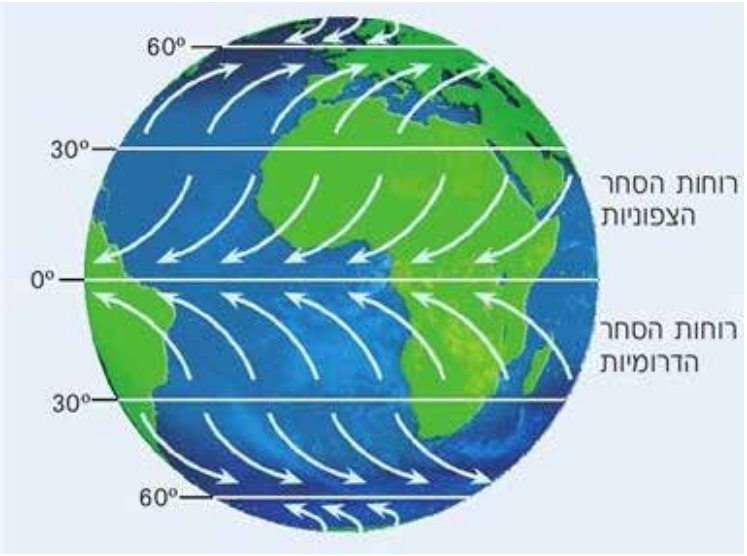
תא קוטבי

התאים הקוטביים

הזוג השלישי של תאי זרימה אטמוספריים הוא התאים הקוטביים. זוג התאים הזה משתרע בין קווי הרוחב °60-°90 בחצי הצפוני ובחצי הדרומי של כדור הארץ (איור 14). האוויר בקטבים, באזור קו הרוחב °90, הוא קר, כבד וצפוף, ולכן לחץ האוויר בפני הקרקע הוא גבוה **(א)**. משום כך נוצרת באזור הקטבים רמה ברומטרית סמוך לפני הקרקע. מהקטבים האוויר זורם סמוך לפני הקרקע לכיוון קו הרוחב °60, שם הוא נתקל באוויר קר פחות **(ב)**, המגיע מכיוון קו הרוחב °30 (תא פרל). המפגש הזה גורם להתרוממות האוויר ולהתקררותו **(ג)**. חלק מן האוויר שהתקרר זורם בגובה רב לעבר הקוטב בתא הקוטבי **(ד)** וחלק ממנו זורם לעבר קו הרוחב °30, בתא פרל.

מערכת הרוחות העולמית

תנועת האוויר בתאי הזרימה וסיבוב כדור הארץ סביב עצמו יוצרים מערכת רוחות קבועה למדי. רוחות אלה היו צריכות לזרום בכיוון צפון-דרום, בהתאם לתאי הזרימה השונים, אך כיוונן מוסט בהשפעת תנועת הסיבוב של כדור הארץ סביב עצמו (בגלל כוח קוריוליס) (איור 15). באזור קו המשווה נושבות רוחות אופקיות מזרחיות (ממזרח למערב) חלשות יחסית. בין קווי הרוחב °10-°30 הרוחות נושבות מכיוון צפון-מזרח בחצי הכדור הצפוני ומכיוון דרום-מזרח בחצי הכדור הדרומי.



איור 15

מערכת הרוחות העולמית

כך נוצרת משני עברי קו המשווה חגורה קבועה של רוחות צפון-מזרחיות או דרום-מזרחיות, בהתאמה, משני צדיו של קו המשווה. הרוחות האלה מכונות "רוחות הסחר". בעידן ספינות המפרש, הספנים ידעו לנצל את הרוחות האלה ככוח מניע לספינותיהם בהפלגות המסחריות הארוכות. הודות לעוצמתן וליציבותן, רוחות הסחר מאפשרות לחצות את האוקיינוסים הגדולים בספינות מפרש במשך שבועות מעטים. בין קווי הרוחב °30-°60 נושבות "הרוחות המערביות". רוחות אלה מוסטות אף הן בגלל כוח קוריוליס, ולכן הן דרום-מערביות בחצי הכדור הצפוני וצפון-מערביות בחצי הכדור הדרומי. בין קווי הרוחב °60 לאזורי הקטבים נושבות רוחות מזרחיות עזות.

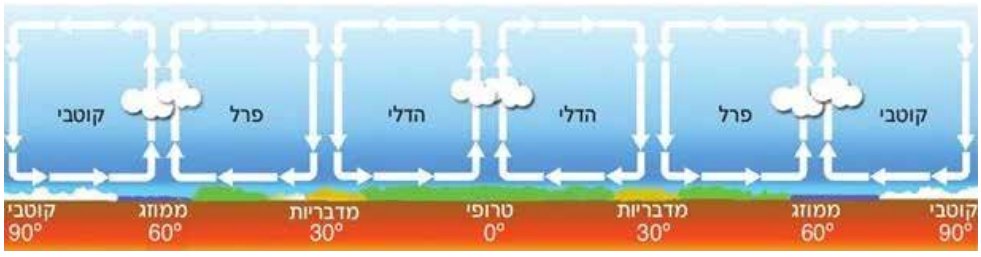
ההבדלים האלה בכמויות הקרינה הנקלטות באזורים שונים על פני כדור הארץ, ביחד עם זרימת הרוחות הגלובאלית, מסבירים את קיומם של סוגי אקלים שונים, למשל אקלים טרופי חם וגשום באזור קו המשווה ואקלים קר ויבש באזור הקטבים (איור 16).

האקלים המשווני (הטרופי)

האקלים המשווני שורר באזור המשתרע מקו המשווה עד לקו הרוחב °20 משני צידי קו המשווה. כאמור, בגלל הקרינה החזקה של השמש, האוויר באזור הזה מתחמם ועולה מעלה. באקלים המשווני אין כמעט הבדל בין עונות השנה, ולכל אורך השנה הטמפרטורות גבוהות, הלחות גבוהה וכמויות הגשמים גדולות. המאפיינים האלה משמשים סביבת מחיה פורייה לצמחייה עשירה של יערות גשם ירוקי-עד ולמגוון עשיר מאוד של בעלי חיים. באזורים המשווניים קיימים תנאים להתפתחות סופות טרופיות חזקות.

האקלים המדברי

האוויר העולה מן האזור המשווני נישא לגובה של כמה קילומטרים, ולאחר שהוא מתקרר הוא יורד אל פני השטח בסביבות קו הרוחב °30. התייבשות האוויר באזור שבין קווי הרוחב °20-°30, בשני חצאיו של כדור הארץ, יוצרת שם אזור של מדבריות גדולים, המכונה "חגורת המדבריות", לדוגמה, מדבר סהרה, המשתרע באזור קו הרוחב °30 צפון, ומדבר קלהרי, המשתרע באזור קו רוחב °30 דרום. האקלים המדברי מוגדר על פי כמות המשקעים - פחות מ-200 מ"מ בממוצע בשנה והוא מתאפיין בטמפרטורות גבוהות בממוצע, אך גם במשרע (הפרש) גדול בין הטמפרטורות הגבוהות ביום לבין הטמפרטורות הנמוכות בלילה. האוויר באקלים המדברי הוא יבש ונקי מעננים.



איור 16

הקשר בין תאי הזרימה האטמוספריים לבין אזורי האקלים

האקלים הממוזג

אזור האקלים הממוזג משתרע מצפון ומדרום לחגורת המדבריות ולאזורי האקלים הסובטרופי, בין קווי הרוחב °40-°60 בממוצע. אזור אקלימי זה נמצא תחת השפעתו של תא פרל. באזור האקלים הממוזג האוויר החם המגיע מקו המשווה (תא הדלי) נתקל באוויר הקר המגיע מכיוון הקטבים (תא קוטבי). הרוחות הנושבות באזורים האלה גורמות לגושי האוויר להתערבל זה עם זה. כך נוצרות מערכות של רמות ושקעים המהוות חלק חשוב מהמנגנון האטמוספרי לעירוב של גושי אוויר חמים מאזור קו המשווה עם גושי אוויר קרים מאזורי הקטבים. גושי האוויר מסתחררים לתוך שקעים ברומטריים וממלאים אותם, וכך הם מאזנים את הבדלי הטמפרטורה והלחץ. קווי המפגש של גושי האוויר האלה, הנקראים "חזיתות", יוצרים עננים ותופעות מזג אוויר אופייניות. האקלים באזורים האלה מאופיין בארבע עונות שנה מובחנות, המשתנות מחורף קר ומושלג לקיץ חם וגשום וביניהם עונות מעבר - סתיו ואביב. באזורים האלה מזג האוויר יכול להשתנות באופן קיצוני מיום ליום, בהתאם לתנועתן של מערכות הלחץ והיווצרות החזיתות. נוהגים לחלק את אזור האקלים הממוזג לשני סוגי משנה: אקלים ממוזג ימי, המתאפיין בטמפרטורות מתונות לאורך כל השנה, בהשפעת האוקיינוסים. אקלים ממוזג יבשתי, המתאפיין בחורפים קרים ובקיצים חמים.

האקלים הקוטבי

חלק מן האוויר העולה בסביבות קו הרוחב °60 עושה את דרכו צפונה או דרומה בגובה רב. האוויר הזה, שהוא קר וכבד, שוקע באזור הקטבים ומשם הוא זורם בגובה נמוך, קרוב לפני השטח, חזרה לקו הרוחב °60. באזורי הקטבים שורר לחץ אוויר גבוה, בהשפעת הרמות הברומטריות הקוטביות שמעל כיפות הקרח. האוויר הקר באזור הזה נדחס, והלחץ שלו גדל, וכתוצאה מכך נושבות בין קווי הרוחב °60-°80 רוחות קרות מאזור הקטבים לעבר קווי הרוחב ששורר בהם אקלים ממוזג. בשל סיבוב כדור הארץ, הן מוסטות והופכות למזרחיות יותר. האקלים הקוטבי הוא אקלים קר ויבש, המתאפיין בטמפרטורות נמוכות מאוד ובכמות משקעים מועטה ובאזור שבו הוא שורר משתרעים מדבריות קרח קרים וצחיחים. הוא נחלק לשני סוגי משנה: אקלים קוטבי סמוך לקטבים עצמם, בין קווי הרוחב °70-°90. אקלים טונדרה בשולי הקטבים, באזור שבין קווי הרוחב °60-°70. באוגוסט 2021 תועד לראשונה גשם על פסגת כיפת הקרח הענקית בגרינלנד, דבר שנחשב, עד לאחרונה, לכמעט בלתי אפשרי. התנאים באזורי האקלים הקוטבי הם קשים, ומשום כך הם מיושבים בדלילות רבה.

7.2 זרמי הים

טל ברמן

בפרק הקודם הוסבר כי יש עודף קרינה נכנסת בקווי רוחב נמוכים ועודף קרינה נפלטת בקווי רוחב גבוהים. עם זאת, לאורך זמן, הטמפרטורה בקווי הרוחב הנמוכים והגבוהים היא במצב עמיד (Steady State, ללא שינוי). מכיוון שאזורים הקרובים לקו המשווה (קווי הרוחב הנמוכים) אינם מתחממים לאורך זמן בשל עודף הקרינה הנכנסת ובאזורים בקווי רוחב גבוהים אין התקררות נוספת בגלל עודף הקרינה היוצאת, ניתן להסיק כי ישנה מערכת המאזנת בין עודף הקרינה הנכנסת בקווי הרוחב הנמוכים ועודף הקרינה היוצאת בקווי רוחב גבוהים (איור 17). מערכת זו, המאזנת בין עודף הקרינה הנכנסת באזור קו המשווה לעודף הקרינה היוצאת בקווי רוחב גבוהים, היא מערכת הרוחות והזרמים הגלובליים המסיעה חום מקו המשווה לקטבים ולהפך.

פיקנוקלינה
הגבול המפריד בין שתי שכבות נוזל בעלות צפיפות שונה. באוקיינוסים יש הפרש גדול בצפיפות מי השטח (או 100 המטרים העליונים) לבין מי האוקיינוס העמוקים, היוצר שיכוב ומונע זרמים אנכיים.

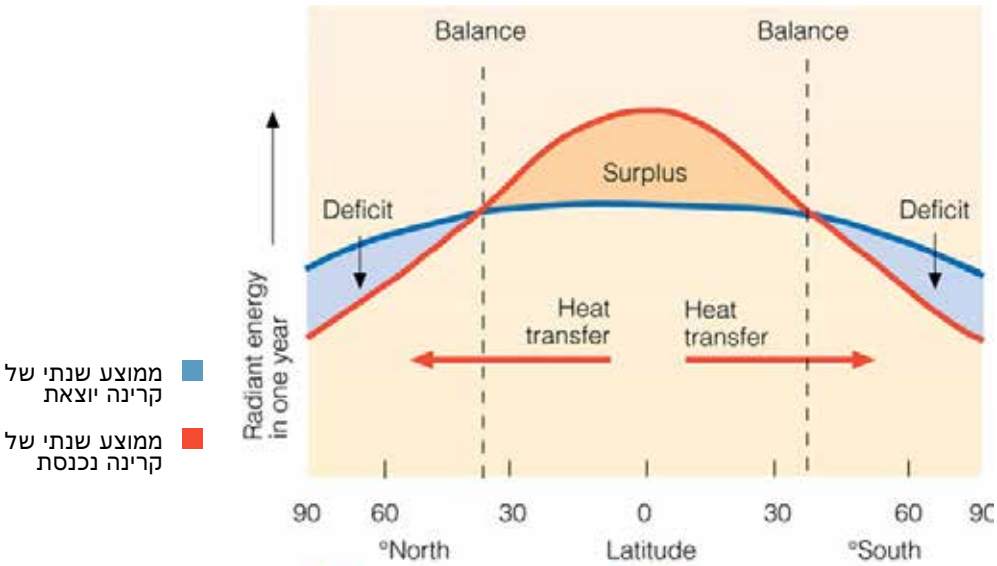
זרמי הים

זרמי הים, מסווגים לשני סוגים, על פי הכוח המניע אותם:

1. **זרמי פני שטח** שהגורם המניע אותם הוא רוח.
את זרמים אלו ניתן לזהות מפני השטח (פני הים) ועד לעומק מקסימלי של כ-150-300 מאות מטר - עומק מקסימלי של ה**פיקנוקלינה** (**Pycnocline**) הקבועה באוקיאנוסים, ועומק מקסימלי של השפעת הרוח. עומק זה הוא כעשירית מהעומק הממוצע של האוקיאנוסים.

2. **זרמי עומק** שהגורם המניע אותם הוא הפרש בצפיפות המים. צפיפות המים נקבעת על ידי הטמפרטורה (תרמו - Termo) והמליחות (Haline - מלח בלטינית). ולכן תהליך זה מכונה מחזור תרמוהלין (Thermohaline Circulation).

איור 17. כמות הקרינה הנכנסת/יוצאת מפני כדה"א כפונקציה של קווי הרוחב
(PennState Collge of Earth and Mineral Sciences, Department of GeoSciences)



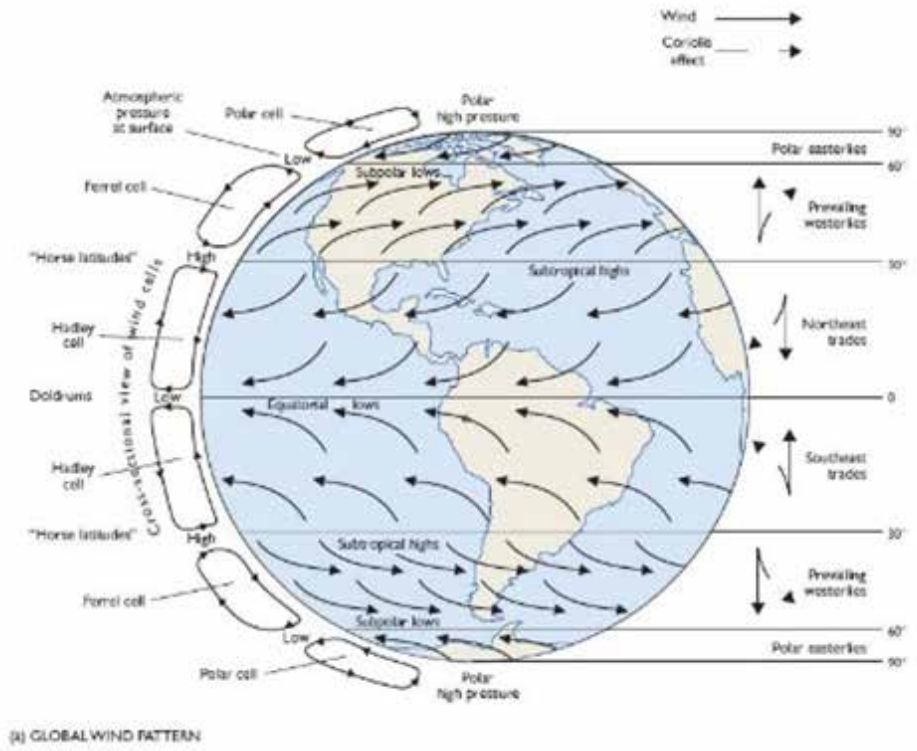
1. זרמי פני שטח

בפרק הקודם למדנו על משטר הרוחות הגלובלי ועל משטר הרוחות בפני השטח. משטר הרוחות מונע כתוצאה מהפרשי החום בין קווי רוחב נמוכים לבין קווי רוחב גבוהים ובהשפעת סיבוב כדור הארץ (כוח קוריוליס). בקווי הרוחב הנמוכים, באזור קו המשווה הרוחות נושבות מכיוון צפון מזרח בהמיספרה הצפונית, ורוחות המנשבות מכיוון דרום מזרח בהמיספרה הדרומית (איור 18). אלו הן **רוחות המסחר (Trade Winds)**. במשך מאות בשנים חצו ספינות מפרש את האוקיאנוס האטלנטי והפסיפסי ממזרח למערב בעזרת רוחות אלו. כך נוצרו קשרי מסחר מבוססים בין אירופה לבין המושבות שהיו בשליטת מדינות אירופאיות שונות. בקווי הרוחב הבינונים, בהמיספרה הצפונית וגם בהמיספרה הדרומית הרוחות הנושבות הן **רוחות מערביות (Westerlies)**.

החיכוך שבין הרוח הנושבת לבין פני הים, גורם להעברת **אנרגיה (קינטית)** מהאטמוספרה לים ולהסעת מים - זרם בפני השטח. רוחות המסחר הצפון מזרחיות והדרום מזרחיות משני צידי קו המשווה מניעות ומסיעות את זרמי הים בפני השטח לכיוון מערב. לכן הם מכונים זרמים מערביים (זרמים בשונה מרוח, נקראים על פי הכיוון אליו הם זורמים). בכל האוקיאנוסים, האטלנטי, השקט וההודי, נקראים זרמים אלו **הזרמים הצפון** משוונים (North Equatorial Current) **והזרמים הדרום משוונים** (South Equatorial Current) (איור 19).

אנרגיה קינטית

היא אנרגיה שיש לגוף בזכות התנועה שלו. האנרגיה הקינטית, הקרויה גם אנרגיית תנועה, תלויה במסה של הגוף ובמהירות שלו. משום שהמהירות של הגוף משתנה, גם האנרגיה הקינטית שלו משתנה.



איור 18

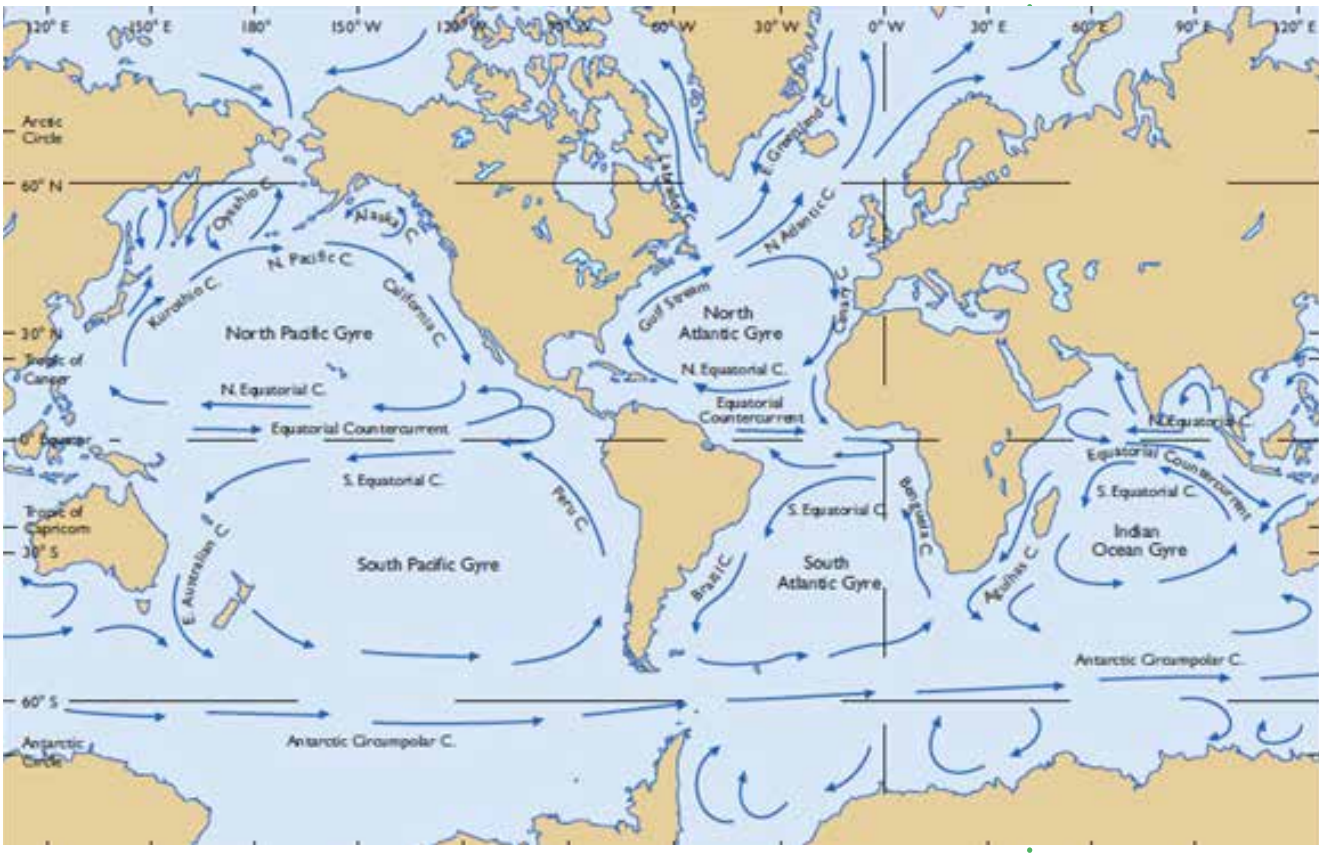
הרוחות הגלובליות בפני השטח מניעות את זרמי פני השטח

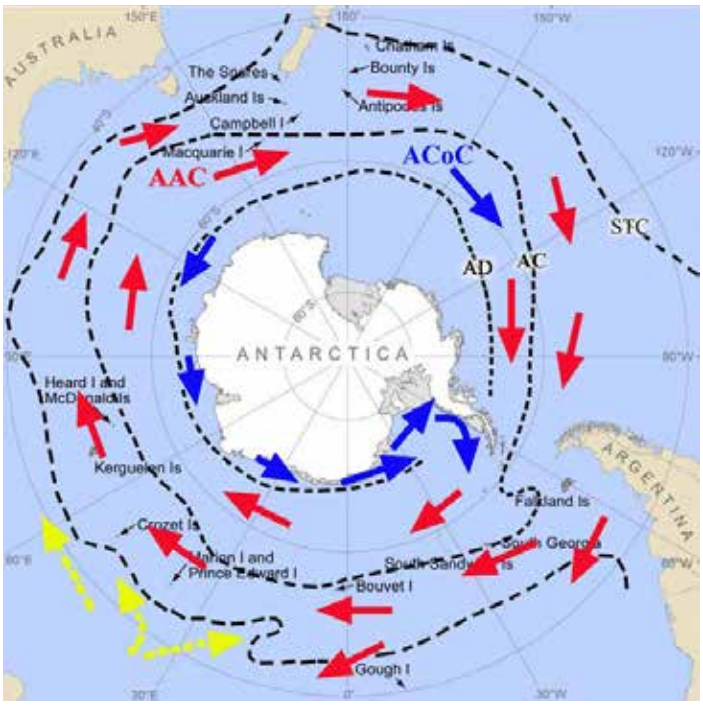
Paul R. Pinet;)
Invitation to
(Oceanography

כשהזרמים המשוונים מגיעים לשולי האוקיאנוסים ופוגשים את היבשות, הם מוסטים צפונה ודרומה (איור 19): הזרמים המשוונים, הנעים לכיוון מערב, סוטים צפונה בחצי כדור הארץ הצפוני - **זרם הגולף** (Gulf Stream) לאורך חופי צפון מזרח ארה"ב וקנדה ו**זרם קורושיו** (Kuroshio Current) לאורך חופי יפן. בחצי כדור הארץ הדרומי, סוטים הזרמים המשוונים דרומה - **זרם ברזיל** (Brazil Current) במקביל לחופי ברזיל ודרום אמריקה, **זרם מזרח אוסטרליה** (East Australian Current) לאורך מזרח אוסטרליה, ו**זרם מוזמביק** (Mozambique Current) ו**זרם אגולס** (Agulhas Current) בדרום האוקיאנוס ההודי. זרמים אלו מסיעים איתם מים חמים מקווי רוחב נמוכים לקווי רוחב גבוהים, ובכך מאזנים את עודף הקרינה הנכנסת בקווי רוחב נמוכים.

הרוחות המערביות בקווי רוחב בינונים בחצי כדור הארץ הצפוני והדרומי גורמות, בהתאמה, להסעת המים ולזרימה מזרחית, ממערב האוקיאנוסים לצידם המזרחי (איור 19). בהמיספרה הצפונית ניתן להבחין בסחף הצפון אטלנטי (North Atlantic Drift) ו**זרם הצפון פסיפסי** (North Pacific Current). בהמיספרה הדרומית נוכל לזהות את **הזרם הדרום אטלנטי** (South Atlantic Current) **הזרם הדרום פסיפי** (South Pacific Currents) ו**זרם ההודי הדרומי** (South Indian Currents). כשזרמים אלו מגיעים לשולי האוקיאנוסים, הם פוגשים את היבשות ומוסטים דרומה בהמיספרה הצפונית: כך למשל **הזרם הקנרי** (Canary Current) נע לאורך דרום אירופה וצפון אפריקה באוקיינוס האטלנטי ו**זרם קליפורניה** (California Current) נע לאורך חופי צפון אמריקה בצפון-מזרח האוקיינוס השקט.

איור 19
מפת הזרמים בפני השטח
Paul R. Pinet;)
Invitation to
(Oceanography





איור 20

זרם סובב אנטרקטיקה (ACC) וזרם האנטרקטי החופי (ACoC) (Nelson Eby)

בהמיספרה הדרומית, זרמי הים מוסטים צפונה: כך למשל **זרם בנגולה** (Benguela Current) נע לאורך חופי אפריקה המערבית בדרום האוקיאנוס האטלנטי, **זרם מערב אוסטרליה** (West Australian Current) זורם לאורך חופי אוסטרליה באוקיאנוס ההודי ו**זרם פרו** (Peru Current) נע לאורך חופי פרו והחופים המערביים של דרום אמריקה באוקיינוס השקט. זרם פרו נקרא גם **זרם הומבולדט** (Humboldt current) על שם חוקר הטבע הגרמני הנודע אלכסנדר פון הומבולדט. זרמים אלו מסיעים איתם מים קרים מקווי רוחב גבוהים לכיוון קו המשווה.

באוקיאנוס הדרומי, באזור בו אין יבשות, ניתן לראות כי הרוחות המערביות החזקות סובבות סביב כדור הארץ וכך גם בכל הנוגע לזרם המזרחי סובב אנטרקטיקה (Antarctic Circumpolar Current). הזרם ליד יבשת אנטרקטיקה, המכונה הזרם האנטרקטי החופי (Antarctic Coastal Current (ACoC הוא זרם מערבי. זרם זה מושפע מהרמה הפולרית (Polar High) הממוקמת מעל יבשת אנטרקטיקה (איור 20).

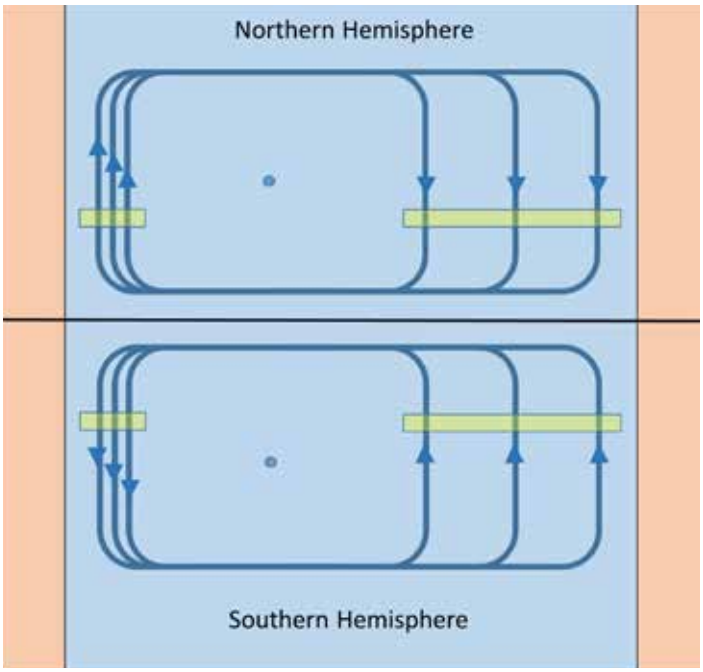
זרימות אלו, המונעת על ידי הרוח הנושבת בפני השטח האוקיאנוסים, והמשתלבות אחת בשנייה יוצרות **סביבונים אוקייניים** (זרם אוקיאני מעגלי - Gyres). ניתן לזהות חמישה סביבונים אוקייניים: שניים באוקיאנוס האטלנטי, שניים באוקיאנוס השקט וסביבון אחד באוקיאנוס ההודי (איור 19): הסביבון הצפון אטלנטי (North Atlantic Gyre), הסביבון הדרום אטלנטי (South Atlantic Gyre), הסביבון הצפון פסיפי (North Pacific Gyre), הסביבון הדרום פסיפי (Southern Pacific Gyre), והסביבון ההודי (Indian Ocean gyre). סביבונים אלו מסתובבים באוקיאנוסים - בכיוון השעון בחצי הכדור הצפוני וכנגד כיוון השעון בחצי הכדור הדרומי. הזרמים בצד המזרחי והמערבי של הסביבונים, בגבול שבין האוקיאנוס ליבשות נקראים **זרמי גבול**.

זרמי גבול מזרחים ומערבים באוקיאנוסים:

בין אם הם נמצאים בהמיספרה הצפונית או הדרומית, כל חמשת הסביבונים האוקייניים מורכבים מזרמי ים. הזרמים הנעים לאורך היבשות (הזרמים הצפונים והזרמים הדרומים), מכונים זרמי גבול (Boundary Currents). בצד המזרחי של האוקיאנוסים Eastern Boundary Currents ובצד המערבי של האוקיאנוסים Western Boundary Currents. עוצמת הזרימה של זרמי הגבול המערבים, הזורמים בצד המערבי של האוקיאנוסים (זרם הגולף, זרם ברזיל, זרם קורושיו וכו') חזקה יותר ורוחבם צר יותר מאלו של זרמי הגבול המזרחים (הזרם הקנרי, זרם קליפורניה, זרם פרו, זרם בנגולה וכו'), מסיבות שיפורטו בהמשך.

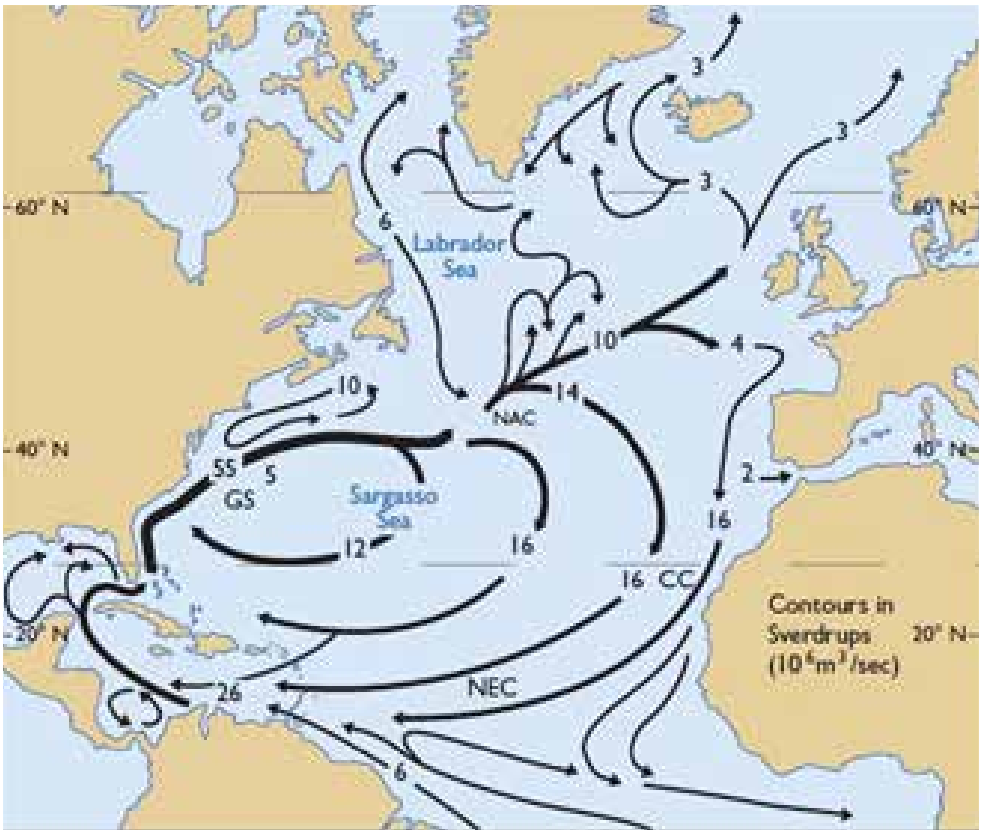
כפי שכבר הוסבר, כוח קוריוליס נובע מסיבוב כדור הארץ סביב צירו. אפקט זה גורם לכך שכל דבר הנע על פני כדור הארץ סוטה ימינה בהמיספרה הצפונית ושמאלה בחצי כדור הארץ הדרומי. עוצמתו של כוח קוריוליס גדלה ככל שמהירות האובייקט גדלה, וככל שעולים בקווי הרוחב: בקו המשווה כוח קוריוליס שווה לאפס ואילו בקטבים עוצמתו מקסימלית.

בסביבונים האוקייניים, זרמי פני השטח, הנעים לכיוון מזרח (הזרמים המזרחים) נמצאים בקווי הרוחב הבינוניים. בגלל קרבתם לקטבים, זרמים אלו חווים את כוח קוריוליס בעוצמה חזקה יותר, מאשר הזרמים המערבים באזור קו המשווה. כאשר הזרמים נעים מזרחה בקווי הרוחב הבינונים, כוח קוריוליס מתחיל להסיט את הזרמים לעבר קו המשווה במהירות ובעוצמה גבוהה. לכן, מיד עם התרחקותם ממזרח היבשות שהם נעים לאורכן (צפון מזרח אמריקה, חוף ברזיל, מזרח אפריקה, ומזרח אוסטרליה), מוסטים הזרמים המזרחים, בהשפעת אפקט קוריוליס, ונעים דרומה בהמיספרה הצפונית וצפונה בהמיספרה הדרומית, לעבר קו המשווה. הזרימה שלהם היא על שטח רחב מאוד, המשתרע כמעט לכל רוחב האוקיאנוסים, (איור 21). לעומת זאת, בקווי רוחב נמוכים, ליד קו המשווה, הזרמים המערבים חווים את כוח קוריוליס בצורה חלשה יותר בהשוואה לזרמים המזרחים ולכן, הסטתם צפונה בהמיספרה הצפונית ודרומה בהמיספרה הדרומית, לעבר קווי הרוחב הבינונים, קטנה וכמעט אינה מתרחשת (איור 21).



איור 21

תיאור סכמתי של ההתעצמות המערבית Western-Boundary Intensification (אורך הפסים הצהובים מתאר את רוחב הזרמים)
Roger Williams)
(University



איור 22

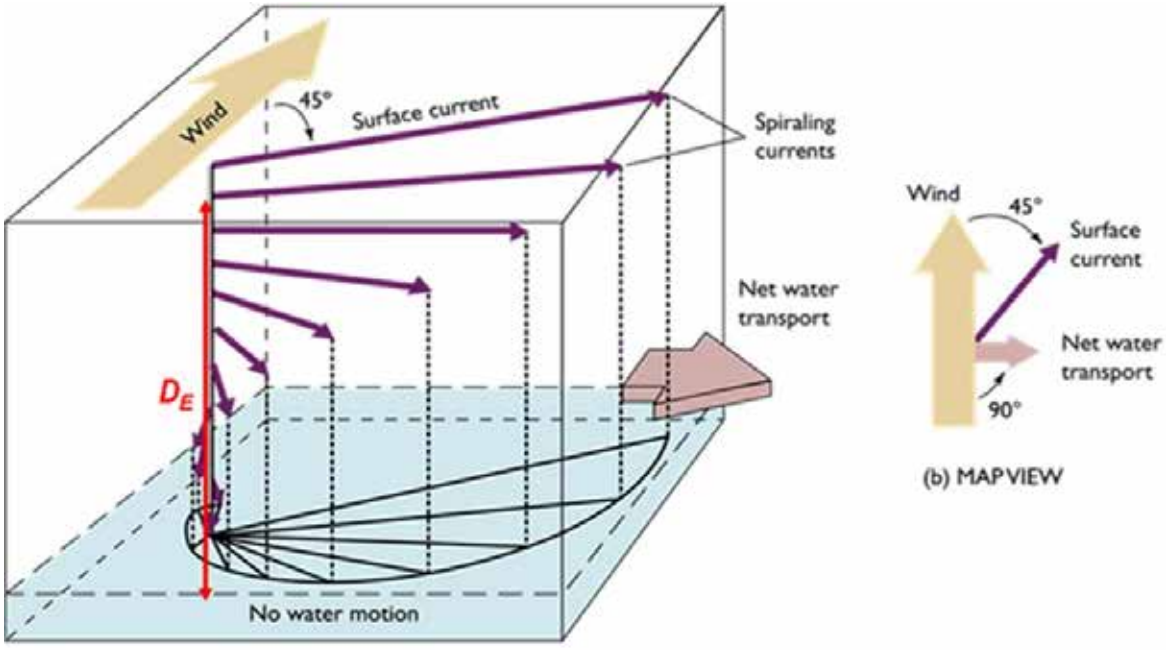
ההתעצמות המערבית של זרמים בצפון האוקינוס האטלנטי: זרם הגולף במערב האוקינוס צר חזק ועוצמתי ביחס לזרם הקנרי במזרח האוקיאנוס האטלנטי
(Paul R. Pinet; Invitation to Oceanography)

רק כשהזרם יגיע לצד המערבי של האוקיאנוס, בעקבות המפגש עם היבשות, יחלו זרמים אלו את מסעם (צפונה ודרומה) לעבר קווי הרוחב הבינונים.

מכיוון שאותו נפח מים המוסע צפונה, חייב להיות מוסע חזרה דרומה, נפח המים הזורם לכיוון קו המשווה בצד המזרחי של הסביבונים חייב להיות שווה לנפח המים המוסע לכיוון קווי הרוחב הבינונים בצד המערבי של הסביבונים. כדי שאותה כמות של מים תוכל לעבור באזור צר בהרבה, הזרמים בצד המערבי צריכים להיות עוצמתיים וחזקים יותר מהזרמים הנמצאים בצד המזרחי של האוקיאנוסים (איור 22). העצמה זו נקראת ההתעצמות המערבית (Western-Boundary Intensification). ההבדלים בעוצמות הזרימה גם גורמים לכך שמרכז הסביבונים אינו נמצא במרכז אגני האוקיאנוס, אלא קרוב יותר לצד המערבי של האוקיאנוסים. זרמי הגבול המערבי הם לא רק מהירים יותר, אלא גם עמוקים יותר מזרמי הגבול המזרחי. לדוגמה: זרם קורושיו במערב האוקיאנוס השקט, מהיר פי 15, צר פי 20 ועמוק פי 5 מזרם קליפורניה הנמצא במזרח האוקיאנוס השקט.

מתחת לפני השטח - ספירלת אקמן

בסוף המאה ה-19 הפליגה משלחת מחקר בראשות האוקינוגרף והחוקר הנורווגי המפורסם ד"ר פריטיוף ננסן (Fridtjof Nansen) לים הארקטי, על ספינת המחקר הנורווגית "Fram". מטרת המסע הייתה לחקור את האזור ולמפות את האיים השוכנים בו. במסע שנמשך שלוש שנים, הבחין ננסן בתופעה מעניינת: הקרחונים בים נעו בזווית (ימינה מכיוון הרוח) לרוח ולא ישר במורד הרוח, כפי שניתן היה לצפות. אחרי שהמשלחת חזרה לנורבגיה פרסם ננסן את הגילוי.

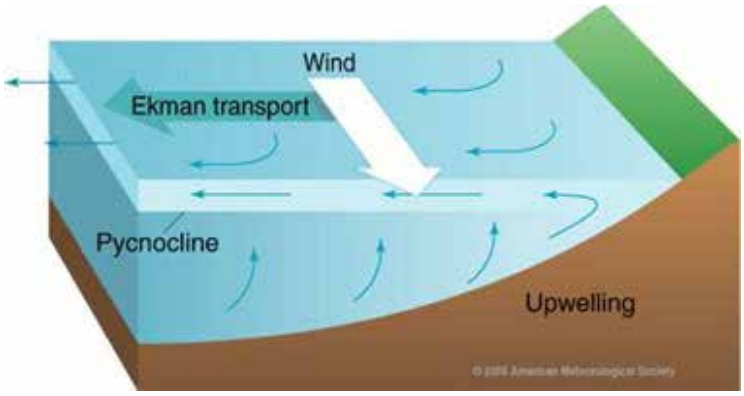


בשנת 1905 פרסם ואגן וולפריד אקמן Vagn Walfrid Ekman סטודנט, פיזיקאי ואוקיינוגרף צעיר, את השערתו לפתרון התעלומה: אקמן הבין שבהנחת מצב עמיד, כלומר כשאין שינוי בכוחות במערכת לאורך זמן, חייב להיות איזון כוחות בין כוח החיכוך (שבין הרוח לבין המים) וכוח קוריוליס שפועל בניצב לכיוון ההתקדמות של הזרימה, בשכבת פני השטח של האוקיינוס. כוח קוריוליס מסיט את תנועת המים בשכבת המים העליונה ביותר, שבאה במגע עם הרוח, בהתאם להמיספרה בה היא נמצאת: ימינה מכיוון נשיבת הרוח בהמיספרה הצפונית, ושמאלה מכיוון נשיבת הרוח בהמיספרה הדרומית. אקמן גילה שהמים נעים, בהשפעת כוח קוריוליס והחיכוך בין שכבות המים, בזווית הולכת וגדלה ובעצמה הולכת וקטנה יחסית לרוח, ככל שמעמיקים מפני המים, דבר היוצר את האפקט המכונה **"ספירלת אקמן" (Ekman spiral)** (איור 23).

ככל שמעמיקים בעמודת המים, כיוון ועוצמת הזרימה משתנים בכל שכבת מים. בהשפעת כוח החיכוך, כל שכבת מים מסיטה את השכבה מתחתיה ימינה מכיוון זרימתה (בחצי כדור הארץ הצפוני). מהירות הזרימה דועכת אקספוננציאלית עם העומק ובסיס הספירלה נמצא בעומק בו נפסקת השפעת הרוח. בפני השטח הזרימה היא בזווית של 45° לרוח, ובממוצע נעה כל שכבת המים ב-90° לרוח. זו גם התצפית שראה ננסן בהפלגה - הקרחונים נעים בתשעים מעלות לרוח. עם זאת, חשוב לציין כי אם נבחן נקודה מסוימת בתוך שכבת המים העליונה באוקיינוס, יהיה קשה להבחין בתנועה בדיוק בהתאם לספירלת אקמן, היות ובפועל קיימים כוחות נוספים בעמודת המים והזרמים הם טורבולנטיים (ערבוליים). כשמסתכלים בקנה מידה גדול, הזרימה הזאת משמעותית ובעלת השפעה רבה על תופעות חשובות באוקיינוס כגון תופעות של נביעה Upwelling ושקיעה Downwelling.

איור 23

תיאור סכמתי של ספירת אקמן
(Paul R. Pinet; Invitation to Oceanography)



איור 24

תיאור סכמטי של תהליך נביעת מים (upwelling) בקירבת החוף בהמיספרה הצפונית.
(Ocean Motion)

Upwelling - עליית מי העומק אל פני השטח

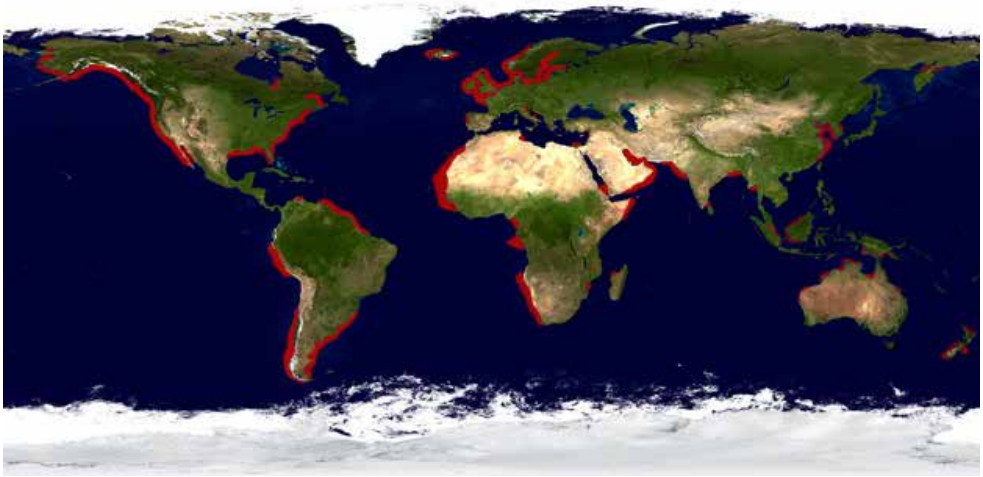
כאמור, בהשפעת הובלת אקמן, עמודת המים מוסטת ב-90° ימינה מכיוון הרוח בהמיספרה הצפונית ו-90° שמאלה מכיוון נשיבת הרוח בהמיספרה הדרומית.

כאשר רוח הנושבת לאורך החוף, כשהיבשה נמצאת משמאל לכיוון נשבת הרוח בהמיספרה הצפונית, או כשהיבשה נמצאת מימין לכיוון נשיבת הרוח בהמיספרה הדרומית, זרם הים מוסט ימינה בהמיספרה הצפונית ושמאלה בהמיספרה הדרומית, כלומר, לכיוון הים הפתוח בשניהם. בגלל הובלת אקמן והסעת המים מהחופים לכיוון מרכז האוקיאנוסים, נוצר גירעון של מים על יד קו החוף ומי עומק עולים לפני השטח על מנת לפצות על המים שהוסעו מהחוף (איור 24). מי עומק אלו מביאים איתם נוטריינטים רבים הנחוצים לתהליך היצרנות הראשונית. תופעה זו נקראת **נביעה (Upwelling)**.

אזורים עשירים ביצרנות ראשונית (Primary Production), הם אזורים בהם יש תהליכים אינטנסיביים של פוטוסינתזה. כדי שתהליך פוטוסינתזה יתרחש יש צורך בפחמן דו-חמצני ואור, המצויים בפני השטח, ב**נוטריינטים** הנמצאים בעומק האוקיאנוסים. פיטופלנקטון, יצורים מיקרוסקופים פוטוסינתטיים, הנזקקים לנוטריינטים כתנאי לגדילתם, נפוצים באזורים אלו. לכן, אזורים של עלית מי עומק יהיו אזורים פוריים ועשירים בדגה עם פעילות ביולוגית ענפה (איור 25).

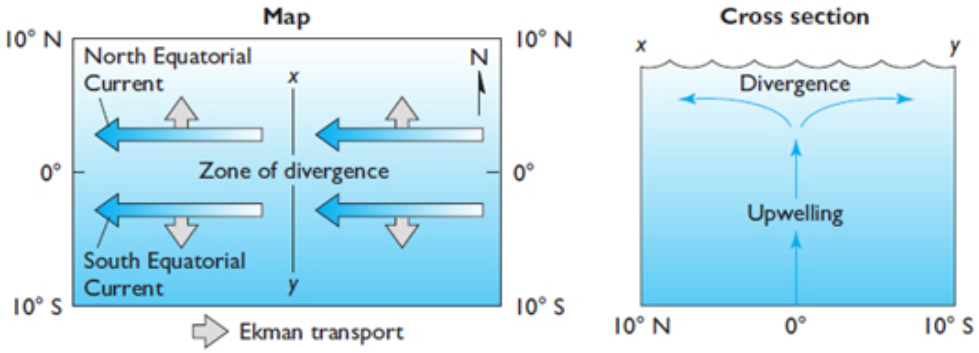
נביעה
תופעה אוקיינוגרפית, המונעת על ידי הרוח וכוללת תנועה של מים צפופים, קרירים ובדרך כלל גם עשירים בחומרי תזונה, ממים עמוקים אל פני האוקיינוס.

נוטריינטים
חומרי תזונה המומסים בים וכוללים חומרים אנאורגניים כמו ברזל, זרחן וחנקן.



איור 25

באדום, אזורי Upwelling ואזורים העשירים ביצרנות ראשונית.
(Clim'Blog)



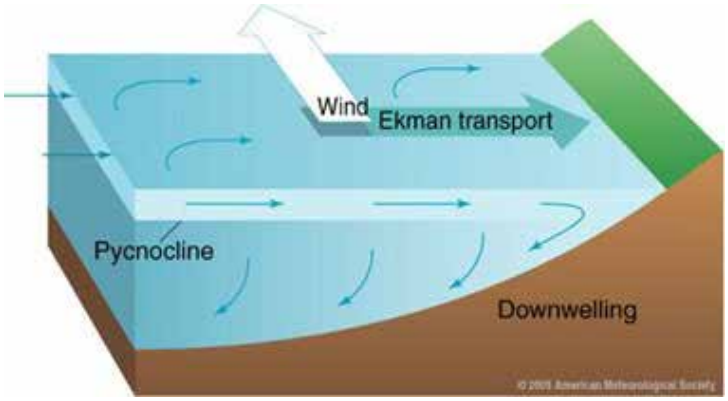
איור 26

תהליך upwelling לאורך קו המשווה.
(Paul R. Pinet; Invitation to Oceanography)

תהליך Upwelling מתקיים גם באזור קו המשווה. מי הים מצפון ומדרום לקו המשווה, המוסעים בגלל הרוח למערב האוקיאנוסים, מוסטים מקו המשווה למרכזי הסביבונים הסמוכים לו מצפון ומדרום. בגלל ספירת אקמן וכפיצוי על הסעת מים זו, יש עליה של מי עומק עשירים בנוטריינטים (איור 26).

Downwelling - שקיעת מי שטח

Downwelling היא שקיעה של מי השטח לעומק האוקינוס, המתרחשת כאשר היבשת נמצאת מימין לכיוון הזרימה (בהמיספרה הצפונית) או משמאל לכיוון הזרימה (בהמיספרה הדרומית) וזרם בהשפעת זרימת אקמן מסיע מים לכיוון החוף, המים נערמים על יד החוף. בגלל ההערמה של המים הם שוקעים בתהליך המכונה Downwelling. אזורים אלו, בהם יש מיעוט נוטריינטים, נחשבים לאזורים עניים בדגה ובפעילות ביולוגית (איור 27).



איור 27

תיאור סכמטי של תהליך שקיעת מים (downwelling) בקירבת החוף בהמיספרה הצפונית.
(Ocean Motion)

2. זרמי עומק

זרמי עומק מונעים על ידי הפרשי צפיפות. צפיפות המים מוכתבת על ידי הטמפרטורה (Thermo) ועל ידי המליחות (Haline). צפיפות המים עולה ככל שהמליחות גבוהה יותר וטמפרטורת המים נמוכה יותר. זרימה בהשפעת הפרשי הצפיפות מכונה זרימה תרמוהלינית (Thermohaline Circulation) או המחזור התרמוהליני. סירקולציה זו, בשילוב עם זרמי פני השטח, ידועה גם כ**חגורת המסוע (Conveyor Belt)**.

בשונה מהזרמים בפני השטח, זרמים תרמוהליניים נעים מאוד לאט. נפחם עצום וקשה מאוד למדוד את מהירות זרימתם האיטית. לכן הם מכונים **מסות מים (Water Masses)**. כל מסת מים מאופיינת בטמפרטורה ובמליחות של מקור היווצרותה. בגלל הנפח הגדול שלהן, הערבוב שלהן בשוליים עם מסות מים אחרות שולי והן שומרות על ייחודן ועל תכונות המליחות והטמפרטורה שלהן לאורך זמן. רשימת מסות המים העיקריות מצורפת בהמשך (טבלה 1). בדרך כלל שמות מסות המים השונות נקבעים על פי מקום היווצרותם. לדוגמא מסות מים עמוקים שנוצרה בצפון האטלנטי תיקרא North Atlantic Deep Water. אמנם הידע שלנו על זרימות מי העומק הוא מועט למדי, אך מדובר בזרימה הדומיננטית ביותר והיא מהווה כ-90% מנפח האוקיאנוסים.

טבלה 1. רשימת מסות המים העיקריות

AABW	Antarctic Bottom Water
AADW	Antarctic Deep Water
AAIW	Antarctic Intermediate Water
CoW	Common Water
ECW	Equatorial Central Water
MIW	Mediterranean Intermediate Water
NABW	North Atlantic Bottom Water
NACW	North Atlantic Central Water
NADW	North Atlantic Deep Water
NPCW	North Pacific Central Water
NPIW	North Pacific Intermediate Water
PSW	Pacific Subarctic Water
RSIW	Red Sea Intermediate Water
SACW	South Atlantic Central Water
SICW	South Indian Central Water
SPCW	South Pacific Central Water

חגורת המסוע

היא מערכת זרמים בה מועברים מים בין האוקיינוסים השונים: מקובל להתחיל את המסוע הימי בזרם הגולף. הזרם החם והמלוח נע צפונה לאורך החוף המזרחי של צפון אמריקה. עקב הקירור האינטנסיבי באזור הקוטב והעובדה שהוא צפוף יחסית, הוא שוקע לקרקעית האוקיינוס האטלנטי ונע דרומה. באזור אנטארקטיקה מצטרפים לזרם מים קרים מאוד ששקעו עקב קירור אינטנסיבי באוקיינוס הדרומי. מי העומק עולים בצפון האוקיינוס ההודי ובצפון האוקיינוס השקט. בתחילת המסוע, המים קרים יחסית ולכן מאפשרים הסעת ריכוז גבוה יותר של חמצן מומס. בזכות תופעה זו יש חמצן בכל עומק באוקיינוס. המסוע אוסף בדרכו נוטריינטים שפורקו על ידי בעלי-חיים תוך צריכת חמצן. כאשר מי העומק עולים, הם עשירים בנוטריינטים ומדשנים את האזור. תופעה זו מאפשרת אזורים גדולים של יצרנות ראשונית.

זרימת מי העומק באוקיינוסים השונים

כדי שנבין טוב יותר את תהליכי יצירת הזרימות ונכיר את מסות העומק, ניקח את האוקיאנוס האטלנטי כדוגמא. עם זאת, דוגמא זאת מייצגת את כלל האוקיאנוסים, מכיוון שתהליכים דומים לתהליכים אלו מתרחשים גם באוקיאנוס השקט וגם באוקיאנוס ההודי.

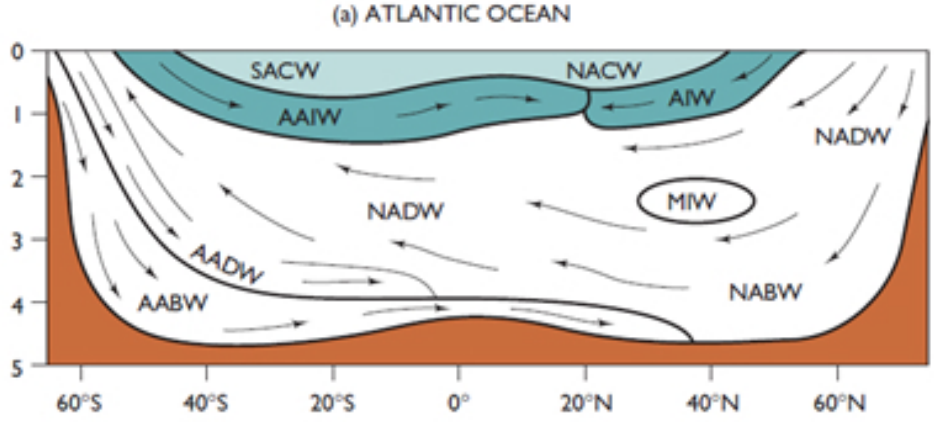
זרימות מי העומק באוקיאנוס האטלנטי:

מי השטח בחלקו המערבי של האוקיאנוס האטלנטי מוסעים מאזור קו המשווה לקווי הרוחב הצפונים והדרומים של האוקיאנוס האטלנטי - **זרם הגולף וזרם ברזיל** (זרמי פני השטח גם הם חלק ממסות המים הגלובליות, למרות שהן מסות עם נפח קטן יחסית ומהירות זרימה מדידה). שמם של מסות מים אלו: **NACW** (North Atlantic Central Water) ו-(South Atlantic Central Water) **SACW**.

מסות המים **NACW** ו-**SACW** מוסעות צפונה ודרומה בהתאמה, עד לקו °45 מעלות צפון ודרום. בהשוואה לסביבתם, מים אלו חמים מאוד, וזרמים אלו מרוכזים באזור צר במערב האוקיאנוס (ראו הסבר על זרמי גבול מערבים). בגלל טמפרטורת המים, האידוי שלהם גבוה מאוד. מאחר ורק אדי מים מתוקים מתאדים, צפיפות המים גדלה בגלל שריכוז המלח (שלא התאדה) במים, גדל. עם העלייה בקווי הרוחב, צפונה בהמיספרה הצפונית ודרומה בהמיספרה הדרומים מסות המים מתקררות. קירור המים גורם לעליה נוספת בצפיפות. בגלל צפיפותם הגבוהה מים אלו מתחילים לשקוע מתחת למי השטח ומתחילים לזרום דרומה (בהמיספרה הצפונית) - מסת המים המכונה **AIW** (Arctic Intermediate Water), וצפונה בדרום האוקיאנוס האטלנטי (בהמיספרה הדרומית) - **AAIW** (Antarctic Intermediate Water) (איור 28).

מצפון לאזור ההיווצרות של AIW, באזור גרינלנד, על שטח גדול בצפון האוקיאנוס האטלנטי, בשל האידוי (מי הים ממשכים להתאדות כל זמן שהים חם מהסביבה) והקור (שוב, עליה בצפיפות מסת מים גדולה בעלת צפיפות בינונית) מים אלו צוללים אל מתחת למסת המים AIW.

מסת מים זו זורמת דרומה, חוצה את קו המשווה וממשיכה עד לדרום האוקיאנוס האטלנטי מתחת ל-AAIW. זוהי מסת המים הגדולה ביותר באוקיאנוס האטלנטי והיא נקראת **NADW** (North Atlantic Deep Water).



איור 28

חתך עומק מצפון לדרום האוקינוס האטלנטי, בחלקו המערבי.
(Paul R. Pinet; Invitation to Oceanography)

החלק הצפוני של אזורי היווצרות מסת המים NADW, הוא האזור הקר ביותר ולכן הקרח קופא, מעלה את מליחות המים ומגביר את שקיעת מסת המים **NABW** (North Atlantic Bottom Water).

את מסת המים NADW ניתן לזהות עד לדרום האוקיאנוס האטלנטי. באזור זה ניתן לזהות אותה מעל מסת המים **AADW** (Antarctic Deep Water) שקצת צפופה יותר. מסת המים AADW נוצרת בדרום האטלנטי באזור אנטרקטיקה מסיבות דומות.

בקצה הדרומי של האוקיאנוס האטלנטי, באזור ים וואדל (Weddell Sea) שליד אנטרקטיקה, בחורף - בתקופה בה המים קרים ביותר, נוצרת שכבת קרח משמעותית. פני השטח נמצאים בקיפאון עמוק. לכן המים מלוחים ביותר צפופים וכבדים ויכולים לשקוע לתחתית האוקיאנוס. זאת הסיבה שהם נקראים **AABW** (Antarctic Bottom Water).

בחלק הצפוני של האוקיאנוס האטלנטי (במרכז איור 28) נמצאת מסת מים המכונה MIW (Mediterranean Intermediate Water). זוהי לשון מים היוצאת מהים התיכון, דרך מצר גיברלטר. מדובר במסת מים חמים יחסית עם מליחות גבוהה יחסית. בגלל צפיפותה היא יכולה לשקוע ולהתייצב בעומק של כ-800 מטר. את מסת מים זאת ניתן לזהות עד למערב האוקיאנוס האטלנטי.

זרימות מי העומק באוקיאנוס השקט ובאוקיאנוס ההודי:

תהליכי יצירת מי העומק באוקיאנוסים השקט וההודי דומים מאוד לתהליכים שתוארו באוקיאנוס האטלנטי. בפני השטח באוקיינוס השקט ניתן להבחין ב-**NPCW** (North Pacific Central Water) וב-**SPCW** (South Pacific Central Water). באוקיאנוס ההודי ניתן לראות את **SICW** (South Indian Central Water) ואת **ECW** (Equatorial Central Water). מסות מים אלו נוצרות ודומות בהתנהגותן למסות המים **NACW** ו-**SACW** עליהן התמקדנו באוקיינוס האטלנטי.

טבלה 2. תכונות המאפיינות מסות מים באוקיאנוסים: שם המסה, עומק, ואפיון של טמפרטורה ומליחות

Water-Mass Types	Approximate Depth Range (km)	Water Mass*	Temperature (°C)**	Salinity (‰)
Central waters	0–1	SPCW	9–20	34.3–36.2
		NPCW	7–20	34.1–34.8
		NACW	4–20	35.0–36.8
		SACW	5–18	34.3–35.9
		SICW	6–16	34.5–35.6
Intermediate waters	1–2	NPIW	4–10	34.0–34.5
		RSIW	23	40.0
		MIW	6–11.9	35.3–36.5
		AIW	0–2	34.9
		AAIW	2.2–5	33.8–34.6
Deep and bottom waters	>2	CoW	0.6–1.3	34.7
		PSW	5–9	33.5–33.8
		NADW	3–4	34.9–35.0
		AADW	4.0	35.0
		NABW	2.5–3.1	34.9
		AABW	−0.4	34.6

(Paul R. Pinet; Invitation to Oceanography. Adapted from M. U. Sverdrup, M. W. Johnson, and R. M. Fleming, The Oceans: Their Physics)

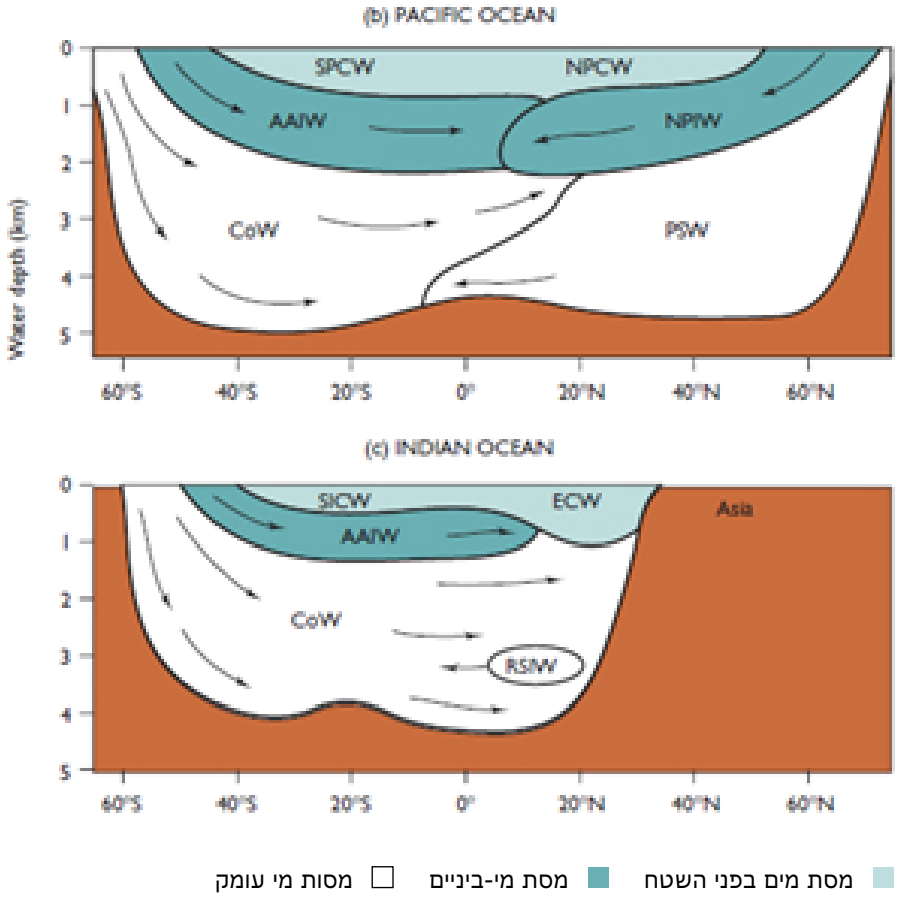
בדרום, בשני האוקיאנוסים, האוקיאנוס השקט והאוקיאנוס ההודי ניתן לראות את מי **AAIW** השוקעים אל מתחת למי פני השטח (איור 29).

בצפון האוקיאנוס השקט ניתן להבחין בשקיעת מסת המים **NPIW** (North Pacific Intermediate Water). מסה זו שוקעת מאותן הסיבות (קירור, עליה במליחות) שבגללן שוקעת **NADW**. קצת מצפון לאזור היצירה של **NPIW**, שוקעים **PSW** (Pacific Subarctic Water) ממסת מים שנוצרת בגלל אותן הסיבות שנוצרת מסת המים **NABW**.

בצפון האוקיאנוס ההודי לא ניתן להבחין במסת מים דומה ל-**PSW** או למסת המים **NABW** מהסיבה הפשוטה שהאוקיאנוס ההודי לא מגיע עד לקווי רוחב גבוהים בהן יכול להיות תהליך שקיעת המים.

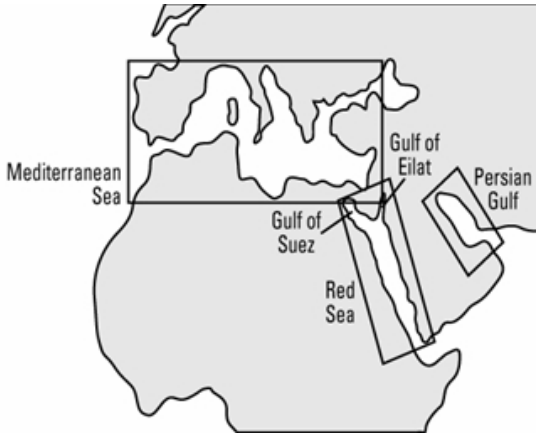
בדרום האוקיאנוס ההודי והאוקיאנוס השקט ניתן לראות מסת מים שנקראת **CoW** (Common Water). CoW היא מסת מי העומק של האוקיאנוס ההודי והאוקיאנוס השקט. מסות מי העומק בשני אוקיאנוסים אלו מאוד דומות בתכונותיהן והן מאופיינות לכן כמסה אחת משותפת - Common Water, המייצגת מיזוג של מסות המים **AABW** ו-**NADW**. בהשפעת הזרם הסובב אנטרקטיקה התמזגו להן מסות מים אלו למסת מים אחת המאופיינת בטמפרטורה של 1.5°C ומליחות של 34.7 ppm.

בצפון האוקיאנוס ההודי, בעומק שמתחת לאלפיים מטר ניתן להבחין במסת המים **RSIW** (Red Sea Intermediate Water). בדומה למסת MIW, זוהי לשון מים חמים ומלוחים הנשפכת מהים האדום לאוקיאנוס ההודי. המסה מאופיינת בטמפרטורה גבוהה מאוד 23°C ומליחות גבוהה מאוד 40 ppm.



איור 29

חתכי עומק, מצפון לדרום, באוקיאנוס השקט ובאוקיאנוס ההודי.
(Paul R. Pinet; Invitation to Oceanography)



איור 30

אגני שולים במזרח התיכון

זרימות באגני שולים

אגן שולים מוגדר כאגן קטן ביחס לאגן הצמוד אליו. הים התיכון הוא אגן שולים של האוקיאנוס האטלנטי. באחה קליפורניה (Baja California) הוא אגן שולים של האוקיאנוס השקט. הים האדום והמפרץ הפרסי הם אגני שולים של האוקיאנוס ההודי. מפרץ אילת ומפרץ סואץ הם אגני שולים של הים האדום, והים השחור הוא אגן שולים של הים התיכון (איור 30).

בגלל גודלו הקטן (ביחס לאוקיאנוס/ים הצמוד אליו), אגן שולים מושפע מאוד מהסביבה היבשתית שסובבת אותו.

ישנם שני סוגי אגני שולים:

1. אגנים בהם כמות המשקעים וכניסת מים לאגן מנהרות, גדולה מאידוי המים (הים השחור)
2. אגנים בהם האידוי גדול יותר מירידת המשקעים ומכניסת מי נהרות לאגן (ים תיכון, מפרץ אילת ועוד). אגן שולים שבו האידוי גדול מהמשקעים וכניסת נהרות, מוגדר כ**אגן לגונרי**.

ישנם אגני שולים שאין להם מצר המגביל את זרימת המים בין אגן השולים לבין האוקיאנוס הצמוד אליו. באגנים אלו זרימת המים פתוחה וחופשית ואין הגבלה בזרימה המתקיימת בין האגן לבין האוקיאנוס שלידן, ומסות המים של האגנים והאוקיאנוסים מתערבבות כל הזמן. כפי שאפשר לראות בבאחה קליפורניה, במפרץ סואץ ובמפרץ הפרסי.

לעומתם ישנם אגנים בהם המצר מגביל ושולט בזרימה לתוך ומתוך האגנים, לאוקיאנוס הצמוד אליהם. אגנים אלו נקראים **אגנים חצי סגורים (Semienclosed Seas)**. בין אגנים אלו נמנים הים תיכון, מפרץ אילת, הים השחור, והים האדום.

בפרק זה נתמקד באגנים לגונרים חצי סגורים ונתייחס לים התיכון כמקרה בוחן ממנו אפשר ללמוד ולהבין את הנעשה בכלל אגני השולים הלגונרים (חצי סגורים).

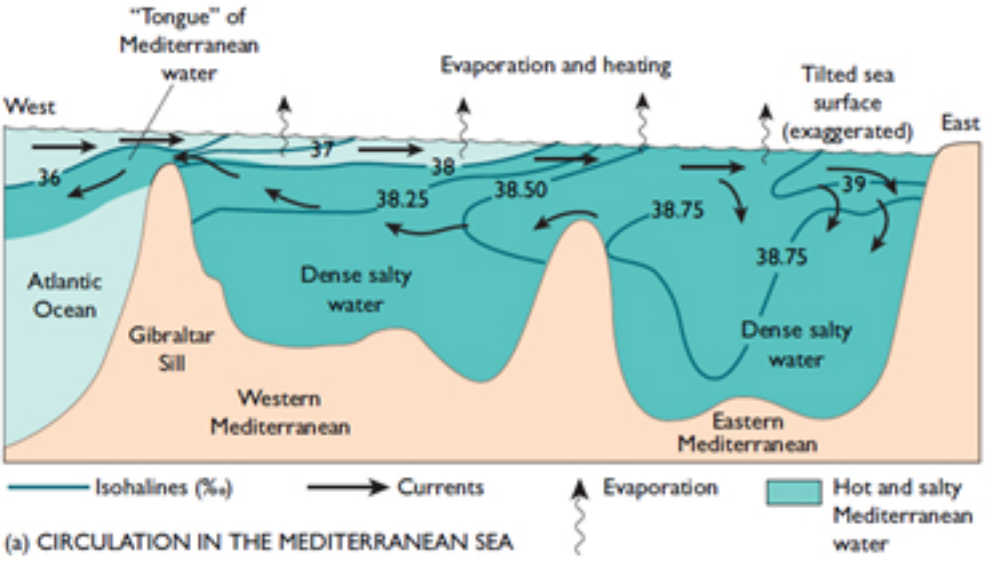
בתהליך האידוי מפני השטח, רק המים מתאדים והמלחים אשר נשארים במים מעלים את רמת המליחות באגן. כדי שהאגן לא יתייבש לאורך זמן, תחלופת המים במיצר, בכניסה לאגן חצי סגור, צריכה לפצות על איבוד המים שהתאדו. בנוסף, צריכה הזרימה לאגן להוריד את ריכוז המלחים באגן, שהצטבר בגלל האידוי.

אגן הים התיכון הוא אגן באורך של כ-3,000 ק"מ רוחב של כ-1,000 ק"מ. העומק ממוצע שלו הוא כ-1,500 מטרים. בקצהו המערבי ממוקם מיצר גיברלטר, השולט ומגביל את זרימת המים לתוך ומתוך הים (חילופי המים בתעלת סואץ זניחים בהשוואה לשטפים במצר גיברלטר). אורכו של מצר גיברלטר הוא 6 ק"מ ועומקו כ-300 מ'.

אגן הים התיכון הוא אגן שולים לגונרי - אגן בו כמות האידוי גדולה מכמות כניסת המים המתוקים (משקעים ונהרות). על איבוד המים באידוי מפצה כניסת מים "מתוקים" (פחות מלוחים ביחס למי הים התיכון שמליחותם עלתה עקב האידוי) מהאוקיאנוס האטלנטי. על עלית המליחות, עקב האידוי באגן, מפצה יציאת מים מלוחים מהים התיכון לאוקיאנוס האטלנטי.

תחזורת (סירקולציה) כזו המושפעת מהפרשי מליחות והאידוי נקראת **זרימה תרמוהלינית.** איור 31 מתאר באופן סכמתי את התחזורת המתרחשת באגן הים התיכון: מים קרים, עם מליחות של נכנסים בפני השטח במצר גיברלטר. מסת המים זורמת מזרחה בפני השטח ועם התקדמותה מזרחה, האידוי גורם לעליה במליחות ולעליה בטמפרטורת המים. צפיפות המים עולה. כשמסת המים מגיעה למזרח הים התיכון המים מלוחים מאוד וצפיפותם גבוהה. המים שוקעים במזרח הים התיכון וזורמים כמי עומק מערבה חזרה לכיוון מצר גיברלטר. הם יוצאים מהמצר בחלקו התחתון ונשפכים לאוקיינוס האטלנטי. מליחות המים ביציאה ממצרי גיברלטר היא. לאחר שהמים נשפכים לאוקיינוס האטלנטי ניתן לעקוב אחריהם כלשון ארוכה המכונה "הלשון" של הים התיכון ("Tongue" of the Mediterranean Sea) עד למערב האוקיינוס האטלנטי.

על מנת שאגן שולים לגונרי, כים התיכון, לא יתייבש או יתמלח, **שטף המלחים והמים הנכנסים והיוצאים ממצר גיברלטר חייב להיות שווה.**



איור 31

תיאור סכמתי של הזרימה התרמוהלינית בים התיכון

Paul R. Pinet;) Invitation to (Oceanography

שטף המלח בכניסה וביציאה מאגן לגונרי

(ריכוז המלחים בתוך שטף המים):

משוואה 1. $$F_{in} \cdot S_{in} = F_{out} \cdot S_{out}$$

כאשר, כאשר F_{in} הוא שטף המים הנכנס לאגן, S_{in} שטף המלחים הנכנסים לאגן, F_{out} שטף המים היוצא מהאגן ו-S_{out} שטף המלחים העוזבים את האגן.

כמו כן, **שטף כניסת המים לאגן שווה לשטף יציאת המים מהאגן** יחד עם שטף המים המתאדים מהאגן:

משוואה 2. $$F_{in} \cdot S_{in} = F_{out} \cdot S_{out}$$

כאשר, FE הוא שטף המים (נטו אידוי פחות כניסת מי נהרות) שמתאדים מהאגן.

מתוך הנחה שאנחנו יודעים את מליחות המים בכניסה וביציאה ממצר גיברלטר (מדידה פשוטה), ואנחנו גם יודעים את שטף האידוי נטו הממוצע בים התיכון, אפשר ליצור שתי משוואות עם שני נעלמים:

F_{in} ו- F_{out}

נעביר אגפים במשוואה 1, ונקבל: $$\frac{F_{in} \cdot S_{in}}{S_{out}} = F_{out}$$

נציב את התוצאה שקבלנו במשוואה 2, ונקבל: $$F_{in} = \frac{F_{in} \cdot S_{in}}{S_{out}} + FE$$

נעביר אגפים ונקבל: $$F_{in} - \frac{F_{in} \cdot S_{in}}{S_{out}} = FE$$

נחלץ את F_{in} ונקבל: $$F_{in} \cdot \left(1 - \frac{S_{in}}{S_{out}}\right) = FE$$

נעביר אגפים, ונקבל: $$F_{in} = \frac{FE}{\left(1 - \frac{S_{in}}{S_{out}}\right)}$$

נציב את הנתונים של הים התיכון במשוואה (מליחות יוצאת, מליחות נכנסת ושטף האידוי), נקבל את **שטף כניסת המים לים התיכון**:

$$FE = 70 \cdot 10^3 \left[m^3/sec\right];\ S_{in} = 36.25\ [ppm];\ S_{out} = 37.75[ppm]$$

$$F_{in} = \frac{70 \cdot 10^3}{\left(1 - \frac{36.25}{37.75}\right)} = 1.76 \cdot 10^6 \left[m^3/sec\right]$$

זמן שהות Residence Time

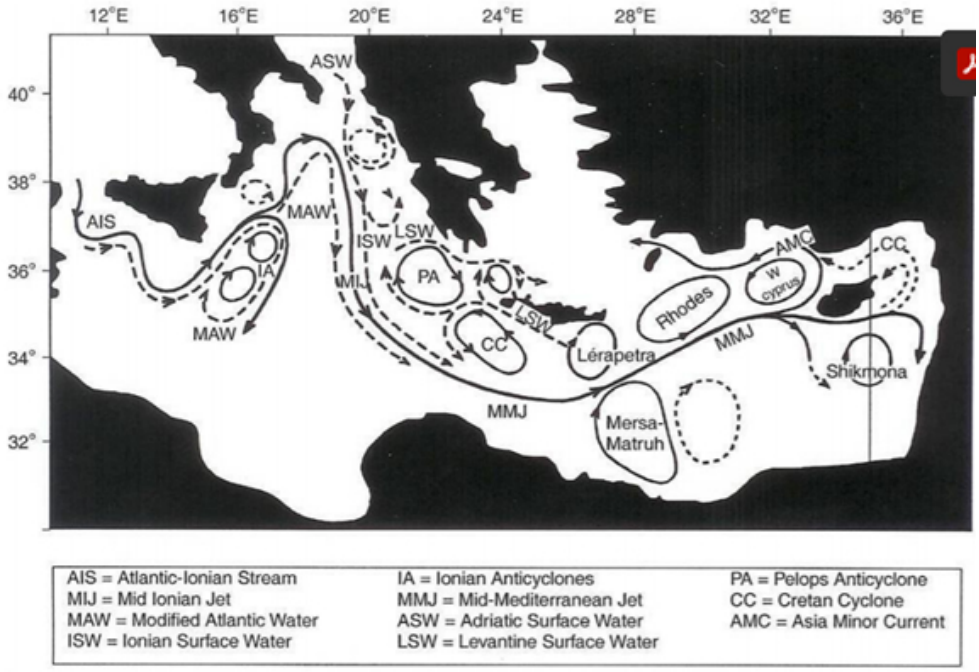
אנחנו יודעים מהו אורך, רוחב ועומק הים התיכון. לכן בעזרת נתונים אלו אנחנו יכולים לחשב את נפח הים התיכון. **נפח הים הוא** $4 \cdot 10^{15}\ [m^3]$.

אם ידוע לנו נפח הים התיכון כמו גם שטף המים הנכנסים אליו, אנחנו יכולים לחשב כמה זמן לוקח למלא/לרוקן את הים התיכון. במילים אחרות אנחנו יכולים לחשב כמה זמן לוקח למים מהרגע שהם נכנסו לים התיכון ועד לרגע שהם יוצאים מהים. זהו **זמן השהות (Residence Time)** של מים באגן.

$$\text{Residence Time} = \frac{Volume}{F} = \frac{4 \cdot 10^{15} m^3}{1.76 \cdot 10^6\ m^3/sec} = 2.2 \cdot 10^9 [sec] \approx 70\ [years]$$

נתון זה הוא נתון חשוב מאוד, הוא מצביע ומגדיר שכל מה שנכנס לים התיכון לוקח לו עשרות שנים, (מקסימום שבעים שנה) עד שהוא יוצא מהאגן. לנתון זאת יש השלכה על הרגישות שיש בים התיכון לזיהומים. לכל זיהום שנפלט לים התיכון ייקח עשרות שנים עד שהוא יתפנה מהים התיכון לכיוון האוקיאנוס האטלנטי.

התאור שניתן עד עכשיו לזרימת מים בים התיכון היה תאור סכמטי פשוט שנקרא **מודל קופסאות (Box Model)**. זהו מודל שבעזרתו מחשבים את כל הכניסות והיציאות (**Inputs**, **Outputs**) של מים ומלחים מהאגן ומשווים ביניהם. בפועל, התמונה הרבה יותר מורכבת מהתיאור הסכמטי. המציאות מורכבת מסביבונים (**Gyres**) וזרימות מי עומק קרים מצפון הים התיכון ועוד. במציאות הזרימות מורכבות הרבה יותר. הן מושפעות מהטופוגרפיה באגן ומסיבוב כדור הארץ (כח קוריוליס). באיור 32 ניתן לראות את מורכבות הזרימה בפני השטח. אולם בסופו של דבר ממוצע הזרימות הוא כפי שמתקבל במודל הקופסאות שתארנו.



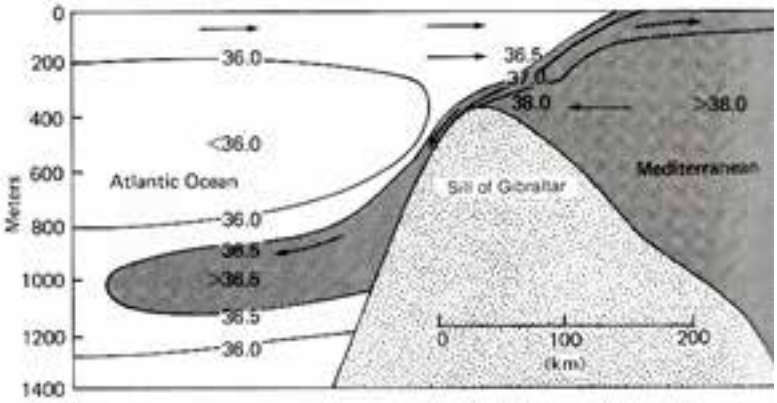
איור 32

הצגה סכמטית של מורכבות הזרימה בים התיכון.
(אוקיינוגרפיה פיסיקלית: סקירת הים העמוק והאזור החופי)

ומה קורה למים כשהם יוצאים מהים התיכון לאוקיאנוס האטלנטי?

בגלל המליחות והצפיפות של המים שיוצאים ונשפכים מהים התיכון לאוקיינוס האטלנטי, הם מתייצבים כמסת מים בעומק של כשמונה מאות מטר. מסת מים של הים התיכון נקראת (Mediterranean Intermediate Water) **MIW**. את מסת המים הזו ניתן לזהות עד למערב הים התיכון, באזור הקריבי.

הזרימות בים האדום - בין הים האדום לאוקינוס ההודי במצרי באב אל מנדב, והזרימה במפרץ אילת ובין מפרץ אילת לים סוף במצרי טיראן, דומות מאוד לזרימה שמתקיימת בים התיכון. גם את הלשון של מי מפרץ אילת ומי הים האדום ניתן לזהות בים האדום ובאוקינוס ההודי בהתאמה.



איור 33

לשון מי הים מהים התיכון בתוך האוקינוס האטלנטי. (למעלה) **מבט צד.** (למטה) **מבט מלמעלה.** (SlideToDoc)

7.3 גלי-ים

טל ברמן

גל מורכב מ**פסגות (Crest)** כשבניהן יש **שפל (Trough).** הפסגות הן גבהי השיא של הגל והשפל הן הנקודות הנמוכות ביותר של הגל. גל מוגדר על ידי **אורך הגל** שלו **(Wavelength)** - המרחק בין שני פסגות עוקבות או שתי נקודות שפל עוקבות. **גובה הגל (Wave Height)** הוא הפרש הגובה בין שפל הגל לפסגת גל. מחזור הגל - הזמן שלוקח לגל לעבור את מרחק אורך הגל. **תדירות הגל (Period)** - מספר פסגות הגל שעוברות לפי מיקום קבוע בפרק זמן מסוים. (איור 34).

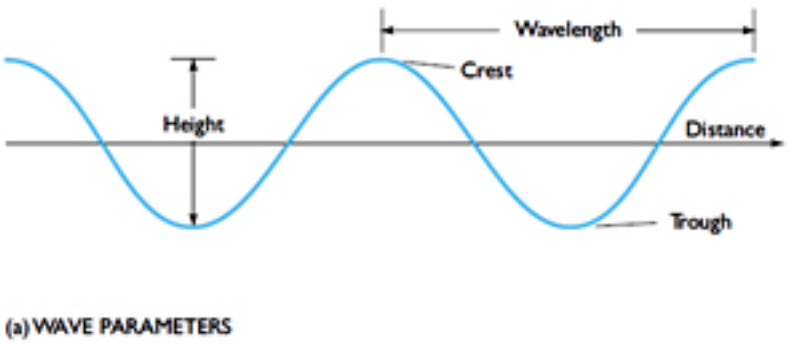
גלי הים נבנים מרוח, כוח המשיכה, רעידות אדמה והפרשי צפיפות בין שכבות מים. הם מנעד רחב של תופעות בים - החל מ**גלים קפילריים (Capillary wave)** שלהם אורך גל של מספר מילימטרים ועד **גלי רעידות אדמה (Tsunami Wave)** או **גלי גאות ושפל (Tide Wave)**, שאורכי הגל שלהן משתרעים על פני עשרות אלפי קילומטר. לגל גאות למשל, אורך גל של חצי כדור הארץ.

לגלים יש תפקיד חשוב מאוד בבניית כל המערכות הגאומורפולוגיות והאקולוגיות בים. הם מכניסים חמצן מהאטמוספירה לפני השטח, ומאיצים את תהליכי הפוטוסינתזה בשכבת המים העליונים. הגלים בונים ומכתיבים איך יראה קו החוף ואנרגית הגלים מכתיבה מה יתפתח ויחיה באזור קו הגאות, או כיצד יראו המבנים ההנדסיים באזורים חופיים - מזחים, נמלים וכלובי דגים.

אפשר לסווג גלים לפי אורך, גובה, תדירות וסיבת היווצרותם (טבלה 3). אולם אחת הדרכים המרכזיות לסיווג גלים היא תדירותם.

טבלה 3. אפיון גלים על פי תכונותיהם (Paul R. Pinet; Invitation to Oceanography)

Wave	Period	Wavelength	Wave Type	Cause
Capillary wave	<0.1 sec	<2 cm	Deep to shallow	Local winds
Chop	1–10 sec	1–10 m	Deep to shallow	Local winds
Swell	10–30 sec	Up to hundreds of m	Deep or shallow	Distant storm



איור 34

תכונות גלי ים.
Paul R. Pinet;)
Invitation to
(Oceanography

איור 35

(מלמעלה למטה)
גלים קפילריים
(Wikipedia)
גלי גיבוע
(Surfertoday)
גלי רוח
(Nicola Triscott)

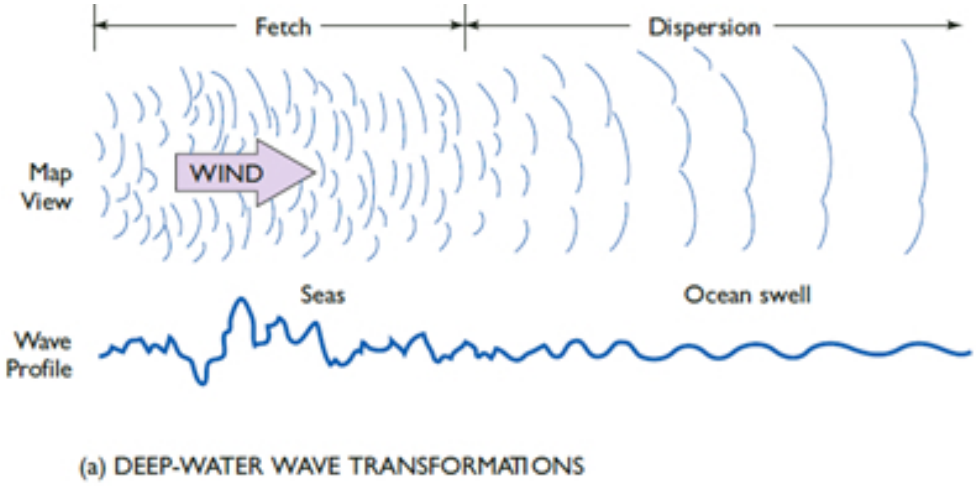
גלים בפני השטח בהשפעת רוח (איור 35)

גלים קפילריים (Capillary Wave) הם הגלים הקטנים ביותר: זמן המחזור שלהם הוא הקטן ביותר - עשירית שניה ואורך הגל שלהם הוא סנטימטרים בודדים. הם בעלי תדירות גבוהה. כאשר משב רוח קל נושב מעל פני המים, גלים אלו נראים בברור על פני ים שטוח ורגוע. גלים אלו נשלטים על ידי כוחות של מתח פנים בפני השטח.

גלי רוח (**Wind Wave** או **Chop**) הם גלים שנוצרו מרוח מקומית, לגלים אלו אורך גל קצר ותדירות של שניות בודדות.

גלי גיבוע (סוול Swell) הם גלים ארוכים יותר. התדירות שלהם היא של עשרות שניות.

ההבדל בין **גל רוח** לגל גיבוע הוא שגלי רוח נוצרים על ידי רוח מקומית הנושבת בפני המים וניתן בעזרתם ניתן להצביע על כיוון ועוצמת הרוח. **גלי גיבוע** הם גלים הנעים אל מעבר לאזור הרוח והסערה בה נוצרו (גלים היוצאים הרחק מאזור הרוח שיצרה אותם). בדרך כלל יש להם פסגות חלקות. כאשר אנו נתקלים בסערה מפותחת עם גלי ים גבוהים (Seas) זה נובע בדרך כלל משילוב של גלי רוח וגלי גיבוע (איור 36).



(a) DEEP-WATER WAVE TRANSFORMATIONS

איור 36

התפתחות גלים בים הפתוח. מגלי רוח באזור הסערה ועד להתפתחות גלי גיבוע מחוץ לאזור הסערה.
Paul R. Pinet;)
Invitation to
(Oceanography

גובה הגלים תלוי בארבעה תנאים:

1. עוצמת הרוח
2. זמן נשיבת הרוח
3. **מרחב הנשיבה** של הרוח (**Fetch**)
4. במצב ים התחלתי.

במילים פשוטות, ככל שעוצמת הרוח גדלה, זמן נשיבת הרוח גדל ומרחב נשיבת הרוח גדל (לדוגמא: מרחבי אוקיאנוס בהשוואה לאגן סגור) גלי הרוח גדלים - בגובה, באורך הגל ובזמן המחזור. טבלה 4 מתארת גלים בים מפותח (ים פתוח ורוח הנושבת במשך זמן רב) ביחס לעוצמת הרוח.

תנועת הגלים

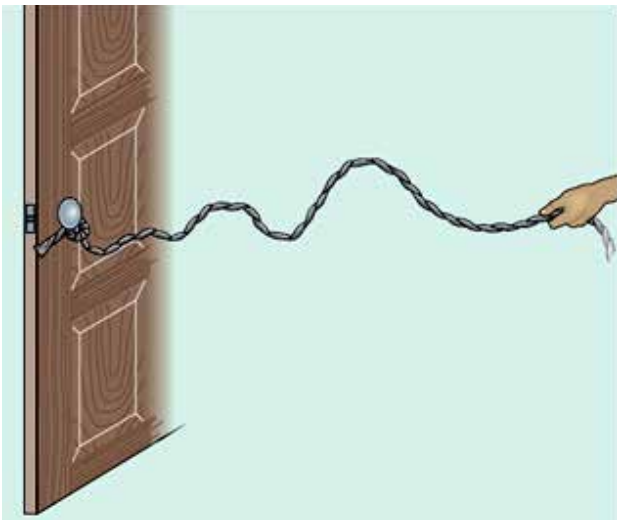
גלים שנוצרו על ידי רוח מתקדמים על פני הים. אם נתמקד, נראה את פסגת הגל המתקדם, ונוכל לעקוב אחרי הגלים לאורך זמן. אבל מה בעצם נע ומתקדם? צורת הגלים כמובן נעה ומתקדמת. אבל מה קורה מתחת לפני השטח? האם המים מתחת לפני הים מתקדמים גם הם?

מרחב נשיבה

מרחב הים הנקי ממכשולים טופוגרפיים שהרוח נושבת עליו.

טבלה 4. **תכונות גלי רוח, בים מפותח, ביחס לעוצמת הרוח** (Paul R. Pinet; Invitation to Oceanography)

Wind Speed (km/hr)	Average Height (m)	Average Length (m)	Average Period (sec)	Significant Wave Height (m)
20	0.33	10.6	3.2	0.5
30	0.88	22.2	4.6	1.2
40	1.8	39.7	6.2	2.5
50	3.2	61.8	7.7	4.5
60	5.1	89.2	9.9	7.1
70	7.4	121.4	10.8	10.3
80	10.3	158.6	12.4	14.3
90	13.9	201.6	13.9	19.3

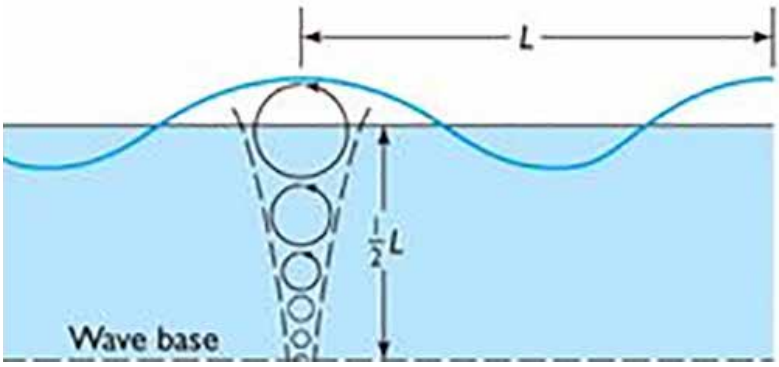


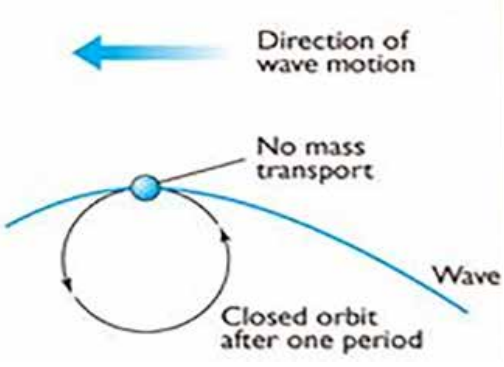
איור 37

תנועת הגל.
הגל שנוצר מהנפת החבל מייצג את זרימת האנרגיה.
(Paul R. Pinet; Invitation to Oceanography)

ישנם שני סוגים עיקרים של תנועות הגלים בים: התנועה קדימה של צורת הגל והתנועה המסלולית של חלקיקי מים מתחת לגל. לדוגמא: אם נקשור חבל אל ידית דלת וננענע את החבל מעלה מטה, נגרום ליצירה של סדרת גלים מתקדמים לכיוון הדלת (איור 37). החבל ינוע, הוא יעלה וירד. לאורך החבל ייווצרו גלים שיצרו תנועת התקדמות. אבל החבל עצמו יישאר במקום. הוא לא יזוז, הוא תמיד יהיה ממוקם בין היד המניעה אותו לידית הדלת. זה מה שקורה בתוך הים. הגל מתקדם על פני המים, אולם המים מתחת לגל לא מתקדמים. האנרגיה של הגל מתקדמת ומתפשטת, אבל מסת המים לא.

במהלך התקדמות הגל, קדמת הגל תתקדם קדימה ואז תידחף כלפי מטה בחלק האחורי של הגל, במורד הגל. התנועה היא הפוכה כלפי מעלה. כך נוצרת סדרה של סביבונים שחלקיקי המים מסתובבים כמתואר באיור 38.





איור 38

תנועת הגל מתחת לפני השטח.
(Paul R. Pinet; Invitation to Oceanography)

נוסחאות פשוטות לחישוב מהירות הגלים

גלים מחלקים לשני סוגים:

גלי ים עמוק (Deep Water Wave). גלים אלו לא מרגישים את קרקע הים. לכן אין חיכוך בין הגל המתקדם לבין קרקעית הים.

נוסחת התקדמות הגל במקרה זה היא: $C = \sqrt{g \cdot L/2\pi}$

כאשר C היא מהירות התקדמות הגל העמוק, g קבוע הגרביטציה, L אורך הגל ו-2π קבוע.

גלי ים רדוד (Shallow Water Wave) - גלים אלו מרגישים את החיכוך עם קרקעית הים, לכן מהירות התקדמותם איטית יותר. ככל שעומק הים רדוד יותר, החיכוך בין קרקעית הים לבין הגל המתקדם, גבוה יותר. לכן מהירות התקדמות הגל איטית יותר. מהירות גל רדוד מתוארת בעזרת הנוסחה: $C = \sqrt{g \cdot D}$

כאשר C היא מהירות התקדמות הגל הרדוד, g קבוע הגרביטציה ו-D עומק הים.

גל מים עמוקים (שאינו מרגיש את החיכוך עם קרקעית הים) מוגדר, כגל שנמצא באזור בו עומק הים גדול ממחצית אורך הגל:

$$Water\ Depth \geq \frac{Wavelenght}{2}$$

גל מים רדודים מוגדר כגל המתקדם באזור בו עומק המים קטן מאחד חלקי עשרים מאורך הגל:

$$Water\ Depth \leq \frac{Wavelenght}{20}$$

כשגל מתקדם בעומקים כשמחצית אורך הגל לאחת חלקי עשרים מאורכו:

$$\frac{Wavelenght}{2} \geq Water\ Depth \geq \frac{Wavelenght}{20}$$

הוא מוגדר כ**גל בעומק הביניים (Intermediate Water Wave).**

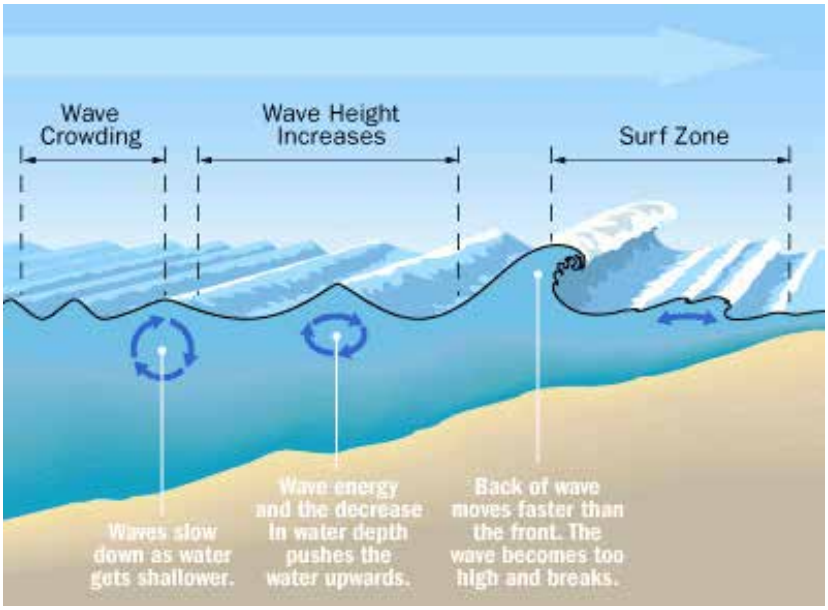
*לא נעסוק בגלים מסוג זה ביחידה זו.

לדוגמא: אם ניקח גל שאורכו 100 מטר. מהירות התקדמות שלו בים העמוק תהיה:

$$C = \sqrt{g \cdot \frac{L}{2\pi}} = 12.5[^{m}/_{sec}]$$

לשם השוואה בים רדוד, בעומק של 5 מטר, מהירות התקדמות הגל תהיה:

$$C = \sqrt{g \cdot D} = 7[^{m}/_{sec}]$$



איור 39

מגל עמוק למשברים.
Chole and Georgia's)
Amazzeballs Sose
(Project

משברי גלים

יחס פשוט המחלק את גובה הגל באורך הגל (H / L), מגדיר את תלילות הגל (Wave Steepness). בעזרת תלילות הגל אפשר לגלות מתי הגל יהיה בלתי יציב וישבר. כשגל מתקרב לחוף, הים נהיה רדוד יותר. הגל מתקדם לאט, על פי נוסחת המהירות של גל רדוד והגלים מאחור, שנמצאים בעומק פחות רדוד, מתקדמים מהר יותר. המרחק בין הגלים מתקצר והגל שנמצא מאחור מתחיל להשיג את זה שמלפניו (איור 39).

ככל שהגל מתקדם לעבר החוף, החלק הקדמי של הגל מתקדם לאט יותר מהחלק האחורי שלו. בגלל שחזית הגל נמצאת באזור רדוד יותר, החלק האחורי של הגל משיג את החלק הקדמי של הגל, נערם עליו והגל מתחיל לגבוה.

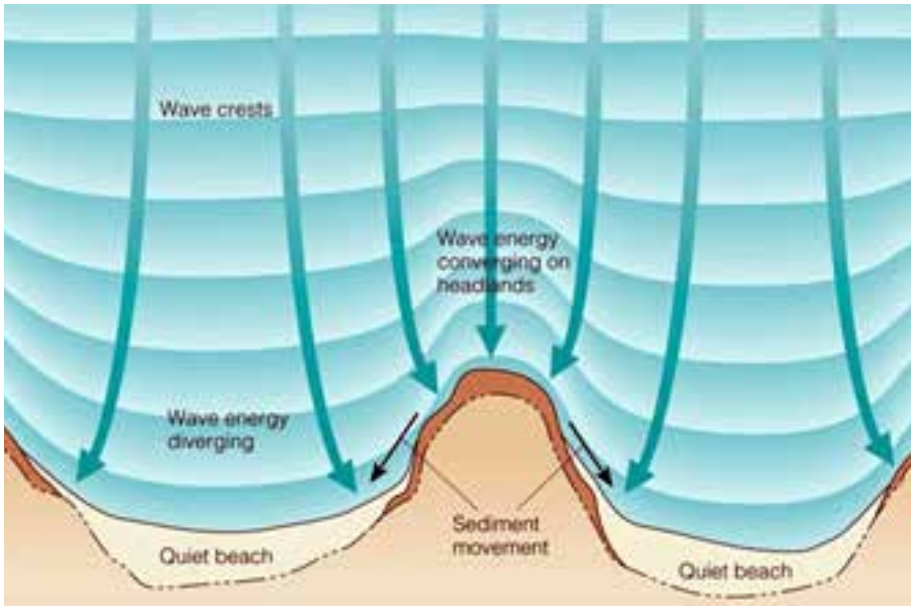
כשגלים מתקדמים למים הרדודים, גובהם (H) עולה ואורך הגל שלהם (L) מתקצר. המשמעות היא שהתלילות הגל עולה והוא הופך להיות בלתי יציב כאשר גובה הגל שווה או גדול משביעית מאורך הגל:

$$H/L \geq 1/7$$

כלומר, אם גובה הגל הוא מטר אחד (H = 1 מטר) ואורכו 7 מטר (L = 7 מטר), אז הגל מוגדר כלא יציב. החיכוך בחלק התחתון (הקידמי) של הגל מעכב את בסיס הגל ומאפשר לחלק העליון של הגל (פסגת הגל) להמשיך לנוע קדימה. כתוצאה מכך הגל נשבר.

משברים גלים במפרצים ובכַך

אנרגית הגלים פרופורציונלית ל**אמפליטודת הגל** (חצי מגובה הגל) בריבוע (a^2). גל שהאמפליטודה שלו גדולה פי שתים מגל אחר, האנרגיה שלו תהיה פי ארבע גבוהה יותר. לדוגמא, לגל בגובה ארבע מטר (אמפליטודה של שני מטר) תהיה פי ארבע יותר אנרגיה מגל בגובה שני מטר (אמפליטודה של מטר אחד).



איור 40

התכנסות גלים לכיוון כף, העצמה של אנרגית הגלים. התבדרות גלים במפרץ קעור ודעיכה של אנרגית הגלים.
(Oceanography Invitation to ;Paul R. Pinet)

כשגלי ים המתקרבים אל קו החוף, קווי הזרימה שלהם נוטים להסתדר במקביל לחוף אותו הם עתידים לפגוש (איור 40). קווי הזרימה מתרכזים לכיוון כף הבולט לכיוון הים ומתבדרים באזור מפרץ עם קו חוף קעור וארוך וכתוצאה מכך אנרגית הגלים גודלת ומתרכזת בכפים ומתבדרת ודועכת במפרצים. כתוצאה מכך גובה הגלים בכפים גבוה יותר מאשר במפרצים, ביחס ריבועי לאנרגיה.

גלי גאות ושפל

נסיון השייט של הספנים הרומאים נרכש באזור אגן הים התיכון. לכן, כשהצי הרומאי בפיקודו של יוליוס קיסר הגיע למפרץ פגוול (Pegwell Bay) שבתעלה האנגלית בבריטניה, נתקלו ספנים מיומנים אלו במכשול לא מוכר: תופעת הגאות ושפל. בלילה הראשון, אחרי שרוב הספינות כבר הגיעו לחוף, החלה הגאות. ספינות האספקה של הצי הרומי החלו לטבוע ולהתנגש אחת בשניה. הנזק היה רב מאוד. האספקה בבטן הספינות, שהיתה מיועדת לכוחות הצבאים בתקופת החורף האנגלי, ניזוקה. ליוליוס קיסר לא נותרה כל ברירה - הוא נסוג בחזרה לים. תופעת הגאות והשפל שבתעלה האנגלית, שינתה את ההיסטוריה.

מהם הגאות והשפל?

גאות ושפל הם שינויים מחזוריים בגובה מפלס פני הים, המתחוללים בגלל השפעת כוח הכבידה של הירח, השמש וגופים שמימיים נוספים על מעטפת המים של כדור הארץ. גובה הגלים משתנה במקומות שונים על פני כדור הארץ. **המשרעת** (הפרש בגובה פני הים בין שיא הגאות לבין שיא השפל) יכולה להשתנות מהפרש של סנטמטרים ספורים באזורים מסוימים (כמו למשל באזור ים התיכון) ועד להפרשי גובה של 15 מטר (כמו למשל, במפרץ פאנדי Bay of Fundy בנובה סקוטיה, קנדה). כל חצי כדור הארץ הפונה לעבר הירח מושפע מהגאות. לכן אורך כל הגאות הוא כמחצית מהיקף כדור הארץ, כ-20,000 ק"מ. מאחר וגל רדוד מוגדר כגל שעומקו קטן או שווה ל-1/20 מאורכו:

$$Water\ Depth \leq \frac{Wavelenght}{20}$$

אם נציב את אורך גל הגאות במשוואה (20,000 ק"מ), נראה כי גל הגאות הוא גל רדוד המושפע מהחיכוך עם קרקעית הים ועם היבשות הסובבות את האוקינוסים.

בפרק זה נדון במספר תופעות הקשורות בגאות ובשפל:

1. מהו הגורם לגאות?
2. מדוע הירח, למרות שהוא גוף שמימי והרבה יותר קטן במסתו מהשמש, הוא הגוף הדומננטי בהשפעה על הגאות?
3. למה יש גאות ושפל פעמיים ביום?
4. מדוע משתנה המשרעת של גל הגאות והשפל במהלך החודש?

מה גורם לגאות ולשפל?

כוח המשיכה של הירח גורם למעטפת המים להמשך לכיוון הירח בצד הקרוב לירח. על הציר שבין מרכז הירח למרכז כדור הארץ בצד הקרוב לירח, נוצרת "בליטה" של מים (איור 41). מאחר וכדור הארץ מסתובב סביב צירו ובכל זמן נקודה אחרת על פני כדור פונה כלפי הירח, "הבליטה" היא גל גאות מתקדם.

כוחות המשיכה בין השמש, הירח וכדור הארץ

כל ימאי מתחיל יודע כי בתופעת הגאות והשפל, הירח הוא זה שמשפיע יותר על התופעה מהשמש. השמש רחוקה יותר מכדור הארץ, יחסית לירח, אך גם כבדה יותר (טבלה 5). אז מדוע הירח הוא בעל ההשפעה המשמעותית יותר על גלי הגאות?

איור 41

גאות בצד הפונה אל הירח בגלל כוח המשיכה שבין כדור הארץ לבין הירח.
Paul R. Pinet;)
Invitation to
(Oceanography

טבלה 5. נתוני מרחק ומשקל של השמש והירח

מרחק השמש מכדור הארץ	149,600,000 ק"מ
משקל השמש	$1.98X10^{30}$ ק"ג
מרחק הירח מכדור הארץ	384,500 ק"מ
משקל הירח	$7.35X10^{22}$ ק"ג
G **קבוע** הכבידה האוניברסלי	$6.67428 \times 10^{11} \frac{m^3}{sec^2 \cdot kg}$

המשיכה בין השמש והירח לבין כדור הארץ

כוח המשיכה (חוקי ניוטון) מגדיר כי בין כל שני גופים כח המשיכה פרופרציוני למכפלת מסותיהם חלקי המרחק שבינם - בריבוע.

$$F = \frac{G \cdot M \cdot m}{R^2}$$

F - הכוח שכל אחד מהגופים מפעיל על הגוף השני

R - המרחק בין מרכזי הכובד שלהם

M - מסת כדור הארץ

m - מסת הגוף השמימי (ירח, שמש)

G - **קבוע**, הנקרא קבוע הכבידה האוניברסלי

נציב את הנתונים מטבלה 5 במשוואות כוחות המשיכה -

כח המשיכה בין כדור הארץ לבין הירח הוא:

$$F_{M_e} = \frac{G \cdot M_e \cdot m_m}{R_{me}^{2\ 2}}$$

F_{M_a} - כוח המשיכה בין כדור הארץ לבין הירח

M_e - מסת כדור הארץ

M_m - מסת הירח

R_{ma} - המרחק שבין מרכז כדור הארץ למרכז הירח

G - קבוע הכבידה האוניברסלי

כח המשיכה בין כדור הארץ לבין השמש הוא:

$$F_{M_s} = \frac{G \cdot M_e \cdot m_s}{R_{se}^{2\ 2}}$$

F_{M_a} - הוא כוח המשיכה בין כדור הארץ לבין השמש

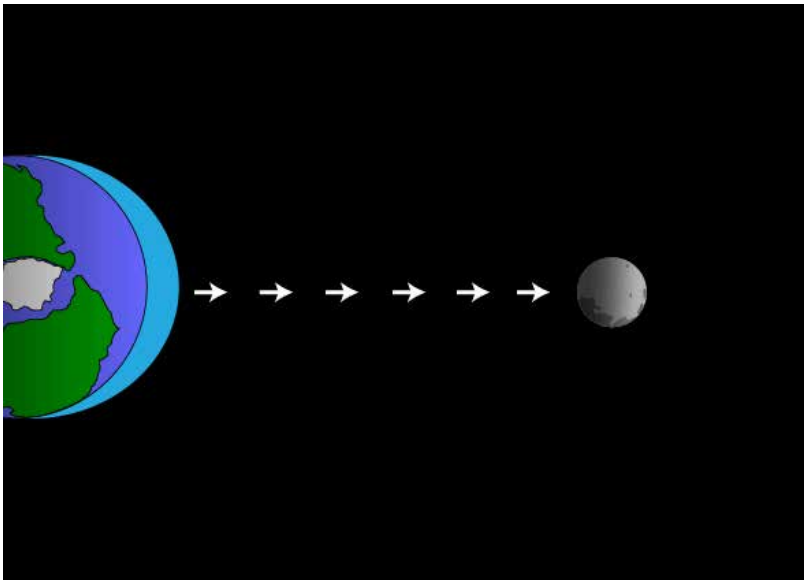
M_e - מסת כדור הארץ

M_m - מסת השמש

R_{ma} - המרחק שבין מרכז כדור הארץ למרכז השמש

G - קבוע הכבידה האוניברסלי

הציבו את הנתונים ובצעו את החישובים.



איור 42

מעטפת המים נמשכת לגוף השמימי יותר ממרכז כדור הארץ מאחר והיא קרובה אליו יותר.
(SciJinks)

לאחר הצבת הנתונים וביצוע החישובים שבמסגרת, נגלה כי בהתחשב במסת השמש והירח ובמרחקם מכדור הארץ, **המשיכה בין כדור הארץ לבין השמש חזקה פי 178 בהשוואה למשיכה בין כדור הארץ לבין הירח.**

אולם, בכוח המשיכה הפועל על כדור הארץ ישנו חוסר אחידות בגלל הרדיוס של כדור הארץ: מעטפת המים בפני השטח של כדור הארץ קרובה יותר לשמש ולירח, מאשר מרכז כדור הארץ. לכן, כוח המשיכה בינה לבין השמש והירח גדול יותר מאשר הכוח הפועל על מרכז כדור הארץ (איור 42). אם כדור הארץ היה נמשך לעבר השמש או הירח בצורה אחידה (במרכזו ועל פניו) לא הינו מקבלים את ה"בליטה"- את הגאות. גל הגאות מורגש משום שפני הים נמשכים לכיוון השמש והירח יותר מאשר מרכז כדור הארץ, מאחר שהם קרובים יותר אליהם.

נוסיף לחישובי כוחות המשיכה גם את ההפרש שבין משיכת פני השטח בכדור הארץ לבין מרכז כדור הארץ.

המשיכה בין השמש והירח לבין פני השטח של כדור הארץ ומרכזו

ההפרש שבין משיכת פני השטח בכדור הארץ לבין מרכז כדור הארץ בא לידי ביטוי במשוואה הבאה:

$$TPE = \frac{G \cdot M \cdot m}{(R-a)^2} - \frac{G \cdot M \cdot m}{R^2}$$

TPE מבטא את הפרש בין המשיכה בפני השטח בכדור הארץ לבין כוח המשיכה במרכזו.

האיבר הראשון $\left(\frac{G \cdot M \cdot m}{(R-a)^2}\right)$ במשוואה מתאר את המשיכה בפני השטח בכדור הארץ (רדיוס ממרכז הגוף השמימי למרכז כדור הארץ פחות רדיוס כדור הארץ).

האיבר השני במשוואה $\left(\frac{G \cdot M \cdot m}{R^2}\right)$ מתאר את המשיכה במרכז כדור הארץ.

a - רדיוס כדור הארץ (6,400 ק"מ)

R - מתאר את המרחק בין מרכז השמש/ירח לבין מרכז כדור הארץ.

כל שאר המשתנים G, M, m הם כפי שהוצגו במשוואות הקודמות.

אם נעשה מכנה משותף ופישוט, נקבל:

$$TPE = \frac{G \cdot M \cdot m \cdot a \cdot (2 \cdot R - a)}{R^2 \cdot (R-a)^2}$$

מאחר ש-a קטן בהרבה מ-R, וכמעט זניח בהשוואה ל-R. 6,400 ק"מ רדיוס כדור הארץ בהשוואה ל 149,000,000 ק"מ המרחק לשמש או 384,500 ק"מ המרחק לירח. **ניתן לכן, לצמצם את האיבר (R-a) ל-R** והשינוי יהיה זניח.

במקרה כזה נקבל כי:

$$TPE = \frac{G \cdot M \cdot m \cdot a \cdot (2 \cdot R - \cancel{a})}{R \cdot (R - \cancel{a})^2} = \frac{2 \cdot G \cdot M \cdot m \cdot a}{R^3}$$

כלומר, המשיכה בין השמש והירח לכדור הארץ פרופציונית ל-R^3.

נציב שוב את הנתונים של G, M ,m ו-R של השמש הירח וכדור הארץ מטבלה 5 במשוואה החדשה.

כלומר, אם נוסיף את ההבדלים בכוחות המשיכה המופעלים על ידי השמש והירח על פני השטח של כדור הארץ, לעומת מרכזו, לנתוני המסה והמרחק, נקבל כי **השפעת כוחות המשיכה שבין הירח לבין כדור הארץ גדולים פי 2.5 מאשר כוחות המשיכה שבין השמש לבין כדור הארץ.**

מדוע יש גאות ושפל פעמיים ביום?

אפשר לדמות את הגאות למעין אליפסה של מים המסתובבת עם סיבוב כדור הארץ סביב צירו, כפי שמודגם באתר SciJinks. אליפסת מים זאת עוטפת את כדור הארץ המוצק, שציר האורך שלה מקביל תמיד לציר המחבר בין מרכז כדור הארץ לירח.

בכל נקודה ברחבי העולם, גאות ושפל מתרחשים פעמיים ביום, במחזורים של 12:25 שעות (כחצי יום ירחי). זוהי מחצית הזמן שלוקח לכל נקודה על כדור הארץ לחלוף באזור הקרוב ביותר לירח. בכל זמן נתון, הגאות מתרחשת בשני אזורים נפרדים בכדור הארץ: באזור הנמצא בצד הקרוב ביותר לירח (הפונה אל הירח) ובאזור הנמצא בצד הנגדי אליו (איור 43).

הגאות **בצד המופנה** כלפי הגוף השמימי נובעת מכוח המשיכה שבין השמש והירח לבין כדור הארץ ופרופרציוני למרחק ביניהם בשלישית (R^3). הכוח הפועל **בצד הנגדי** לגוף השמיימי, הוא **הכוח הצנטריפוגלי** (איור 44). הכוח שנובע מסיבוב כדור הארץ סביב הירח, או הירח סביב כדור הארץ (הכל יחסי). הכוח הצינטרפוגלי חייב להיות שווה בעצמתו לכוח משיכה כי אחרת כדור הארץ היה נצמד לירח, או שהיה מתרחק ממנו.

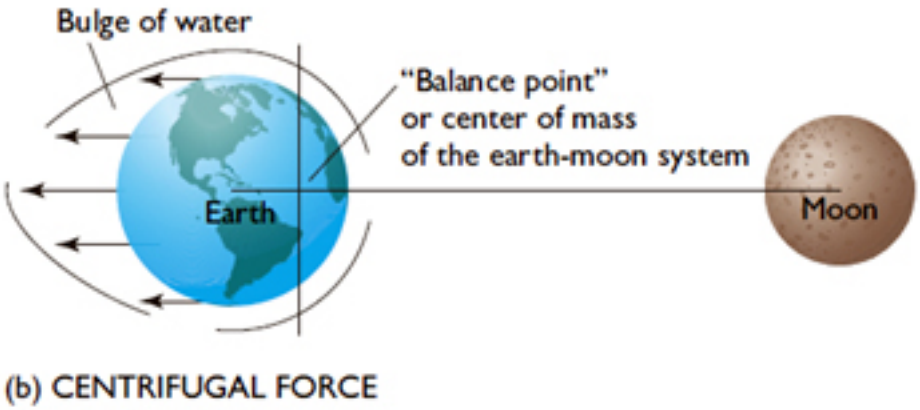
כוח צֶנְטְרִיפוּגָלִי
(מלטינית, "בורח מהמרכז": centrum - מרכז, fugere - לברוח) הוא כוח מדומה המושך גוף הנתון בתנועה מעגלית לאורך רדיוס הסיבוב, בכיוון הפונה החוצה ממרכז המעגל.

איור 43

גאות ושפל מתרחשים פעמיים ביום: פעם באזור הנמצא בצד הקרוב ביותר לירח (הפונה אל הירח) ופעם נוספת ובאזור הנמצא בצד הנגדי אליו.
Paul R. Pinet;)
Invitation to
(Oceanography

איור 44

כוח צנטריפוגלי.
Physics for)
(Animators



איור 45

גל גאות בצד המנוגד לירח. הגאות בצד המנוגד לירח נובעת מהכוח הצנטרפוגלי של סיבוב כדור הארץ והירח אחד סביב השני.
(Paul R. Pinet; Invitation to Oceanography)

כתוצאה משני התהליכים האלו גאות ושפל מתרחשים פעמים ביום: פעם אחת בגלל כוח המשיכה (איור 41), כשצידו של כדור הארץ מופנה כלפי הירח ופעם נוספת בצד הנגדי לירח (איור 45).

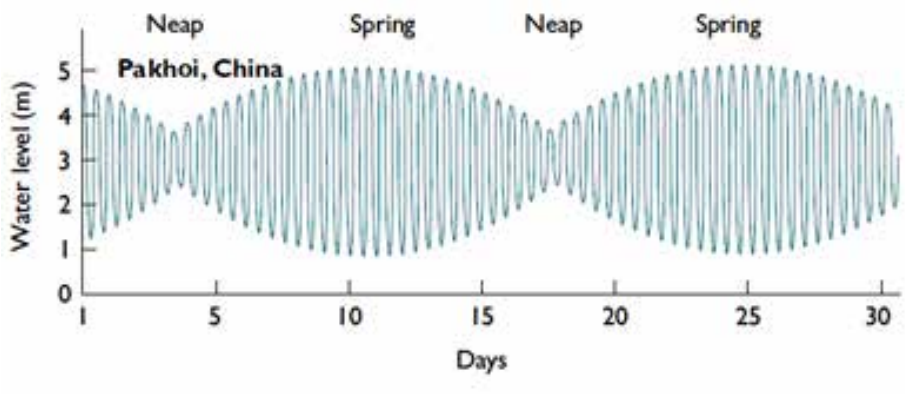
שינויים במשרעת גל הגאות במהלך החודש

פעמיים במהלך החודש משרעת הגאות היא מרבית ונקראת **Spring Tide** (אין קשר לאביב, הביטוי בא מגרמנית) ופעמים בחודש משרעת הגאות נמוכה ונקראת **Neap Tide** (איור 46).

הירח הוא הדומיננטי בתופעת הגאות והשפל, לכן כשאנחנו דנים ומסבירים את תופעות גאות ושפל בפרק זמן של חודש, הכוונה היא לחודש ירחי (כלומר, על פי לוח השנה העברי). אורכו של חודש ירחי הוא 29.5 יום בממוצע.

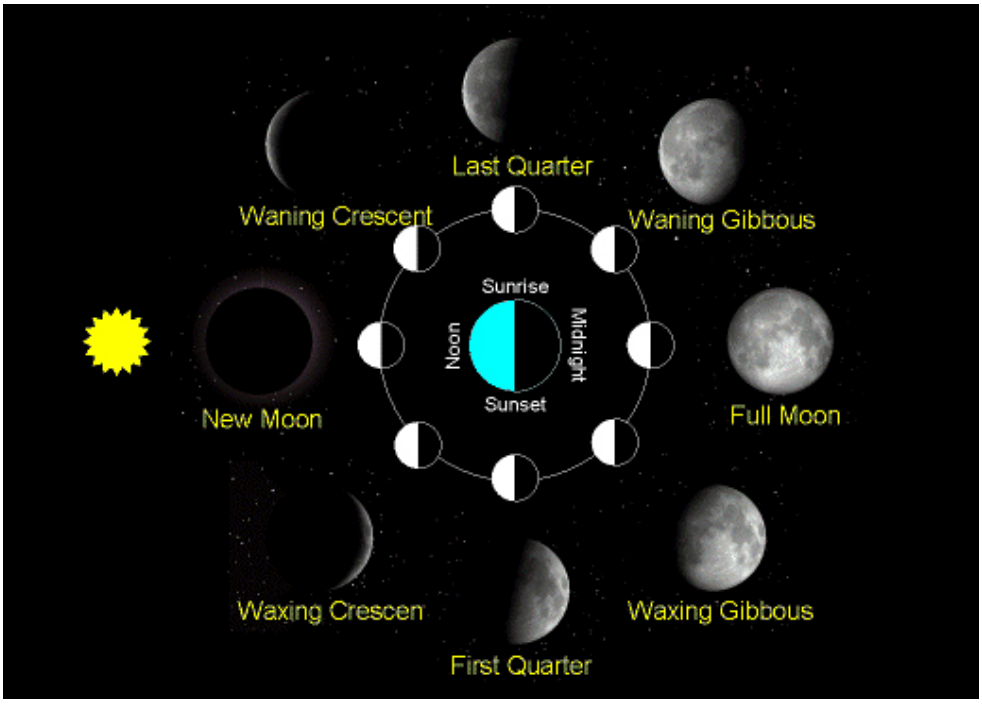
חודש ירחי ותופעת מופעי ירח

בתחילת חודש עברי (New Moon), לא רואים את הירח. מכיוון שכדור הארץ, הירח והשמש נמצאים באותו הכיוון, כשאנחנו בצד הרחוק מהשמש,אין לנו אפשרות לראות בשעות הלילה את הירח. שבועיים לאחר מכן (אמצע חודש עברי), הירח והשמש נמצאים בצדדים מנוגדים אחד לשני. לכן בשעות הלילה, כשאנו בצד המרוחק מהשמש, השמש מאירה על הירח בבהירות ואנו רואים ירח מלא (Full Moon) (איור 47).



איור 46

משרעת הגאות והשפל במועד ים מרבי (Spring Tide) **ובמועד ים רבעוני** (Neap Tide).
(Paul R. Pinet; Invitation to Oceanography)

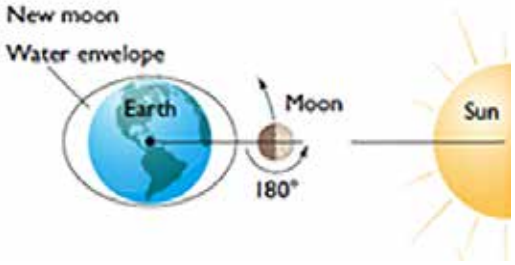


איור 47

מופעי ירח.
(Astronomy)

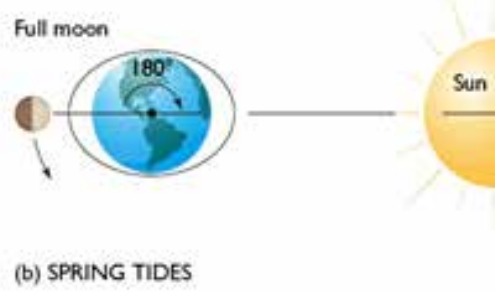
במהלך השבועיים הראשונים של החודש, אנחנו רואים את הירח גדל מאפס לכיוון ירח מלא. לאחר מכן הוא קטן עד סוף החודש ובתחילת החודש החדש, הוא נעלם שוב. בתחילת חודש עברי, כשהירח והשמש נמצאים באותו הצד ובקו אחד ביחס לכדור הארץ, כח המשיכה על מעטפת המים של כדור הארץ, משלב בין כוח המשיכה שבין הירח לכדור הארץ לבין כוח המשיכה שבין השמש לבין כדור הארץ וגורם לגאות מרבית. במקביל ובהתאמה, בצד השני של כדור הארץ הכוח הצנטרפוגלי שווה לשני כוחות אלו. לכן בראש חודש עברי יש גאות מרבית, Spring Tide (איור 48).

כשבועיים לאחר מכן, באמצע החודש העברי, הירח והשמש נמצאים בצדדים מנוגדים לכדור הארץ (איור 49).



איור 48

גאות מרבית בראש חודש עברי.
Paul R. Pinet;)
Invitation to
(Oceanography

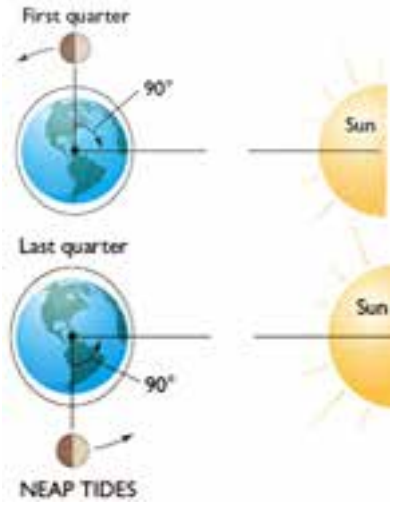


איור 49

גאות מרבית באמצע חודש עברי.
Paul R. Pinet;)
Invitation to
(Oceanography

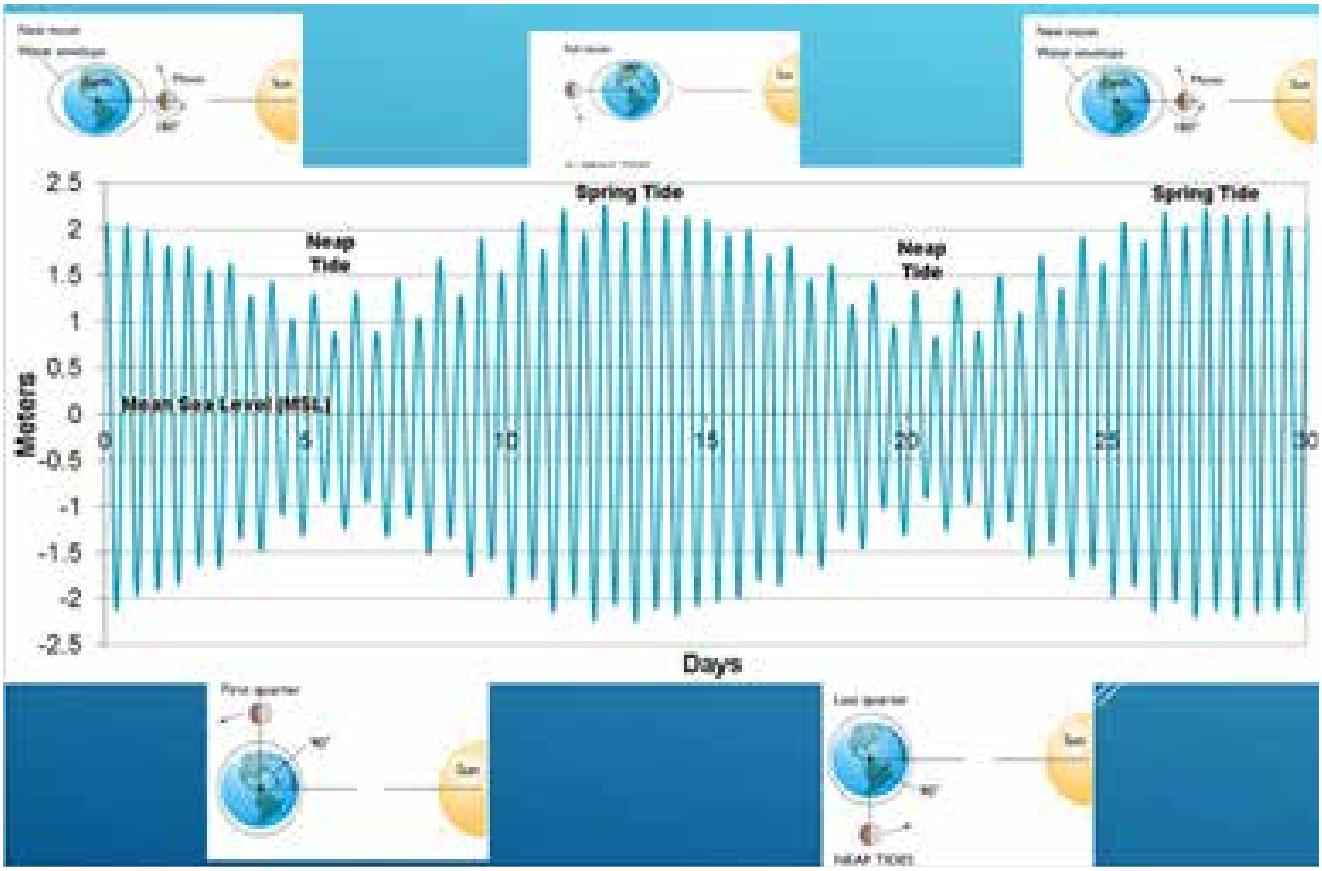
כח הכבידה שבין הירח לבין כדור הארץ מושך לכיוונו וכוח הצנטרפוגלי המאזן אותו מנגד. שילוב זה גורם לגאות בצד הרחוק מהירח. השמש גורמת לגאות בצד הנגדי לירח ובמקביל הכוח הצנטרפוגלי בהשפעתה נגרמת גאות בצד הנגדי לשמש על כדור הארץ. וכך בצד אחד של כדור הארץ יש גאות הנובעת מכוח המשיכה של הירח והכוח הצינטרפוגלי של סיבוב כדור הארץ סביב השמש. בצד השני של כדור הארץ מתקיימת גאות שהיא תוצאה של כוח המשיכה של השמש ביחד עם הכוח הצנטרפוגלי של סיבוב כדור הארץ סביב הירח. השמש והירח משלבים כוחות ו ונוצרת גאות גבוהה Spring Tide.

בשבוע הראשון והשלישי של החודש העברי, השמש והירח ניצבים זה לזה. כוח המשיכה של הירח מושך את פני הים לכיוון אחד ואילו כוח המשיכה של השמש מושך לכיוון שניצב לו (איור 50). במקביל, הכוחות הצנטרפוגלים של השמש והירח מפעילים כוח נגדי בהתאמה. כשכוחות המשיכה של הירח/שמש ניצבים זה לזה הם לא מגדילים את גובה גל הגאות. לכן בתקופות אלו הגאות היא מינמלית, Neap Tide.



איור 50

גאות ים רבעונית, בשבוע הראשון והשלישי של חודש עברי.
(Paul R. Pinet; Invitation to Oceanography)

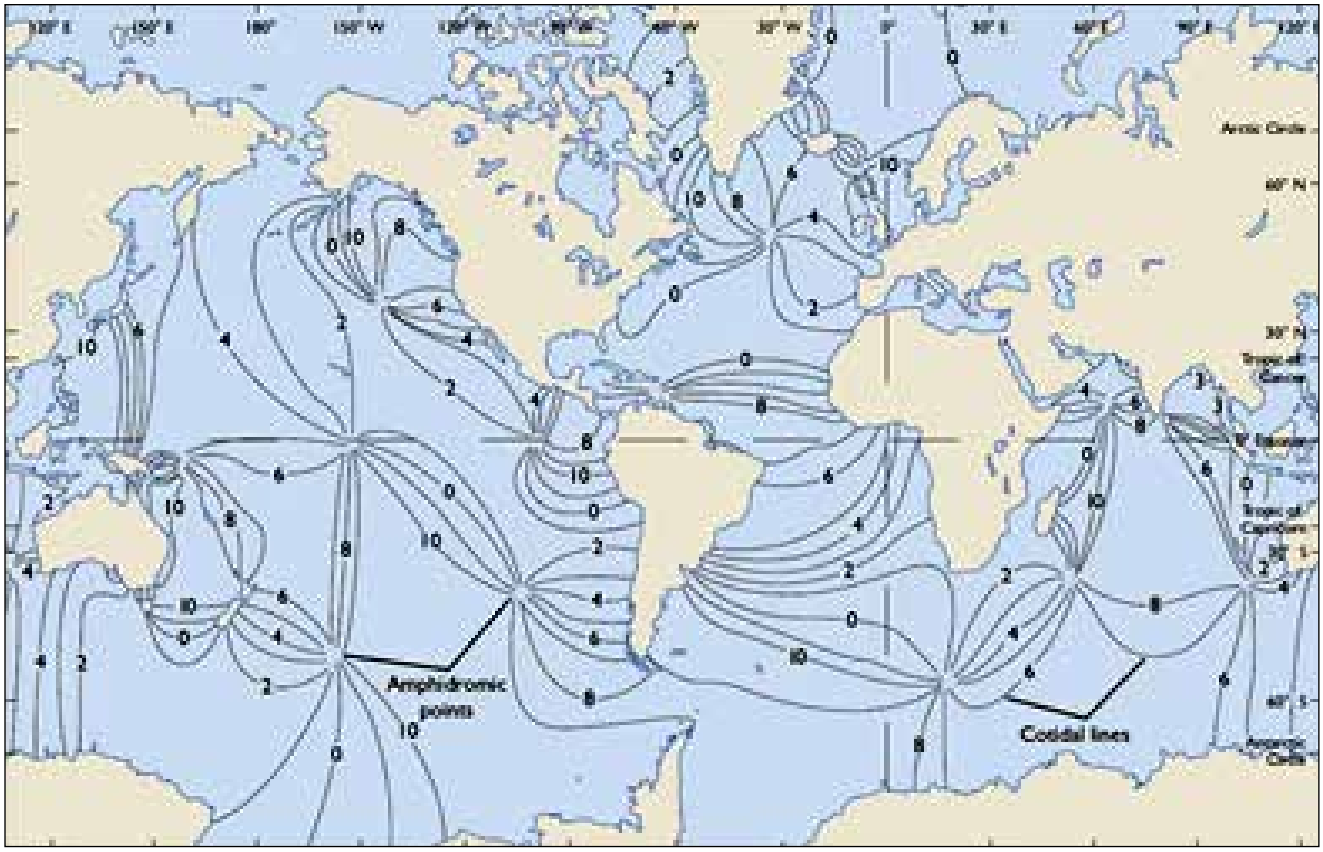


איור 51

משרעת הגאות והשפל במהלך החודש.
(מבוסס על איורים מ: Paul R. Pinet; Invitation to Oceanography)

לסיכום: כשהירח והשמש נמצאים באותו כיוון או שהם נמצאים בכיוון נגדי אחד לשני ביחס לכדור הארץ, נוצרת גאות מרבית - Spring Tide. כשהירח והשמש ניצבים זה לזה ביחס לכדור הארץ, הגאות היא מינמלית (רבעונית) Neap Tide (איור 51).

*הדיון וההסברים בפרק הדן בגאות ושפל, התייחסו לכדור הארץ אחיד. זאת אומרת לכדור שבמרכזו ארץ קשיחה המכוסה במעטפת אחידה של ים. במציאות, כדור הארץ מורכב מיבשות, אוקינוסים, אגני שולים ומפרצים. לכן גל הגאות הוא גל רדוד והמושפע מהחיכוך בקרקעית ובשולי היבשות. כל אלו משפיעים על התקדמות גל הגאות סביב כדור הארץ (איור 52): טווח הגאות והשפל הממוצע באמצע האוקיינוס הוא סביב מטר אחד. יחד עם זאת, באזורי חוף מסוימים, טווח הגאות יכול להיות גבוה פי 10, באזורים הקיצוניים ביותר. קווי החוף המשתנים בעולם מכתיבים במידה רבה את גובה משרעת הגאות והשפל. הגאות הגבוהה ביותר בעולם היא במפרץ פונדי בקנדה (Bay of Fundy), שם ההבדל בין גאות לשפל יכול להיות עד 16.3 מטר. לאורך חופי בריטניה, טווח הגאות משתנה בין 0.5 מטר עד למקסימום של 15 מטר. בים התיכון ההפרש בין שיא הגאות לשיא השפל הוא עשרות בודדות של סנטימטרים.



איור 52

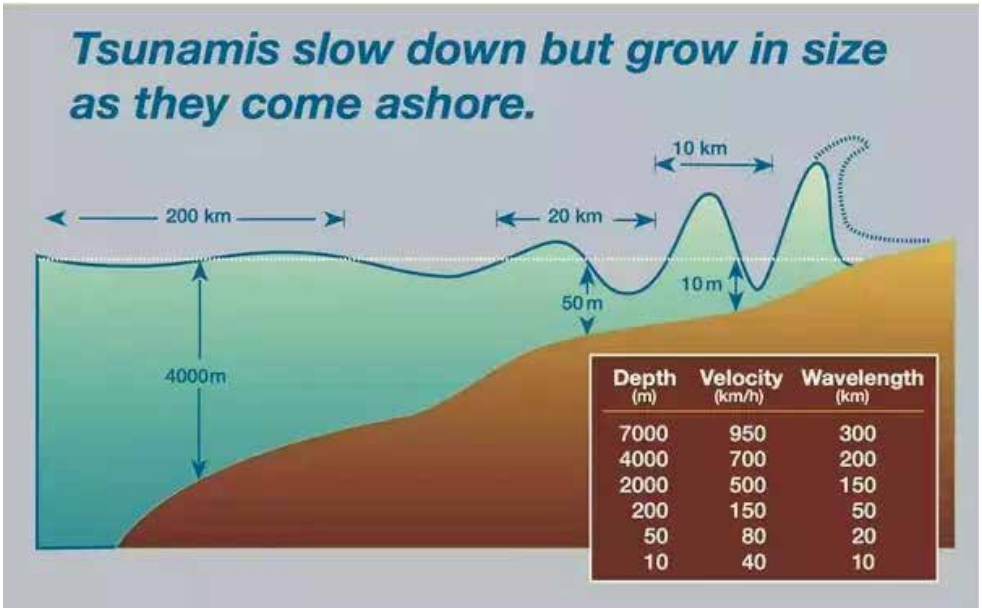
התפשטות גל הגאות באוקינוסים ובימים.
(Oceanography; Invitation to Paul R. Pinet)

גלי צונאמי (Tsunami)

מקורו של השם צונאמי הוא בשפה היפנית, פירושו 'גל נמל'. כשאבן נופלת לשלולית מים, היא יוצרת סדרת גלים שמתפשטת מנקודת הנפילה לכל הכיוונים. גל צונמי מתפתח בדרך דומה: הפרעה - תזוזה פתאומית של קרקעית הים הנגרמת על ידי רעידות אדמה, התפרצויות הר געש תת ימי, או גלישת קרקע - עלולה לגרום לתזוזת המים באזור, כלומר, ליצירת גל צונאמי שיתפתח מעל אזור ההפרעה. רוב גלי צונאמי נוצרים בעקבות רעידות אדמה. מעל אזור רעש האדמה נוצרת סדרת גלים נמוכים, שיש להם אורך גל ארוך וזמן מחזור ארוך.

בעוד שגלים הנוצרים בהשפעת הרוח משפיעים רק על החלק העליון של עמודת המים, גלי צונמי משפיעים על כל עמודת המים, מהקרקעית ועד לפני הים. גלי הצונמי נעים באופן מעגלי מנקודת המוצא שלהם, באזור הרעש ומתפשטים ברחבי האוקיאנוס.

מאחר שהגל נוצר מתזוזת הקרקע, שהיא בדרך כלל בסדר גודל של מטר, הגל שנוצר בים העמוק, מעל רעידת האדמה, הוא גל שגבהו מאותו סדר גודל - מטר אחד. מאחר שאורך הגל הוא עשרות קילומטרים, סירה שנמצאת בים באזור הרעש אינה מרגישה כלל את הגל שנוצר.



איור 53

גל צונמי, בים העמוק ועם התקרבתו לחוף.
(Quora)

מהירות התקדמות של גל צונאמי

גלי הצונאמי בהגדרתם הם גלים רדודים, אשר נוצרו מתזוזת קרקע. אלו גלים שמרגישים את הקרקע ובהתקדמותם יש חיכוך בינם לבין הקרקע ולכן מהירות התקדמותם מחושבת לפי נוסחת ההתקדמות של גל רדוד. מהירות הגל תלויה בעומק הים ($C = \sqrt{g \cdot D}$) - ככל שעומק המים רדוד יותר מהירות התקדמות הגל איטית יותר.

באוקיינוס הפתוח, בים העמוק, גלי צונאמי שנוצרו בגלל רעידת אדמה בתעלה אוקיינית בעומק של 5,000 מטר, נעים בקצב של כ-760 ק"מ לשעה. מהירות זו דומה למהירות של מטוס סילון. כשגלים אלו מגיעים למים רדודים באזור החוף, מאיטים גלי הצונאמי את מהירותם במידה ניכרת ובעומק של 20 מטר מהירותם קטנה לסביבות 50 קמ"ש.

גובה גלי צונמי בהגעתם לחוף

כאמור, גובהו של גל צונמי בים העמוק הוא כ-1 מטר. אך כשהגל מתקרב ליבשה, חזית הגל הנמצאת בים הרדוד יוצרת חיכוך של הגל עם הקרקעית גדלה ומהירותו מואטת. ירכתי הגל, הנמצאים עדין בים העמוק, כמאה קילומטר מאחור, שומרים על מהירותם הגבוהה ומשיגים בסופו של דבר את חזית הגל והגל נהיה גבוה ותלול. (איור 53).

כמה גבוה יכול להיות גל הצונאמי?

בתחילת הפרק הגדרנו כי האנרגיה של הגל פרופרציונית לאמפליטודה שלו.

$$E = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot a^2$$

E - אנרגית הגל

a - אמפליטודת הגל

g - קבוע הכבידה

p - צפיפות המים

כדי לקבל תשובה מלאה לשאלה זאת, צריך לחשב גם את **שטף האנרגיה**: כמות האנרגיה בחזית הגל ליחידת זמן, או: **מהירת הגל** מכופל באנרגיה. מאחר שגל הצונמי הוא גל רדוד, אז:

$$c \cdot E = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot a^2 \cdot \sqrt{g \cdot D}$$

c - מהירות הגל

D - עומק הים

שטף האנרגיה הוא קבוע. שטף אנרגיה בים העמוק, זהה לשטף האנרגיה בים הרדוד.

$$c_{deep} \cdot E_{deep} = c_{Shallow} \cdot E_{shallow} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot a_{deep}^2 \cdot \sqrt{g \cdot D_{deep}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot a_{shallow}^2 \cdot \sqrt{g \cdot D_{shallow}}$$

מכאן ש: $a_{deep}^2 \cdot \sqrt{D_{deep}} = a_{shallow}^2 \cdot \sqrt{D_{shallow}}$

או: $$\frac{a_{deep}^2 \cdot \sqrt{D_{deep}}}{\sqrt{D_{shallow}}} = a_{shallow}^2$$

וגם: $$\sqrt{\frac{a_{deep}^2 \cdot \sqrt{D_{deep}}}{\sqrt{D_{shallow}}}} = a_{shallow} = \frac{1}{2} \cdot h$$

כאשר h הוא גובה הגל.

מה קורה למשל לגל שנוצר באזור תעלה אוקינית בעומק של 7,000 מטר, אמפליטודה של מטר, כשהוא מגיע לאזור החוף לעומק של 5 מטר?

$$D_{deep} = 7{,}000\ m;\ a_{deep} = 1\ m;\ D_{shallow}$$

$$\sqrt{\frac{a_{deep}^2 \cdot \sqrt{D_{deep}}}{\sqrt{D_{shallow}}}} = \sqrt{\frac{1 \cdot \sqrt{7{,}000}}{\sqrt{5}}} = 6\ m$$

$h = 2 \cdot a = 12\ m$

איור 54

גל צונמי שוטף את חוף יפן, 2011.
(SMS - Tsunami Warning)

זאת אומרת שגל שכמעט ואינו מורגש בים העמוק, יכול להגיע לגובה של 12 מ' בהגיעו אל החוף. הגיע הזמן לשבור כמה מיתוסים. גלים בגובה של 12-10 מטר בחוף, אינם נדירים. יש הרבה מאוד ימים: בהוואי, בחוף המערבי של אמריקה, בדרום אפריקה ובמקומות רבים נוספים, בהם ישנם גלים בסדרי גודל כאלה, המהווים חגיגה לגולשי הגלים.

אז למה גל צונאמי מסוכן כל כך? מדוע דווקא גל זה גורם לנזקים רבים כל כך? מדוע שלא כמו גלי חוף בעלי גובה, גל צונאמי בגובה דומה מסוכן כל כך?

מה שהופך גל צונמאי להיות גל מסוכן הוא לא גובה הגל, אלא אורך הגל.

כשגל בגובה 10 מטר פוגע בחוף ואורכו הוא עשרות קילומטרים, האנרגיה שלו עצומה ולכן הוא שוטף את החוף עד לפנים הארץ, דורס ומחריב כל מה שנמצא בדרכו (איור 54).

גובה גל צונאמי בים העמוק, נמוך בהשוואה לגובה גלי רוח, אך אורכו ארוך מאוד. כשמתקרבים לחוף, גובה גל הצונאמי גדל ויכול להגיע לגובה של כעשרה מטר, כמו גלי רוח גבוהים. אבל בעוד שאורך גל רוח המגיע לחוף הוא עשרות מטרים, אורך גל צונאמי הוא כמאה קילומטר וזאת הסכנה האמיתית של גלי צונאמי כשהם שוטפים את החוף, עמוק לתוך היבשה.

7.4 יחסי גומלין בין הים לאטמוספירה

מיה אלסר

במערכת האקלים של כדור הארץ משתתפים גורמים רבים: קרינת השמש, האַטְמוֹסְפֵרָה (כיסוי הגזים העוטף את כדור הארץ), ההִידְרוֹסְפֵרָה (האוקיינוסים, הימים, הנהרות, האגמים), הלִיתוֹסְפֵרָה (קרום כדור הארץ המוצק, פני השטח והנוף), הבִּיוֹסְפֵרָה (עולם החי, על הצמחים ובעלי החיים שבו, כולל בני האדם) והקְרִיוֹסְפֵרָה (כיפות הקרח בקטבים והקרח ביבשות). מערכת האקלים היא מערכת מורכבת ורגישה לשינויים, בין הגורמים המשתתפים בה מתקיימים קשרי גומלין. כל מרכיב במערכת משפיע על המרכיבים האחרים, ובו בזמן גם מושפע מהם.

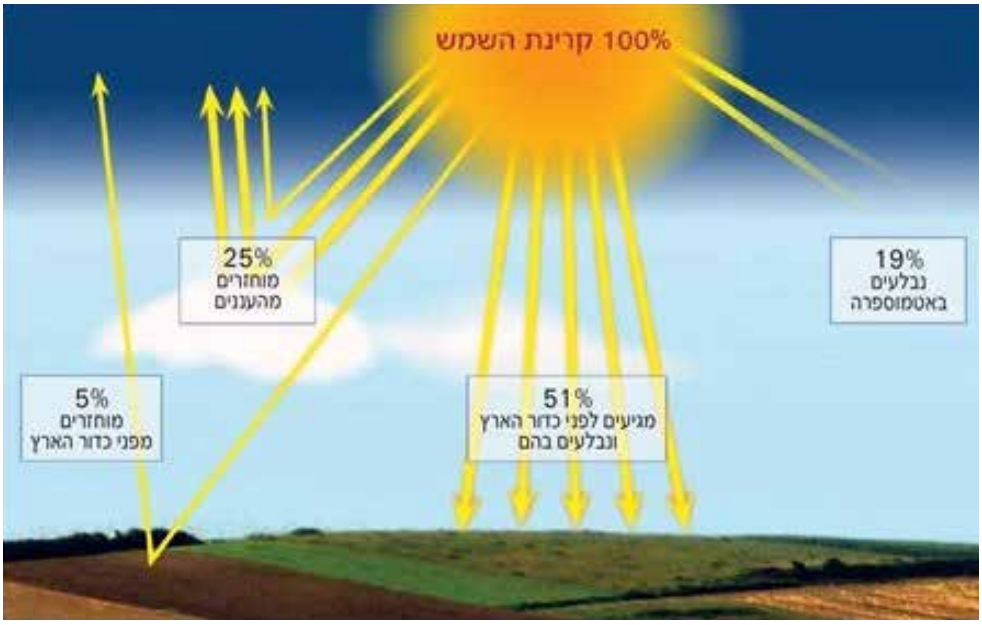
קרינת השמש היא מקור האנרגיה של מערכת האקלים, והיא הגורם המרכזי בהשפעתו על התהליכים המתרחשים במערכת זאת. השמש מייצרת קרינה המגיעה אל כדור הארץ. חלק מהקרינה מוחזר אל החלל; חלק אחר נבלע בגזים, באדי המים ובעננים שבאטמוספרה; והחלק הנותר נבלע בפני כדור הארץ, ואז הוא נפלט חזרה אל האטמוספרה בצורת אנרגיה של חום. מכאן מסתבר שהחום השורר באטמוספרה של כדור הארץ, מקורו בפני הארץ (ולא בקרינת השמש הישירה, כפי שאנחנו נוטים לחשוב).

מאזן האנרגיה

במערכת האנרגיה שבין השמש ובין כדור הארץ מתקיים מאזן בין הכניסה של אנרגיית הקרינה של השמש אל האטמוספרה ואל כדור הארץ, ובין היציאה של אנרגיה זאת מהאטמוספרה ומכדור הארץ. כל שינוי במאזן זה יכול לגרום לשינויים במערכת האקלים. ארגון IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) - הוועדה הבין-ממשלתית לחקר שינויי האקלים וכן מדענים בכל רחבי העולם, קובעים כי כיום מתקיימים שינויים במאזן האנרגיה, ובעקבותיהם נגרמים שינויי האקלים ובכללם ההתחממות הגלובאלית. עוד הם קובעים כי למעשי האדם יש חלק מכריע בשינויים אלה. נסביר את מהותו של מאזן האנרגיה ואת חלקו של האדם בהפרתו. הכמות הכוללת (100%) של האנרגיה המגיעה מן השמש אל כדור הארץ, נחלקת באופן הבא (איור 55):

- כ-51% עוברים באטמוספרה ללא הפרעה ומגיעים אל פני השטח של כדור הארץ, נבלעים בהם ומחממים את קרקע היבשות ואת מי האוקיינוסים. אנרגיה זאת מומרת לחום והיא נפלטת חזרה אל האטמוספרה ודרכה אל החלל, בצורת קרינת חום ארוכת גל (קרינה תת-אדומה, אינפרה אדומה).
- כ-19% נבלעים באטמוספרה עצמה, על ידי מולקולות האוויר השונות, וגם הם נפלטים חזרה לאטמוספרה כקרינת חום.
- כ-30% מוחזרים ישירות אל החלל: מהם 25% מוחזרים על ידי העננים, ו-5% מוחזרים על ידי משטחים בהירים המצויים בפני השטח של כדור הארץ, כקרינת חום ארוכת גל.

כמות האנרגיה של השמש המגיעה אל כדור הארץ לאורך תקופת זמן שווה לסך כל האנרגיה הנפלטת מכדור הארץ, הן כקרינת חום אל החלל והן קרינת החום הנותרת באטמוספרה באותה תקופת זמן.



איור 55

מאזן האנרגיה בכדור הארץ - האנרגיה המגיעה מן השמש, האנרגיה המוחזרת והאנרגיה הנבלעת בכדור הארץ ובאטמוספרה.
(כדור הארץ והסביבה)

שיווי משקל קרינתי
מצב של שוויון בין אנרגיית השמש המגיעה אל כדור הארץ ובין סך כל האנרגיה הנפלטת כקרינת חום מכדור הארץ אל החלל החיצון לאורך תקופת זמן נתונה.

זהו **שיווי המשקל הקרינתי** בין קליטת הקרינה מן השמש ופליטת הקרינה מכדור הארץ. במאזן שבין כמות האנרגיה הנפלטת מכדור הארץ כקרינת חום חזרה לחלל החיצון ולאטמוספרה, ובין הכמות הנותרת באטמוספרה כתוצאה מתהליכים אחרים, הטמפרטורה הממוצעת של כדור הארץ היא כ-15.3°C. אבל מאזן זה יכול להתערער, למשל בעקבות עלייה בריכוז הפחמן הדו-חמצני באטמוספרה. עלייה כזאת עלולה לגרום לצמצום הכמות של קרינת החום הנפלטת מכדור הארץ אל החלל החיצון. במצב כזה, מאחר שכמות הקרינה המגיעה אל כדור הארץ נותרת ללא שינוי, יש לצפות שהטמפרטורות בכדור הארץ יעלו עקב עודף הקרינה הנותרת באטמוספרה, עד שייווצר שיווי משקל חדש.

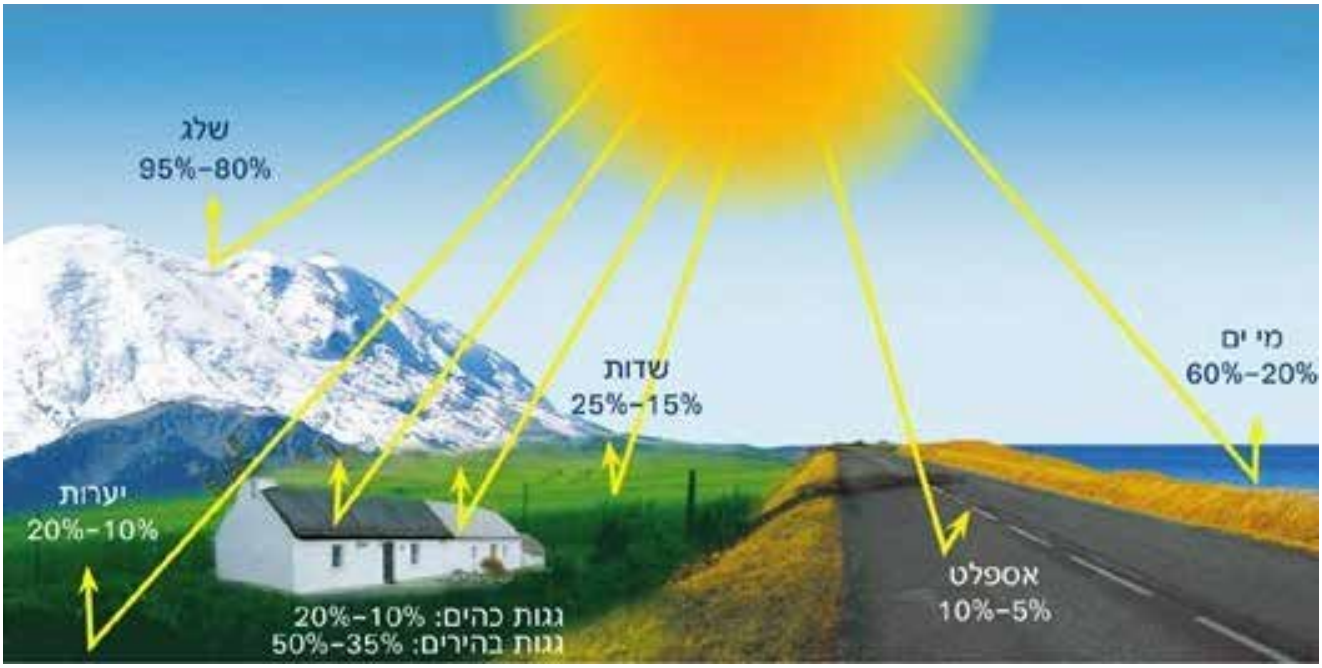
שינויי אקלים

ההתחממות הגלובאלית

מאז המאה ה-19 מתרחשים שינויים במאזן האנרגיה שתואר כאן, והם הם הגורמים לשינויי האקלים ולהתחממות הגלובאלית. שני השינויים העיקריים הם: שינויים בשיעור האלבֵּדו, והתגברות אפקט החממה. נסביר שינויים אלה:

1. החזר אנרגיית השמש לחלל - האַלְבֵּדו

כפי שציינו, חלק מן הקרינה של השמש נבלע בפני השטח, וחלק מוחזר מהם אל החלל. שיעור ההחזר מתוך סך כל הקרינה של השמש המגיעה אל כדור הארץ, נקרא "אַלְבֵּדו" (איור 56). כאשר קרינת השמש פוגעת במשטחים כהים - אחוז גדול ממנה נבלע בהם, ורק אחוז קטן ממנה מוחזר, ולכן משטחים אלה מוגדרים כ"בעלי אלבדו נמוך" (כלומר, אחוז הקרינה המוחזרת מהם הוא נמוך). כאשר הקרינה פוגעת במשטחים בהירים - רק אחוז קטן ממנה נבלע בהם, וחלקה הגדול מוחזר, ועל כן הם מוגדרים כ"בעלי אלבדו גבוה" (כלומר, אחוז הקרינה המוחזרת מהם הוא גבוה).



איור 56

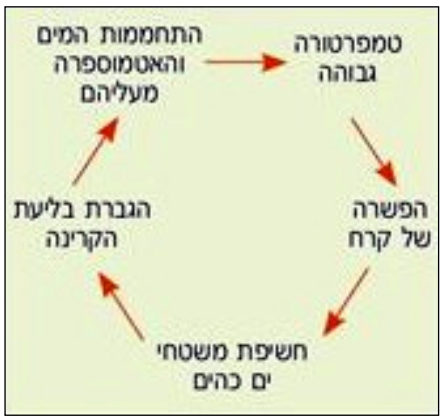
האַלְבֵדו, שיעור הקרינה המוחזרת ממשטחים שונים על פני כדור הארץ.
(כדור הארץ והסביבה)

לשיעור האלבדו יש חשיבות גדולה. ככל שהאלבדו נמוך יותר כן שיעור הקרינה הנבלעת בפני כדור הארץ גדול יותר - מפני השטח נפלטת קרינת חום בכמות גדולה יותר, ואז פני השטח והאטמוספרה שמעליהם מתחממים יותר.

השיעור הממוצע של האלבדו בעולם כולו הוא כ-30%, אולם, בגלל ההתחממות הגלובאלית חלים בשיעורי האלבדו כמה שינויים חשובים. נבחן שינויים אלה.

הצמצום בשטחם של קרחוני הקטבים גורם להקטנת האלבדו

חלק חשוב של ההחזרה של קרינת השמש לחלל מתרחש במשטחי הקרח העצומים המצויים בקטבים, ששיעור האלבדו שלהם הוא כמעט 80%, בעוד שהאוקיינוסים הכהים ומשטחי היבשות בולעים את מרבית הקרינה. הצמצום שחל בשטחו של כיסוי הקרח מביא לידי כך ששיעור האלבדו של כדור הארץ קטן, וכמות גדולה יותר של אנרגיה נבלעת בפני השטח. תצפיות שנערכו בשנת 2008 הראו שממוצע הטמפרטורות בסתיו באזור הארקטי היה גבוה יותר בשנה זאת ב-5°C לעומת הסתיו בשנה שקדמה לו. פעל כאן מנגנון של משוב חיובי (איור 57): בגלל הטמפרטורות החמות יחסית ששררו באזור הארקטי בשנים האחרונות - בעונת הקיץ הפשיר כל הקרח, ובמקום משטחי קרח בהירים נחשפו מי האוקיינוס הכהים, שבלעו קרינת שמש רבה. בליעת האנרגיה, והחזרתה כאנרגיה של חום, הביאו לחימום המים והאטמוספרה שמעליהם - וכך קרה שהסתיו שהגיע בעקבות הקיץ היה חמים יותר וירדה בו כמות שלג מועטה יותר.

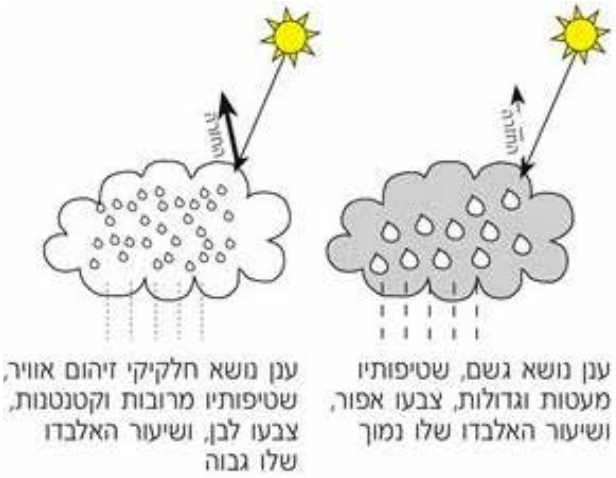


איור 57

תהליך המשוב החיובי הגורם לעליית הטמפרטורה באזורי הקטבים.
(כדור הארץ והסביבה)

איור 58

זיהום אוויר ושיעורי אלבדו בעננים.
(כדור הארץ והסביבה)



זיהום האוויר גורם לתהליכי שינוי בעננים ולהגברת האלבדו

בעננים "נקיים", שאינם מושפעים מחלקיקי זיהום האוויר (פיח, עשן ו**אווירוסולים**) - הטיפות גדֵלות בהתמדה ובקצב איטי, מתנגשות ומתלכדות זו עם זו סביב **גרעיני התעבות**, עד שהן כבדות מספיק ואז הן נופלות אל הקרקע כגשם. צבעם של עננים גשם אלה הוא אפור, ועל כן האלבדו שלהם נמוך (איור 58). זהו התהליך הטבעי המתקיים בעננים וגורם לעלייה בטמפרטורה, והוא חלק ממאזן האנרגיה שבין השמש לכדור הארץ.

מעניין כי דווקא תהליכי זיהום האוויר תורמים לירידה בטמפרטורות. כיצד? כאשר יש זיהום אוויר - העננים בהירים, הם מחזירים קרינה רבה יותר לחלל, ולפיכך האלבדו שלהם גבוה יותר מזה של עננים נקיים. זאת ועוד: בתנאים מסוימים עננים אלה גם מתפתחים לגובה רב, ונוצרות בהם כמויות גדולות של גבישי קרח זעירים, המגבירים עוד יותר את האלבדו. יש לציין גם את העננים המיוחדים הנוצרים כשובלים דקים הנפלטים ממנועיהם של מטוסי סילון. עננים אלה, המכילים גבישי קרח, שוהים באטמוספרה בגובה רב ומקטינים אף הם את כמות הקרינה המגיעה לקרקע. אם כן, כתוצאה מזיהום האוויר - שיעור האלבדו של העננים גדל, כמות הקרינה המגיעה אל כדור הארץ פוחתת, וההתחממות הגלובאלית קטֵנה.

זהו תהליך של **משוב שלילי** - תהליך המקטין את השינוי במערכת, ומגמתו החזרת המערכת לאיזון. אלא שלתהליך זיהום האוויר יש השפעה שלילית גם על האקלים - בגלל זיהום האוויר גדלה בעננים כמות החלקיקים המהווים גרעיני התעבות. הכמות הגדולה של גרעיני ההתעבות לא מאפשרת היווצרות של טיפות גדולות וכבדות, אלא רק היווצרות של טיפונות קטנות וקלות. התוצאה היא יצירת עננים רבים שאינם מורידים גשם, ולעתים אף עצירת הגשמים.

בירוא יערות גורם להגדלת האלבדו ולירידה בכמות המשקעים

גם ל**בירוא יערות** הגשם בידי האדם יש השפעה על האלבדו. נבחן, לדוגמה, את הנעשה באזור הג'ונגלים הטרופיים של אגן האמזונס שבברזיל (איור 59), שם נכרתו בחמישים השנים האחרונות עצים כ-4 מיליון קמ"ר, שהם כ-15% משטחם של יערות הגשם באמזונס. במקומם נזרעו שטחים של גידולים חקלאיים כמו סויה וקני סוכר.

אווירוסולים
חלקיקים זעירים המצויים באוויר, בחלק התחתון של האטמוספרה, ומקורם באבק טבעי או בחלקיקי זיהום שנוצרו בידי האדם בתעשייה, בתחבורה וכדומה.

גרעיני התעבות
חלקיקים מיקרוסקופיים מוצקים המרחפים באוויר (כגון: חלקיקי אבק, חלקיקי פיח, אבקת צמחים וגבישי מלח), שסביבם מתעבים אדי המים שבאוויר ויוצרים טיפונות של מים. טיפונת תהפוך לטיפת גשם כאשר תהיה כבדה יותר מזרמי אוויר העולים מן הקרקע, ואז היא תרד אל פני הארץ.

בירוא יערות
כריתה או שרפה של עצי יער במטרה לפנות שטחי קרקע ולנצלם למטרות אחרות כגון חקלאות ומרעה, הפקת מחצבים המצויים בשטח היער, שימוש בעצי היער כחומר גלם לתעשייה ולבניין ועוד.

איור 59

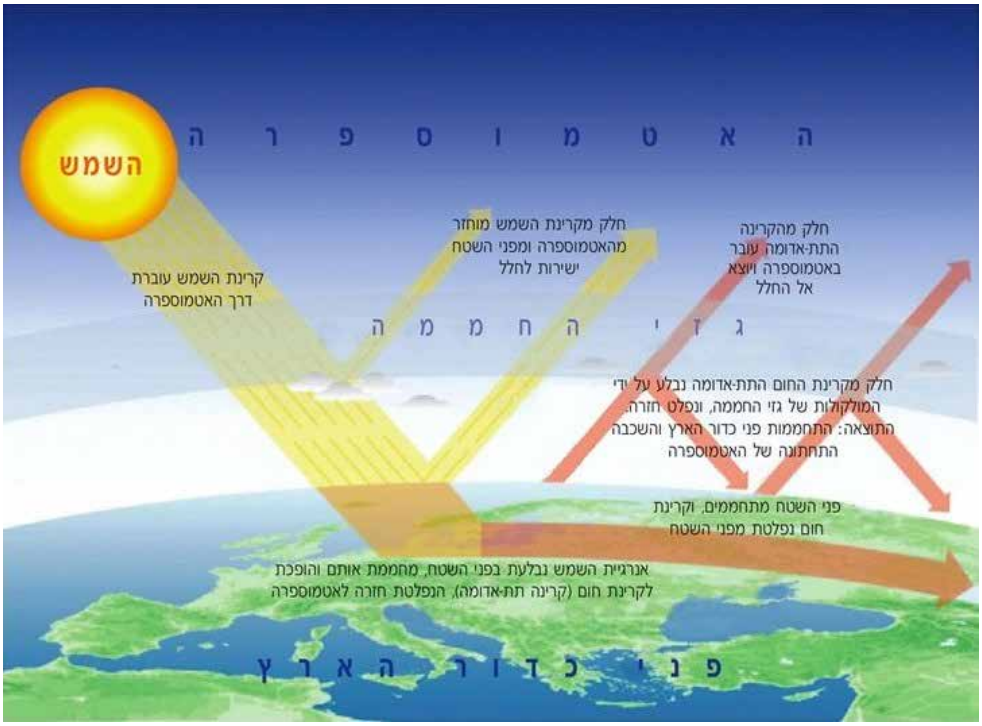
בירוא יערות באמזונס.
(Getty images)

דיות
התהליך שבו מים משתחררים מן הצמח לאטמוספרה בצורת אדים, לאחר שעברו מן השורשים דרך רקמות ההובלה שבצמח אל העלים.

היערות הסבוכים, הירוקים והכהים, בולעים כמעט 90% מקרינת השמש. לעומת זאת האלבדו של השטחים המעובדים, שצבעם בהיר יותר - גדול יותר, כמות גדולה יותר של קרינת השמש משטחים אלה מוחזרת לחלל, וכמות קטנה יותר נבלעת ולכן הקרקע והאטמוספרה שמעליה באזורים אלה מתחממים פחות. הפחתת החימום גורמת להפחתה גדולה בהתאדות ובדיות מהעצים ומהנהרות ולירידה בכמות אדי המים המשתחררת לאטמוספרה. כאשר כמות אדי המים יורדת, העננים הנוצרים באזור הם דלילים ושטוחים יותר, וכמות המשקעים באגן האמזונס כולו - יורדת. תהליכים אלה מסכנים את עצם קיומם של היערות וכן את שטחי החקלאות שלשמם הם נכרתו.

2. הגברת אפקט החממה - גורם חשוב בהתחממות הגלובאלית

כאמור, קרינת השמש הנבלעת בפני הקרקע של כדור הארץ נפלטת מהם כקרינת חום. חלק קטן מקרינת החום הנפלטת מוחזר ישירות אל החלל, אך מרביתה נבלעת באטמוספרה על ידי העננים, חלקיקי האבק והגזים, ואלה פולטים אותה חזרה אל פני השטח. מנגנון פיזיקאלי זה נקרא "**אפקט החממה**" (איור 60) והוא מנגנון חשוב וחיוני לקיום החיים על פני כדור הארץ. מדוע? כי קרינת החום הנבלעת באטמוספרה ומוחזרת אל פני כדור הארץ, היא זאת השומרת את פני כדור הארץ בטמפרטורה ממוצעת, הנוחה לקיום המים ולקיום החיים. אלמלא קיומו של אפקט החממה הייתה כל קרינת החום נפלטת ישירות אל החלל ואז הטמפרטורה הממוצעת על פני כדור הארץ הייתה נמוכה - כ-18°C מתחת לאפס; לא היו על פני כדור הארץ מים במצב צבירה נוזלי; לא היו מתקיימות בו התופעות השונות של מזג האוויר; והתוצאה - לא היו יכולים להתקיים בו חיים. הוכחה לכך היא המתרחש בירח, הסובב את כדור הארץ והמקבל את אותה כמות אנרגיה מהשמש:



איור 60

אפקט החממה.
(כדור הארץ והסביבה)

שם אין אטמוספרה, לא מתקיים אפקט החממה, כל האנרגיה המגיעה מן השמש נפלטת ישירות מפני השטח אל החלל, והתוצאה - הטמפרטורה צונחת בשעות הלילה ל-150°C מתחת לאפס.

הגזים המרכיבים את האטמוספרה כוללים בעיקר חנקן וחמצן, המהווים יחד כ-99% מכלל הגזים באטמוספרה. בנוסף האטמוספרה מכילה פחמן דו-חמצני, אדי מים, **מתאן** וגזים נוספים, שכולם יחד מהווים פחות מ-1% מהגזים באטמוספרה והם ידועים בשם הכולל **"גזי החממה"**. 'גז חממה' הוא שם כולל לחומרים במצב צבירה גזי שנמצאים באטמוספירה ויכולים לבלוע או לפלוט קרינה אינפרא- אדומה. גזים בולעים את הקרינה ובדרך כלל פולטים אותה מחדש, וחלק ממנה עושה את דרכו חזרה לכדור הארץ. כך נמנעת פליטה יעילה של חום מכדור הארץ ונשמרת טמפרטורה גבוהה יחסית על פני הכדור. לפי ההגדרה הזו כמעט כל גז הוא גז חממה, אבל כשמתייחסים לגזי חממה הכוונה היא בעיקר לגזים שנמצאים בריכוז גבוה יחסית והשפעתם על הבליעה הכוללת של האטמוספירה היא משמעותית. גז החממה המשמעותי ביותר בהפרש ניכר מהאחרים הוא אדי מים ואחריו פחמן דו חמצני (CO_2), מתאן (CH_4), אוזון (O_3), חנקן דו חמצני (NO_2) ומשפחת הגזים שנקראים פריאונים.

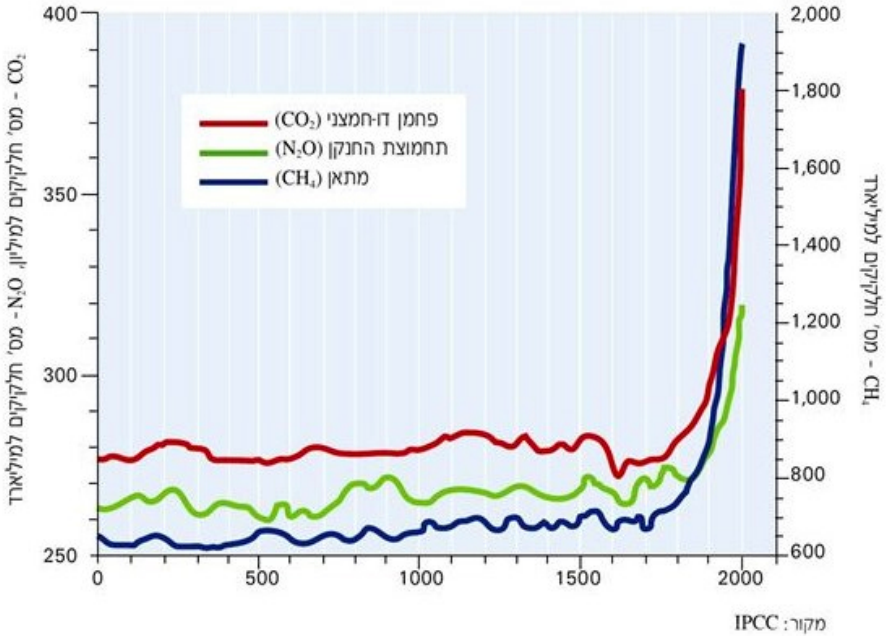
למרות הנחיצות של גזי החממה, הם זכו לפרסום שלילי בשנים האחרונות כששמם נקשר עם ההתחממות העולמית. טענה, שמקובלת על הרוב המכריע של העולם המדעי, היא שאפקט החממה מתעצם ותורם להתחממות העולמית בגלל עליה בריכוז גזי החממה כתוצאה מפעילות האדם (איור 61). נדון בגזי החממה השונים, ונבחין בין אלה שמקורם טבעי ואין ביכולתנו להשפיע עליהם, ובין אלה שנוצרו בידי האדם ואפשר בהחלט להשפיע עליהם.

מתאן

(CH_4) תרכובת אורגאנית המורכבת מאטום אחד של פחמן (C) ו-4 אטומי מימן (H). זהו גז דליק והוא חסר צבע וריח.

גזי חממה

קבוצה של תרכובות כימיות במצב גזי, בהן פחמן דו-חמצני, אדי מים ומתאן, אשר נמצאות בריכוזים נמוכים מאוד באטמוספרה. לגזי החממה, למרות שיעורם הנמוך, יש חשיבות מיוחדת שכן הם (כמו גזים אחרים באטמוספרה) קולטים את קרינת השמש ומונעים את "בריחתה" לחלל. גזי החממה קיימים באטמוספרה כתוצאה מתהליכים טבעיים, ואליהם מתווספים גזי חממה שהם תוצאה של פעילות האדם. הגידול בשיעורם של גזי החממה מביא להתחממות הגלובאלית.



איור 61

העלייה בריכוז גזי החממה, משנת 0 לספירה ועד ימינו.
(כדור הארץ והסביבה)

גזי החממה

א. הפחמן הדו-חמצני

גז החממה השכיח ביותר הוא הפחמן הדו-חמצני ובין גזי החממה הוא בעל החשיבות הגדולה ביותר בהגדלת כמות הקרינה הנפלטת לאטמוספרה. ריכוזו הנוכחי באטמוספרה הוא כ-385 חלקיקים למיליון (כלומר, מתוך מיליון מולקולות של אוויר, כ-385 הן של פחמן דו-חמצני. נוהגים לסמן יחידות אלה כ-**ppm** ובעברית: מספר חלקיקים למיליון). ריכוזו של הפחמן הדו-חמצני באטמוספרה נקבע על ידי תהליכים שונים של פליטה וקליטה של גז זה:

- **הפחמן הדו-חמצני נפלט אל האטמוספרה, וריכוזו בה עולה, בעיקר בשני תהליכים:**

- **תהליכי נשימה:** תהליכים המאפיינים את כל היצורים החיים, הקולטים חמצן ופולטים פחמן דו-חמצני בסיום תהליך הנשימה.

- **תהליכי בערה:** הן תהליכים הנובעים מאירועים טבעיים (לדוגמה, התפרצות הרי געש) והן תהליכים הנגרמים על ידי האדם: שרפות (לדוגמה, שרפות יער) ושרפת מקורות אנרגיה (פחם, נפט וגז), בעיקר בתעשייה ובתחבורה.

- **הפחמן הדו-חמצני נקלט מן האטמוספרה, וריכוזו בה יורד, בשני תהליכים עיקריים:**

- **בתהליכי הטמעה (פוטוסינתזה):** הצמחים הירוקים המצויים ביבשות העולם ופיטופלנקטון זעירים המרחפים במקווי מים ובאוקיינוסים, קולטים את הפחמן הדו-חמצני מן האוויר בתהליך ההטמעה, שבסיומו נפלט חמצן אל האוויר.

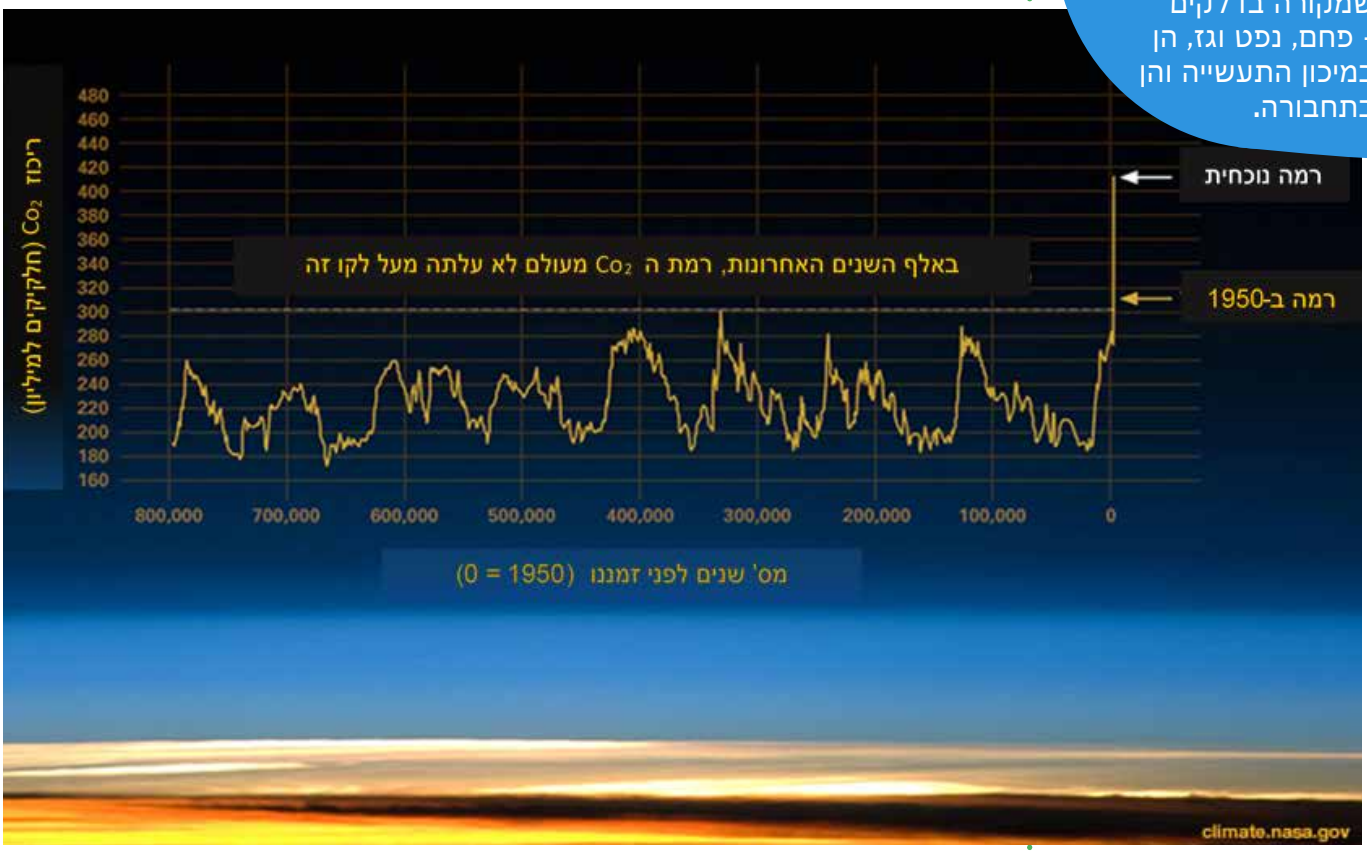
- **בתהליכי השקעה כימית:** סלעי הגיר, הנוצרים באוקיינוסים, מורכבים מגבישים המכילים סידן, פחמן וחמצן. מקורם של הפחמן והחמצן שבסלעים הוא בפחמן הדו-חמצני, הנקלט מן האוויר ומומס במי האוקיינוסים.

מחקרים רבים מלמדים על כך שריכוז הפחמן הדו-חמצני באטמוספרה נמצא בעלייה מתמדת, ויותר ויותר נתונים מעידים על כך שעלייה זאת מתרחשת ברציפות מאז ראשיתה של **המהפכה התעשייתית**, שהחלה בסוף המאה ה-18. בשנת 1958 החל מדען בשם צ'רלס קילינג לחקור את השינויים בריכוז הפחמן הדו-חמצני באטמוספרה במרכז המחקר במַאונָה לואָה שבאיי הוואי. הנתונים שהצטברו עד לשנת 2000 הראו עלייה רצופה בריכוז הפחמן הדו-חמצני, למרות שנמדדו הרחק ממוקדי תעשייה ותחבורה. זוהי הוכחה לכך שהעלייה בריכוז הפחמן הדו-חמצני אינה מקומית אלא היא תופעה גלובאלית, תופעה המתרחשת בכל רחבי העולם.

המדידות הרציפות והנתונים שנצברו יחד בין השנים 2000-2008 ותוארו בגרף המכונה "עקומת קילינג" (איור 62), מוכיחים בבירור שריכוז הפחמן הדו-חמצני באטמוספרה עולה בהתמדה. מסתבר כי במשך 50 שנה, משנת 1958 ועד לשנת 2008, עלה ריכוז הפחמן הדו-חמצני באטמוספרה מ-315 חלקיקים למיליון ל-385 חלקיקים למיליון, כלומר, עלייה של 70 חלקיקים למיליון. הקצב הממוצע הוא 1.4 חלקיקים למיליון בשנה, אך מבט מדוקדק בגרף מראה כי בשנים האחרונות חלה עלייה מואצת מעט והקצב הוא 2.0 חלקיקים למיליון בשנה.

המהפכה התעשייתית

כינוי לשינויים הטכנולוגיים, הכלכליים והחברתיים, שהחלו להתרחש באנגליה בסוף המאה ה-18 והתפשטו למדינות אחרות באירופה, לארצות הברית ולחלקי עולם אחרים. במהלך המהפכה התעשייתית הוקמו מפעלי תעשייה, הומצאו שיטות חדישות לניצול חומרי גלם ולייצור מוצרים, ופותחו אמצעי תחבורה. בעקבות המהפכה התעשייתית החלו לעשות שימוש באנרגיה שמקורה בדלקים - פחם, נפט וגז, הן במיכון התעשייה והן בתחבורה.



איור 62

ריכוז הפחמן הדו-חמצני באטמוספרה ב-800,000 השנים האחרונות. (NASA)

מדוע עולה ריכוז הפחמן הדו-חמצני באוויר?

יש לכך כמה סיבות:

- **פליטת הפחמן הדו-חמצני לאטמוספרה גוברת כתוצאה משרפת הדלקים בתעשייה ובתחבורה.**
מאז המהפכה התעשייתית גבר השימוש בדלקים המאובנים - הפחם, הנפט והגז הטבעי. תהליך ניצולם של הדלקים משחרר לאטמוספרה כמויות עצומות של פחמן דו-חמצני. כיצד? הדלקים המאובנים מכילים פחמן אשר לפני מיליוני שנים נקלט מן האטמוספרה על ידי הצמחים. הצמחים האלה ובעלי החיים שניזונו מהם, נקברו במשך מיליוני שנים מתחת לסלעים, שהצטברו מעליהם בתנאי לחץ וטמפרטורה גבוהים והפכו ל**פחמימנים**.
הפחמימנים השונים הם חומרים דליקים, שבתהליך שרפתם הם פולטים אנרגיה רבה ועל כן הם משמשים כמקור אנרגיה בתעשייה, בתחבורה, בחימום ועוד. תהליך השרפה של הפחמימנים, ההולך וגדל מאז המהפכה התעשייתית ועד ימינו, משחרר חזרה לאטמוספרה כמויות עצומות של פחמן דו-חמצני. פליטת הפחמן הדו-חמצני בתעשייה ובתחבורה היא, כנראה, הגורם העיקרי להגדלת כמות גזי החממה באטמוספרה, והיא כולה תוצר של מעשי האדם!

- **קליטת הפחמן הדו-חמצני מהאטמוספרה על ידי הביוספרה קטֵנה כתוצאה מבירוא היערות.**
האוכלוסייה הגדלה בעולם, ורמת החיים העולה, מביאים לעלייה בביקוש לעץ ולשטחים המיועדים לגידולים חקלאיים. צרכים אלה מביאים לכריתה מוגברת ומואצת של שטחי יער בכל רחבי העולם, ובעיקר באזורי יערות הגשם הטרופיים. הצמצום הגובר בשטחי היערות גורם לכך שפחות ופחות עצי יער קולטים מן האטמוספרה את הפחמן הדו-חמצני בתהליך הפוטוסינתזה, וקטנה מידת השתתפותם של היערות בהורדת רמת הריכוז של הפחמן הדו-חמצני באטמוספרה.

- **פליטת הפחמן הדו-חמצני לאטמוספרה גוברת כתוצאה מההתחממות של מימי האוקיינוסים.**
הפחמן הדו-חמצני, שמקורו באוויר, מומס במימי האוקיינוסים. עם ההתחממות הגלובאלית והעלייה בטמפרטורות של מי האוקיינוסים יורדת כמות הפחמן הדו-חמצני שהם יכולים להכיל, ומשתחררות לאטמוספרה כמויות הולכות וגדֵלות של פחמן דו-חמצני. למה הדבר דומה? לגזים המצויים בבקבוק משקה מוגז: כאשר הבקבוק קר - כמות הגז המשתחררת ממנו אל האוויר לאחר פתיחתו היא מועטה ואילו כאשר הבקבוק חם - פתיחתו תגרום לשחרור כמות גדולה של גז. השתחררות הפחמן הדו-חמצני מן האוקיינוסים אל האטמוספרה היא חלק מתהליך של "משוב חיובי" - ככל שהטמפרטורות עולות כן מתחממים מי האוקיינוסים והם פולטים כמות גדולה יותר של פחמן דו-חמצני לאטמוספרה. העלייה בריכוז הפחמן הדו-חמצני תגביר עוד יותר את עליית הטמפרטורות וכמות גדולה יותר של גז תשתחרר ממי האוקיינוסים, וחוזר חלילה.

פחמימנים
קבוצה נרחבת של תרכובות אורגניות שונות, המורכבות מאטומי פחמן (C) ומימן (H) בלבד. הפחמימנים נפוצים בטבע בצמחים וגם בבעלי החיים, אך בעיקר בנפט הגולמי. כולם דליקים, וחלקם משמשים כחומרי דלק חשובים.

מחסן הפחמן של הקרקעות הקפואות

אזורי הקרקעות הקפואות (Permafrost) מהווים 20%-25% מהשטח היבשתי של חצי הכדור הצפוני. קרקעות אלה מכילות כ-1,600 מיליארדי טונות של פחמן, רובו כחומר אורגאני קפוא. לשם השוואה - האטמוספרה כולה מכילה כ-850 מיליארדי טונות של פחמן (בצורת פחמן דו-חמצני). במשך שנים היוו הקרקעות הקפואות "מחסן" של פחמן שלא שוחרר לאטמוספרה, אבל במחקרים שנערכו לאחרונה נמצא כי עם התמשכות ההתחממות הגלובאלית יהפכו הקרקעות המפשירות לספק פחמן והן ישחררו לאטמוספרה כמויות גדולות של פחמן דו-חמצני. תהליך זה יגרום למשוב חיובי - יותר פחמן ישוחרר מהפשרת הקרקעות, ההתחממות תגבר, יותר קרקעות יופשרו, ועוד פחמן ישוחרר ויהפוך לתוספת הולכת וגדלה של פחמן דו-חמצני לאטמוספרה.

איור 63

קרקעות קפואות בנורבגיה. (Seppfriedhuber/Getty Images)

ב. אדי מים

גז חממה טבעי נוסף, שכיח ופעיל מאוד, הוא אדי המים. ריכוז אדי המים באוויר משתנה ממקום למקום ומעונה לעונה: ריכוזם גבוה סמוך לפני המים באוקיינוסים, שם ההתאדות גבוהה, והוא יורד כמעט לאפס באזורים יבשים כמו המדבריות. פעולת אדי המים כגז חממה מוגבלת לשכבה הקרובה לפני השטח, שכן מעל לגובה של 15 ק"מ ריכוזם יורד בצורה חדה.

אדי המים, יחד עם הפחמן הדו-חמצני, בולעים כמעט 100% מאנרגיית החום הנפלטת מפני כדור הארץ. כמו הפחמן הדו-חמצני, גם אדי המים משתתפים במנגנון של **משוב חיובי**: העלייה בטמפרטורות מאיצה את ההתאדות ומגדילה את ריכוז אדי המים באטמוספרה. אדי המים, שהם גז חממה יעיל, בולעים עוד קרינת חום, הטמפרטורות עולות, וחוזר חלילה.

העלייה בהתאדות ובכמות אדי המים באוויר גורמת לעלייה מסוימת בכמות העננים באטמוספרה. ומכיוון שהעננים מחזירים חלק מקרינת השמש ישירות לחלל, הם עשויים לתרום לירידה בטמפרטורות ולהפחתה בהתחממות הגלובאלית (**משוב שלילי**). העננים מחזירים את קרינת השמש לאטמוספרה רק בשעות היום. בלילה, לעומת זאת, העננים מונעים מן החום שנפלט מפני השטח - שהתחממו במשך היום - לברוח אל החלל, ואז קורה תהליך הפוך: עלייה בטמפרטורות (**משוב חיובי**). מחישובים שנערכו באמצעות מודלים אקלימיים מתברר שהשפעתם של אדי המים כגורם המעלה את הטמפרטורות, בעיקר עקב יעילותם כגז חממה, גדולה יותר מהשפעתם כגורם המביא לירידה בטמפרטורות.

ג. מֶתאן ותחמוצות חנקן

גזי חממה נוספים הם המתאן ו**תחמוצת החנקן**, שריכוזיהם באטמוספרה נמוכים מאוד (המתאן נמדד במספר חלקיקים למיליארד). מקורו של המתאן בגז הטבעי ובפחם, בריקבון של פסולת אורגאנית מסוגים שונים, בפליטת הגזים של הבקר והצאן, באזורי ביצות ובמים ששדות האורז מוצפים בהם. הכמות ההולכת וגדלה של אשפה ופסולת אורגאנית, כמו גם הגידול בכמות עדרי הבקר והצאן ברחבי העולם, מעלים את ריכוזו של המתאן בכדור הארץ.

המקור העיקרי להיווצרות תחמוצות החנקן קשור להתפתחות הטכנולוגית המתרחשת בעולם ב-150 השנים האחרונות - שרפת הדלק במנועי המכוניות והתהליכים המתרחשים בתחנות הכוח ובמפעלי התעשייה. עקב התיעוש הגובר והשימוש ההולך וגדל בתחבורה, נמצא גם הריכוז של תחמוצת החנקן באטמוספרה בעלייה. תחמוצות החנקן נוצרות גם באופן טבעי - בעת התרחשותן של סופות ברקים - אך תרומתו של מקור זה קטנה יחסית לתרומתו של האדם. בעבר נחשבה השפעתם של גזים אלה למוגבלת, בגלל ריכוזם הנמוך באטמוספרה. רוב פליטות המתאן ותחמוצות החנקן הן תוצר של פעילות האדם. כמותם הולכת וגדלה ועלולה לגדול עוד, ומשום כך השפעתם על הגברת תוצא החממה תגבר גם היא עוד יותר בעתיד.

מסקירתם של גזי החממה השונים ברור כי לאדם חלק ניכר בהגדלת ריכוזיהם באטמוספרה, וכי על האנושות מוטלת האחריות לנקוט צעדים שיביאו להקטנת הפליטה של גזים אלה. גם אם ננקוט מיד בצעדים כאלה יש לדעת כי התהליך יארך עוד כמה מאות שנים, שכן ההצטברות של גזי החממה תימשך בשל פליטות שכבר התרחשו (איור 61). לפיכך, רק אחרי תקופה ארוכה יתחיל ריכוז הפחמן הדו-חמצני לרדת עד שיתייצב בערכים שיבטיחו מאזן אקלימי יציב.

צעדים לצמצום אפקט החממה

פרוטוקול קיוטו, שהתקבל ב-1992, הציע שני כיווני התמודדות עיקריים לצמצום אפקט החממה: הגבלת פליטת גזי חממה וסילוק גזי חממה מהאטמוספירה. המקור העיקרי לפליטת גזי חממה הם מפעלי תעשייה ותחנות כוח שמתבססות על שריפת דלק מאובנים: פחם, מזוט, גז טבעי ופצלי שמן. לפיכך, ייצור חשמל באמצעות טכנולוגיות חלופיות שמתבססות על סוגי אנרגיה שאינם מזהמים יכול לסייע לצמצום הפליטה. כאלו הן למשל אנרגיית השמש, אנרגיית הרוח ואנרגיה גרעינית (שכמובן כרוכה בסיכונים בטיחותיים אחרים). בנוסף קיימת מגמה של

תחמוצות חנקן

קבוצה של תרכובות המכילות חנקן (N) וחמצן (**O**). תחמוצת החנקן הנפוצה ביותר באטמוספרה היא N_2O.

פרוטוקול (אמנת) קיוטו

הוא תוספת לאמנת היסוד של האו"ם לשינויי אקלים, אמנה בינלאומית בנושא התחממות כדור הארץ. הפרוטוקול הוא הסכם משפטי המחייב מדינות מתועשות להפחית את הפליטה המשותפת של גזי חממה בשיעור של 5.2% יחסית לשיעור שנמדד בשנת 1990.

מולקולה
החלקיק הקטן ביותר של כל חומר - חלקיק המקיים את התכונות הכימיות של החומר כולו. המולקולה מורכבת משני אטומים או יותר הקשורים ביניהם בקשר כימי. בעברית - פרודה.

מעבר מבנזין וסולר כחומרי דלק במנועי בעירה פנימית לדלקים ביולוגיים כמו ביו-דיזל או ביואתנול שמופקים מצמחים, וכמובן לפיתוח של כלי רכב חשמליים או היברידיים (שמונעים במנוע חשמלי ובמנוע בעירה פנימית גם יחד). גם אלה עשויים לצמצם את פליטת גזי החממה. במקביל אפשר לסייע לסילוק גזי חממה מהאטמוספירה על ידי נטיעת יערות או מניעה של כריתתם.

התקווה היא שלפחות חלק מהצעדים הללו יסייעו למתן את אפקט החממה. במקביל להם ננקטות גם אסטרטגיות של הסתגלות להתחממות העולמית, שנועדו להפחית את ההשלכות הבלתי רצויות שלה או למנוע אותן, כגון הגנה מהצפות והבטחת ביטחון תזונתי.

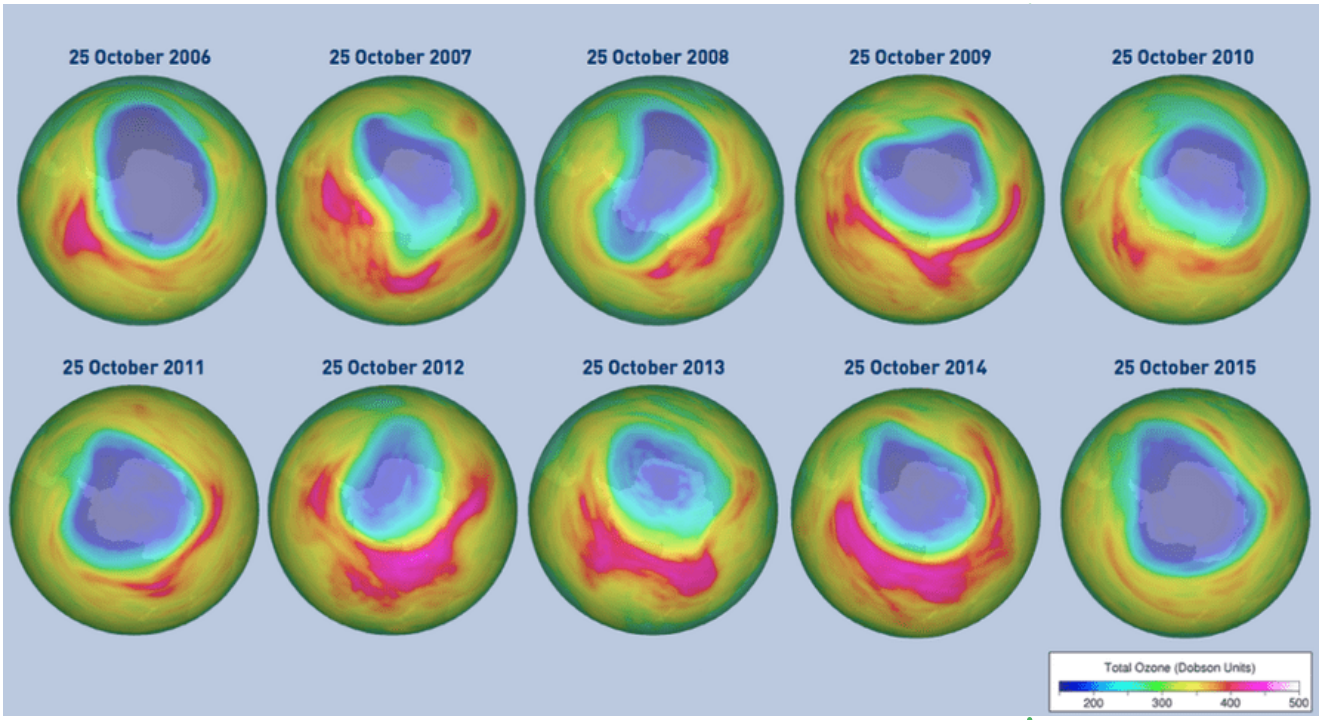
ההתחממות העולמית היא לא התופעה האטמוספרית היחידה לה אנו עדים בעשורים האחרונים. גם שכבת האוזון משתנה בעקבות פעילות האדם, אך בעוד שההתחממות מתרחשת בעיקר בשכבות הנמוכות של האטמוספירה (טרופוספרה), השינוי בשכבת האוזון מתרכז בשכבות הגבוהות יותר (סטרטוספרה).

החור באוזון

האוזון O_3 הוא גז המכיל **מולקולות** שכל אחת מהן מורכבת משלושה אטומי חמצן. בסטרטוספרה, שכבת האוויר הנמצאת בגובה שבין 15-50 ק"מ מעל לפני הקרקע, מגיע האוזון לריכוזו המרבי. האוזון שבסטרטוספרה, חשוב ביותר לקיום החיים על פני כדור הארץ, שכן הוא בולע את הקרינה האולטרא-סגולה (UV) שהיא קרינה מסוכנת שמקורה מן השמש. חשיפה רבה לקרינה האולטרא-סגולה עלולה לגרום לשינויים במבנה החומר התורשתי (DNA) ובחומרים אחרים בתאים. בשל כך עולה הסיכון לחלות בסרטן העור ובמחלת הקטרקט (מחלת עיניים העלולה לגרום לעיוורון).

משלחות מחקר ששהו באנטארקטיקה בשנות ה-70 של המאה העשרים ועסקו במדידת ריכוזי האוזון בסטרטוספרה, מצאו שמדי שנה בתקופת האביב יורד ריכוז האוזון בקוטב הדרומי במידה ניכרת. ההידלדלות של האוזון כונתה "**החור באוזון**". מעקב רב-שנתי (איור 64) שהתקיים מאז העלה, כי עם השנים גוברת הירידה בכמות האוזון בתקופת האביב. מדידות אוזון שנערכו בשאר חלקי העולם העלו כי הידלדלות האוזון בסטרטוספרה קיימת לא רק באנטארקטיקה אלא גם באזורים אחרים בעולם, אם כי במידה פחותה בהרבה.

פירוק ויצירה של האוזון מתקיימים בסטרטוספרה באופן טבעי כל העת. בין שני התהליכים הללו - הפירוק והיצירה של האוזון - קיים שיווי משקל שבו כמות האוזון בסטרטוספרה נותרת קבועה. הידלדלות האוזון היא תוצאה של הפרת שיווי המשקל הטבעי בין היצירה והפירוק של האוזון. שיווי משקל זה מופר מכיוון שחומרים שונים, הנמצאים בשימוש האדם, נפלטים לאוויר וגורמים לקצב פירוק מוגבר של מולקולות האוזון על ידי כך שהם לוכדים את אטום החמצן החופשי שנוצר בתהליך הפירוק. החומרים העיקריים הגורמים לפגיעה באוזון הם גזים המורכבים ממולקולות המכילות כלור, פלואור ופחמן. גזים אלה נקראים **פראונים**, ובקיצור - **CFC** (Chlor, Fluor, Carbon).



איור 64

ריכוז האוזון (ביחידות דובסון) מעל אנטרקטיקה, בין השנים 2006-2015. מדידות האוזון נלקחו בתאריך זהה (25 באוקטובר) בכל שנה. הצבעים הכחולים מצביעים על התדלדלות השכבה, בעוד הצבעים האדומים, על עלייה בצפיפותה.
(World Meteorological Organization)

תהליך הידלדלות האוזון מתרחש בעיקר בקטבים, ובעיקר בקוטב הדרומי. בשאר חלקי העולם הוא נוצר בעקבות מהילה של אוויר הקטבים עם האוויר של שאר אזורי העולם. היווצרותו של ה"חור באוזון" מעל לקוטב הדרומי קשורה לתנאים המיוחדים השוררים באזור זה בתקופת החורף. בתקופה זאת הטמפרטורות בסטרטוספרה שמעל אנטארקטיקה הן הנמוכות ביותר בעולם ומגיעות עד 90°C-. בתנאים אלה מצטברות בעננים מולקולות של חומרי CFC ומולקולות אחרות, המכילות כלור וחמצן. מולקולות אלה יציבות ואינן פוגעת באוזון. עם בוא האביב לחצי הכדור הדרומי, בחודשים ספטמבר-אוקטובר, לאחר חצי שנה של חורף חשוך, קרינת השמש מפרקת את המולקולות היציבות שהצטברו במשך החורף, ואטומי הכלור, שהשתחררו ממולקולות אלה, גורמים לפירוקו המהיר של האוזון ולירידה ניכרת בריכוזו באנטארקטיקה וגם באזורים הסמוכים לה, כלומר, בניו-זילנד ובאמריקה הדרומית. ריכוז האוזון מעל אנטארקטיקה שב ועולה בקיץ. הידלדלות מסוימת של האוזון באביב מתקיימת גם בקוטב הצפוני, אך היא פחותה בהרבה מזו המתרחשת בקוטב הדרומי, ועל כן השפעתה של הידלדלות האוזון על חצי הכדור הצפוני היא פחותה.

חשוב לציין כי בשנים האחרונות נבלמה הידלדלות האוזון בסטרטוספרה, וניתן לראות עלייה מתונה בריכוזו. ההתמודדות עם בעיית האוזון הסטרטוספרי נחשבת כיום לסיפור הצלחה. מאחר שבעיית האוזון היא בעיה כלל-עולמית, ששום מדינה אינה יכולה להתמודד עמה לבדה - כדי לפתור אותה נדרש שיתוף פעולה בין-לאומי. ואכן, נערכו מספר ועידות בין-לאומיות שדנו בנושא, ובמהלכן התחייבו 177 מדינות (כולל ישראל) לא לייצר ולא להשתמש בגזים הפוגעים בשכבת האוזון. כדי לעמוד בהתחייבות זאת החלו פעולות לפיתוח חומרים חלופיים, ונערכו גם פעולות הסברה לעידוד השימוש במוצרים שאינם מכילים חומרים הפוגעים באוזון.

הידלדלות האוזון והשינוי באקלים העולמי

רבים קושרים את נושא שינוי האקלים לבעיית הידלדלות האוזון. קיים קשר מסוים בין שני הנושאים, אולם כפי שהסברנו בפרק זה, הסיבות העיקריות לשינוי האקלים אינן קשורות להידלדלות שכבת האוזון. עם זאת, נציין כי מולקולות הפראונים (CFC) הם גזי חממה, ומשום כך יש להם תרומה גם להתחממות. יכולת בליעת החום של כל מולקולת CFC היא גבוהה מזו של הפחמן הדו-חמצני, אולם מכיוון שריכוז גזי CFC ה-CFC באטמוספרה נמוך בהרבה מזה של הפחמן הדו-חמצני וגזי חממה אחרים, השפעת ה-CFC על תופעת ההתחממות היא מעטה.

מה ניתן ללמוד משינויי האקלים בעבר?

שינויים באקלים כדור הארץ התרחשו בעבר - הקרוב וגם הרחוק. חלקם שינויים איטיים וממושכים, וחלקם מהירים וקצרים. כיום אפשר לשחזר את האקלים ששרר בתקופות שונות בעבר בדיוק רב, יחסית, כמעט 3 מיליארדי שנים לאחור בזמן. זהו הישג מדעי מרשים, מאחר שרישומי אקלים אמינים, מסודרים ומדויקים (במידה זאת או אחרת) מתקיימים רק ב-150 השנים האחרונות. כדי לשחזר את הטמפרטורות ואת הרכב הגזים בעבר, החוקרים נעזרים בטכנולוגיות המשלבות ידע מתחומים שונים - ביולוגי, כימי ופיזיקאלי. שחזור הטמפרטורות בעבר נעשה בעזרת כמה שיטות:

- **מדידת הטבעות בגזעים של עצים וצמחים עתיקים.**
כאשר מתבוננים בחתך של גזע עץ, אפשר להבחין בטבעות הגידול המופיעות עליו - מדי שנה נוצרת בגזע טבעת גידול נוספת. בשנה שבה הטמפרטורות גבוהות וכמות המשקעים גדולה - עונת הצמיחה של העץ מתארכת, וטבעת הגידול השנתית מתרחבת. בדיקות כימיות של גזעי עצים, בשילוב עם הנתונים על רוחבן של הטבעות, מספקים מידע על השינויים בגובה הטמפרטורות ובכמות המשקעים שהתרחשו במהלך שנות חייהם של העצים הנבדקים (איור 65). בדיקות אלה מסייעות לשחזר את שינויי האקלים שהתרחשו בעולם במשך כמה מאות שנים.

איור 65

מדידת טבעות גידול בגזע עץ כעדות לאקלים קדום.
Global Climate)
(Change

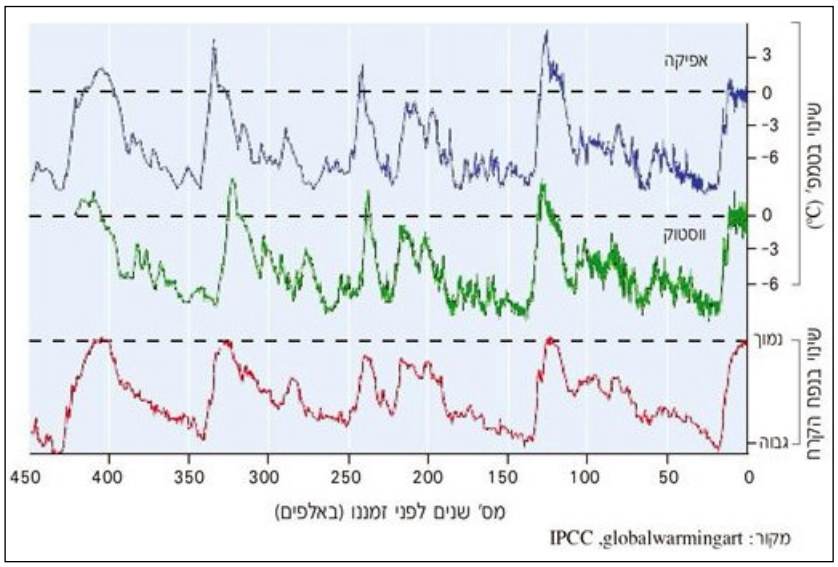
- **בדיקות של היסוד חמצן בשלדים של אלמוגים.**
גם בשלדי האלמוגים אפשר לזהות טבעות גידול שנתיות, ואפשר לתארך בעזרתן את גילו של האלמוג עד 1,000 שנים לאחור. האלמוגים יוצרים את השלד שלהם מחומרים המצויים במי הים, ולכן התכונות הכימיות של השלד, ובעיקר אלה של אטומי החמצן, תואמות את ההרכב הכימי של מי הים. כאשר הטמפרטורות עולות או יורדות חל שינוי בהרכב של אטומי החמצן במים, ושינוי זה משתקף גם בטבעת הגידול של האלמוג ומאפשר שחזור של הטמפרטורה הממוצעת בכל שנה.

- **ניתוח הרכבן הכימי של בועיות אוויר זעירות הלכודות בכיסוי הקרח בקטבים.**
הרכב הגזים באטמוספרה מושפע מגובה הטמפרטורות, לדוגמה: כאשר הטמפרטורה עולה - ריכוז הפחמן הדו-חמצני באוויר עולה, וכאשר הטמפרטורה יורדת - ריכוז הפחמן הדו-חמצני יורד. בתחנות המחקר הממוקמות בקטבים קודחים לעומק כמה קילומטרים ומוציאים גלילי קרח שלכודות בתוכם בועיות אוויר זעירות (איור 66). הבועיות האלה משמרות את הרכב הגזים שהיה באטמוספרה בזמן שירד השלג, וכך אפשר לשחזר את הטמפרטורות ששררו שם באותה שנה. בדיקות נוספות אחרות, הקשורות בעיקר לפחמן ולגזים אחרים המצויים בבועות האוויר, מאפשרות לקבוע את גילו של הקרח הנבדק, וכך מקבלים שחזור של הטמפרטורות לאורך השנים (איור 67).

נסקור את השינויים שהתחוללו באקלים כדור הארץ בעבר, ונבדוק מה אפשר ללמוד מהם על ההתחממות הגלובאלית.

איור 66

קידוח גליל קרח. בתחנת המחקר בוסטוק שבאנטארקטיקה הגיעו בדיקות הגיל של קידוחי הקרח ל-420,000 שנים לפני זמננו, ובתחנת אפיקה, 560 ק"מ מווסטוק, הגיעו הבדיקות ל-720,000 שנים לפני זמננו
(R.Mulvaney / British Antarctic Survey)

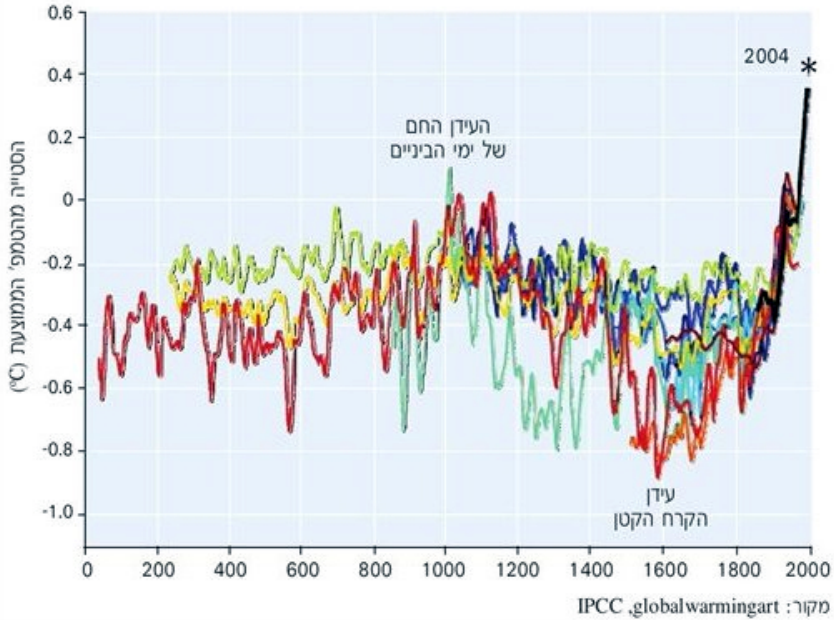


איור 67

שינויי טמפרטורות ושינויים בנפח הקרח בעידני הקרח.
(כדור הארץ והסביבה)

איור 68

הסטייה מהטמפרטורה העולמית הממוצעת על פי מחקרים שונים, משנת 0 לספירה ועד לשנת 2004.
(כדור הארץ והסביבה)



מקור: IPCC ,globalwarmingart

שינויי האקלים בעבר הקרוב

בביטוי "העבר הקרוב" אנחנו מתכוונים לשינויי האקלים שהתחוללו ב-2,000 השנים האחרונות - משנת 0 לספירה ועד ימינו. הגרף שלפניכם (איור 68) מתאר את שינויי הטמפרטורות שהתרחשו בטווח שנים זה, ועולה ממנו התמונה הבאה: בין השנים 900-1100 בערך הייתה עלייה בטמפרטורות. תקופה זאת ידועה בשם "העידן החם של ימי הביניים". בשיאה של התקופה היה האי גרנלנד מיושב על ידי ויקינגים בני אירופה, שהצליחו לקיים בו מרעה וחקלאות ואף לגדל כרמי יין. ואולם כעבור כמה מאות שנים חלה התקררות באקלים, הטמפרטורות ירדו עד למטה מהממוצע ולקראת שנת 1600 החל מה שמכונה "עידן הקרח הקטן". תקופה זאת הביאה לחורפים ארוכים וקפואים בחצי הצפוני של כדור הארץ. מרבית תושבי גרנלנד מתו ברעב, והמעטים ששרדו נאלצו לנטוש את האי ולשוב לאירופה.

השינוי בטמפרטורה הממוצעת העולמית היה אמנם קטן יחסית (סטייה של 0.2°C-0.4°C מהממוצע, כפי שנראה בגרף), אבל הייתה לו השפעה רבה. עוד עולה מן הגרף כי החל באמצע המאה ה-19 (סביב שנת 1860) ועד ימינו, קיימת מגמת התחממות ברורה. שיעורה הכולל של העלייה בטמפרטורה הממוצעת העולמית ב-150 השנים האחרונות (משנת 1850 ועד לשנת 2000) הוא כ-0.7°C. שינוי זה החל במהפכה התעשייתית, והוא מקביל לשינוי הנובע מהשימוש ההולך וגובר בשרפת הדלקים המאובנים.

שינויי האקלים בעבר הרחוק

החוקרים מספרים שעל כדור הארץ היו כמה עידני קרח במהלך 4.5 מיליארד שנות קיומו. כל אחד מעידני קרח אלו נמשך כמה עשרות או מאות מיליוני שנים.

בבחינת שינויים שחלו בטמפרטורות לאורך 450,000 שנים לאחור, בולטות תקופות ממושכות שבהן הטמפרטורה העולמית הממוצעת הייתה נמוכה ב-3°C-6°C לעומת ממוצע הטמפרטורות כיום. תקופות אלה נקראות **"עידני הקרח"**.

במהלכו של כל עידן קרח הצטברו שכבות עבות מאוד של קרח בקטבים, ונוצרו קרחונים גדולי ממדים - גם בקטבים וגם באזורים כמו מרכז אירופה ומרכז אמריקה הצפונית, ששורר בהם אקלים ממוזג. בשיאו של כל עידן קרח כיסו קרחוני ענק שטחים נרחבים מן היבשות, שכיום שורר בהן אקלים ממוזג ונוח. במהלכם של עידני הקרח הצטברו כמויות עצומות של מי אוקיינוסים והפכו לקרחוני ענק, ומפלס מי האוקיינוסים היה נמוך בעשרות מטרים מזה הנוכחי. הירידה העצומה במפלס מי האוקיינוסים חשפה שטחי יבשה נרחבים וגרמה להיווצרותם של גשרים בין-יבשתיים, שאפשרו נדידה ומעבר של בעלי חיים ממקום למקום. בתום כל עידן קרח חלה תקופה של התחממות, שבה שרר אקלים הדומה לזה של ימינו. בסך הכול היו 4 עידני קרח ו-4 תקופות בין-קרחוניות. התופעה חזרה על עצמה במרווחים קבועים (פחות או יותר) של 140 אלף שנה בערך.

משערים שאחת הסיבות לקיומם של עידני הקרח היא שינויים מחזוריים, המתרחשים אחת ל-100,000 שנה בערך, במסלולו של כדור הארץ סביב השמש. שינויים אלה גורמים להפחתה של כמות הקרינה המתקבלת מן השמש, ולשינויים בחלוקה של כמות הקרינה על פני כדור הארץ.

סיבה נוספת היא ויסות האקלים העולמי ופיזור אנרגיית החום בפני כדור הארץ על ידי מערכת הזרמים העולמית. בכל אחת מתקופות הקרח אירעו כמה וכמה מחזורים של שינויי אקלים פתאומיים וקיצוניים, שנבעו מהאטה משמעותית ולעיתים אף עצירה של זרמי האוקיינוסים, אם כתוצאה מהפשרתן של כיפות הקרח הגדולות שכיסו אז את כדור הארץ, או מתזוזת היבשות שמנעו מזרמים חמים להתפשט מהאזור המשווני לכיוון הקטבים. וכך, כשהתרחשו עידני הקרח - החורפים היו קרים וממושכים, וקרחונים נוצרו גם בקווי הרוחב ששרר בהם אקלים נעים ומתון. עידן הקרח האחרון הסתיים לפני כ-10,000 שנה, וכיום אנחנו נמצאים בתקופה בין-קרחונית.

מה היה הקשר בין ריכוז הפחמן הדו-חמצני לשינויי האקלים בעבר?

מהגרף המראה את נתוני הטמפרטורות וריכוז הפחמן הדו-חמצני מלפני 400,000 שנים ועד ימינו, אפשר ללמוד שבתקופות החמות, הבין-קרחוניות, היה ריכוזו של הפחמן הדו-חמצני באטמוספרה גבוה יותר, ואילו בתקופות הקרות, בעידני הקרח, היה ריכוזו נמוך.

ראינו כי גם בעשרות השנים האחרונות עולה ריכוזו של הפחמן הדו-חמצני באטמוספרה, וכי במקביל חלה מגמה של עלייה בטמפרטורות. האם אפשר להסיק מכך שמאחר שאנו מצויים בתקופה בין-קרחונית - הטמפרטורה עולה, ובמקביל עולה גם ריכוז הפחמן הדו-חמצני?

אם נחזור ונעיין בגרף המתאר את העלייה בריכוז הפחמן הדו-חמצני מראשית הספירה ועד ימינו (איור 62), נמצא כי בולט הזינוק החד בריכוז הפחמן הדו-חמצני ב-150 השנים האחרונות: זוהי עלייה שאין לה אח ורע בכל התיעוד הידוע של ריכוז הפחמן הדו-חמצני באטמוספרה! עלייה חריפה זאת אינה קשורה לעידן הבין-קרחוני שאנו מצויים בעיצומו אלא היא נגרמה כתוצאה משרפת הדלקים המאובנים, שהחלה בזמן המהפכה התעשייתית.

שינויי אקלים מהירים

כאשר בוחנים ומשחזרים את שינויי האקלים בכדור הארץ בעבר הקרוב ובעבר הרחוק, מסתבר שגם בעבר התרחשו פעמים רבות שינויים משמעותיים - מרביתם שינויים איטיים והדרגתיים. ואולם מדי פעם אנו מוצאים גם שינוי אקלימי שהתרחש באופן חד ופתאומי, בתוך שנים ספורות. שינויים מהירים כאלה התרחשו בעבר ומתרחשים גם כיום, ככל הנראה כתוצאה מאירועים חריגים ובעלי עוצמה כגון פגיעת **אסטרואיד** (שהגיע לפני כדור הארץ כ**מטאוריט**) או התפרצויות געשיות רבות עוצמה. לדוגמה: התקררות חדה ומהירה, שהתרחשה לפני כ- 65 מיליוני שנים, גרמה להכחדתם של אלפי מינים של בעלי חיים, ובראש ובראשונה של שליטי כדור הארץ באותה עת, הדינוזאורים.

כיצד קרה הדבר?

מרבית המדענים סבורים כי השינוי נגרם עקב פגיעתו של אסטרואיד שקוטרו המשוער היה 10 ק"מ, אשר יצר מכתש בקוטר של 180 ק"מ באזור חצי האי יוקטן (מכסיקו). פגיעה זאת העיפה לאטמוספרה מיליארדי טונות של אבק ואפר, ששהו תקופה ממושכת בגובה רב וחסמו את דרכה של קרינת השמש אל פני הקרקע. חסימת הקרינה של השמש גרמה לאפלה על פני כדור הארץ, ולהתקררות האקלים. השינוי האקלימי המהיר גרר בעקבותיו פגיעה קשה בצמחייה, קריסה של כל שרשרת המזון, והכחדה המונית של בעלי החיים.

קבוצה קטנה אחרת של מדענים טוענת כי ההכחדה של הדינוזאורים, מקורה בהתפרצות געשית עזה שפקדה את כדור הארץ. מדענים אלה מצביעים על שכבות עבות של סלעים געשיים המצויים ברמת דקאן שבהודו, המשמשים עדות להתפרצות הרי געש בתקופה המקבילה להכחדה, שהתרחשה לפני 65 מיליוני שנים.

הפעילות הגעשית בכדור הארץ היא כיום "רגועה" יחסית, ורק אחת לעשור (בערך) נרשמת התפרצות גדולה שבה הר געש פולט אל האטמוספרה ענני ענק של אפר געשי וכמויות גדולות של גזים. האבק הדקיק נישא אל שכבות האטמוספרה הגבוהות ומתפזר על ידי הרוחות במשך שבועות וכך נוצר מעטה חובק עולם של חלקיקים - מעין שמיכה דקה המחזירה חלק מאור השמש לחלל. ההתקררות שנוצרת בעקבות פעילות געשית כזאת אינה דרמטית כמו באירוע שגרם להכחדת הדינוזאורים, אבל די בה כדי לגרום לחורפים קשים יותר ולמשקעים מרובים.

מן ההיסטוריה הקרובה ידועה ה"שנה ללא קיץ", שנת 1816, שכונתה כך בגלל אירועים שהתרחשו בעקבות התפרצותו של הר הגעש טמבורה בחצי האי יאווה (אינדונזיה). באותה שנה ירדו שלגים כבדים באזורים רבים בעולם בחודשים מאי ויוני, חודשים השייכים לעונת האביב והקיץ בחצי הכדור הצפוני, ואף בחודשים שלאחר מכן עוד שררו באזורים רבים טמפרטורות מתחת לאפס. גל הקור שפקד אז את העולם כולו הביא להרס עצום של גידולים חקלאיים שהיו אמורים להבשיל בקיץ, והתוצאה המיידית הייתה מחסור חמור במזון. ←

אסטרואיד

גוף שמימי קטן, בדרך כלל עשוי סלע. האסטרואידים, אשר גודלם נע בין כמה ק"מ ועד מאות ק"מ, מקיפים את השמש. משערים שקיימים מיליוני אסטרואידים, והם נעים בחגורת האסטרואידים, בין מסלוליהם של כוכבי הלכת מאדים וצדק.

מטאוריט

חלקיק (רסיס של אסטרואיד או שביט) שהגיע מהחלל, חדר דרך האטמוספרה ונחת על פני כדור הארץ. כאשר המטאוריט נשרף בהגיעו לאטמוספרה, נראה לעינינו הבזק אור קצר. זהו מטאור.

התפרצותו של הר הגעש פינטובו שבפיליפינים ביוני 1991 גרמה לפיזור אבק ואפר געשי בשכבות העליונות של האטמוספרה, שהסתירו מעט את קרינת השמש. החורף של 1992-1991 היה קר, ארוך וגשום בכל רחבי העולם, וגם בישראל זכורה שנה זאת כשנה קרה וגשומה במיוחד.

שינויי אקלים אלה, הנגרמים כתוצאה מפעילות געשית, אמנם גורמים לירידה בטמפרטורות של כדור הארץ, אבל שינוי זה הוא קצר-מועד, ולאחר תקופה קצרה המצב חוזר לקדמותו.

בפרק זה עסקנו בשינויים אקלימיים הנובעים מיחסי הגומלין המורכבים בין הים לאטמוספרה. נסיים את הפרק באחת הדוגמאות הבולטות לתופעה שמקורה בשינויים מקומיים של רוחות וזרמים, אך השפעתה ניכרת בתופעות אקלימיות ברחבי העולם: האל-ניניו.

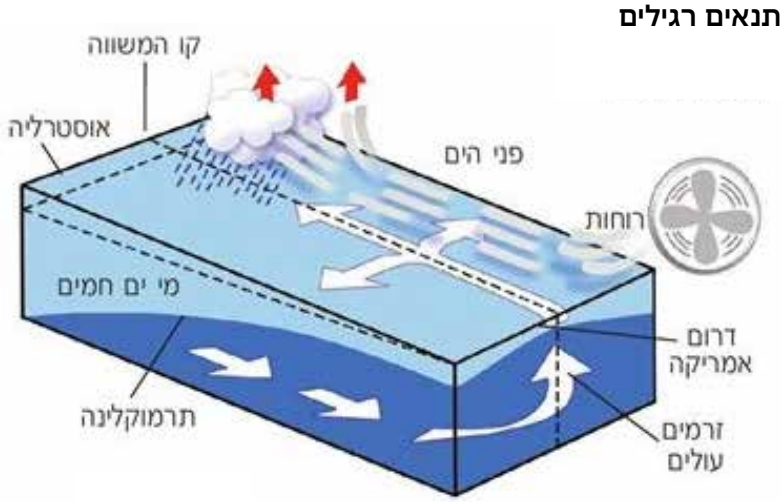
אל-ניניו ולה-ניניה

דייגים בחופי פרו שבאמריקה הדרומית, לחופו המזרחי של האוקיינוס השקט, הבחינו כבר לפני מאות שנים כי אחת לכמה שנים, בסוף דצמבר, בתקופת חג המולד, מופיע בפני השטח של האוקיינוס זרם של מים חמים. בשנים רגילות נמשכת תופעה זאת תקופה קצרה, שבוע-שבועיים, אך אחת לכמה שנים היא עשויה להימשך כמה חודשים. בשנה כזאת כמות הדגים פוחתת לאורך חופי פרו ואקוודור במידה ניכרת. לתופעה הזאת נלווה גם מזג אוויר סוער, המלווה בגשמי זעף הגורמים לשיטפונות. הדייגים כינו את התופעה בשם "אל-ניניו" (בספרדית - "הילד", על שמו של ישו התינוק, אשר על פי המסורת הנוצרית נולד בתקופה זאת של השנה). מחקרים מדעיים הראו שהתופעה שהדייגים כינו בשם "אל-ניניו" היא חלק מתהליך מחזורי של שינוי אקלימי קצר טווח המתרחש אחת ל-7-4 שנים, אשר יש המכנים אותו **"התנודה הדרומית"**. מחזור אל-ניניו נגרם עקב החלשה זמנית של רוחות הסחר המזרחיות באזור קו משווה באוקיינוס השקט, החלשה הגורמת למי האוקיינוס החמים להתפשט מזרחה, לכיוון חופי אמריקה הדרומית. בעקבות זאת שכבת המים החמים, שהיא שכבה דלה במזון, הולכת ומתעבה ככל שמתקדמים לכיוון מזרח האוקיינוס (איור 69).

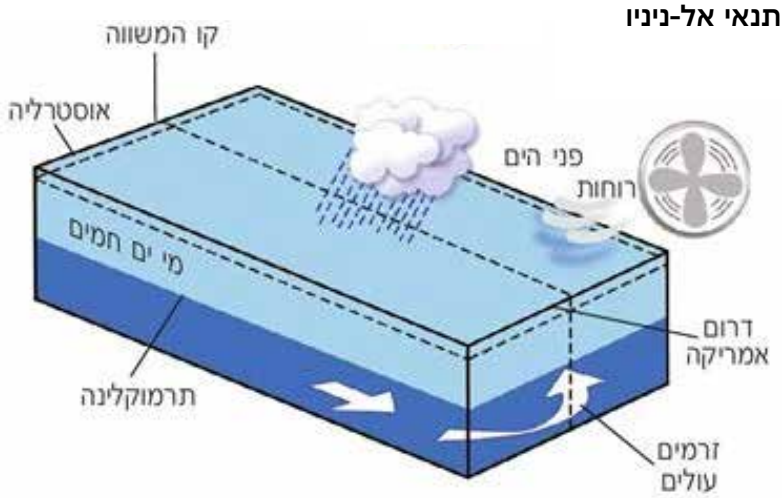
לפיכך **התרמוקלינה**, שכבת המים המפרידה בין המים החמים והדלים בחומרי מזון, המצויים בפני המים, ובין מי העומק הקרים והעשירים בחומרי מזון - הולכת ומעמיקה. ההתפשטות של מי הים החמים גורמת לקטיעתו של זרם מעמקים קר ועשיר במזון, אשר בתנאים הרגילים מייצר בחופים המערביים של אמריקה הדרומית דגה שופעת ועשירה.

ההשפעה של אל-ניניו אינה מוגבלת רק ליבשת אמריקה הדרומית. מחקרים הנערכים כיום קושרים לתופעה זאת הפרעות ושינויים במערכות רבות של זרימה אטמוספרית בעולם כולו. הנה כמה דוגמאות לשינויים המתרחשים באזורים שונים בעולם בשנת אל-ניניו:

תנאים רגילים



תנאי אל-ניניו



איור 69

האוקיינוס השקט בתנאים רגילים ובתנאים של שנת אל-ניניו. שימו לב להשתנות הרוחות והמשקעים ולשינוי בתרמוקלינה ובזרמים העולים (כדור הארץ והסביבה)

חלה הפחתה ניכרת במספרן ובעוצמתן של סופות ההוריקן באוקיינוס האטלנטי. באוסטרליה, בדרום-מזרח אסיה ובמרכז ארה"ב, מתרחשות תקופות בצורת קשות. הבצורות, והשרפות הקשות שנגרמות בעקבותיהן, פוגעות ביבולי החקלאות ובעיקר ביבולי החיטה במקומות אלה.

בחופי פרו ואקוודור, באזורים שבדרך כלל הם יבשים למדי, מתרחשים אירועי שיטפון כבדים. הגשמים העזים, היוצרים תוך זמן קצר אזורי ביצות עם צמחייה צפופה ובעלי חיים המתרבים במהירות, משנים את איזון המערכת האקולוגית. בחופי פרו ואקוודור חלה פגיעה קשה בענף הדיג. תמותת הדגים גורמת לתמותה של בעלי החיים הניזונים מהם (בעיקר עופות המים) ולפגיעה בכל שרשרת המזון. ההשפעות של אל-ניניו פגות כעבור כשנה, ובמקומות שבהם התופעה מתרחשת המצב חוזר לקדמותו.

מצב הפוך לאל-ניניו מתרחש באותו אופן מחזורי וקרוי "**לה-ניניה**" ("הילדה" בספרדית). במצב לה-ניניה חלקו המזרחי של האוקיינוס השקט מתקרר, ההתאדות של מי האוקיינוס פוחתת, וגם כמות הגשמים פוחתת.

המצב הזה גורם לתקופות בצורת קשות במדינות אמריקה הדרומית, בעוד שבמקומות רבים אחרים בעולם יורדות כמויות גדולות מאוד של משקעים, הגורמות לשיטפונות קשים. גם תופעת לה-ניניה נמשכת כמה חדשים עד שנה, ואחר כך חוזרים לשרור תנאי מזג האוויר הממוצעים בכל אזור.

מחזורי אל-ניניו ולה-ניניה הם תנודה אקלימית קצרת טווח, המתרחשת באופן לא קבוע. הסיבות להופעתם עדיין אינן ברורות לגמרי, אבל לאור השפעתם הרבה בכל רחבי העולם מתנהל מעקב רציף אחר הרוחות הנלוות להם. מעקב זה נעזר גם בנתונים שונים הנאספים על ידי מערך של לווייניים בחלל ומצופים באוקיינוס, ובמדידות קפדניות של טמפרטורת מי הים. איסוף הנתונים והמעקב נועדו להתריע חודשים מראש על מגמת ההתחממות או ההתקררות של האוקיינוסים.

מקורות לפרק זה

Colling, A. 2001. **Ocean circulation**. Prepared by an Open University course team. Butterworth-Heinemann, A division of Reed Educational and Professional Publishing Ltd.

Pinet, P. R. 2019. **Invitation to oceanography**. Jones & Bartlett Learning.

Wright, J., Colling, A. and Park, D. 1999. **Waves, Tides, and Shallow-water Process**. Open University. Oceanography Course Team.

יאיר, י. וזיו, ב. 1993. **מבוא למטאורולוגיה**. בהוצאת האוניברסיטה הפתוחה.

פלכסר, ע., גינת, ח., שטסל, ז., סביר, ב., דינר, י., עספור, מ. ויאיר, י. 2010. **כדור הארץ והסביבה**, ספר לימוד בגאוגרפיה ופיתוח הסביבה. בהוצאת משרד החינוך, התרבות והספורט. המינהל הפדגוגי. האגף לתוכניות לימודים. ישראל.

אוקסנברג, א. 2018. מה זה גז חממה? אתר 'מכון דוידסון', הזרוע החינוכית של מכון ויצמן למדע.

אליאסון, א. 2018. מי סגר את הברז לזרם הגולף? אתר 'מכון דוידסון', הזרוע החינוכית של מכון ויצמן למדע.

8

סביבות החיים בים

תמר גיא-חיים ומִיה אלסר

8.1 אזור החוף

אזור המפגש בין הים ליבשה, המושפע מתהליכי הגאות והשפל, נקרא כְּרִית. היצורים (אורגניזמים) שחיים באזור הכרית חווים שינויים קיצוניים ביובש, טמפרטורה ומליחות, וחשופים לפעילותם האיתנה של הגלים.

פני הים באזור הכרית עולים (בגאות) ויורדים (בשפל) במחזוריות קבועה הנקבעת על ידי מיקום הירח יחסית לכדור-הארץ. כוח הכבידה של הירח מוביל ליצירת גאות בצד של כדור-הארץ הקרוב ביותר לירח ובצד המרוחק ביותר ממנו ושפל באזורים הניצבים למיקום הירח. בגלל סיבוב כדור הארץ סביב צירו, אירועי גאות ושפל מתרחשים פעמיים בממוצע ביום, אחת ל-12:24 שעות. בחופי אוקיינוסים, שינויי המפלס בין הגאות והשפל עשויים להגיע למעל 10 מטרים (שיא ההבדלים נמצא במפרץ פאנדי בקנדה – 16.2 מטרים), אך בישראל, הן בים התיכון והן במפרץ אילת - אזורים התחומים בין יבשות - משרעת הגאות והשפל הינה מזערית, 20-40 ס"מ.

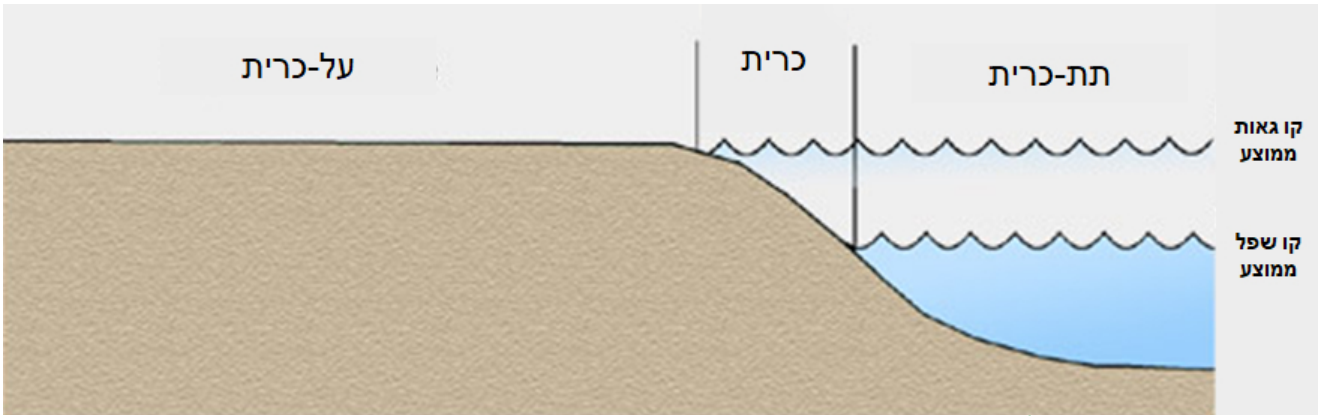
מרבית האורגניזמים החיים בחוף הים שוכנים על הקרקעית, בתוכה או בצמוד לה ונקראים **בֶּנְתוֹס** (**benthos**). מחזור החיים של הבנתוס מורכב וכולל שלבי חיים צעירים הנקראים **פגיות** (לארוות), שלרוב נישאים במים ומהווים חלק מהפלנקטון. התקופה בה נישאות הפגיות במים נקראת **משך זמן לארוולי פלאגי** (PLD ,Pelagic Larval Duration) ועשויה להימשך ימים בודדים ועד שבועות וחודשים. לאחר זמן זה, הפגיות מתיישבות על הקרקעית, בתוכה או בסמוך לה ועוברות מטמורפוזה (גלגול) לצורת הבוגר. תהליך זה בו פרטים צעירים מצטרפים לאוכלוסייה הבוגרת נקרא **גיוס** (recruitment).

החוף הסלעי

אחת התופעות הבולטות ביותר בחוף הסלעי הינה **חֲגוֹר** מינים (**Zonation**) – חלוקת אזור החוף לחגורות (רצועות) מקבילות מקו המים ומזרחה, המאופיינות במגוון מינים מסוים המושפע ממידת הכיסוי והגילוי של הסלע על ידי מי-הים, בעקבות הגאות והשפל. תופעת החגור בחוף נוצרת בשל השינויים בתנאי החיים בין האזורים המוצפים קבוע על ידי מי-הים לבין האזורים המוצפים רק בחלק מהזמן, או אלו היבשים במרבית הזמן. מינים מאכלסים רצועות שונות על-פי דרגת עמידותם ליובש ועל פי דרגת הצורך שלהם בכיסוי מים, הנחוצים כדי למצוא מזון או כדי להתרבות.

בֶּנְתוֹס
(Benthos)
חברת הצמחים ובעלי-החיים השוכנים על, בתוך או בצמוד לקרקעית.

חֲגוֹר
(Zonation)
חלוקת בית הגידול לאזורים המאופיינים בתנאים אביוטיים וביוטיים מסוימים. החגור באזור הכרית הינו תופעה כלל-עולמית, וכולל חגורות מקבילות לקו החוף המאופיינות בחברות אקולוגיות מסוימות באזורי התת-כרית, כרית ועל-כרית.



איור 1

חֲגור באזור החוף

שלוש החגורות העיקריות בכרית (איור 1), שכל אחת מהן מאופיינת בחי וצומח ייחודיים, הן:

א. **אזור התת-כרית** (Subtidal) - אזור הנמצא מתחת לגובה פני הים, גם בזמן שפל ומוצף בקביעות על ידי הים. מתאפיין במגוון סרטנים , קיפודי-ים, אלמוגים, דגים.

ב. **אזור הכרית** (Intertidal) - האזור החופי הנתחם על ידי גובה פני המים בזמני הגאות והשפל, נחשף ומתכסה במים לסירוגין. מתאפיין במגוון אצות, חלזונות, צדפות, ספוגים, שושנות-ים, חיטחביים ואצטלניים.

ג. **אזור העל-כרית** (Supratidal) - רצועת החוף הנמצאת מעל לגובה פני המים בגאות ומושפעת מרסס הגלים. אינו מוצף ונרטב אך ורק מרסס הגלים בעת שבירתם. התנאים בחגורה זו הינם הקיצוניים ביותר. מתאפיין בבלוטי-ים ובחלזונות הניזונים מציאנובקטריה.

חלוקה זו לרצועות נשמרת בכל החופים הסלעיים שברחבי הימים והאוקיינוסים בעולם. הגבולות בין האזורים נקבעים על ידי משטר הגאות והשפל המקומיים, ועל ידי תהליכים אקולוגיים דוגמת טריפה ותחרות.

איור 2

טבלאות גידוד
(גיל רילוב)

טבלאות הגידוד הינן בית גידול ייחודי ומאופיינות במשטחי סלע שגלי הים כרסמו בהם עד לגובה פני הים הממוצע ומהוות משטחים אופקיים רחבים בעלי חשיבות אקולוגית רבה באזור בו משרעת הגאות והשפל מצומצמת (איור 2). חלזונות קבועי-מקום (צינורנים, Vermetids) בונים שונית משלדי הקונכיות שלהם בגובה פני-הים בתהליך של **בנייה ביוגנית.** שונית זו (הנקראת גם "שונית צינורנים" או "שונית ורמטידים") מגנה על טבלת הגידוד מבליית גלי הים. בישראל, טבלאות הגידוד מהוות כעשרה אחוזים מקו החוף הים תיכוני, שאורכו כ-200 ק"מ. טבלאות הגידוד הינן בתי גידול מורכבים, הכוללים בורות המתמלאים במים ('בורות שפל'), אזורים חשופים ומוגנים, ותומכות במגוון מינים גבוה, הכולל אצות, חלזונות, צדפות, סרטנים, וחסרי-חוליות נוספים. מכיוון שהצינורניים משנים את הסביבה הפיזית ובכך את התנאים עבור מגוון האורגניזמים החיים בטבלת הגידוד, הם נחשבים ל**מהנדסי סביבה.**

טבלת-גידוד

(Abrasion platform) - משטח סלעי שגלי הים כרסמו בו עד לגובה פני הים הממוצע. חלזונות קבועי-מקום (צינורנים) בעלי קונכייה קשה בונים שונית בגובה פני-הים המגנה על הטבלה מגלי הים.

בנייה ביוגנית

(Biogenic structure) - יצירת מבנים על ידי אורגניזמים חיים (למשל, שונית אלמוגים).

מין מהנדס-סביבה

(Ecosystem engineer) מין היוצר, משנה או הורס באופן משמעותי את בית הגידול שבו הוא נמצא, ובעשותו כך, משנה את תפוצתם של אורגניזמים אחרים. לדוגמא: עצים, אלמוגים בוני-שונית.

מחקרים אקולוגיים בחוף הסלעי

אזור החוף הסלעי מהווה מוקד משיכה למחקרים בנושאים אקולוגיים, מאחר שהוא מאפשר תצפיות על מגוון רב של אורגניזמים בתנאי סביבה המשתנים מקצה (יבשתי) לקצה (ימי) בשטח גיאוגרפי מצומצם. אכן, כמה מהמחקרים פורצי הדרך באקולוגיה נערכו בחוף הסלעי. להלן מספר דוגמאות:

רוברט פיין

בשנת 1969 מדען בשם רוברט פיין עבד באזור הכרית הסלעי בחופי מדינת וושינגטון. הוא הסיר מרצועת חוף את כל הפרטים של כוכב הים הסגול *Pisaster* שמהווה טורף-על במארג המזון. כתוצאה מכך, מגוון המינים הכולל ירד בחצי. המינים שמהווים טרף עבור כוכב הים, התחרו ביניהם על שטח מסלע פנוי, ודחקו אחד את השני. פיין כינה מינים המשנים את הרכב ומבנה החברה באופן משמעותי יותר מאשר מספרם היחסי בחברה - מיני מפתח. לוטרות הינן דוגמא נוספת למין מפתח. הלוטרות טורפות קיפודי-ים אשר ניזונים מאצות קלף ומסוגלים לכלות יערות קלף שלמים כאשר אוכלוסיותיהן אינן מבוקרות באמצעות טריפה על ידי הלוטרות (בקרה מלמעלה למטה).

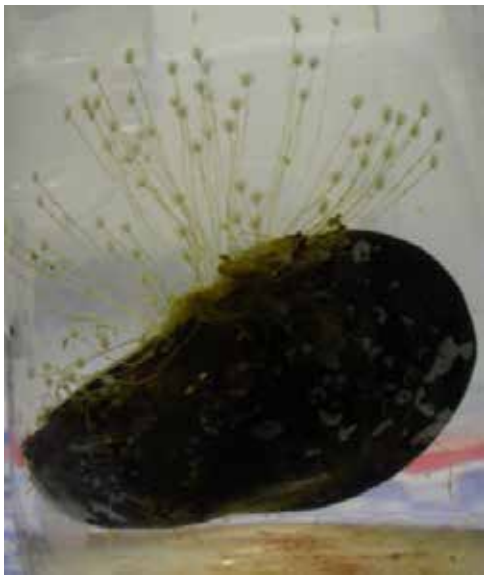
מדען בשם ג'וזף קונל הציע שתכיפות נמוכה או גבוהה של הפרעה סביבתית תוביל למגוון מינים נמוך, בעוד שתכיפות בינונית - למגוון מינים גבוה. השערה זו ידועה בתור השערת ההפרעה הבינונית. בשנת 1979 מדען בשם וויין סוסה בחן השערה זו בחוף הסלעי של מדינת קליפורניה. הוא הפך אבנים עם חברות צימדה (fouling) על גבן בתדירות משתנה ובכך יצר הפרעה באופן מלאכותי. סוסה מצא שעל גבי האבנים שהפך בתדירות נמוכה התפתחו מינים שתלטנים (דומיננטים) שדחקו מינים אחרים ואילו על גבי האבנים שהפך בתדירות גבוהה התפתחו פחות מינים. בשני מקרים אלו המגוון היה נמוך יותר מאשר כאשר תדירות הפיכת האבנים הייתה בינונית.

החוף הסלעי - התאמות החי והצומח לתנאי עקה

האורגניזמים החיים בחוף הסלעי חשופים לתנאי עקה (סטרס) בעקבות חשיפה ליובש, קרינה, מפץ הגלים וטמפרטורה גבוהה. בעקבות כך, פיתחו התאמות (אדפטציות) מיוחדות לתנאים אלו. התאמות אלו כוללות היצמדות חזקה לסלעים, על-מנת להתמודד עם פעילות הגלים. התאמה זו אופיינית לחלזונות דוגמת הצלחית (*Patella*) (איור 3), חלזון הניזון מאצות המצויות על הסלעים, בעל רגל שרירית וחזקה המאפשרת היצמדות לסלעים בחוזקה, ולסרטנים ישיבים הנקראים בלוטי-ים (barnacles), המפרישים חלבון הידוע כאחד מהדבקים החזקים ביותר בטבע. בצדפות מסוימות קיימים חוטי הצמדה דקים הנקראים סיבי ביסוס (byssal threads) בעזרתן הן נאחזות במצע (איור 4). דרך נוספת להגנה מפני מפץ הגלים היא באמצעות מחסה בנקיקים ובחריצי סלע, כפי שניתן לראות בחלזונות מסוג חופית (*Littorina*) השכיחים באזור העל-כרית.

איור 3

צלחית מכחילה
(*Patella caerulea*)
(גיל רילוב)



איור 4

סיבי ביסוס בצדפת הבוצית
(תמר גיא-חיים)

יובש הוא גורם העקה העיקרי באזור הכרית והעל-כרית. עמידות לתנאי יובש מוגדרת כיכולת לשרוד התייבשות עד ל 10% מתכולת המים בגופם. בעוד שאורגניזמים ניידים יכולים להימנע מהתייבשות על ידי הגירה לאזור מתאים (למשל, אל בור שפל), אורגניזמים נייחים או ניידים פחות, צריכים להתאים את עצמם לתנאי יובש זמניים או ממושכים ולכן נצמדים למצע בחוזקה כדי לאבד כמה שפחות מים (בלוטי-ים, צלחיות) ואוגרים מים בחללי הגוף (שושנות-ים, איור 5) או בחלל הגלימה (החלל מתחת לקונכייה בחלזונות, בצדפות ובבלוטי-ים). צלחיות מתאימות עצמן לסלעים עליהם הן יושבות - שפת הקונכיה מותאמת לחספוסי הסלע שעליו יושבת הצלחית. למרבית הצלחיות מקום מושב קבוע הנקרא "צלקת". בזמני הגאות יוצאות הצלחיות לרעות בסביבתן ובעת השפל חוזרות כל אחת למקומה הקבוע, ובכך נמנעות מהתייבשות.

איור 5
שושנת ים אדומה, אוגרת מים בחלל הגוף בזמן השפל
(גיל רילוב)

איור 6
סלען זיפני בזמן שפל
(גיל רילוב)

ברוב האורגניזמים החיים בכרית הנשימה נעשית באמצעות זימים המאפשרים לקלוט חמצן מומס מהמים, או ישירות בדיפוזיה מהמים, ולכן אינם יכולים לסבול תנאי יובש ממושכים. בעלי-חיים בעלי יכולת תנועה (סרטנים למשל, איור 6) משנים את מיקומם בהתאם לגאות ולשפל. בעלי-החיים השוכנים באזור העל-כרית, דוגמת חלזונות מסוג חופית, פיתחו זימים המאפשרים קליטת חמצן מהאוויר כהתאמה לתנאי היובש הקיצוני בו הם שרויים. הורדת קצב ה**מטבוליזם** (חילוף החומרים) וצריכת החמצן, משמשת כאחת ההתאמות המרכזיות של בעלי החיים בכרית לחשיפה ממושכת לתנאי יובש. במספר בעלי-חיים (חלזונות, צדפות ובלוטי-ים) התפתחה יכולת של נשימה אנאירובית (תהליך נשימה תאית שבו לא נעשה שימוש בחמצן).

הבדלי טמפרטורה עשויים להיות גבוהים מאוד באזור הכרית. מרבית האורגניזמים הימיים הינם **אקטותרמיים**, כלומר אינם יכולים לווסת את טמפרטורת גופם והינם תלויים בטמפרטורת הסביבה. עלייה בטמפרטורה מגבירה את קצב המטבוליזם ואת הדרישה לחמצן. אחת ההתאמות לחיים בתנאים אלו היא באמצעות שינוי הרכב הממברנות (קרום התא). בטמפרטורות גבוהות, רמת הצמיגות של הממברנות יורדת, ורמת השומנים הרוויים בהן עולה, על מנת לשמור על פעילותם התקינה של התאים ועל קצבי מטבוליזם אחידים. התאמה נוספת לחיים בתנאי חום קיצוניים היא ייצור של חלבוני עקת חום (Heat Shock Proteins, HSPs). חלבונים אלו מגנים על אנזימים חשובים מפני נזקי עקת חום ומיוצרים על ידי אורגניזמים רבים באזור הכרית כגון אצות, צלחיות, צדפות ובלוטי-ים. צבעי קונכייה בהירים או שטח פנים גדול מאפשרים למיני כרית שונים (בלוטי-ים, צלחיות) להתמודד עם עקת חום על ידי פיזור הקרינה או החום.

מליחות מי-הים עשויה להשתנות באופן קיצוני באזור הכרית, בייחוד באזורים הניתקים מהים הפתוח (בורות שפל). גשם יכול לגרום לירידה במליחות ואידוי-לעלייה במליחות. שינויים במליחות משנים את הלחץ האוסמוטי בתאי רקמות הגוף וגורמים להם להתנפח או להתכווץ. לאורגניזמים החיים בכרית יש התאמות להתמודד עם שינויים בלחץ האוסמוטי, כמו אגירת מלח ב**וואקולות** (אברוני תא חלולים הנמצאים באצות ובצמחים) או הפרשת מלח מבלוטות (בעשבי-ים). עם זאת, רוב האורגניזמים בכרית הם **אוסמו-קונפורמרים**: הם אינם יכולים לשלוט על תכולת המלח בגופם. ההתאמה לשינויים במליחות נעשית על ידי ייצור **אוסמוליטים** - תרכובות אורגניות מומסות הנמצאות בתאים ובאמצעות מעברן בממברנות שומרות על לחץ אוסמוטי שווה לזה של הסביבה הימית כדי למנוע את התכווצות התאים או התרחבותם.

החוף החולי והתאמות החי והצומח שבו

בניגוד לחוף הסלעי, המאופיין ביציבות המצע וברמת מורכבות מבנית גבוהה, החוף החולי הינו בעל מורכבות נמוכה ומצע לא יציב. חוסר יציבות המצע מהווה הפרעה תמידית להתיישבות אורגניזמים ובנוסף תנועת החול יוצרת אפקט שחיקה. מסיבה זו, עושר ומגוון המינים לרוב נמוכים יותר בחוף החולי, ולרוב בעלי-החיים בו יכולת תנועה כלשהי. החגור בחוף החולי אינו בעל גבולות ברורים כמו בחוף הסלעי, אך ניתן גם בו לאפיין שלוש חגורות. רצועת העל-כרית חשופה בעיקר לרסס הגלים ומאוכלסת על ידי הסרטן חולון החוף (*Ocypode*), הניזון משאריות חומר אורגני שנסחפו לחוף ומסתתר במחילות בשעות היום החמות.

אזור זה מהווה גם אתר הטלה מועדף על נקבות צבי-הים (בישראל, צב הים החום *Caretta caretta* וצב הים הירוק *Chelonia mydas* הנמצאים בסכנת הכחדה) ואתר קינון לעופות-מים. אזור הכרית החולי נשטף תדיר על ידי הגלים, ולכן האורגניזמים שבו פיתחו התאמות מיוחדות להתמודדות עם סחף הגלים ועם שחיקת גרגירי החול. למשל, צדפות ממין סירת משה (*Donax*) משתמשות ברגלן החזקה על מנת להתחפר עמוק בחול ולהימנע מסחיפת הגלים.

ברצועת הכרית ניתן למצוא סרטנים נתרנים מסדרת הקפזרגליים (Amphipoda), סרטנים כיסנאים (Mysida) וסרטנים שווי-רגליים (Isopoda) המתחפרים בחול במהלך היום ובשעות הלילה עולים אל עמודת המים. ההתחפרות מהווה מנגנון הגנה יעיל מפני טריפה (למשל, על ידי עופות מים).

אזור התת-כרית מכוסה תמידית במים - מקו השפל עד לעומק של כמה מטרים בודדים, וחיים בו תולעים, חלזונות, סרטנים וקיפודי-ים. למצע החולי יש רמת נקבוביות גבוהה, כ-40% מכלל נפח המצע, מה שמאפשר את התיישבותם של אורגניזמים זעירים (דוגמת מאיופאונה, פרוטוזואה, אצות צורניות וחיידקים) במי החללים שבו (איור 7). המאיופאונה היא קבוצה של אורגניזמים הקטנים מ-1 מ"מ, הכוללת תולעים נימיות (נמטודות), סרטנים זעירים, ותולעים רב-זיפיות. למיני מאיופאונה רבים יכולת הסתגלות לרמות חמצן נמוכות המאפיינות את תוך המצע החולי.

איור 7
נקבוביות בקרקעית חולית באזור התת-כרית, ראש הנקרה
(מִיה אלסר)

השפעות פעילות האדם על החי והצומח בחוף

אזורי החוף מהווה את החיץ בין הים ליבשה ובכך משמש מוקד משיכה לפעילות אנושית רבה: נופש, דיג, הקמת מבנים ותשתיות חופיות כגון נמלים ומעגני סירות. תהליכי הפיתוח בחופים כוללים חפירה, קדיחה, הקמת מבנים כגון שוברי גלים, העברת צינורות, כריית והזנת חול, ייבוש קטעי חוף, הפעלת כלים כבדים וחרישת החוף, ומובילים לעתים קרובות להרס בתי הגידול שבחוף באופן בלתי הפיך.
פעילות האדם חושפת את החופים ואת האורגניזמים השוכנים בהם לסכנות זיהום רבות: זיהומים כימיים-תעשייתיים, הזרמת שפכים, זיהומי דשנים מחקלאות, זיהומי נפט, פסולת פלסטיק, זיהום אור (מתאורה מלאכותית) וחום (מטורבינות במתקנים חופיים). בנוסף לאלו, שינויי אקלים הכוללים התחממות מי-הים, עליית מפלס והחמצת מי-הים, פוגעים ישירות במיני החוף המקומיים והרגישים לשינויים אלו, ומעודדים את התבססותם של מינים מהגרים ופולשים עמידים יותר, שדוחקים את המינים המקומיים ומשנים את הרכב ותפקוד המערכת האקולוגית בחוף. בכדי לשמור על המערכות האקולוגיות בחוף ומגוון המינים שבהן, יש לפקח על פיתוח התשתיות, לאסור על שימוש בחומרים המזיקים לסביבה, ולהקים שמורות ימיות בהן פעילויות כגון דייג ובנייה אסורות או מוגבלות.

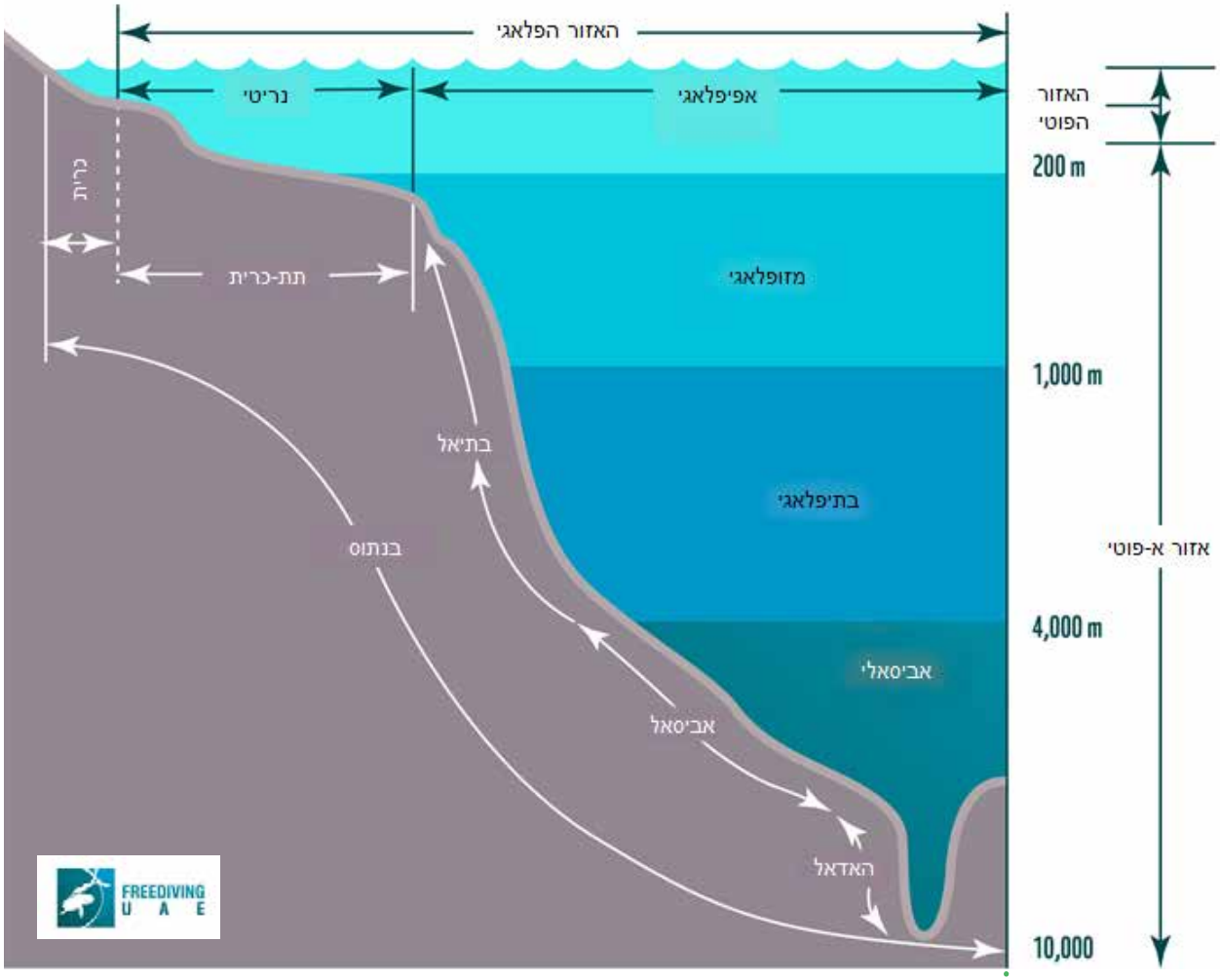
8.2 הים הפתוח

האוקיינוסים מכסים כ 71% משטח כדור-הארץ, מתוכם 10% הם בתי גידול חופיים ואילו הים הפתוח מהווה 90% משטחם. בשולי היבשות מצוי מדרון הנקרא גם מדף היבשת (continental shelf) המשתרע מתחת אל פני הים בשיפוע מתון עד לאיזור תלול יותר הנקרא מדרון היבשת (continental slope), הנמשך לכיוון הים העמוק. האזור הימי של מדף היבשת נקרא אזור חופי, או אזור נריטי (neritic zone), ועומקו לרוב פחות מ-200 מטרים. מעבר לאיזור מדף היבשת משתרע **הים הפתוח**. בית הגידול של הים הפתוח מתחיל בקצה החיצוני של מדף היבשת, ומשתרע מפני השטח עד למעמקים העמוקים ביותר של קרקעית האוקיינוס. סביבת המים של אזור זה, המכונה ביחד **האזור הפלאגי** (pelagic zone), יורדת לעומק עמודת המים ומחולקת לפי עומק החדירה היחסי של אור השמש (איור 8). האזור האפיפלאגי (epipelagic zone) משתרע מפני השטח עד לעומק של 200 מטרים, וכולל את האזור הפוטי (photic zone, נקרא גם euphotic zone) בו מתבצעת פוטוסינתיזה. האזור המזופוטי (mesophotic zone) נמצא בין העומקים 200 ל-1,000 מטרים, האזור הבתיאלי (bathypelagic zone) בין 1,000 ל-4,000 מטרים והאזור האביסאלי (abyssopelagic zone) מתחת ל4,000 מ'.

האזור הפלאגי
(Pelagic zone)

אזור הכולל את עמודת המים בים הפתוח.

איור 8
חלוקה לשכבות באזור הפלאגי



תנאי הסביבה בים הפתוח

השכבות בעמודת המים מתאפיינות בערכים שונים של משתנים פיזיקליים וכימיים - אור, טמפרטורה, מליחות, עכירות, חמצן ונוטריינטים. השכבה העליונה מתערבלת בהשפעת הרוחות ואילו השכבות התחתונות יציבות וקבועות. השכבה שבה השינוי בטמפרטורה מהיר יותר מהשכבה מעליה או מתחתה נקראת **תרמוקלינה** (thermocline). עובי התרמוקלינה ועומקה משתנים מאזור לאזור ומושפעים משינויי אקלים עונתיים וגובה קו הרוחב, ומגורמים סביבתיים מקומיים כמו זרמים וגאות ושפל. בקיץ, נוצרת שכבה עליונה חמה וקלה יותר הנפרדת משכבת העומק הקרה על ידי התרמוקלינה. תהליך זה נקרא **שיכוב תרמי** (thermal stratification). בחורף, גורמת התקררות השכבה העליונה לערבול עמודת המים ולהצטמצמות התרמוקלינה, או במקרה של ערבול מלא - גם להיעלמותה. תכונות עמודת המים והשכבות שבה, משפיעות על האורגניזמים החיים באזורים השונים של הים הפתוח. באזור הפוטי, משפיע השיכוב על זמינות הנוטריינטים מעל ומתחת לתרמוקלינה. הים הפתוח מהווה את המערכת האקולוגית הגדולה ביותר בכדור הארץ, ולמרות שניתן למצוא בו אזורים עשירים במגוון ביולוגי, עושר המינים (ביחס לנפח) בסביבת חיים זו הינו נמוך. צפיפות האורגניזמים הגבוהה מפצה על עושר המינים הנמוך והביומסה הכוללת בעלת חשיבות גדולה לחיים באוקיינוסים ולאדם.

החיים בים הפתוח

היצורים החיים בסביבה הימית נחלקים לשניים: ה**פלנקטון** (plankton), יצורים הנסחפים במים, מרחפים עם הזרם, בעלי יכולת שחייה מוגבלת מאוד או לא קיימת ("פלנקטון" ביוונית: נסחף, נודד); ה**נקטון** (nekton), יצורים המסוגלים לשחות וכוללים בתוכם דגים, צבים, תמנונים, יונקים ימיים; פלנקטון נע ב**מספרי ריינולדס** נמוכים (0.001 עד 10), כלומר בתנאי זרימה בעלת צמיגות גבוהה. נקטון, לעומת זאת, נע במספרי ריינולדס גבוהים, בתנאי זרימה ערבולית.

פלנקטון

הפלנקטון הימי כולל חיידקים, ארכיאונים (מיקרואורגניזמים פרוקריוטיים קדמוניים המאפיינים סביבות קיצון, כמו מעיינות חמים ואזורים געשיים), מיקרו-אצות, פרוטוזואה (חד-תאיים אאוקריוטיים, דוגמת ריסניות), ובעלי-חיים הנסחפים או צפים בעמודת המים. החלוקה הבסיסית ביותר של הפלנקטון היא ל**פיטופלנקטון** (phytoplankton), יצורים אוטוטרופיים המבצעים פוטוסינתזה ועל כן הם יצרנים ראשוניים, ו**זואופלנקטון** (zooplankton), בעלי-חיים הניזונים מהפיטופלנקטון. בנוסף להם, ה**בקרטריופלנקטון** (bacterioplankton) הם החיידקים והארכיאונים וה**ויריופלנקטון** (virioplankton) - הווירוסים הנמצאים בעמודת המים.

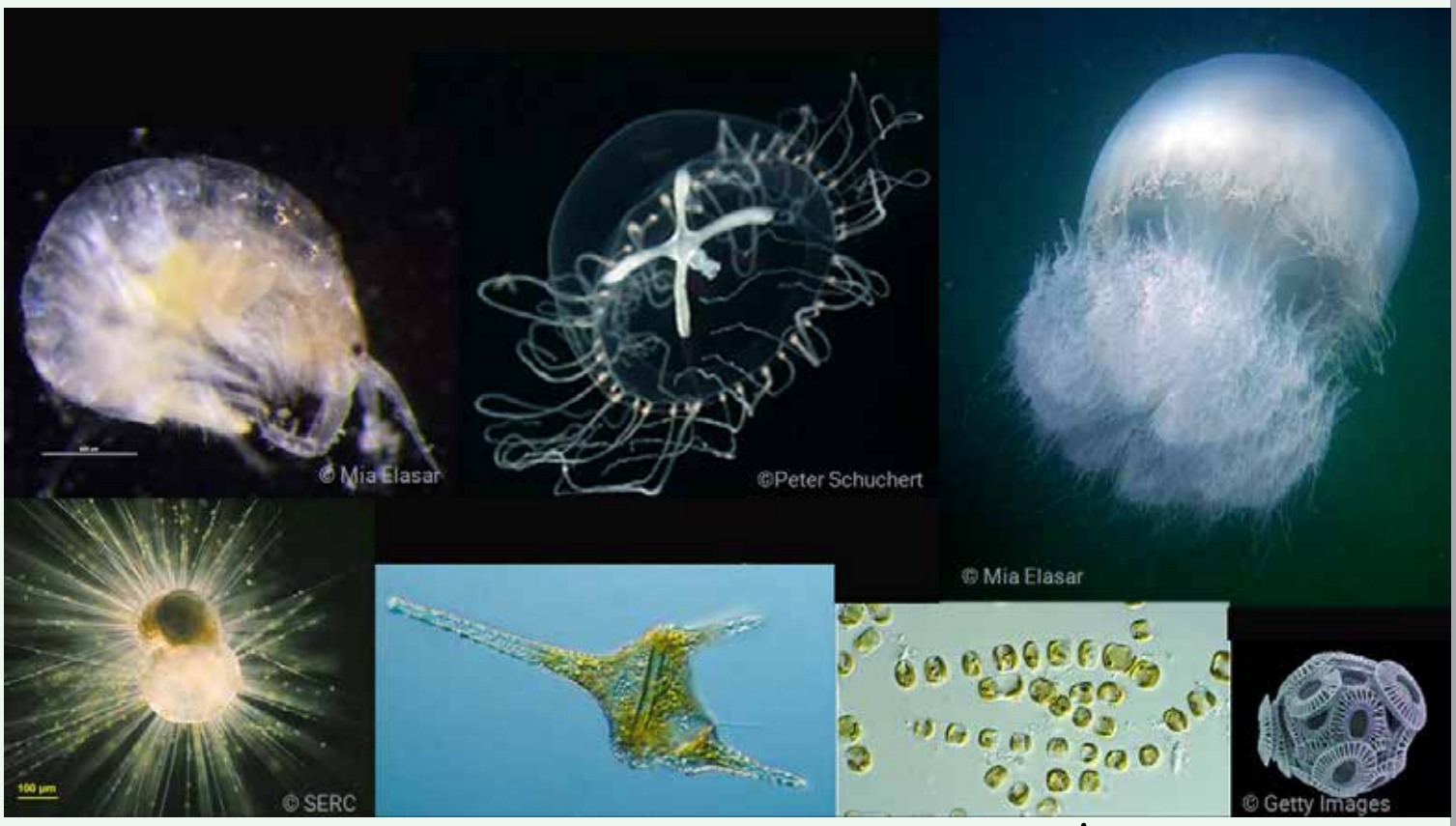
פלנקטון
(Plankton)
אורגניזמים בעלי יכולת תנועה אופקית מוגבלת, הנישאים במים באמצעות זרמים.

נקטון
(Nekton)
אורגניזמים בעלי יכולת תנועה אופקית, גם כנגד כיוון הזרמים. למשל: דגים, דיונונים, תמנונים, מחושתנים (לובסטרים), צבי-ים ויונקים ימיים.

מספר ריינולדס
(Re)
הוא גודל שמבטא את היחס בין כוחות האינרציה של הנוזל לבין כוחות החיכוך הפועלים בתוך הנוזל. לפי גודל זה אפשר לחזות אם בתנאי זרימה מסוימים תהיה זרימה שכבתית (למינרית), האופיינית למספרי ריינולדס נמוכים, או זרימה ערבולית (טורבולנטית), ששכבות הזורם בה מתערבלים ואופיינית למספרי ריינולדס גבוהים. ככל שהצמיגות גדולה יותר, כך מספר ריינולדס קטן יותר.

פיטופלנקטון
(Phytoplankton)
אורגניזמים פלנקטוניים מיקרוסקופיים אשר מהווים את היצרנים הראשונים במארג המזון הפלאגי.

זואופלנקטון
(Zooplankton)
אורגניזמים פלנקטוניים הטרוטרופיים במארג המזון הפלאגי.



איור 9

חלוקת יצורי הפלנקטון על פי גודלם. (מימין למעלה ונגד כיוון השעון): **מגה-פלנקטון (מדוזה); מקרו-פלנקטון (הידרוזואה); מזו-זואופלנקטון (אמפיפודה); מיקרו-פלנקטון (פורמיניפרה); ננו-פלנקטון (דינופלגלט); פיקו-פלנקטון (חיידקים); פמטו-פלנקטון (וירוס)**

מחלקים את הפלנקטון גם על-פי גודל: מגה-פלנקטון (>20 ס"מ), הכולל מדוזות ומסרקניות; מקרו-פלנקטון (2-20 ס"מ), דוגמת הידרוזואה; מזו-זואופלנקטון (0.2-20 מ"מ), הכולל קופפודים, צדפוניות, דפנאים, אמפיפודים, תולעי-חץ; מיקרו-פלנקטון (200-20 מיקרון), הכולל ריסניות ופורמיניפרה, ננו-פלנקטון (20-2 מיקרון), הכולל דינופלגלטים, פיקו-פלנקטון (2-0.2 מיקרון) הכולל את מרבית החיידקים, ופמטו-פלנקטון (<0.2 מיקרון) הכולל את הוירוסים.

עוד על קבוצות הפלנקטון באתר Planktomania

עומק הכלורופיל המקסימלי (DCM, Deep Chlorophyll Maximum) העומק בו נמדד ריכוז שיא בכלורופיל a, נמצא לרוב בחפיפה לריכוז שיא של פיטופלנקטון ויצרנות ראשונית.

פיטופלנקטון - היצרנים הראשוניים

הפיטופלנקטון מהווים פחות מאחוז אחד מביומסת הצמחים על פני כדור-הארץ, אבל אחראיים על כ-45% מהיצרנות הראשונית הגלובאלית. בתהליך הפוטוסינתיזה הם מנצלים אנרגיית אור לייצור חמצן וקיבוע פחמן, ולכן מרוכזים בשכבה העליונה של הים (השכבה הפוטית). שגשוג הפיטופלנקטון תלוי באור הנמצא בשפע בשכבות העליונות ומצטמצם ככל שמעמיקים, ובנוטריינטים, הנמצאים לרוב בשפע קרוב לקרקעית בעוד שהשכבה העליונה הינה עניה בהם. מסיבה זו, בעיקר בתקופה של שיכוב תרמי (קיץ), מרבית הפיטופלנקטון מרוכז בשכבה מתחת לפני השטח הנקראת (Deep Chlorophyll Maximum) **DCM**. עומק ה-DCM משתנה כתלות בעונה, רמת הקרינה, ריכוזי הנוטריינטים, ובטמפרטורה. קיימים מעל ל-4000 מינים של פיטופלנקטון, גודלם בין חצי מיקרון לאלף מיקרון (1 מ"מ). הם מהווים את בסיס מארג המזון הימי, ובעלי חשיבות מרכזית למחזור הפחמן, הנוטריינטים ואספקת מזון לים העמוק.

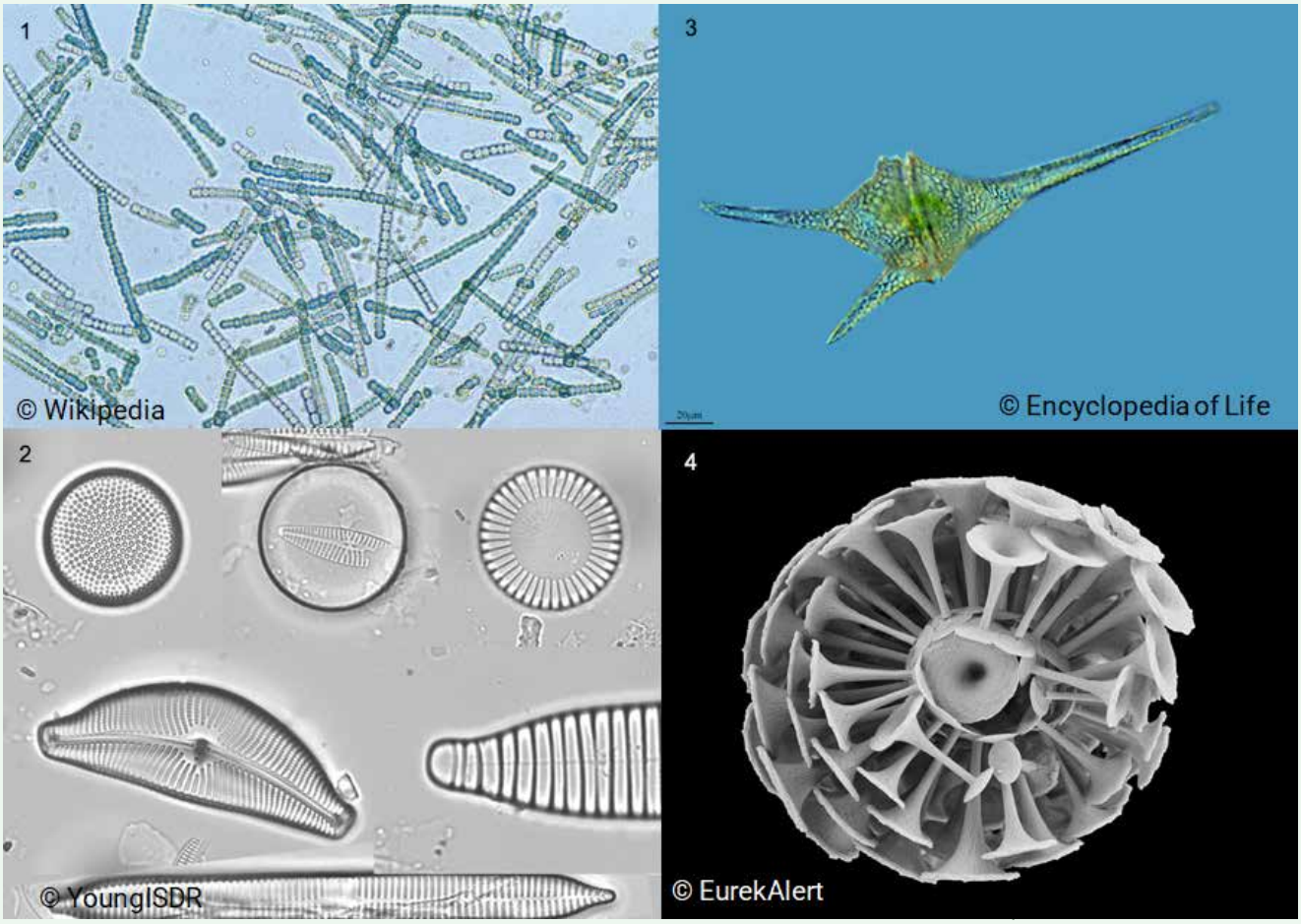
קבוצות הפיטופלנקטון המרכזיות בים

1. **ציאנובקטריה** (cyanobacteria) - פיטופלקנטון פרוקריוטיים. זוהי צורת החיים העתיקה ביותר הידועה, עם מאובנים המתוארכים למעלה מ-3.5 מיליארד שנים. ניתן למצוא אותם כתאים בודדים או כשרשראות ארוכות. לעתים קרובות, שרשראות אלו חוברות יחד לשכבות גדולות, אשר יכולות להיות מחוברות אל הקרקע או לצוף במים. מרבית מיני הציאנובקטריה חיים במים חמים יחסית, בים הפתוח. גודלם הזעיר ובהתאם - יחס שטח פנים לנפח גדול - נותנים להם יתרון תחרותי בקליטת נוטריינטים, ולכן באזורים אוליגוטרופיים, בהם יש מחסור בנוטריינטים, הם מהווים יצרנים ראשוניים עיקריים. נציגים מקבוצת הציאנובקטריה, טריכודזמיום וקרוקוספירה, מסוגלים לקבע חנקן אטמוספרי לחנקן אורגני ובכך מספקים לעצמם ולמארג המזון תוספת חנקן חיונית.

2. **צורניות** (diatoms) - קבוצת הפיטופלנקטון הגדולה ביותר, המכילה כ-2,000 מינים. גודלם משתנה מאוד (2-1000 מיקרון, מננו-פלנקטון עד מיקרו-פלנקטון). ניתן למצוא אותם כמעט בכל סביבת חיים ימית ובעיקר באזורים עשירים בנוטריינטים, בקווי רוחב גבוהים ואזורי מערבלים (gyre) בים הפתוח. לקבוצה זו התרומה המשמעותית ביותר ליצרנות הגלובאלית באוקיינוסים. לצורניות אין אמצעי תנועה, והן תלויות לגמרי בזרמים. קוצים העשויים מסיליקה (צורן) וחומצות שומן המיוצרות בתוך גופם מונעים את שקיעתן המהירה. לעתים הן נצמדים בעזרת הקוצים לצורניות נוספות כדי ליצור שרשראות תאים ארוכות, שמוחזקות ביחד עם חוט של ריר או צורן. שלדם בנוי שתי קשוות העשויות סיליקה (צורן, ומכאן שם הקבוצה), שבתוכן יושב התא. על-פי צורתן הצורניות מחולקות למאורכות או מעוגלות. כאשר תנאי התאורה וריכוזי הנוטריינטים מתאימים, הצורניות עשויות להתרבות בקצב מהיר עד למספרים כבירים ולייצר פריחה (bloom).

3. **דו-שוטוניות** (dinoflagellates) - פיטופלנקטון אאוקריוטי. גודלם 20-200 מיקרון. ישנם מינים פוטוסינתטיים, אך מינים רבים הינם **מיקסוטרופים** (mixotrophic), המשלבים פוטוסינתיזה (אוטוטרופיה) ובליעת טרף (הטרוטרופיה). בעלי שני

←



איור 10

קבוצות פיטופלנקטון מרכזיות בים:
(1) ציאנובקטריה
(2) צורניות
(3) שוטוניות
(4) קוקוליתופורידים

שוטונים הנמצאים בקצה התא. השוטון בקצה אחראי לתזוזה קדימה, והשני מסובב את התא סביב צירו. לתאים מעטפת הבנויה מלוחיות של חומר אורגני. מכיוון שהם גדולים יחסית, הם נראים בקלות בדגימות פלנקטון. השוטוניות הגדולות יותר נמצאות בעיקר בקרבת החוף, באזור בו התרמוקלינה רדודה יותר. השוטוניות הקטנות יותר נמצאות באזורים בהם התרמוקלינה עמוקה, רחוק מהחוף. בדומה ליצורי פיטופלנקטון אחרים, השוטוניות עשויות להופיע בכמות גבוהה באירועי פריחה. פריחת השוטוניות מתרחשת לאחר שהצורניות כבר פרחו וכילו את הנוטריינטים שהצטברו בים במשך החורף. בתהליך זה, האצות מפרישות חומרים רעילים רבי עוצמה שהורגים את כלל היצורים החיים במים. פריחה מזיקה זו (HAB, Harmful Algal Bloom) נותנת למים גוון אדמדם ולכן נקראת "גאות אדומה" - תופעה נפוצה מאוד בחופים בהם יש שפכים של ביוב וזיהום.

4. **קוקוליתופורידים** (coccolithophores) - פיטופלנקטון אאוקריוטי. גודלם קטן (<20 מיקרון). התאים מכוסים במגנים עשויים מקלציום קרבונט. לחלקם יכולת שחייה. הקוקוליטופורידים מתרבים באמצעות חלוקה תאית פשוטה ולעיתים נדירות באמצעות רבייה מינית. הם חסרי כלורופלסט, אך מבצעים פוטוסינתזה באמצעות ממברנה תילקואידית (קרום בצורת דיסקיות (איור 10.4) ובו מצויים פיגמנטים המשתתפים בתהליך הפוטוסינתיזה). הם נמצאים בעיקר קרוב לפני הים באזור הפוטי של האוקיאנוסים. הקוקוליטופורידים משפיעים על מחזור הגופרית בכך שהם משחררים DMS (דימתיל סולפיד), מולקולה המעורבת בייצור עננים.

המשאבה הביולוגית
(Biological pump)
מכלול התהליכים (ביולוגים ופיסיקליים) שבהם מועבר פחמן אי-אורגני מפני שטח האוקיינוס לים העמוק ולסדימנט.

מגוון המינים הפלנקטוניים בים הפתוח הינו גבוה, למרות כמות המשאבים (אור, חנקן, זרחן) המצומצמת עליהם מתחרים המינים השונים. תצפית זו נחשבת לפרדוקס (המכונה **הפרדוקס של הפלנקטון**) מכיוון שהיא נוגדת את עקרון הדחיקה התחרותית, לפיו כאשר שני מינים המתחרים על אותו משאב, אחד מהם יכחד או ידחק. השערות שונות הועלו על-מנת לפתור את הפרדוקס הזה, ביניהן דפוסי כתמיות בזמן ובמרחב והבדל בגדלי המינים מונעים תחרות ומאפשרים קיום משותף.

זואופלנקטון והמשאבה הביולוגית

זואופלנקטון כולל מגוון רב של יצורים הטרוטרופיים בעלי אסטרטגיות הזנה שונות: חלקם **מסננים** (filter feeders) שניזונים בעיקר מפיטופלנקטון וחומר חלקיקי מומס, חלקם טורפים, וחלקם **דטריטיבורים** (אוכלי-רקב) הניזונים מ**שלג ימי** (marine snow) - חומר אורגני חלקיקי הנופל מהשכבות העליונות של עמודת המים לכיוון הקרקעית ומקורו ביצורים מתים ובהפרשות של יצורים חיים. לזואופלנקטון תפקיד חשוב במארג המזון בים הפתוח כחוליית ביניים המקשרת בין הרמות הטרופיות הנמוכות לגבוהות. באמצעות הפרשה, הזואופלנקטון תורמים להובלה של פחמן אורגני לים העמוק.

למיני זואופלנקטון רבים יש יכולת תנועה אנכית והם מבצעים **נדידה אנכית יממתית** (נדידה שמתרחשת כל 24 שעות) (Diel Vertical Migration ,DVM). במהלך היום הזואופלנקטון מהגר לשכבות העמוקות יותר, ואילו בשעות הלילה עולה קרוב לפני השטח. ההסבר המרכזי להתנהגות זו הוא בריחה מטורפים ויזואליים שניזונים מפלנקטון במהלך שעות האור, ועליה אל פני השטח לניצול מקורות המזון בשעות הלילה, כאשר טורפים אלו אינם פעילים.

ניתן לחלק את הזואופלנקטון על-פי היסטוריית החיים שלהם לשניים: **הולופלנקטון** (holoplankton) - בעלי-חיים הנמצאים באזור הפלאגי כפלנקטון במשך כל חייהם ו**מרופלנקטון** (meroplankton) - אורגניזמים הנמצאים בפלנקטון בשלבי החיים הצעירים (איור 11) ועם התבגרותם הופכים לנקטון או בנתוס.

איור 11

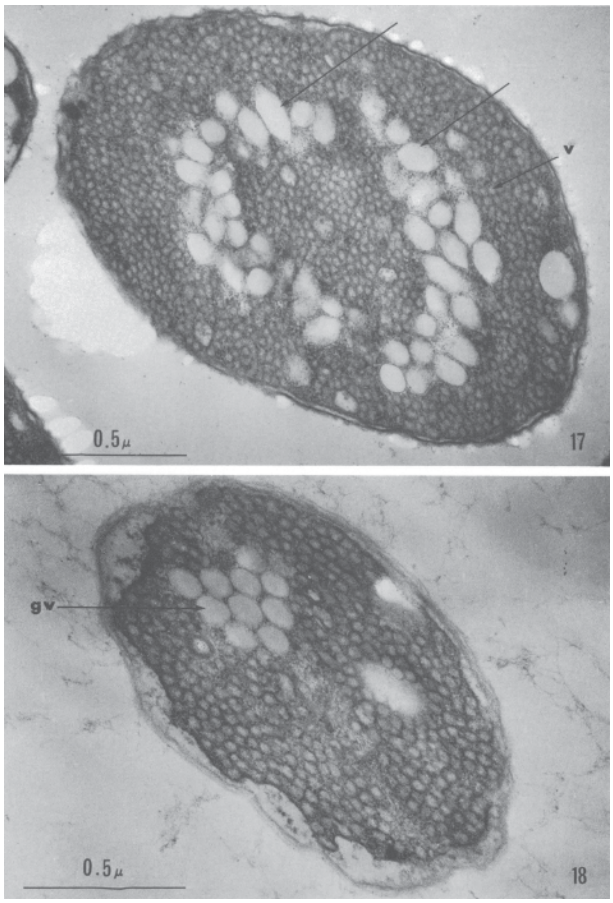
יצורי מרופלנקטון. משמאל למעלה ועם כיוון השעון: זואיאה (פגית) של סרטן קצר בטן; פגית של חסילון גמל שלמה; פגית של כוכב ים; מגלופה (פגית) של סרטן קצר בטן; פגית של דג; פגית של תולעת רב-זיפית
(תמר גיא-חיים)

פלנקטון ג'לטיני
(Gelatinous plankton)
בעלי-חיים בעלי גוף עדין ללא שלד פנימי או חיצוני. ביניהם ניתן למצוא מדוזות, מסרקניות, סיפונופורה, סלפות, תולעי-חץ ואפנדקולריה.

התאמות הפלנקטון לחיים בים הפתוח

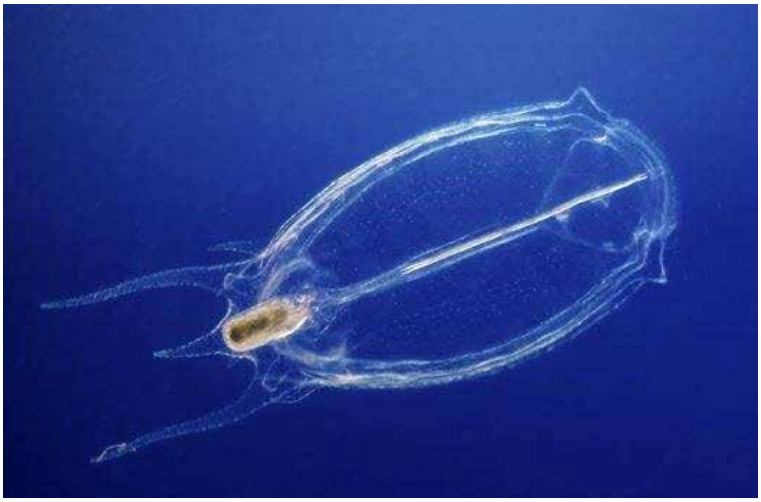
צפיפותם של יצורים פלנקטוניים גבוהה מצפיפות המים. על-מנת שלא לשקוע, יצורים אלו פיתחו התאמות שונות: (1) **תנועת שחיה מתמדת** (קופפודים); (2) **הפחתת צפיפות הגוף** על ידי בועיות גז (ציאנובקטריה, איור 12), גוף **ג'לטיני** בעל צפיפות דומה לזו של מי-ים (מדוזות, סאלפות, איור 13), בועות ובועיות שמן (קופפודים וביצי דגים, איור 14), החלפת יונים כבדים (סידן, סולפט) ביונים קלים (אמוניה, נתרן, כלור) בפרפרי-ים ומסרקניות; (3) הגדלת יחס שטח פנים לנפח על ידי תוספות (קופפודים, וליגרים - לרוות של רכיכות (איור 15), פלוטאוסים - לרוות של קווצי עור), קוצים (פורמיניפרה).

בשכבת פני השטח של האוקיינוסים, באזור המפגש בין האטמוספירה לעמודת המים, ניתן למצוא מגוון פלנקטון ייחודי הנקרא **נאוסטון**. היצורים החיים בשכבה זו מתאפיינים בהתאמות ייחודיות, כמו צבע כחול (קופפודים (איור 16), הידרוזואה) המאפשר הגנה מקרינת UV ובריחה מטורפים, ומבנים צפים מעל פני המים (ההידרוזואה שלפוחן מצוי, איור 17).



איור 12

בועיות גז
(ציאנובקטריה)
(Cohen-Bazire et al. 1969)



איור 13

גוף ג'לטיני (סלפה)
(Dennis Bryant)

איור 14

בועיות שמן בקופפוד
(NOAA)

איור 15

הגדלת שטח פנים (ביחס לנפח) על ידי תוספות ריסניות בלרווה של רכיכות (veliger)
(org.pbs)

איור 16

צבע גוף כחול - בקופפוד ממשפחת ה-Pontellidae הנפוץ בנאוסטון
(תמר גיא-חיים)

איור 17

שלפוחן מצוי ("ספינת מלחמה פורטוגזית") צף על פני המים
(Corbis)

למידע נוסף על הפלנקטון בים הפתוח, ניתן לצפות בסרטון Ocean Drifters.

נקטון

כפי שצוין מעלה, יצורי הנקטון הם אורגניזמים ששוחים באופן אקטיבי בעמודת המים, ללא תלות בזרמים או ברוח. יצורי הנקטון, טורפים ברובם, מייצגים שלוש מערכות טקסונומיות: חולייתנים (דגי סחוס וגרם, יונקים ימיים וזוחלים), רכיכות (תמנונים ודיונונים) וסדרה אחת בלבד של פרוקי רגליים - מעשירי רגלים (Decapoda) - (שרימפסים, סרטנים ולובסטרים).

מינים נקטוניים מוגבלים בתפוצתם המרחבים והאנכית על ידי מחסומים של טמפרטורה, מליחות, אספקת חומרי הזנה ועומק המים. מגוון יצורי הנקטון הגבוה ביותר נמצא במים הטרופיים, שם מגוון מיני הדגים גבוה במיוחד. היצור הגדול ביותר על פני כדור הארץ נמנה גם הוא על יצורי הנקטון - הליוויתן הכחול (*Balaenoptera musculus*) אשר מגיע לאורך 30-25 מ'. יצורי הנקטון מהווים בסיס חשוב לדיג ברחבי העולם. להקות עצומות של דגי אנשובי קטנים, הרינג וסרדינים מהווים בדרך כלל רבע עד שליש מהיבול השנתי מהאוקיינוסים.

התאמות הנקטון לחיים בים הפתוח

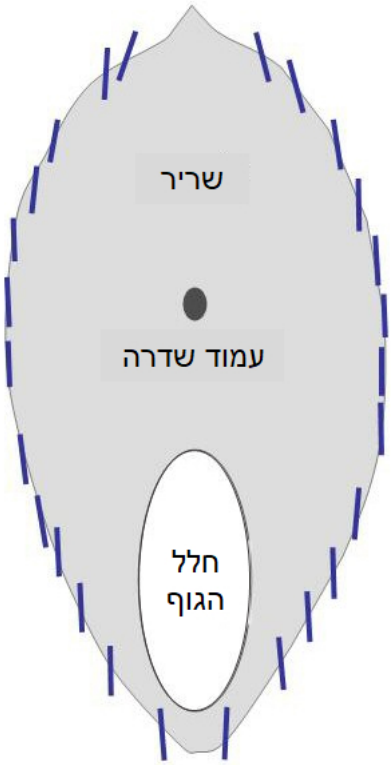
דגים פלגיים שונים בגודלם - מדגי ההרינג והסרדינים הקטנים, לטורפי-על כמו דגי הטונה והכרישים. רובם חיים בשכבה האפיפלגית, שם הם נאלצים לשחות ללא הרף כדי שלא ישקעו לעומקים קיצוניים ובחיפוש אחר מזון על פני שטח נרחב. מבנה גוף הידרודינמי, דמוי עין, מאפשר להם תנועה מהירה עם חיכוך מינימלי עם המים (איור 18).

בנוסף, במים הפתוחים אין מקומות מסתור ולפיכך ההסוואה היא הכרחית ומורכבת יותר, יחסית לבתי גידול אחרים.

פרוקי הרגליים בים הפתוח הם יצורים ברמת שקיפות משתנה, הנובעת בחלקה מהתאמה לציפה בעמודת המים ובחלקה כדרך הסוואה. השקיפות מטשטשת את מבנה האורגניזם ומשקפת את האור ברקע ועל כן יעילה בעומקים שונים, ברמות תאורה שונות ובזווית הראיה. יונקים וזוחלים מסווים עצמם באמצעות צבעים בהירים בגחון (מתמזג עם צבע השמים הבהיר למסתכלים מלמטה) וצבעים כהים יותר בגבם (מתמזג עם צבע המים העמוקים למסתכלים מלמעלה).

איור 18

(ימין) **מבנה גוף הידרודינמי בדולפין** (דנה ריינינגר) (שמאל) **בטונה** (CBS news)



איור 19

קשקשים מחזירי אור (קווים כחולים באיור) ממוקמים בצורה כמעט אנכית בכדי לספק הסוואה במבט מהצד (Wikimedia)

רוב הדגים מסווים את עצמם בצבעים כסופים אשר מפזרים את האור הנכנס ופוגעים בראות. קשקשיהם הכסופים מתפקדים כמראות קטנות שמחזירות אור (איור 19), עד שברמה מסוימת מקנות אפקט של שקיפות. דגים מסוימים אף מוסיפים פיגמנטים לקשקשים, לשיפור ההסוואה מזוויות שונות. בעומקים גדולים יותר, בהם האור מגיע מלמעלה, מכוונים הקשקשים בצורה אנכית והופכים את הדגים לבתי נראים מהצד.

8.3 ים עמוק

כ-60% משטח כדור הארץ נמצא בים העמוק, החל מ-1600 מטר, וכמחצית משטח הימים עמוק מ-3 קילומטר. הים העמוק מתחיל בעומק 200 מ' - העומק הנראה לעינינו נעלם והטמפרטורה צונחת באופן דרמטי. זהו גם העומק הממוצע בו מסתיימים מדפי היבשות. למרות שהים העמוק נחשב למערכת האקולוגית הגדולה ביותר בעולם, פחות מאחוז אחד ממנו נסקר, ומעט מאד ידוע עליו.

אזורי הים העמוק מאופיינים במים קרים מאוד ולחץ הידרוסטטי אדיר שמופעל על ידי עמודת המים שמעל, אך גם ביציבות גבוהה ביותר - התנאים הסביבתיים (טמפרטורה, מליחות וריכוז חמצן) באזורים אלו משתנים מעט מאוד לאורך השנה. בנוסף, מרבית שטח הים העמוק מאופיין בטופוגרפיה שטוחה ומורכבות מבנית נמוכה (מצע רך), ועקב כך מתקיימים בסביבה זו מגוון ביולוגי וביומסה נמוכים יחסית. עם זאת, פזורים בתוך ה"מדבר" התת ימי בתי גידול ייחודיים, כגון הרי מצולות או קניונים תת ימיים שזוהו כ"נקודה חמה" (hot spot) של מגוון ביולוגי - אזורים בעלי מגוון גבוה במיוחד על הקרקעית ובעמודת המים שמעליה.

חלוקה לאזורים בים העמוק

נהוג לחלק את אזור קרקעית הים העמוק על פי מאפיינים ביוטיים וא-ביוטיים (איור 20, שמאל):

אזור	אפיון טופוגראפי	עומק
באתיאלי (Bathyal)	מדרון היבשת	1,000-4,000 מ'
אביסאלי (Abyssal)	מישורים אביסאליים	4,000-6,000 מ'
האדאלי (Hadal)	תעלות אוקייניות	> 6,000 מ'

מאפיינים א-ביוטיים בים העמוק

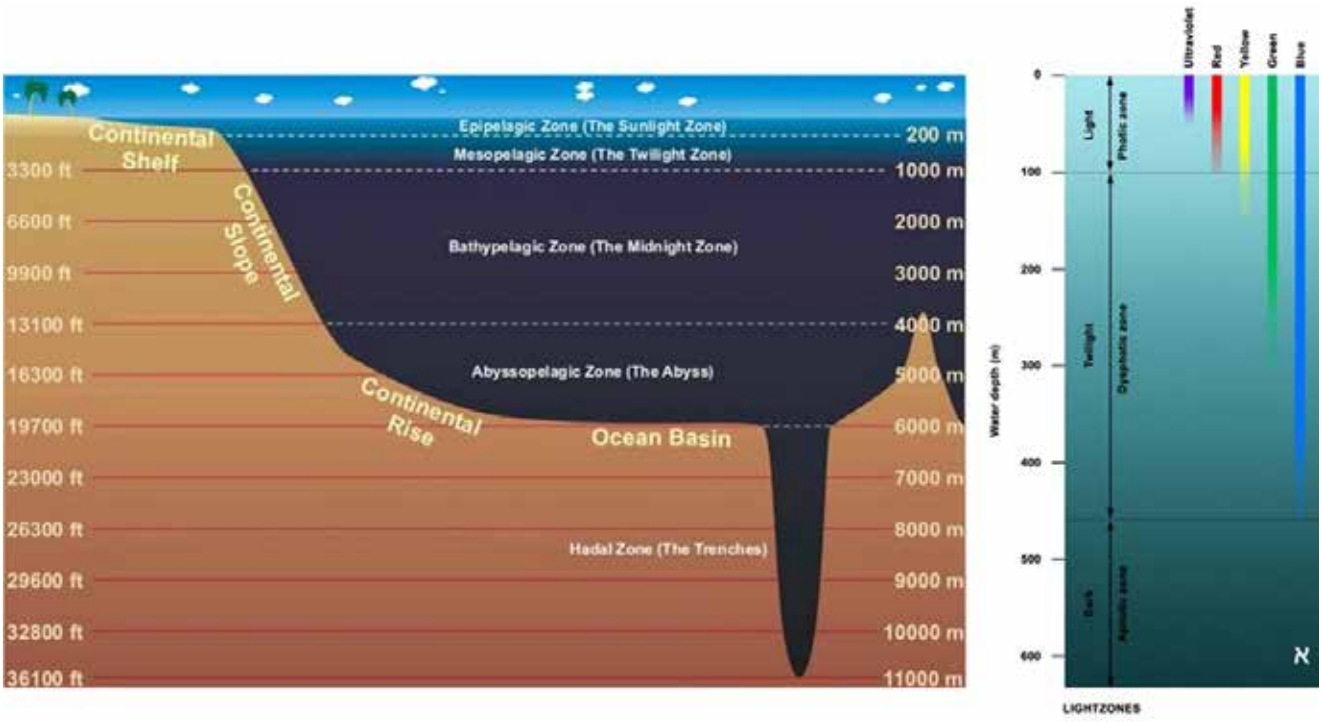
מכל גורמי הסביבה הפועלים על היצורים במעמקים, העומק (ולפיכך גם הלחץ המופעל על ידי שכבות המים) הוא בעל טווח השינויים הגדול ביותר (20 עד 1,000 אטמוספירות). באף סביבה ימית אחרת אין הלחץ ממלא תפקיד דומה בחשיבותו לגבי תפוצה של יצורים.

כאשר האור חודר למי הים, הוא פוגע במולקולות המים ובחומרים המומסים בים ומתפזר. ככל שאורך הגל של קרני האור קצר יותר, עוצמת הפיזור גדלה. ככל שאורך הגל ארוך יותר, הקרינה תיבלע מהר יותר. זו הסיבה שככל שנעמיק בים, 'נאבד' את הצבעים בעלי אורכי הגל הארוכים יותר (אדום) ואילו האור הכחול, באורך הגל הקצר, יחדור עמוק יותר למים (איור 20, ימין). יוצא מן הכלל הוא האור הסגול בעל אורך הגל הקצר ביותר ובעל האנרגיה הגבוהה ביותר (בספקטרום האור הנראה), אשר מתפזר על ידי חלקיקים שנמצאים במים. ככלל - האוקיינוס בולע את מרבית האור כבר בשכבות המים העליונות. רק 1% מאנרגית האור הנראה מגיעה לעומק של כ-150 מטר, גם כאשר המים צלולים. כלומר, העדר האור הוא גורם מרכזי בחיי היצורים החיים בים העמוק.

אזור בתיאלי
אזור הקרקעית שבין העומקים 1,000-4,000 מ'.

אזור אביסאלי
'אביס' משמעו ביוונית 'מעמקים'. אזור הקרקעית בעומקים שבין 4,000 - 6,000 מ'.

אזור האדאלי
האזור העמוק ביותר באוקיינוסים, אזור התעלות האוקייניות. משתרע מעומקים של 6,000 מ' ועד לנקודה העמוקה ביותר באוקיינוסים - תהום מריאנה שבאוקיינוס השקט בעומק 11,000 מ'.



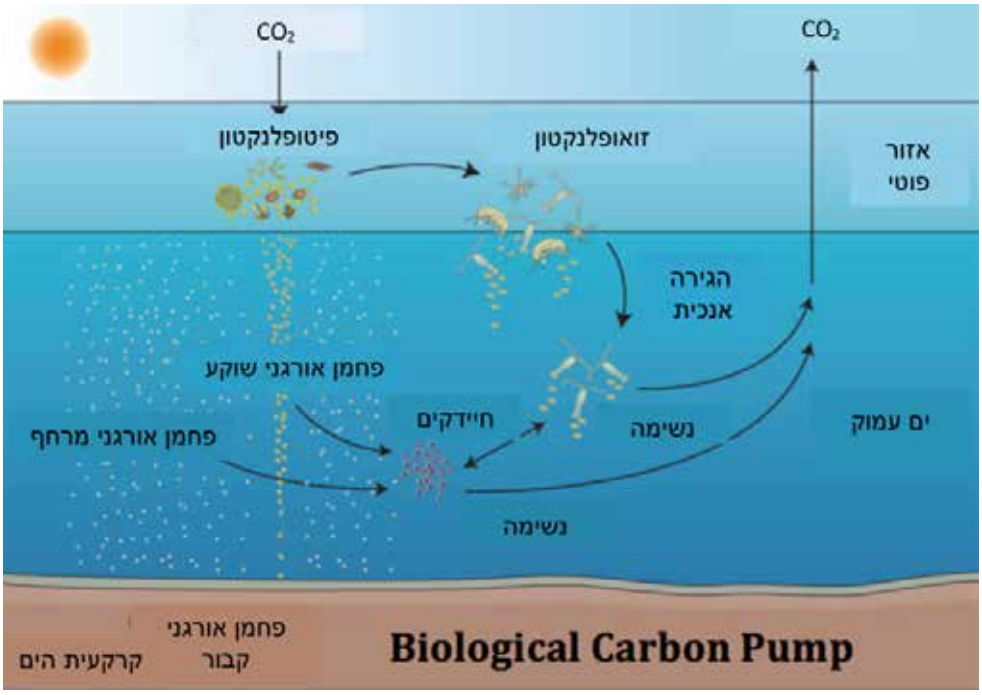
איור 20

חלוקת האוקיינוסים לאזורים על פי עומק וחדירות האור: (מימין) **אזורי תאורה** (Woods Hole Oceanographic Institute) (משמאל) **אזורים ביולוגים** (Ocean)

מאפיינים ביוטיים בים העמוק

בגלל התנהגות האור במים, היצרנות הביולוגית המתבססת על תהליך הפוטוסינתזה בים העמוק, נמוכה יחסית. מרבית היצורים באזור זה ניזונים מ'שלג ימי' (marine snow) - שאריות של חלקיקי מזון, הפרשות של בעלי חיים ואורגניזמים מתים הנושרים מטה מעמודת המים הרדודה והמוארת. זרימת חומרי הזנה מלמעלה מאפשרת למעשה את קיום כלל המערכת האקולוגית בים העמוק, למעט באתרים נדירים שבהם קיימת פעילות גיאוכימית (פליטת גזים כגון מתאן וגופרית), שסביבם מתקיימות חברות המתבססות על חיידקים כימו-סינתטיים ('ארובות הידרותרמיות'). יצורי הים העמוק ניזונים מסינון חומר אורגני מתוך החול, ליקוט חלקיקי מזון הנסחפים בזרם, חלקי גופות שמגיעות משכבות המים העליונות ואף טריפה של בעלי חיים אחרים.

לים העמוק תפקיד משמעותי בספיגת ריכוזי פחמן אנאורגני מהאטמוספירה (CO_2) ועל כן, במיתון ההתחממות הגלובאלית. פחמן דו-חמצני מגיע לפני האוקיינוסים בתהליך של שחלוף (דיפוזיה) עם האטמוספירה ושם מקובע על ידי פיטופלנקטון בתהליך הפוטוסינתזה. הפיטופלנקטון נטרף על ידי זואופלנקטון ושניהם משחררים חומר אורגני מומס (DOM - Dissolved Organic Matter) למים העמוקים. בנוסף, מועבר הפחמן האורגני לים העמוק, כתוצאה מתהליכי טריפה והפרשות של האורגניזמים השונים ובאמצעות תהליכים פיזיקליים של ערבוב ושקיעה. עיקר הפחמן שמגיע למי העומק הוא אורגני. שם הוא מתפרק, נצרך על ידי יצורים הטרוטרופים, הופך לפחמן אנאורגני בתהליכי נשימה ומגיע לפני השטח כעבור כ-1000 שנה בתהליכי ערבול אוקייניים. רק כ-1% נקבר בסדימנט בקרקעית הים העמוקה. מכלול התהליכים (ביולוגים ופיסיקליים) שבהם מועבר פחמן אנ-אורגני מפני שטח האוקיינוס לים העמוק ולסדימנט, נקרא '**משאבה ביולוגית**' (איור 21).



איור 21

המשאבה הביולוגית

(University of Southampton)

בעשרות השנים האחרונות קיים עניין מוגבר במשאבה הביולוגית, הנובע מהעלייה בריכוז ה-CO_2 כתוצאה מפעילות אנושית. כ-30% מתוספת הפחמן, מאז המהפכה התעשייתית, נבלע על ידי האוקיינוסים. מבלע זה אינו בלתי מוגבל מכיוון שתהליך הפוטוסינתזה מוגבל על ידי אור ונוטריינטים אחרים (שאינם פחמן). גם הירידה במסיסות הגזים (בינהם CO_2) כתוצאה מעליית טמפרטורת מי הים משפיעה על המשאבה הביולוגית וגורמת להאטת קצב השחלוף בין האטמוספרה לים.

כיצד יתאימו עצמם, בעלי החיים לסביבה זו?

מזון

המזון הזמין ליצורים בקרקעית האוקיינוס העמוק מצוי בעיקרו כחומר אורגני מורחף (שלג ימי) וכמותו דועכת עם ההעמקה. באופן כללי, שוכני המעמקים פחות בררנים בבחירת מזונם - הם אוכלים ללא אבחנה בסוג האוכל - **אוכלי כל.** החיות הניזונות ממשקעים אלו הם בין השאר, אלמוגי המים העמוקים, ספוגים, תולעים, צדפות, קווצי עור (קיפודי ים, נחשוני ים וכד'), איצטלנים ושפע של מיקרו אורגניזמים אשר מפרקים את הנשורת. אלו מהווים את בסיס מארגי מזון של הים העמוק, עליהם ניזונים הדגים והטורפים השונים. כל אלה מקיימים עולם חי עשיר המתבסס על המזון שמגיע מהעולם המואר שלמעלה.

אלמוגי המים העמוקים, בניגוד לקרוביהם החיים בים הרדוד, אינם מקיימים יחסי שיתוף עם אצות (מכיוון שאין בים העמוק אור המאפשר לאצות לבצע פעילות פוטוסינתיזה). אלמוגים מותאמים למחיה בים העמוק מכיוון שצורת ההזנה שלהם (סינון פסיבי של חלקיקי מזון מהמים) דורשת מינימום אנרגיה ורק כאשר באים במגע עם זואופלנקטון או עם "שלג ימי", מופעלים תאי הצריבה שעל גבי זרועות הציד שלהם, והמזון מועבר לפה.

אוכלי כל

בעל חיים שתזונתו מורכבת מפריטים הן ממלכת החי והן ממלכת הצומח - מערכת העיכול שלו יכולה לעכל מזון צמחי ובשרי, בין אם הוא מממש יכולת זו או לא.

איור 22

דג חצובה שנצפה באזור מפרץ Kealakekua, הוואי
(wikipedia)

יצורי העומק ממעטים לנוע ועברו התאמות על מנת להשיג מזון במינימום השקעת אנרגיה:

דגי החצובה (*Bathypterois sp.*) למשל, מזרימים נוזל לסנפירי הגחון שלהם, על מנת להקשיח אותם, שיוכלו לשמש כחצובה. בעזרתם הם עומדים על גבי הקרקעית (איור 22), עם פניהם פונים לזרם ולוכדים חסרי חוליות קטנים המגיעים אליהם.

כוכבי ים מסדרת Brisingida (איור 23) מותאמים לחיים בים העמוק: יש להם בין 6-18 זרועות, לרוב הן מורמות על מנת לתפוס מזון הנע בזרם בעזרת קוצי השלד שלהם אשר עברו התאמה והארכה לתזונת סינון.

איור 23

כוכב ים מסדרת Brisingida
(NOAA Office of Ocean Exploration and Research)

איור 24

איצטלן מסוג *Bathochordaeus sp.*

ננו-פלנקטון

יצורים מיקרוסקופיים בגודל 2-20 µm המרחפים בגוף המים.

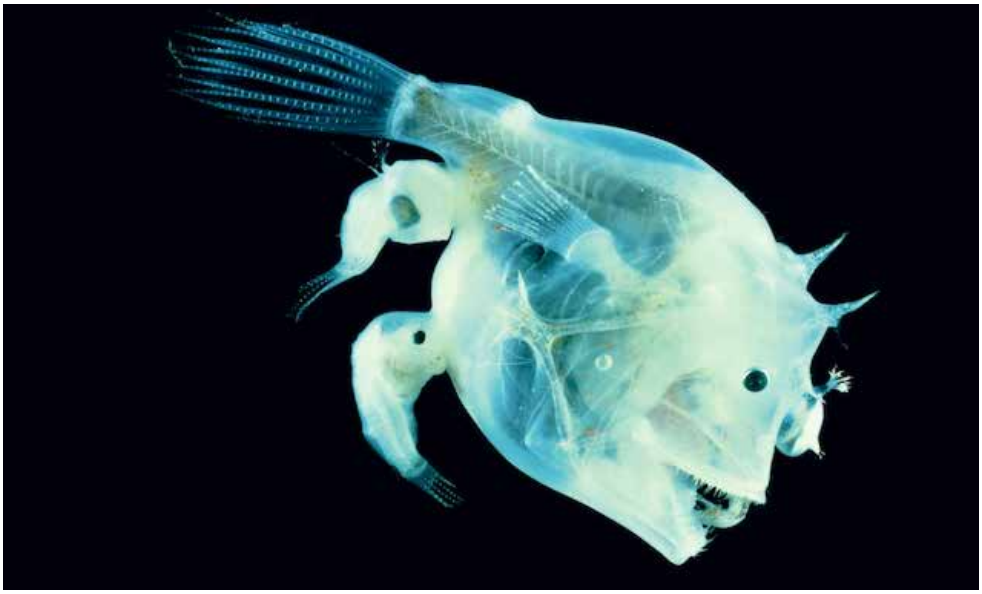
האיצטלן *Bathochordaeus sp.* (איור 24) אשר גופו עשוי מגוף וזנב גם בצורתו הבוגרת, מסנן **ננו-פלנקטון** מהמים באמצעות רשת אותה הוא יוצר ופורש.

דג החכאי (איור 25) משתמש בבליטה מוארכות היוצאת ממרכז ראשו, אשר בקצה שלה ישנה פיתיון ביולומיסנטי בוהק, וכך הוא שוכן על הקרקעית תוך השקעה מינימלית של אנרגיה ומפתה את טרפו להגיע אליו.

דוגמאות נוספות לדרכי תזונה שונות במעמקים ניתן למצוא בכתבה של ה-New York times.

איור 25

דג חכאי



איור 26

לעיתים יותר מזכר אחד של דגי החכאי מתחבר לנקבה - השיא הידוע הוא שמונה (Peter David, Getty Images**)**

רבייה

- **רבייה במשך כל השנה** - באזורים רדודים יש בדרך כלל שינויים מחזוריים בגורמים סביבתיים המבקרים את הרבייה ומגבילים אותה לעונה מסוימת. במעמקים, ללא חדירות האור ועם קביעות של הגורמים הפיסיקליים בכל עומק, הרבייה נמשכת במשך כל השנה ולא מתגלה דגם עונתי.

- **רבייה מינית בחשיכה** - אחת הבעיות הניצבות בפני יצורים המתרבים בצורה מינית, היא איתור בן / בת הזוג בתנאים של צפיפות נמוכה של יצורים וללא אור.

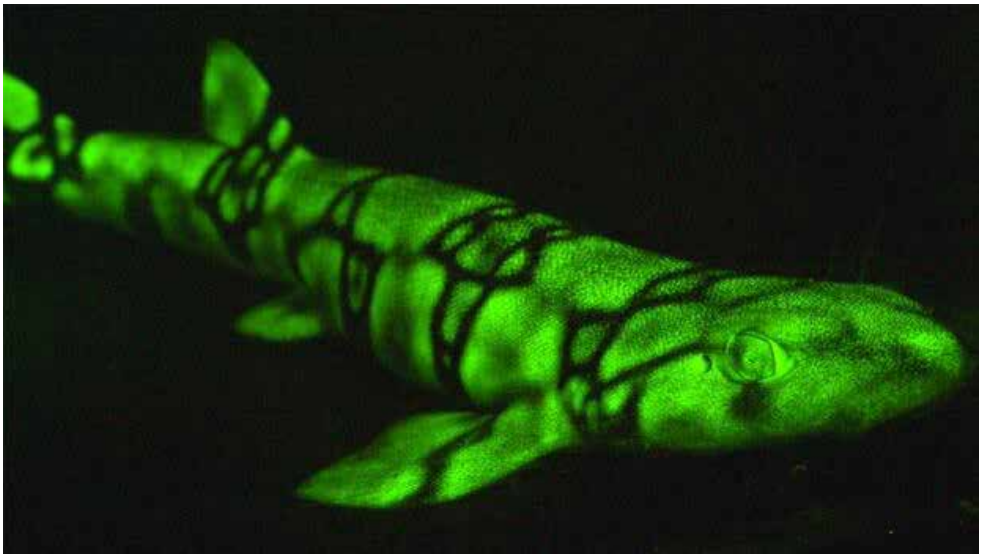
חכאי הים העמוק פותר את בעיית נדירות בן הזוג באמצעות חיים בזוגות. הנקבות של החכאים גדולות לעתים באופן ניכר מהזכרים. כשהזכר מתבגר מערכת העיכול שלו מתנוונת והוא נמשך לנקבה באמצעות חוש הריח. הזכר נושך את עורה של הנקבה ומשחרר אנזים שמאפשר לו להתמזג עמה ולחיות בתוכה כטפיל על ידי פירוק רקמת הפה שלו ופירוק העור שהוא נשך (איור 26). במשך הזמן רוב גופו של הזכר מתנוון ורק אשכיו ממשיכים לתפקד. הם משחררים תאי זרע, בתגובה להורמונים שמגיעים אליהם דרך זרם הדם בשעה שהביצית מוכנה להפריה.

- **התפתחות עוברית ממושכת** - היות והמזון נדיר, יצורים רבים מייצרים ביצים גדולות ומועטות הבוקעות בשלב מתקדם בהתפתחותן.

בים העמוק מתגלים שני דגמים של רבייה:

1. השלבים הראשונים חיים באזור העליון-הפוטי והצעירים נודדים לעומק כאשר הם עוברים לשלב הבוגרים - דגם נפוץ בדגי מעמקים מהסוג חכאי ובדיונונים שונים.
2. השלבים הצעירים נמצאים במקום מושבם של הבוגרים - נפוץ במיני סרטנים ותמנונים.

היצורים במעמקים בדרך כלל גדלים לאט, חיים זמן ארוך ומעמידים מעט צאצאים.



איור 27

פלואורסנציה בכרישי חתול (David Gruber)

תקשורת

בסביבה חשוכה בעלי החיים מתקשרים זה עם זה באמצעות צלילים, "ריחות" (תקשורת כימית) ובעיקר - בעזרת אורות הנוצרים בשני תהליכים עיקריים:

1. **החזרת אור** (**פלואורנסציה**) - מתרחשת בדרך כלל בנוכחות חלבונים המסוגלים לקלוט אור באורך גל קצר, לבלוע חלק מהאנרגיה ובתהליך פיסיקלי-כימי לפלוט אור באורך גל ארוך יותר. כך נוצרות תבניות צבע ייחודיות על גבי בעלי החיים, אשר מופיעות רק כאשר אנו בוחנים את הסביבה על ידי שימוש בתאורה מיוחדת ומסננים הקולטים את החזר האור הפלורוסנטי לבדו. מדענים משערם כי זוהי צורה של תקשורת מורכבת ייחודית ליצורים המסוגלים לייצר אור ויצורים המסוגלים לראות פליטות אור אלו (איור 27). עוד על פלואורנסציה בהרצאתו של David Gruber:
Glow-in-the-dark shark and other stunning sea creatures

בעיני כרישי החתול (Cat shark) קיימים מסנני צבע מיוחדים המאפשרים להם לראות את האותות הביו -פלואורסצנטיים של בעלי חיים אחרים, שיכולים לאפשר להם להעביר אותות הלוך ושוב.

2. **זהירה ביולוגית** (**ביולומינציה**) - אור קר הנפלט מבלוטה מיוחדת המייצרת אור. רוב היצורים הזוהרים מייצרים בעצמם את האור באמצעות פעולה כימית (שני כימיקלים מעורבבים בנוכחות חמצן) המתבצעת בתוך איברים מיוחדים המיועדים לכך. ישנם גם מינים אשר מקבלים את הכימיקלים הנכונים ליצירת האור ע"י טריפה של יצורים מאירים אחרים. זהירה ביולוגית משמשת את האורגניזמים במעמקים כדי לתקשר עם בני זוג, למשוך טרף, לבלבל טורפים, ועוד. עוד על ביולומינציה בים העמוק, בהרצאתה של Edith Widder:
The weird, wonderful world of bioluminescence

פלואורסנציה
תהליך החזרת אור מחלבונים בגוף החי המסוגלים לקלוט אור באורך גל קצר, לבלוע חלק מהאנרגיה ובתהליך פיסיקלי-כימי לפלוט אור באורך גל ארוך יותר.

ביולומינציה
זהירה ביולוגית. אור קר המיוצר בבלוטה מיוחדת אצל בעלי חיים. רוב היצורים הזוהרים מייצרים בעצמם את האור באמצעות פעולה כימית (שני כימיקלים מעורבבים בנוכחות חמצן) המתבצעת בתוך איברים מיוחדים המיועדים לכך. ישנם גם מינים אשר מקבלים את הכימיקלים הנכונים ליצירת האור ע"י טריפה של יצורים מאירים אחרים.

איור 28

דג האיצטרובל
(pine apple fish)

דג האיצטרובל (pineapple) חי בעומק של עד 400 מטרים. גודלו המקסימלי הוא 17 ס"מ. לדג האיצטרובל יש קשקשים קשיחים, גדולים וצהובים הנותנים לו הגנה של שיריון קשיח בעל קוצים גדולים למניעת טריפה (איור 28). לדג האיצטרובל יש בקטריה זוהרת אשר מרוכזת בשני כתמים כהים בחיבור הלסתות. בצורה זו האור זוהר רק כשהפה פתוח ומוכן למשוך יצורים שונים אל האור.

נקודות חמות של מגוון ביולוגי בים העמוק

בשל תנאי המחייה המורכבים המאפיינים את הים העמוק, צפיפות היצורים בו ומגוון המינים דל יחסית למים הרדודים, העשירים יותר. עם זאת, ישנם מספר בתי גידול הייחודיים לקרקעית הים העמוק, בהם המגוון הביולוגי עשיר יותר והוא משפיע גם על עמודת המים מעליהם:

נביעות גז (Cold Seeps)

נביעות קרות של גז (מתאן, תרכובות גופרית ומימן) מסדקים בקרקעית, אשר משחררים גז ונוזל מבוססי-נפט ממאגרים תת-קרקעיים בני מיליוני שנים. סביב נביעות אלו מתפתחים חיידקים המפיקים אנרגיה וחומר אורגני על בסיס תרכובות כימיות (**כימוסינתזה**). על בסיס יצרנות זו מתפתחת חברה אקולוגית ייחודית בה חלק מבעלי החיים מקיימים חיי שיתוף (סימביוזה) עם החיידקים ו'מארחים' אותם בתוך גופם כסימביונטים, חלקם ניזונים ישירות ממצע החיידקים הגדל ועוטף את הסלעים סביב הנביעות וחלקם ניזונים מטריפת בעלי החיים הללו.

נביעות הגז מהוות אי של עושר ביולוגי בים העמוק, לא רק בגלל היותם מקור לאנרגיה וחומר אורגני, אלא גם בגלל היותן אי של מצע קשה בסביבה של מצע רך: נביעות הגז יוצרות משקעים של סלעים פחמניים קשיחים, בתהליך המתווך על ידי חיידקים כימו-סינתטיים. על סלעים אלו מתיישבים מגוון בעלי חיים.

כימוסינתזה

כימו=כימי;
סינתזה=הרכבה.
כימוסינתזה הוא תהליך המבוצע ל ידי חיידקים באזורים ללא אור, בו הם הופכים פחמן אנ-אורגני המצוי בסביבתם לפחמן אורגני על ידי ניצול אנרגיה כימית שמחליפה את אנרגיית השמש. חיידקים כימוסינטטיים מהווים את רמת היצרנות במארג המזון במעמקים.

סלעים ביוגניים (נוצרו בתיווך של תהליך ביולוגי) אלה מהווים מקור נוסף למגוון הביולוגי בסביבה, מכיוון שהמורכבות המבנית של המצע הסלעי הקשה מאפשרת התפתחות של עושר ביולוגי רב. כאשר אוזלים מאגרי האנרגיה הכימית, הרכב מי הים מתאזן עם הסביבה וחוזר להרכבו הרגיל, ובשלב זה מסוגלים להתיישב על סלעים אלה בעלי חיים חדשים, שאינם קשורים למערכת הכימו-סינתטית. בעלי חיים אלה מייצרים חברה אקולוגית חדשה, המנצלת את המצע הקשה שיצרו הנביעות, אך ניזונים מ"שלג ימי" ומקורות אנרגיה אשר לא קשורים למארג הכימו-סינתטי, כגון אלמוגי העומק.

ארובות הידרותרמיות

ארובות הידרותרמיות קיימות באזורים פעילים וולקנית. מי הים מחלחלים דרך הסדקים בקרום כדור הארץ עד שמגיעים למגמה הלוהטת, מתחממים וסופגים מתכות כמו ברזל, אבץ, נחושת, עופרת וקובלט מהמסלע שמסביב. המים החמים עולים ונושאים את המינרלים אל פני קרקעית הים. כאשר המים החמים באים במגע עם מי העומק הקרים, נוצרת תגובה כימית אשר יוצרת משקעים מוצקים שעם הזמן יוצרת מגדלים דמויי ארובות - הארובות ההידרותרמיות (הידרו= מים; תרמי=חום). יש ארובות אשר פולטות מים עמוסי ברזל גופרתי שחור ולכן נקראים black smokers, בעוד ארובות אחרות פולטות מים עמוסים בבריום, סידן וסיליקון ונקראות white smokers.

המים יוצאים מן הנביעות בטמפרטורה של כ-400°C צלזיוס ומתקררים מייד עם התערבבותם במי הסביבה, מה שמעלה אותה לטמפרטורה של 8-21°C (הרבה מעל הטמפרטורה השלטת בקרקעית הים בעומקים אלו). גם שם, בדומה לנביעות הקרות, מכילים מי הנביעות ריכוז גבוה של תרכובות גופרית המנוצלת ע"י החיידקים לסנתוז (ייצור) חומר אורגני המשמש כבסיס למארג מזון עשיר.

אחד מהיצורים האופייניים לארובות הידרותרמיות הן תולעי הריפטיה אשר מסננות את המים בעזרת זיפיהן וסופגות חמצן ותרכובות גופרית מהמים סביב הארובות (איור 29). מינרלים אלו משמשים את החיידקים הסימביונטים החיים איתם, לייצור אנרגיה.

בריכוז כה גדול של מזון סביב הסדקים - גדול עד פי 500 מזה שבכל מקום אחר על הקרקעית העמוקה של האוקיינוס - מגיעות כמה תולעים צינוריות עד לאורך של מטר וחצי.

הנביעות החמות אינן מצויות באתרים שקצב ההתפשטות בהם הוא 2 ס"מ לשנה או פחות - ככל שקצב ההתפשטות מהיר יותר, שטף החום דרך הרכס גבוה יותר וכך גם הסיכוי להמצאות נביעות פעילות. הנביעות ההידרותרמיות רחוקות זו מזו וחייהן קצרים. כאשר הנביעה אינה פעילה יותר, החיים בה פוסקים.

איור 29

תולעים צינוריות החיות בסימביוזה עם חיידקים מפיקי אנרגיה בארובות הידרותרמיות.
(NOAA)

קניונים תת-ימיים

קניונים תת ימיים הם בעלי חשיבות אקולוגית מיוחדת. הם מרכזים חומרי הזנה מהיבשה (המגיעים משפכי נחלים למשל) ויוצרים סביבה הידרודינמית ייחודית בעלת משטר זרמים אינטנסיבי יותר, אשר מרכז גם חומרי תזונה בשטחו. הקירות, שיפועי המדף וקרקעית הקניון יוצרים בית גידול מגוון ועשיר בזרמים הנושאים עימם חלקיקי מזון זעירים. המדפים הסלעיים מתאימים להתיישבות אלמוגי ים-עמוק והקרקעית הבוצית מתאימה להתחפרות תולעים ורכיכות. גם דגים פלאגיים, לוויתנים ועופות ים, נהנים כנראה מהעושר שנובע מהקניון התת ימי.

איור 30

זרוע ROV (רובוט מצלמה תת-ימי) אוספת קרום סלע בנביעות מתאן באיזור הפרעת פלמחים (מקסים רובין-בלום ואיציק מקובסקי)

הים העמוק מול חופי ישראל

בתוך ה"מדבר" התת ימי של האגן המזרחי של הים התיכון, פזורים מול קו החוף הישראלי בתי גידול ייחודיים:

נביעות גז - נביעות גז התגלו בים התיכון באתרים שונים, ולאחרונה גם בתחום המים הכלכליים של ישראל. מערכות אקולוגיות אלה הן ייחודיות, ונמצאו כנבדלות מהמקבילות להן באוקיאנוס האטלנטי בהרכב המינים. לדוגמה, בנביעות הגז בים התיכון ישנן מיני צדפות ייחודיות, שהן קטנות מהמינים המקבילים להן באוקיאנוס האטלנטי. סביב נביעות גז ב'הפרעת פלמחים' אותרה גם פעילות משמעותית של בעלי חיים הנוברים בתוך המצע הרך (איור 30). בעל החיים העיקרי שנמצא הוא מין של חסילון נדיר (*Calliax lobata*), שנמצא לאחרונה גם בסביבה של נביעות קרות ממפרץ קדיז ליד מצרי ג'ברלטר. לחסילון זה חשיבות רבה ביצירת ערבול בסדימנט ועידוד יצירת המסלעות במקום.

איור 31

טורפי על במארג המזון מעל קניון אכזיב - דולפינן מצוי (*Tursiops truncatus*) (מִיה אלסר)

קניון אכזיב - קניון אכזיב הוא אחד מתוך עשרה קניונים תת-ימיים עיקריים אשר מופו מול חופי צפון ישראל ודרום לבנון, קניונים בוגרים אשר חרצו עמוקות את מדף ומדרון היבשת הצרים וחתרו את דרכם אל הים העמוק, החל ממרחק קצר מאוד מהחוף. כקניון היחיד בגבולות ישראל, הוא מהווה בית גידול ייחודי לאורך קו החוף הישראלי הים תיכוני, המאופיין ברובו במדף יבשת נרחב היוצר סביבת חיים ימית רדודה. במחקר שבוצע על ידי אוניברסיטת חיפה ובחן את צפיפות ומגוון המינים של רמות תזונה שונה באזור הקניון, לעומת עומקים דומים במדרון היבשת הרחוק יותר מהחוף, נמצא מגוון גבוה של חסרי חוליות בקרקעית, מינים ייחודים לקניון וצפיפות גבוהה יותר של דולפינים ממין דולפינן מצוי (*Tursiops truncatus*), כטורפי על, מעל הקניון (תמונה 31).

עוד על סביבת הים העמוק מול חופי ישראל, ניתן ללמוד מ[הרצאתו של אדם וייסמן](), יוני 2020.

מקורות לפרק זה

Johnsen, S. 2014. Hide and Seek in the Open Sea: Pelagic Camouflage and Visual Countermeasures. Annual Reviews Marine Science. 6: 369-92.

Roditi-Elasar, M., Kerem, D., Lazar, M., Barneah, O., Almogi-Labin, A., Angel, D. 2019. Benthic macro-faunal abundance and diversity and sediment distribution in Akhziv submarine canyon and the adjacent slope (eastern Levant Basin, Mediterranean Sea). Mediterranean Marine Science, 20(3): 521-531. DOI:10.12681/mms.19430

ויסמן א, רוטשילד א. 2018. הים התיכון העמוק - חשוך, קר ומיוחד: חשיבות שמירת הים העמוק וקידום שמורת טבע "הפרעת פלמחים". החברה להגנת הטבע, 75 עמ'.

מקורות מידע נוספים

[ע] - עברית, [en] - אנגלית

1. איך מתחוללים הגאות והשפל? מכון דוידסון [ע]
2. תחזית גאות ושפל לים התיכון - חקר ימים ואגמים [ע]
3. זיהום פלסטיק בים - נשיונל גאוגרפיק [en]
4. תגובת מינים להתחממות הים התיכון - היעלמות קיפודי-הים [ע]
5. מלח, חול וצדפים: המדע של חוף הים. מכון דוידסון [ע]
6. סודות הים התיכון - החברה להגנת הטבע: חומר קריאה וסרטונים [ע]
7. החיים בכרית - נשיונל גאוגרפיק [en]
8. שוניות סלעיות בים התיכון: אוצרות הטבע החבויים של הים - החברה להגנת הטבע [ע]
9. עולם חבוי בין גרגירי החול - המצע הרך בים התיכון - החברה להגנת הטבע [ע]
10. משחק זיהוי פלנקטון [en] PlanktonID (בקרוב בעברית)
10. חייהם הסודיים של הפלנקטון - מכון דוידסון [ע]
11. Planktomania - מודלים תלת מימדיים של פלנקטון [en]
12. מאמר - צמחים אינם חיות וחיות אינן צמחים, נכון? טעות! יצורים זעירים באוקיינוס יכולים להיות גם וגם בו בזמן! Frontiers for Young Minds [ע]
13. מדוזות בעם - פרויקט מדע אזרחי למיפוי מדוזות בחופי ישראל [ע]
14. כרישים בישראל [ע]
15. אתר המוזיאון הלאומי להיסטוריה של הטבע - Ocean

9

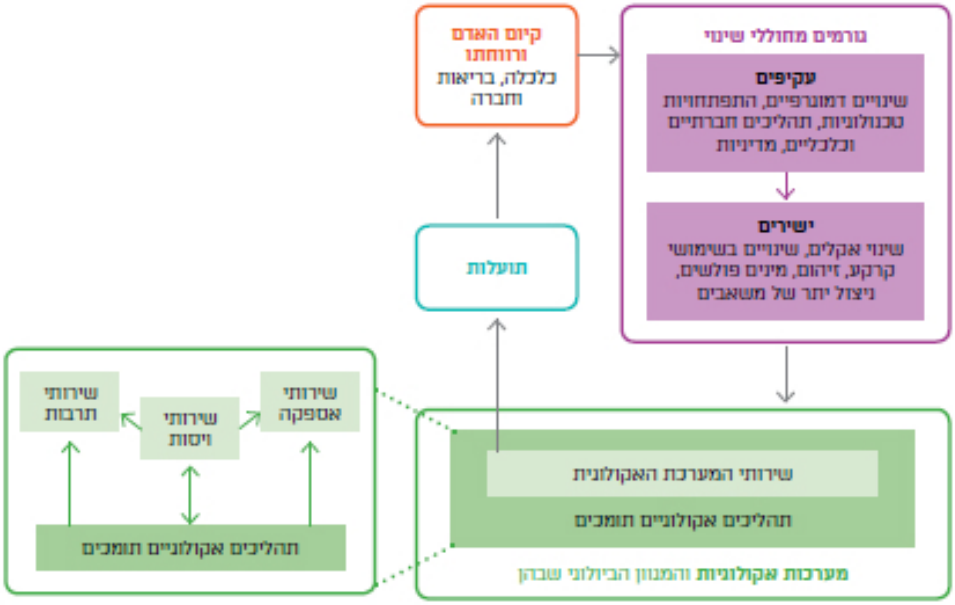
משאבים מן הים

דור אדליסט

במאתיים השנים האחרונות גדלה אוכלוסיית בני האדם בעולם ממיליארד אחד לכמעט שמונה מיליארד. עם תום המאה העשרים נהנה האדם מאיכות חיים חסרת תקדים וקיומו אינו מאוים יותר על ידי מחלות, רעב או מלחמות. מאידך, עם ניצחון ה**קפיטליזם** כסדר הכלכלי-חברתי השולט בעולמנו, איכות החיים והצריכה שלנו נוסקות לשמיים ועל כן גם תצרוכת המשאבים שלנו נמצאת בעלייה ומאיצה כל העת. לכן האתגר העיקרי שלנו כיום הוא מציאת דרכים לפיתוח וניצול בר קיימא של המשאבים בהם אנו משתמשים. במאה העשרים ואחת ביטחונם התזונתי של כמעט כל אזרחי העולם הינו ודאי, והשמנת יתר הנה בעיה חמורה בהרבה מאשר תת תזונה (למעשה, מספר האנשים הסובלים מהשמנה הינו כפול ממספר הסובלים מתת תזונה). בכדי לכלכל צמיחה גדולה כזו שמכתיב הקפיטליזם, נדרשים גם משאבים גדולים. עם הצפיפות הגוברת על היבשה וכילוי רבים ממשאביה, עוברות רבות מזירות ההפקה האנושיות לים, שהוא אכן גדול, אך הוא אינו אינסופי. בנוסף על החמצן שאנו נושמים שמחציתו נוצרת בים, יותר ויותר ממי השתיה שלנו, מהמזון והאנרגיה שאנו צורכים מגיעים מן הים. גם תרבות הפנאי, התיירות ואף חזית המחקר מופנות כיום אל הימים והאוקיינוסים. הטבות אלו שהים מעניק לנו נקראות גם שירותי מערכת אקולוגית (איור 1). כל שירות כזה והתועלות שנגזרות ממנו לאדם, מושפע מגורמים מחוללי שינוי שונים, שיכולים להיות ישירים או עקיפים, טבעיים או מעשי ידי אדם ועלינו לוודא שהגורמים שנמצאים בשליטתנו לא יחוללו שינויים בלתי הפיכים במערכת, כך שנוכל להמשיך לקבל את השירות.

קפיטליזם

הסדר הכלכלי השולט בעולם בתחילת המאה העשרים ואחת. במערכת קפיטליסטית, אמצעי הייצור נמצאים בבעלות פרטית או בבעלות של חברות מסחריות והמחירים נקבעים בעיקר על ידי תחרות בשוק חופשי ולא על ידי המדינה. אמצעי הייצור בדרך כלל מופעלים לצורך הפקת רווח. הגישה הקפיטליסטית מקדשת ערכים של צמיחה וחירות כלכלית ורמת חיים גבוהה על פני ערכים כגון שוויון או רווחת השכבות החלשות. מאחר וקפיטליזם מכתיב צמיחה כלכלית מתמדת, מוטל עלינו כיום יותר מתמיד לחשוב היטב על הגבלת הצריכה והילודה כחלק מתפיסת הקיימות שלנו.



איור 1

המסגרת הרעיונית של פרויקט "מערכות אקולוגיות ורווחת האדם - הערכה לאומית"

שירותי מערכת הינם לרוב מערך מורכב של פשרות והמרות בין שירות אחד לאחר. לדוגמא הזרמת שפכים אורגניים לים עשויה לסייע ליצרנות המערכת ולתמוך בשירותי אספקה (דיג) ותהיה זולה מטיפול בשפכים ביבשה, אבל מאידך הזיהום של הים עלול לפגוע בסביבה ובשירותי תרבות כגון תיירות ובריאות הגוף והנפש של בני אדם, ולכן אנו בוחרים בישראל לטפל בשפכים ביבשה.

הדרך המקובלת כיום לאזן בין הצרכים והרצונות של האדם אל מול צרכי הטבע נקראת ניהול בגישת המערכת האקולוגית. גישה זו מורכבת מההכרה בכך שהאדם הינו חלק מן המערכת האקולוגית ושעליו להבטיח את שלמות המערכת בטווח הארוך. אמנם מדובר כאן בטורף על מיומן שמזהם את הימים, משנה את האקלים, את הפיסיקה הכימיה והביולוגיה של מי הים ואת בתי הגידול הימיים עצמם, אבל את האדם ניתן לנהל, ומשאבי הים הינם ערכים שניתנים לניהול כך שיאזנו בין צרכי האדם וצרכי הסביבה. על המערכת יש להגן בכדי לשמר את האיזון והתפקוד שלה, הן כערך בפני עצמו והן בכדי לשמר את השירותים שאנו גוזרים ממנה. בהיות האדם בעל החיים השני הכי נפוץ בכדור הארץ מבין בעלי החיים הגדולים (אחרי התרנגולות שהוא מגדל למאכל), השפעתו על הסביבה הינה כבירה. לכן בכל פעם שאנו מבקשים לנצל את משאבי הים, עלינו לשאול אם יכול ניצול זה להיות **בר קיימא**. בכדי לענות על השאלה הזו, עלינו להבין את התועלות לאדם, את הנזקים שניצול המשאבים עלול לגרום, את הגורמים מחוללי השינוי והגורמים שמנהלים את הביקוש למשאבים השונים, ואת המערכות האקולוגיות עצמן - שמספקות אותם ותומכות גם בקיום החיים עצמם. בנושאים אלו עוסק הפרק שלפנינו.

בכדי לנהל את משאבי הים כראוי, נדרש תכנון של המרחב הימי (MSP - Marine Spatial Planning). על תכנון כזה לבחון את מערכות היחסים בין המשאבים והשימושים השונים, ובינם לבין המערכת האקולוגית (איור 2). עליו לזהות את ההזדמנויות והקונפליקטים, ולתעדף אותם במרחב ובזמן. שתי עבודות מסוג זה נעשו בעת האחרונה בישראל - על ידי מנהל התכנון ועל ידי הטכניון.

קיימות ופיתוח בר קיימא

קיימות הינה היכולת לשמר מצב קיים לאורך זמן. היא נשענת על שלושה עמודים עיקריים: כלכלי, סביבתי וחברתי. במובן האקולוגי והסביבתי, משמעה של קיימות היא שימור של מערכות אקולוגיות, מגוון ביולוגי ותפקוד תקין שלהם להבטחת קיום החיים על פני כדה"א. במאה ה- 21 אנו מתייחסים לפיתוח בר קיימא כתהליך של הפניית משאבי המין האנושי, הפיתוח הטכנולוגי ומערכות החוק והשלטון כך שיאפשרו את קיומה ותפקודה התקין של הביוספירה לצד רווחת האדם.

איור 2

משאבים ושימושים שונים בים שיש לתכלל בתכנון המרחב הימי

העתיד אמנם לוט בערפל, אבל ברור לנו כבר היום שהמשאבים שיידרשו להכשיר פלנטה חדשה להתיישבות בני אדם הינם הרבה מעבר לאלו שיידרשו לקיום חיים טובים לטווח ארוך כאן על הכדור שלנו. לכן האתגר הגדול ביותר העומד לפתחנו הוא הפקת לקחים מן הניסיון ביבשה ופיתוח בר קיימא של המשאבים והשירותים שהים בנדיבותו מעניק לנו, מבלי להגיע לניצול יתר שלהם ומבלי לפגוע באופן בלתי הפיך במערכת האקולוגית, כך שנוכל להמשיך ולהסתמך עליהם בטווח הזמן הארוך.

9.1 תעשיות חופיות מסורתיות - מלח, ארגמן, זכוכית, חומרי בניין

עוד לפני הנמלים והמעגנות, שסימלו את הפתח ליציאה לים, עשו בני האדם שימוש במשאבים החופיים הזמינים שמצאו על החוף ובמים הרדודים. כבר בעת העתיקה ידעו בני האדם לנצל משאבים שנמצאו לחוף הים. חומרי בניין ובעיקר חול וסלעים שימשו לא רק לבנייה מקומית אלא יוצאו במעלה ובמורד החוף ואף נשלחו לפנים הארץ. מינרלים חיוניים כגון מלח או יוד הופקו מייבוש מי הים בבריכות ייעודיות, צדפים ואלמוגים שימשו לקישוט ופולחן, ספוגים שימשו לרחצה וצבע הופק מחלזונות ויצורי ים אחרים.

חומרי בנייה עיקריים המצויים בים התיכון הינם חול וכורכר. חול הינו מצרך יסוד בבנייה, בייצור זכוכית ובמגוון מוצרים, ויש מחסור עולמי בחול כאשר כבר כיום כמות ההפקה שלו הינה כפולה מקצב היצירה שלו. מקור החול בחופי ישראל ברמות אתיופיה, משם הוא מגיע לנהר הנילוס ונשפך לים התיכון, ולכן אנחנו מחשיבים אותו כמשאב ימי. בעבר חופי הים התיכון שלנו סיפקו משאב זה בכמויות גדולות לבניית הארץ כאשר זרמי הים היו שבים וממלאים אותם כל שנה עם נדידת החול מכיוון דלתת הנילוס.

איור 3

גמלים נושאי חול חוצים את שפך הירקון, 1934.
ארכיון חברת חשמל

עם זאת מאז הקמת סכר אסואן תנועת החול אל חופי ארצנו פחתה באופן דרסטי ובניית מבנים חופיים כגון נמלים, מרינות, שוברי גלים ואף טיילות על החוף מונעת את הצטברות החול על החופים. על כן כיום כריית החול מהחופים הינה אסורה בתכלית.

רכסי כורכר שימשו בעבר לבניית מבנים בקו החוף הישראלי וחלק מהאבנים שנחצבו מהם אף הוסעו לפנים ארץ. רכסים אלו נוצרים בדיוק בקו המים. מספר רכסים כאלו שטבועים בקרקעית הים התיכון, מקו החוף ועד לעומק 120 מ', הינם למעשה סמנים של מפלסי ים בעבר הרחוק, מימים בהם היה המפלס נמוך יותר. למעשה הם מהווים כיום את מרבית הממצע הקשה הסלעי על מדף היבשת הישראלי. לאורך קו החוף של דרום ומרכז ישראל, נמצא גם מצוק כורכר חופי גבוה (עד כ-30-40 מ') שהולך ונשחק כתוצאה מפעולת גלי הים ומי גשמים. להתמוטטות המצוק הזה השלכות כלכליות, ציבוריות וסביבתיות נרחבות והחציבה בו אסורה על פי חוק. רכסים נוספים נמצאים עוד מזרחה, ביבשה, והם מהווים עדות לימים בהם מפלס פני הים היה גבוה יותר. רכס כביש החוף הוא הבולט מהם. גם רכסים אלו הם שימשו בעבר כחומר מבוקש ללבנים, שכן הכורכר היה קל לחציבה וחזק דיו לצורך הקמת בתים. כיום קיימים חומרים קלים וחזקים יותר ובעשורים האחרונים אין כלל חציבת כורכר לצרכי בנייה בישראל.

זכוכית - זכוכית מופקת מתחמוצת הצורן (סיליקון), ממלחים המכילים אשלגן ומסודה המחוממים לטמפרטורה של כ-1,100 מעלות צלזיוס. תחמוצת הצורן נמצאת בשפע בחול הים ומלחי האשלגן והסודה נמצאים באצות, מכאן נובעת ההשערה כי גילוי הזכוכית היה במדורה של אצות על חוף הים כבר לפני כ-4,000 שנים. בארץ נעשה בעבר ניסיון להקמת מזגגה ב-1891 בכפר הערבי טנטורה (כיום בקיבוץ נחשולים) אך מחסור בחומרי גלם מקומיים, יבוא זכוכית זול מאירופה, עלות ייצור גבוהה ומחלת הקדחת הביאו לסגירתו לאחר ארבע שנות פעילות בלבד. כיום המבנה משמש כמוזיאון ימי.

מלח - מי שיטייל לאורך החוף הסלעי של ישראל ימצא הצטברות של מלח בשקעים בסלע עם בוא השפל, כאשר מי הים התאדו מהם. הפקת המלח בשיטה פשוטה וטבעית זו של אידוי, ששימשה בזמני קדם לחוף הים, הפכה כיום לתעשייה שלמה. המלח היה מצרך מבוקש ביותר לקיום בסיסי ולשימור המזון עוד מימי קדם, אם כי כיום הפקת המלח מיועדת בעיקרה לתעשיות המזון והכימיקלים. כיום מופק המלח בישראל במקומות כמו עתלית בים התיכון ואילת בים האדום, תוך שימוש בציוד מודרני כמו משאבות ומערכת בריכות המנצלות את חום השמש בצורה יעילה יותר. תעשיית המלח הגדולה בישראל הינה כמובן במפעלי ים המלח, שם מופקים מלחים לתעשיית הכימיקלים כגון אשלג וברום שאינם משמשים למאכל.

צביעת בדים הייתה תעשייה מרכזית בחופי האגן המזרחי של הים-התיכון מימי הפניקים ועד הכיבוש המוסלמי. צבעי התכלת והארגמן שהופקו מחלזונות ימיים בשם ארגמונים שימשו לצרכים דתיים, והיו סמלים של מעמד בבגדי האצולה. צבעים אלה הצטיינו ביציבותם וביופיים ובשל איכותם, נדירותם והתהליך המורכב של הפקתם, מחירם היה יקר ביותר. במשך הדורות, עם הפסקת ייצורם הסדיר של צבעים אלה, נשתכחו הפרטים העיקריים של הפקתם ומדי פעם מנסים החוקרים

רכסי כורכר

כורכר הינו סלע משקע שנוצר מהתלכדות והתאבנות של חול קורצי בקו המים בשל עירובו עם רכיבים גירניים (קרבונטים) ממי הים ומיצורים ימיים. זהו סלע ייחודי ללבנט (מזרח הים התיכון). כאשר מפלס הים משתנה, נחשפים רכסי הכורכר ושחיקתם אף יוצרת מצוקים מרשימים.

המודרנים להתחקות אחר שיטות ההפקה הקדומות. הצבעים הופקו לאחר ריסוק הקונכיות ומיצוי הצבע מחומרים שמקורם בבלוטות התת-זימיות של החלזונות. בחופי ישראל הים תיכוניים שכיחים שלושה מיני ארגמונים שקונכיותיהם נמצאו בערמות באתרים שונים: 1) ארגמון קהה-קוצים, השכיח במים רדודים, מצוי בעיקר בבית גידול סלעי. 2) ארגמנית אדומת-פה (איור 4), הניכרת בצבע האדמדם הבולט של פנים פתח קונכייתה אף היא מצויה על סלעים במים רדודים מאד 3) ארגמון חד-קוצים, השוכן בקרקע רכה ובוצית במעמקי הים. סלים עם בשר דגים היו מוכנסים למים והארגמונים, שהם טורפים, נאספו בהם והועברו לבריכות גידול לחופי הים, משם נלקחו לצורך הפקת הצבע. כיום שלושה מינים מקומיים אלו הינם נדירים בחופי הארץ. בפרט הארמגנית אדומת הפה שבעשורים האחרונים נעלמה כמעט לחלוטין. ככל הנראה הם נטרפו או נדחקו על ידי **מהגרים לספסים** שהגיעו לים התיכון דרך תעלת סואץ, וייתכן שגם להתחממות מי הים חלק משמעותי בהיעלמם. פולמוסים דתיים בנוגע לאותנטיות התהליך ומידת קדושתו נמשכים בשנים האחרונות במלוא עוזם, בעוד הארגמונים עצמם הולכים ונעלמים מחופינו. כיום מופק צבע התכלת במפעל במעלה אדומים, ובשל נדירות המינים המקומיים בחופינו הוא מיוצר מארגמונים שמיובאים ממקומות אחרים בים התיכון.

אורגניזמים נוספים מהם הופק צבע הארגמן הם חלזונות צפים בשם סגולית (Jantina) שחיים בלב ים במים העליונים ונסחפים לחופים בעת סערות, בעוד דיונון הרוקחים זוהה כמקור אפשרי נוסף שמזוהה עם צבע התכלת.

איור 4

ארגמנית אדומת פה - מין זה נדיר ביותר בחופי ישראל כיום, כנראה בעיקר בשל התחממות מי הים.
(H. Zell)

הגירה לספסית

המעבר של בעלי חיים וצמחים מים סוף ומהאזור האינדו-פסיפי (האוקיינוס ההודי ומערב האוקיינוס השקט) אל הים התיכון דרך תעלת סואץ. נקראים על שם פרדיננד דה לספס, המהנדס האחראי על חפירת התעלה ב-1869. מאות מינים של בעלי חיים חדשים כאלו כבר התיישבו במזרח הים התיכון וייסדו בו אוכלוסיות קבע. את אלו מתוכם שגורמים לנזקים גדולים במיוחד לסביבה הימית המקומית אנו מכנים מינים פולשים. העמקת והרחבת התעלה (ואף הכפלתה) מביאות בשנים האחרונות לכניסה של עוד ועוד מינים חדשים למזרח הים התיכון.

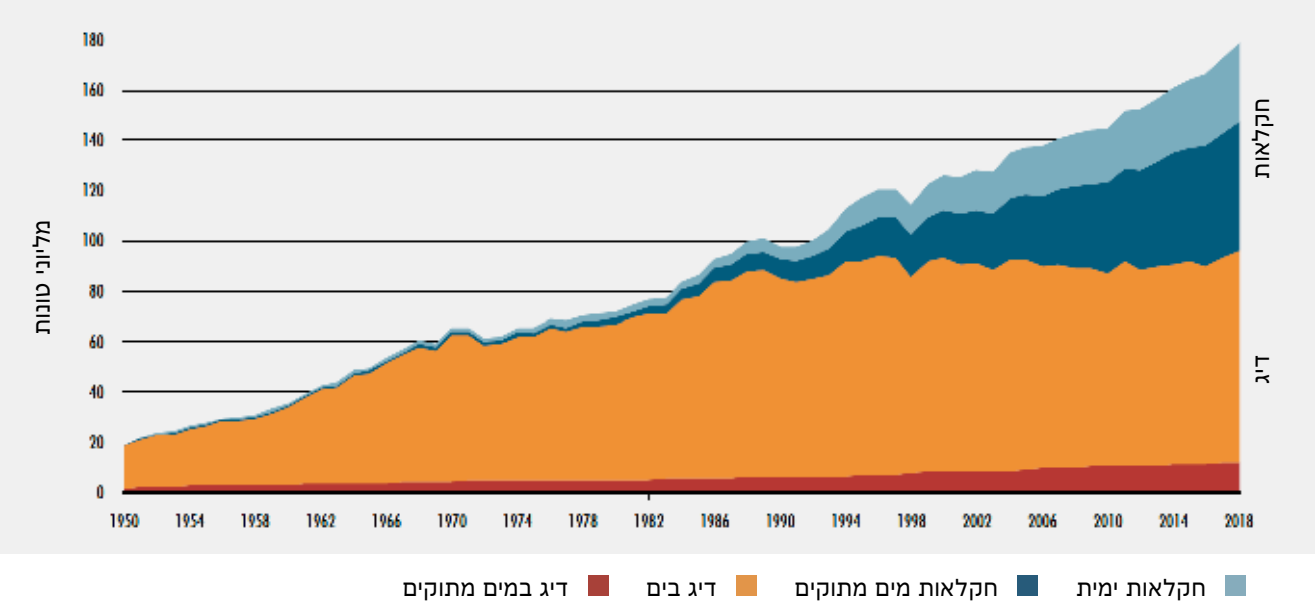
9.2 מזון מהים - דיג וחקלאות ימית

הדיג בים: עבר, הווה ועתיד

המשאב הימי הראשון שניצל המין האנושי הינו הדגה. משחר האנושות בני אדם שחיו לחופיהם של מקווי מים מלוחים ומתוקים ניזונו על הדגים שנלכדו בהם. עדויות עתיקות בנות עשרות אלפי שנים מהעולם (למשל קרסי דיג בני 42,000 שנים ממזרח טימור) ומהארץ (למשל בריכות דגים בנות 23,000 שנים לחופי הכינרת באתר אוהלו) מהוות עדות לקיומם העתיק של ציד ואף גידול של דגים. עם השנים הלכו והשתכללו יכולותיהם של בני האדם בתחום הימי - יציאה לים על כלי שיט למרחקים גדלים והולכים אפשרה לבני האדם לצוד יותר דגים, גם רחוק יותר מהחוף ובעומקים הולכים וגדלים ושיטות הדיג הלכו והשתכללו. עם המהפכה התעשייתית נכנסו שיטות דיג ממוכנות לפעולה ועם תום מלחמת העולם השנייה, הופנה חלק גדול ממשאבי תעשיית כלי השיט מייצור משחתות צוללות וספינות קרב לייצור ספינות דיג. מגמה זו באה לענות על העלייה התלולה באוכלוסיית בני האדם ובצריכת הדגים לנפש, שהכפילה עצמה בשבעים השנים האחרונות. בנוסף לצריכה ישירה של בני אדם מבוצע גם דיג לשם ייצור קמח דגים ושמן דגים, בעיקר לצרכי הזנת בעלי חיים. העליות האלו הביאו למצב בו לקראת סוף המאה העשרים הגיעו בני האדם לניצול מלא של כמעט כל המערכות האקולוגיות הימיות שמספקות לנו דגה. למעשה, מאז שנות התשעים של המאה העשרים נפסקה העלייה בשלל הדיג העולמי והוא התייצב על קצת פחות ממאה מיליון טונות של דגים בשנה (איור 5).

אם כך, ככל הנראה הגענו לסף של מה שמסוגל הים לספק לנו באופן טבעי. יחד עם ההבנה הזו, בעשורים האחרונים הלך ועלה בעולם הגידול של דגים וחסרי חוליות בחקלאות ימית בכדי לענות על הביקוש הגובר. החל מהעשור השני של המאה ה-21, חקלאות המים (גידול בים ובמים מתוקים) השתוותה לדיג הימי ואף עקפה אותו כמקור האספקה העיקרי שלנו לצריכת דגה (איור 5).

איור 5. דיג וחקלאות בים ובמקווי מים מתוקים - ייצור שנתי במיליוני טונות מאז 1950



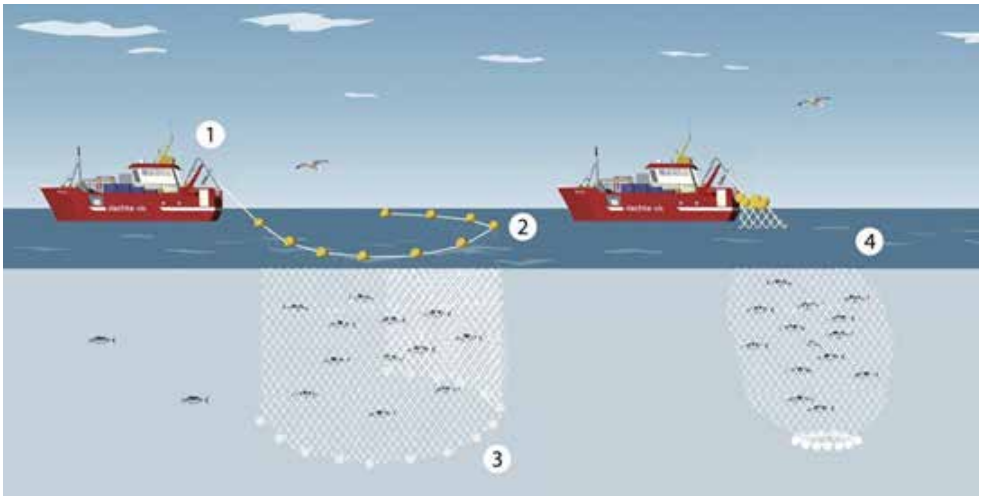
עיקר העלייה הזו, הן בצריכה והן באספקה, מתרחשת במזרח אסיה, ובעיקר בסין שהיא היצרנית והצרכנית הגדולה ביותר של מזון מהים, אך היא ניכרת כמעט בכל מדינות החוף.

שיטות הדיג - שיטות הדיג העתיקות ביותר מימי קדם כללו חכות עם קרסים, צלצלים ורשתות שהופעלו ידנית על ידי דייגים בודדים וקבוצות קטנות, וכך נותרו במשך אלפי שנים. המהפכה התעשייתית היא שחוללה את השינוי הגדול ביותר בדרך בה אנו מוציאים דגים מן הים. אמנם גם כיום אנו משתמשים בקרסים וברשתות, אבל הכמות שלהם, החומרים מהם הם עשויים והדרך בה הם מועלים לסיפון או ליבשה, אחרות לחלוטין. מנועי הבעירה הפנימית (קיטור ואחריו דיזל) אפשרו לספינות גדולות יותר לצאת לים לשהות ארוכה יותר, לעשות שימוש במערכות הידראוליקה חזקות למשיכה, גרירה והעלאת רשתות גדולות יותר, להפעיל מקררים לשימור הדגים, לשנע אותם למרחקים גדולים ובגדול, לדוג יותר דגים. לצד הדיג המסחרי והתעשייתי גדול הממדים שהתפתח, ממשיך הדיג החופי המסורתי להתקיים בדוחק, וחשיבותו הרבה, שנובעת בעיקר ממספר המועסקים הגבוה, מעמדם החברתי-כלכלי הנמוך ושיטות הדיג המקיימות שבהן הם דגים, מצריכה ניהול נבון ורגיש של המשאבים, כזה שמקדש יותר מאשר רווחים בטווח הקצר.

שיטות הדיג הנבחרות לשימוש תלויות בעיקר בבית הגידול של דגי המטרה. קיימים שלושה סוגי בתי גידול עיקריים: קרקעית רכה (בעיקר טין וחול), קרקעית קשה (סלעים, אלמוגים, חצץ) וגוף המים (מספר מטרים מעל הקרקעית ועד פני המים). על הקרקעית הרכה דגים כיום בעיקר בעזרת **מכמורת** - רשת דמוית משפך שנגררת על ידי ספינה על גבי הקרקעית הרכה ומרכזת לתוכה כל בעלי החיים הנקרים בדרכה. ביקורת רבה נמתחה על שיטת דיג תעשייתית זו בשל הסלקטיביות הנמוכה שלה (ראו שלל לוואי בהמשך) ובשל הנזק שהיא גורמת לבית הגידול הקרקעי, שכן רשתות מכמורת ניתן לגרור גם על הקרקעית הסלעית. בישראל הנזק לקרקעית מוגבל, שכן הגרירה של רשתות מכמורת על קרקעית הקשה או בקרבתה הינה אסורה ואף קיימת תקנה שאוסרת על החזקה בציוד ייעודי שעשוי לאפשר גרירה על המסלע (גלילים שמחוברים לרשת על מנת לאפשר לה לנתר מעל למסלע ועל גביו). עיני רשתות, שהוגדלו לאחרונה על פי חוק, מבטיחות אף הן הפחתה בשלל הלוואי. את רשת המכמורת ניתן לגרור גם בגוף המים, ללא מגע עם הקרקעית וקיימות יוזמות לדוג כך גם בישראל.

שיטת הדיג העיקרית בגוף המים הינה **רשתות הקפה** - שמשמשות, כשמן, להקפת להקות דגים בגוף המים (איור 6). בשיטה זו נידוגים מרבית הדגים בעולם. רובם דגים קטנים כגון אנשובי, סרדינים ומקרלים, אבל גם דגי טונה ודגים גדולים אחרים נידוגים בהקפה.

בניגוד לשיטות הדינאמיות של מכמורת והקפה, על המצע הסלעי נעשה שימוש בעיקר באמצעים נייחים אותם משאירים הדייגים על הקרקעית, בדרך כלל למשך הלילה, כגון **מערכי חכות**, **מלכודות ורשתות עמידה**. אלו מסתבכים פחות במסלע וגורמים לו ולעצמם פחות נזק. שיטות דיג נוספות, שרווחות בעיקר בדיג חובבים כוללות **גרירת פיתיונות על פני המים ודיג עם חכות וקרסים או בעזרת צלצל (רובה)** ואף הם מתרחשים בדרך כלל בקרבת הקרקעית הסלעית.



איור 6

דיג הקפה:
1. הספינה מאתרת ומקיפה להקת דגים
2. מצופים על פני המים
3. משקולות בתחתית הרשת
4. חבל שעובר דרך תחתית הרשת נמשך וסוגר את הלהקה מלמטה והרשת ובה הדגים מועלית לסיפון.
"Purse-Seine" by lauren.packard

מינים עיקריים בשלל הדיג - מרבית הדגים בימים נמצאים באזור מדף היבשת - בעומק שאינו עולה עד 200-100 מ', אבל מספר מיני דגי מים עליונים גדולים ומהירים, ובכללם דגי הטונה, עשויים להימצא גם הרחק מהחוף ובלב האוקיינוס. מיני הדגים שנידוגים בכמויות הגדולות ביותר בים הינם דגים קטנים שנידוגים בגוף המים, דוגמת אנשובי, סרדינים ומקרלים. דגים גדולים בגוף המים כוללים את הטונה כחולת הסנפיר (איור 7) או אטונס שחור קווים, שהוא אחד הדגים הנפוצים ביותר בעולם וזה שנמצא לרוב בקופסאות השימורים של הטונה.

דגי הקרקעית הרכה הנפוצים ביותר בשלל הינם הבקלה והסול. דגי מצע קשה נפוצים כוללים את הדקראים (לוקוסים) והספרוסיים. בנוסף על הדגים, חסרי חוליות נפוצים בשלל הדיג כוללים סרטנים כגון לובסטרים וחסילונים (שרימפסים) וכן רכיכות כגון דיונונים, תמנונים וצדפות ואפילו מדוזות (כמיליון טון בשנה) שנידוגות למזון ושימושים אחרים.

איור 7

דגי טונה כחולת סנפיר (*Thunnus thynnus*). דגי ענק אלו, שמוגדרים כיום כנתונים בסכנת הכחדה בשל דיג מאסיבי שלהם שנובע מערכם הגבוה, עשויים להגיע לאורך 3.5 מטרים ולמשקל של מעל חצי טון

אתגרים בדיג - דיג יתר, שלל לוואי, הרס בתי גידול, ניהול ממשק דיג בר קיימא - מאחר ודגה הינה משאב מתחדש ומפאת גודלם של האוקיינוסים, בעבר נהוג היה לחשוב שלעולם לא נוכל להגיע למצב של ניצול ביתר של משאב הדגה. עם זאת, כיום אנחנו יודעים היטב שיש סף לכמות הדגים שהים מסוגל לייצר עבורנו באופן טבעי. באזורים רבים ניכרו השפעות הדיג על דגי המטרה, שהלכו והתמעטו ולעתים אף נעלמו כמעט לחלוטין מאזורים נרחבים. דיג יתר הינו מצב בו קצב הדיג גדול מיכולת ההתחדשות הטבעית של מיני המטרה והוא עלול לגרום לפגיעה קשה וארוכת טווח בדגה. "דיג יתר של גודל" הינו מצב בו אנו מוציאים מהים דגים קטנים מדי, והוא נפוץ למדי בשיטות דיג לא סלקטיביות כמו דיג מכמורת. "דיג יתר של גיוס" הינו הוצאת יותר מדי פרטים בוגרים, כך שלא נשארים מספיק הורים באוכלוסייה ונגרמת קריסה של המשאב - מצב כזה נדיר יותר, אך הוא יותר מפורסם שכן הוא בעל השלכות חמורות יותר. בנוסף על אלו נטבע לאחרונה מונח חדש - "דיג יתר של מערכות אקולוגיות" - המתייחס למצב בו כל המערכת האקולוגית מושפעת ומשתנה כתוצאה מהוצאת הדגים, הרס בתי גידול ושינוי הדינאמיקה של חברת בעלי החיים והצמחים בים. מקרים מפורסמים של "דיג יתר של גיוס" שתועדו הנם דיג הקוד (סוג של בקלה) בצפון האוקיינוס האטלנטי, דיג האנשובטה (סוג של אנשובי) בפרו והטונה כחולת הסנפיר בים התיכון. לאחר שמתרחש דיג יתר, הדייגים בדרך כלל מפסיקים לצאת לדוג את המין שסובל מדיג יתר כתוצאה ממגבלות שמנהלי הדיג מטילים עליהם או פשוט עקב קריסה מסחרית ונדירות הדגים. במקרים של דגי מים עליונים כמו האנשובי הקטן או הטונה הענקית, די היה בהפסקת הדיג או הטלת מכסות מחמירות למשך כמה שנים ומלאי הדגה התחדש. במקרה של דגי קרקעית כמו הבקלה בצפון מערב האוקיינוס האטלנטי ההתאוששות איטית מאד. למרות שדיג הבקלה פסק בשנת 1992, עשורים שלמים של סגר טרם הספיקו בכדי שהכמויות ישובו לערכים שלפני הסגר. כיום קובע ארגון המזון של האומות המאוחדות כי כשליש מהמינים המסחריים העיקריים בעולם נמצאים ברמות שונות של דיג יתר. בשנת 2006 פרסמו חוקרי דיג מובילים בעולם מאמר שטען שמלאי הדגה המסחרי העולמי נמצא בסכנת התמוטטות, והם צוטטו בתקשורת בטעות כאילו האוקיינוסים עלולים להתרוקן מדגים עד שנת 2048. חוקרים מובילים אחרים הצביעו על התעלמות של החוקרים האלו ממספר סיפורי הצלחה בולטים של ניהול דיג בר קיימא במקומות שונים. לבסוף התכנסו שני צוותי החוקרים הניצים יחד לעבודה משותפת ופרסמו מאמר משותף שהראה שהמצב של דיג יתר אמנם נפוץ למדי ושבמקומות רבים אכן קיים סיכון למלאי הדגה המסחרי, אבל גם שההערכות הראשונות היו מוגזמות ושעם ניהול נכון בהחלט יש בידינו להביא לבנייה מחודשת של מלאי הדגה ואף לאישוש של המערכת האקולוגית.

בנוסף על דיג יתר של מיני המטרה, הדיג עלול לגרום לנזקים נוספים למערכת האקולוגית. בחלק משיטות הדיג נלכד גם שלל רב שאינו מיני המטרה. מינים אלו, שנקראים '**שלל לוואי**' נלכדים בעיקר בשיטות דיג בעלות סלקטיביות נמוכה כגון דיג מכמורת, במהלכו נגררת רשת שקוטר עיניה קטן יחסית על גבי הקרקעית. המכמורת אוספת כמעט כל מה שנקרה בדרכה, ולכן שלל הלוואי בדיג המכמורת גדול, והוא מורכב בדרך כלל מפרטים קטנים של מינים מסחריים וממינים חסרי חשיבות מסחרית. שלל הלוואי עלול לכלול גם מיני דגל שבני האדם מייחסים להם חשיבות גבוהה, כגון יונקים ימיים, דגי סחוס (כרישים ובטאים), צבי ים ואחרים.

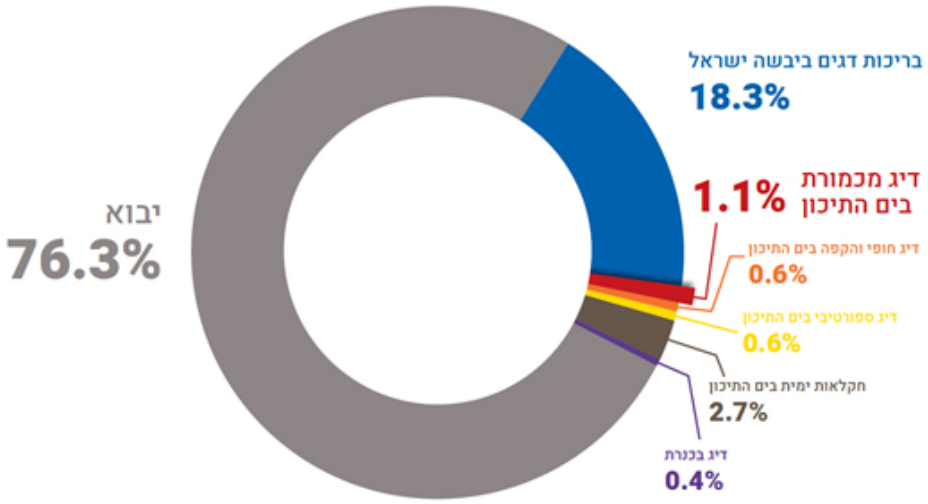
מינים אלו עלולים להילכד כמובן גם בשיטות דיג אחרות כגון רשתות עמידה או מערכי חכות שאף להם חלק בשלל הלוואי, אם כי קטן יותר בדרך כלל. בעיה נוספת של הדיג נוגעת להרס בתי גידול. על הקרקעית הרכה קיימים אמנם חילוקי דעות בנוגע להגדרה של "הרס", שכן קרקעיות רכות מסוגלות להשתקם מדיג מהר יחסית, אבל על הקרקעית הקשה ברור שגרירת ציוד דיג כגון רשתות מכמורת וכן ציוד דיג נטוש שנתפס על סלעים וזיזים גורמים לשיטוח ועקירת מסלע - הפרעות לטווח הארוך שהנן לעתים בלתי הפיכות, וכן כיסוי וסתימה בחול של אצות וחסרי חוליות ישיבים.

הדיג בישראל - לפני כעשרת אלפים שנה חברו לראשונה בחופי ארץ ישראל תרבויות חקלאיות שהתגבשו בסהר הפורה עם תרבויות דייגים והתגבשה לראשונה מערכת הקיום הים תיכונית. כאן צמח לפני כעשרת אלפים שנים כפר הדייגים הים תיכוני הראשון, שתושביו עסקו בו זמנית בחקלאות ובניצול משאבי הים, וכאן התהווה הבסיס לדיאטה הים תיכונית המומלצת כיום על ידי מומחי התזונה בעולם. החל מהתקופה הניאוליתית ועד לזמנים מודרניים היה הדייג חלק חשוב ובלתי נפרד מהתרבות ומהכלכלה הים תיכונית. במדינת ישראל התגלו ממצאים רבים של ציוד דייג ועצמות דגים המלמדים על מגוון שיטות דייג קדומות (גלילי ואחרים 2013). בתקופה העות'מאנית ובמהלך המנדט הבריטי פעלו בישראל מאות כלי שייט שעסקו בדייג ופקיד הדייג הבריטי ג'ימס הורנל היה הראשון לתעד את מעגני הדייג, כלי השייט, שיטות הדייג והשלל וב- 1937 אף כתב את פקודת הדיג המנדטורית, עליה התבסס ניהול הדיג בישראל עד לעת האחרונה. עם זאת, ישראל מעולם לא הייתה מעצמת דיג. שטח מדף היבשת המצומצם שלה ומיקומה בצדו החם, המלוח והעני בחומרי דשן של הים התיכון, מכתיבים כיום כבעבר שלל דיג לאומי צנוע, שמספק אחוזים בודדים מן התצרוכת הלאומית (איור 8). אמנם שכנותינו בעזה בסוריה ובלבנון מוציאות מהים שלל גבוה מעט יותר, אבל זה משקף בעיקר את מספר הדייגים הגדול יותר בהן, מסורת דיג חזקה וכן את המציאות הכלכלית הקשה יותר והיעדר אפשרויות תעסוקה אחרות לשכבות החלשות בהן, ולא בהכרח ניהול דיג מתקדם יותר. בדומה לדיג העולמי, הדיג בישראל עלה מאז 1950 עד שנות התשעים של המאה העשרים ומאז התייצב ואף ירד בכמותו.

עם קום המדינה היה הדיג חזית המחקר הימי בישראל ומרבית המדענים הימיים בארץ עסקו אז בשאלות שסובבות סביב הדגה. בשנות השישים הועברו מרבית החוקרים והמחקרים מהיחידה לחקר הדיג אל המכון לחקר ימים ואגמים, ועם השנים התפתחו תחומי המחקר הימי אל מעבר לדיג ודומה כי נטשו אותו כמעט לחלוטין עד לעת האחרונה, בה זוכה חקר הדיג לעדנה בשל מחלוקות על השימושים בשטחי הים, על הזכות לדוג ועל הגנה על הטבע הימי. צריכת הדגים לנפש בישראל הוכפלה בשלושה העשורים האחרונים והאוכלוסייה אף היא הכפילה את עצמה בתקופה זו, כך שצריכת הדגים כיום הינה פי 4 מאשר ב-1990. בסה"כ כיום נצרכים בישראל היום כ- 100,000 טון דגים. מתוכם כ-80% מיובאים ופחות מחמישה אחוזים מהם נידוגים או מיוצרים בים שלנו (איור 8).

בנוסף למשאב הדגה כמזון, הדיג מהווה גם משאב לא מבוטל של מקור פנאי, הנאה ובריאות הגוף והנפש עבור כ-70,000 דייגים חובבים בישראל. עבור הדייגים האלו חווית היציאה לים עצמה חשובה לא פחות מהדג המונח על צלחתם.

איור 8. **צריכת הדגה בישראל 2017** (באחוזים)



מקורות הדגה הנצרכת בישראל (נתוני משרד החקלאות, 2017). מקור: החברה להגנת הטבע, 2020

הגורמים המשפיעים על הדיג הישראלי - מספר גורמים חיצוניים משמעותיים שאינם תלויים בכמות הדגים הזמינים לדיג בים ממשיכים להתקיים ולהשפיע על הדגה לא פחות ולרב אף יותר מהדיג עצמו: העיקרי בהם הינו דחיקת והחלפת המינים המקומיים במהגרים לספסים - מינים שעברו לים התיכון מים סוף והאוקיינוס ההודי דרך תעלת סואץ, ומהווים כיום כבר כמחצית משלל הדיג. גורמים נוספים הינם התחממות מי הים בשל שינויי אקלים גלובאליים, זיהום מי הים בשפכים ופסולת מוצקה, בעיקר פלסטיק, זיהום אור וזיהום רעש, שהם נושאים חדשים שהמחקר עליהם עודו בחיתולים ועוד גורמי עקה חיצוניים. בנוסף על אלו, גורמים גיאופוליטיים כגון היצע וביקוש, יבוא וייצוא, מחירי הדגים, עלויות הדיג (לדוגמא מחירי העבודה והדלק) ואף מלחמות וסכסוכים בינלאומיים הינם בעלי השפעה משמעותית ביותר על שלל הדיג. לצד אלו, כמובן שלניהול הדיג עצמו, בין אם הוא מוטה פיתוח וניצול או שימור והגנה על הטבע יש תפקיד חשוב בקביעת כמות הדגים המוצאת מהים.

ניהול הדיג בישראל - כמו בעולם, גם בישראל הלך ועלה שלל הדיג עם השנים עד שנות התשעים עם העלייה במאמץ הדיג (המאמץ המושקע בדיג, המתבטא במספר כלי השיט והדייגים, זמן הדיג, כח המנוע, גודל הציוד וכו'). בשנת 1995, בשל חששות לדיג יתר בישראל, החליט אגף הדיג על הקפאת גודלו של צי הדיג הישראל ומאז לא ניתנו יותר רישיונות דיג חדשים. אכן, מאז שנות התשעים חלה ירידה בשלל ובמאמץ הדיג - הן בכמות הדייגים והסירות והן בכמות הדגים שהם הוציאו מהים. בשנת 2016, לאחר קמפיין ציבורי ומשפטי מאסיבי בהובלת החברה להגנת הטבע הוטלו הגבלות מחמירות נוספות במסגרת רפורמה בדיג, הוקמה יחידת אכיפה חדשה של פיקוח ימי ברשות הטבע והגנים וכיום ישראל היא מהמדינות המתקדמות ביותר בהגנה על הסובב הימי בכל הנוגע לדיג. בין התקנות העיקריות: ישראל היא המדינה היחידה בים התיכון בה אסור לחלוטין הדיג של דגי סחוס (כרישים ובטאים), תקנות וסגרים בעונת הרבייה כוללים איסור על דיג דקרים (לוקוסים) במשך שלושה חודשים, הדיג החופי סגור למשך כחודש ודיג המכמורת לחודשיים (עד שלושה חודשים לפי התקנות), שיטות דיג אסורות

איור 9

דייג חובב מוציא דג מהמים. מרבית הדייגים החובבים בישראל דגים מהחוף בעזרת חכות וקרסים

(רשתות גריפה מהחוף, דיג ברובה בצלילה בעזרת מכלים, דיג מכמורת על המסלע ועוד), איסור על דיג מכמורת בכל צפון הארץ ובדרום בעומקים רדודים מ-40 מ' (25 מ' בלילה), מגבלות שלל בדיג החובבים (עד 5 ק"ג או 2 דגים ליום), עודכנו מגבלות האורך המזערי המותר לדיג עבור עשרות מיני דגים ועוד. ניתן למצוא רשימה ברורה של תקנות וחוקי הדיג באתר רשות הטבע והגנים. בנוסף על אלו, נאסר הדיג בשמורות ימיות. רשת של שמורות ים גדולות כאלו, שיכסו כ-20% משטח מדף היבשת הישראלי נפרשת מול החופים בימים אלו. בכך משנה ישראל את הנחת היסוד של ניהול הדיג בה ממיקסום של השלל להגנה על הדגה לטווח הארוך. בכך גם הופכת ישראל לאחת המדינות המחמירות ביותר בים התיכון מבחינת תקנות הדיג.

חקלאות ימית

חקלאות ימית הינה ענף של חקלאות מים, העוסק בגידול דגים, חסרי חוליות וצמחים במים מלוחים, בים או ביבשה. בבואנו לאתר מקורות מזון מן הים על מנת להאכיל את אוכלוסיית העולם ההולכת וגדלה, אנו רואים שהדיג מוגבל ביכולתו לספק את הצריכה הגוברת (איור 5). דיג יתר, מחסור עולמי במים מתוקים וקשיים שונים להגדיל את מלאי המזון על היבשה (למשל עלויות קרקע גבוהות) ממקמים את החקלאות הימית כפתרון בעל פוטנציאל עצום לגישור על הפער התזונתי הזה, וכאחד התחומים שצומחים במהירות הגבוהה ביותר בכלכלה העולמית בעשורים האחרונים. כיום התרומה של האוקיינוסים עומדת על 3%-4% בלבד מכלל מלאי המזון האנושי, כך שיש לחקלאות הימית עוד הרבה מקום לצמוח.

שני גורמים עיקריים מבדילים את החקלאות הימית מדיג: 1) חקלאות משמעה בעלות על המלאי המגודל, 2) בחקלאות יש השקעת תשומות והתערבות בשלבי רבייה וגידול בעלי החיים למטרת הגדלת הייצור.

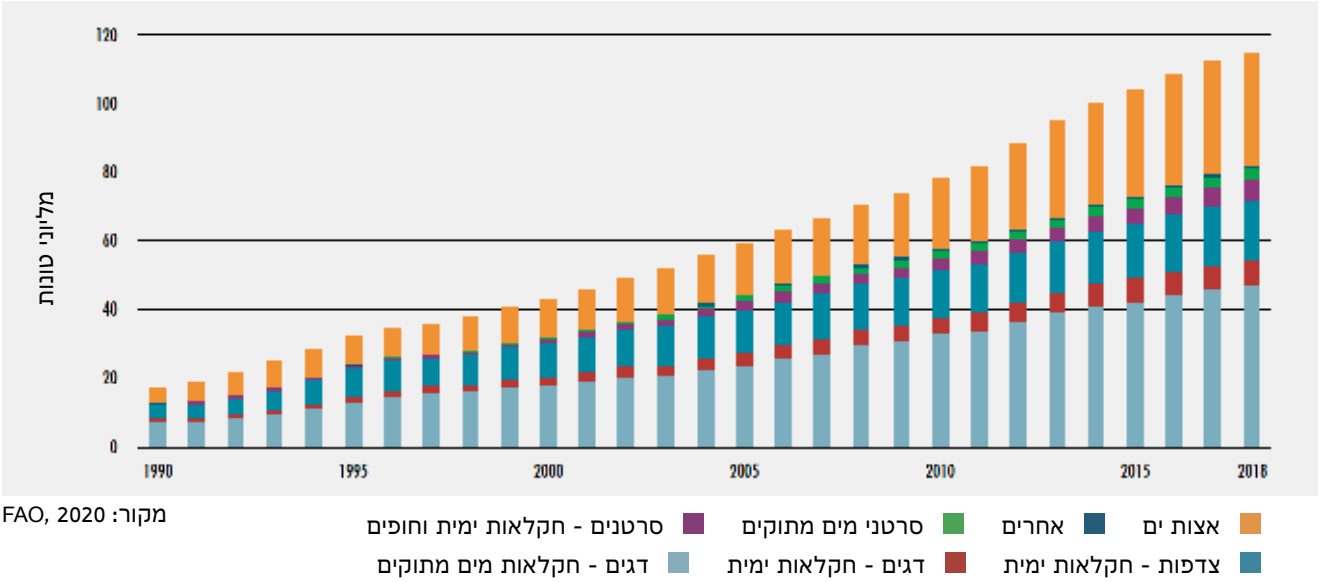
התהליך כולל בדרך כלל את השלבים הבאים: א) במכוני רביה ביבשה: ייצור ביצים או לארוות על ידי גידול להקת פרטים בוגרים. להקה זו צריכה להיות גדולה מספיק ומגוונת מספיק מבחינה גנטית מחד, ומאידך על הפרטים האלו להיות המובחרים ביותר ובעלי התכונות הרצויות ביותר למלאי שבכוונתנו לגדל (גדולים, בעלי קצב גידול מהיר, עמידים למחלות ותנאי עקה וכו').

השלב הבא הוא אילוץ הטלה והפריה באמצעים מלאכותיים ולאחר מכן הזנה וגידול שלבי החיים הצעירים עד גודל דגיג ב) אכלוס בבריכות, כלובים, מכלים או מתקנים אחרים - סביבת הגידול נבחרת על פי המין שברצוננו לגדל והמשאבים הקיימים באזור, למשל אצות וצדפות מגדלים על חבלים תלויים בעמודת המים, סרטנים מגודלים בדרך כלל בבריכות עפר סמוכות לים ודגים בים בדרך כלל מגודלים בכלובים (למרות שגם אותם ניתן לגדל ביבשה). ג) הוספת מזון לשם האצת הגדילה עד הגעה לגודל שוק וטיפול במלאי - למשל הוספת תרופות או חמצן, סניטציה (סילוק מתים) הרחקת טורפים ותחזוקת המתקן למניעת בריחה של הדגים ככל הנדרש עד לשיווק.

כמעט כל החקלאות הימית באה לספק מזון מן הים, אך קיימים גם שימושים אחרים, למשל גידול פנינים לתכשיטים או אצות לייצור קוסמטיקה ואנרגיה. כיום עיקר גידול הדגים בעולם עדיין מתרחש במים מתוקים (איור 10) אבל עשרות מינים כבר מגודלים בחקלאות ימית, ועשרות מינים נוספים נמצאים בשלבי פיתוח שונים. מספר מינים בולטים במיוחד: סלמון (*Salmo salar*) וטרוטה (*Oncorhynchus mykiss*) שמגודלים בעיקר בפיורדים בצ'ילה ובצפון אירופה, מיני ספרוסיים, דקרים, דגים שטוחים וקוביה (*Rachycentron canadum*) שמגודלים במזרח הרחוק ובעיקר בסין, ובים התיכון דגי דניס (*Sparus aurata*) לברק (*Dicentrarchus labrax*) ובורי (*Mugil cephalus*). גם חסרי חוליות מגודלים בחקלאות ימית וחופית ובהם בולטים בעיקר חסילונים (שרימפסים) מהמין *Litopenaeus vannamei* שמגודלים במזרח אסיה. בשנים האחרונות הוחל גם בגידול דגי טונה בכלובים בים, כולל בים התיכון, אבל עיקרם עדיין מגיעים מדיג ולא ממכוני רבייה ורק מפוטמים בים עד לגודל שיווק.

אצות נפוצות בכל ימות העולם ומשמשות כמזון כבר אלפי שנים, ולכן ניתן למצוא בגידולן הבטחה גדולה לתזונת האדם. הן נחלקות למיקרו-אצות (שהן חד תאיות זעירות) ומאקרו-אצות (האצות הגדולות יותר). למרבית האצות צבע ירקרק, אבל הן נחלקות גם לאצות אדומיות, כמו למשל פורפירה (הידועה גם בשם נורי), אצות חומיות כמו אונדריה (הידועה גם כוואקאמה) ואצות ירוקיות כמו אולווה (חסנית).

איור 10. ייצור דגים, אצות וחסרי חוליות בחקלאות מים בעולם לפי שנים



מקור: FAO, 2020

אצות אלה נקצרות מהים הפתוח או מגודלות בחקלאות, שיכולה להתרחש הן בבריכות ביבשה או על מערכות חבלים בים. ניתן לאכול את האצות טריות, מיובשות ואף מוחמצות. כבר כיום ניתן למצוא על המדף מוצרי אצות רבים ובעתיד צפוי חלקן לגדול משמעותית. יש להן ערך כימי ותזונתי גבוה ותכונות של הסמכה וייצוב שהופכים אותן לתוספים טבעיים אידאלים שמעשירים ומשפרים את איכותם ועמידותם של מזונות אחרים, וכיום מוצרים מבוססי אצות מוספים לדגנים, גבינות, בשר ומזונות רבים אחרים.

יתרונות מול אתגרים בחקלאות ימית - גידול דגים בים פותר הרבה מהבעיות שצצות במקווי מים סגורים וביבשה. ראשית, ביבשה הנדל"ן (שטחים) הוא יקר ערך בעוד בים יש שטח זול למכביר. שנית, המים עצמם הינם משאב יקר ערך שמצוי בים בשפע ובחינם. בנוסף, בחקלאות במקווי מים סגורים הבעיות הגדולות ביותר הינן בדרך כלל תחלואה, שמצריכה שימוש בתרופות ואנטיביוטיקה, מחסור בחמצן, שמצריך הרבה שימוש באנרגיה כדי למנוע תמותה המונית והצטברות רעלים כתוצאה ממזון שלא נאכל ומצריך סינון וטיפול אינטנסיבי במים. יציאה לים הפתוח פותרת במידה רבה את הבעיות האלו, שכן תחלופת המים בים הינה גבוהה בהרבה ומחלות או מחסור בחמצן נדירים. יחד עם זאת, יציאה לים הפתוח מצריכה השקעה בתשומות של כלי שיט ודלק (הגעה לאתר), ובים הפתוח יש גם סערות וגלים שעלולים להרוס את החווה, ועל כן מרבית החקלאות הימית עדיין מתרחשת במפרצים חצי סגורים ובלגונות ואזורים מוגנים בקרבת החוף, שם חלק מהבעיות של חקלאות המים ביבשה עדיין קיימות. לדוגמא במפרצים סגורים חומרי הדשן הזולגים לסביבה מהכלובים (מזון דגים שלא נאכל והפרשות הדגים) עלולים לגרום ל'אזורים מתים' מתחת לכלובים ולפריחת אצות בגוף המים, שעלולה לפגוע באלמוגים ובחי והצומח הטבעי. פתרון אחד אפשרי נקרא **חקלאות ימית משולבת**, וכולל לצד גידול דגים גם גידול של ספוגים, אצות או מינים אחרים שמסננים ומשתמשים בהפרשות הדגים לגדילה וכך נוצר רווח כפול מהשימוש בחומרי המזון והם אינם מזהמים את הסביבה הימית. פתרונות לאתגרים שמציבה יציאה לים הפתוח כוללים טכנולוגיות של כלובים עמידים וקשיחים או כלובים רכים וגמישים שמסוגלים לצלול אל מתחת לעומק הגלים והסערות.

על מנת להתמודד עם אתגרים של ים פתוח כמו כרישים וטורפים אחרים שמנסים לחדור לכלובי דגים, ניתן לבצע סניטציה (פינוי דגים מתים) בתדירות גבוהה ולהשתמש ברשתות מחוזקות, מה שגם מפחית את הסיכוי לבריחת דגים.

חקלאות ימית בישראל - בתחילת שנות התשעים החלה ממשלת ישראל להפנות משאבים להאצת פיתוח החקלאות הימית וגוף המים הנבחר היה מפרץ אילת, המוגן יחסית מסערות. המחקר והפיתוח המואצים הביאו לייסוד שתי חוות גדולות של כלובים צפים באילת שייצרו בשנות השיא שלהן כ-2,500 טון של דגים, בעיקר ממין אחד - הדניס (*Sparus aurata*), או בשמו העברי ספרוס זהוב. עם זאת, חומרי הדשן שהשתחררו מהכלובים גרמו ל'אזור מת' מתחתיהם ונטען על ידי מדענים וארגוני סביבה כי הם פוגעים גם בשוניות האלמוגים הרגישות שבמפרץ. מפרץ אילת הוא קטן וכושר הנשיאה האקולוגי שלו (יכולת המערכת האקולוגית לפרק ולמחזר את חומרי הדשן הנפלטים מהכלובים) נמצא על ידי ועדת מומחים בינלאומית כמוגבל. לאחר מאבק ציבורי עז שהיה הוויכוח הסביבתי הגדול ביותר בישראל בזמנו, הוחלט על הוצאת הכלובים מאילת והעברתם לים התיכון.

חקלאות ימית משולבת

בגידול דגים בים, מזון עשיר ויקר מייצור תעשייתי משמש להאכלת הדגים בכלובים. שאריות מזון שלא נאכלות וכן הפרשות הדגים שוקעים ומתפזרים בים. בחקלאות ימית משולבת מגודלים לצד הדגים גם ספוגים, אצות או מינים בעלי ערך מסחרי אחרים שמסננים או משתמשים בהפרשות הדגים לגדילה וכך נוצר רווח כפול מהשימוש בחומרי המזון, והם אינם מזהמים את הסביבה הימית.

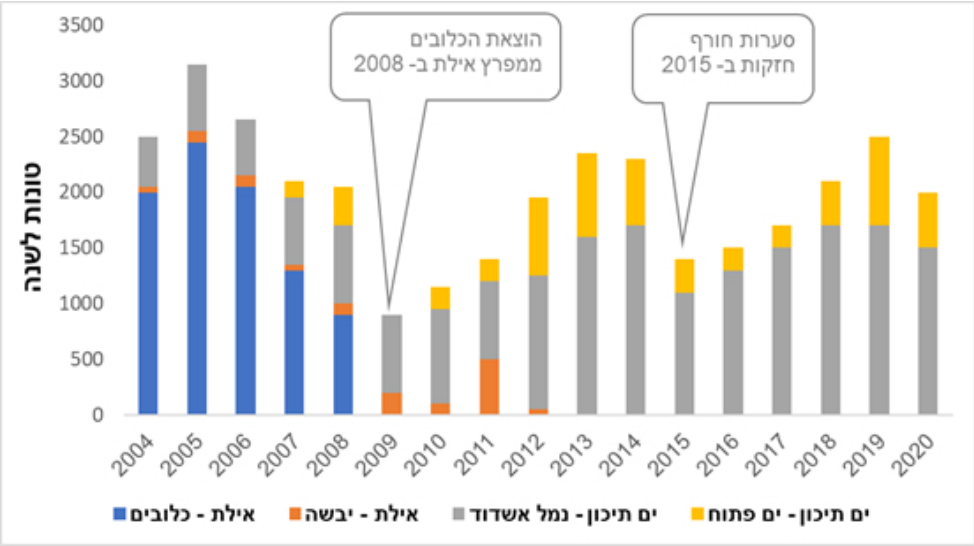
כיום נותר באילת פיילוט קטן לגידול דגים ביבשה בלבד, בו מגודלים הדגים בבריכות בעזרת מים שנשאבים מהים וקיימת שליטה מלאה על הפלט והפרשות הדגים ממנו, כך שלא נובע ממנו סיכון לאקולוגיה של המפרץ. מאחר ובחופי הים התיכון הישראלי לא קיימים מפרצים מוגנים מסערות בשטח מספיק לגידול דגים, החוות הועברו בשנת 2008 לנמל אשדוד, המוגן בשובר גלים (איור 11).

בנוסף, קיימות בים התיכון שתי חוות ים פתוח של כלובים ברי-שיקוע (בעלי יכולת צלילה): מול אשדוד בעומק 40-60 מ' ומול מכמורת בעומק 20-30 מ'. כמו כן מגדלים בישראל אצות ביבשה במים שנשאבים מהים (במכמורת, בראש הנקרה ובחבל אילות) וגם דגי נוי. כיום מתוכננות לקום חוות חקלאות ימית על שטח גדול בים התיכון, כאלו שיספקו את מרבית צריכת הדגים במדינה בשנים הקרובות.

דיג מול חקלאות

אם קיימת האופציה של חקלאות, מדוע אנחנו ממשיכים לדוג? ובכן, הדיג הימי עדיין מהווה את המקור העיקרי והמתחדש לחלבון מן החי עבור למעלה ממיליארד בני אדם בעולם, מרביתם במדינות מתפתחות. מרביתם שייכים לשכבות מוחלשות באוכלוסייה. הדיג הוא מקור תעסוקה ופרנסה לעשרות מיליונים ומהווה גם תחביב וחיבור לטבע שתורם לבריאות הגוף והנפש של עשרות מיליוני דייגים חובבים. מספר העוסקים בדיג גבוה בהרבה ממספר העוסקים בחקלאות ימית וקשה יהיה להסב דייגים לחקלאות עקב האופי השונה של כל כך של הדרישות בכל מקצוע כזה. עבור דייגים רבים הדיג מהווה דרך חיים, שכן דיג הוא יותר מעיסוק ופרנסה. הדיג הוא מסורת, הוא תרבות ולעתים הוא אפילו בריחה מהיבשה עבור אלו שזקוקים לכך. בנוסף, חיי הדג באוקיינוס ובריאותו טובים בהרבה מחייו של הדג הגדל בכלוב. על כן סביר שבעתיד החקלאות תמשיך לגדול לצד הדיג ולא תחליף אותו לחלוטין.

איור 11. ייצור דגים בחקלאות ימית בישראל



מקור: עד 2014 נתונים רשמיים של משרד החקלאות. החל מ-2015 - הערכת המחבר מבוססת על ראיונות.

9.3 אנרגיה מן הים

פחמימנים (הידרוקרבונים) - נפט וגז טבעי

פחמימנים הינם תרכובות אורגניות (שמקורן מן החי) המורכבות מפחמן ומימן. דלקים פוסיליים (שמקורם ממאובנים) אלו הצטרפו לפחם והניעו את העולם שאנו מכירים במהלך המאה העשרים ועדיין מניעים את רובו כיום, אם כי חלקם בסל מקורות האנרגיה העולמי נמצא בירידה, ועל כך בהמשך. בניגוד לפחם, שמקורו בצמחייה יבשתית, מקורם של הפחמימנים הימיים (נפט וגז) הינו בשרידי יצורים ימיים, כנראה בעיקר פלנקטון ואצות, שהצטברו ונקברו בקרקעית האוקיינוסים במשך מאות מיליוני שנים. בהיעדר חמצן, הפכו אותם יצורים ימיים זעירים תחת חום ולחץ רב לנפט ולגז טבעי, שחלחלו דרך שכבות סלע נקבוביות עד שנתקלו בשכבה עוצרת והצטברו מעליה. בדרך כלל נמצאים מאגרי הנפט מתחת למאגרי הגז, שמבקש לפרוץ למעלה ומוגבל על ידי שכבה חוסמת מעליו. עם העלייה העולמית בצריכת דלקים החלו בצפון אמריקה לפני כמאה שנים קידוחים בים (בעיקר בקליפורניה ובמפרץ מקסיקו) להוצאת הפחמימנים. בחמישים השנים האחרונות הלכו והעמיקו הקידוחים ממדף היבשת גם אל הים העמוק והתפשטו ממפרץ מקסיקו בארה"ב והים הצפוני שבין נורבגיה לבריטניה, למפרץ הפרסי, למדרון היבשת בברזיל, למזרח אסיה ולאחרונה גם לים התיכון. בישראל נמצאו מרבצי גז טבעי (מתאן) משמעותיים בשנים 1999, 2000 ו- 2010, והוא משמש כיום כמקור אנרגיה עיקרי במשק הישראלי.

תהליך ייצור האנרגיה כולל בתחילה חיפושים שמתבצעים על ידי סקר סייסמי: ספינה שגוררת תותחי אוויר יורה גלי קול שחודרים לתת הקרקע ואז חוזרים אל מקלטים בספינה. גיאולוגים מפענחים את האותות האלו ויוצרים מפה תלת ממדית של תת הקרקע כדי לאתר בה מבנים שעשויים להכיל מאגרי פחמימנים. לאחר איתור המבנים מגיעה לאתר אסדה שקודחת בורות עמוקים אל תת הקרקע ותכולת הפחמימנים בכל מאגר מוערכת. בשלב הבא מחוברים הבורות הפעילים במאגרים (בארות) לצנרת הולכה ומגיעים למתקן טיפול, שיכול להימצא ביבשה או על אסדה נוספת בים, שם מופרדים הנוזלים מהגזים וחומרים שונים מופרדים מהתמיסה הגולמית שיוצאת מהבאר. אסדת לוויתן לדוגמא הינה מתקן טיפול כזה שהקמתו גררה ויכוח ציבורי סביבתי חסר תקדים בהיקפו בישראל. ממתקן הטיפול בדרך כלל מוזרמים הפחמימנים למערכות הולכה בצנרת או אף למכליות גדולות, שמביאות אותם לבתי זיקוק לתהליכי ייצור של מוצרים סופיים כמו סוגי הדלקים המותאמים לשימוש בתחבורה, הסקה, תעשייה ועוד.

פחמימנים והסביבה הימית - נפט וגז נפלטים מתת הקרקע אל הים כל העת ומתפרקים בה באופן טבעי, אבל לפליטות האלו השפעה מועטה בלבד על מערכות אקולוגיות, כי הן מפוזרות על שטח עצום. לעומתם, להוצאה ושימוש בדלקים פחמימנים על ידי בני אדם מספר השפעות משמעותיות על הסביבה הימית שהעיקריות בהן כוללות:

1. בשלב הראשון, שלב החיפושים והסקר הסייסמי, גלי הקול שיורים תותחי האוויר גורמים לפגיעות הדף בחי הימי, בעיקר בחיות שיש בגופן חללי אוויר כמו יונקים ימיים וצבי ים.

סקר סייסמי תת ימי

סקר שמטרתו מיפוי תת הקרקע הימית. במהלכו גוררת ספינה מיוחדת כבלים ארוכים ועליהם תותחי אוויר שמייצרים פיצוצים שגלי הקול שלהם חודרים לתת הקרקע ואז חוזרים אל מקלטים בספינה. גיאולוגים מפענחים את האותות האלו ויוצרים מפה תלת ממדית של תת הקרקע.

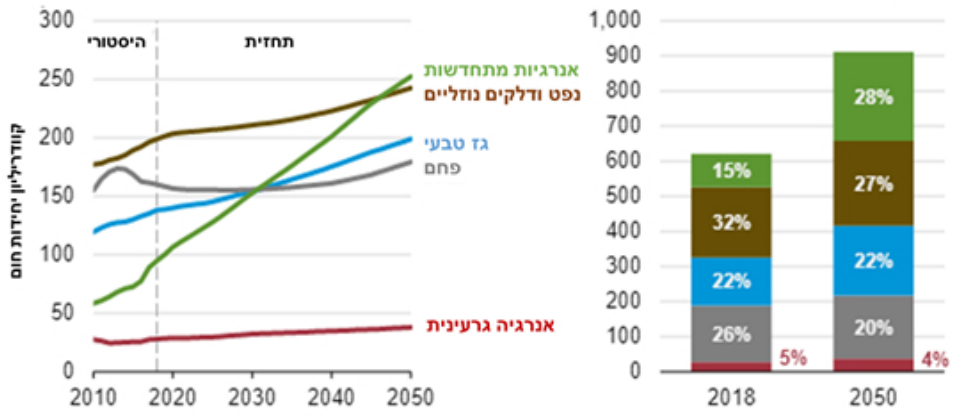
2. בשלב השני, שלב הקידוח, מוצבת באתר אסדה שקודחת לתת הקרקע. חומרים כגון בוצת קידוח (חומר שמנוני שמשמש לסיכה וקירור ראש המקדח) וכן מטחן (החומר דמוי החצץ המוצא מן הבור) מתפזרים בשלב זה על הקרקעית בשטח שסביב הקידוח וגורמים לקבורה וחנק של החי הימי באזור.
3. בשלב ההפקה מוצבת אסדת הפקה מעל הקידוח או במיקום אחר והפחמימנים מוזרמים אליה ומטופלים בה. טיפול כזה עשוי להתבצע בים או ביבשה, והתוצרים עשויים להיות מוזרמים לחוף או לאונייה על פי הבאר בלב ים. בשלב זה נפלטים לסביבה הימית מי מוצר - מים מעורבים בפחמימנים וחומרים אחרים שעשויה להיות להם רעילות לחי הימי. אסדות כאלו יגרמו גם לעלייה בזיהום האוויר. בנוסף, למבנים עצמם השפעה נופית מעל פני המים ומשנה את הטבע על ידי הוספת מצע קשה מתחתיהם (לטוב או לרע). כל שלוש ההשפעות שתוארו עד כה הינן השפעות בשגרה שהן יחסית מקומיות ודומות בין מאגרי גז ונפט, אבל "שובר השוויון" בעל פוטנציאל הזיהום הגדול ביותר הינה דליפת נפט גדולה - השפעה בחירום, שעלולה להיגרם במקרה של תקלה בתפעול מאגרי נפט ועלולה לגרום לאסון סביבתי אדיר. השפעה כזו הינה פחותה בהרבה במקרה של מאגרי גז.

דליפת נפט בכמות גדולה תגרום לאסון אקולוגי רחב היקף שתוצאותיו עלולות לגרום להרעלה והרג נרחב של החי והצומח בים ולציפוי חופים בשכבת נפט שמנונית גם במרחק של עשרות ואף מאות קילומטרים ממקור הדליפה. מנזקים כאלו ייקח למערכת האקולוגית בדרך כלל עשרות שנים להתאושש ולעתים גם אז היא לא תשוב לקדמותה. אמנם שפכי נפט מאסדות וקידוחים נפוצים הרבה פחות מאשר מקרים של שפכים כתוצאה מתאונות שיט של מכליות נפט, אבל חלק מהאסונות הגדולים ביותר שאירעו בזמן האחרון (למשל דליפת הנפט מאסדת Deepwater Horizon במפרץ מקסיקו בשנת 2010) קרו בעת קידוחי נפט בים העמוק (איור 12).

איור 12

הפיצוץ של אסדת הקידוח Deepwater Horizon בקידוח מקונדו של חברת BP גרם לדליפת הנפט הגדולה בהיסטוריה. הנפט נשפך אל מי מפרץ מקסיקו וגרם לפגיעה ארוכת טווח בחי והצומח הימי ברדיוס עצום

איור 13. מצב קיים ותחזית צריכת אנרגיה עולמית על פי מקורות האנרגיה, בשנים 2010-2050



מקור: U.S. Energy Information Administration, International Energy Outlook 2019 Reference

מעבר לכל הנזקים שתוארו כאן, לעצם השימוש בדלקים מבוססי פחמן, בין אם מקורם בים ובין אם ביבשה, יש עלויות נוספות בדמות זיהום אוויר ושינוי האקלים. שריפת פחמימנים גורמת לעלייה בכמות גזי החממה באטמוספירה ובכך תורמת להתחממות כדור הארץ והאוקיינוסים, ל[החמצת מי הים](), הפוגעת באלמוגים ויצורים אחרים שמשקיעים שלד גירני, לעליית המפלס של מי הים ולשלל השפעות נלוות. מאחר וגז טבעי הינו בעל השפעה פחותה מאשר פחמן ונפט מבחינת פליטת גזי חממה בשריפתו, נהוג לומר עליו שהוא מהווה אנרגיית מעבר מהפחם והנפט ששימשו אותנו עד כה. אבל מעבר למה? בהמשך נסקור אנרגיות ממקורות מתחדשים בים, כאלו שאליהם שואף המין האנושי לעבור לשם הפחתת טביעת הרגל האקולוגית שלנו על כדה"א בכלל והאוקיינוסים בפרט והגברת הקיימות שלנו בטווח הארוך.

הערכה של משרד האנרגיה האמריקאי משנת 2019 (איור 13) צופה עד שנת 2050 גידול של 13% באנרגיות הירוקות על חשבון הפחם והנפט, לעומת עליה של 50% בכלל הצריכה. אין ספק שמעבר לאנרגיות מתחדשות ייקח זמן ומשאבים רבים, אבל כבר כיום אנו רואים כי המעבר הזה הוא לא רק נכון, אלא בלתי נמנע.

אנרגיה ממקורות מתחדשים

אנרגיה הינה כוח לביצוע עבודה. [מקור הכח הזה עשוי להיות מגוון]() כמו גם סוג העבודה שהכוח נדרש לבצע. כיום השימוש העיקרי באנרגיה הוא הפיכת אנרגיה קינטית (תנועת רוח או מים) או אנרגיה תרמית (חום) לאנרגיית חשמל, על ידי סיבוב טורבינה. בים ישנם מספר מקורות אנרגיה דומים לאלו שיש ביבשה, אך לכל אחד מהם טוויסט ימי ייחודי משלו בדרך שבה הוא מביא לסיבוב אותה טורבינה. בנוסף קיימות בים גם צורות אנרגיה שאין למצוא ביבשה (למשל אנרגיית גלים). כמובן שגם רתימת אנרגיות מתחדשות אינה נטולת השפעה סביבתית, לדוגמה טורבינות רוח עלולות לגרום להרג עופות ים ולייצור ומחזור של פאנלים סולאריים מחיר סביבתי ניכר. עם זאת, ברור שטביעת הרגל האקולוגית שלהם

החמצת מי הים

אחד משינויי האקלים המשמעותיים ביותר שמתרחשים עקב פליטת גזי חממה לאטמוספירה היא החמצת מי הים. העלייה ברמות הפד"ח (CO_2) באטמוספירה משפיעה מאד על האוקיאנוסים שסופחים את הפד"ח ממנה. בתגובה, רמות ההגבה של מי הים (pH) יורדות ושלל תהליכים ביולוגים חשובים נפגעים. לדוגמא כמות יוני הקרבונט במערכת פוחתת וכך נפגע ייצור קלציום קרבונט - תרכובת הכרחית ליצירת שלד של בעלי חיים ימיים רבים מחלזונות עד אלמוגים.

מבחינת זיהום אוויר והשפעה על שינויי אקלים הינה קטנה משל דלקים פחמימנים. מקורות האנרגיה המתחדשת העיקריים בים כוללים את הצורות הבאות:

אנרגיית רוח - הרעיון של שימוש ברוח לייצור אנרגיה אינו חדש, אבל בעשורים האחרונים ובמיוחד מאז התגלתה השפעת שריפת דלקים פחמימניים על האקלים תפס תחום אנרגיית הרוח תאוצה אדירה. הרוח הנושבת מעל הים עשויה להגיע למהירויות גבוהות יותר שכן החיכוך עם פני הקרקע נמוך יותר בהיעדר מכשולים (איור 14). בים ניתן להציב טורבינות רוח גבוהות (מעל פני הקרקע/מים) מאלו שניתן להציב ביבשה, וכך קוטר הלהבים בהן יכול להיות גדול יותר וניתן לקצור בהם יותר רוח חזקה יותר ולהרוויח יותר אנרגיה. את הטורבינות בדרך כלל נועצים בקרקעית הים (עד עומק 50 מ'), אבל ישנן כיום אפילו חוות של טורבינות ענק צפות עבור פרישה בעומקים גדולים יותר.

הרוחות החזקות בכדור הארץ נמצאות בעיקר בקווי רוחב גבוהים - מעל 40° צפון או דרום, זאת אומרת שבקנדה, נורבגיה, ארגנטינה דרום אפריקה או ניו-זילנד למשל, הפוטנציאל של אנרגיית הרוח בים גבוה בהרבה מאשר במקסיקו, הודו או ישראל. כיום קיימות חוות רוח גדולות בים בעיקר בים הצפוני, שבצפון מערב אירופה, וגרמניה ואנגליה מהוות כשני שליש מכלל הייצור של אנרגיית רוח בים. חוות גדולות נוספות מתוכננות לקום גם בטאיוואן וארצות נוספות.

אנגריה סולארית - יחד עם אנרגיית רוח, אנרגיה סולארית צפויה להוביל את הגידול באספקת האנרגיה המתחדשת בכדה"א. בים קיימים שטחים נרחבים בהרבה מאשר ביבשה, שבה נדל"ן הינו יקר ערך. יחד עם זאת, שלא כמו באגמים וגופי מים ביבשה, מרבית הים הוא עמוק מאד ונתון לסערות חזקות ועל כן נדרשת הקמת מבנים גדולים ועמידים בכדי להקים עליהם חוות סולאריות, בין אם הם מעוגנים לקרקעית ובין אם הם צפים.

איור 14

חוות טורבינות הרוח, London Array מהגדולות בעולם, נחנכה מול שפך נהר התמזה לתעלת למאנש בשנת 2013 בעומק מים של עד 25 מ'. גובה המרכז של כל טורבינה מעל פני הים הוא 87 מטרים וקוטר הלהבים 120 מטרים

בנוסף, הצטברות מלח עלולה לפגוע ביעילות ועמידות הפאנלים הסולארים ומתקני ההולכה. לכן אנרגיית השמש בים קשה ליישום ונמצאת בחיתוליה ביחס לרתימת אנרגיית הרוח. רעיון נוסף לשימוש באנרגיה סולארית (ואף אנרגיית רוח) הוא להנעת אוניות משא.

אנרגיה גיאותרמית - שיטה זו עוסקת בשאיבת מים חמים או קרים מתת הקרקע והזרמתם למפעל בו מים חמים ישמשו ליצירת קיטור שיניע טורבינה ומים קרים יכולים לשמש למערכות קירור. הרווח האנרגטי במערכות אלו מגיע מהחלפת החום. בים השיטה הזו פועלת בעיקר בכיוון של קירור (שאיבת מי עומק קרים למטרות מיזוג וקירור) ופחות משאיבת מים חמים מתת הקרקע להפקת אנרגיה כפי שקורה ביבשה.

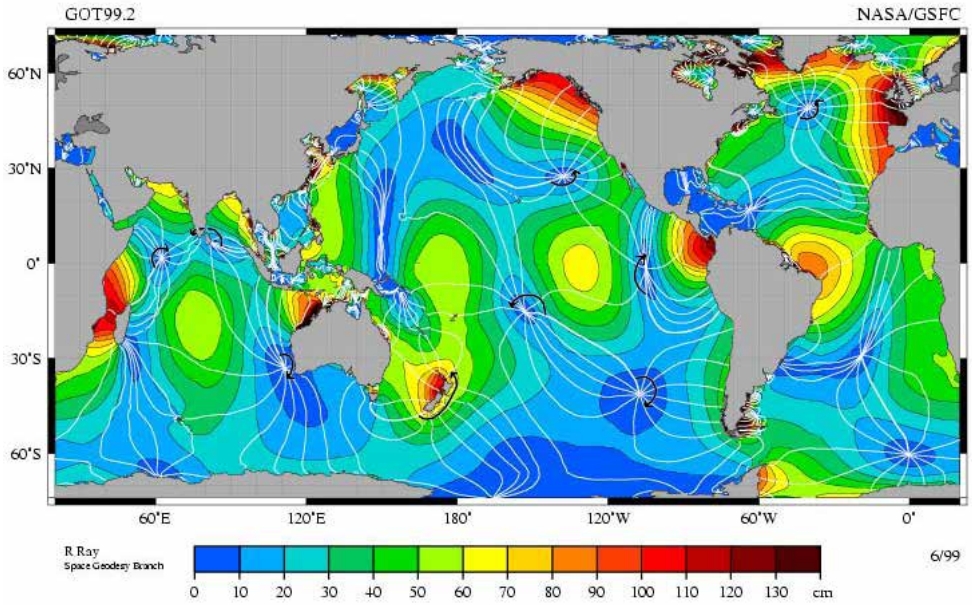
אנרגיה הידרואלקטרית - זוהי הפקת אנרגיה מתנועת המים עצמם. בעוד ביבשה מדובר בעיקר בהזרמת מים ממקום גבוה למקום נמוך, בדרך כלל בסכרים, בים ברור שרק מספר מועט של מקומות יוצאי דופן נמצאים מתחת לפני הים (לדוגמא ים המלח), ולכן המים שיניעו את הטורבינות ההידרואלקטריות בים לא ינועו מלמעלה למטה אלא במאוזן. בים קיימים זרמים קבועים חזקים מאד באזורים שונים, למשל באזורי גאות ושפל, וניתן לנצל את הזרמים להפקת אנרגיה. כמו כן ניתן לנצל אנרגיית גלים בדרכים שונות, במרביתן תנועת הגלים למעלה ולמטה מפעילה בוכנות שנעות למעלה ולמטה לשם ייצור חשמל. שני סוגי ההפקה העיקריים האלו, זרמים וגלים, הינם כר נרחב למחקר ופיתוח:

- **אנרגיית זרמי הים** - זרמי המים באוקיינוסים נושאים עמם אנרגיה רבה, שדי בקמצוץ ממנה בכדי לספק את כל צרכי האדם. הטכנולוגיה המודרנית לניצולם היא בעיקרה פיתוח של טורבינות הרוח המוכרות מהיבשה. זרמי האוקיינוס הקבועים מונעים על ידי מספר כוחות - הרוחות (שיוצרת בעיקר השמש) וכן סיבוב כדור הארץ, הבדלי מליחות וטמפרטורה, צורת האוקיינוס והחוף הם בין הגורמים המעצבים אותם. רתימת זרמים באוקיינוסים הינה מאתגרת במיוחד שכן הים הינו סביבת עבודה קשוחה. סערות, מליחות והזרמים עצמם מצריכים מבנים חזקים, אמינים ועמידים שבהם כמה שפחות חלקים נעים.
- **אנרגיית גלים** - סוג נוסף של אנרגיה, שקיים בפני השטח של הים, הוא אנרגיית הגלים. גלי הרוח, הגלים שאנו מכירים טוב כל כך מהחוף, הינם תוצר של רוחות שמקבלות את האנרגיה שלהן מהשמש. כמו הזרמים, גם מיקום הגלים החזקים ביותר נגזר מהמיקום שלהם ביחס למערכות מזג האוויר הגדולות באוקיינוס ושל ה**בתימטריה** (הצורה של קרקעית הים). בניגוד לזרמים ולרוח, גלים אינם מעבר של חומר, אלא מעבר של אנרגיה בלבד. בלב הים, הגלים הינם מהירים ונמוכים, אך כשהם מתקרבים לחוף, הם מאטים ומתגבהים. למעשה הם ממירים את האנרגיה הקינטית שלהם (מהירות) באנרגיה פוטנציאלית (גובה), ואת האנרגיה הזו אנו יכולים לנצל במגוון דרכים. בשל מגוון סיבות, אנרגיה זו נחשבת לפחות יעילה ויקרה להפקה מבין הדרכים להפיק אנרגיה מהים. כיום אין עדיין חוות מסחריות מלאות להפקת אנרגיה בשיטה זו, אך מיזמים רבים, כולל בישראל, מנסים לפתור את הבעיות בדרכים יצירתיות ולגוון עוד יותר את סל מקורות האנרגיה המתחדשת.

בתימטריה

מיפוי קרקעית הים. מבוצע בדרך כלל באמצעים אקוסטיים (גלי קול) במכשיר הנקרא מד-הד (אקוסאונדר) השולח אלומות קול אל הקרקעית וקולט אותן בחזרה. מפות טופוגרפיות כאלו של קרקעית הים מכילות קווי עומק בדומה לקווי הגובה המוצגים ביבשה. מיפוי ברזולוציה גבוהה של המים הריבוניים והכלכליים של ישראל בים התיכון בוצע לאחרונה בעזרת מד הד רב אלומתי (מולטי-בים אקוסאונדר) על ידי משרד האנרגיה והמשרד להגנת הסביבה בשיתוף המכון לחקר ימים ואגמים. מפות בתימטריות כאלו מאפשרות לנו כיום לראשונה לזהות ולמפות בקרקעית הים משאבים שונים, כולל בתי הגידול השונים (קרקעית קשה מול מצע רך).

איור 15. זרמי הגאות העיקריים באוקיינוסים לפי גובה גאות בס"מ ונקודות מרכזיות



מקור: R. Ray, NASA

- אנרגיית גלים מופקת גם מגלי גאות ושפל אשר יוצרים זרמים חזקים בשולי האוקיינוסים, בעיקר בכניסות למפרצים ובין איים, שם הם מחליפים כיוון בכל שש שעות. תנועת הירח והשמש סביב כדור הארץ מניעה גלי גאות אדירים על פני האוקיאנוסים והימים. גלים אלו מייצרים זרמים חזקים וקבועים הנמצאים בעיקר באזורים הרדודים בשולי האוקיאנוסים ושם ניתן לנצלם (איור 15).

חוות גדולות שמנצלות את זרמי הגאות נמצאות כיום בצרפת ובדרום קוריאה וחוות גדולות נוספות מתוכננות באנגליה וברוסיה.

9.4 מחצבים בקרקעית הים - מתכות ומינרלים

בקרקעית האוקיינוס קיימים אזורים, בעיקר ליד הרי געש תת ימיים, בהם קרום כדור הארץ עשוי להיות דק או סדוק, ודרכו נובעים מים גופרתיים רותחים ועשירים במינרלים. אזורים אלו נקראים נביעות הידרותרמיות והם נמצאים בדרך כלל בעומקים שבין 1,700 ל-3,400 מטרים. במגע עם מי הים הקרים, שוקעים המינרלים מהנביעות אל הקרקעית שסביב הנביעה ומצטברים עליה כקרום עשיר במתכות שונות.

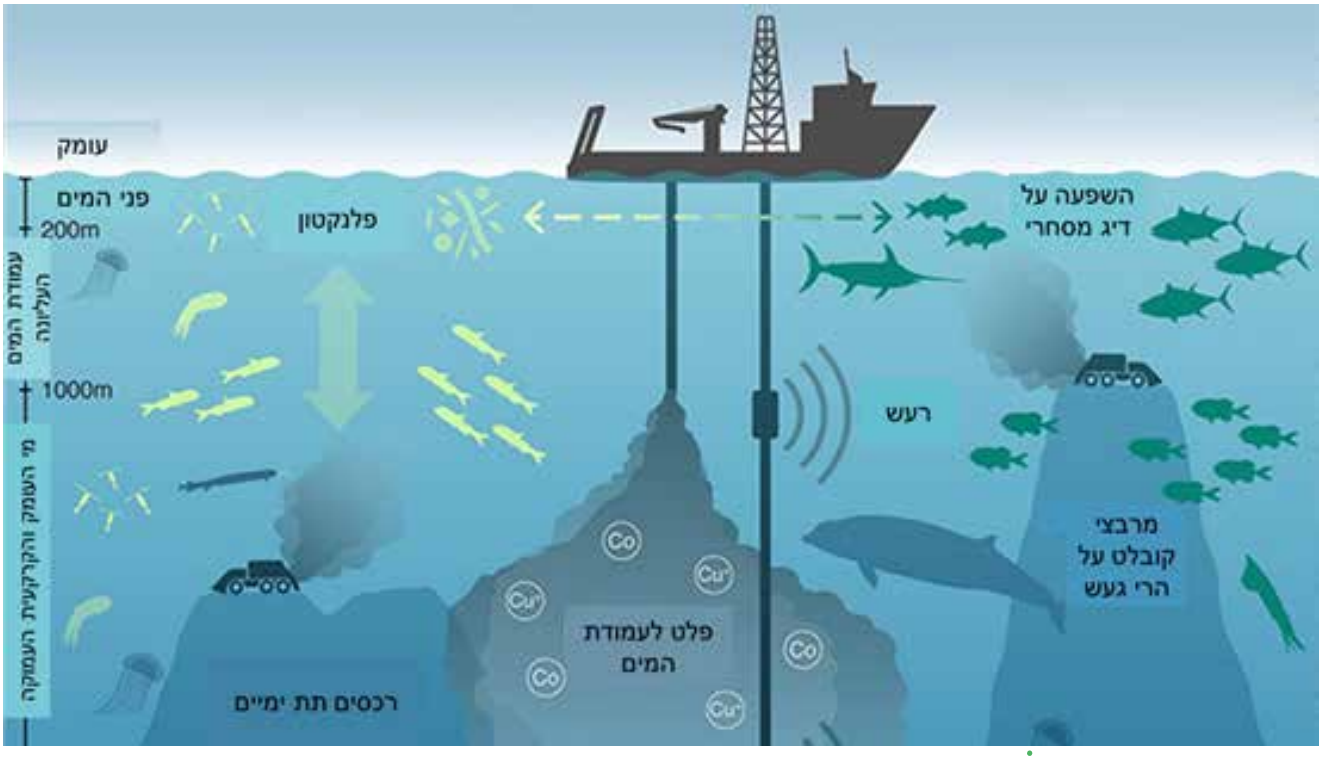
העפרות העשירות האלו עשויות להכיל ריכוזים גבוהים של כסף, זהב, נחושת, מנגן קובלט ואבץ - כולן מתכות בעלות ערך רב לאדם בתהליכי ייצור שונים. כיום מנצלים אותן בעיקר על ידי כריה בעזרת דליים או משאבות הידראוליות שמעלים את העפרות לפני המים להפרדה ועיבוד, אבל מכונות חדשות לכרייה מפותחות כל העת (איור 16).

כמו כן, על פני חלק מהמישורים העמוקים של האוקיינוסים נמצאו בעשורים האחרונים מספר שדות נרחבים של פקעיות (nodules) ובהן ריכוז גבוה מאד של נחושת, מנגן, ניקל וטיטניום. אלו מעין כדורים בגדלים שבין מילימטרים בודדים ועד לגודל כדורעף שאיסופם מהקרקעית אמור להיות יחסית פשוט. אמנם טרם בוצעה כרייה בקנה מידה גדול שלהם והעומק הוא עדיין גורם מגביל עקב עלויות הכרייה הגבוהות, אך הוכח כבר שברגע שבו קיימת היתכנות כלכלית, אפילו עתידית, ממהרים בני האדם לנצל את המשאבים. אכן, זיכיונות כרייה בקרקעית האוקיינוסים מחולקים בימים אלו לחברות שונות וביפן הוחל בשנת 2017 במהלך הכרייה המסחרי הראשון בעולם, בו נכרו אבץ, זהב, נחושת ועופרת מעומק של 1,600 מ' באזור געשי בשם תעלת אוקינאווה.

השפעות סביבתיות של כריית מינרלי מן הקרקעית יכללו, כמעט בהכרח, פגיעה מקומית קשה בחי על הקרקעית. אזורי הנביעות מהווים בדרך כלל גם בתי גידול ייחודיים בהם מתפתחת מערכת אקולוגית עשירה של בעלי חיים שמבססים את חייהם על נוכחותם של חיידקים מחזרי גופרית. תולעי ענק, סרטנים וצדפות משלבים בגופם את החיידקים האלו להפיכת המינרלים הנפלטים בנביעות לאנרגיה, ואפילו דגי גרם וכרישים מוצאים באזורים הקיצוניים האלו

איור 16

מכונות לכריית מינרלים מהים העמוק.
Nautilus Minerals



איור 17

השפעות כריה תת ימית על הסביבה הימית.

Drazen et al. 2020

סביבה שמתאימה לחיים. חשוב לציין שבעומק הים קצב החיים האיטי הנובע מסביבת החיים העוינת (קור, חושך ולחץ קיצוניים) מכתיב קצב התאוששות איטי במיוחד מהפרעות חיצוניות.

בתהליך הכרייה מעלים את המינרלים יחד עם כל החומר הנחצב על סיפון האוניות הכורות לשם סינון שלהם, ואז מוזרם הפלט בחזרה לים. בכך נפגע גם החי והצומח בכל עמודת המים שמעל לשטח הכרייה מעכירות ואף רעילות של הפלט, מה שעלול לפגוע גם בדגה. פתרון אחד לבעיה זו הינו להשיב את כל הפלט לקרקעית בצינור, כך שלפחות ייחסכו הנזקים מעמודת המים העליונה. בישראל לא ידוע על קיום משאבים לכרייה תת ימית ואין בים שלנו נביעות הידרותרמיות. אמנם יש אצלנו נביעות מתאן קרות מעל למאגרי הגז וקיימים מעט חיים בים העמוק כגון אלמוגי עומק פזורים, אבל מלבד קידוחי גז ונפט, לא צפויה בים שלנו פעילות חציבה או כריה.

9.5 התפלת מי ים

התפלת מי ים כרוכה בהוצאת המלח מהמים לשם הפיכתם לראויים לשתייה. את הוצאת המינרלים והמלחים ממי-הים ניתן לבצע בשתי שיטות עיקריות:

1. **זיקוק\אידוי** - שיטה מתבססת על ההבדלים בנקודת הרתיחה בין המים לבין המלחים המומסים בתוכם: מחממים את מי הים עד לרתיחה ואידוי המים בעוד המלחים נשארים. את אדי המים מצננים והם מתעבים למים מזוקקים ללא מלחים. שיטת הזיקוק דורשת אנרגיה להרתחת המים ולהפיכתם לאדים, אך ניתן לייעל את התהליך ולחסוך באנרגיה על ידי ניצול החום המשתחרר בזמן עיבוי האדים לחימום התמיסה המקורית בשיטה הנקראת זיקוק רב שלבי. חיסכון נוסף מושג כאשר משלבים את מתקן ההתפלה בתחנת כוח כמקור של אנרגיית חום. מתקן התפלה בשיטת הזיקוק הוקם באילת בצמוד לתחנת כוח כבר בשנות הששים.

2. **אוסמוזה הפוכה** - אוסמוזה היא מעבר (פעפוע) של חומרים מתמיסה אחת לאחרת דרך קרום חדיר למחצה. הקרום הבררני הזה מעביר רק מולקולות מסוג מסוים ואינו מעביר אחרות. באופן רגיל חומרים נעים מתמיסה לתמיסה בכיוון "מפל הריכוזים", כלומר מריכוז גבוה לריכוז נמוך. על פי חוקיות זו מים ינועו מתמיסה של מי שתייה אל מים מלוחים. כדי לגרום לתנועה בכיוון ההפוך, כלומר לגרום למולקולות המים ל"עזוב" את התמיסה בעלת ריכוז המלחים הגבוה לכיוון תמיסה בריכוז מלחים נמוך יותר, בשיטת האוסמוזה ההפוכה מופעל לחץ גבוה על תמיסת המים המלוחים, הנמצאים בצדו האחד של קרום חדיר למחצה. הלחץ גורם למים לעבור דרך הקרום אל הצד האחר שלו, והמלחים נותרים במקומם. כך המים המתוקים מצטברים מעבר לקרום הבררני והמלחים מסולקים. האנרגיה לתהליך זה מסופקת ממשאבות חשמליות. שיטה זאת היא השיטה המתקדמת והחסכונית ביותר ולכן הנפוצה ביותר להתפלת מי ים בעולם כיום (בשנת 2020 כשני שליש ממתקני ההתפלה בעולם מבוססים על אוסמוזה הפוכה ושליש הינם מבוססי אידוי). בשל השימוש הרב באנרגיה להתפלה, היא בדרך כלל יקרה בהרבה משימוש במים מתוקים שמקורם בנהרות או בקידוחים להוצאת מי תהום מאקוויפרים בתת הקרקע, אך אופציות אלו לא תמיד זמינות ולכן חלקה של ההתפלה באספקת מים מתוקים במקומות אלו, כמו בישראל, נמצא בעליה. במחקר אמריקאי חדש שהתפרסם לאחרונה בכתב העת המדעי היוקרתי Science, פיתחו החוקרים טכנולוגיה ייחודית שתוכל בעתיד לאפשר לייעל (ולהוזיל) את התהליך.

בשתי השיטות שתוארו כאן נעשה שימוש גם להתפלת מים מליחים (בעלי מליחות נמוכה ממי ים וגבוהה ממים מתוקים) שנשאבים מתת הקרקע ביבשה. בנוסף לשתי שיטות אלו ניתן להתפיל מים מליחים גם בשיטות ההקפאה והאלקטרודיאליזה (electrodialysis). **אלקטרודיאליזה** מבוססת על הזרמת מים מלוחים לתוך מערכת, שהותקנו בה אלקטרודות המופרדות על ידי קרומים חדירים למחצה. כאשר מפעילים את הזרם החשמלי היונים נודדים לאלקטרודות דרך הקרומים, בהתאם למטענם החשמלי. הקרומים אינם מאפשרים ליונים של המלחים לחזור אל התמיסה, וכך בתא המרכזי של המערכת נוצרת תמיסה, המכילה פחות מלחים. מתקן כזה להתפלת מים מליחים בשיטת האלקטרודיאליזה נמצא במשאבי שדה בנגב.

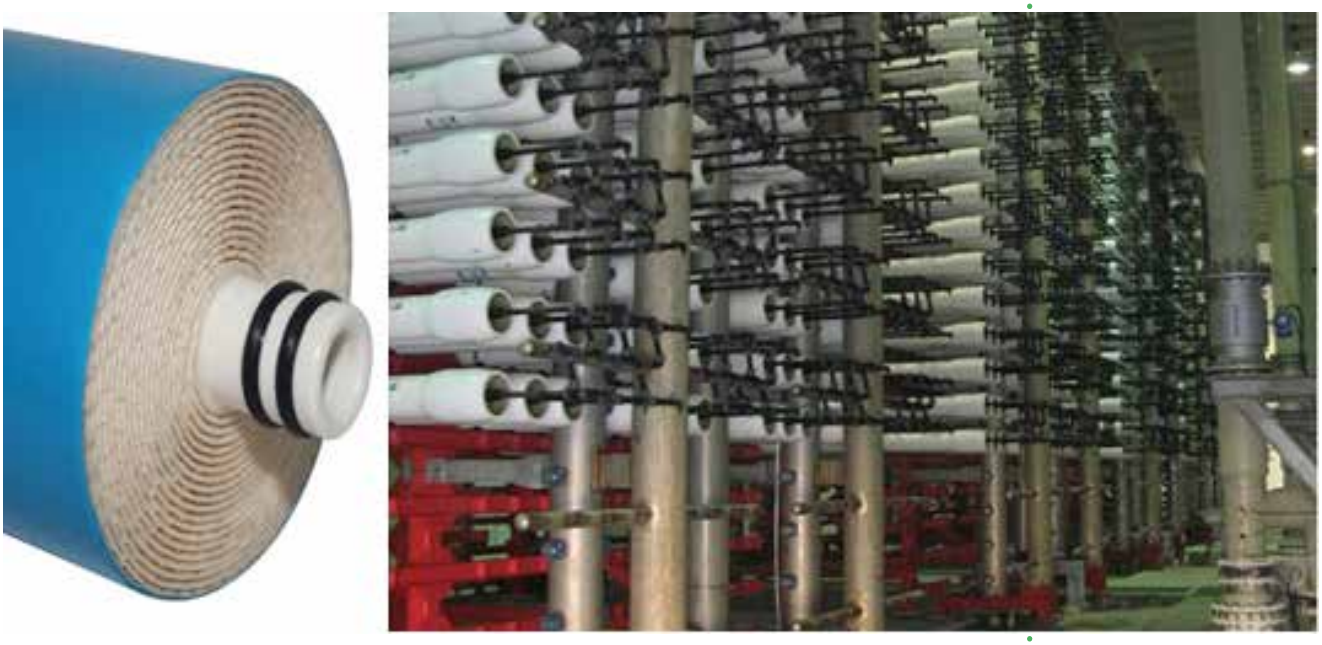
שיטת ההתפלה ב**הקפאה** מבוססת על תהליך הפוך משיטת הזיקוק: במקום לאדות את המים - מקפיאים אותם. כשם שמלחים נפרדים מאדי המים, כך הם מופרדים מגבישי הקרח, מכניסים מי ים מקוררים לתוך מיכל, שלחץ נמוך שורר בו, ומורידים את טמפרטורת המים עד שהם הופכים לגבישי קרח, במיכל אחר גבישי הקרח נשטפים, מובאים במגע עם אדים והופכים לנוזל. אחד מאבות שיטת ההקפאה היה המהנדס הישראלי אלכסנדר זרחין. מפעל שהקים פעל בשנות ה-60 באילת, אך נסגר עקב חוסר כדאיות כלכלית.

התפלת מים בעולם - בסך הכל מותפלים בעולם כ-140 מיליון מ"ק בכל יום, וכיום רק 1-2% מאוכלוסיית העולם מקבלת את מי השתיה שלה מהתפלה. עם זאת, בשנת 2025 הצפי הוא שכ-14% מבני האדם בעולמנו יחוו קשיים בהשגת מים שפירים לשתייה, ולכן חלקה של ההתפלה גדל בשנים האחרונות באופן מעריכי. בנוסף, במדינות חופיות בהן קצב גידול האוכלוסייה משיג במהירות את מצאי המים ומצבן הכלכלי מאפשר הקמת מפעלי התפלה גדולים (לדוגמה ערב הסעודית, איחוד האמירויות וישראל), מים מותפלים מהווים כבר כיום למעלה ממחצית המים הזמינים לצריכת האדם. מתקן ההתפלה הגדול ביותר בעולם נמצא בערב הסעודית והוא מתפיל במים בכמות של כמיליון וחצי מ"ק ביום. במדינות רבות נוספות יש מתקני התפלה גדולים - בסדר יורד אחרי סעודיה, גם איחוד האמירויות, כווית, ארה"ב, סין, ישראל, אוסטרליה, ספרד, הודו ואלג'יריה מתפילות מים בכמויות גדולות.

התפלה בישראל - את ממברנת ההתפלה הראשונה בעולם פיתח פרופ' סידני לואב ז"ל (שעבד באוניברסיטת בן גוריון בנגב) כבר ב-1965. למרות זאת, ולמרות הקמת מפעל ההתפלה הראשון באילת כבר ב-1967, רק בשני העשורים האחרונים החלה הקמה מאסיבית של מתקני התפלה, זאת בכדי לענות על הביקוש הגובר למים מתוקים. צריכת המים בישראל עלתה בעשורים האחרונים, בעיקר כתוצאה מהעלייה באוכלוסייה ובצריכה הביתית (הכפלה בצריכה הביתית

איור 18

מפעל התפלה בישראל: (מימין) **מים בלחץ גבוה מוזרקים לתוך צינורות ובתוכם ממברנות** (משמאל) **שמתפילות את המים בתהליך אוסמוזה הפוכה.**
(אתר רשות המים)



בשנים 1990-2020). בשנת 1999 החליטה הממשלה על הקמת סדרת מפעלי התפלה לאורך חופי הים התיכון באשקלון, אשדוד, פלמחים, שורק, חדרה, מעגן מיכאל ושבי ציון. כמות המים המותפלים מהים התיכון בישראל גדלה מ-0 בשנת 2000, לכ-300 מיליון מ"ק בשנת 2010 ועד כ-600 מיליון מ"ק בשנת 2020 (מ"ק = 1000 ליטר). הכמות הזאת שווה למעלה ממחצית מכמות המים לשימושים ביתיים וציבוריים בישראל (ללא חקלאות ותעשייה), ומאפשרת לנו לשאוב פחות מים מהכנרת וממי התהום, להעלות את המפלס שלהם ואף לשקם נחלים שיובשו עקב שאיבת יתר. עם זאת, גם תהליך ההתפלה הינו בעל טביעת רגל אקולוגית משמעותית. אמנם ההשפעות של הזרמת התמלחת לים בתהליך ההתפלה על החי הימי נראות מקומיות למדי (אם כי אינן ברורות לנו עדיין עד תומן), אך קיימות השפעות עקיפות, שכן התפלה הינו תהליך שצורך אנרגיה רבה ובכך הוא מעלה את פליטת גזי החממה באופן משמעותי ותורם לשינויי אקלים כגון התחממות כדה"א והחמצת האוקיינוסים.

התפלת מי ים הינה מאתגרת לא רק מבחינת ההשקעה האנרגטית. במי הים נמצאים שלבי חיים של יצורים רבים, מהם בעלי חיים ישיבים כגון צדפות, אצטלנים, בלוטי ים, ספוגים ואחרים שמצפים את צנרת ההתפלה מבפנים וסותמים אותה. תופעה דומה קורית גם כאשר שואבים מי ים למטרת קירור טורבינות בתחנות כוח. על מנת להתמודד עם **הצמדה** יש לבצע סינון רב בטיפול המקדים, שטיפות הפוכות בלחץ גבוה או שימוש בחומרים שונים, שלהם השפעה על הסביבה הימית. גם ל**תמלחת** עצמה (חצי מהמים הנשאבים נפלטים חזרה לים כשמליחותם כפולה) עלולות להיות השפעות שעדיין איננו מבינים מאחר והתפלה היא תעשייה חדשה יחסית. על כן גם בתעשיית ההתפלה חשוב לבצע ניטור מוסדר ומקיף של הסביבה הימית בקרבת המתקנים.

צמדה ימית (פאולינג)
בעלי חיים וצמחים ימיים רבים, ביניהם אצות, סרטנים, רכיכות ואצטלנים הינם בעלי שלבי חיים ישיבים (צמודי מצע). כאשר הם מתיישבים על גופי אוניות הם מגדילים את החיכוך שלהן עם מי הים וכך מאטים אותן. כשהם מתיישבים על מבנים צפים, הם מכבידים אותם ועלולים להשקיע אותם. כאשר הם מתיישבים על פנים צינורות יניקת מי ים הם סותמים אותם. יש מספר דרכים להתמודד עם התופעה, כולל למשל צביעה בצבעים נוגדי צמדה. בשל רעילותם הגבוהה של הצבעים הישנים פותחו לאחרונה צבעים חדשים שהנם ידידותיים יותר לסביבה הימית.

תמלחת
בתהליך ההתפלה מופרדים מי הים למים מתוקים שמוזרמים לצרכנים ולמים במליחות גבוהה שנקראים תמלחת. התמלחת מוזרמת בחזרה לים כשהמליחות בה בדרך כלל כפולה ממליחות מי הים הרגילה.

9.6 ביוטכנולוגיה ימית

ביוטכנולוגיה ימית הינה המדע של פיתוח הטכנולוגיה, השימושים, המידע והשירותים לאדם שנגזרים מהמגוון הביולוגי האדיר שיש למערכת האקולוגית הימית להציע. הצורה, המבנה, הפיזיולוגיה והכימיה של יצורים ימיים עשויים להיות שונים למדי מאלו שנמצאים על היבשה. עקב כך נודע להם פוטנציאל אדיר של העשרת הידע האנושי במגוון תחומים. חיקוי של הטבע ליצירת שיטות, תהליכים וחומרים חדשים לצד פיתוח השימוש בתהליכים הטבעיים עצמם מביאים תועלות מגוונות לאדם. מרבית המינים, בתי הגידול והמערכות האקולוגיות בים לא נחקרו עד תומם או לא נחקרו כלל. לכן פיצוח הפוטנציאל של מאגר הידע העצום הזה הנו אחד האתגרים הגדולים ביותר כיום לא רק בחקר הים, אלא גם בביוכימיה, רפואה, קוסמטיקה, אנרגיה, תזונה ותחומים נוספים. ביוטכנולוגיה ימית הינה תהליך של ייצור ידע והמרה שלו למסלולים של שימושים פרקטיים. החקר והרתימה של התרכובות והחומרים הימיים עשויים לתמוך במגוון שימושים חדשים לאדם, שחלקם אף רחוקים למדי מן הים. הנה מספר דוגמאות:

מזון - מוצרי מזון ורכיבי מזון שמקורם בים (אצות, חסרי חוליות ודגים):

- האצת ייצור בחקלאות ימית
- רכיבים מהים לשיפור איכות המזון
- שיטות שמבוססות על גנומיקה (גנים) או פרוטאומיקה (מבני חלבונים)

אנרגיה - מקורות ותהליכי אנרגיה מתחדשים שמופקים מאצות:

- מיקרו-אצות לייצור ביו-דלקים כגון אתנול או ביו-דיזל
- טכנולוגיה להאצת גידול ביומאסה של מיקרו-אצות

בריאות האדם ואיכות חיים - תרופות, טיפולים ומוצרי היגיינה וקוסמטיקה:

- חומרי טבע כתרופות מהים
- פרוטוקולים חדשניים לניסויים קליניים
- נשאי ומחדירי תרופות (ננו-מזרקים)
- סוגי אנטיביוטיקה חדשים
- תוספי תזונה לבני אדם ולבעלי חיים
- קוסמטיקה

סביבה - מנגנונים, יישומים וגישות ביוטכנולוגיות לפתרון בעיות סביבה:

- טכנולוגיות חישה - ביו-סנסורים (מיקרו-חיישנים סביבתיים)
- טכנולוגיות אנטי-פאולינג (למניעת והסרת צמדה ימית מכלי שיט ומערכות יניקת מי ים)
- כלים ושיטות באנליזה לשימושי תעשיה ומחקר
- מסננים ביולוגים לתהליכי טיפול בזיהומים

מוצרים תעשייתיים - מולקולות, תרכובות וחומרים שונים לשימושי תעשייה:

- ביו-פולימרים (תחליפי פלסטיק עמידים או מתכלים)
- חומרי טבע שונים
- חלבונים ימיים חדשים
- אנזימים ימיים חדשים

מקבלי החלטות מזהים ביוטכנולוגיה ימית כענף שמציע הזדמנויות ופוטנציאל צמיחה גבוה, וזה תואם את הדוגמה הכלכלית-חברתית הקפיטליסטית. המשמעות הינה שהתחום נמצא בצמיחה מהירה ושיותר ויותר משקיעים מהמרים על פתרונות מבוססי ים לאתגרים שהמין האנושי פוגש ולשווקים בהם הוא פועל. אחת הדוגמאות הבולטות לאיתור תרופות בים נמצאת אצל הספוגים - בעלי חיים עתיקים ומיוחדים שמספר המינים הגדול שלהם מאופיין במגוון גנטי ופונקציונאלי גבוה במיוחד. עד היום בודדו מספוגים כ-5,300 חומרים פעילים וכ-200 חומרים נוספים מדווחים מדי שנה. חומרים שונים שהופקו מספוגים נמצאו כיעילים בטיפול בסוגי סרטן כמו לוקמיה ולימפומה, באיידס, הרפס, זיהומי חיידקים, פטריות, נגיפים, פרוטוזואה ותולעים טפילות, דלקות, כשל חיסוני ומחלות של מערכת העצבים. תגליות חדשות של גני ספוגים ובהם עשרות מינים מול חופי ישראל (איור 19), מפיחות תקווה בחוקרים שגם אצלנו ניתן יהיה בעתיד לאתר חומרים כאלו.

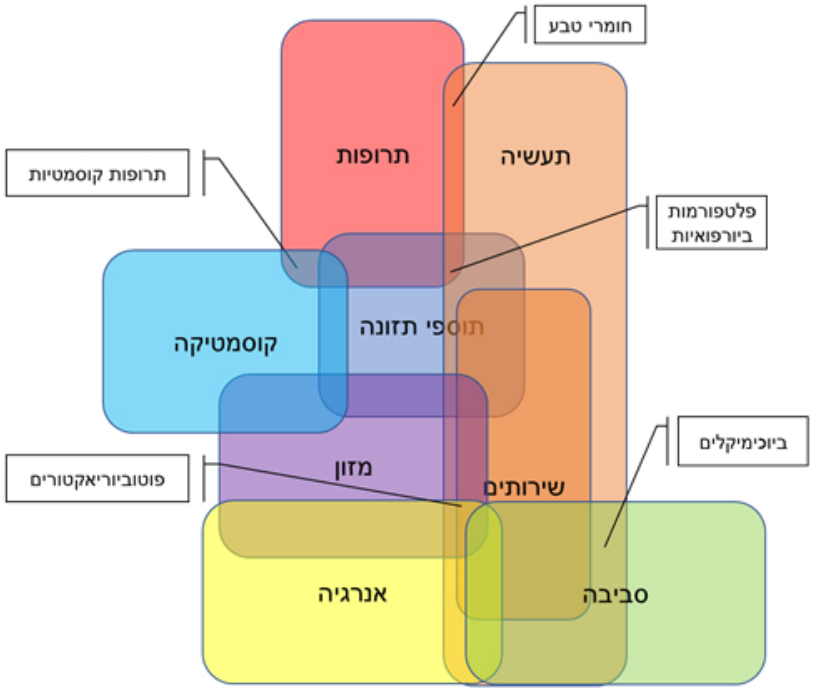
איור 19

גן הספוגים בראש הכרמל. צולם על ידי טל אידן, ממעבדת פרופ' מיכה אילן, באוניברסיטת תל אביב באמצעות רובוט תת ימי

אחד האתגרים הגדולים ביותר עבור כל ענף גדל ובפרט עבור ביוטכנולוגיה, הינו שהפיתוח יהא בר קיימא. על כן בפיתוח חומרי הטבע לרב לא מדובר על הפקת ביומאסה גדולה של משאבים מהים לצרכי האדם, אלא על גידול מלאכותי שלה או על בידוד וחיקוי של התכונות הביולוגיות, ואז סינתזה (הרכבה) במעבדה של תחליפים מלאכותיים לחומרי הטבע. בשל מגוון השימושים האפשריים, ביוטכנולוגיה היא פעמים רבות ענף רב תחומי, ואחד הרווחים הגדולים שבחקר מסוג זה הינו מציאת תוצרים חדשים כתוצאה מההשקה הבינתחומית (איור 20).

בהיותה תעשיית עתירת ידע, ביוטכנולוגיה ימית דורשת משאבים רבים כגון מימון בקנה מידה גדול וקבוע, ספינות מחקר ותשתיות ימיות, מעבדות, אוניברסיטאות ומכוני מחקר אקדמיים, תשתיות פיזיות של מכשירי מדידה, מחקר וניתוח מידע, תשתיות לאחזקת ושיתוף בסיסי נתונים עצומים ואף תעשיות ייצור פרמצבטיות בקנה מידה נרחב.

בישראל כיום מספר צוותים של חוקרים עובדים על פתרונות שונים מהים: מדוזות משמשות לייצור תחבושות לכוויות שאינן נדבקות לעור, קרם הגנה מהשמש שגם מגן מצריבת מדוזות ואף נחקרות כחומר גלם לייצור מסננים שימנעו מחלקיקי מיקרו-פלסטיק להגיע למי הים. אלמוגים רכים עשויים לשמש כמקור לסיבי קולגן רך, חומר גלם נדרש בתעשיית הקוסמטיקה (הכוונה אינה לכרות אלמוגים אלא לחקות את מבנה הסיבים) וחומרים המופקים מספוגים מגלים לנו דרכים בהן ניתן להתמודד עם מחלות קשות כגון סרטן או איידס. מספר מינים של מיקרו-אצות וחיידקים פוטוסינתטים נחקרים כיום בארץ כמקור לביו-דלקים. מיני אצות אחרים מגודלים באופן מסחרי בבריכות מי מלח ביבשה כמזון או כתוספי מזון שונים שמופקים מהן.



איור 20

שווקים שונים של ביוטכנולוגיה ימית, החפיפה ביניהם ודוגמאות שימושים שנובעים מההשקה בין תחומי הידע.
גרקו וסינקגרני (2016)

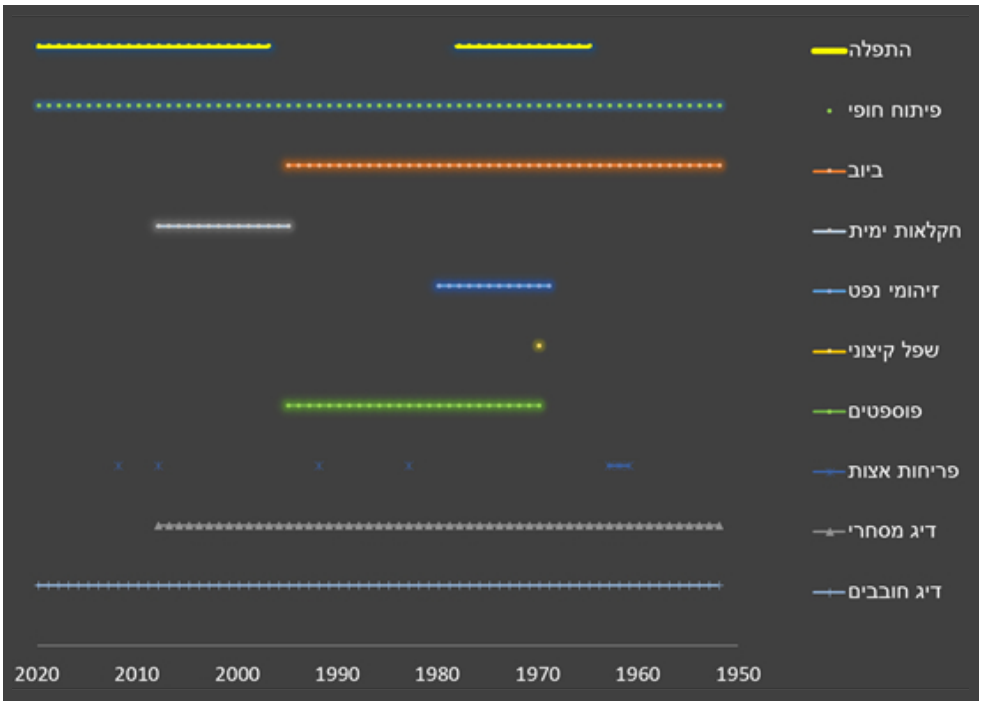
כיום מרבית התחומים של ביוטכנולוגיה ימית נמצאים עדיין בחיתולים, בשלבי מחקר ופיתוח שונים וכסטארט-אפים ומעטות מהטכנולוגיות תורגמו לתעשיות מוכחות פעילות. עם זאת, המין האנושי כבר הוכיח שהמרחק בין רעיונות חדשניים ליישומם הינו לעתים קצר מהנדמה. יוצא דופן אחד הוא תחום האצות לתוספי מזון. לדוגמא, בדרום הערבה, בקרבת העיר אילת, נמצא מפעל העושה שימוש במי המפרץ לגידול ביבשה של האצה הימית דונליאלה, העשירה בויטמין הבטא־קרוטן. גידול האצה פותח במכון ויצמן והטכנולוגיה נמכרה לחברה יפנית, המפעילה את האתר. בתנאים קשים של קרינה ומליחות הדונליאלה מייצרת שכבת הגנה של בטא־קרוטן שמזוקקת לאבקה כתומה עתירת ויטמין A. האבקה משמשת לייצור כמוסות, משולבת במוצרים שונים או נמכרת גולמית בעיקר בשוק היפני, במזרח אסיה, בארצות הברית, בקנדה ואוסטרליה. היא משמשת כתוסף מזון וכחומר גלם גם בתעשיית הקוסמטיקה.

9.7 תיירות חופית וימית

כ-80% מן התיירות בעולמנו מתבצעת לאורך החופים ובמים. כאשר אנו באים לכמת שירותי מערכת אקולוגית ימיות, משמע לייחס להם ערך מוניטרי, אנו נוהגים להתייחס לשלושה סוגי שירותים עיקריים שאנחנו מקבלים מהטבע: שירותי אספקה (לדוגמה מזון) שירותי ויסות (לדוגמה פירוק מזהמים או ויסות אקלים) ושירותי תרבות (לדוגמא בריאות הגוף והנפש ותיירות). כמעט בכל ההערכות, נוטה הכימות בבירור לצד שירותי התרבות. הערך שמייחסים בני האדם לים כמקור הנאה, שעשועים, בריאות ופנאי הינו גבוה מאד. לראייה, מחירי דירות קרובות לחוף או כאלו שנשקף מהם נוף לים (נדל"ן "כחול") גבוהים הרבה ממחירי דירות דומות שנשקף מהן נוף ירוק (נדל"ן ירוק"), שבתורן שוות יותר מאלו שנשקף מהן נוף עירוני. מלינות בבתי מלון עד יאכטות וספינות תענוגות, משחיה גלישה ושנירקול עד צלילה עם כרישים, התיירות החופית והימית העולמית הינה עסק ענק שמעסיק עשרות מיליוני עובדים ומגלגל טריליוני דולרים בשנה.

תיירות חופית וימית בישראל - אילת כדוגמא - חופי ישראל, בים תיכון, בכנרת ואפילו בים המלח, זוכים לביקורי תיירים רבים, אבל עיר תיירות אחת עומדת הרבה מעל האחרות בישראל, תודות בעיקר למערכת האקולוגית הימית הייחודית שלה. דוגמה מצוינת לערכה של תיירות חופית וימית ניתן למצוא באילת, שחופיה מהווים מוקד לביקורים של מיליוני נופשים מישראל ומחו"ל בכל שנה. תיירים עוברים התנסויות אקטיביות מגוונות עם הים וחופיו, שהם חווים באמצעות מגוון רחב של פעילויות: החל מצפייה בים מבתי קפה ומלונות, התבוננות בים תוך רביצה, ישיבה והליכה בטיילת או על החוף, דרך פעילות גופנית בחוף וכלה בפעילויות הרבות הנעשות בגוף המים. אלו כוללות טבילה ורחצה בים, שחיה להנאה או כפעילות גופנית, שנירקול וצלילה לשם צפייה בנוף התת-ימי ומגוון מרשים של פעילויות על פני המים, כולל ספורט ימי חובבני ומקצועי המתבצע באמצעות גלשנים, מפרשיות וכלי שיט ממונעים, וכן תיירות שיט ענפה, שחלקה נסמך על צפייה במגוון הביולוגי, בין אם דרך מסיכה או קרקעית שקופה של סירה. בכדי לאפשר קיום שירותי תרבות, על המגוון הביולוגי לאפשר את ההתנסות הזו במלואה, דרך קיום שוניות אלמוגים צבעוניות עם מיני דגל, דגים רבים, ובעלי חיים שאין לראותם בישראל אלא במערכת זו בלבד. מרבית מועדוני הצלילה בישראל נמצאים באילת ומכאן שלצלילה תפקיד מהותי בתיוגה כיעד תיירות, פנאי וספורט לאומי ובינלאומי, וזאת גם משום שבאילת ניתן לבקר מתחת למים ולצפות בשוניות האלמוגים המרהיבות אפילו בלי לצלול או לצאת לים. למשל במצפה התת ימי - למרות שזהו אתר הטבע הגובה את מחיר הכניסה הגבוה ביותר בישראל, בכל זאת מבקרים בו מאות אלפים כל שנה. באילת ניתן אפילו ליהנות מארוחה במסעדה מול הנוף התת ימי, ואף לחזות בדולפינים או לשחות איתם בריף הדולפינים. כמחצית מהלינות בבתי מלון בישראל מתרחשות באילת ולמרות שכשישית מהתיירים המגיעים לישראל מבקרים בעיר, מרבית המבקרים בה הם תיירים ישראלים.

באילת הצלילה הינה דומיננטית, אבל גם שחיינים, שייטים, חותרים, גולשים (כולל מדליות אולימפיות ואליפויות עולם לגולשים מאילת), דייגים חובבים וכמובן הרוחצים עשויים נהנים מפעילות גופנית שבצידה תועלת מהימצאות



איור 21

איומים שונים על שונית האלמוגים באילת (לא כולל סערות קיצוניות). ניתן לראות כיצד כמה מהאיומים האנתרופוגנים העיקריים הוסרו עם שדרוג תשתיות הביוב ונמלי הנפט והפוספטים של העיר, הוצאת כלובי הדגים מהמים והפסקת הדיג המסחרי במפרץ. [מערכות אקולוגיות ורווחת האדם - הערכה לאומית]

בחיק המערכת האקולוגית. בנוסף, שונית האלמוגים של אילת משמשת כמשאב מחקרי וחינוכי מדרגה ראשונה. היא אחת הנחקרות ביותר בעולם מבחינת מספר המאמרים למ"ר ובשל השונית הוקם המכון הבין-אוניברסיטאי. מבחינת שמירת טבע הרי מפרץ אילת הוא דוגמה לעליה בהכרת האדם כי נדרש שימור של המערכות הטבעיות. השמורה הראשונה שהוקמה בישראל הינה שמורת טבע חוף האלמוגים המאפשרת צפיה באלמוגים מבלי לפגוע בהם. בעת הקמת ופיתוח העיר אילת ולפני התפתחות המודעות הסביבתית והתיירות בה, איומים מעשה ידי אדם על השונית והמפרץ כללו בניית נמלים בשנות החמישים, הזרמות נפט וביוב גולמי בשנות השבעים וחקלאות ימית בשנות התשעים, אבל עם הזמן הלכו והוסרו האיומים (איור 21).

כיום, הרבה תודות לתיירות פנים, ולמרות שעדיין קיימים מספר גורמים מחוללי השפעה על שירותי התרבות במפרץ, תיירות הינה עדיין עמוד השדרה של העיר הדרומית. בכלל, ניכר כי המשאב של עצם קיום מערכת אקולוגית ימית בעלת יופי וייחוד, כזו שמושכת את העין, המחשבה והלב של בני האדם, מצדיקה קיום חיים לצד הים. לו הייתה מערכת אקולוגית דומה למפרץ אילת בים המלח, האם לא היינו מקימים ערים לחופיו? האם לא היינו מיטיבים לשמור עליו? הים התיכון הישראלי עובר כיום מהפכה של שימור הטבע הימי. עם הפחתת הזרמות שפכים, מגבלות דיג מחמירות ושמורות ימיות גדולות שמוקמות בו, האם יהיה בכך בכדי להפכו למרכז תיירותי בדומה למפרץ אילת? ימים יגידו.

מקורות לפרק זה

אליאסון א (2019) בחול האוזל על שפת הים. מכון דוידסון.
https://davidson.weizmann.ac.il/online/sciencepanorama

ביין ע, אידלמן ע, כהן ג (2010) התמוטטות המצוק בחופי ישראל - דרכים להתמודדות, והמשמעויות הכלכליות, הציבוריות והסביבתיות. מסמך מדיניות. 50 ע'

החברה להגנת הטבע (2020) תכנית פעולה לניהול הדיג ואישוש הדגה והטבע בים התיכון. 126 ע'

הטכניון (2015) תכנית ימית לישראל. 57 ע'
https://msp-israel.net.technion.ac.il/files/2015/11/Israel-Marine-Plan-.pdf

לוטן א, ספריאל א, פייטלסון ע (2017) מערכות אקולוגיות ורווחת האדם. הערכה לאומית. דוח ביניים. 106 ע'

מוסד שמואל נאמן בטכניון ומשרד החקלאות (2015) פיתוח בר-קיימא של חקלאות ימית בים התיכון של ישראל. 142 ע'

מנהל התכנון (2020) מסמך מדיניות למרחב הימי של ישראל, ים תיכון. 152 ע'
https://maritime.gov.il/Pages/HomePage.aspx

קרמון נ (1993) תעשיית הארגמן בעת העתיקה, בתוך: צבע מהטבע, תל אביב: הוצאת מוזיאון ארץ-ישראל, תשנ"ג.

רשות הטבע והגנים (2020) שמורות טבע ימיות.
https://www.parks.org.il/article/שמורות-טבע-ימיות/

FAO (2020) The state of world fisheries and aquaculture. Sustainability in action. 224 p

OECD (2017) Marine Biotechnology. Definitions, Infrastructures and directions for innovation. 51 p

10

גיאומורפולוגיה חופית

מִיה אלסר

10.1 גיאומורפולוגיה של חופים

חוף הים הוא התחום המפריד בין האזור הימי המוצף מים דרך קבע, לבין אזור היבשת שאין מי הים מגיעים אליו כלל. החוף הוא אחד האזורים הדינמיים ביותר על פני כדור הארץ ובו מתחוללות ללא הרף התמורות הגיאולוגיות והגיאומורפולוגיות המהירות ביותר על פני כדור הארץ (למעט אֵירועים אפיזודיים רבי עוצמה, כגון רעידות אדמה והתפרצויות געשיות). תמורות אלה מעצבות סביבה יִיחודית, שנופיה רבגוניים והיא משתנה תדיר, המהווה אתגר לחברות בעלי חיים וצמחים ולאדם, אשר מנצלים את משאביה ומתקיימים בה.

היכן נגמר הים ומתחילה היבשה?

למעשה מפגש זה קורה בקצה מדף היבשת, רחוק ועמוק משפת הים. שולי היבשת מוצפים מים, ואילו החוף נמצא במקום שהמים נעצרים. זה המצב בימינו. בתקופות אחרות היה הים רחוק יותר, ושולי היבשת מגולים, או שהציף את היבשה, וחלקים גדולים ממנה היו מכוסים מים, כך שהמפגש איננו נראה לעין.

את חוף הים (באנגלית: beach, shore, coast) נחלק לשניים:

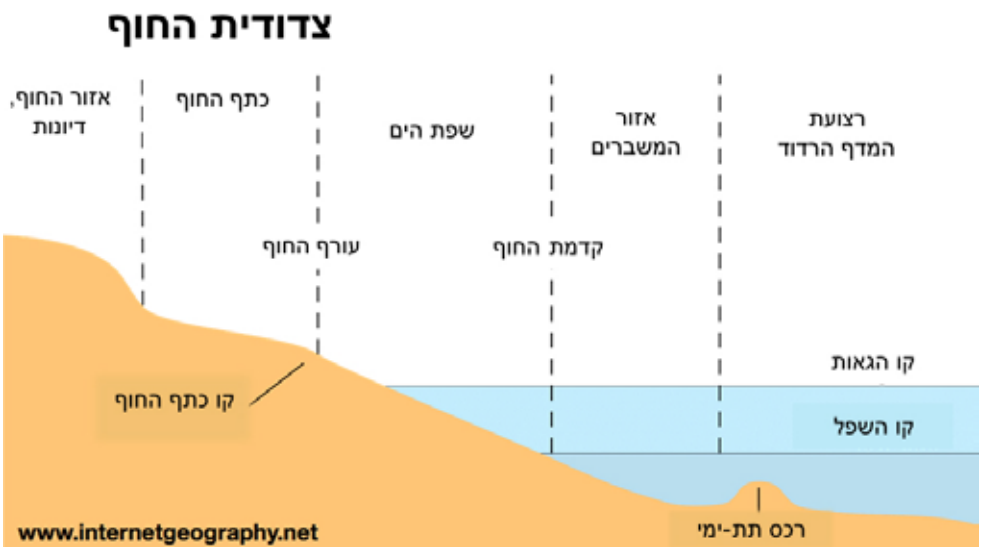
1. **שפת הים** - אזור דינאמי ביותר, המשתרע בין קו השפל הנמוך ביותר לבין קו הגאות הגבוהה ביותר. **קידמת החוף** (חזית שפת ים קדמית) מתגלה בשפל, ואילו **עורף החוף** (חזית שפת ים אחורית) מוצף בגאות. קו החוף נע בין שני קוים אלה. מיקומו המדויק של קו החוף משתנה בהשפעת הגלים ואלה מושפעים מעוצמת הרוחות המנשבות וכיוונן (בהתאם לכך נקבע גובה הגלים).

   משפטית, שפת הים מוגדרת מקו המים מזרחה עד גבול טבעי, פיזי או מלאכותי, או תחום 100 מ' שהינם התחום האסור לבניה במדינות רבות כיום. מימי החופים כוללים את אזור המשברים, בד"כ עד עומק של כ-10 מ', כ-900 מ' בממוצע מקו החוף. רצועת המדף הרדוד, מעומק מים של 10 מ' עד 30 מ', ברצועה שרוחבה מגיע ל-3 ק"מ בממוצע.

2. **אזור החוף** משתרע ביבשה ככל שמגיעות ההשפעות הימיות - הבריזות, המליחות, החולות הנודדים, מפלסי ים קדומים. מעבר לעורף החוף קיימת בדרך כלל מדרגה או מצוק, לפי טיב הקרקע, היא כתף החוף (berm) ומעבר לקדמת החוף קיימת לעתים דרגה נוספת.

הפרופיל האנכי של שפת הים נקרא צדודית החוף (איור 1). נדיר מאד כיום למצוא צדודית בשיווי משקל, אשר כוחות הבינוי וההרס הפועלים עליה מתאזנים בקנה מידה עונתי, שנתי ורב שנתי.

צילום: יותם אלסר



איור 1

צדודית החוף

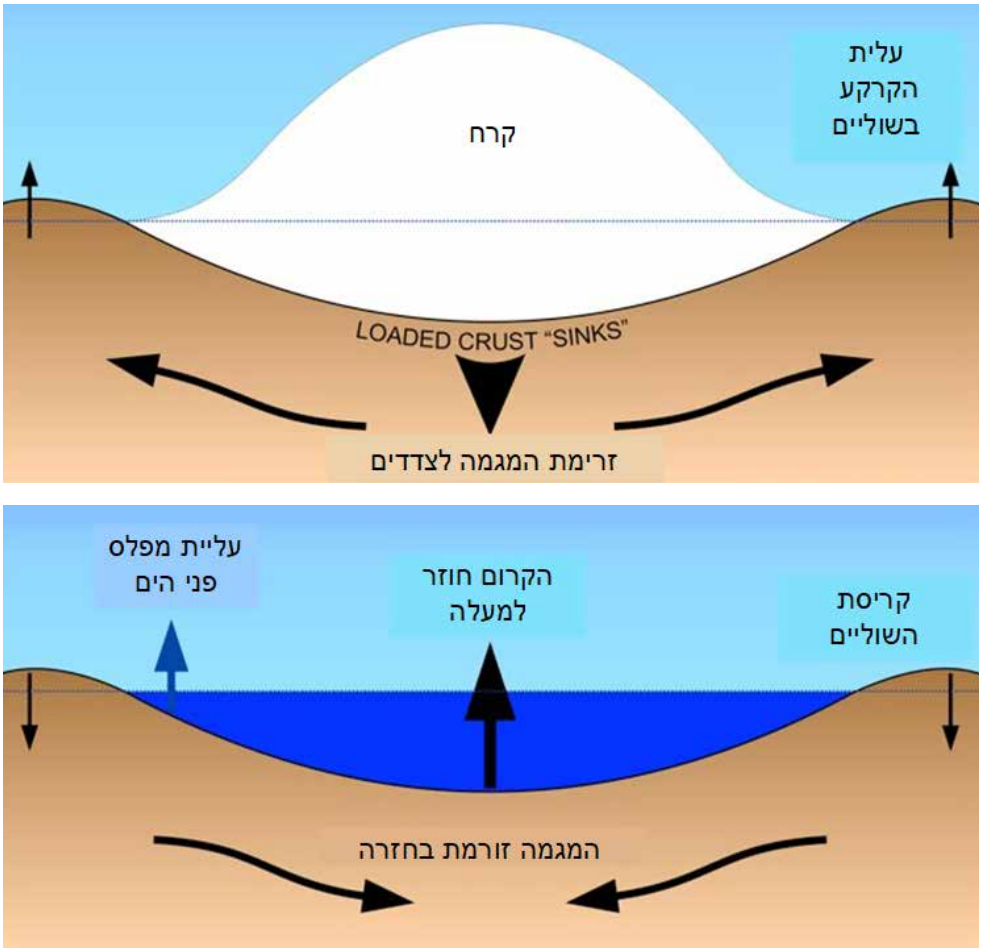
מה משפיע על מיקום קו החוף?

קו החוף מוגדר כרצועת המגע שבין מי הים לבין היבשה. מיקומו המדויק של קו החוף משתנה בהתאם לתהליכים בים או ביבשה:

1. **תנודה איזוסטטית** - שינוי במפלס פני הים כתוצאה מתנודה אנכית, מקומית או אזורית, של הליתוספרה. תנועות שקיעה של החוף הנובעות מהכבדה רבה על החוף ותנועות עלייה של החוף הנובעות מהפחתה רבה במשקלו. תנודה זו היא **מקומית או אזורית.** הכבדה יכולה להיגרם עקב הצטברות רבה של קרחונים על חלקי יבשות: בעבר היו כמה תקופות של ירידה בטמפרטורת כדור הארץ. בתקופות הללו הורבדו קרחונים ומעטי קרח בעובי של מאות ואלפי מטרים באזורי הקטבים ואף דרומה וצפונה מהם באזורים גבוהים. בכל המקומות האלה הטמפרטורות היו קרות דיין כדי למנוע הפשרה של חלק גדול מהשלג שירד. השלג הרב אשר לא הפשיר נדחס והיה לקרח, למעטי קרח ולקרחונים. הקרחונים התפשטו והתרבו, ועוביים הלך וגדל. ההצטברות האדירה של קרח וקרחונים הכבידה על חלקי יבשות אלה במיליארדי טונות של קרח (איור 2 למעלה). משקלו של מטר מעוקב של קרח הוא 900-970 קילוגרמים, כלומר טונה כמעט. כך למשל המשקל האדיר של קרח וקרחונים שהצטבר בסקנדינביה, הכביד מאוד על הלוח הטקטוני אשר חצי האי מצוי עליו וגרם לשקיעתו. שקיעתה של סקנדינביה בהשוואה למפלס מי הים והצפת חופיה בתקופות הקרח הביאה להתרוממותה של הולנד, מדינה המצויה בצדו האחר של הלוח הטקטוני. חלקים מהולנד אשר כיום שקועים בים, הורמו אז בהשוואה למפלס מי הים והיו ליבשה. באותן תקופות הקרח התרחשו אפוא בו-זמנית שקיעה איזוסטטית של סקנדינביה ועלייה איזוסטטית של הולנד. בסקנדינביה התפשט אז הים לתוך היבשה, ואילו בהולנד חל גידול בשטח היבשה על חשבון הים.

   בתקופות הבין-קרחוניות, תקופות של עליית הטמפרטורות בכדור הארץ דוגמת זו שאנו מצויים בה כיום, חלה הפשרה רבה ונסיגה של קרחונים.

תנודה איזוסטטית
תנועת המעטפת כתוצאה משינויים בפני השטח. מתרחש כתוצאה מהסרת משקל כבד מהיבשה, כמו במקרים של המסת קרחונים משמעותית.



איור 2

תנועה איזוסטטית (למעלה) **הצטברות של קרח וקרחונים מכבידה על היבשות וגורמת לשקיעתן.** (למטה) **בתקופות בין קרחוניות, פוחת מאוד משקל הקרחונים וחלה עלייה איזוסטטית של היבשת. חופים שהוצפו על ידי מי הים בתקופת הקרח והשקיעה האיזוסטטית, יתרוממו מעל לפני הים עם הפשרת הקרחונים** (Alba Martin).

השטחים המכוסים קרחונים הצטמצמו מאוד, ועובי הקרחונים שנותרו פחת במידה ניכרת. כתוצאה מכך פחת מאוד משקל הקרחונים בסקנדינביה, חלה עלייה איזוסטטית והלוח הסקנדינבי התרומם. חופים שהוצפו על ידי מי הים בתקופת הקרח והשקיעה האיזוסטטית, התרוממו מעל לפני הים עם הפשרת הקרחונים (איור 2 למטה). בד בבד בצדו הנגדי של הלוח הטקטוני הזה (הצד אשר הולנד נמצאת בו) חלה שקיעה, והים הציף שוב את החופים.

2. **תנודה אֵאוסְטָטית** - שינוי במפלס פני הים כתוצאה משינוי בנפח המים, כתוצאה משינויים אקלימיים או משינויים בצורת האגן האוקייני. תנודה זו **איטית וגלובאלית.** בתקופות של התחממות והפשרת קרחונים מיתוספות לימים כמויות מים גדולות מאוד, מפלס המים עולה, הים מציף שטחי יבשה בקרבת החופים, ואלה הופכים קרקעית של ים רדוד. כך למשל מדידות שנערכו בחופי תל-אביב, אשדוד ואשקלון הצביעו על עלייה של 15 סנטימטרים במפלס פני הים בין השנים 1973-2000. במקומות בהם מצויים קרחונים גדולים מתקיים מאזן המשתנה בין התקופות האקלימיות:

בתקופות בין-קרחוניות הצטמצמו מאוד השטחים המכוסים בקרח וקרחונים ועובי הקרחונים ומעטי הקרח שנותרו פחת. כמויות אדירות של מי ההפשרה הגיעו לאוקיינוסים, העלו את מפלסיהם והציפו את כל החופים הנמוכים יותר ממפלס הים הגואה. הים התרחב על חשבון היבשה. במקביל, פחת משקלם

תנודה אאוסטטית
שינויי מפלס ים עולמיים הנגרמים כתוצאה משינויים בנפח המים באוקיינוסים או משינויים בנפח ובגיאומטריה של האגנים האוקייניים.

של אותם חלקי היבשות אשר נפחי קרח וקרחונים גדולים מאוד כיסו אותם. הקרחונים הפשירו, משקלם פחת, ולכן הם התרוממו. ההרמה האיזוסטטית גדולה יותר משיעור העלייה האאוסטטית של מפלס הים. בדרך זו הפשרת הקרחונים בסקנדינביה, כמו גם ביתר חלקי היבשות שהיו "מקורחנים", גרמה לעליית מפלס מי הים ובד בבד לעלייה איזוסטטית של חלקי היבשת הסקנדינביים. ככל שעובי כיסוי מעטי הקרח והקרחונים אשר הפשירו היה גדול יותר, שיעור העלייה האיזוסטטית היה גדול יותר. לפיכך שיעור העלייה האיזוסטטית באזורים ההרריים הגבוהים שבמרכז סקנדינביה, אזורים אשר היו מכוסים כיסוי רב ועבה של קרחונים, היה גדול יותר משיעור העלייה של אזורי החופים שבשולי האזורים ה"מקורחנים". האחרונים התרוממו פחות, ועמקי הקרחונים שהפשירו שם הוצפו והיו לפיורדים.

עוד על היחס בין התנודות ניתן ללמוד בקישור הבא

What is the difference between isostatic and eustatic sea level change?

3. **גלי הים והשפעתם על עיצוב שפת הים והחוף** - המשברים והגלים מחוללים את התהליך העיקרי אשר מעצב את החופים. עיקר השפעתם ניכרת בשפת הים: גלי הים באים במגע עם היבשה והם משפיעים עליה באופן פיזקלי (גידוד) ובאופן כימי (בליה). תהליכי בניה וצבירה מרחיבים את שטח היבשה על חשבון הים ואילו תהליכי הרס וגידוד מקטינים את שטח היבשה תוך כדי הגדלת שטח הים, כפי שמדגים הסרטון.

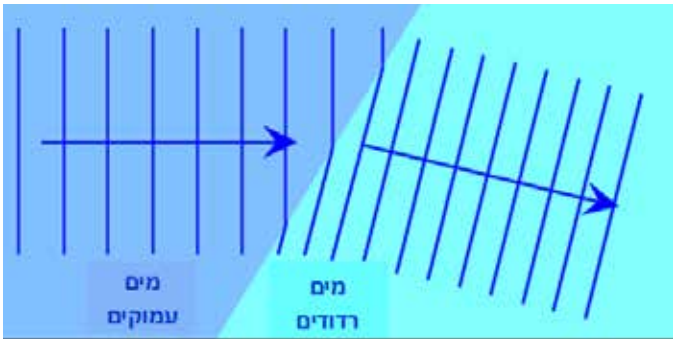
בנייה

חופים יכולים לגדול ולהתרחב כתוצאה מצבירה והרבדה של חומרי סחף המושקעים בשפת הים ובקרקעית הים בקרבת החופים ובצמוד אליהם. חומרי הסחף יכולים להיות ממקורות ימיים או יבשתיים:

- סחף ממקור יבשתי מוסע אל הים באמצעות נחלים ונהרות. הסחף מושקע בים או בחוף ויוצר מניפות סחף ודלתאות (איור 3).

איור 3

דלתה שנוצרה ב-Lower Cook inlet, Kachemak bay, Alaska, צפון-מזרח האוקיינוס השקט (WorldAtlas)



איור 4

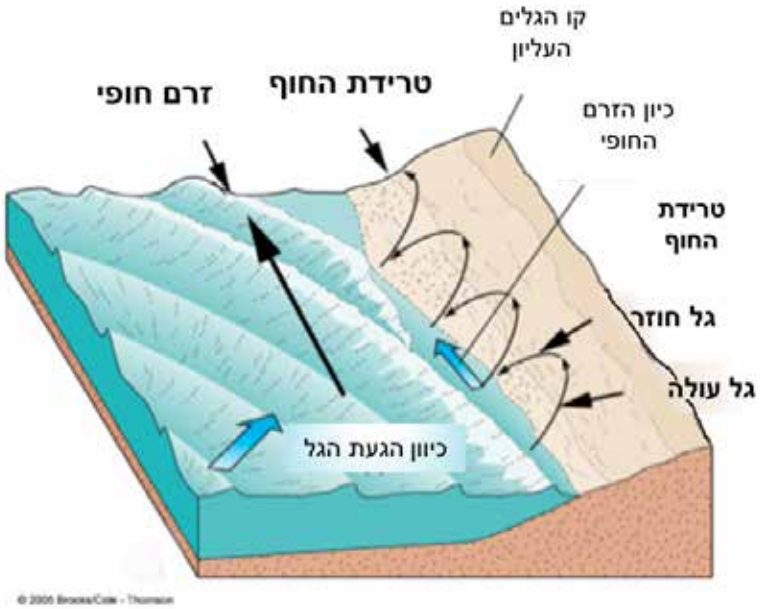
כיוון השקעת סחף ממקור ימי על החוף

הזרם החופי (longshore current)
תנועת מים במקביל לחוף, הנוצרת מהשתברות גלים בזווית לקו החוף.

טרידת החוף
תנועת החומר המובא אל החוף ומוסר ממנו ע"י הזרימה החופית.

- סחף ממקור ימי המוסע על ידי זרמי ים וגלים ומושקע על החוף ובקרבתו: הגלים מגיעים לחוף בזווית מסוימת, התלויה בכוון הרוח, צורת קרקעית הים ומבנה קו החוף. כאשר הגל מתקרב אל החוף, כיוונו משתנה עקב המפגש עם הקרקעית, והגל נעשה מקביל יותר ויותר אל החוף (איור 4).

מכיוון שלא כל חזית הגל מגיעה ליבשה באותו זמן ואילו הגל החוזר פונה בניצב לחוף ממש, נוצרת זווית בין תנועת הגל העולה והחוזר, ונוצרת תמונת זיגזג רצופה. עוצמתו של הגל העולה גדולה מזו של החוזר, וכך מצטבר עודף מים הנדחף במעלה החוף וזורם במקביל לו. זוהי דרך היווצרותו של **הזרם החופי** (**longshore current**) - תנועת מים במקביל לחוף, הנוצרת מהשתברות גלים בזווית לקו החוף. הזרימה החופית יוצרת את **טרידת החוף** - תנועת החומר המובא אל החוף ומוסר ממנו (איור 5). הגלים מביאים איתם חומר מרחף, השוקע על החוף עם הישברם עליו, ורק חלקו הקטן חוזר לים. חומר זה מוסע על ידי הזרם החופי ושוקע בהמשך דרכו. זוהי **הפעילות הבונה** של הגלים. זו קורית בדרך כלל בעונת הקיץ, כתוצאה מגלים מתונים. טרידת החוף היא האחראית, אם כן, על יישור קו החוף, אחידות השיפוע שלו, היווצרות שרטונות בסמוך לשפכי הנהרות ומוצאי המעגנות והנמלים.



איור 5

היווצרות זרם חופי וטרידת החוף

איור 6

זרמי פריצה (rip currents)

(מימין) NOAA
(משמאל) NPS.gov

מכיוון שכל גל תורם כמות מים מסוימת לזרם החופי, מצטברת בו כמות מים גדולה, ובמשך התקדמותו פורצים ממנו זרמים לעבר הים העמוק. הגלים החוזרים, או **זרמי הפריצה** (**rip currents**) (איור 6), יכולים להגיע לעוצמה רבה, ליצור תעלות, בורות ומערבולות, **אך** הם גם מטאטאים את החוף, ומחדירים לים כמויות גדולות של חמצן.

זרמי הפריצה (rip currents)

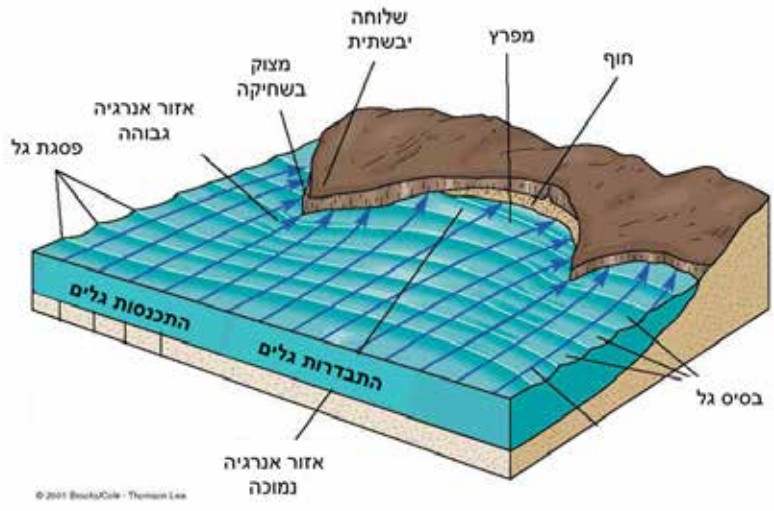
זרמים הנוצרים בחופים עם משברי גלים. המים החוזרים המצטברים מהגלים הנשברים אל החוף, חוזרים במסלול מעגלי בחזרה אל הים הפתוח בצורת זרם חזק וממוקד.

הרס

כאשר הגלים גבוהים מהממוצע (מעל 3 מ' לאורך חופי הארץ), מהירותם רבה, והמרווח ופרק הגל קצרים יותר, הם הופכים ל**גלי הרס**, הגורמים לבליה של הסלע או הכיסוי החולי של החוף עליו הם מתנפלים. אופי קרקעית הים (מדף היבשת) משפיע על הגלים בכך, שככל שעומקו רב ליד היבשה, המשברים נוצרים קרוב יותר אליה, ועוצמתם רבה יותר.

פעילות בניה או הרס של גלי החוף מושפעת גם מצורת החוף: שלוחות יבשתיות גורמות ל**התכנסות הגלים**, המתקיפים אותן משלושת עבריהן, בעוד שמפרצים (סטיה קעורה בקו החוף) גורמת ל**התבדרות הגלים** והגדלת המרחקים ביניהם (איור 7). כמובן שפעילות הרס במקום אחד הופכת לפעילות בונה במקום אחר, וכן ישנם הבדלים עונתיים גדולים בצורת החוף.

מעבר לגורמים הטבעיים המשפיעים על עיצוב החוף, כיום האדם הוא הגורם המורפולוגי המרכזי בחופים. כריית חול, שוברי גלים לסוגיהם, מתקני נמל, תחנות כוח, סכרים, איים מלאכותיים, אפקט החממה - כל אלה משנים ללא היכר את צורת החופים, ועל כך בהמשך.



איור 7

התכנסות והתבדרות גלים

סוגי חופים

בעולם ישנם הרבה סוגים של חופים, הנבדלים אחד מהשני במאפייניהם:

חוף חולי

חוף חולי הוא חוף בעל קרקעית רכה, המורכב מחומרים בלתי מלוכדים. גודל החומר המרכיב את הקרקעית הרכה משתנה כתלות בגיאומורפולוגיה של החוף. החומר מוגדר עפ"י גודלו (איור 8).

באזורים מוגנים באופן יחסי (מפרצים למשל) יכול להצטבר ולשקוע סדימנט בעל גודל גרגר קטן. לעומת זאת, באזורים שטוחים (ללא הגנת סלעים) החשופים לפעילות גלים וזרמים, ייסחפו גרגרים בעלי גודל גרגר קטן מאוד אל הים ועל החוף יישאר סדימנט עם גודל גרגר גס. באופן כללי, גודל הגרגר הולך וקטן ככל שמעמיקים ומתרחקים מקו החוף. במים עמוקים יותר עולה החלק היחסי של טין וחרסית שגודל הגרגר שלהם קטן. גודל הגרגר משפיע על הרווחים הבין גרגריים ועל "אוורור" הסדימנט, כלומר משפיע על חדירת מים וחמצן שפוחתת ככל שגודל הגרגר קטן (מחול לטין). בחופים הנמצאים בסמוך לאזורים סלעיים/מצוקים או שפכי נחלים יכולות להיות בקו החוף ובמים הרדודים גם אבנים בגדלים שונים, שמקורן בהסעה מערוצי נחלים או מבליה של מצוקים חופיים. נוכחותן של אבנים בגדלים שונים או שברי צדפים באזור מצע רך מאפשרת היאחזות של מגוון בעלי חיים ישיבים ומהווה מעין "אי של יציבות" במרחב הדינמי של המצע הרך.

איור 8

מיון סדימנטים על פי גודלם

חרסית
0.002-0.004 מ"מ

טין
0.004-0.06 מ"מ

חול
0.06-2 מ"מ

גרופת ימית (Shingle)
2 מ"מ > קוטר > 50 ס"מ

בולדרים
50< ס"מ

* חומר אשר קוטר חלקיקיו קטן מ-0.002 מ"מ מומס במים.

אנרגיית הגלים ומשטר הזרמים יעצבו גם הם את החוף החולי: חלק ממי הגלים הנשברים אל החוף יחלחלו בחול ולכן כמות המים הנסוגים (הזרם החופי) תהיה קטנה יחסית. ככל שהחול יהיה גס יותר, כמות המים המחלחלת בו תהיה גדולה יותר. חול יבש יגביר את החלחול, לעומת חול רווי במים, שיגביר את כמות ומהירות הגלים החוזרים ויגרום לשחיקה של החוף.

יש שהרוחות מסיעות את גרגירי החול (לאחר התייבשותו) פנימה אל החוף ולעתים נוצרות **חוליות (דיונות)** לאורך החוף. אם החוליות סופגות תמיסות גירניות, הן מתלכדות לסלע - אבן חול גירית המכונה בארץ ישראל בשם הערבי המקומי '**כורכר**'. במישור החוף הישראלי מצויים שלושה עד חמישה רכסי כורכר המקבילים לחוף ומצויים מזרחית לו. אלו שרשרות של גבעות העשויות חול ומלט גירי, חומרים אשר התלכדו ליצירת סלע כורכר. לפני התלכדותם היו אלו חוליות (דיונות חול) אשר הורבדו והוערמו על ידי הגלים לאורך קווי החוף הקדומים, קווי חוף שנסוגו במיליון וחצי השנים האחרונות, בשל ירידה משמעותית של מפלס מי הים בתקופות קרחונית. ירידת פני הים, חושפת מרבצים גדולים של חול לפעילות הרוח. התנאים ההכרחיים להתהוות החוליות הן היעדר מכשולים טופוגרפיים, כגון מתלולי חוף, ורוחות המנשבות בשכיחות ניכרת מן הים ליבשה. תנועה אאולית של חול מן הים ליבשה הייתה אחת התופעות הבולטות שליוו את תקופות הקרח האחרונות. הדיונות דינאמיות מאד ועשויות לחדור ק"מ רבים לתוך היבשה. בתנאים מסוימים הן עשויות להתייצב על ידי צמחיה.

מקור החומר הבונה את החופים החוליים הוא ימי ויבשתי כאחד. המקור הימי הוא קטעי חוף המגודדים על ידי הים וסחף המוסע על ידו. מקורות יבשתיים הם סחף נהרות (**מקור אלוביאלי** - שנוצר מסחף המים), התפוררות מתלול החוף באתרו, וחול מוסע על ידי הרוח (**מקור אאולי** - אאולוס היה אל הרוחות במיתולוגיה היוונית). באזורים אחרים בעולם יש משמעות רבה גם לחומר המוסע על ידי קרחונים.

חופים חוליים מאופיינים לעיתים על ידי שרטונות, סוללות של חומר המתרוממות מקרקעית הים, אל פני המים. השרטונות יכולים להיות **צמודים** אל החוף, או במרחק ניכר מהחוף (**חיצוניים**). לשרטונות אלו השפעה מרובה על משטר הגלים המגיעים מהים הפתוח ונשברים במורד החיצוני של השרטון, הפונה אל הים. שרטונות החוף הם צורות ארעיות, הנתונות לשינויים תכופים. מידי פעם בפעם הם נהרסים בחלקים על ידי גלים עזים ולעיתים אף נעלמים כליל בסערות עזות. לעיתים עשויה להיווצר רצועת יבשה בין שרטון צמוד, לחוף הקרוב אליו. רצועה זו נקראת **טוֹמְבּוֹלוֹ** (מאיטלקית: Tombolo בענקבות הלטינית: tumulus שפירושו "תלולית").

חוף סלעי

הרכב הסלע מהווה גורם מכריע בקביעת צורת החוף - קיים הבדל ניכר בפרטי צדודיותיהם של חופים סלעיים בעלי הרכב ומבנה שונים. עם זאת, רוב החופים המסולעים יהיו מורכבים משתי יחידות - מתלול החוף וטבלת גידוד.

חולית (דיונה)
גבעת חול שנוצרה על ידי סחיפה אאולית: חולות סחף (המורכבים בעיקר מקוורץ) מובלים באמצעות רוח מחוף הים, עד שהם מתחילים לעבור הרבדה. דיונות נוצרות לרוב במדבריות או באזורי חוף ים.

כורכר
סלע משקע פריך ונקבובי. הכורכר נוצר כתוצאה מהתאבנות חולות, דהיינו, התלכדות גרגירי הקוורץ בחול בעזרת חומר גירי.

1. מתלול החוף

מתלולי החוף הם מדרונות תלולים, שגובהם נע ממטרים ספורים עד מאות מטרים, כשהקטעים הגבוהים והנמוכים עשויים להימצא זה בצד זה. בארץ ממוחשת תופעה זו במתלול הגבוה של ראש הנקרה, כשבדרומו מגיע גובה החוף הסלעי למטרים אחדים בלבד. הפרש גבהים דומה מצוי בין מתלולי החוף המשתרעים מנתניה ועד כפר ויתקין, שגובהם עשרות מטרים, לבין קטעי החוף הנמוכים של קיסריה ועתלית הסמוכים להם.

המתלולים החופיים התלולים ביותר מתפתחים בד"כ בסלעים שקשיותם בינונית, כגון גירים-קירטוניים, קירטונים (ראש הנקרה), אבן חול בלתי מלוכדת יחסית (כמו כורכר) ותלכידים (קונגלומראט) מלוכדים ליכוד בינוני.

מתלולי חוף מתהווים, מתפתחים ושומרים על אופיים לאורך אותם קטעים שבסיסם בא לעיתים קרובות במגע ישיר עם גלי הים. במשך הזמן נסוג המתלול בהדרגה אחורנית ונפסק לחלוטין כל מגע בינו לבין הגלים והוא הופך למתלול יבשתי. חשיבות רבה בעיצוב המתלול החוף נודעת לעוצמת הגלים: ליד ים סוער וגבה-גלים הם יהיו תלולים ומחוררים יותר מאשר ליד ים רגוע.

במקום המפגש של הים עם המתלול יווצר '**צניר**' - שקערורית הנוצרת בגובה פני הים. ככל שהצניר ארוך יותר, ניתן ללמוד כי משך הזמן בו נשאר הים במפלס המדובר, היה ארוך יותר. לצנירים תפקיד משמעותי בהתפתחות המתלולים: צניר נוצר בבסיס המתלול ומעמיק בצורה הדרגתית עם הזמן ופעילות הים, עד להתמוטטות חזית המתלול. כאשר גלי הים ירחיקו את גושי החומר שהתמוטט מבסיס המתלול, ייווצר צניר חדש.

גובה המתלולים קובע במידה רבה את קצב הריסתם ונסיגתם: כאשר מתמוטטת חזית מתלול עקב פעולת גלים, מתכסה שפת הים בשברי סלע רבים המגנים על רגלי המתלול זמן ממושך בפני התקפת הגלים. כל עוד לא הורחק חומר המפולת ע"י גלי הים, נשאר המתלול איתן ונתון אך ורק לתהליכי בלייה וסחיפה. היות וכמות חומר המפולת תהיה גדולה יותר ככל שהמתלול יהיה גבוה יותר, קצב הריסתם של מתלולים יהיה איטי יותר ככל שיהיו גבוהים יותר.

2. טבלת גידוד

טבלת הגידוד הינה משטח סלעי, הנוצר לרגלי מתלול החוף עקב נסיגתו. נסיגה זו גורמת להתהוות שטח מהוקצע-ללא-הרף ע"י גלי הים. טבלת הגידוד נמצאת בחלקה בתוך הים ומתחת לפניו ובחלקה מעל מפלס הים. באזורים, כמו בחופי ארצנו, שבהם מועדי-הים חלשים יחסית, תשתרע טבלת הגידוד, בחלקה הגדול, מתחת לפני המים. כאשר מועדי-הים ניכרים, יחשפו חלקים גדולים מפני הטבלה בעת השפל. אם פועלים באזור החוף תהליכי צבירה (הרבדת סחף), יתכסה חלקה היבשתי של הטבלה בחומר, עד לכיסויה והטבלה תהווה תשתית למשטח ההרבדה החופי. לעתים ניכרים הפרשי גבהים בין חלקיה השונים של טבלת הגידוד, הנובעים בעיקר מההבדלים בכושר העמידות של הסלעים השונים ובמידת מה בעוצמתם הבלתי אחידה של הגלים לאורך חזית השונית המופנית כלפי הים. דוגמה נאה לכך ניתן לראות בהשתרעותן הנרחבת של שוניות הכורכר הקשה

לאורך חופי ארצנו בסביבות קיסריה, דור, עתלית ואכזיב, לעומת מיעוטן היחסי לאורך חופי אשקלון, נתניה וכפר ויתקין, העשויים סלע כורכר מלוכד פחות.

גם ירידה הדרגתית במפלס פני הים, או עלייה הדרגתית של החוף יצרו מדרגות בטבלאות הגידוד, כפי שניתן לראות בקטעים אחדים של חוף לבנון וחוף סיני הדרומי. מדרגות אלו מהוות כלי חשוב במעקב אחר התמורות הטקטוניות של אזור החוף או התנועות האאוסטטיות של מפלס הים.

קצב השינוי במפלס פני הים ישפיע גם על רוחב טבלת הגידוד: אם מפלס הים יעלה ביחס ליבשה, תהיה הטבלה צרה ביותר, משום שלגלי הים אין שהות מספקת להרחיבה. לעומת זאת, עשויה טבלת הגידוד להגיע למימדי ניכרים בזמנים בהם מפלס הים יורד. כאשר במשך תקופה ארוכה למדי לא חל שינוי ביחס בין מפלס הים ליבשה, תגיע טבלת הגידוד לרוחב של מאות מטרים.

לגונה

כאשר שני טומבולי או יותר, מחברים בין השרטונות ליבשה, הם סוגרים על משטחי מים והופכים אותם ללגונות. לגונות אלו מתמלאות במשך הזמן בסחף, המרפד את קרקעיתן בחול. מי הלגונה רדודים בדרך כלל ושקטים. מבחינים בין לגונות הקשורות לים הפתוח ומקבלות אספקת מי ים ולגונות אשר קשריהן עם הים הפתוח נותקו. האחרונות ילכו ויתרדדו עם הזמן, כתוצאה מהרבדת חומר ושטח מימיהן יצטמצם.

דלתא

דלתה היא מישור סחף (קרקעי, יבשתי) הנמצא בשפך נהר לתוך ים או אגם. עוד בימי קדם הבחינו בדמיון אשר קיים בין צורתו של שפך נהר הנילוס לים התיכון, צורת משולש הפוך שקדקודו פונה למעלה הנהר, לבין האות היוונית דלתא (Δ). בהגיעו של הנהר למישור עוצמת זרימתו נחלשת, וחומרי הסחף הגסים והכבדים שבמימיו שוקעים. בהמשך זרימתו במישור אל הים הוא מצליח להסיע רק סחף עדין, כזה שעיקרו חרסית וחלקו חול.

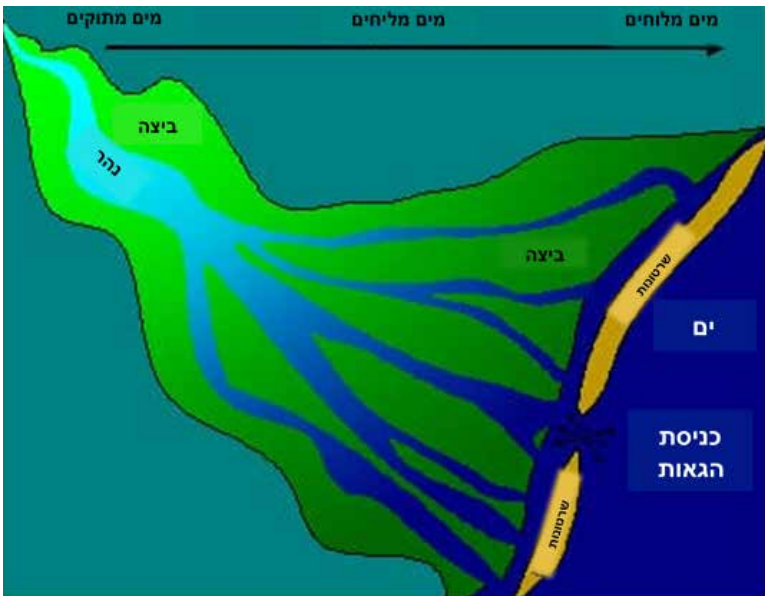
התנאים להיווצרות דלתא

- **שיפוע הנהר** - שיפועו של אפיק הנהר מתון מאוד לא רק בקרבת שפכו לים, אלא כבר במרחק גדול ממנו. שיפוע מתון כזה מאפשר לנהר להסיע טעונת דקת גרגירים בלבד.
- **סוג הסחף** - הסחף המאפיין דלתאות של נהרות מכיל גרגירים דקים: חרסית, טין (סילט) וחול. כל חלקיקי הסחף הגס (חלוקי נחל, צרורות) שקעו בחלק העילי והתלול יותר של הנהר.
- **כמות הסדימנטים בנהר** - ככל שהכמות גדולה יותר, גדל הסיכוי להיווצרות דלתה גדולה יותר.
- **"בסיס הסחיפה" אשר הנהר נשפך אליו** - חוף מוגן, שיפוע מתון של קרקעית הים (אדן היבשת) וזרמים חלשים של גאות ושפל הם תנאים טובים להתפתחות דלתה.

אסטואר

אסטוארים הם שפכי נהרות שצורתם כשל משפך המתרחב מאוד לקראת פגישתם עם הים (איור 9). משטר הזרימה באסטוארים מיוחד, כיוון שהנהרות נשפכים לים בחופים המתאפיינים בהפרשי גובה גדולים בין הגאות לבין השפל. בזמני הגאות מי הים עולים, גלים זורמים לתוך שפכי הנהרות הללו ומי הנהר המתוקים מפסיקים לזרום במורדו אל הים. מי הים הגואים מהווים סכר של מים צפופים וכבדים יותר אשר מתקדמים במעלה הנהר ומונעים ממי הנהר המתוקים ומהסחף שהם מסיעים, לזרום לים ודוחקים אותם לעבר מעלה האסטואר. גלי הגאות האלה מגביהים מאוד את מפלס מי הנהר ביחס למפלסו בעת שפל. האסטואר אינו יכול להכיל את כל תוספת המים הזורמת בו, ולכן הוא גורם לגלישת חלק מהמים המתוקים - הקלים יותר - אל מעבר לגדותיו ולהצפת הפשט של הנהר. המים המתוקים קלים ממי הים המלוחים וצפים מעליהם. לפיכך בפשטי ההצפה של אסטוארים רבים מתפתחים שטחי ביצות, כאלה שאינם ראויים לגידולים חקלאיים ומשמשים למרעה.

עליית המפלס של מי הים, התכנסותם לתוך שפך הנהר (האסטואר) בזמני גאות וזרימתם המהירה במעלה הנהר, גורמים לגידוד רב של האסטואר המעמיק ומתרחב מאוד. אפיק הנהר באזור השפך מקבל צורת משפך ההולך ומתרחב ככל שמתקרבים לים. רוחבם של אסטוארים בהישפכם לים נע בין מאות מטרים לכמה קילומטרים ואף יותר. חסימת זרימתם של מי הנהר המתוקים, בזמני הגאות, במורד האסטואר, מונעת מהם להסיע סדימנטים אל הים והם שקעים על קרקעית האסטואר. למרות זאת האסטואר אינו מתמלא סחף ואינו נסתם, כי בזמני השפל קיימת זרימה מחוזקת אל הים - של מי הים שחדרו לאסטואר ובעקבותיהם גם מי הנהר המתוקים. הזרימה הכפולה הזו סוחפת לים את הסדימנטים ששקעו בגאות או לפחות את מרביתם. הסדימנטים הנותרים, יוצרים שרטונות במשפך המתרחב. האסטואר הגדול ביותר בעולם מצוי בנהר סנט לורנס שבקנדה. אוניות מהאוקיינוס האטלנטי יכולות לשוט מרחק של כ-1,000 קילומטר במעלה האסטואר עד לנמל של קוויבק המצוי במעלה. דרך הנמל ודרך תעלות שיט הקשורות אליו אפשר להגיע עד לאגמים הגדולים שבגבול בין ארצות-הברית לקנדה.



איור 9

אסטואר

חופים אורגאנוגניים

חופים הנבנים בסיוע החי או הצומח, כדוגמת חופי אלמוגים (איור 10) או חופי מאנגרוב (איור 11). הם מצויים רק באזורי אקלים מסוימים, מאחר והאורגניזמים בוני החופים דורשים תנאי קיום מיוחדים.

איור 10

חופי אלמוגים, שונית המחסום הגדולה באוסטרליה (Ker & Downey). חופים ארוכים למדי מלווים במבני אלמוגים, עד למרחק ניכר מהחוף. גלי הים שוברים בעיקר את החלקים הגבוהים של המושבה ומרבידים את הבלית הנוצרת בדרך זו, על החוף. שפת הים תתכסה בחול לבנבן, המורכב משברים זעירים של אלמוגים וקונכיות

איור 11

חופי מאנגרובים. מאנגרוב פירושו יער של עצים ושיחים, המתפתח ומשגשג למרות כיסויו הזמני במי-ים. צומח אמפיבי זה נפוץ באזור הטרופי, בעיקר לאורך שפכי נהרות ובחופים ביצתיים שטוחים. גזע העץ וענפיו מצמיחים שורשי אוויר המזדקרים מעל מי הגאות ומשמשים מלכודת יעילה לחומר המוצק הנישא במים ולהרבדתו. יער המאנגרוב מתפשט במהירות רבה יחסית לעבר הים הרדוד

10.2 מאפייני החוף הארץ ישראלי הים-תיכוני

חוף הים הישראלי הים-תיכוני הוא פס ארוך וצר, שרוחבו אינו עולה על כמה עשרות מטרים. אזור החוף דינמי - גם במיקומו - משום שקו המים (הגבול האמיתי שבין היבשת לים) נע בלא הפסק בתוכו; וגם במשך קיומו משום שלאורך זמן, מאות עד עשרות אלפי שנים, תחום החוף כולו נודד על פני המישור הנטוי קלות, אשר נמשך מגבעות השפלה במזרח עד קצה מפתן היבשת המוצף במערב (המישור החופי, או מישור החוף, הוא חלקו החשוף). בעבר הגיאולוגי היה מפתן היבשת העליון הנוכחי לא פעם רצועת חוף יבֵשה, ואילו חלקים ניכרים ממישור החוף היו מוצפים במי הים. קיים, אפוא, קושי ניכר לייַחֵד את החוף מהאזורים הסמוכים אליו ולהגדיר את גבולותיו.

ברוב חופי העולם וכך גם בארץ, סביבת החוף היא סביבה של מרבצי חול ונופי חול. סיפור החוף, כמו גם זה של המישור החופי בעורפו ומפתן היבשת בחזיתו, הוא סיפור השתנותם של נופי החול. בהשפעת תקופות הקרח של **עידן הרביעון**, ירד מפלס הים והים נסוג מערבה וחשף שטחים נרחבים, וקו החוף נדד על פני מפתן היבשת. בתקופות בין-קרחוניות עלה המפלס והים נדד מזרחה וחזר והציף שטחים אלו. חול, שהובא כל אותה העת מדלתת הנילוס, נושב מן החוף אל המישורים החופיים שבעורפו וכִסָּם במעטה של חוליות, שנתגבהו לרכסי חול מקבילי-חוף. בהשפעת האקלים התאבנו חוליות אלה והפכו לרכסי **כורכר** או שנתבלו והפכו לקרקעות **חמרה** חוליים. כל אלה - החוליות, רכסי הכורכר וקרקעות החמרה - יצרו את התבליט הנוכחי. כיום שוב נודד החוף מזרחה, והים מגַדד את רכסי הכורכר ויוצר את צוקי החוף, הנמשכים עשרות קילומטרים.

כיום, אורכה של רצועת חוף הים התיכון בגבולות מדינת ישראל 197 ק"מ בלבד, בין רצועת עזה לראש הנקרה, רוחבה 2-2.5 ק"מ ושטחה כ-460 קמ"ר (כ-2% משטח המדינה). רצועה זו נתברכה באקלים נוח, נופים מרהיבים ועולם צומח וחי מיוחד במינו. **מישור החוף**, יחידת הנוף המערבית של ארץ ישראל, משתרעת מחופי סיני בדרום ועד ראש הנקרה בצפון (איור 12), מוגבלת ממזרחה - בגבעות השפלה ובשדרות ההר, ובמערבה - בים התיכון. המונח '**מישור החוף**' משלב שני מושגים גיאוגרפים נפרדים: מישור וחוף, משמע, מישור החוף של ישראל מהווה יחידת נוף המשלבת טופוגרפיה מישורית וחוף ים, המשפיעים זה על זה. בפרק זה נתמקד בחוף הים.

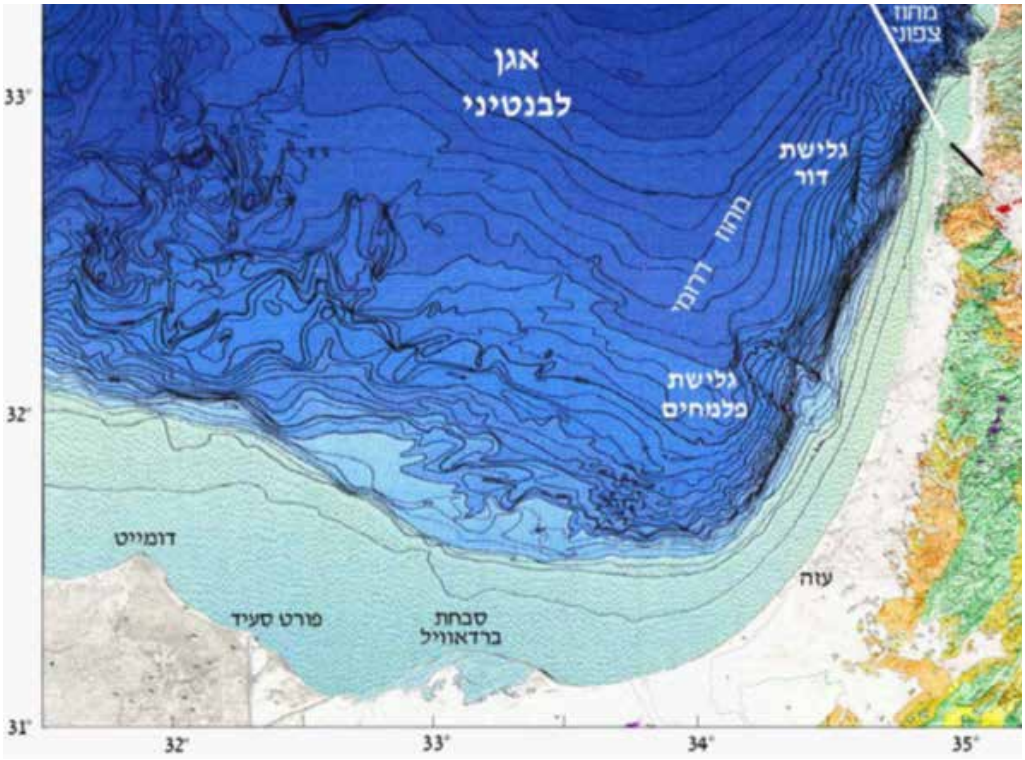
לקו החוף של ארץ ישראל שני מאפיינים בולטים:

1. צורה קשתית של חוף ישר זה, מדרום מערב לצפון מזרח.
2. קו חוף ישר, נעדר מפרצים גדולים, המשתרע מצפון סיני ועד לכרמל.

עידן הרביעון (Quaternary)
1.8 מיליון השנים האחרונות.

חמרה
אדמה עשירה בתחמוצות ברזל, שצבעה חום-אדמדם. מקור השם הוא מהמילה הערבית חמרה - אדומה.

מישור החוף
הוא חבל ארץ מישורי בארץ ישראל, המשתרע לאורך חוף הים התיכון - מראש הנקרה בצפון ועד לגבול מצרים בדרום.



איור 12

שולי היבשת של צפון סיני וישראל: מפתן היבשת ומדרון היבשת מול סיני וישראל (המחוז הדרומי) הם האגף הצפון-מזרחי הטבוע של דלתת הנילוס הוא הולך ונעשה צר ותלול עם המרחק ממוצאי הנילוס, עד לקטיעתו על ידי העתק יגור-כרמל. שולי היבשת מצפון להעתק (המחוז הצפוני) צרים ותלולים מאוד וקניונים רבים חותרים בהם. מפתן היבשת - ירוק בהיר; מישור החוף - אפור בהיר; דלתת הנילוס - אפורה כהה. תצורות גבעיות והרריות - צבעוניות. (אלמגור ופרת, 2012)

קו חוף קשתי

קו החוף הארצישראלי מתמשך בצורה קשתית מצפון-מזרח לדרום-מערב. הסיבה לכך נעוצה במבנה הגיאולוגי של פני הארץ. קיימת התאמה בין צורתו וכיוונו של קו החוף לבין כיוונה של רצועת ההרים שממזרחו (איור 13). התאמה זו גדולה במיוחד במרכז הארץ, בהרי יהודה ובשומרון וקיימת במידה פחותה גם בהרי הגליל ובצפון הנגב. בכרמל, בו חודרים ההרים לים, יש אי-התאמה בין קו החוף לאזור ההר. התעגלות קו החוף בדרום הארץ קשורה להצטברות של חולות.

קו חוף חלק, מועט במפרצים

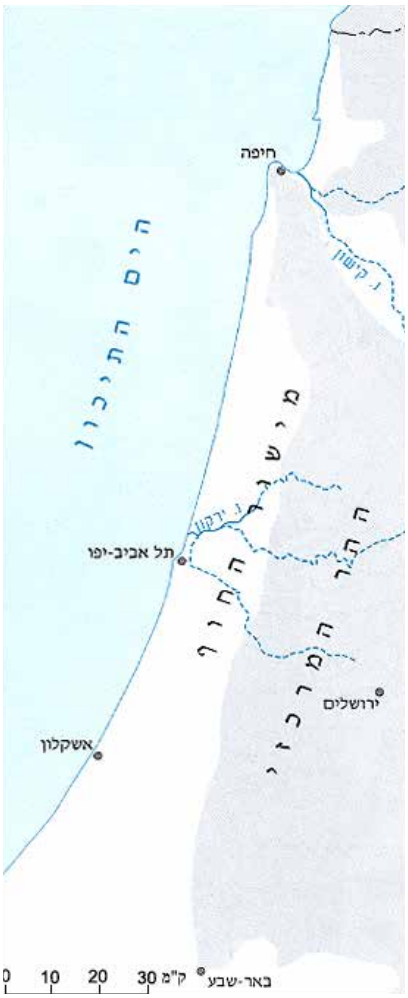
קו החוף של ארץ ישראל, למעט מפרץ חיפה ובליטות קטנות ביפו ובעתלית, הינו חלק וחסר מפרצים. החוף של ישראל מהווה אזור מעבר בין החופים החלקים של דרום הים התיכון וצפון אפריקה לבין החופים המפורצים האופייניים לצפון הים התיכון (מלבנון וצפונה דרך טורקיה ועד לחופי ספרד). שלושת המפרצים בחופה של הארץ, בחיפה, בעתלית וביפו, נוצרו משילוב של תהליכי הרבדה ופעולות טקטוניות. באזור יפו קיימת בליטה בקו החוף, שנוצרה מהימצאותו של קו סיסמי, שגרם להעתקה אופקית של החוף. במפרץ עתלית, נסיגת החוף נגרמה כפי הנראה כתוצאה מההעתק של נחל מערות, שכיוונו דרום-מזרח צפון-מערב ומגיע אל צפונו של מפרץ עתלית העתק זה גרם כפי הנראה להטבעת חלק מרכס הכורכר, כך שחלקו נמצא היום מתחת למפלס פני הים וחלקו יוצר את המצוק החופי המפורץ. גם את מפרץ חיפה יצר תהליך טקטוני ברור. המפרץ נוצר מהזווית שבין קו ההעתק התוחם את הכרמל מצפון לבין קו החוף. גם בחלקו הצפוני נתחם מפרץ חיפה על ידי קו שבר גיאולוגי, המפריד בין הגליל התחתון לגליל העליון ומגיע לחוף מדרום לעכו. לקו זה יש המשך גם במפתן היבשת מתחת לפני הים.

מבחינה מורפולוגית, מרבית החופים בין זיקים וראש עכו חוליים ומתאפיינים ברצועת חוף רחבה יחסית ואחידה, בעלת שיפוע מתון. לעומת זאת, מצפון לראש עכו ועד ראש הנקרה (חופי הגליל המערבי), מרבית החופים סלעיים ומתאפיינים ברצועת חוף צרה בעורף קו החוף הסלעי.

החופים הכורכריים

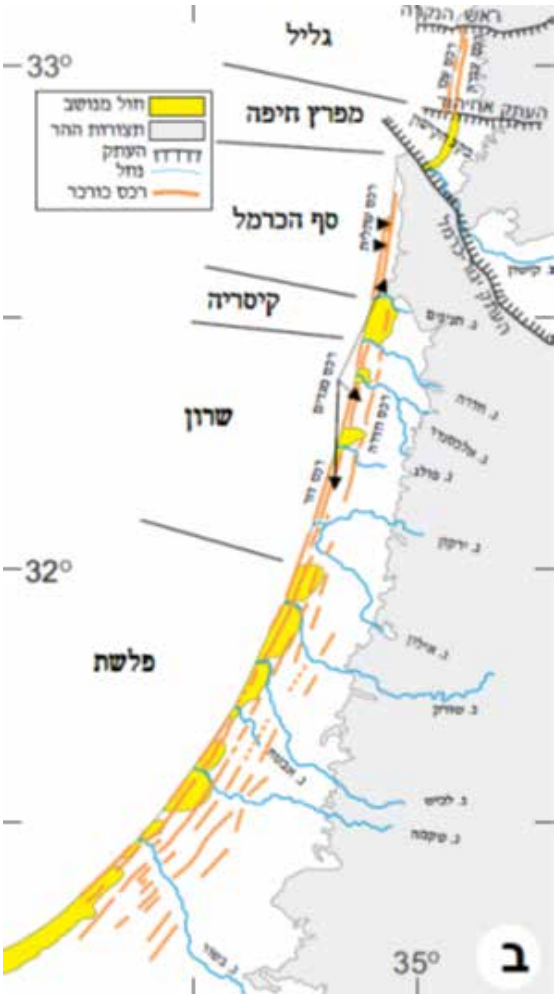
רכסי הכורכר במישור החוף, שומרים אף הם על מתאר החוף הקשתי ויוצרים סדרת רכסים המקבילה לערך לכיוון החוף (איור 14). חלקה המערבי של הסדרה קבור כיום במדף היבשת, תחת מעטה עבה של חול, טין וחרסית. רוחב השתרעות רכסי הכורכר במישור החוף הולך ונהיה צר כלפי צפון ומספרם פוחת, מרצועה שרוחבה כ-23 ק"מ בדרום ישראל, ל-3 רכסים על פני רצועה שרוחבה כ-1.5 ק"מ בלבד באזור השרון. מאלה נותר רכס אחד הממשיך לחוף הכרמל, במבואות הדרומיים של חיפה.

חופים אלו אופייניים לקטע החוף מאזור יפו וצפונה. באזורים אלו מגיע רכס הכורכר המערבי עד לקו המים ויוצר מצוק חופי. בחלק הדרומי של מישור החוף, מיפו ועד לרפיח, המצוק פחות מפותח, למעט קטעים קצרים בחופי ראשון לציון, אשקלון, זיקים וברצועת עזה. לגובהו המירבי (48 מ') מגיע המצוק בחוף השרון.



איור 13

(מימין) **צורת קו החוף ביחס לכיוון ההר המרכזי**



איור 14

(משמאל) **סדרת רכסי הכורכר והנחלים הגדולים במישור החוף (אלמגור ופרת, 2012). החוף חולק ל-6 קטעים בעלי מורפולוגיה ייחודית**

מגבעת אולגה וצפונה, עד לחופי עתלית רכסי הכורכר נמוכים ומקוטעים וברוב המקרים החוף הוא סלעי, עם טבלאות גידוד ולא מצוקי. את מצוק הכורכר המתנשא כמה עשרות מטרים מעל לקו המים חוצים בשרון הנחלים אלכסנדר ופולג, אשר ייתכן שנוצרו עוד קודם להיווצרות המצוק. בדרום נחצה המצוק על ידי נחל עזה. למעט מקרים אלו, לא חוצים את המצוק החופי נחלים גדולים, בשל הקושי של המים לחצות רכס סלעים גבוה.

מצוק החוף של ישראל נוצר ומתחדש ללא הרף, תוך נסיגה מזרחה. גלי הים המציפים את רצועת החוף הצרה ולוחכים את תחתית המצוק (כשהוא נקי מדרדרת), חותרים בה צניר אשר מעמיק בתוך מספר עונות. תהליך העמקת הצניר יהיה מהיר יותר במקרים בהם השכבה העליונה של הכורכר קשה יותר מהשכבות התחתונות. גלי הים, שמכים בדרך כלל בגובה נמוך יחסית, יחתרו בשכבות החלשות וישאירו את השכבה העליונה תלויה ללא בסיס. מאמצי המתיחה במתלול התלוי מעל הצניר, אשר מתעצמים עם גידול משקלו אחרי הרווייתו במי גשם, גורמים להתפתחות סדקים בכורכר שמערערים את יציבותו וגורמים להתמוטטותו. התפוררות הסלע גורמת למרכיביו הגסים להצטבר על החוף ולמרגלות טבלאות הגידוד שבחזיתו, שכן אין בכוח הזרמים לאורך החוף להסיע גרופת גסה למרחקים גדולים. באזור הרצליה וחוף נתניה נראים גושי סלע גדולים על החוף. סלעים אלו שומרים במידת מה על בסיס המצוק משום שהם סופגים ראשונים את מכות גלי הים. שברי הסלעים הקטנים מוזזים ומושלכים ללא הרף על ידי הגלים, נשחקים, מוקטנים, מתעגלים ומקבלים צורה פחוסה, המקלה על המשך הרמתם וסילוקם.

במקומות שבהם נקטע המצוק נוצרו מפרצים זעירים, המהווים מלכודת לסדימנטים בגלל פיזור אנרגיית המים בעקבות התבדרות הגלים הנכנסים אליהם. ככל שהמפרצים חודרים עמוק יותר אל היבשה, מורבדים על חופיהם הפנימיים יותר סדימנטים ומרחיבים אותם. בתוך מפרצים גדולים, אשר פתחיהם הרחבים אינם מונעים כניסת ויציאת מים, מצטבר במשך הקיץ חול רב, המכיל מעט צדפים יחסית ומסולק בדרך כלל בעת סערות החורף. לעומת זאת, במפרצים קטנים וסגורים למחצה, נצברות כמויות גדולות של צדפים בריכוזים עבים (איור 15). הצדפים, אשר מוסעים אל המפרצים האלה על ידי מי הים עתירי-האנרגיה הנכנסים אליהם (בגלל שבירת הגלים ותיעול הזרימה בפתחיהם הצרים), שוקעים ומצטברים בעיקר לאורך חופיהם הפנימיים, המרוחקים מהים, שבהם נחלשת מאוד אנרגיית הגלים הנכנסים. הגלים החוזרים חלשים מאוד, ואין בכוחם להסיע את הצדפים שנלכדו במפרצים, בחזרה אל הים הפתוח.

איור 15

מפרץ הצדפים, חוף הבונים (ענת סקילי)

בחלק הצפוני של מישור החוף, מחיפה וצפונה, בונה רכס הכורכר המזרחי את קו החוף. באזור זה טבוע רכס הכורכר המערבי בתוך הים, חלקו הגדול נהרס ושייריו נראים מעל פני הים בשורה של איים קטנים הנמצאים במרחק של 2-4 ק"מ מהחוף. ההיצרות ברוחב מדף היבשת מצפון לראש עכו, נובעת מכך שאזור זה נמצא מצפון לתא החופי של הנילוס ולכן סובל מדלילות באספקת הסדימנטים ביחס לחלק הדרומי. כמו כן, בלית הכורכר בצפון רבה יותר, שכן הוא מורכב מחול גירני, המתבלה ביתר קלות מהחול הצורני.

גם האזור החופי, המשתרע מתחת לפני המים, באזור שמצפון למפרץ חיפה, הוא ייחודי: שולי מדף היבשת, בעומקי מים של כ-75-80 מ' משוננים כתוצאה מהתחתרות קניונים מקבילים וצפופים, שהתפתחותם קשורה גם לתנועות טקטוניות על העתקים החוצים את המדף באזור זה. קצב הסרת הסדימנטים בתהליכי כבידה, בשילוב עם תנועות טקטוניות אנכיות, גוברים על שטף הסדימנטים הקטן יחסית וגורמים למורפולוגיה מחורצת.

רכסי הכורכר לאורך החוף הישראלי

הכורכר, הוא סלע חופי המהווה עדות מובהקת לקו חוף קדום, שכן סביבת יצירתו היא בקו מגע של חוף וים. דיונות שהתפתחו בקווי חוף קדומים, התייצבו והתאבנו עם הצפתם, יצרו מצוקי הכורכר בתהליכי הצפה ונסיגה של הים התיכון במהלך מיליון השנים האחרונות (תור הרביעון). חמש הצפות של מישור החוף במי הים-התיכון - כל אחת בקו שונה מרעותה - הותירו במישור החוף עקבות של קווי החוף הקדומים בצורה של רכסי כורכר מקבילים.

ההצפה הקדומה בסדרת ההצפות - ההצפה הסיצילינית הקדומה (לפני כ-700,000 שנה) - הותירה מצוק וצנירי גידוד במדרונו המערבי של הכרמל, בגובה של 90 מ'. ההצפה הבאה - ההצפה הסיצילינית המאוחרת (לפני כ-500,000 שנה) - הותירה את עקבות קו החוף שלה בצורת רכס כורכר שגובהו כ-60 מ' באזור ניר עם שבנגב (חרבת חרב), וכן בצורת סלע חופי שגובהו גם כן כ-60 מ' באזור אופקים.

ההצפה השלישית - ההצפה הטירנית הקדומה (לפני כ-250,000 שנה) - הותירה במישור החוף את **רכס הכורכר המזרחי**, שגובהו כ-30 מ'. זהו הרכס הרצוף ביותר - מצפון סיני ועד לראש הנקרה, עליו בנויות הרצליה, רעננה, חדרה ובנימינה. ממערבו - כביש 4.

ההצפה הטירנית התיכונה (לפני כ-100,000 שנה) הותירה את **רכס הכורכר התיכון**, שגובהו 15-18 מ'. על רכס זה בנויים יישובי החוף - נתניה, בית ינאי, הבונים, עתלית והוא מהווה מחסום בדרכם של רוב נחלי מישור החוף אל הים. ברבים מהם נפרצו פרצות מלאכותיות בידי האדם במהלך ההיסטוריה (נחלי דליה, מערות, פולג, הרצליה). בין שני רכסים אלה התקיימו ביצות עד לדורות האחרונים. כאן עוברת מסילת הברזל וכביש 2.

ההצפה הטירנית המאוחרת (לפני כ-50,000 שנה) הותירה את **רכס הכורכר המערבי**. כתוצאה מעליית פני הים לאחר מכן, נשאר רכס זה תת-ימי ברובו, עם שרטונות ואיים קטנים הבולטים מעל לפני הים, במקביל לקו החוף הנוכחי, כגון איי חוף אכזיב, איי חוף דור ואי יונים שמול מעגן מיכאל. רכס זה מתגלה גם באשקלון, פלמחים, בת-ים ויפו.

בין רכסי הכורכר משתרעים שטחים נמוכים, הנקראים **אבוסים** (כינוי לעמקי האורך של מישור החוף. בהיותם מוגבלים בשני צידיהם ברכסים, נראים העמקים כאבוסים), בגלל הניקוז הגרוע שלהם והתהוות ביצות עונתיות. כיום מנוצלים האבוסים לבריכות דגים ולהעברת קווי תחבורה (כביש, מסילת-ברזל) בין הרכסים, במקביל לקו החוף.

כך קרה, שהמשקעים הבונים את מישור החוף הם ממוצא ימי ויבשתי כאחד, ונקראים בשם "**חבורת הכורכר**", על שם המאפיין העיקרי שלהם - סלעי הכורכר. "חבורת הכורכר" הגיאולוגית, כוללת גם חומרים בלתי מלוכדים - חול, חמרה וקרקעות אחרות, המשתלבים בין שכבות הכורכר:

הכורכר, אבן חול קוורצית (**קוורץ** = תחמוצת צורן SiO_2, מינרל גבישי שקוף וקשה. הקוורץ מרכיב את אבני החול והגרניט) מלוכדת בקרבונאט ($CaCO_3$), מאפיין במיוחד את חופי מרכז הארץ במצוק חופי מרשים. החול הוסע ע"י הרוח בזמן ירידת פני הים, כלומר מקורו ימי.

הכורכר מתאפיין לעתים ב**שיכוב צולב** שמקורו בדיונות מהן נוצר. הוא כולל הרבה שרידי אורגניזמים כמו שבלולים, דפוסי חלקים מן הצומח (ענפים, שורשים, גזעים ושיחים) המעידים על פסקי זמן בהתפתחות הרכס, שאפשרו ייצוב פני השטח והתפתחות צמחיה.

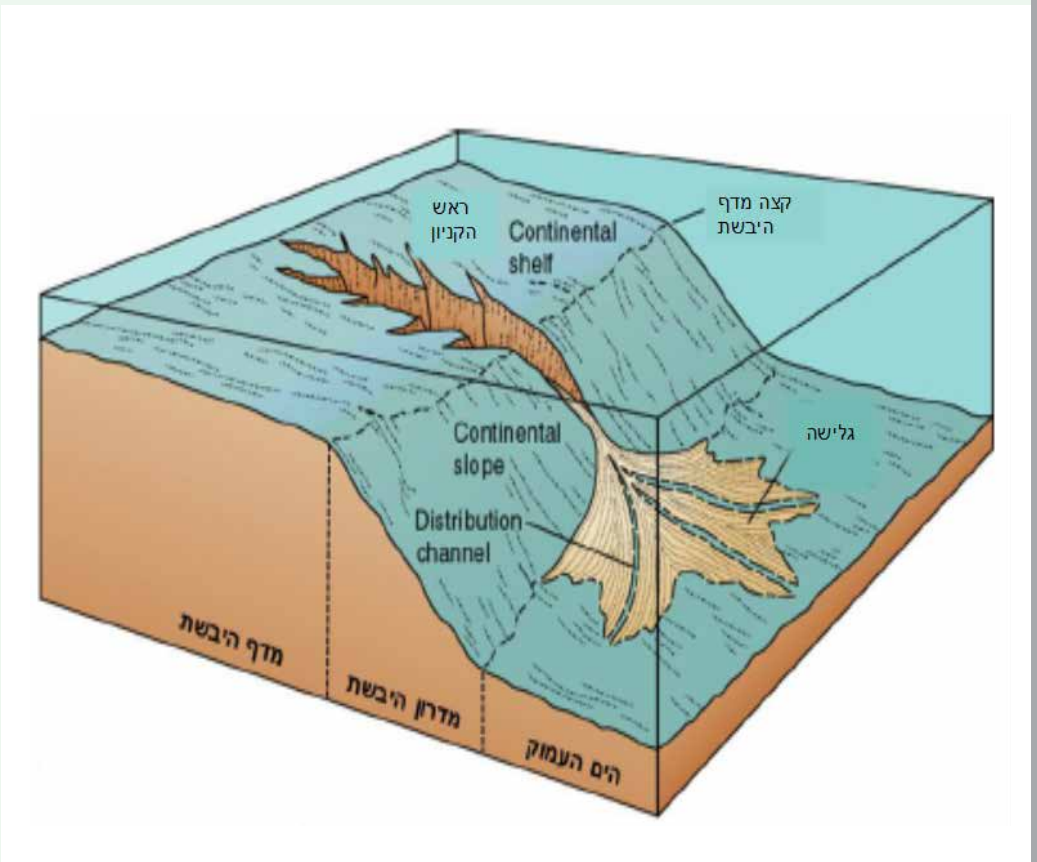
החמרה (אדומה בערבית), היא שכבת חול-טין אדום המופיעה במזרח מישור החוף כגבעות העשויות להגיע לגובה 50 מ', ובמערבו היא משולבת בדרך כלל ברכסי הכורכר. צבעו האדום נובע מחמצון שאריות הברזל הנמצאות בו, על ידי שטיפה באמצעות הגשמים. מקורה יבשתי. זמן היווצרות החמרה ארוך יותר מהכורכר ולכן השכבות של החמרה יהיו דקות יותר מאלו של הכורכר. ליד החמרה, מצויות בחבורת הכורכר גם שכבות כהות, העשירות בחומר אורגאני, עד כדי יצירת כבול הביצות באזורים הנמוכים ביותר.

החופים החוליים

מרבית החופים החוליים בארץ מצויים מאזור יפו ודרומה. חולות החוף כיסו את השטח בתקופה גיאולוגית מאוחרת יחסית, בתקופת הרביעון. החולות חדרו למעמקי מישור החוף באותם מקומות שבהם לא נחסמו על ידי מכשולים טופוגרפיים. החולות במישור החוף מגיעים משני מקורות עיקריים:

א. חולות שמקורם בבלית סלעי ההר. חולות אלו מכילים מרכיבים גירניים. תהליכי סחיפה מביאים את הבלית המתרכזת בעיקר בשפכי הנחלים ולמרגלות ההרים.

ב. חולות המגיעים מהים. חולות אלו מכילים מרכיבים צורניים (קוורציים). גלי הים וזרמיו מעבירים את החולות מאזורים שמדרום לארץ ישראל. חולות אלו נוצרו בבליה של סלעי יסוד המצויים במרכז יבשת אפריקה, בהרי אתיופיה ובסודן והם נשאו אל הים התיכון בעיקר על ידי מי הנילוס. הצטברות המשכית של סדימנטים המוסעים מדרום לצפון, גורמת לכך שרוחבו של המדף הישראלי מצטמצם מ-30 ק"מ באזור רצועת עזה ועד לכ-5 ק"מ באזור ראש הכרמל. באזור מפרץ חיפה מתרחב המדף לכ-14 ק"מ ושוב מוצר צפונה עד כ-2-3 ק"מ באזור קניון אכזיב. משקעי הנילוס המורבדים על מדף היבשת, מפעילים לחץ על המדף וגורמים לשקיעתו, בתהליך איטי ביותר, בעוד שדרת ההר הולכת ומתרוממת.

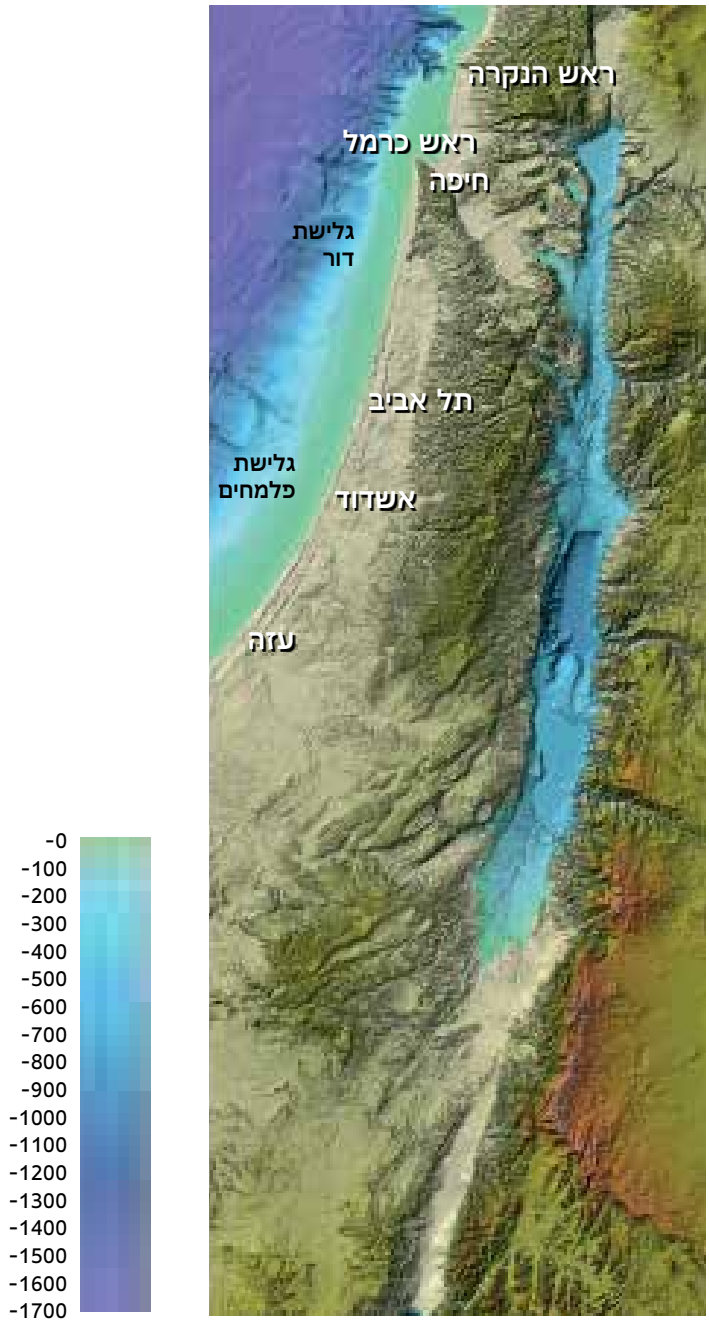


תזכורת.

קרקעית הים בסמוך לשולי היבשת מתחלקת למספר קטעים:
מדף היבשת - שטוח ורדוד יחסית (עד כ-100 מ' עומק מים); הים העמוק אשר יכול להגיע לעומק מים של מספר אלפי מטרים - תחתית הים העמוק במזרח הים התיכון מצוי בעומקים של מעל 1511 מטר; **מדרון היבשת** הוא אזור תלול יותר שמחבר בין שני האזורים הקודמים. במדרון היבשת מתפתחות תופעות של גלישות וחוצים אותו קניונים תת-ימיים שדרכם מובלים סדימנטים ממדף היבשת הרדוד לים העמוק.

שיפוע המדף משתנה מדרום לצפון: השיפוע הממוצע של מדרון היבשת עולה מ-1.20 באזור אשקלון לכ-3.50 מול חוף כרמל ועד לכ-5^0 מול מישור חוף הגליל. ערכיו המרביים מגיעים עד 18^0 בחלק הצפוני (קניון אכזיב). במקומות בהם עולה השיפוע הבתימטרי על שיפוע קריטי מסוים, שמעליו מתערערת יציבות המדרון, מתרחשות גלישות (slumping) של הסדימנטים ונוצרות 'צלקות גלישה' בחלקו של מדף היבשת הפונה למדרון.

מדרון היבשת, בחלק שבין סיני לראש הכרמל, מופר במקומות רבים על-ידי מערכת מורכבת של גלישות סדימנטים (איור 16), המתרחשות, בין היתר, כתגובה לרעידות אדמה. דור ופלמחים הם שני מכלולי הגלישה הגדולים שהתפתחו לאורך חופי הארץ, שטחם כ-650 וכ-1,000 קמ"ר, בהתאמה.



איור 16

בתימטריה של מדף היבשת של ישראל, מפת בסיס
(Hall, 2005)

10.3 הסעת החול לאורך החוף הארץ ישראלי הים-תיכוני

כפי שלמדנו בפרק 10.2, החוף הישראלי הים-תיכוני נחלק מבחינה מורפולוגית לחוף צפוני (ראש הנקרה עד עכו) ולחוף דרומי (עכו עד זיקים), אשר מהווה חלק מ'התא הליטורלי (חופי) של הנילוס'.

1. התא החופי של הנילוס

נהר הנילוס, שראשיתו לפני כ-6 מיליון שנה, פעיל בגלגולו הנוכחי לפחות מאז תקופת הפלייסטוקן התיכון, כ-200,000 שנים קדום להיום. הנהר סיפק את הסדימנטים אשר בנו את הדלתה שלו, את המשכה התת-ימי ואת מדרגת היבשת של צפון סיני, ישראל ולבנון. הדלתה הנוכחית, אשר נוצרה לפני כ-6-8 אלפי שנים וצורתה המוכרת כיום עוצבה ב-2,000 השנים האחרונות, משתרעת על פני כ-22,000 קמ"ר. הסדימנטים הדקים, הנסחפים משולי הדלתה על ידי גלי סערה, אינם יכולים לשקוע בחזית החוף עתירת הגלים והזרמים ומתפזרים על ידי גלים וזרמים לחופי דרום-מזרח הים התיכון.

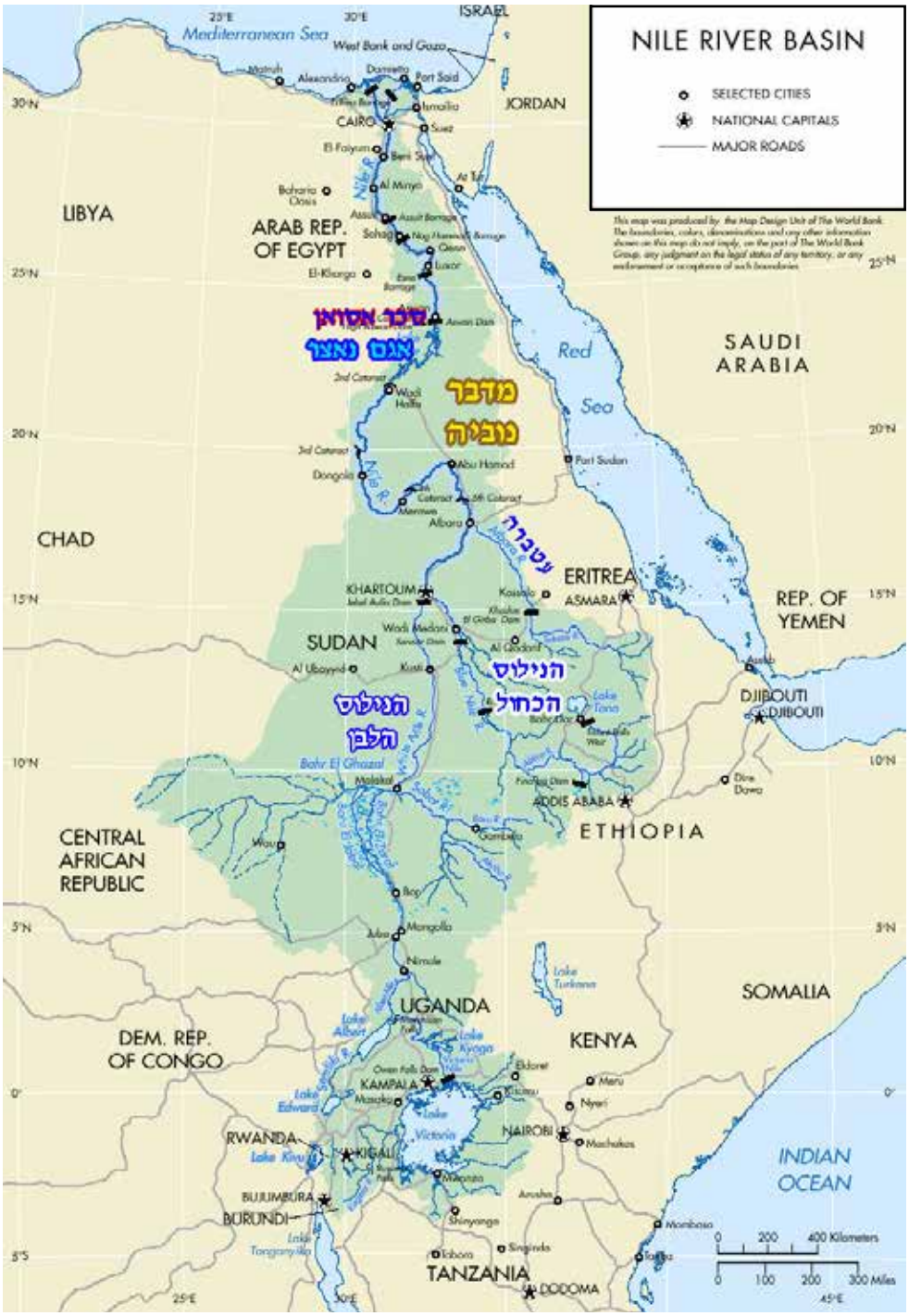
חופים אלו, הנמשכים לאורך כ-650 ק"מ ממפרץ אבו קיר (Quir Abu) הנמצא מזרחית לעיר אלכסנדריה שבמצרים ועד לצפון מפרץ חיפה, שייכים לתא חופי מהגדולים בעולם, המכונה "התא הליטורלי של הנילוס" (איור 17).

בתא חופי זה מתקיים מחזור סדימנטרי שלם הכולל: מקור (הנילוס) שסיפק את עיקר הסדימנטים לתא, זרמים המסיעים את הסדימנטים לאורך חופי התא, ואזורי שקיעה סופיים בהם מורבדים הסדימנטים היוצאים מהמערכת הפעילה של התא.

איור 17

חופי "התא הליטורלי של הנילוס"
(צביאלי, 2016)

רוב החול של הנילוס מקורו במחשופי אבן חול נובית במצרים העליונה, שהלכו ונהרסו על ידי הנהר וסיפקו לסחף כמויות עצומות של חול קוורץ (קוורץ = SiO_2, מינרל גבישי שקוף וקשה) עדין גרגר (איור 18). חול זה נוצר ברובו מבליית סלעי גרניט השכיחים במדבר נוב (צפון-מזרח סודן). בחולות הנילוס מצויים גם מינרלים שחורים בכמויות קטנות (כ-3-5% מכלל הסחף של הנהר), שהתבלו מסלעי בזלת הנפוצים ברמת חבש (אתיופיה). מינרלים אלה מהווים סמן של חולות הנילוס המבדיל אותם מחולות אחרים.



איור 18

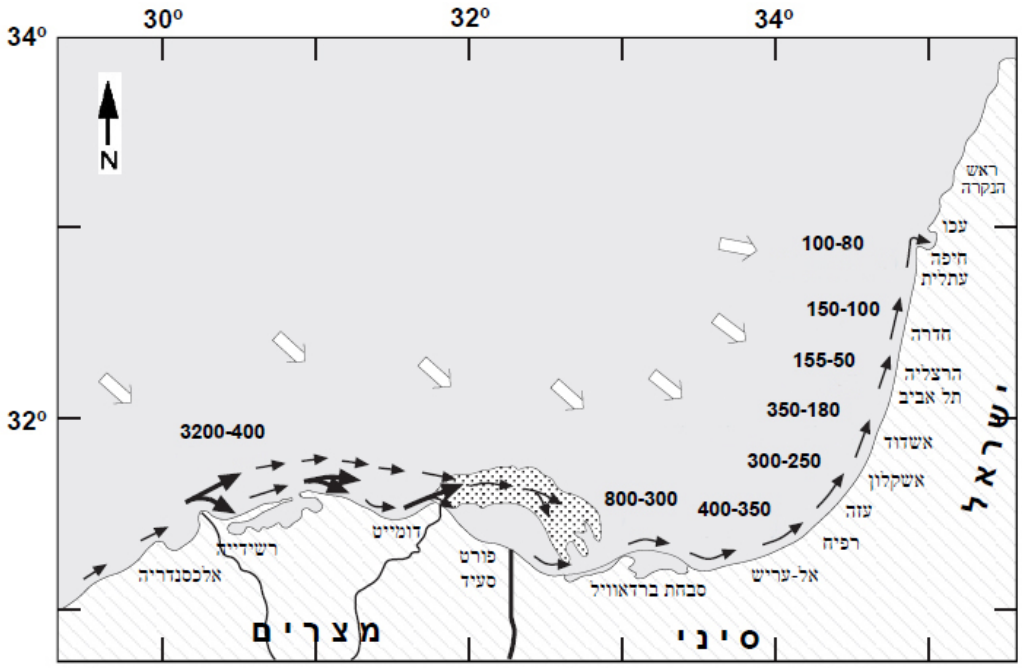
הנילוס ומקורותיו
(צביאלי, 2016)

קודם לסכירתו באסואן, הביא נהר הנילוס מידי שנה כ-150 מיליון מ^3 סחף מצפון-מזרח אפריקה אל הים התיכון המזרחי והשקיע אותו בדלתה ובשולי היבשת. חלק מהרכיב החרסיתי של הסחף המשיך לצוף במי הים עוד ימים מספר לאחר הגיעו ואז הוא נישא אל מדרון היבשת ואל חלקו העמוק יותר של הים התיכון המזרחי. הרכיב החולי של הסחף נשאר בשפת הים ובמדף היבשת הרדוד.

כיוון הסעת חולות מהנילוס לחופי ישראל מבוסס על שתי מערכות הסעה:

- הזרמים החופיים, אשר כיוונם משתנה ממקום למקום, בהתאם לכיווני הגלים. בים התיכון המזרחי המשברים של גלי הים המתנפצים אל החוף באים ממערב והכיוון של חופי סיני הוא מזרח-מערב. לכן יוצרים הגלים זרם חופי חזק הזורם במקביל לחוף ומסיע איתו את החול מהדלתה של הנילוס לאורך חופי סיני משם לחופי ישראל. כיוון הזרם החופי נקבע בעיקר על פי הפרש הזווית המתקבלת בין אזימוט החוף (כיוון יחסית לצפון), לחזית כיוון הגלים אל עבר החוף. מכאן, שככל שאזימוט החוף נוטה יותר מזרחה, כמו בדרום ישראל, ההפרש הזוויתי לעיל, יהיה גדול יותר. כתוצאה מכך בחופים כדוגמת אשקלון ואשדוד, הסעת החול תהיה תמיד גדולה יותר באופן משמעותי בהשוואה לחופי מרכז ישראל וצפונה. ראיה לכך הם מרחבי חוליות (דיונות) בדרום, המשתרעים לעתים על פני קילומטרים רבים במישור - חולות עגור וחולות חלוצה במישור חוף הנגב וחולות זיקים-אשדוד במישור חוף יהודה. חוליות אלו הן פרי הסעה של חולות מדלתת הנילוס. לעומת זאת, במרכז ישראל ובצפונה, אזימוט החוף שואף יותר לכיוון צפון ולכן ההפרש הזוויתי ביחס לכיוון הגלים, קטן יותר באופן משמעותי. דבר זה גורם לעיתים תכופות להיפוך בכיוון הסעת החול לאורך החוף במים רדודים (עומק קרקעית 5-0 מ').
- הזרם הים-תיכוני הכללי, אשר זורם מעבר לאזור המשברים (offshore zone) ואינו מושפע מהרוחות המקומיות. ברוב הזמן (לפחות 70% מהשנה) כיוון הזרם הוא מדרום לצפון והוא נוטה לנוע במקביל לקווי העומק המקומיים. המהירות הממוצעת של הזרם החופי היא כ-10 ס"מ לשניה, ובסערות החורף הפוקדות את החוף מכיוון דרום-מערב (אזימוט 282, שם מרחב הנשיבה (fetch) הוא הגדול ביותר בים התיכון ומשתרע למרחק של 2,200 ק"מ עד סיציליה), יכולה להגיע ל-60 ס"מ לשניה.

חוקרים מעריכים כי עיקר הסעת החול לאורך החוף הישראלי מתקיימת באזור החופי (מושרה-גלים) וכי תרומת הזרמים מעבר לאזור המשברים (מושרי-הרוח) להסעת החול באזור החופי היא זניחה. על פי חישובים בעזרת נוסחאות ומודלים, מעריכים כי כמויות שטף החול, המוסעות על ידי זרמים מושרי-גלים ומושרי-רוח גם יחד, עומד על מעל 400,000 מ"ק באשקלון, כ-200,000 מ"ק באשדוד, כ-100,000 מ"ק בהרצליה וכ-70,000 מ"ק בחוף כרמל. כף עכו בצפון מפרץ חיפה יוצר מכשול טבעי להסעת חולות הנילוס צפונה והופך את מפרץ חיפה לאזור השקיעה הסופי של חולות אלה (איור 19).



איור 19

התא החופי של הנילוס בין רשידייה לעכו: נפחי החול המוסעים לאורך החוף קטֵנים עם המרחק ממוצאי הנילוס. המספרים המודגשים מציינים אומדנים ממוצעים של כושר ההסעה של החול באלפי מטרים מעוקבים לאורך חופי התא הנילוטי.
(אלמגור ופרת, 2012)

אספקת חול ממקורות נוספים לנילוס

מלבד החול מהנילוס, מוסעות בתא החופי גם כמויות גדולות של חול ממוחזר ורסיסי סלע, כתוצאה מההרס (הגידוד) של רכס הכורכר החופי, חול ביוגני וסחף מנחלי ישראל, אשר הופך משמעותי רק בעת שטפונות עזים ונושא עימו טין וחרסית אל החוף והים. לעיתים רחוקות מביאות גם סופות אבק, שמקורן בסיני ובלוב, כמויות קטנות של קרבונט וקוורץ דק-גרגר.

2. התא החופי של הגליל המערבי

צפונה לראש עכו ועד לראש הנקרה, משתרע תא חופי קטן ומקומי של הגליל המערבי. תבנית הזרמים מול חוף הגליל שונה מאוד מזו שמדרום לכרמל, בגלל אופי הקרקעית השונה של מפתן היבשת. במפתן זה, התלול יחסית, אין הגלים נוגעים בקרקעית עד שהם קרובים לחוף ולפיכך הם אינם מאבדים הרבה אנרגיה על ידי חיכוך בקרקעית. רכסי הכורכר הטבועים, המצויים במרחק של 1-2.5 ק"מ בלבד מהחוף (מדרום לצפון) גורמים לשבירה מוקדמת של הגלים שבסיסם נתקל ברכסי הכורכר ומאפשרים לגלים הרדודים יותר להגיע ולהישבר סמוך לחוף וליצור זרמים חזקים לאורך החוף. כיוון הזרימה משתנה באופן תדיר, שכן קו החוף כמעט מקביל לחזית הגלים הפוגעת בו ולכן שינויים קטנים בזווית הפגיעה של חזיתות הגלים בחוף, גורמים להיפוך כיוון הזרימה. השינויים התכופים בכיוונים ובעוצמת הזרמים החופיים, גורמים להסעה מתמדת של חול לאורך חופי הגליל, אשר חלק ניכר ממנו אינו מגיע לחוף ומתפזר על פני מפתן היבשת הצר ומדרונו. באופן כללי, תהיה פעילות של הסרת חול בסערות החורף והרבדתו בקיץ.

הסדימנט השכיח בתא חופי זה הוא חול גס-גרגר ממוצא ביוגני ימי, פאונה ימית וחלוקים שונים ממוצא יבשתי. תכולת הקרבונט הממוצעת בחולות חוף הגליל המערבי גבוהה מאוד (80-90%), בעוד שבחופי דרום ומרכז ישראל, תכולת הקרבונט הממוצעת היא עד כ-8% בלבד.

בחוף הכרמל הצפוני ובחופי מפרץ חיפה, תכולת הקרבונט הממוצעת גבוהה יותר ויכולה להגיע עד כ-30%. עלייה זו היא תוצאה של רכסי כורכר רבים הנמצאים באזור החוף ובאזור הרדוד של מדף היבשת.

בתא חוף זה יש שכיחות ניכרת של רוחות צפוניות וצפון-מערביות, ואילו כיוון החוף הכללי דרום-דרום-מערב לצפון-צפון-מזרח, כך שהזרימה החופית כאן היא לעתים מצפון לדרום, אך בעוצמה חלשה בהרבה, אולי גם בשל טבלאות הגידוד הרצופות המעכבות את התקדמותה.

השפעת פעילות האדם על הסעת החול לאורך החוף הישראלי

1. **כריית חול ברצועת החוף** - עד ראשית המנדט הבריטי שימשו לבנים שנחצבו וסותתו מסלעים מקומיים (לדוגמה: כורכר, סלע חוף, גיר, דולומיט ובזלת) מרכיב עיקרי להקמת מבנים בארץ ישראל. בשנת 1922 נוסד דרומית לחיפה בית החרושת למלט 'נשר' ושלוש שנים מאוחר יותר, יוצר שק המלט הראשון שהיה באיכות גבוהה יותר מהמלט שיובא מאירופה. מאז, החל שינוי הדרגתי בשיטת הבנייה בארץ והבטון הפך להיות מרכיב דומיננטי לבניה. ייצור הבטון דרש מלט וחול שנכרה מהחופים והדיונות הסמוכות. עם העלייה הגדולה לאחר מלחמת העצמאות, הקימה המדינה במהירות עשרות אלפי בתים ושיכונים חדשים, שדרשו כמויות חול גדולות שנכרו מאזור החוף (איור 20). חול זה מכיל בתוכו חלוקי כורכר ורסק צדפים, אשר מטייבים את הבטון המופק ממנו וזאת השוואה לחול המופק מדיונה הנמצאת בפנים היבשת המרוחקת מאות מטרים עד קילומטרים ספורים מקו החוף. כריית החול בשפת הים בוצעה על ידי "גילוח" פני השטח עד לגובה פני הים, או חפירת בורות שעומקם מספר מטרים. בקטעי חוף שבהם היו סלעי חוף בקו המים, שהפריעו לפעילות הכרייה, רוסקו ונעקרו הסלעים ממקומם ונערמו בעורף החוף.

איור 20

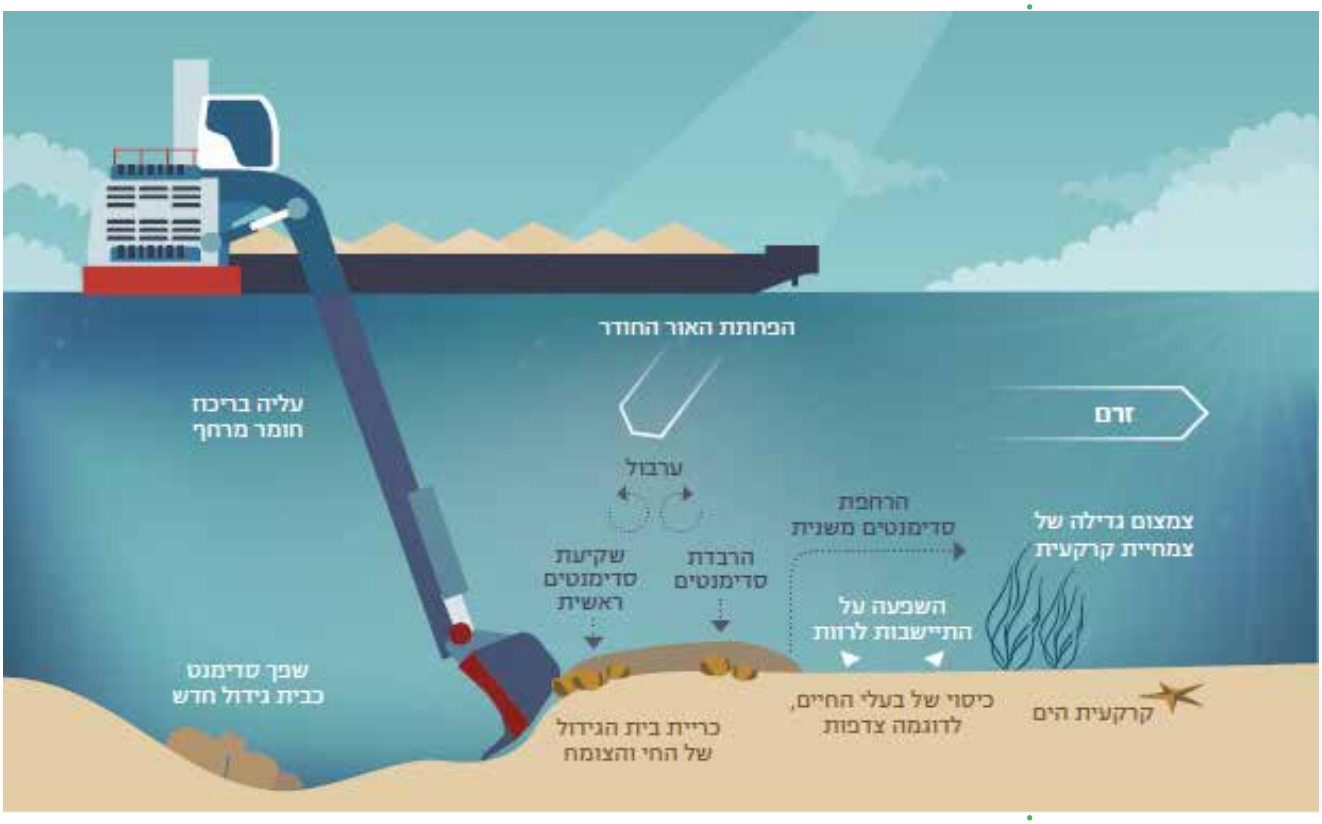
כריית חול מאזור החוף

על פי הערכה, ניכרו בחופי ישראל כ-6 מיליון מ"ק חול מתחילת המאה ה-20 ועד סוף תקופת המנדט, ועוד כ-4 מיליון מ"ק חול בשנים 1948-1964. כתוצאה מפעילות הכרייה האינטנסיבית ברצועת החוף, נוצר גירעון במאזן החול בקטעי חוף רבים, דבר שגרם לנסיגת קו החוף מזרחה ולצמצום רצועת החוף החולית, עד כדי עשרות מטרים בחופים מסוימים. בשנת 1964 הוקמה ועדה לבדיקת נושא כריית החול בחוף הים (ועדת הזיפזיף) שהמליצה על הפסקת הכרייה באזור החוף. בעקבות המלצת הועדה הוציא שר הפיתוח והשיכון דאז, יוסף אלמוגי, צו בדבר הכרזת אזור סגור האוסר, בין השאר, כריית חול בשטח שגבולו 150 מ' מזרחה לקו חוף הים התיכון ו-150 מ' מערבה לו. רבים מחופי ישראל בהם הקיימה כריית חול אינטנסיבית נשארו מצולקים ולא השתקמו שנים רבות ואחדים, כמו חוף הגליל המערבי, חשופים מחול גם היום.

2. **חפירת חול ימי** - פעולות חפירה תת-ימית של חול וסדימנטים אחרים, שכיחה לאורך החוף הישראלי לצורך הקמת נמלים ופיתוחם, שמירת עומקי תפעול של אוניות בתעלות שייט ובפתחי כניסה של נמלים, במעגלי התמרון של אוניות גדולות ובאזורי עגינה ליד רציפים (איור 21). מרבית החול שנחפר לצורך 'תחזוקת עומקים' בנמלים, מרינות ובריכות מי הקירור של תחנות כוח, הוטל בעומק מים גדול מ-6 מ', עקב מגבל השוקע של אוניית המחפר. אתרי הטלת החול מוקמו בדרך כלל במרחק שאינו עולה על 5 ק"מ מאזור החפירה. חול ימי המכיל חומרים מזהמים שאינם עומדים ב'תקני סביבה לאיכות מי הים התיכון בישראל', נחפר וסולק לאתר פסולת בים, הנמצא מעבר למדף היבשת מול חופי ישראל, בכפוף להיתרים. לאתרים אלו מסולקים גם סדימנטים דקים

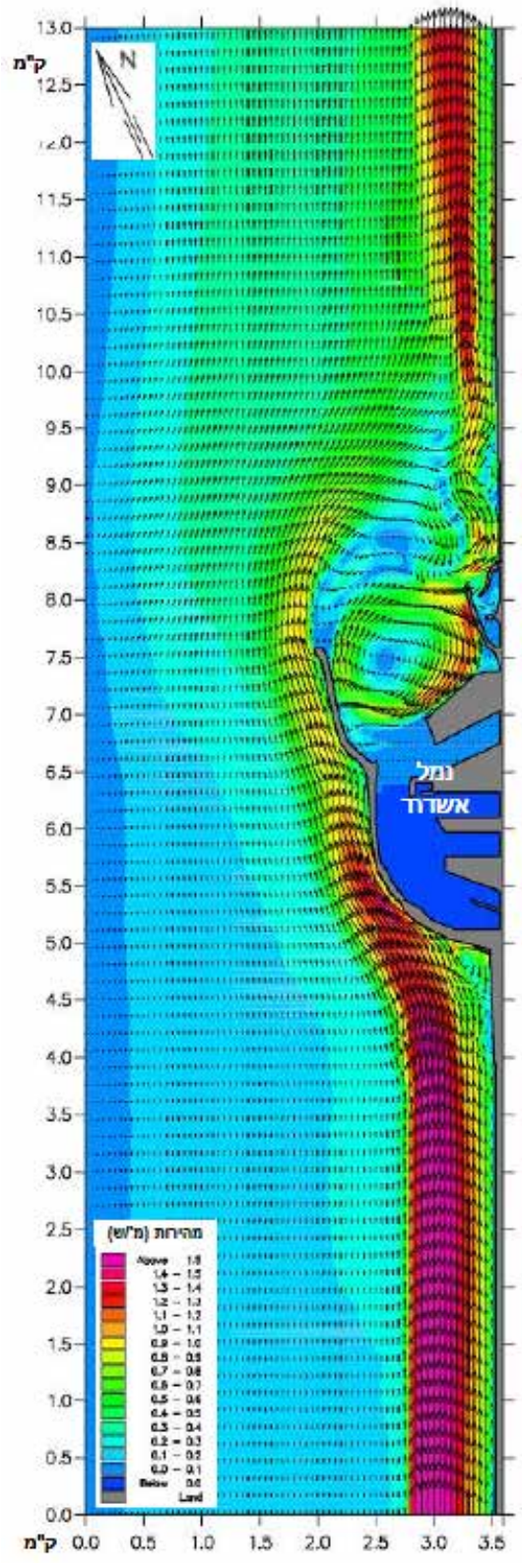
איור 21

השפעות סביבתיות אפשריות של כריית חול ימי (ברוקוביץ' וסימוביץ', 2015)



(טין וחרסית) שאינם מתאימים למילוי מבנים ימיים או שימוש חופי ומשקעי נמל מזוהמים, הרבודים בדרך כלל בשכבה העליונה של קרקעית הנמל והמרינות. עד לשנת 2016 נחפרה באזור הרדוד של מדף היבשת של ישראל כמות סדימנט (חול, טין וחרסית) הנאמדת בכ-20 מיליון מ"ק. מכלל כמות זו, כ-10 מיליון מ"ק חול שימשו למילוי רציפים וייבוש שטחים בנמלים ובמרינות.

3. **ההשפעה המורפולוגית של הקמת מבנים ימיים וחופיים** - מעל חמישים מבנים ימיים נמצאים כיום לאורך חופי הארץ - נמלים, מרינות, בריכות מי קירור של תחנות כוח חופיות, מזחים לפריקת פחם, שוברי גלים מנותקים, דורבנות ומבנים חופיים אחרים (פרק 10.4).
מחקרים מראים כי לגודלו הפיזי של המבנה הימי, אטימותו למעבר זרמים דרכו ובעיקר למרחק חדירתו אל ים בניצב לקו החוף, השפעה רבה על מידת השינויים מורפולוגים בחופים הסמוכים אליו ובקרקעית הים שבסביבתו. מבנים ימיים מחלישים את עוצמת הזרם החופי ולפיכך כושר ההסעה של הזרם פוחת וגורם להצטברות החולות, במעלה זרם החוף, ליד המכשול. למרות שמעבר למכשול, במורד הזרם, חוזרים הגלים ופוגעים בחוף ללא הפרעה וזרימת הזרם החופי מתחדשת (איור 22), אין בחוף שמעבר למכשול, סדימנטים חוליים זמינים (משום שנבלמו על ידי המכשול המלאכותי) והזרם החופי מסלק ממקומם את הסדימנטים המצויים בחוף. התוצאה היא בליה חריפה של החוף. כך לדוגמה, גרמה בניית שובר הגלים של המרינה בחוף אשקלון לצבירת חולות מדרום לה ולהרס חוף ברנע שמצפון, ובניית המרינה בהרצליה גרמה לפגיעה במצוק החופי של הרצליה פיתוח.



איור 22

תבנית זרימה סביב נמל אשדוד
(אלמגור ופרת, 2012)

כאשר נבנו דורבנות בקו החוף על מנת להגן, בהצלחה לא מבוטלת, על החוף של הרצליה פיתוח, נדדה הבליה החופית לחופי נוף ים ואפולוניה. השינויים המורפולוגים המשמעותיים יותר מתפתחים תוך שנים ספורות לאחר הקמת המבנה ועם הזמן, מתייצבת מחדש המורפולוגיה בסביבתו. עוד על השפעת המבנים הימיים על הסעת החול בכתבה: החולות נסחפים והתכווצות החופים בישראל מחריפה.

4. **סכירת הנילוס** - במהלך המאה ה-20 נעשו פעולות רבות לסכירת הנילוס, בראשם הקמת הסכרים באסואן. עקב כך, ירדה דרמטית ספיקת מימי הנהר ופחתו כמעט לחלוטין כמויות החול, הטין והחרסית הגדולות שהובלו אל הים התיכון. כתוצאה מכך, התפתחו תהליכי סחיפה דרמטיים בחופי הדלתה ובמדף היבשת הרדוד מולם. מאז הקמת סכר אסואן "הגבוה" (1965), מהווים חופי הדלתה של הנילוס וקרקעית הים הסמוכה אליהם, מקור החול העיקרי המזין את התא הליטורלי של הנילוס. על פי הערכות יחלפו מאות שנים עד שמאגרי החול האדירים בדלתה יסחפו ויעלמו וגם לאחר מכן יהיו עדיין עתודות חול גדולות מאוד לאורך חופי צפון סיני ורצועת עזה שיבטיחו את המשך הסעת החול אל חופי ישראל.

סכירת הנילוס, בניית מחסומים מלאכותיים להתקדמות זרמים המסיעים חולות לאורך החוף, כריית חולות ושינויים נוספים ידי אדם הובילו לכך שמאזן החול לאורך רוב חופי המדינה הוא שלילי. אם נוסיף את התערבות האדם בתהליך הסעת החול, לעובדה כי רכס הכורכר החופי הוא בלתי יציב מלכתחילה, נקבל נסיגה מהירה של החוף. השרידים הארכיאולוגיים באשקלון ובארסוף-אפולוניה מעידים שבתקופות ההיסטוריות היה הרס איטי ואילו לאחרונה - הרס מואץ: בבדיקות שנערכו על פי נתונים המשתרעים על יותר מחמישים שנה (מפות, צילומי אויר ומדידות בשטח), הגיעו חוקרים למסקנה שקצב נסיגת מצוק הכורכר באזור בית ינאי הוא בין 15 ל-30 ס"מ לשנה, ואילו באזור חבצלת השרון הוא מגיע ליותר מ-50 ס"מ לשנה, לעומת נסיגה מוערכת של כ-3-5 ס"מ לשנה, ללא השפעת האדם. משמעות הדבר עבור מקומות רבים לאורך חופי הארץ היא שכמות החול, כמו גם שטחי החוף, הולכים וקטנים. ישנם חוקרים הטוענים כי גם אם בעתיד תיפסק לחלוטין הסעת החול מדלתת הנילוס לישראל, עדיין יהיו זמינות במדף הרדוד של ישראל כמויות חול אדירות לצרכים השונים של המשק. האתגר הגדול יהיה ניצול וניהול משאב חיוני זה, בלי לפגוע במורפולוגיה של החופים ובערכי טבע אחרים.

10.4 מבנים ימיים לסוגיהם

סוגי המבנים הימיים: שוברי גלים ומזחים, דורבנות, מוצאי שפכים וניקוז, מבנים לנוחות ובטיחות הרחצה, מרינות, נמלי דיג, נמלים מסחריים, מספנות.

- המבנה הדומיננטי ביותר בחוף ובים הם **שוברי הגלים.**

סוג שובר הגלים תלוי במספר גורמים: תכונות הגלים, עומק המים, תכונות הקרקעית, הנגישות, עלות החומרים והציוד, טכניקת הבניה, היעד (שובר גלים למרינה צריך להיות לא רק יעיל, אלא גם אסתטי ולא מסתיר את נוף הים). ברוב הנמלים והמעגנות בארץ שובר הגלים הראשי הוא הטיפוס המקבילי, המחובר בקצה אחד ליבשה, וחודר לים בצורת קשת רחבה. הפתח הוא כלפי צפון-מערב, שובר הגלים הראשי סוגר שטח עגינה מצפון-מזרח לו, ושובר משני קצר יותר, הניצב לחוף, סוגר את שטח העגינה מצפון. בגלל משטר הזרמים והרוחות לאורך חופי הארץ, נוצרת כמעט תמיד בעיה של כליאת חולות מדרום לבסיס השובר וארוזיה חמורה מצפון לו, המשולבת ביצירת שרטונות בפתח המעגן. בעולם קיימים שוברי גלים שונים, בצורת אצבעות ניצבות לחוף, אצבעות מתכנסות, שוברים מנותקים.

שוברי הגלים בנויים בכמה צורות עיקריות:

א. ערמת סלעים, בשיפוע ממוצע של 1:3

ב. אלמנטים מבטון, מכמה טיפוסים, המצטיינים בחוזק, יציבות, עמידות ונוחות בבניה. לכאורה זהו הפתרון, אך בנמל אשדוד, שניבנה מטטרפודים (איור 23), היה צורך בכיסוי נוסף מאבנים כבירות כדי שהשובר יעמוד בפני כוח המחץ של הגלים

איור 23

שובר גלים בנוי מטטרפודים

ג. שובר משולב, הבנוי מלכתחילה כדי למנוע בעיות מסוג זה, וכן כדי לחסוך בחומרים ולהקטין את שטח החתך הרוחבי

ד. שובר מדורג, בשיפוע ממוצע של 1:5, אך נמוך יותר מהראשון

ה. שובר אנכי, הבנוי משיגומים (sheet piles) העשויים מפלדה, בטון או חומר פלאסטי. ייתכן רק בקרקעית חולית, בעומק מוגבל ובשטח מוגן יחסית. מיועד בדרך כלל לפתרונות זמניים

ו. שובר בנוי כיסונים (caissons), בעל יתרונות רבים ידוע עוד מהעת העתיקה (נמל קיסריה הרומי) ונפוץ ביותר גם בימינו

ז. שובר צף - הכי ידידותי לסביבה הימית, אך מוגבל ביותר בשימושיו

ראש השובר הוא חלקו הפגיע ביותר, ולכן הוא בנוי כבד יותר, מתפרש ושיפועו מתון. כל זה מקטין את שטח הכניסה, וצריך להיות מסומן היטב. שוברי גלים בנמלים מסחריים מגיעים לאורך מאות מטרים, ובדרך כלל יש על גבם דרך לרכב. בצידם הפנימי, המוגן, יש לעתים רציפים המשמשים לטעינה ופריקה, אחסון, דיג ותיירות. בתוך השטח המוגן על ידי שוברי הגלים נבנים לעתים מזחים לייעול העגינה, שצורתם בדרך כלל ישרה וניצבת לחוף, והם נושאים על גבם רציפים להקלת השטעון.

נוהגים לחלק את שוברי הגלים לגדולים, בינוניים וקטנים, לא לפי ממדיהם, אלא לפי מידת חדירתם לרצועת המשברים (או במלים אחרות - העומק אליו הם מגיעים). שוברי הגלים של הנמלים הגדולים עוברים את רצועת המשברים (בעומק של קרוב ל-20 מ'); אלה של המרינות חודרים אליה (ומוגדרים בינוניים, עד 7 מ'), ואילו שוברים קטנים הם אלה הבנויים מול חופי רחצה, למשל, בעומק מטר בממוצע.

שוברי גלים מנותקים נפוצים מאד בחופי הרחצה המוסדרים בארץ (ת"א, נתניה, חיפה ונהריה), וכן בהקשר למרינות (אשקלון, הרצליה). הם מיועדים להקטין את אנרגית הגלים לפני הגעתם אל החוף. הם מונעים בליה חופית, ובדרך כלל אף מרחיבים את רצועת החוף כתוצאה משקיעת סדימנטים ב"צל" השובר. במקרים רבים נוצר שירטון (טומבולו) המחבר את השובר אל החוף, וכך פוגע בתנועת החולות במעלה הזרם החופי. גם כמויות החול הניכרות היוצרות את הטומבולו נגרעות למעשה מהחופים הסמוכים. להשלמת פעולתם של השוברים המנותקים נבנים במקרים מסוימים דורבנות - מבנים ימיים ששורשם בחוף והם חודרים לים בניצב לקו החוף, בדומה למזחים. מטרתם להקטין את הארוזיה החופית, להגדיל חוף קיים ולהקטין את אנרגיית הגלים.

- **מעגנות** (מרינות) הן נמלים קטנים המיועדים לכלי שיט קטנים, בעקר למטרות נופש ופנאי. חלקן משמשות כנמלי דיג, וחלקן הוכרזו כנמלים. כמעט כל המרינות כרוכות גם בייבוש ים, שמשמעותו דחיפת קו החוף מערבה וניצול נוסף של אפשרויות בניה בקו החוף.

כיום קיימות בחוף הישראלי תשע מרינות, מהן ארבע שהוקמו בעשר השנים האחרונות:

נמלי עכו והקישון, המשמשים גם כנמלי דיג; נמל קיסריה העתיק; מעגן מכמורת (בי"ס ימי); מרינה הרצליה, חדשה, עם עורף נדל"ני נרחב; מרינה ת"א הותיקה מכולן; נמל יפו, גם הוא משמש לדיג; מרינות אשדוד ואשקלון, חדשות לגמרי. סה"כ 2,900 מקומות עגינה, הרבה למעלה מהביקוש. המרינות החדשות גרמו נזקים סביבתיים חמורים ועברו על החוקים בעניין בניה למגורים בתחום 100 מ' מקו החוף. בניגוד למרינות, יש ביקוש רב מצד הדייגים לקבלת מקומות עגינה נוספים, אך הם אינם נענים בשל חוסר הכדאיות הכלכלית של נמלי הדיג.

- שני **הנמלים** הגדולים הפעילים בארץ, חיפה ואשדוד, עברו לאחרונה הרחבה משמעותית. במאי 2007 אישרה ממשלת ישראל את הקמתם של שני מסופי מכולות מתקדמים, כנגזרת מתוכנית האב האסטרטגית - ממזרח לנמל חיפה ("נמל המפרץ") וצפונית לאשדוד ("נמל הדרום").

רשות הנמלים התחייבה באופן תקדימי וחשוב ביותר להקצות תקציב שוטף (מיליון וחצי דולר לשנה!) להעברת חול מדרום הנמל לצפונו, כדי לקזז את ההשפעות השליליות של הגדלת הנמל על הסביבה הימית והחופית. לאחר מספר הזנות חול, במקומות שונים לאורך החוף הישראלי, התגברה ההבנה כי הטלת חול על קרקעית הים בעומקים העולים על 5 מ', אינה תורמת לשיקומם והרחבתם הישירה של חופים שנסחפו וכי ברור שהחול המוטל ממשיך ונע הלאה צפונה לאורך חופי ישראל.

- לאורך חופי הארץ בנויים גם מספר **מסופים לפריקת פחם ונפט**, כמו בחדרה, אשקלון ואילת. מסופים אלה בנויים על כלונסאות והשפעתם הסביבתית קטנה. סוג אחר של מסופים הם מסופים צפים, גם הם לסוג מסוים וכמות מוגבלת של מטענים -תחנות הכח רידינג, ואשכול (אשדוד).

- **קיר ים** מיועד להגן על חוף או מבנה בחוף מפעילות הגלים. אפשר לבנות אותו מבטון, מסלעים או בבניית נדבכים מסודרת. קיר ים מגביר את עוצמת הזרמים החוזרים, השטח החולי שלפניו עובר ארוזיה גדולה יותר, והקיר עצמו חשוף לפעולת יניקה של יסודותיו, הגורמת בסופו של דבר להתערערותו (ראה הטיילת החדשה בקיסריה, למרות שנבנה שובר גלים שקוע בים לפניה).

- **איים מלאכותיים** מתוכננים להיבנות לאורך חופי הארץ כתשובה ללחצי אוכלוסין, תשתיות (שדה דב, פי גלילות, חיריה), אתרי תיירות וספורט ופיתוח תחומי עיסוק חדשים. גורמים שונים כגון הטכניון, החברה הממשלתית לחקר ימים ואגמים, המכון הגיאולוגי ויזמים פרטיים, החלו למן שנות הששים לעסוק בבחינת פתרון בכיוון זה. המדינה, באמצעות משרד התשתיות הלאומיות, כבר השקיעה כספים רבים במחקרי היתכנות וכדאיות הקמת האיים, בשיתוף פעולה עם חברות הולנדיות בעלות ניסיון רב בנושא.

גם הניסיון היפני בבניית איים נלמד היטב, אך אנו עדיין רחוקים מתשובות חד-משמעיות על שורה של בעיות:

1. השפעות אוקיינוגרפיות, כגון תנועת החולות ופגיעה בחופים פתוחים
2. רמת מיגון האיים בפני תנאים טבעיים קיצוניים, כגון רעידות אדמה, גלי ענק, סערות חריגות
3. מהו האי האופטימאלי מבחינת צורה, גודל, מיקום, מרחק מהחוף, צפיפות
4. היתכנות הנדסית וכלכלית להקמת איים בעומקים שונים
5. מצאי חומרי בניה לאי והשפעות סביבתיות של הכרייה וכן של נוכחות האי לכשיקום
6. השפעות סביבתיות של שימושים שונים באיים, כגון תשתיות, סילוק פסולת, תיירות
7. השפעות סביבתיות של האופציות השונות לחיבור האי ליבשה

נראה שהבעיה המרכזית העומדת בפני בוני האיים היא מקורות החומר לבנייתם. מקורות יבשתיים מקומיים אינם קיימים. ניתן כמובן לייבא חומר, אך זה אינו כלכלי לחלוטין. נשארת החלופה של מקורות ימיים, המתחלקים בעקרם לשניים - חול וסלע (בעיקר כורכר), שכמויותיהם ומיקומם עדיין אינם ברורים כלל. אפר פחם מתחנות הכוח ופסולת בנין אינרטית הם מקורות בעייתיים ושוליים.

ישנן כיום כמה חלופות לבניית איים:

1. איים מוצקים מלאים, בכמה חלופות:
   א. בניה מהקרקעית כלפי פני הים
   ב. בנית מסגרת חיצונית ומילויה בשיטות שונות
   ג. איים הבנויים חומר גמיש, השומר על צורתו בעזרת לחץ הידרוסטטי
   ד. שילוב של ב' וג', על ידי בניית שוברי גלים חיצוניים ומילויים במבנים מודולאריים ספוגיים
2. איים על כלונסאות - פתרון כלכלי וסביבתי טוב, אך מוגבל בשטח ומשקל.
3. איים צפים, מעין דוברות שקועות, או איים צפים על מצופים מתנפחים - פתרון מהיר אך מוגבל. חשוב לזכור תמיד, שאיים לא התקיימו מול חופי ישראל במשך שני מיליוני השנים האחרונות (לפחות), ומשתמע מכך שהם אינם יציבים בתנאי הים שלנו. בניית איים מלאכותיים היא מעשה בראשית, ויש לשקול היטב את מכלול השלכותיו, לטווח רחוק.

10.5 הגנה על החופים

החל מראשית המאה ה-20 חלה תנופה נרחבת של פיתוח חקלאי בכל אזורי החוף והמישור החופי הקרוב לחוף, ואתה גידול מהיר של התשתית היישובית (העירונית והכפרית) והתעשייתית המוכרת כיום. בדומה למקומות אחרים בעולם, התיישב חלק גדול מתושבי ארץ ישראל סמוך לחוף. האוכלוסייה ברצועת החוף גדלה מפחות מ-100,000 נפש בראשית המאה ה-20 לכ-1.8 מיליון נפשות בשנת 2006 - כ-26% מכלל אוכלוסיית המדינה, וצפיפותה גבוהה 14 מונים מצפיפותה בכל שטח המדינה (אתר הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה). מגמה זו הולכת ונמשכת. מאז שנות ה-30 של המאה ה-20 מנוצל מישור החוף המערבי למגורים באופן מתגבר, כאזור של עורקי תחבורה ראשיים, כמשכן למִגְוָן גדול של תעשיות, אתרי מסחר ועסקים מכל הסוגים, כמקור לחומרי בניה וסלילה (אשר נדלדלו עד מאוד) וכאזור של יצירת וסילוק אשפה ומפעלים לטיהור מי קולחין תוך מאמץ לשַמר אזורי חקלאות, אזורים ירוקים ושמורות טבע.

ברצועת החוף נבנו ערים גדולות ובקו החוף נבנו נמלים, מעגנים ומעגנות, תחנות כוח, מפעלים להתפלת מי ים מהגדולים בעולם, מסופי נפט ופחם, מתקנים צבאיים ומוצאי נקזים וביוב, וכל אלה בצד תעשיית קיט ונופש. נכון לשנת 2012, נותרה רק כמחצית מרצועת החוף הצמודה לקו המים ללא שינוי ובניה וחלוקת החוף לפי השימושים הנעשים בו השתנתה אך מעט בעשור האחרון: כ-57 ק"מ של חופים שבעורפם בינוי עירוני וכפרי, וכ-49 ק"מ של חוף הסגורים לציבור: נמלים ותשתיות (תחנות כוח, וכן מסופי דלקים וגז, מזחי פחם ומתקני התפלה, שברובם ממוקמים בתוך תשתיות קיימות) לאורך כ-18 ק"מ מהחופים, ומתקני צבא ובטחון לאורך כ-31 ק"מ. היתרה - כ-45 ק"מ של חופים פתוחים ללא בינוי בעורפם, אשר לפי שעה הם פתוחים לציבור - חלקם הוצעו כשמורות טבע, חלקם מכילים שרידים ארכיאולוגיים מרשימים, וחלקם מהווים את השריד האחרון של שטח בר ברצועת החוף העמוסה לעייפה.

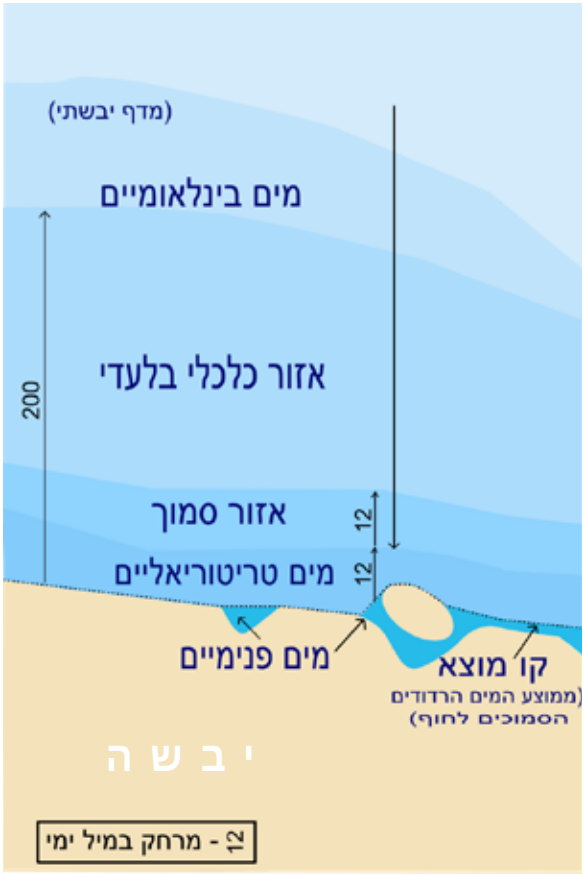
צורכי האוכלוסייה הגדלה לאורך החוף - ואתם הלחצים לקידומם של מפעלי בנייה מכל הסוגים ברצועת החוף ובעורפה - גוברים בהתמדה. מימושן של כל תוכניות הפיתוח הקיימות, שמרביתן עדיין שנויות במחלוקת, יביא ללא ספק לשינוי בולט באופייה של רצועת החוף, בעיקר סמוך לערים הגדולות ולמוקדי הקיט והנופש.

השינויים שנכפו על הסביבה בעקבות התערבות האדם, אשר נעשו במקרים רבים ללא מעקב או חיזוי ותוך נטילת סיכונים שטיבם וגודלם אינם ידועים לאשורם, גרמו וגורמים נזקים, מהם קשים ויקרים לתיקון ומהם בלתי הפיכים, לטווח הקצר והארוך. השימוש בשדות החול ורכסי הכורכר לאורך החוף כמצע לבינוי עירוני ותעשייתי ולסלילת כבישים הביא מצד אחד לקבורת עתודות חול ענקיות, שחסרונן הולך ומחריף מאוד, ומצד שני לכריה של רוב החולות והכורכר שנותרו, המשמשים כחומר גלם לבניה וסלילת דרכים. כיום דולדלו עתודות החול והכורכר, ואתם נעלמו הנופים המיוחדים והביוטופים של רצועת החוליות. סילוק בלתי-מבוקר של תכסית החול בעורף צוקי החוף הביא לסחיפה פרועה של שכבת החמרה שנחשפה מתחתיה, שיבוש טופוגרפי וניקוז של שטחי חקלאות ומגורים.

כריית חול בחופים בעבר ולכידת חול על ידי מבנים ימיים בולטים (נמלים, מעגנות, ברֵכות קֵרור והשקטה, שוברי גלים וכיוצא בהם) הפרו את המאזן הטבעי של הֶבָאָה וסילוק של חול לאורך החופים, והאיצו את הנסיגה הטבעית של קו החוף והרס צוקי החוף עקב עליית מפלס כלל-עולמית.

גם בישראל הצפופה, עם קו החוף המצומצם, הגיעו להכרה כי יש צורך בהתייחסות מיוחדת בכל הנוגע לתכנון וניהול החופים, תוך שמירה על ייעודו הציבורי של החוף, תכנון ופיתוח רצועת החוף על בסיס ניתוח סביבתי והרחקת בינוי אינטנסיבי מקרבת החוף. התגבשה הבנה כי שמירת טבע באזורים יפים עם מגוון גדול של מינים אינה מספקת וכי צריך להרחיב את השמירה גם לאזורים שמספקים מגוון רחב של שירותי מערכת אקולוגית, כגון אזורי רבייה למזון, חול לבנייה, מים נקיים להתפלה או אתרים מטופחים לתיירות.

ראוי לציין כי על פי חוק הים העולמי משנת 1983, אמנה בינלאומית ביוזמת האו"ם עליה חתמו רוב מדינות העולם, למדינות השוכנות לחופי-ים, רצועה של מים טריטוריאליים ברוחב 12 מייל ימי מקו החוף ואזור כלכלי בלעדי המשתרע עד 200 מייל ימי מהחוף, אותו זכאית המדינה לנצל לצרכיה (דיג, אוצרות טבע) (איור 24). חוק זה מעניק למדינת ישראל אזור כלכלי בלעדי הגדול משטחה היבשתי.



איור 24

אזורי ים לפי החוק הבינלאומי (ויקיפדיה)

שמירת הסביבה החופית בישראל

- בשנות השמונים, החלה להתגבש מדיניות תכנונית, הקובעת את ייעודי הקרקע באזור החוף. תמ"א 13 קבעה את מערך השימושים וייעודי הקרקע בתחום הסביבה החופית ומתווה את המדיניות באזורי החוף. הישגה הגדול של התוכנית היה איסור בניה בתחום 100 מ' מהחוף. אלא שהלחץ לבניה על קו המים הלך וגדל, ואחת הדרכים לעקוף אותו הייתה יבוש הים לבנית מרינות. עוד מעיקרי התכנית: תוספת שמורות טבע, גנים לאומיים, שמורות נוף ושמורות חוף, איסור בניה בתחום מרחק של 100 מ' מקו המים, ודגש על שימוש ציבורי של החוף. עקרונות אלו היו היסוד למדיניות ולחוקים שנחקקו בהמשך בנושא החופים.

בתאריך 30.1.2020 הוחלפה תמ"א 13 לחופי הים התיכון, בפרק החופים בתמ"א 1, באישור הממשלה.

- בשנת 1999 יצא 'מסמך מדיניות מימי החופין' לניהול מימי החופים והחוף כנכס לאומי-ציבורי ראשי, שילובו במטרות ובמדיניות התכנון הלאומי הכולל ופיתוחו הזהיר על פי עקרונות הקיימות:

- שימור התהליכים האקולוגיים ואתרי מורשת
- שמירה קפדנית על האינטרס הציבורי
- העדפת פיתוח באתרים קיימים
- מניעת הפרעה להסעת החול
- אישור שימושים בעלי תחליף סביר ביבשה
- כריית חול רק מעל 30 מ' עומק

- בשנת 2004 נחקק חוק שמירת הסביבה החופית, התשס"ד - 2004
החוק נועד להגן על הסביבה החופית ואוצרות הטבע והמורשת שבה, לשקמם ולשמרם כמשאב בעל ערכים ייחודיים וכן למנוע ולצמצם במידת האפשר פגיעה בהם; לשמור את הסביבה החופית והחול החופי לתועלת ולהנאת הציבור, ולדורות הבאים; לקבוע עקרונות והגבלות לניהול, לפיתוח ולשימוש בני קיימא של הסביבה החופית. החוק קובע את זכות הציבור למעבר חופשי בחוף הים, למעט חריגים הקבועים בו כגון מתקן בטחוני, נמל ומתקני התפלה. השינוי הבולט בחוק זה הרחיב את איסור הבניה למרחק של 300 מ' מקו החוף, למעט במקרים של תוכניות שאושרו לפני כניסתו של החוק לתוקף. בעקבות החקיקה לעיל, הוקמה הוועדה לשמירת הסביבה החופית (ולחוף). הוועדה מופקדת על שמירה ואיזון בין שיקולי התכנון לבין הערך של השמירה על הוועדה לשמירת הסביבה החופית וזאת בהתאם לעקרונות, לתנאים ולסייגים שנקבעו בחוק.

- בעקבות הרחבת הפעילות הימית בישראל, אישרה בדצמבר 2019 הוועדה לשמירה על הסביבה החופית, את מסמך מדיניות למרחב הימי של ישראל וים תיכון, שהוביל מנהל התכנון. זהו מסמך מדיניות ראשון מסוגו, הרואה בשטח הימי של ישראל, המתפרש על פני 22,000 קמ"ר, חלק בלתי נפרד משטחה של המדינה. במסמך נבחנו הצרכים העכשוויים והעתידיים של ישראל, הן במים הטריטוריאליים (הכוללים את אזור החוף) והן במים הכלכליים, והומלצו שורה של צעדים להסדרת פעילות הגופים השונים במרחב הימי של ישראל.

מקורות לפרק זה

Hall, J. K. 2005. The 25-m DTM (Digital Terrain Model) of Israel. Israel Journal of Earth Sciences, 57: 145-147.

אלמגור, ג. ופרת, א. 2012. חוף הים התיכון של ישראל. דו"ח מספר GSI/28/2012, המכון הגיאולוגי לישראל, משרד האנרגיה והמים. מהדורה שלישית מורחבת 2012.

אקולוג, הנדסה בע"מ. 2014. היבטים גיאולוגים בתכנית הימית לישראל. דוח עבור הפקולטה לארכיטקטורה ובינוי ערים, המרכז לחקר העיר והאזור של קלצניק. פרויקט מס' 14067PR.

בן יוסף, ס. 2001. מבואות: גבולות וגיאומורפולוגיה (מישור החוף הדרומי, פלשת). מדריך ישראל החדש: אנציקלופדיה, מסלולי טיול. בהוצאת משרד הביטחון, כתר הוצאה לאור, ידיעות אחרונות.

ברוקוביץ', ע. וסימוביץ', מ. 2015. כריית חול ימי בישראל - תמונת מצב, השלכות סביבתיות והמלצות. סיכום והמלצות של ועדת מומחים, מרץ 2015. האגודה הישראלית לאקולוגיה ולמדעי הסביבה.

ברנע, א. 2016. המצע הרך בים התיכון, עולם חבוי בין גרגרי החול. החברה להגנת הטבע ורשות הטבע והגנים.

זוהר, ג. 1997. המבנה הפיסי של מישור החוף. מישור החוף: אדם וסביבה לאורך הדורות, לחטיבה העליונה. בהוצאת משרד החינוך, התרבות והספורט, המנהל הפדגוגי, האגף לתוכניות לימודים.

מרט, י. 2003. הים בראש ההר, תולדות הגיאולוגיה של הים התיון המזרחי. בהוצאת משרד הביטחון.

צביאלי, ד. 2016. משאב החול הימי של ישראל: תמונת מצב 2016. דוח המשרד להגנת הסביבה, היחידה הארצית להגנת הסביבה הימית, דצמבר 2016.

צביאלי, ד. 2019. "מתנת הנילוס" - משאב החול הימי של ישראל: מקורות, שימושים וכמויות. מתוך: הערכה אסטרטגית ימית רבתי לישראל 2018/19. עורך ראשי: פרופ' שאול חורב. המרכז לחקר מידיניות ואסטרטגיה ימית, ישראל.

רון, צ. וגולדשלגר, נ. 2013. פרקים בעיצוב נופי כדור הארץ: השפעת פעילות הכוחות החיצוניים (גאומורפולוגיה). בהוצאת מכון מופ"ת, רעננה.

שטנר, י. 1970. גיאומורפולוגיה, העיצוב החיצון של התבליט. הוצאת 'קרית ספר' בע"מ. ירושלים תש"ל.

11

אלמוגים ושוניות אלמוגים

תום שלזינגר

הקדמה

בשחר ההיסטוריה של כדור הארץ, לפני מיליוני שנים, החלו אלמוגי האבן להתפתח ולגדול לאיטם זה לצד זה וזה על זה. במהלך שנים רבות יצרו מבנים מורכבים וגדולים, עם חללים, כוכים ומחילות, אשר הפכו למעין "ערים" תת-ימיות, להן אנו קוראים שוניות אלמוגים. כך החל להיווצר הנוף תת-מימי של שוניות האלמוגים. שונית אלמוגים הינה אחת מפינות החמד העשירות והמגוונות ביותר בטבע. שוניות אלו מספקות בתי גידול - מזון ומחסה, למגוון אדיר של בעלי חיים נוספים אשר חייהם ועתידם קשורים באלו של השוניות. בשל עושר החיים, הצבעים ומגוון המינים הרב המתקיימים בשונית האלמוגים, רבים האנשים לאורך ההיסטוריה אשר השוו את השונית לג'ונגל או יער טרופי תת-מימי, משום שאלו סביבות החיים העשירות והמגוונות ביותר מבחינת החי והצומח על פני היבשה. ראוי לציין שהשוואה זו טומנת בחובה הטיה היסטורית מבחינת מה קדם למה. אנחנו, בני אדם, יצורים יבשתיים אשר במשך מאות שנות גילוי יבשות וחקר הטבע למדנו על החיים בים בעיקר מרחוק - מבלי להיכנס לים, מבלי לצלול, מבלי לחזות מקרוב במלוא הדרו ועושרו של העולם התת-ימי. כיום, עשורים בודדים לאחר תחילת עידן הצלילה הספורטיבית אשר מאפשרת חקר טבע תת-מימי מקרוב, אנחנו מבינים ששוניות אלמוגים רבות הינן למעשה צבעוניות ושוקקות חיים אפילו יותר מג'ונגלים רבים. יהיה נכון אם כך, לקרוא מעתה ואילך לג'ונגלים ויערות גשם - "שוניות האלמוגים" של היבשה.

שוניות האלמוגים מוגבלות בתפוצתן העולמית לרצועה יחסית צרה על פני כדור הארץ (בחגורת האזור הטרופי) ומכסות שטח קטן מכלל קרקעית האוקיינוסים והימים. אף על פי כן, הן מהוות בית-גידול חשוב ביותר למאות אלפי בעלי חיים ימיים שונים. בנוסף, מיליוני בני אדם ברחבי העולם תלויים במידה כזו או אחרת בשוניות אלמוגים בריאות: למעלה מ-100 מדינות אשר בשטחן מצויות שוניות אלמוגים נהנות ממקורות מזון מגוונים (דגים וכו'), הגנה על קו החוף מבליה מעצם היותן כעין 'שוברי גלים' טבעיים, ואפילו מקור לתרופות וחומרים שונים המופקים על ידי חלק מדיירי השונית ומשמשים אותנו, בני האדם, לרפואה. בנוסף, שוניות אלמוגים מושכות אליהן מיליוני תיירים מכל רחבי העולם, ובכך הן מהוות מקור כלכלי ותיירותי חשוב. אך אליה וקוץ בה: עומס מבקרים רב עלול ליצור לחץ כבד מדי המאיים ומסכן את קיומן של השוניות.

בפרק זה נלמד מיהם ומהם בעצם האלמוגים. כיצד הם ניזונים, מתקיימים ומתרבים. כיצד הם בונים שוניות ומה תפקידן בכלל של שוניות אלו. מה מאיים עליהן, מה אנו עלולים להפסיד אם הן תיפגענה, ומה אנו יכולים לעשות בכדי לנסות להבטיח את המשך קיומן.

מהם אלמוגים?

אלמוגים הינם בעלי חיים ימיים המשתייכים למערכת הצורבים. מרבית האלמוגים הם בעלי חיים ישיבים (צמודים למצע) המציגים מגוון רחב של צורות גידול ותכונות חיים. על קרובי המשפחה של האלמוגים נמנות מדוזות, שושנות ים ובעלי חיים רבים נוספים. מערכה זו כוללת אלפי מינים של בעלי חיים להם מספר מאפיינים בסיסיים דומים:

1. נוכחות תאים מיוחדים בעלי ארס, הנקראים תאים צורבים ומשמשים לטריפה והגנה. על שם תאים אלו קיבלה המערכה כולה את שמה - מערכת הצורבים.
2. בעלי חיים פשוטים יחסית מבחינה אנטומית, כלומר מבחינת מבנה הגוף - יש להם שתי שכבות גוף בלבד.
3. בעלי סימטריה רדיאלית, כלומר סימטריה מעגלית ביחס לציר מרכזי.
4. יחידת החיים הבודדת באלמוגים, נקראת פוליפ, בעלת מבנה בסיסי זהה.

אלמוג - מושבה ופוליפ

הפוליפ כאמור, הוא יחידת המבנה הבסיסית של האלמוגים, בעל צורת גליל חלול שבחלקו העליון פתח פה המוקף בזרועות ציד. מרבית האלמוגים גדלים כמושבה שיתופית של אלפי פוליפים היוצרים מבנה אחד עיקרי לכל מין. גודל כל פוליפ במיני אלמוגים שונים יכול לנוע בין מילימטר בודד ועד לכמה סנטימטרים. אף על פי כן, ישנם מספר מיני אלמוגים אשר אינם יוצרים מושבות ונקראים אלמוגים יחידניים (איור 1). אלמוגים אלו בעלי פוליפ אחד בודד אשר גודלו נע בין מספר סנטימטרים במינים מסוימים ועד לעשרות סנטימטרים במינים אחרים.

איור 1

(מימין) **אלמוג יחידני (פוליפ בודד וגדול),** (משמאל) **אלמוג מושבתי (מושבה של פוליפים)**

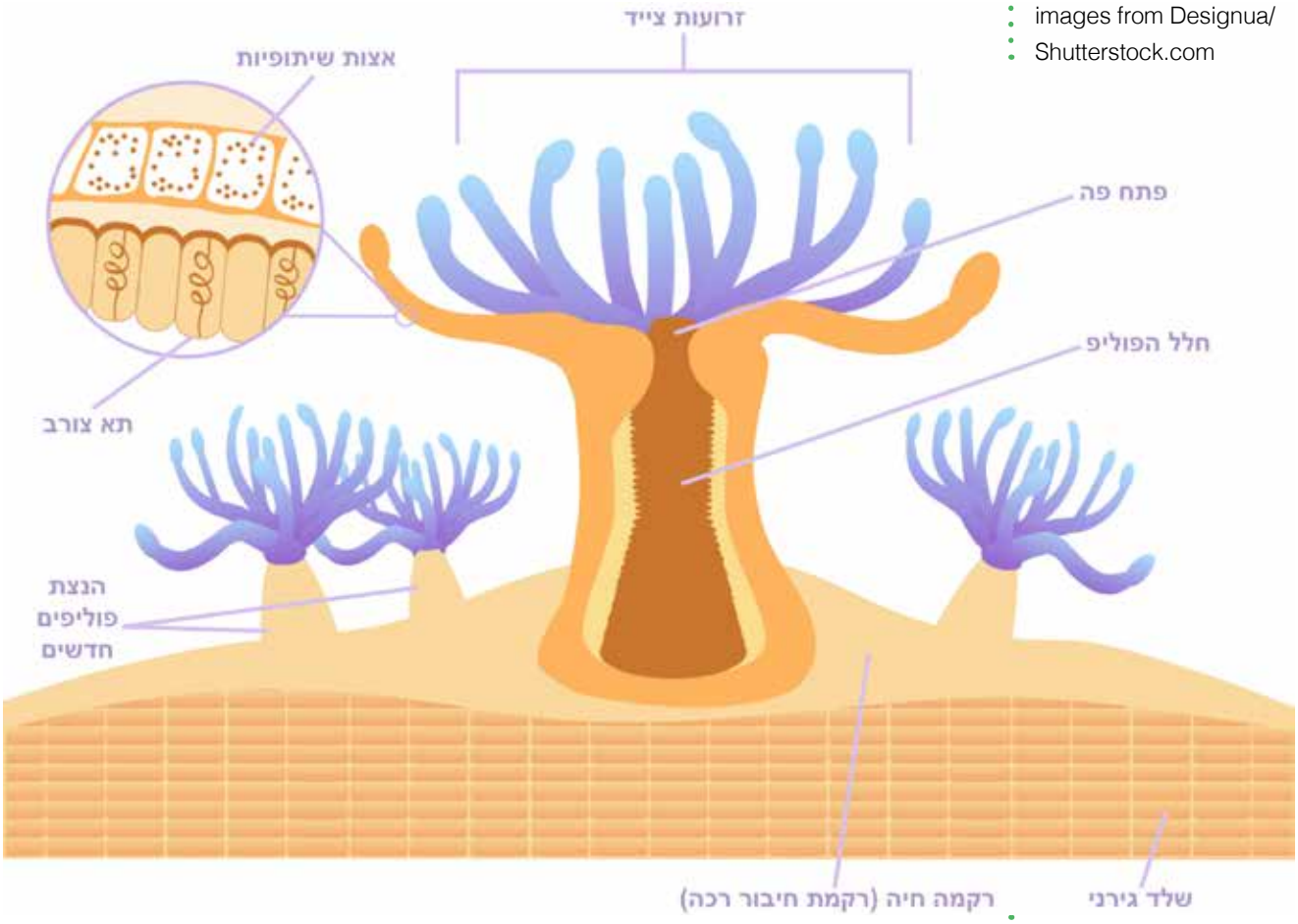
גם באלמוגים המושבתיים וגם באלמוגים היחידניים, כל פוליפ מהווה יחידה עצמאית המקיימת את כל פעולות החיים, כדוגמת תזונה, נשימה, הפרשה ורבייה. יחד עם זאת, קיימים מספר יתרונות לסגנון החיים המושבתי של מרבית האלמוגים. ראשית, בין הפוליפים במושבה קיים קשר רקמתי של תעלות ורקמות המחברות

ביניהם וכך הם מעבירים חומרים ומזון מאחד לשני. לדוגמה, אם נגרם נזק כלשהו באזור מסוים במושבת האלמוג, האזורים אשר לא ניזוקו יכולים למעשה לתמוך באזורים שנפגעו על ידי העברת חומרים, מזון, אנרגיה, וכך לעזור לפוליפים הפגועים להתאושש ביתר מהירות. שנית, בשל האופי המושבתי של האלמוג מחד, ועצמאות כל פוליפ מאידך, מושבת האלמוג עשויה לעבור תמותה חלקית, באזור מסוים במושבה מבלי שתיגרם בהכרח תמותה מלאה של כלל מושבת האלמוג.

אנטומיית האלמוג

אלמוגים הינם בעלי מבנה גוף פשוט במיוחד המעיד על דרגת התפתחות נמוכה יחסית מבחינה אבולוציונית ודומה באופן עקרוני לאלמוגים קדומים אשר הופיעו לפני כ-200-400 מיליון שנים. הם חסרים התמיינות והתמחות של שכבות גוף לתפקוד ייעודי כדוגמת עיכול, נשימה, תנועה וכדומה. פוליפ האלמוג בנוי משתי שכבות של רקמת תאים ובהם תאים המתפקדים לעיכול, הובלת חומרים ולתגובה. בין שתי שכבות אלו מפרידה מעין שכבת חיבור (איור 2):

1. שכבה חיצונית - שכבת התאים החיצונית נקראת "**אפידרמיס**" והיא מכילה את מרבית התאים הצורבים שבאלמוג בנוסף לתאים דמויי תאי שריר ועצב.



איור 2

מבנה מופשט של מושבת אלמוג אבן והפוליפים הבונים אותה.

איור זה עודכן על בסיס איור מספרו של עודד דגני, Reflections Underwater, illustrated by Anath Eventzur based on images from Designua/ Shutterstock.com

2. **שכבה פנימית** - שכבת התאים הפנימית נקראת **"גסטרודרמיס"** (או "אנדודרמיס") והיא מכילה בעיקר תאי תזונה, תאי חישה ותאי בלוטה האחראים על הפרשות חומרי פסולת, הורמונים והתפתחות בלוטות המין. שכבה זו יוצרת את "חלל הפוליפ" אשר הינו חלל עיכול מרכזי ובו מתפתחים באופן עונתי גם תאי המין של הפוליפ. בנוסף, באלמוגים רבים שכבת גוף זו מכילה אצות מיקרוסקופיות חד-תאיות, הנקראות אצות שיתופיות או **"זואוקסנטלות"**, וחיות בצוותאות (חיי שיתוף או "סימביוזה") עם האלמוג.

3. **שכבת חיבור** - בין שכבת התאים החיצונית לשכבת התאים הפנימית מפרידה מעין שכבה הנקראת **"מזוגליאה"**, העשויה בעיקרה מחומר ג'לטיני.

לכל פוליפ יש במרכזו פתח פה הפונה כלפי מעלה (או החוצה אל עבר הים הפתוח) דרכו מתבצעות גם תזונה, גם רבייה וגם הפרשות. מסביב לפתח הפה מעוטר הפוליפ בזרועות ציד המכילות ריכוזים גבוהים במיוחד של תאים צורבים, בהתאם לתפקידן של זרועות ציד אלו בלכידת מזון והגנה על האלמוג. גופו של הפוליפ מסודר בצורה סימטרית רדיאלית כאשר חלל הפוליפ מחולק על ידי מחיצות הגדלות משכבת הגוף הפנימית למרכז חללו הפנימי של הפוליפ. מספר המחיצות משתנה בהתאם למיני האלמוגים השונים.

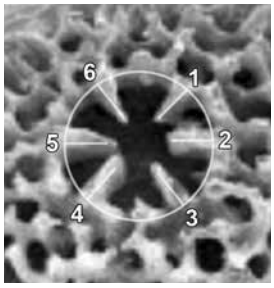
מזוגליאה
שכבת ביניים של חומר ג'לטיני המחברת את האפידרמיס והגסטרודרמיס ונמצאת בין שתי שכבות אלו.

חלוקה מערכתית וצורות גידול של אלמוגים

על פי צורת הגידול, מבנה הפוליפים ומספר המחיצות שבהם, ניתן לחלק את מחלקת האלמוגים לשתי תת-מחלקות:

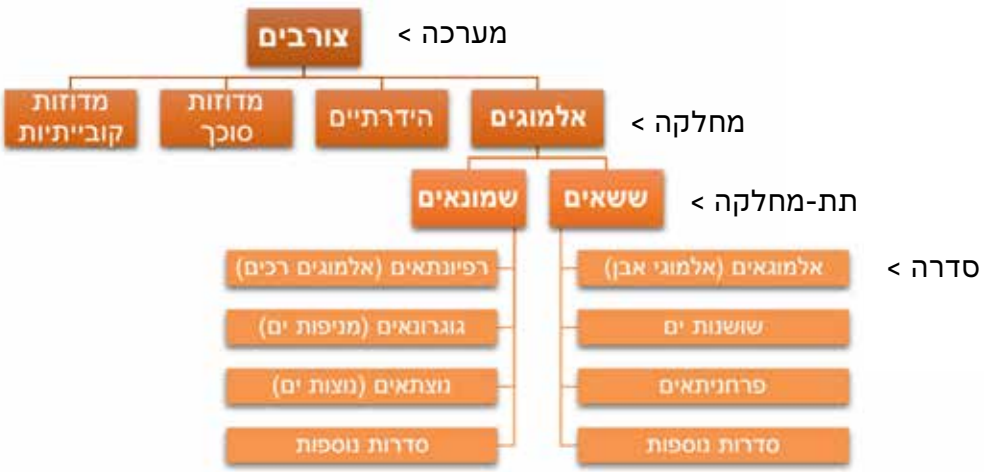
1. **ששאים** - באלמוגים אלו מספר המחיצות בפוליפ וזרועות הציד שלו הוא שש וכפולותיו (איור 3). תת-מחלקה זו כוללת מספר סדרות בעלי חיים כאשר הבולטות שבהן הינן סדרת אלמוגי האבן, להם שלד סידני הנותר כאבן לאחר מות האלמוג, וסדרת שושנות הים.

2. **שמונאים** - באלמוגים אלו מספר המחיצות וזרועות הציד הינו קבוע ועומד תמיד על שמונה. תת-מחלקה זו גם היא כוללת מספר סדרות כדוגמת סדרת האלמוגים הרכים, מניפות ים, נוצות ים ועוד.



איור 3

תקריב מיקרוסקופי של שלד פוליפ של אלמוג אבן (ששאי)



איור 4

חלוקה מערכתית של מחלקת האלמוגים לתת מחלקות וסדרות

איור 5

אלמוג אבן. בצידו השמאלי חשוף השלד הגירני ללא פוליפים חיים

סדרת האלמוגאים (אלמוגי האבן) קיבלה את שמה על שום השלד הגירני הדחוס המושקע על ידי אלמוגים אלו (איור 5). גם לאחר תמותת האלמוג נשאר שלדו כחלק מהשונית עליו יגדלו במשך הזמן אלמוגים אחרים וכך בעצם נוצר מבנה השונית עצמו. אלמוגים רכים, לעומת זאת, אינם משקיעים שלד בצורה דומה וגופם נתמך על ידי "**שלד מים**" - לחץ הנוזל שבתוך גוף האלמוג ובו גם פזורות מחטי שלד גירניות זעירות, המספקות תוספת תמיכה. עם מותם של האלמוגים הרכים, מתפורר גופם לחלוטין ולכן הם אינם תורמים לבניין השונית. באופן כללי, קצב הגדילה של אלמוגים הינו איטי ביותר ונע בין מספר מילימטרים בודדים בשנה במינים מסוימים ועד לכמה סנטימטרים בשנה במינים אשר הינם יותר מהירי-גידול. גדילתם של האלמוגים תלויה רבות בתנאי הסביבה שלהם כאשר ללא תנאי סביבה מיטביים אלמוגים יכולים אפילו לקטון משנה לשנה על ידי תמותה חלקית של אזורים במושבה (איור 5). תוחלת החיים של אלמוגים יכולה לנוע בין עשרות שנים לכדי מאות ואף לאלפי שנים במינים מסוימים.

לאלמוגים ממינים שונים או מסדרות שונות ישנן צורות גדילה שונות לחלוטין אשר יוצרות מבנים מורכבים (איור 6). נהוג לחלק את צורת גידול האלמוגים לשתי רמות: 1. רמת המושבה - צורתו הגידול הכללית של האלמוג. 2. רמת הפוליפ - אופי ומבנה רכיבי השלד של הפוליפים עצמם.

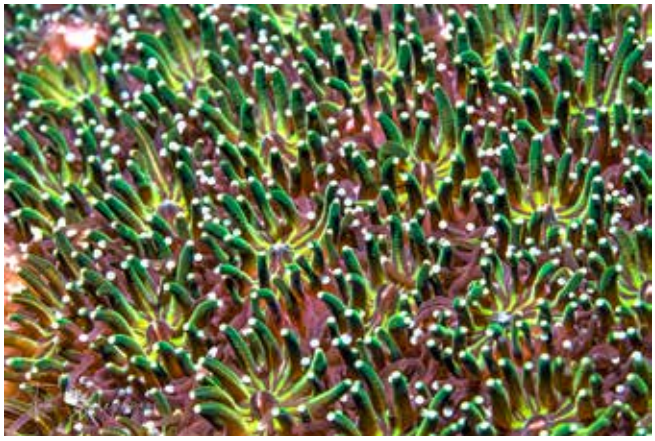
מבחינה היסטורית, זיהוי ומיון האלמוגים למינים, הסוגים והמשפחות השונות נעשה על פי צורת שלד האלמוג ומאפייניו הכוללים הן את צורת גדילת המושבה הכללית והן (ובעצם בעיקר) את מאפייני ומבני שלד הפוליפ הבודד. הבחנות אלו דורשות לעיתים בדיקה תחת מיקרוסקופ. התקדמות המדע בתחומים הגנטיים הובילה לכך שהחל משנת 2000 ואילך נעשה שילוב של שיטות בדיקה חזותית של שלדי האלמוגים לצד שיטות גנטיות על מנת לזהות ולהגדיר מהם המינים השונים ומהם הקשרים האבולוציוניים ביניהם. בנוסף, נוהגים להיעזר לעיתים במאפיינים רבייתיים שונים על מנת להבדיל בין מיני אלמוגים שונים.

שלד מים / הידרוסטטי

אלמוגים רכים נתמכים על ידי "שלד" המכיל נוזל ומחטי שלד גירניות זעירות אשר כלואים בין רקמות האלמוג.

איור 6

צורות גידול שונות של מושבות אלמוגים
(למעלה מימין בכיוון השעון):
אלמוג אבן שיחני / מעונף מהסוג שיטית,
אלמוג אבן מסיבי / גושי מהסוג מוחן,
אלמוג אבן מגשתי / צלחתי,
מניפת ים,
אלמוג רך מהסוג ססגונית



איור 7

צילומי תקריב של אלמוגים הפורשים את זרועות הציד שלהם הנמצאות סביב פתחי הפה של הפוליפים. הבליטות העגולות והבהירות בקצה זרועות הציד הן סוללות (או מצבור) של תאים צורבים

תזונה

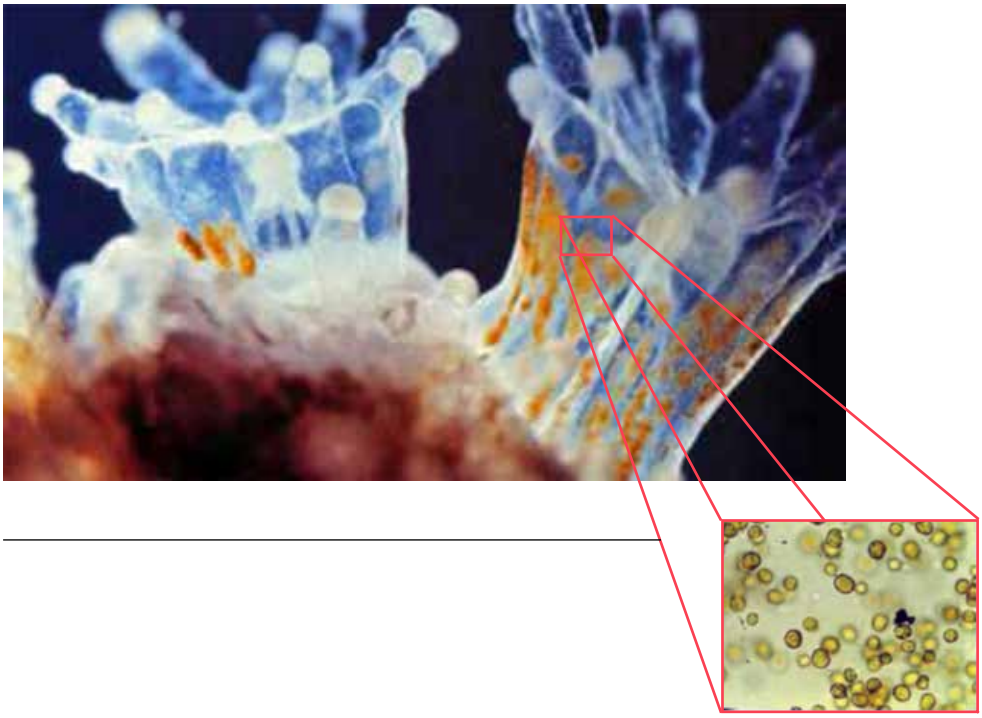
לאלמוגים שתי צורות תזונה עיקריות:

1. **טריפה** - לכידת יצורים זעירים המרחפים במים. כאמור, כל פוליפ מוקף בטבעת של זרועות ציד אשר מצוידות בסוללות של תאים צורבים (איור 7), המשמשים את הפוליפ בלכידת מזונו - מיני יצורים זעירים, מקבוצות שונות, הנסחפים בזרמי הים ונקראים בכלליות **פלנקטון**. כל תא צורב מכיל מבנה דמוי צלצל או קרס המחובר על ידי סיב לתא עצמו. כאשר תאי החישה הנמצאים בזרועות הציד חשים בתנועה ובחומר אורגני בקרבתם, "יורה" התא הצורב את הצלצל אל עבר הטרף ודרך הסיב מוזרק הארס. זרועות הציד וכן מרבית רקמות הפוליפ, של רוב האלמוגים, נחבאות היטב בתוך כוסית שלד הפוליפ ונפתחות ונפרשות כלפי חוץ על מנת לבצע טריפה רק במהלך הלילה. לאחר לכידת הטרף, הוא מועבר דרך פתח הפה לחלל המרכזי של הפוליפ ושם מתרחשים תהליכי העיכול. חומרי הפסולת מופרשים גם הם חזרה למי הים דרך אותו פתח הפה.

2. **הטמעת אור (פוטוסינתזה)** - בנוסף לטריפה, לאלמוגים רבים ישנו מקור נוסף לקבלת אנרגיה באמצעות אצות שיתופיות. זהו למעשה מקור התזונה העיקרי של אלמוגים אלו - הם חיים בצוותא (**סימביוזה**) עם סוג של אצות שיתופיות חד-תאיות, הנקראות זואוקסנטלות (איור 8). אצות מיקרוסקופיות אלו מצויות בריכוזים גבוהים בתוך הרקמה הפנימית (גסטרודרמיס) של האלמוג והן מבצעות את תהליך הטמעת האור או "פוטוסינתזה" בדומה לצמחים. הטמעת אור הינה התהליך בו אנרגיית האור מומרת לאנרגיה כימית, כלומר, זהו תהליך ייצור אנרגיה וסוכרים באמצעות אור השמש. את מרבית האנרגיה שאצות אלו מייצרות, הן מעבירות לאלמוג המארח שלהן, יחד עם תרכובות נוספות להן האלמוג זקוק. האלמוג, בתמורה, מספק לאצות הגנה מכל מיני טורפים, שכן הן חיות בתוך הרקמות של האלמוג. האצות מקבלות מהפרשות האלמוג חומרי דשן (נקראים גם חומרי הזנה או "נוטריינטים") מסוימים וחומרים אחרים שהן זקוקות למחיתן ומשתמשות בהם לביצוע תהליך הפוטוסינתזה. רבים מצבעי האלמוג הירוקים והחומים מקורם באצות השיתופיות החיות ברקמות האלמוג.

פלנקטון
שם כולל לכל היצורים החיים בגוף המים ונסחפים עם הזרמים. למרות שחלקם בעלי יכולת תנועה מסוימת (בעיקר בצורה ורטיקלית), הם אינם יכולים לנוע כנגד הזרם.

סימביוזה / צוותאות
יחסי שיתוף/גומלין בין יצורים שונים החיים ביחד ובצמידות.



איור 8

אצות שיתופיות (זואוקסנטלות) החיות בתוך רקמות האלמוג ומבצעות הטמעת אור. אצות אלו מעבירות לאלמוג המכיל אותן את מרבית האנרגיה שהן מייצרות, ומהוות למעשה מקור האנרגיה העיקרי של האלמוגים המאכסנים שלהם

נשימה

מטבע היותם בעלי חיים פשוטים וקדומים, לאלמוגים אין איברים מיוחדים כדוגמת ריאות, המיועדים לנשימה, וחילוף הגזים מתבצע על ידי פעפוע (דיפוזיה) גזים דרך כל שטח גוף האלמוג. בדרך זו, מקבל האלמוג חמצן מומס ממי הים החולפים על פני רקמותיו. החמצן נחוץ לתאי הגוף לתהליכי גידול ותהליכים נוספים ואילו אחוז ניכר מהפחמן הדו-חמצני המשתחרר בתהליך הנשימה נקלט על ידי האצות השיתופיות אשר זקוקות לו לשם קיום תהליך הטמעת האור.

רבייה

למרות היות אלמוגים בעלי חיים פשוטים, הם בעלי אסטרטגיות רבייה רבות, גמישות ומגוונות, אשר תורמות במידה ניכרת להצלחתם האבולוציונית רבת השנים לאורך מיליוני שנות הקיום של קבוצת בעלי חיים אלו. ניתן לחלק את אופן הרבייה לשני מסלולים מרכזיים: רבייה מינית, שהיא התהליך בו יצורים חיים מעמידים צאצאים תוצרי התלכדות של תאי מין (תאי ביצה וזרע) מפרטים שונים; ורבייה אל-מינית, שהיא תהליך בו פרט אחד יוצר העתק מדויק של עצמו ללא הצורך בהפריה בין תאי מין, שמקורם מפרטים שונים.

1. **רבייה אל-מינית** - שיטת רבייה זו מתייחסת לרוב לצורת ריבוי הפוליפים ובעצם לדרך בה גדלה מושבת האלמוג. פוליפים במושבה יכולים להיווצר הן על ידי הנצת פוליפים חדשים והן על ידי התחלקות פוליפ קיים לשניים. כל מושבת אלמוג מתחילה את חייה מפוליפ ראשוני, מייסד, הנצמד לשונית ומתחיל לגדול כפרט חדש, ובמהירה מתחיל גם להתחלק או להנץ פוליפים נוספים. באופן זה מתפתחות מושבות האלמוגים המורכבות מפוליפים אינספור. מגוון צורות ה**הנצה** והופעת הפוליפים החדשים באלמוג הוא המכתיב, במידה רבה, את הצורה

רבייה מינית
תהליך בו פרטים יוצרים פרט חדש, צעיר, כתוצאה מהתלכדות של שני תאי מין (תא ביצה ותא זרע). החומר התורשתי ותכונותיו של הפרט החדש מורכבים מאלו של שני תאי המין שיצרו אותו.

רבייה אל-מינית
תהליך בו פרט אחד יוצר העתק מדויק של עצמו מבחינה גנטית ללא כל הפריה מינית ולכן ללא עירוב חומר תורשתי מפרט אחר.

הנצה
צורת רבייה אל-מינית באמצעותה מתפתחים פוליפים חדשים זהים גנטית.

איור 9

רבייה אל-מינית. (מימין) **פוליפים חדשים קטנים מנצים מבסיס הפוליפים הבוגרים.** (משמאל) **פוליפ במהלך תהליך ההתפצלות לשני פוליפים, כאשר שני פתחי פה ברורים כבר מופיעים**

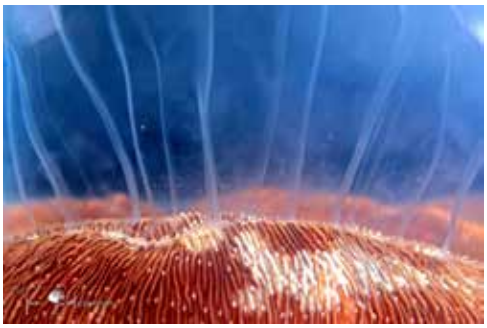
המושבתית השונה למיני האלמוגים. פוליפים חדשים מנצים לרוב בשולי הפוליפ או מושבת אלמוג קיימת. לדוגמה, במיני אלמוגים מסועפים, ענפי המושבה מתארכים כתוצאה מהנצת פוליפים חדשים בקצותיהם. במינים בהם פוליפים עוברים חלוקה פנימית לשני פוליפים (שיטה הקרויה **הנצה** תוך-פוליפית), הפוליפ הראשוני לרוב מתעבה ומתארך כך שבקצהו מתחיל להיפתח פה נוסף. לאחר מכן, בעוד מושבת האלמוג כולה ממשיכה לגדול, הולכים שני הפיות ומתרחקים זה ומזה ולבסוף מושקע גם שלד גירני אשר חוצה בין שני הפיות והופך אותם לשני פוליפים חדשים ונפרדים (איור 9).

צורת רבייה אל-מינית נוספת, המכונה "**רביית מקטעים**", היא למעשה שבירה של חלק ממושבת אלמוג קיימת. תופעה זו קורה בעיקר באלמוגים שיחניים בעלי צורות מסועפות. חלקי מושבות (ענפים) עלולים להישבר בקלות בעת סערה או פגיעה חזקה של דג או יצור ימי אחר. מרבית השברים הללו מתגלגלים אל קרקעית השונית, לעיתים על פני החול ולעיתים אל תוך חריצים עמוקים בשונית. חלקם אינם נחשפים לאור השמש, לו זקוקות האצות השיתופיות שלהם בכדי לייצר אנרגיה וכך שברים אלו בסופו של דבר מתים. למרות זאת, ישנם מקרים בהם הענפים השבורים מצליחים להתבסס מחדש בשונית ולפתח מושבת אלמוג חדשה. מצד אחד יש ב"רביית מקטעים" יתרון, משום שבצורה זו יכולות להיווצר בצורה מהירה מספר מושבות אלמוגים. מנגד, החיסרון בצורת התרבות זו היא שכל מושבות הבת הנוצרות, זהות גנטית למושבת האם ובכך לא מתאפשרים המגוון והחידושים הגנטיים, המתהווים ברבייה מינית וחיוניים לשגשוג והתאמת אוכלוסיות אלמוגים לתנאי סביבתם לאורך טווחי זמן גדולים.

רביית מקטעים
צורת רבייה אל-מינית אשר בה חלקי מושבת אלמוג נשברים ונפרדים ממושבת האם, נופלים לתחתית השונית ולעיתים מצליחים להתבסס מחדש ולגדול.

איור 10

אלמוגי אבן חד-ביתיים בהם כל פוליפ בודד מייצר גם תאי זרע וגם ביציות ומשחרר את כולם בבת אחת בצבר אחד המכיל את כל תאי המין



איור 11

אלמוגים דו-ביתיים (זוויגים נפרדים)
מימין - **מושבת אלמוג אבן נקבית בעת שחרור צברי ביציות ורדרדות.**
משמאל - **אלמוג אבן יחידני זכרי בעת שחרור תאי זרע**

2. **רבייה מינית** - אלמוגים, כדוגמת יתר בעלי החיים, מוכרחים לייצר צאצאים בכדי להבטיח את המשך קיומם לדורות הבאים. מרגע הגיעם לבגרות מינית, מתרבים האלמוגים בדרך של רבייה מינית באופן עונתי – לרוב במחזוריות של פעם אחת בשנה, אם כי ישנם מינים שיכולים להתרבות מספר פעמים בשנה. רבייה מינית היא למעשה מפגש והפריה בין תאי מין – תא זרע ותא ביצית, שמקורם בהורים שונים. בתהליך ההפריה הם מתלכדים לכדי תא אחד חדש אשר תכונותיו והחומר התורשתי שלו מורכבים מאלו של שני תאי המין שיצרו אותו. מתא זה מתפתח עובר היוצר חיים חדשים - פרט חדש באוכלוסיה.

מרבית מיני האלמוגים בעולם הינם חד-ביתיים או "**הרמפרודיטים**", כלומר - אותה מושבת אלמוג (ולרוב גם כל פוליפ במושבה) מכילה בלוטות מין של שני הזוויגים ומתפקדת כזכר ונקבה כאחד (איור 10) - מייצרת הן תאי מין נקביים (ביציות) והן תאי מין זכריים (תאי זרע). מנגד, קיימים גם מיני אלמוגים שהם דו-ביתיים או "**נפרדי-זוויג**". אלמוגים אלו הינם בעלי זוויגים נפרדים, כלומר - מושבת אלמוג מתפקדת אך ורק כזוויג אחד - זכרי או נקבי (איור 11). בנוסף לאמור לעיל, מצויים כמה מיני אלמוגים אשר מסוגלים לשנות את זוויגם משנה לשנה וכך הם יכולים להיות נקבה ולייצר ביציות בשנה אחת ולאחר מכן להשתנות לזכר ולייצר תאי זרע בשנה העוקבת, וכן הלאה.

אך האלמוגים צמודים כל חייהם למצע השונית. ללא היכולת לנוע, לחפש ולפגוש בני זוג לצורכי רבייה, כיצד הם יכולים להתגבר על מכשול זה ומצליחים להתרבות?

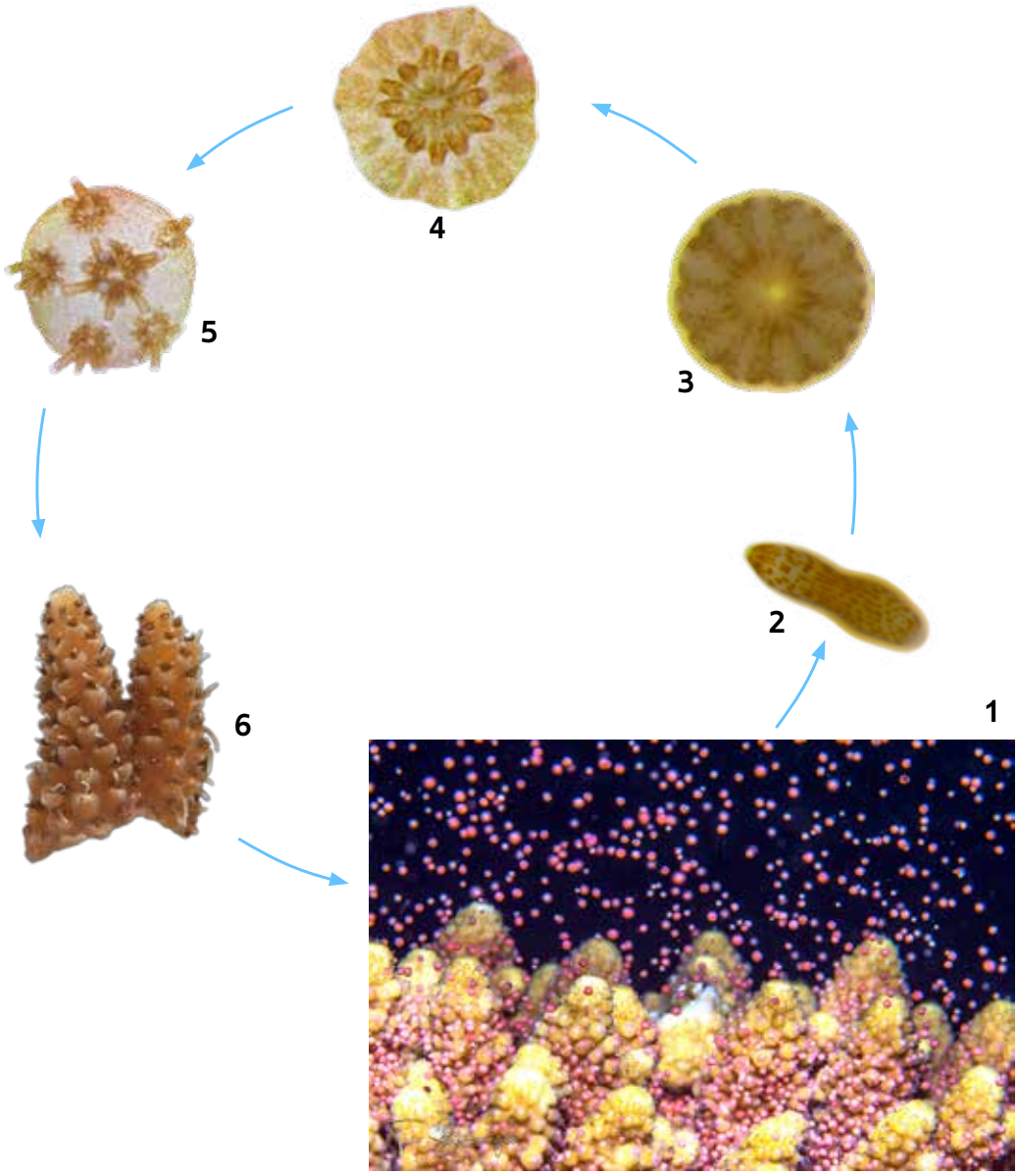
חד-ביתי (הרמפרודיט)
מין בטבע אשר בו כל פרט הינו גם זכר וגם נקבה.

דו-ביתי / נפרד-זוויג (גונוכוריסט)
מין בטבע אשר בו פרט בודד הינו זכר או נקבה.

ה"פתרון" של הטבע לבעיה הינו פיתוח שיטת רבייה בה ההפריה מתרחשת חיצונית במים, כלומר לא בתוך גוף החיה. מרבית האלמוגים משחררים למים הפתוחים בו זמנית את כל תאי המין שלהם. כל החומר הרבייתי הזה (תאי הזרע והביציות) נסחף בזרמים וצף לאיטו לפני המים. תוך כדי ההיסחפות יפגוש תא זרע את הביצית, יתלכד איתה ויפרה אותה. ההתפתחות העוברית תתרחש במים הפתוחים וחיים חדשים ייווצרו. לאחר ההתפתחות העוברית נוצרת פגית הנקראת **פלנולה** (זהו בעצם "זחל" האלמוג) בגודל של כ-1-2 מ"מ והיא ממשיכה להיסחף בזרמי הים למשך זמן שיכול להיארך בין שעות, לימים ושבועות. לפלנולה מבנה כדורי-אגסי פשוט, בעל שתי שכבות גוף ומוקף בריסים המשמשים לתנועה. תנועת הפלנולה חלשה, מוגבלת ואינה יכולה להתמודד כנגד זרמי הים והגלים. לפלנולה של האלמוג יכולות חישה לסביבה (חישה לאור, לחומרים כימיים מהשונית ועוד) ואם היא מגיעה למצע השונית וחשה את הסימנים הנכונים המעודדים את התיישבותה, היא תיצמד למצע השונית ותחל לעבור מיד תהליך מטמופרמוזה - שינוי צורה. היא תשקיע שלד גירני ויתפתח פוליפ ראשוני אשר יתרבה באופן אל-מיני ויהפוך למושבת אלמוג צעירה (איור 12).

פלנולה

שם הפגית / לרווה של אלמוגים. הפגית הינה למעשה שלב חיים ראשוני תוצר רבייה מינית אשר נסחף עם הפלנקטון ומופץ הרחק ממקום מחייתם של ההורים.



איור 12

מחזור החיים של אלמוג. מימין - (1) אלמוג שיטית בעת שחרור צברי תאי זרע והביציות אשר ייסחפו בזרמי הים עד שתתרחש הפריה ותיווצר (2) פגית האלמוג. לאחר מכן, הפגית תיצמד למצע השונית ותהפוך (3) לפוליפ ראשוני, שישקיע שלד גירני, (4) יגדל (5) ויתחלק ויהפוך בתוך כמה חודשים (6) למושבת אלמוג צעירה

מכשול נוסף עליו צריכים האלמוגים להתגבר בשיטת רביה זו היא העובדה שתאי המין של האלמוגים, בטרם עוברים הפריה והתפתחות לפלנולה, מחזיקים מעמד בים רק שעות בודדות ולאחר מכן הם מתחילים להתפרק ולהיעלם. בנוסף, תאי המין הקטנטנים האלו נמהלים במהרה בים הפתוח - "כמו טיפה בים". כדי להתגבר על אתגרים אלו ולהגדיל את סיכויי ההפריה, פיתחו האלמוגים מנגנונים מופלאים לתזמן באופן מדוייק את רבייתם. המחזורים העונתיים הם העוזרים לאלמוגים לאמוד את הזמן ולסנכרן את מועד רבייתם. לדוגמה, מרבית האלמוגים מתרבים בחודשים החמים בשנה ותחילת התחממות מי הים לפני הקיץ, מעידה על העונה או החודש המתאים. מחזוריות הירח מסייעת לאלמוגים לתזמן את הלילות המסוימים בחודש, בהם יתרבו. שעת השקיעה עוזרת לתאם את השעה המדוייקת בלילה בה הם ישחררו למים את תאי המין בבת אחת, להגדלת סיכויי התלכדות והפריה. בנוסף, ייתכן ותקשורת כימית דרך המים, כלומר חישה של הורמונים הנישאים במים, עוזרת גם היא לתיאום מסונכרן של שחרור תאי המין.

למרות שרוב אלמוגי האבן בוני השונית ברוב המקומות בעולם מתרבים בחודשים היותר חמים בשנה, ישנם הבדלים בדפוסי הרבייה בין איזורים שונים. לדוגמה, במפרץ אילת מרבית מיני האלמוגים מתרבים במהלך מספר חודשים בקיץ (למרות שישנם כמה מינים אשר מתרבים בעונות אחרות בשנה) אך רוב המינים מתרבים למעשה בשעות, לילות, ומופעי ירח שונים. כל מין בזמן הקבוע שלו – כך נוצר **בידוד רבייתי** בזמן בין מיני האלמוגים, אשר מפחית משמעותית את הסיכויים שתהיינה הכלאות לא מוצלחות בין מינים שונים. לאחרונה נמצאו במפרץ אילת שיבושים חמורים בסנכרון הרבייה של מספר מיני אלמוגים, דבר אשר גורם לירידה גדולה בסיכויי ההפריה ולכישלון רבייתי. לסרטון המציג את תופעת רביית האלמוגים במפרץ אילת והסכנות האורבות לה לחצ/י כאן.

מנגד, בשונית המחסום הגדולה באוסטרליה, למעלה מ-100 מיני אלמוגים שונים, לאורך מאות קילומטרים של שונית, מתרבים במשך מספר לילות בודדים בשנה, בדרך כלל בשבוע שלאחר הירח המלא בחודש נובמבר או דצמבר. רביית האלמוגים באוסטרליה זכתה לכינוי "**רבייה המונית**", שכן כל מושבות האלמוגים של מספר גדול במיוחד של מיני אלמוגים משחררים בו זמנית את כל תאי המין שלהם. למרות שברבייה המונית שכזו יכול להיות סיכוי גדול להפריות בין מינים שונים והיווצרות בני-כלאיים, שאינם ממשיכים להתפתח ולשרוד בדרך כלל, היתרון בדגם רבייתי זה יכול להיות טמון בהקטנת סכנת הטריפה של תאי המין. עבור דגי השונית, אירועי הרבייה של האלמוגים משמשים כסעודה חגיגית ומזינה במיוחד וכאשר כל האלמוגים באוסטרליה משחררים את תאי המין שלהם בו זמנית הם למעשה מציפים את הים בחומר רבייתי ובמהירה כל הדגים ישבעו ולא יטרפו עוד. שתי הדוגמאות לעיל של עונתיות רביית האלמוגים במפרץ אילת לעומת אוסטרליה מהוות למעשה שני קצוות של דפוסי רבייה, כאשר אלמוגים במקומות שונים בעולם עשויים להראות דפוסים עונתיים שונים היכולים לנוע בין שני קצוות אלו.

קיימים מיני אלמוגים בהם ההפריה הינה פנימית, כלומר בתוך חלל הפוליפ, ולא בגוף המים. מיני אלמוגים אלו משחררים אל מי הים רק תאי זרע אשר נקלטים על ידי מושבות אחרות וכך ההפריה וההתפתחות העוברית מתרחשות בתוך גוף האלמוג. לאחר השלמת ההתפתחות העוברית בגוף הפוליפים, ישוחררו מתוכם פלנולות מוכנות להתיישבות.

בידוד רבייתי
מונח המסביר אסטרטגית רבייה מינית של אלמוגים (ובעיקר אלו במפרץ אילת). מושג זה מתייחס לתופעה בה מינים שונים של אלמוגים מתרבים בלילות שונים במהלך חודשי הקיץ ובשעות שונות במהלך הלילה. באופן זה נוצר בידוד רבייתי בזמן הרבייה של מינים שונים, דבר המונע יצירת בני-כלאיים, אשר לרוב אינם פוריים ו/או מאריכי חיים.

רבייה המונית
מונח המסביר אסטרטגית רבייה מינית של אלמוגים (ובעיקר אלו בשונית המחסום הגדולה באוסטרליה). מושג זה מתייחס לתופעה בה פרטים רבים, המשתייכים למינים רבים, מבצעים את רבייתם המינית (שחרור תאי המין למים) בו זמנית.

איור 13

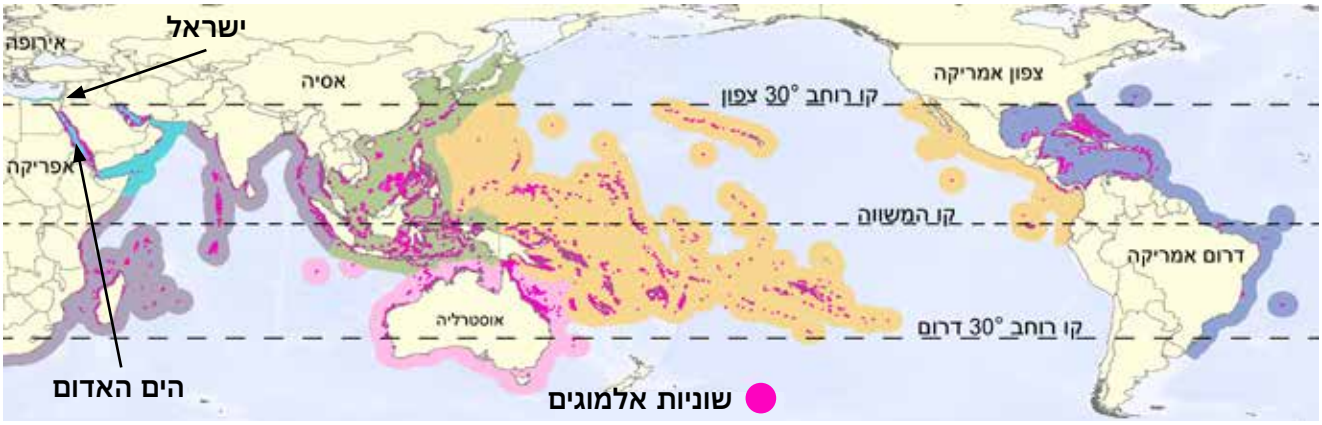
שונית האלמוגים במפרץ אילת בשעת שקיעה

שונית אלמוגים

שוניות אלמוגים הן כנראה מערכות החיים המורכבות, המרהיבות והעשירות ביותר באוקיינוסים, והן גם מבתי הגידול הצבעוניים, המגוונים והמסקרנים ביותר על פני כדור הארץ. בין המבנים המורכבים, הכוכים והסדקים של השונית חיים להם אינספור מינים של דגים, קיפודי ים, חלזונות, כוכבי ים, צדפות ועוד רבים אחרים (איור 13).

לפני שנמשיך ונלמד כיצד מתפתחות שוניות אלמוגים על שלל בעלי החיים שבהן, חשוב לדעת שאלמוגים מסוגים שונים ניתן למצוא בכל סביבה ימית בעולם. ישנם אלמוגים שחיים במעמקי האוקיינוסים - בעומקים של אלפי מטרים, וישנם אפילו אלמוגים שחיים בקטבים. אולם תפוצת שוניות אלמוגים היא הרבה יותר מצומצמת ומתרכזת בעיקרה בעשרות המטרים הרדודים של הים ובעיקר באזורים הטרופים בעולם, בתחומי קווי רוחב °30 צפון ו °30 דרום (איור 14).

אז מה מגביל, אם כן, את תפוצת שוניות האלמוגים בעולם?



איור 14

תפוצת שוניות אלמוגים בעולם וחלוקה לאזורים גיאוגרפים עיקריים

מהם התנאים הנחוצים להיווצרות שונית?

באופן כללי, שוניות אלמוגים גדלות על קרקעית הים, באזורים מוארים וחמימים (בהשוואה לכלל מרחבי האוקיינוסים). אלמוגי האבן, הבונים שלד גירני נוקשה, הם בעלי החיים העיקריים והחשובים ביותר ביצירת המבנה המורכב של שונית האלמוגים. שונית אלמוגים, כשמה כן היא - בנויה בעיקרה משלדי אלמוגי האבן ועל כן היא נחשבת **למבנה ביוגני**, כלומר, שנבנה על ידי יצורים חיים: כאשר אלמוגים גדלים אחד ליד השני, לעיתים הם מתים אולם שלדם נשאר במקום. על השלד שנותר, יתיישבו ויגדלו אלמוגים חדשים וכך לאט, במשך שנים רבות, ייווצר המבנה האדיר והמורכב שהוא השונית עצמה. ישנם אורגניזמים נוספים אשר יכולים לתרום לבניית השונית. לדוגמה, אצות גירניות, המפרישות שלד גירני דק ומרפדות אזורים שונים בשונית תורמות להתלכדות וחיזוק מבנה השונית. תהליך התפתחות השונית, המתרחש במהלך אלפי ועשרות אלפי שנים, טומן בחובו איזון עדין בין כוחות הבנייה (כדוגמת גדילת אלמוגים חדשים) וכוחות הבליה (כגון מות אלמוגים והתמוססות השונית על ידי כוחות הזרמים והגלים).

התפתחות שוניות אלמוגים דורשת טווח מצומצם יחסית של תנאים סביבתיים. תפוצת שוניות האלמוגים ברחבי העולם מוגבלת למעשה על ידי הפיזיולוגיה והתנאים הדרושים לגדילת אלמוגי האבן, הבונים את השונית. אלמוגי אבן בוני-שונית לא יכולים לשרוד כאשר טמפרטורת מי הים נמוכה מכ-18° צלזיוס. כמו כן, מרביתם גדלים בצורה מיטבית כאשר טווח טמפרטורת מי הים נע בתחומי 20° עד 30° צלזיוס (אם כי ישנם אזורים בעולם בהם האלמוגים עמידים גם בטמפרטורות גבוהות במעט מ-30° צלזיוס). לדוגמה, בים התיכון ובהתאם למשרעת הטמפרטורות שבו, למרות שאפשר למצוא אלמוגי אבן, הם אינם אלמוגים בוני-שונית ולכן לא מתפתחות בים התיכון שוניות אלמוגים כדוגמת אלו שניתן למצוא בים סוף. בין היתר זקוקים אלמוגים בוני-שונית לטווח מסוים של מליחות מי ים, העומד על כ-32‰-42‰ (מדד המליחות נמדד ככמות גרם מלח לקילוגרם של מי ים). בנוסף, שוניות אלמוגים מתפתחות טוב יותר באזורים בהם מי הים צלולים במיוחד, כדי שכמות מרבית של אור השמש יגיע אל האלמוגים (בשל חיי השיתוף שלהם עם האצות הפוטוסינתטיות השיתופיות וזיקתן של אצות אלו לאור השמש).

מבנה ביוגני
מבנה גאולוגי קשיח הנוצר על ידי בעלי חיים

התלות הגבוהה של אלמוגים בוני שונית באור השמש מסבירה מדוע שוניות אלמוגים מתפתחות אך ורק באזורים רדודים באוקיינוס - זאת מכיוון שאור השמש מסתנן במהירות על ידי מי הים ולעומקים העולים על 100-150 מטרים כמעט ואינו מגיע. מאפיין נוסף אשר חשוב להכירו הינו ריכוז ואופי חומרי הדשן בים. חומרים אלה משמשים כחומרי הזנה לאלמוגים ולאצות, ודרושים בשונית אך במינון נמוך. באזורים בהם ריכוז חומרי הדשן הינו גבוה צלילות מי הים נפגעת והם הופכים עכורים כתוצאה מריבוי אצות חד תאיות במים. נוסיף לכך את העובדה שבתנאים של העשרה בחומרי דשן, אצות ממינים שונים פורחות וצומחות על פני השונית מהר ובכמויות גבוהות יותר ואינן משאירות לאלמוגים, אשר קצב גידולם איטי ביותר, סיכוי גדול לגדול ולהתפתח. למעשה, שוניות אלמוגים מתפתחות אך ורק באזורים בהם מי הים עניים במיוחד בחומרי דשן ולכן הם מכונים לעיתים "מדבר ימי".

אחד האנשים הראשונים שהבחינו בתופעה זו והוא אשר כינה את שוניות האלמוגים "נאות מדבר בשממה ימית" הוא לא אחר מאשר חוקר הטבע והגאולוג האנגלי צ'רלס דרווין, אשר מוכר לרוב כ"אבי תורת האבולוציה". בשנת 1832, קרוב ל-30 שנים טרם פרסם את ספרו הנודע "מוצא המינים" (ובשמו המלא "על מוצא במינים בדרך הברירה הטבעית או השתמרות גזעים מועדפים במאבק לחיים"), יצא דרווין הצעיר, שעדיין לא מלאו לו 23 שנים, למסע חובק עולם במשך קרוב לחמש שנים על סיפון הספינה "ביגל". לאחר שובו לאנגליה כתב דרווין ספרים ומאמרים רבים על תצפיותיו בעולם כאשר הראשון שבהם היה ספרו "מבנה ותפוצה של שוניות אלמוגים", אשר יצא לאור ב-1842. בספר זה פיתח דרווין תיאוריות גיאולוגיות חשובות על אופן היווצרותן של שוניות אלמוגים מטיפוסים שונים ובעיקר על היווצרות איי אלמוגים בלב האוקיינוסים. אחת התופעות שהפליאה ביותר את דרווין הייתה עובדת שגשוגן של שוניות אלמוגים עשירות בחיים דווקא באזורים הטרופיים, בהם הים דל ביותר בחומרי דשן. דרווין הגדיר זאת כ"פרדוקס שוניות האלמוגים" אשר לימים נקרא גם "הפרדוקס של דרווין". רק כעבור שנים רבות לאחר מותו של דרווין החלו להתבהר ההסברים הביולוגים לפרדוקס זה, כאשר אחד ההסברים המרכזיים הוא יחסי הגומלין בין האלמוגים לאצות השיתופיות, ששוכנות ברקמות האלמוג ומבצעות הטמעת-אור.

חשיבות ותפקידי שונית האלמוגים

למרות ששוניות אלמוגים מכסות שטח קטן ביותר מסך שטח האוקיינוסים (פחות מאחוז אחד), הן מכילות כמות אדירה מכלל בעלי החיים הקיימים בים. מאות אלפי אורגניזמים חיים בסביבות שוניות האלמוגים ולפי הערכות שונות מדובר בכ-25% - 20% מכלל המינים הימיים אשר תלויים בשוניות אלמוגים, בין אם זה כמקור מזון, מסתור ומחיה (איור 15).

שוניות אלמוגים גם חשובות במיוחד לבני אדם לא רק כי הן מספקות בית גידול ומזון לדגים וחיות אחרות, אלא מהסיבה שהן תומכות ומאכילות אותנו. אחוז ניכר משלל הדיג העולמי, אשר מהווה מקור תזונה וחלבון עיקרי למאות מיליוני בני אדם, מגיע מאזורי שוניות אלמוגים. בנוסף יש לשוניות אלמוגים חשיבות אדירה בהגנה על קווי חוף, משום שהן משמשות שוברי גלים טבעיים המגנים מפני

איור 15

שוניות אלמוגים מהוות בית גידול - מקור למזון ומחסה למגוון אדיר של בעלי חיים

סערות ובליית האזור החופי, במיוחד באיים טרופיים. יתר על כן, תועלת נוספת אנו מקבלים מאורגניזמים שונים החיים בשונית האלמוגים והיא השגת מרכיבים טבעיים לצרכי התעשייה הפרמצבטית (תעשיית התרופות). מגוון גדול של חומרי טבע בעלי פעילות ביולוגית כדוגמת חומרים אנטיביוטיים, חומרים כימיים שעשויים לעזור למלחמה במחלת הסרטן, מתגלים במינים שמקורם בשונית האלמוגים. בהיבט הכלכלי חשובה תיירות המבוססת על שוניות אלמוגים שהיא תעשייה הולכת וגוברת המספקת מקור הכנסה עיקרי באזורים רבים בעולם.

בהסתמך על תפקידי ושירותי המערכת שמספקות שוניות האלמוגים, כלכלנים מעריכים ששווין לכלכלה העולמית הוא למעלה מ-150 ביליון דולר בשנה, ושהן תומכות ביכולת המחייה של מיליוני בני אדם בלמעלה מ-130 מדינות, בעיקר באמצעות התיירות והדיג כמקור מזון. לכן חשוב להבין שאם נאבד את שוניות האלמוגים, זה לא יהיה "רק" אסון אקולוגי-סביבתי, אלא אסון בעל השלכות משמעותיות על החיים של בני אדם רבים ברחבי העולם, ולא רק על אלו שנהנים לצלול ומחפשים להתבונן בטבע התת ימי. ובכל זאת, שוניות אלמוגים רבות ברחבי העולם הולכות ודועכות ונמצאות בסכנת קיום ממשית בעקבות מכלול מצטבר של גורמים.

האיומים על שוניות אלמוגים

ראשית, קיימים נזקים המתרחשים בשונית האלמוגים באופן טבעי. סערות חזקות היוצרות גלים גבוהים וחזקים עלולות לשבור אלמוגים רבים. שיטפונות לאחר גשמים ומי נחלים עשויים להזרים אל הים חומרי דשן וסחף (איור 16) שיכולים לכסות ולקבור את האלמוגים וכך למנוע מהם את אור השמש החיוני לשרידותם. בנוסף, מצויים בעלי חיים טורפי אלמוגים כדוגמת כוכב ים הנקרא 'כיפת-קוצים קטלנית' (נקרא בעבר 'כוכבן קוצני') או חלזונות הניזונים על רקמות אלמוגים (איור 16). חשוב לזכור, שלמרות הנזקים הכבדים שאנו עשויים לאתר כתוצאה

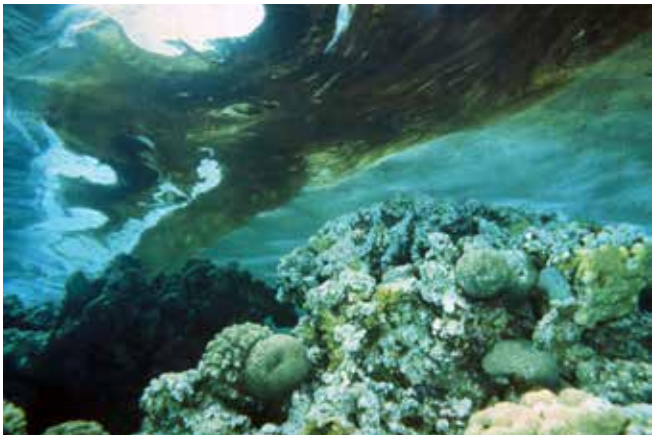
איור 16

דוגמה להפרעות טבעיות במפרץ אילת. (מימין) **מי סחף עכורים זורמים אל תוך מפרץ אילת לאחר גשמים חזקים ושיטפונות ברחבי הנגב.** (משמאל) **כוכב הים, כיפת-קוצים קטלנית, אשר לרוב מסתתר בין נבכי השונית במשך היום, יוצא בלילה וטורף רקמת אלמוגים. האזור הלבן מתחת לכוכב הים הינו שלד האלמוג הנגלה לאחר שהכוכב סיים לעכל את רקמות האלמוג**

מהגורמים המוזכרים לעיל, מפגעים אלו הם למעשה חלק מהפעילות הטבעית המתרחשת בים. יתר על כן, הם יכולים לתרום לעיתים להגדלת מגוון המינים, לפחות כאשר אינם מתרחשים לעיתים קרובות או בצורה קיצונית מדי. כוחות טבע אלו מייצרים מעין ויסות של השונית ומונעים השתלטות של מינים חזקים ודומיננטיים במיוחד על חלקים גדולים של השטח. הפרעות אלו מפנות למעשה אזורים חדשים בשונית, שיהיו זמינים לאכלוס על ידי מגוון רחב של בעלי חיים, לעיתים אפילו מגוון גדול יותר מזה שהיה טרם הסערה.

בניגוד להפרעות הטבעיות אשר רבות מהן חוו שוניות אלמוגים במהלך מאות אלפי שנות אבולוציה, בעשרות השנים האחרונות מתרבות הפרעות מעשה ידי אדם בקצב הולך וגובר. כתוצאה מהגידול המהיר של אוכלוסיית בני האדם ברחבי העולם, לצד הרגלי מחיה רבים שאינם ברי קיימא ומזיקים לסביבה הטבעית, התפתחה רשימה ארוכה של איומים אנתרופוגנים על הסביבה הימית. נחלק אותם לשלושה סוגים עיקריים:

1. **דיג-יתר** או **ניצול-יתר** - באזורים מסוימים בעולם קיימות חברות דיג שונות העובדות על פי ממשק דיג בר-קיימא ומבוסס מדע. כלומר, פועלות בהתאם להגבלות שמטרתן למנוע הידלדלות הרסנית של אוכלוסיות דגים, כך שלא תעשה פגיעה בלתי הפיכה להמשך קיום מינים אלו. אף על פי כן, עקב ביקוש וצריכה הולכים וגוברים, תעשיית הדיג מפתחת שיטות "יעילות" יותר, בהיקפים גאוגרפיים חוצי גבולות, במטרה לתפוס "ולנצל" ככל שאפשר ממשאבי הים. בעבר, היו נפוצות במדינות רבות שיטות דיג הרסניות במיוחד. לדוגמה, זריקת מקלות דינמיט על השונית - דבר אשר לא רק גורם לתמותת דגים נרחבת (וביניהם גם דגים אשר ה"דייגים" לא מעוניינים בהם) אלא גם לשבירה אדירה של מסד השונית עצמו. מעבר לשבירה ולנזק הפיזי שנגרם לשונית האלמוגים, דיג-יתר עלול במקרים רבים לגרום להפרעה חמורה באיזון של כלל המערכת. לכל בעל חיים יש מעין "תפקיד" הנחוץ לקיום כלל המערכת וכאשר אנו מעלימים או פוגעים בחלק מבעלי תפקידי המפתח התוצאה עשויה לעיתים לגרום לקריסה של כלל המערכת. לדוגמה, במקומות רבים בעולם כרישים ניצודים בצורה נרחבת ובלתי מבוקרת. כרישים נמנים על טורפי-העל החשובים ביותר בסביבה הימית שהיא כאמור בעלת איזון דינמי ועדין. צמצום עד כדי העלמה כמעט מוחלטת של אוכלוסיית הכרישים באזורים שונים עלולה לגרום לגידול משמעותי באוכלוסיות



איור 17

דוגמה לזיהומים מעשה ידי אדם במפרץ אילת. (מימין) **פסולת מכל הסוגים בקרקעית החוף הצפוני.** (משמאל) **זיהום נפט מתפשט על פני המים ישירות מעל שונית האלמוגים בשמורת הטבע 'חוף האלמוגים'**

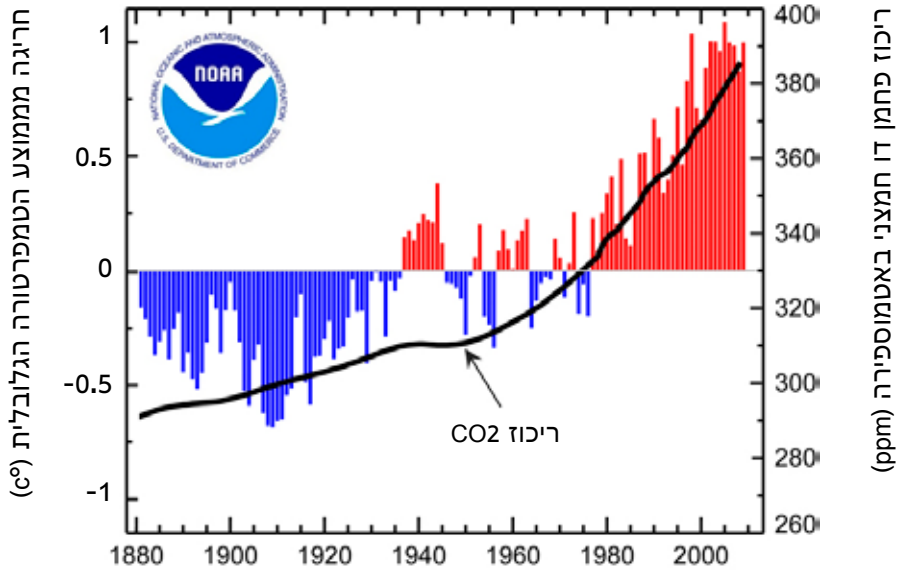
דגים טורפים גדולים, אשר אוכלוסיותיהם מווסתות בין היתר על ידי הכרישים. דגים גדולים אלו טורפים דגים קטנים יותר, אשר לרוב הינם צמחוניים ובהינתן אוכלוסייה גדולה מדי של דגים טורפים, כמות הדגים הצמחוניים עלולה להידלדל בצורה משמעותית. לדגים צמחוניים אלו ישנו תפקיד חשוב באכילת אצות הגדלות בשונית ובוויסות אוכלוסייתן וקצב התפשטותן לצד האלמוגים. במקרים רבים אנו רואים שכאשר אוכלוסיית הדגים הצמחוניים קורסת אצות שונות מתחילות לכסות את השונית בקצב מהיר, לגרום לתמותת אלמוגים ולשנות את כל מערכת השונית המגוונת לכזו הנשלטת על ידי אצות ושאינה מכילה מגוון גדול ובריא של בעלי חיים כדוגמת שונית האלמוגים שהייתה שם לפני כן.

2. **זיהום** - האדם מזהם בצורה ניכרת את הים, בין אם זה במודע באופן ישיר ובין אם זה באופן עקיף וכתוצאה מתאונות לא מכוונות. לדוגמה, במקומות רבים מוזרמים שפכים, מי ביוב וכדומה בצורה ישירה אל הים ומזהמים אותו בחומרים רבים, חלקם אף רעילים ומסוכנים לבני אדם. דליפות של דלקים, שמנים, ונפט מתרחשות לצערנו בתכיפות גבוהה ובכמויות גבוהות במקומות רבים בעולם (איור 17). דליפות אלו מהוות סכנה קיומית מיידית הפוגעות בכל בעלי החיים אשר חייהם קשורים לים, החל מציפורים, צבי ים, לוויתנים ועד לאלמוגים ולדגים. בנוסף לכך, גם הזיהום שמקורו בפעילות אנושית ביבשה מגיע בסופו של דבר אל הסביבה הימית על ידי מי גשמים ונחלים, שזורמים אל הים ושוטפים אליו כל מה שהם אוספים בדרך.

3. **שינויי אקלים** - זהו אולי האיום הגדול ביותר, שכן גם שוניות אלמוגים באזורים הנידחים ביותר בכדור הארץ, הרחק מכל התיישבות אנושית, מושפעות משינויי אקלים. במהלך שני העשורים האחרונים אנו עדים לדעיכה מהירה של שוניות אלמוגים רבות ברחבי העולם. תמותה של אלמוגים והתפוררות השונית עצמה, גורמים לפגיעה מהותית בכל מארג החיים המותנה בשוניות אלמוגים בריאות. דעיכה זו של שוניות אלמוגים קשורה מאוד לשינויי אקלים, שהם למעשה תוצר ישיר של סגנון החיים והצריכה המודרניים של בני האדם. קיימים שני תהליכים מרכזיים, הקשורים לשינויי אקלים ופוגעים משמעותית בשוניות אלמוגים: התחממות גלובלית והחמצת האוקיינוסים. שני תהליכים אלו שלובים זה בזה ונובעים כתוצאה מפליטה הולכת וגוברת של גזי חממה, ובפרט פחמן דו חמצני, לאטמוספירה. העלייה בריכוז גזי החממה באטמוספירה נובעת בעיקר

איור 18

טמפרטורה עולמית וריכוז הפחמן הדו חמצני בשנים 1880-2010



הטמפרטורה בגרף זה מציגה את החריגה ממוצע הטמפרטורה הגלובלית עבור השנים המפורטות באיור. כלומר, ההפרש בין הטמפרטורה בשנה מסוימת לבין ממוצע הטמפרטורות במשך כ-130 השנים האחרונות. הקו השחור המציג את ריכוז הפחמן הדו חמצני באטמוספירה מראה בבירור את הקשר שבין ההתחממות הגלובלית לפליטת גזי חממה לאטמוספירה

משימוש ושריפה של כמויות הולכות וגדלות של דלקים על בסיס פחמן כדוגמת בנזין, פחם, מזוט וגז טבעי. תהליך זה תורם לעלייה יחסית מהירה בטמפרטורה הממוצעת על פני כדור הארץ (איור 18). ההתחממות הגלובלית של כדור הארץ גורמת גם להתחממות האוקיינוסים ומובילה להתפשטות 'גלי חום' אשר גורמים לתופעה המכונה 'הלבנת אלמוגים' (איור 19). כפי שלמדנו קודם, אלמוגים בוני שונית דורשים טווח טמפרטורה מאוד מסוים למחייתם, ולאלמוגים רבים מספיק שהטמפרטורה תחרוג רק במעלה אחת או שתיים מעל למקסימום השנתי שהם מותאמים לו, כדי שיתחילו להלבין, ובעקבות זאת אולי אפילו למות.

אז מהי בעצם אותה 'הלבנת אלמוגים'? הלבנה זו הינה **תגובת עקה** של האלמוגים הגורמת למעשה לשבירת אותה שותפות עתיקת-יומין בין האלמוגים והאצות השיתופיות שחיות ברקמותיהם. תחת תנאי עקה, האצות השיתופיות נפלטות החוצה מרקמות האלמוג. אצות אלו מקנות לאלמוגים, בין היתר, הרבה ממגוון הצבעים שלהם (בעיקר החומים והירוקים) ומכיוון שרקמת האלמוג דקה מאוד ושקופה, ללא האצות אנו רואים בעצם דרך רקמת האלמוג הדקיקה את שלד האלמוג הלבן עצמו. לכן התופעה נקראת 'הלבנה'. תגובת עקה זו יכולה להיגרם ממכלול רחב של גורמים כמו חשיפה למים מתוקים ומליחות מי ים נמוכה, חשיפה לקרינת שמש חזקה, טמפרטורות נמוכות במיוחד, ועוד'. אף על פי כן, אירועי ההלבנה רחבי הידיים המתרחשים בשנים האחרונות לאורך מאות קילומטרים של שוניות ומאיימים על קיומן, נובעים מטמפרטורות מים גבוהות במיוחד. כאשר אלמוג מלבין, למשך זמן מסוים הוא עדיין חי ואפילו יכול לרכוש בחזרה את האצות השיתופיות שלו ולהתאושש, אולם כאשר עקת גל החום מתמשכת, אלמוגים רבים בסופו של דבר מתים. למרות זאת, קיימים הבדלים רבים בעמידות ושרידות האלמוגים לגלי החום השוטפים בצורה גוברת את האוקיינוסים. ישנם מיני אלמוגים שהם יותר עמידים יותר לטמפרטורות גבוהות מאשר אחרים. מצויים מיני אלמוגים המאכלסים ברקמותיהם אצות שיתופיות עמידות אשר לא נפלטות החוצה מרקמות האלמוג. באזורים מסוימים בעולם, לדוגמה מפרץ אילת, נמצאות

תגובת עקה
תגובת לחץ / סטרס. מונח פיזיולוגי המתייחס לתגובת המצוקה של יצור הנובעת מהפרעות או פגיעות שונות

איור 19

הלבנת אלמוגים

שוניות שלמות אשר כתוצאה ממגוון גורמים התפתחותיים וסביבתיים לא מראות אותם סימני הלבנה משמעותיים אפילו כשטמפרטורות מי הים יחסית גבוהות.

התהליך השני הקשור בשינויי אקלים ומאיים על עתידן של שוניות האלמוגים הוא החמצת האוקיינוסים. הרבה מכמות הפחמן הדו חמצני שאנו משחררים לאטמוספירה לא נשאר בה, אלא נספג באוקיינוסים, ומשנה את המבנה הכימי של הים ואת ההרכב של החומרים המומסים במים, וגורם לאוקיינוסים להיעשות יותר חומציים. די בשינויים קטנים בחומציות המים כדי שיהוו אתגר גדול עבור אלמוגים וקושי בבניית השלד הגירני שלהם. למעשה, נפוצות תחזיות המעריכות כי עד סוף המאה הנוכחית, בקצב הנוכחי של החמצת האוקיינוסים, אלמוגים רבים לא יצליחו לבנות את שלדם הגירני אשר יתמוסס במים החומציים בקצב מהיר יותר מקצב השקעתו ובנייתו כשלד אלמוג.

יחסי גומלין בשונית - חיים בלתי פוסקים של שיתוף ותחרות

בנוסף לחיי השיתוף של האלמוגים עם האצות הפוטוסינתטיות, אשר הוזכרו עד כה, ניתן למצוא בשונית האלמוגים עוד אינספור דוגמאות של חיי שיתוף מורכבים ומעניינים בעלי אופי שונה של יחסי גומלין בין המינים המשתתפים. שוניות אלמוגים מהוות בית גידול לאורגניזמים רבים כמו דגים, ספוגים, אצות, צדפות, חלזונות, סרטנים, ועוד. חיי שיתוף ויחסי גומלין אלו נוצרים כאשר מינים שונים מגיבים זה לזה ומאפשרים למערכת הטבעית של שונית האלמוגים לשמור על איזון מארג החיים הטבעי ולאכלס מינים כה רבים יחדיו. בקשרים אלו לפחות מין אחד ייצא נשכר ויהנה מיתרון שחיי השיתוף מעניקים לו ואילו המין השני לעיתים לא נהנה אולם אינו מפסיד, או שלעיתים אפילו יכול להיפגע.

איור 20

(מימין) **דג השושנון מציץ מבעד לזרועות הציד של השושנה בה הוא מתגורר.** (משמאל) **דגים קטנים מהסוג כרומית (וגם פזית אחת) מגיחים החוצה מבין ענפי האלמוג בו הם גרים**

אחת הדוגמאות המוכרות ביותר של חיי שיתוף בסביבת השונית היא חיי השיתוף שבין שושנות ים מסוימות לדגי השושנון (איור 20). שושנות הים הינן קרובות משפחה של אלמוגים ממערכת הצורבים, ובדומה לאלמוגים הן בעלי חיים טורפים בעלי זרועות צייד מלאות בתאים צורבים. הן ניזונות מלכידת יצורי פלנקטון ואף דגים קטנים אשר נלכדים בזרועות הציד הארסיות שלהן. בעלי חיים אלו משותקים על ידי התאים הצורבים ומועברים לפתח הפה של השושנה באמצעות זרועות הציד שלה. אולם דג השושנון הינו יוצא דופן ואף מתגורר למעשה בין זרועות הציד של השושנה. דגי השושנון מכוסים בשכבת רירית דקה אשר גורמת להם להיות חסינים לצריבות השושנה. בדרך זו הדגים מוצאים לעצמם בית ומסתור מוגן במיוחד כאשר גם השושנה מרוויחה מדיירים אלו – דג השושנון מגן בחריצות על השושנה מפני טורפים וגם תורם במידת מה לתזונתה בכך שחלק משאריות האוכל שלו נופלים לפיה. עוד דוגמה לחיי שיתוף בשונית היא מערכת היחסים ההתנהגותית בין סרטנים נקאיים ודגי נקאי לבין הדגים ושאר בעלי החיים הגדולים יותר אותם הם מנקים. הנקאים בעלי 'תחנות ניקוי' באזורים קבועים בשונית אליהם מגיעים הדגים כדי להתנקות. הנקאי מסיר לדוגמה טפילים מגוף ה'לקוח' ומרוויח מכך את ארוחתו (הטפילים עצמם) בעוד שבעל החיים הגדול יותר זכה לטיפול עור וסילוק טפילים מציקים מגופו. דוגמה נוספת הינה חיי השיתוף בין אלמוגים מעונפים (או שיחניים) לבין דגים קטנים שחיים דרך קבע בין ענפיהם (איור 20). דגים אלו לרוב אינם מתרחקים מאלמוג בו הם חיים ובשעת סכנה כשחולף טורף גדול בסביבה הם מתכנסים במהירות אל בין ענפי האלמוג, מקום שבו הטורף לא מצליח להגיע אליהם. אך גם האלמוג "מרוויח" מדגים אלו החיים בין ענפיו – כאשר הדגים שוחים בין ענפי האלמוג ומנפנפים במהירות בסנפיריהם, הם למעשה 'מאווררים' את האלמוג על ידי הזרמת מים טריים בין ענפיו. פעולה זו מאפשרת לאלמוג שטף של מים טריים, נקיים ועשירים בחמצן אשר תורמים לאלמוג בביצוע חילוף חומרים (גזים, חומרי פסולת, וכו') והתנקות מחול ואבק מרחף השוקע על הפוליפים ועלול לכסותם.

מנגד, מתרחשת בשונית האלמוגים תחרות בלתי פוסקת על שטח פנוי כמצע להתיישבות צעירים. אין כמעט סנטימטר אחד בודד בשונית שאינו מאוכלס על ידי אורגניזם כזה או אחר. אם זה לא אלמוג, אז השטח מנוצל על ידי ספוגים, אצות, או חסרי חוליות צמודי מצע שונים. כאשר אורגניזמים אלו גדלים נוצרת

איור 21

תחרות בין אלמוגים ממינים שונים. (מימין) **אלמוג מהסוג שיטית גדל בצורת שולחן מעל אלמוגים קטנים יותר בסביבה ובכך מונע מהם את אור השמש על ידי הצללתם.** (משמאל) **זרועות הציד של האלמוג בצידה הימני של התמונה תוקפות את האלמוג הרך שמשמאל. ניתן לראות שבאזור המגע של זרועות הציד רקמת האלמוג הרך הולכת ומתפוררת וכך גם הפוליפים באזור זה**

קרבה פיזית צמודה ביניהם והם מתחילים ל"הילחם" על השטח ולדחוק אחד את השני באמצעים שונים. תחרות זו יכולה להיווצר הן בין אלמוגים ממינים שונים והן בין מושבות שונות מאותו המין. אלמוגים פיתחו מנגנונים לאיתור וזיהוי מתחרים סמוכים אליהם ולאחר הזיהוי עלולה להתחיל התחרות והאלמוגים ינסו לדחוק את מתחריהם על השטח. אמצעי בולט בו משתמשים האלמוגים בתחרות זו הינן זרועות הציד שלהם וכן 'זרועות סורקות' - זרועות ציד ארוכות במיוחד שהם מפתחים כתגובה לצורך לדחוק מתחרה (איור 21). בדרך זו האלמוגים שולחים זרועות סורקות אל האלמוג או בעל החיים האחר המתחרה על השטח, מפרישים את חומרי הארס שבתאים הצורבים, וגורמים להרס הרקמות ותמותה באזור המגע של המין השני. באופן דומה לשימוש בזרועות הציד בתחרות על השטח בשונית, ישנם אלמוגים אשר עושים שימוש גם בפילמנטים מזנטריאליים (פילמנטים אשר מקורם ברקמות הנמצאות בתוך חלל הפוליפ). למרות שנדיר לראות אלמוגים משתמשים בפילמנטים אלו בטבע, מתצפיות באקווריומים עולה שזוהי תגובה אגרסיבית במיוחד אשר נוצרת כאשר ישנו מגע בין שני סוגי אלמוגים. סוג אחר של תגובה לתחרות על השטח בין אלמוגים הינה עקיפה יותר - אלמוגים שהינם יחסית מהירי גידול, כדוגמת אלמוגים מעונפים רבים, גדלים ומכסים או מצלים על אלמוגים אחרים (איור 21). דבר זה מוביל למניעת תאורה מהאלמוג המוצל כאשר ללא אור השמש הנחוץ לתהליך הפוטוסינתזה, קצב גידולו מוגבל ואיטי יותר ובסופו של דבר מושבת האלמוג יכולה למות. אופן תחרותי נוסף ומאבק בין אלמוגים מתאפשר אפילו במרחק גדול יותר מקו המגע בין שכנים – קיימים מיני אלמוגים המפרישים חומרים כימיים למים אשר פוגעים בהתבססות וגדילת אלמוגים אחרים לידם.

ים סוף ומפרץ אילת

ים סוף, המכונה גם הים האדום, מאכלס כמה משוניות האלמוגים הצפוניות ביותר בעולם, הנחשבות על פי רבים לבין היפות והמגוונות ביותר שקיימות. בים סוף כולו קיימים למעלה מ-1,000 מינים של דגים, כ-350 מינים של אלמוגי אבן (כאשר כ-150 מתוכם מצויים במפרץ אילת), ומי יודע כמה אלפי מינים של חסרי חוליות רבים אחרים. בנוסף, בהשוואה למרבית שוניות האלמוגים ברחבי העולם, יש

בים סוף אחוז גבוה במיוחד של **מינים אנדמיים**, כלומר, מינים אשר הינם ייחודיים לאזור מסוים ולא ניתן למוצאם בשום מקום אחר.

אם כן, אולי תשאלו: מה נשתנה ים זה מכל הימים? מדוע דווקא בים המוקף מכל עבריו מדבר צחיח, פורח לו טבע תת-ימי כה עשיר ושוקק חיים? חלק נכבד מהתשובה לכך קשור לעובדה שאגנו של ים סוף בעל מבנה צר ועמוק והוא סגור יחסית ומבודד במידה רבה מהזרמים השוטפים של האוקיינוס ההודי. כל אלו יחדיו יצרו תנאים אוקיינוגרפיים, גיאוגרפיים ואקלימיים ייחודיים.

ים סוף הוא גוף מים ארוך וצר, המהווה שלוחה של האוקיינוס ההודי. נקודת חיבורו של ים סוף לאוקיינוס ההודי נמצאת במיצרי באב אל-מנדב (משמעות השם בערבית היא 'שער הדמעות') המהווים פתח צר יחסית (עשרות בודדים של קילומטרים) ורדוד (כ-140 מטרים). ים סוף משתרע ממיצרי באב אל-מנדב בדרום ועד לראס-מוחמד בצפון (דרום חצי האי סיני), שם קיימת התפצלות לשני מפרצים (מפרץ אילת / עקבה ממזרח ומפרץ סואץ ממערב) הכולאים ביניהם את חצי האי סיני (איור 22). אורכו של ים סוף קרוב ל-2000 ק"מ ורוחבו המרבי הוא כ-350 ק"מ. אורכו של מפרץ אילת הוא כ-180 ק"מ ורוחבו נע בין 5 ל-26 ק"מ עם ממוצע של כ-16 ק"מ. העומק המרבי במרכז מפרץ אילת הוא כ-1860 מטרים.

מין אנדמי

מין בעל תפוצה גאוגרפית קטנה יחסית ומוגבלת למקום או אזור אחד בעולם

איור 22

תמונת לווין של המזרח התיכון מהאוקיינוס ההודי דרך ים סוף (הים האדום) ועד למפרץ אילת ומפרץ סואץ, המחבר את ים סוף עם הים התיכון באמצעות תעלת סואץ

לעומת זאת מפרץ סואץ, המהווה נתיב הפלגה סואן המחבר את האוקיינוס ההודי דרך תעלת סואץ לים התיכון, הינו רדוד בהרבה ועומקו המירבי הינו כ-73 מטרים בלבד.

ים סוף ומפרץ אילת הם חלק מתצורה גיאולוגית הנקראת הבקע הסורי-אפריקני, אשר נמשך מאפריקה בדרום - מאזור מוזמביק דרך טנזניה, קניה, אתיופיה, מצריים, ישראל, לבנון, סוריה ועד לדרום טורקיה. הבקע הסורי-אפריקני החל

להיווצר לפני כ-20-25 מיליון שנים כאשר לוחות היבשות אפריקה ואסיה החלו להתרחק זה מזה, תהליך גאולוגי הנמשך גם כיום. כתוצאה מכך, מתרחשת בים סוף התפשטות וגדילה של קרקעית הים ולכן הוא נחשב לרוב כאוקיינוס צעיר אשר עדיין בשלביו ההתחלתיים.

התנאים הסביבתיים של מפרץ אילת

מפרץ אילת ממוקם באזור בעל תכונות אקלימיות קיצוניות (בדומה למרביתו של ים סוף), שעיקרן הן חום מדברי, מיעוט גשמים ואידוי רב. במרבית ימות השנה נקיים השמיים מעננים וטמפרטורת האוויר באזור אילת נעה בין כ-10 מעלות צלזיוס בחורף ועד לכמעט 50 מעלות בקיץ. בשל המבנה של ים סוף ומפרץ אילת והאקלים המדברי, נוצרו במפרץ אילת התנאים החיוניים לקיומן של שוניות אלמוגים (איור 23), וזאת ממש בקצה גבול התפוצה הצפוני של שוניות אלמוגים ברחבי העולם.

בשל האקלים החם והיבש והרוחות הצפוניות והצפון-מזרחיות השולטות באזור מרבית הזמן, קצב אידוי מי הים הינו גבוה במיוחד. נוסיף לכך העובדה שלא קיימים נחלים עם מים מתוקים הזורמים בקביעות למפרץ אילת (אלא לעיתים נדירות בעת היווצרות שיטפונות בחורף) וכך עולה מליחות מימי המפרץ והיא מהגבוהות בגופי מים פתוחים ומגיעה ל-42‰ בקירוב (מדד המליחות נמדד ככמות גרם מלח לקילוגרם של מי ים). מליחות זו הינה מיטבית לגדילת אלמוגים ובעלי חיים ימיים אחרים אם כי ערכי המליחות הגבוהים הללו מתקרבים לקצה גבול הסיבולת של בעלי חיים שונים ובמליחות גבוהה יותר הם עלולים להתחיל להיפגע. בהשוואה לטמפרטורות השוררות באוקיינוסים, מפרץ אילת שומר על טווח טמפרטורות אידיאלי לאלמוגים, בין 21°C בחורף ל-29°C בקיץ. טווח טמפרטורות זה נשמר בקביעות הן עקב מבנם הייחודי של אגני ים סוף ומפרץ אילת והן כפועל יוצא מהתנאים האוקיינוגרפים השוררים במקום.

איור 23

מגוון רחב של אלמוגים בשוניות מפרץ אילת תחת ההרים המדבריים המקיפים את המפרץ

איור 24

(מימין) 'קיר האלמוגים' אשר נמצא באתר 'הגנים היפניים' בשמורת הטבע 'חוף האלמוגים' מהווה דוגמה מצוינת להמחשת המדרון התלול במפרץ אילת. בעשרות המטרים העליונים של הים (35 מטרים עומק בתמונה זו), שוניות אלמוגים יכולות לכסות את כל השטח. (משמאל) עקב מיעוט חומרי דשן וזרימת נחלים מימיו של מפרץ אילת צלולים במיוחד ומאפשרים חדירת אור שמש לעומק רב

המבנה הטופוגרפי של שני גופי המים הללו דומה ביותר ומאופיין בקרקעית ים היורדת בתלילות רבה מהאזור החופי למעמקי הים (ים סוף בעומק מירבי של כ-2,800 מטרים) (איור 24). בולט במיוחד מבנה זה במפרץ אילת, שרוחבו צר בהרבה מזה של ים סוף למרות עומקו הרב. פתחו הדרומי של ים סוף לאוקיינוס ההודי, באזור מיצרי באב אל מנדב, רדוד ביותר ויוצר כעין מפתן כניסה גבוה לתחלופת המים בין האוקיינוס וים סוף. כתוצאה מכך נוצר בידוד יחסי של גוף המים בים סוף, כך שרק מי ים מפני השטח יכולים לעבור מהאוקיינוס ההודי לים סוף. שכבת מים עליונים זו הינה חמה יותר ומלוחה פחות מרוב מימי ים סוף. תהליך דומה מתרחש במפרץ אילת כאשר מיצרי טיראן הרדודים עד מאוד מאפשרים תחלופת מי ים, מים סוף לתוך מפרץ אילת רק בשכבת המים העליונה, שהיא כאמור חמה יותר ומלוחה פחות וזורמת צפונה ומתערבבת עם שאר המים במפרץ. חדירת מים בשכבות העליונות של גוף המים גורמת ליציאת מים דרומה לכוון ים סוף. כך חלה תנועת מים החוצה בשכבות התחתונות על פני הקרקעית ומאופיינת במים קרים ומלוחים יותר. בשל תנועה מחזורית זו בתנאים הללו טמפרטורת המים בעומקו של מפרץ אילת אינן שונות בהרבה מאלו של המים העליונים. בקיץ, כאשר החום וקרינת השמש העזה מחממים את המים העליונים מתקבל הפרש של כ-7-8 מעלות בין מי פני השטח למי המעמקים. הפרש זה מתבטל כמעט לחלוטין בחורף, כאשר מימי פני השטח מתחילים להתקרר וכך צפיפותם נהיית קרובה יותר לצפיפות המים בשכבות העומק השונות. בעקבות זה נוצר בחורף ערבול אנכי עמוק של מי מפרץ אילת וכך הטמפרטורות לאורך מאות מטרים של מי ים נהיות זהות ועומדות על כ-21°C.

בעוד שקרקעית מפרץ אילת יורדת לעומק רב (יותר מ-1800 מטרים) רוב האלמוגים בוני השונית מופיעים בעומקים של עד כ- 60-70 מטרים בלבד. במפרץ אילת אפשר למצוא אלמוגי אבן גם בעומקים של כ-100 מטרים ויותר, אולם יהיו אלו מינים בודדים בלבד ולא מהמינים שבונים שוניות מורכבות כפי שאנו מכירים באזורים הרדודים יותר. הסיבה לכך טמונה בצורך הקיומי לאור השמש. בשל מיעוט חומרי ההזנה בים ביחד עם היעדר זרימת נחלים המזרימים חומרי דשן וחול ממקורות יבשתיים, צלולים מי מפרץ אילת בצורה יוצאת דופן (איור 24) – צלילות זו מאפשרת חדירת אור לעומקים גדולים במיוחד המקלה על גידול אלמוגי אבן בעומקים יחסית גדולים.

תנועת זרמי הים הינה משמעותית ביותר לכלל בעלי החיים הצמודים למצע וחסרי היכולת לנוע ממקום למקום כדוגמת אלמוגים, צדפות מסוימות, ושלל בעלי חיים הצמודים למצע השונית. לצד חומרי התזונה אשר האלמוגים מקבלים מהאצות השיתופיות שלהם, הם ניזונים גם מטריפת פלנקטון המגיע על ידי הזרמים. בנוסף, זרמי מים טריים חיוניים לקיום האלמוג לצורך נשימה, חילוף חומרים, אוורור ופוטוסינתזה. הזרמים מהווים גם את האפשרות היחידה של בעלי חיים אלו להפצה, והתיישבות במקומות חדשים. פגיות, או לרוות של בעלי חיים ימיים נסחפות להן עם הזרמים לעיתים ימים ארוכים ואפילו שבועות בטרם הן מתיישבות, מתבגרות, והופכות להיות חלק קבוע בחיי השונית. בדרך זו, בעלי חיים ימיים יכולים להפיץ את צאצאיהם למרחקים גדולים. משטר הזרמים במפרץ אילת הינו יחסית קבוע ומתון במהלך רוב ימות השנה. הרוחות הצפוניות הנושבות באילת רוב ימי השנה יוצרות גלים נמוכים מאד, שגובהם עולה ככל שמדרימים. גלים חזקים הנוצרים בסערות חזקות עלולים לשבור אלמוגים ולפגוע בשונית במידה מה. מצב קיצוני שכזה קורה בעיקר בעונות המעבר, כשהרוח הצפונית מתחלפת ברוח דרומית. הסערות הדרומיות יוצרות גלים גבוהים וחזקים במיוחד אשר שוברים אלמוגים רבים (איור 25). כפי שצוין לעיל, חשוב לזכור שלמרות הנזקים הגדולים שאנו רואים לעיתים בעקבות סערות דרומיות, הן למעשה חלק מהטבע. אירוע שיכול לתרום להגדלת מגוון המינים, בתנאי שקורה לעיתים רחוקות ולא בצורה קיצונית מדי.

איור 25

(מימין) **גלים עוצמתיים נשברים על שובר הגלים בפתח מרינה אילת בעת סערה דרומית.** (משמאל) **שפל קיצוני בצהרי היום חושף את כל חלקה העליון של שונית האלמוגים באילת**

משרעת הגאות והשפל במפרץ אילת היא יחסית קטנה והפרש הגבהים בין שיא הגאות לשיא השפל עומד על ממוצע של כמטר אחד בלבד. אף על פי כן, אחת לכמה שנים מתרחש במפרץ אילת שפל קיצוני ביותר (איור 25) החושף את חלקן העליון של שוניות אלמוגים רבות אל מחוץ לפני הים. כאשר שפל קיצוני זה קורה במהלך שעות היום, הרי שבנוסף להיחשפותם של האלמוגים אל מחוץ לים הם נתונים גם לקרינת שמש ישירה וחזקה מאוד אשר גורמת לתמותה נרחבת ומהירה של אלמוגים רבים במטר העליון של שונית האלמוגים. למרות שהתאוששות השונית משפל זה עלולה לקחת שנים רבות, הרי שהוא אירוע טבעי. כפי שהוזכר קודם בהקשר לנזקי הסופות, גם כאן, שפל קיצוני מהווה גורם המונע השתלטות מינים חזקים במיוחד על כל שטח השונית ובכך עלול לתרום להעלאת ושמירת מגוון המינים.

בתי גידול וחלוקה לאזורים בשוניות האלמוגים באילת

כללית ניתן להגדיר שלושה טיפוסי שוניות אלמוגים בעולם:

1. **שונית חוגרת** - זוהי שונית הגדלה בסמוך לקו החוף ובמקביל אליו. בדרך כלל שוניות אלו מתפתחות במרחק מה מקו החוף ויוצרות לגונה רדודה בעומק של כ-1-2 מטרים בינן לבין החוף. שוניות מסוג זה נוטות להיות צרות באזורים בהם מדרון קרקעית הים תלול ורחבות יותר באזורים בהם המדרון מתון. רבות משוניות האלמוגים בים האדום ובמפרץ אילת הן שוניות חוגרות.

2. **שונית מחסום** - זוהי שונית המתפתחת הרחק מקו החוף, לאורך מדף היבשת השקוע בים, ויוצרת מעין חיץ בין האזורים הרדודים לאזורים העמוקים יותר בים. במקרים רבים נוצרות בין שונית המחסום ליבשה לגונות נרחבות ועמוקות (25 - 15 מטרים). דוגמאות לשוניות מסוג זה הן שונית המחסום הגדולה באוסטרליה, אשר הינה השונית הגדולה ביותר בעולם, ושונית המחסום בבליז, אשר הינה השנייה באורכה בעולם והראשונה בגודלה באוקיינוס האטלנטי.

3. **שונית אטול** - זוהי שונית או רצף של איי שוניות אלמוגים אשר יוצרים מבנה דמוי טבעת סביב לגונה מרכזית. מבנה זה נוצר כתוצאה משקיעת הר געש בלב ים וכך נותרה שונית האלמוגים שגדלה סביבו בעבר. באזורים רבים שרידי הר הגעש עדיין בולטים מעל פני הים ואנו מקבלים איי אטול. רביים מאיי האוקיינוס האינדו-פסיפי הינם אטולים, לדוגמה, האיים המלדיביים, מיקרונזיה, ורבים נוספים.

במפרץ אילת אנו מוצאים את טיפוס השונית החוגרת כאשר באזורים מסוימים היא איננה רציפה ובנויה ממקטעים. מבין המדינות המקיפות את ים סוף, ישראל זכתה ליהנות מהנתח הקטן ביותר של עושר ימי זה, ובכל זאת - הוא מגוון למדי.

ניתן לחלק את האזורים השונים בשונית החוגרת למספר בתי גידול בעלי אופי שונה במקצת (איור 26):

1. **שולחן (או משטח) השונית** - זהו האזור האופקי העליון של השונית, הנמצא קרוב ביותר לפני הים וחשוף למחזורי הגאות והשפל. באזורים שונים במפרץ אילת שולחן השונית יכול להיות נרחב ביותר (בעיקר לאורך חצי האי סיני) ואילו באילת, הוא לרוב ברוחב מטרים בודדים בלבד.

2. **לגונה** - שטח מים רדודים המצוי במקומות בהם השונית ושולחן השונית מתפתחים במרחק מה מקו החוף וכולאים גוף מים רדוד ביניהם לבין החוף. הלגונה מאופיינת בכך שהיא יוצרת בית גידול מוגן ומבודד יחסית מהזרמים והגלים של הים הפתוח.

3. **קדמת השונית** - חלקה העליון של השונית הפונה אל הים הפתוח. במקרים רבים, זהו אחד האזורים העשירים והמגוונים ביותר בשונית עם מגוון רחב של מיני אלמוגים, דגים, קיפודי ים ושאר דיירי השונית.

4. **מדרון השונית** - מדרון שונית האלמוגים החשוף לים הפתוח כהמשכה של קדמת השונית לעומק הים. המדרון יכול להיות תלול ביותר או מתון ומדורג בתלות על פי טופוגרפית קרקעית הים. חלקו העליון של המדרון, במקומות בהם הוא אנכי וניצב לקרקעית קרוי קיר השונית.

5. **בלטי אלמוגים** - באזורים בהם לא מתפתחת שונית המשתרעת לאורכו של כל האזור הרדוד ומדרון אלמוגים לא קיים למרגלותיה או מסתיים די קרוב אליה, לרוב בתחומי עומקים של 3 - 20 מטרים, נגלית קרקעית הים ועליה פזורים בלטי אלמוגים. בלט אלמוגים הינו גוש אלמוגים בודד ונפרד מרצף השונית.

איור 26

(למעלה) **השונית החוגרת בשמורת הטבע 'חוף האלמוגים' באילת וחלוקה לכמה אזורים מרכזיים בשונית.**
(למטה מימין) **בלט אלמוגים המתרומם מעל הקרקעית החולית.**
(למטה משמאל) **צב ים קרני משוטט מעל שדות עשבי הים בחוף הצפוני באילת**

הוא גדל כיחידה מצומצמת במקום אחד, קוטרו לרוב בין עשרות סנטימטרים למטרים בודדים והוא נישא מעל פני הקרקעית באופן בולט. קיימים בלטי אלמוגים שבסיסם בעומק של כ-10 מטרים ומגיעים עד סמוך לפני הים.

בנוסף לשונית עצמה ניתן למצוא לאורכם של חופי אילת מגוון רחב של בתי גידול המספקים בית ומזון לבעלי חיים שונים. לדוגמא, אזורים חוליים בהם מופיעים מינים טיפוסיים המתחפרים בחול. אזורים בהם קרקעית הים מכוסה בעשבי ים, שהם למעשה צמחי יבשה שחזרו לים (איור 26). אזורים אלו משמשים לעיתים כ"מדגרה" או "פעוטון" למיני דגים ובעלי חיים נוספים החיים בין עלי עשבי הים. באזורי החוף הרדודים נזהה בתי גידול ייחודיים המכילים מגוון שונה של תצורות ובעלי חיים. בחגורת הכרית (אזור הגאות והשפל) קיימים אזורים סלעיים כדוגמת בחוף אום רשרש, המאכלסים מינים מחברת השונית הרדודה יחד עם בעלי חיים החיים באזור סלעי בחוף. אומנם בתי גידול אלו אינם עשירים וצבעוניים כמו שונית האלמוגים אך הם מהווים בית גידול חשוב ביותר לבעלי חיים, שלעיתים לא רואים בשוניות האלמוגים הסמוכות. גם האדם, כמובן, "תרם" לנוף התת-ימי במפרץ אילת ואפשר למצוא עצמים מלאכותיים רבים באזור. מספינות טבועות, שוניות מלאכותיות ומתקני ניסוי מדעיים שונים, עד לחבלים, רשתות, ואובייקטים רבים נוספים. חלק מאובייקטים אלו מייצרים בתי גידול ואתרי צלילה מעניינים המשתלבים בסביבה בצורה סבירה ויוצרים מוקדי משיכה לצוללים ואילו חלקם מהווים מפגע אסתטי וגורם מפריע ומיותר.

איומים על החי במפרץ אילת - עבר, הווה, ועתיד

פני השונית כפי שהם נראים כיום, מבחינת עושר וכמות האלמוגים והדגים, הן תוצאה של מכלול גורמים, חלקם תהליכים טבעיים, אך לצערנו, חלקם תוצאה של פעילות אנושית הרסנית. התהליכים הטבעיים קשורים להיבטים ביולוגיים, כדוגמת תחרות בין בעלי חיים שונים, יחסי טורף ונטרף, מחלות וכו'. תהליכים אחרים יכולים להיות קשורים לתנאים הפיזיקליים, כמו סערות חזקות, שיטפונות הזורמים לים, שפל קיצוני וכו'. הפרעות אלו קיימות מאז שחר האבולוציה ועל כן שוניות אלמוגים מסוגלות להתמודד עימן, להשתקם לאחר הנזקים הטבעיים ולהצליח לשמור על שיווי משקל אקולוגי לאורך זמן. לעומת זאת, השינויים והנזקים הנגרמים לשוניות אלמוגים כתוצאה מפעילות האדם הינם מהירים ותכופים, רחבי היקף, והופכים להיות כרוניים. במקרים רבים הם גורמים בסופו של דבר לפגיעה אנושה בסביבה ימית ייחודית זו.

שוניות האלמוגים במפרץ אילת מתפתחות בסמוך לקו החוף. עקב כך הן חשופות לסוגים רבים של מפגעים וזיהומים המגיעים בעיקרם מקרבת האזורים המיושבים. במהלך העשורים האחרונים גדלו הערים אילת ועקבה בצורה משמעותית, ובהתאם, חלה עליה מהירה בהשפעת והתערבות האדם במפרץ (הן בים והן ביבשה). במהלך שנות ה-70 ועד לראשית שנות ה-2000 התדרדר מצב השוניות וחברת בעלי החיים שבהן. כתוצאה ממאבקים סביבתיים רבים שהובילו לשיפור המדיניות הסביבתית וניהולה, החלה השונית להתאושש ולהשתקם. במהלך 50 השנים האחרונות התבצעו מעקבים ומחקרים רבים על שוניות מפרץ אילת ולפיכך קיים תיעוד מהימן של התנודות הרבות אשר עברה השונית - מימי הזוהר ועושר

המינים והפרטים בשנות ה-60 וה-70, בהן השונית פרחה והמים היו צלולים, דרך שלבי הידרדרותה שכללו העלמות בעלי חיים, ירידה דרסטית במגוון המינים ואחוז כיסוי השטח על ידי אלמוגים, ועד להתאוששותה בעשור האחרון והגעתה לשיווי משקל חדש במידה מסוימת.

במהלך שנות ה-70 ותחילת שנות ה-80 המטרדים האקולוגיים הכבדים ביותר באזור אילת היו זיהומי נפט ודלקים, וזיהום פוספט בעת העמסה ופריקה בעבודות בנמל. באותן שנים אירעו בממוצע כשתיים - שלוש דליפות כבדות של נפט גולמי בחודש, אשר הציפו את מימי מפרץ אילת. זיהום הים בנפט פוגע אנושות בכל מארג החיים בים - מעופות ים, צבי ים, דגים, ועד לאלמוגים. אחת הפגיעות המשמעותיות שזיהום נפט עלול לגרום לאלמוגים הינה פגיעה במערכת הרבייה של האלמוגים וביכולתם ליצור פגיות, שיאכלסו מחדש אזורים שנפגעו. באותן השנים עם גידול האוכלוסין בערים אילת ועקבה, עודפי השפכים העירוניים (כלומר הביוב) הוזרמו לים והוסיפו לו ריכוזים גבוהים של חומרים אורגניים, מינרלים, שיירי תרופות, כימיקלים משימוש ביתי ועוד. העשרה אורגנית זו של הים, הנחשבת כזיהום אורגני, גורמת להצטברות חומרי דשן בקרקעית הים ומובילה לפריחת אצות אשר יכולות לכסות שטחים נרחבים על פני השונית ובכללם גם על אלמוגים חיים. הגידול המסיבי הזה חוסם מהאלמוגים את אור השמש ואת תחלופת החמצן שבמים ויכול כך "לחנוק" אותם ולגרום למותם. בנוסף, פריחות האצות אשר מכסות את משטחי השונית מונעות מפגיות אלמוגים מצע להתיישבות ואפשרות לגדול למושבות אלמוגים צעירות.

הזרמת שפכים לים מהעיר אילת הופסקה בשנת 1995 ובעקבה כמה שנים קודם. אך לצערנו החל להצטבר בשנים אלו זיהום אורגני אחר, אשר הוסיף חומרי דשן ואנטיביוטיקה רבים לים. ענף החקלאות ימית שהיה בתאוצת צמיחה באילת התבסס על כלובי דגים שהוצבו במימי צפון המפרץ. עם התרחבותה של תעשייה זו עלתה תוספת חומרי הדשן שהופרשו לים (הזנת הדגים והפרשותיהם) ולמעשה החליפה את הזיהום האורגני שנבע מהביוב ואף עלתה עליו בכמויות. מכיוון ומפרץ אילת מבודד במידה ניכרת מזרמי האוקיינוס הפתוח, החלו חומרים אלו להצטבר בכמויות אדירות על קרקעית המפרץ. תופעה זו הפרה את שיווי המשקל בשונית המתקיים במיטבו במי ים עניים בחומרי דשן. בעקבות זאת החלו תהליכים של פריחת אצות שדחקו את האלמוגים וגרמו למותם. לאחר שנים רבות של מאבק סביבתי ייצרי וכבד, הוציא בית המשפט בשנת 2005 צו להוצאה מדורגת של כלובי הדגים ממי מפרץ אילת ובשנת 2008 פונה אחרון הכלובים מהים. ייתכן שאם תעשייה זו הייתה מבוססת ביבשה בשילוב עם מערכות סינון הולמות, הנזק שגרמה היה יכול להימנע.

בעשור שלאחר מכן, החלה להיראות התאוששות בשוניות אילת. עלייה איטית אך הדרגתית במספר האלמוגים והשטח שהם מכסים וכן הופעה מחודשת של מספר מיני דגים, אלמוגים וחסרי חוליות אחרים, שנעלמו בשנים הקודמות. אף על פי כן, מגמות הפיתוח העירוני, התיירותי והתעשייתי בשתי הערים, אילת ועקבה, מזמנות מטרדים חדשים-ישנים והפרעות חמורות מאיימות על החי המפרץ אילת במידה והמשך הפיתוח יבוצע ללא השקעה בתכנון בר קיימא המתחשב בעולם החי התת ימי באזור. לדוגמה, העלייה בכמות התיירים באזור מבורכת ורצויה עד מאוד, אולם

היא טומנת בחובה גם כמה סכנות לשונית - בין אם זה לחץ רוחצים וצוללים גדול על שטח קטן של שונית, אשר גורם לעיתים קרובות לשבירת אלמוגים, או הרחפת חול השוקע על האלמוגים ומזיק להם, ובין אם זה כמויות הפסולת המושלכות לעיתים קרובות מדי על החוף ומתגלגלות לים. דוגמה אחרת לסכנה הגוברת עם גידול הערים היא זיהום אור, אשר מפריע לבעלי חיים הפעילים בלילה ועלול לשבש תהליכים ביולוגים שונים שתזמונם וויסותם מוכתב על ידי מחזורי האור והחושך. נכון לשנת 2021, כאילו לא נלמדו שום לקחים מהעשורים הקודמים, שינוע נפט מסיבי דרך נמל קצא"א חוזר לפעול. נראה שזה רק עניין של זמן עד שנראה שוב דליפות נפט מסוכנות במימיו המוגנים של מפרץ אילת.

ראוי לציין כי ארבעת המדינות - ישראל, ירדן, מצריים וערב הסעודית, חולקות יחדיו את מפרץ אילת (אשר מוכר בשפות הלועזיות כמפרץ עקבה) ועל כן ארבעתן חייבות לשאת ביחד בנטל השמירה על המפרץ. חוקים ותקנות בכל מדינה בנפרד לא יספיקו על מנת להבטיח את המשך קיומן של שוניות האלמוגים במפרץ אילת, שכן הטבע אינו מכיר בגבולות מדיניים ולא עוצר בהם. אם לדוגמה ירדן תשפר את כל עמדותיה בהקשר השמירה על המשאב הימי יקר הערך הזה אך ישראל לא, עדיין תעמודנה שוניות מפרץ אילת בסכנת כליה. לכן, המצב האידיאלי ביותר וגם ההכרחי, הוא שיתקיים תיאום עמדות ופעולות בכל הקשור לפיתוח הסביבה החופית ושימור שוניות האלמוגים במפרץ אילת בין המדינות השוכנות לחופיו.

שימור ושיקום טבע תת-ימי

בראש ובראשונה חשוב להבחין בין פעולות שימור והגנה לבין פעולות שיקום. פעולות שיקום, משמעותן לנסות לשקם את הטבע לאחר שכבר נעשתה פגיעה קשה והרסנית. לעומת זאת, פעולות שימור והגנה, משמעותן לנסות ולמנוע בכל דרך אפשרית את הפגיעה בטבע טרם התרחשה.

פעולות שמירה יכולות לכלול הכרזה על שטחים טבעיים כשמורות טבע ולקבוע לגביהן כללים כדוגמת איסור הפיתוח החופי והימי בהן. אזורים אלו יכולים להיות נתונים להגבלות ופיקוח על כמות המבקרים בהם על מנת לא להפעיל לחץ אנושי כבד מדי על בעלי החיים בסביבה. לעומת זאת, לא כל פיתוח שנעשה בקרבה יחסית לחוף עלול לגרום לנזקים. השאלה היא איך מבוצע הפיתוח, מהו המינון ואלו שיטות ואמצעים מתכננים על מנת להבטיח שלא יהיו נזקים לטבע, בין אם אלו צפויים או לא צפויים. פעולות שימור והגנה כוללות גם חקיקת חוקים המתווים קוים אדומים לגבי מיקום, גודל, ואופי הפיתוח, אשר חייבים לכלול היבטים של תכנון סביבתי עם מינימום הפרעה לסביבה.

ניתן לחלק את הפעולות לשיקום שוניות אלמוגים לשני מרכיבים: 1. הקמת שוניות מלאכותיות. 2. שיקום השונית הטבעית על ידי שתילת אלמוגים. הגדרת שונית מלאכותית מתאימה בעצם לכל מבנה או אובייקט אשר נבנה בידי האדם ומושלך או מוצב בים. מבנים אלו יכולים לשמש בסיס להתיישבות אלמוגים ובעלי חיים אחרים, ובנוסף הם יוצרים בית גידול לבעלי חיים ברי תנועה כדוגמת דגים, סרטנים, חלזונות ואחרים. יכולת הגוף המלאכותי להוות מוקד משיכה לבעלי חיים ימיים תלוי במבנהו ומורכבותו, במיקומו הפיזי בים כמו גם בחומרים ממנו הוא

עשוי. חשוב לזכור, שחומרים רבים מתפרקים בים לאורך זמן וכך סוגי חומרים שונים מהם נבנות שוניות מלאכותיות עלולים לגרום לזיהום. שוניות מלאכותיות יכולות להיות ספינות, מטוסים או רכבים אשר הוטבעו, או שהן יכולות להיות מבנים שונים או פסלים אשר נוצרו במיוחד למטרה זו. אחת התועלות העיקריות בשוניות מלאכותיות היא שהן מהוות מוקד משיכה אטרקטיבי במיוחד לצוללים וכך קטן עומס הצלילות באזורים הטבעיים ,שבאזור יחסית מוגבל כמו חופי אילת הם די מצומצמים.

הקמת משתלות אלמוגים ושיקום השוניות באמצעות שתילת אלמוגים תפסו תאוצה רבה בשנים האחרונות, זאת בעקבות ההידרדרות המשמעותית של שוניות אלמוגים רבות ברחבי העולם. קיימות שיטות וטכניקות רבות כיצד לבצע זאת. באופן עקרוני הרעיון הוא לקיחת מושבת אלמוג בוגרת ושבירתה להרבה חלקים קטנים המוצמדים בדרך כזו או אחרת למצע זמני כלשהו עליו הם יגדלו פרק זמן מסוים. לאחר מכן, מנסים להצמיד את שברי האלמוגים הללו חזרה לשונית הטבעית בתקווה שייקלטו, ישרדו וימשיכו לגדול ולייצר מושבות אלמוגים חדשות ועודדו התפתחות שונית אלמוגים. למרות שפרויקטים מסוג זה נשמעים כרעיון נחמד והם יכולים לפעמים להוות פתרון נקודתי מצומצם, הם בשום אופן לא יכולים להוות פתרון כולל ולתת מענה לשטחים העצומים שמחייבים שימור.

לדוגמה, שטח בגודל של אצטדיון כדורגל יכול להכיל, באזורים מסוימים בעולם, עשרות ומאות אלפי מושבות אלמוגים הנמנות על מאות מינים שונים. אין ביכולתנו לגדל אלמוגים מכל המינים הקיימים בטבע ובכמות הנדרשת בשביל בכדי לשקם אזור בהיקף נרחב מספיק. כדי שפעולה זו תהיה בעלת משמעות אקולוגית משמעותית, דרושה השקעה אדירה הכרוכה בעלויות של עשרות מיליוני דולרים ומאמץ אדיר של אינספור אנשים. מה גם שמידת ההצלחה במבצע כזה אינה ידועה ומובטחת כלל. לבסוף, אולי הדבר החשוב ביותר לזכור הוא שבמקום בו שוניות אלמוגים טבעיות דעכו, זה קרה בעקבות שינויים בתנאים הסביבתיים שלהם שגרמו להחמרת תנאי המחיה והשרידות - המים נעשו חמים מדי, מזוהמים מדי, וכו'. לכן, שתילת אלמוגים בצורה מלאכותית באזור בו התנאים אינם מתאימים יותר לשגשוג אלמוגים, נידונה מראש לכישלון בטווח הארוך. לסיכום, אם לא נקפיד ונשפר את פעילותנו האישית והציבורית בים ובכל סביבה טבעית אחרת, לא יעזרו כל ניסיונות השיקום. ניסיונות אלו עשויים אולי לתמוך ולקנות עוד קצת זמן לשוניות אלמוגים השורדות כיום אך הם מוכרחים להתקיים בד בבד עם המאמץ לשפר ולתקן את התנאים והזיהומים אשר הובילו לדעיכתן.

איכות סביבה = איכות חיים

אלמוגים הם בין צורות החיים הפשוטות ביותר הקיימות בעולם החי אולם יחד עם זאת הם מוכיחים מורכבות בתגובותיהם ובאינטראקציה שלהם עם הסביבה. הם יכולים להיות רגישים ביותר לכל מיני שינויים סביבתיים אבל ביחד עם זה הם גם יכולים להיות די קשוחים ועמידים, לשנות ולהתאים עצמם בהצלחה רבה לתנאים שונים ומשתנים, כך שגם אם שוניות אלמוגים דועכות, הן יכולות להתאושש די יפה - אבל רק בתנאי שנאפשר להן הזדמנות מתאימה והולמת.

ההתחממות הגלובלית גורמת בעשורים האחרונים לריבוי אירועי הלבנה ותמותה המוניים של שוניות אלמוגים רבות ברחבי העולם. לשמחתנו, האלמוגים בצפון ים סוף עמידים קצת יותר לטמפרטורות גבוהות מאלמוגים באתרים אחרים בעולם, כך שעדיין לא ראינו אירועים כאלו באזורנו. למרות זאת, חשוב לדעת שבהתאם למגמת התחממות האוקיינוסים העולמית, גם צפון ים סוף מתחמם והוא עושה זאת בקצב יחסית מהיר של כ-0.3°C לעשור, כך שבזמן מסוים בעתיד, גם אצלנו הים יכול להיעשות חם מדי לחלק גדול מהחיים בו. כמו כן חייבים לזכור, שתמיד יופיעו איומים חדשים (או ישנים שמתגברים) המסכנים את שוניות מפרץ אילת ומיני אלמוגים ובעלי חיים אחרים הופכים להיות נדירים יותר ויותר. לעת עתה בזמן ששוניות אלמוגים כה רבות ברחבי העולם הולכות וקורסות, מלבינות ומתות, לנו נשארו באילת שוניות אלמוגים מלאות צבע וחיים. אוצר טבע יוצא דופן. זוהי הסיבה שאנו חייבים להתמיד ולשמור על בתי הגידול ושוניות האלמוגים באילת ומצווים להקפיד ולמנוע כל השפעה אנושית מזיקה כדוגמת זיהומים שונים או פיתוח לא מבוקר ובלתי מתחשב בים. חייהם של מיליוני בני אדם במדינות שונות בעולם תלויים בשוניות אלמוגים בריאות כמקור לפרנסה, מזון והנאה, כך גם הצלחתה של העיר אילת מושתתת על הים ואוצרות הטבע הייחודיים שיש בו. אם לא נשכיל להמשיך ולקיימן אנו עלולים לשלם מחיר כבד על כך.

גידולה המהיר של אוכלוסיית בני האדם בעולם, משאיר כבר היום טביעת או דריסת רגל הניכרת בכל פינה בעולם. על כן, כל אחת ואחד מאיתנו מוכרח/ה לחשוב, לפחות במעט, היכן היא והוא יכולים להקל ולהפחית קצת את טביעת הרגל שלהם על הסביבה.

מקורות לפרק זה ועוד

דגני, עודד. 2021.
"Reflections Underwater: A Multidisciplinary Exploration of Coral Reef Wonders"

דפני, יעקב. 2000. מפרץ אילת - מים סוף ועד סופו... הוצאת צ'ריקובר.

דפני, יעקב. 2008. שוניות האלמוגים של אילת - במבט אופטימי. הוצאת יעלה.

דפני, יעקב. מדריכי הים. www.dafni.com

דרום, דוד. 1984. חיים בים אילת. הוצאת מסדה.

דרום, דוד וצורנמל, משה. 1992. מדריך הים וחופיו, חי וצומח. הוצאת כתר.

לויה, יוסי וקליין, רמי. 1994. שונית האלמוגים. הוצאת משרד הביטחון / אוניברסיטת תל אביב.

לויה, יוסי. 2010. חילופי זוויג רב-פעמיים באלמוגים. מגזין איגרת בהוצאת האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים. גיליון 32.

עזריה, אלון. 1983. החי והצומח של ארץ ישראל - אנציקלופדיה שימושית מאוירת. כרך 4 - החי במים, בעריכת לב פישלזון. הוצאת משרד הביטחון.

פלח, מאיה. 2016. חדשות טובות מהים האדום. מגזין מאקו.

קליין, רמי. 2012. לצלול אל המסתורין - עולמם המופלא של חסרי החוליות הימיים. הוצאת המרכז האקדמי רופין.

שלזינגר, יחיעם. 2020. שוניות מלאכותיות במפרץ אילת. מגזין הצוללים הישראלי iDIVE, גיליון 123.

שלזינגר, יחיעם. 2021. אילת ואשקלון כ"ערי נפט"? לא יקרה! מגזין הצוללים הישראלי iDIVE, גיליון 125.

שלזינגר, תום. 2019. סרטון - רביית אלמוגים במפרץ אילת והסכנות להצלחתה (באנגלית עם כתוביות בעברית).

שלזינגר, תום. 2020. מפרץ אילת - רק תבואו! מגזין הצוללים הישראלי iDIVE, גיליון 123.

12

הים כמערכת אקולוגית

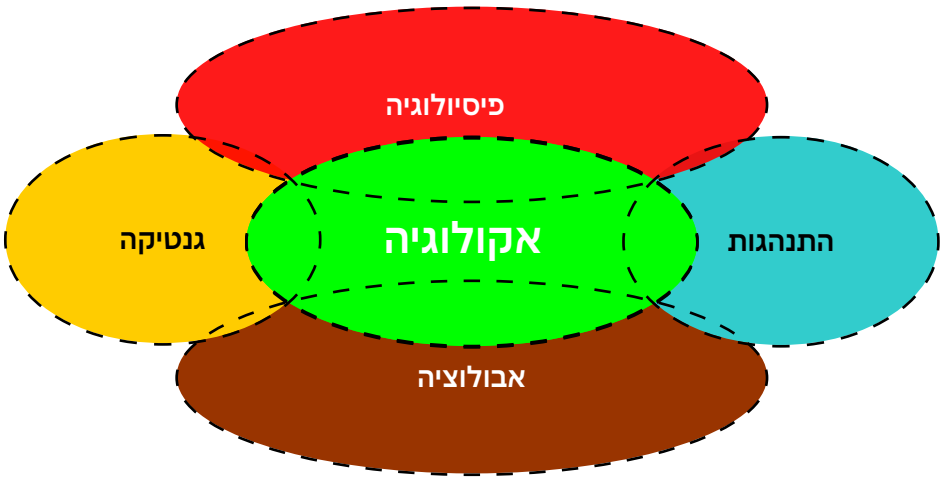
גיל רילוב

12.1 אקולוגיה מהי? - מושגים ועקרונות באקולוגיה

בכדי להבין כיצד משפיע האדם על החיים בים עלינו להכיר את הכוחות המשפיעים על המגוון, השונות והדינאמיקה של החיים בים. לשם כך יש להכיר את מושגי היסוד והעקרונות הבסיסיים של האקולוגיה. פרק זה גם שם דגש מיוחד על התפתחות התיאוריות האקולוגיות ועל המחקר המדעי שהוביל אליהן.

מדע האקולוגיה

מקור המושג אקולוגיה הוא מן המילה היוונית העתיקה OIKOS שפרושה "בית" והמושג LOGOS שפירושו "לימוד" או "תורה". ואכן, האקולוגיה הינה ענף בביולוגיה העוסק בלימוד '**בית הגידול**' (habitat) של האורגניזמים השונים. אופי בית הגידול נקבע הן על ידי גורמים פיסיקליים, או **אביוטיים** (לדוגמא: טמפרטורה, רמת מליחות, קרינת שמש), והן על ידי גורמים ביולוגיים, או **ביוטיים** (לדוגמא: תחרות או טריפה בין אורגניזמים). אקולוגיה היא תחום מדע חדש יחסית שהתחיל להתפתח במחצית השנייה של המאה התשע-עשרה מתוך התחום הכללי והתאורי יותר של '**הכרת הטבע**' (History Natural). בשנת 1869 הגדיר Haeckel Ernest את האקולוגיה כמערכת היחסים הכוללת של החיה עם הסביבה האורגנית ולא-אורגנית שלה. מאז ניסו חוקרים רבים להגדיר תחום מחקר זה, אך כיוון שהאקולוגיה למעשה נושקת לתחומי מחקר נוספים בביולוגיה (איור 1), קשה לעיתים לשים את האצבע במדויק על הקו התוחם בינה לבין תחומים אלה.



איור 1

חפיפה בין תחומי מחקר שונים בביולוגיה

למשל, החוקר הידוע Odum הגדיר את האקולוגיה כלימוד המבנה והתפקוד של הטבע. זוהי הגדרה כוללנית מאוד כמובן, ולכן גם אינה מספקת. כיום מקובלת ההגדרה המצומצמת יותר על פי Krebs שה**אקולוגיה** היא החקירה המדעית של היחסים הקובעים את התפוצה והשפע של האורגניזמים. באופן הפשוט ביותר, האקולוג מנסה להבין מדוע יצור או יצורים מסוימים נמצאים במקום מסוים ושפע מסוים. לדוגמא, שונית האלמוגים מאכלסת בתוכה מספר רב מאוד של מינים החיים בקרבה רבה זה לזה, ובכל זאת כל מין מצוי בתת-סביבה ייחודית לו - או ב**נישה (niche) אקולוגית** שהיא מרחב המחיה שלו. ניתן לשאול, למשל, מדוע בשונית האלמוגים באילת מצוי הדג שושנון אילתי רק בין זרועותיה של שושנת הים, ואילו קרוב משפחתו, דפדוף הפסים, מצוי בשעות היום בעיקר במים הפתוחים שמעל השונית. הסיבות לכך שדגים אלה חיים במקומות שונים יכולות לנבוע ממספר רב של גורמים, לדוגמא: העדפות מזון שונות, תחרות בין המינים ועוד. הניסיון להבין את הגורמים והתהליכים שהביאו להפרדה מרחבית זו של שני המינים - הוא הוא המחקר האקולוגי.

הנישה האקולוגית

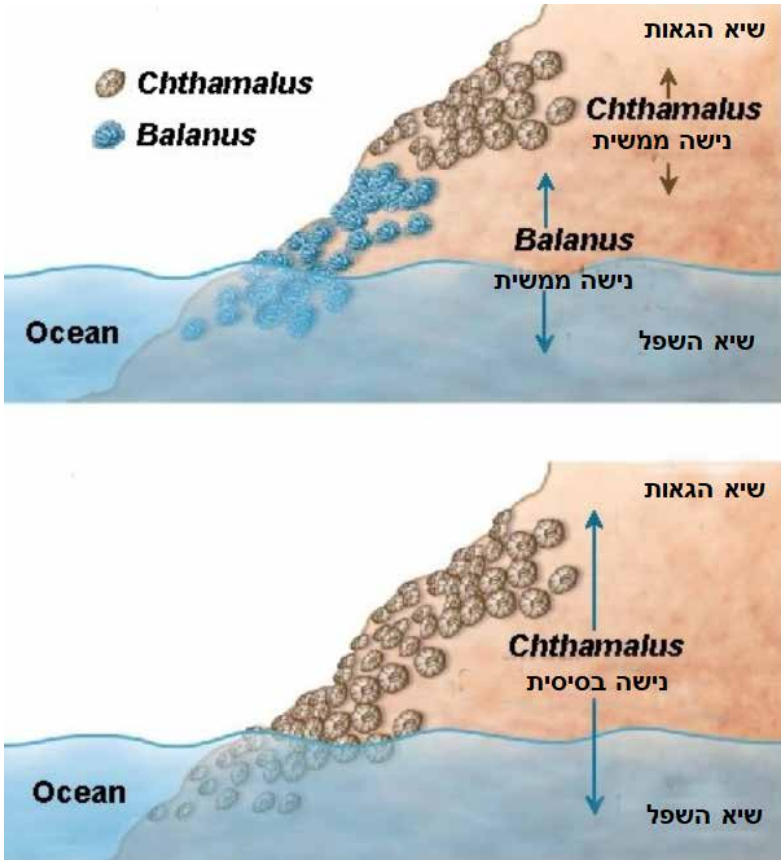
לכל יצור בטבע ישנה נישה אקולוגית בה הוא מתפקד (חי, גדל ומתרבה) בצורה הטובה ביותר. אם כן, הנישה מוגדרת על ידי מכלול הגורמים הפיסיקליים והביולוגיים המאפיינים אותה. הגדרה נוספת לנישה, המקובלת היום באקולוגיה, אומרת כי הנישה הינה התפקיד שממלא האורגניזם בחברה בה הוא חי. ההנחה המקובלת היא כי במהלך האבולוציה ובתהליך הברירה הטבעית עבר כל יצור התאמה (אדפטציה) אנטומית, פיסיולוגית והתנהגותית לחיים באותה נישה. הפרטים בעלי ההתאמה וה**כשירות** היחסית (fitness), המותאמים ביותר לסביבה מסוימת, שורדים במהלך האבולוציה, מתרבים ומעבירים תכונות מותאמות אלה לצאצאיהם, וחוזר חלילה. **מדד הכשירות** הוא החלק היחסי שפרט מסוים תורם למאגר הגנטי של האוכלוסייה בדור הבא. לפרט הכשיר ביותר צאצאים מוצלחים רבים יותר ושיעורם של אלה יהיה גדול יותר באוכלוסייה.

רוחב הנישה האקולוגית. אצל יצורים מסוימים הנישה האקולוגית יכולה להיות צרה ביותר ואצל אחרים רחבה מאוד. דג השושנון, כאמור, חי אך ורק בין זרועות שושנות הים בעומק שבין מטר לשלושים מטר בשונית האלמוגים, ובטווח מאוד מצומצם של טמפרטורות מים, אך דגי הסלמון יכולים לחיות גם במעלה הנהרות (מים מתוקים) וגם במרחבים העצומים של האוקיינוסים (מים מלוחים) ובטווח רחב של טמפרטורות.

נישה בסיסית מול נישה ממשית. לא כל יצור מאכלס בהכרח את כל אזורי הנישה האקולוגית האפשרית שלו. לעיתים קרובות התנאים הפיסיקליים מאפשרים ליצור מסוים לחיות בנישה גדולה יותר - **הנישה הבסיסית** (fundamental niche) - מכפי שהתנאים הביולוגיים מאפשרים לו (כמו לחצי טריפה או תחרות). התנאים הביולוגים מגבילים את היצור אל **הנישה הממשית** (realized niche) שלו. לדוגמא (איור 2) שני מינים של בלוטי ים, א' וב', יכולים מבחינה פיסיקלית (כמו עמידות לטמפרטורת גבוהות ויובש) לחיות על הסלעים באזור הגאות והשפל מגובה של +1 מטר מעל קו המים הממוצע ועד לעומק של -1 מטר מתחת לקו זה. אך בפועל בשטח נמצא שמין א' חי רק באזורים הנמוכים יותר, בטווח שבין 0.0 מטר (הגובה

נישה אקולוגית
כוללת את כל התנאים, ביוטיים (ביולוגיים) ואביוטים (פיסיקליים), בהם מתפקד האורגניזם ואת ההתאמות של האורגניזם לאותם תנאים. לעומת 'גומחה אקולוגית' המתארת את מקום החיות הפיסי-מרחבי של האורגניזם.

כשירות
סיכויו של פרט לשרוד ולהתרבות בסביבה מסוימת ביחס לשאר הפרטים באוכלוסייה שלו.



איור 2

J.H.Connell מאוניברסיטת קליפורניה חקר תחרות בין שני מינים של בלוטי ים שחיים יחדיו על סלעים בחופי סקוטלנד: *Chthamalus stellatus* חי במים הרדודים וחשוף לעיתים קרובות לאוויר, ו- *Semibalanus balanoide* שחי על הסלע מתחתיו ונחשף לאוויר לעיתים רחוקות (למעלה). **מתצפיות על שני המינים נראה כי ה *Balanus sp.* דחק את ה-*Chthamalus sp.* מהשטח המוצף במים ולא נתן לו להתפשט אליו. כאשר הסיר החוקר את בלוטי ה-*Balanus sp.* מהסלע, הצליחו בלוטי ה-*Chthamalus sp.* להתיישב בקלות על האזור העמוק יותר ולהתבסס שם** (למטה), **מה שמעיד כי לא היו אלו מכשולים פיסיקליים שמנעו ממנו להתפשט לשטח זה. לעומת זאת בלוטי ה-*Balanus sp.* לא שרדו במים הרדודים בתחום המחיה של המין המתחרה. כלומר, הנישה הבסיסית של בלוטי ה-*Chthamalus sp.* כוללת גם את השטח הרדוד וגם את השטח העמוק יותר, אך הנישה הממשית שלו הוגבלה על ידי תחרות עם בלוטי ה-*Balanus sp.* לעומת זאת נראה כי הנישה הבסיסית והנישה הממשית של ה-*Chthamalus sp.* זהה**

הממוצע של פני הים) לבין עומק של 1.0- מטר מתחת לפני המים ומין ב' מצוי רק באזורים הגבוהים יותר, בטווח שבין 1.0+ ל-0.0 מטר. הסיבה לכך היא שמין ב' גדל מהר יותר (מתחרה טוב יותר) ממין א' בחלקים העליונים של איזור הגאות והשפל ולכן גדל על מין א' ומשתלט על השטח. במקביל, בעומק קיים חילזון טורף המעדיף לטרוף את מין ב' ובשל כך מגביל את תפוצתו למים הרדודים יותר. כך, לשני המינים נישות בסיסיות דומות אך נישות ממשיות שונות, עם חפיפה מסוימת ביניהם. בכדי לגלות את הסיבות להבדלים בין הבלוטים ולבודד את המנגנונים היוצרים דגם תפוצה זה יש צורך לבצע מחקר וניסויים אקולוגים.

מאורגניזם לביוספרה - רמות מורכבות באקולוגיה

הביולוגיה עוסקת בתחומים רבים וברמות שונות של מורכבות בעולם החי והצומח. אם נתבונן על האורגניזם היחיד כנקודת המוצא הרי שישנם שני כיווני מורכבות היוצאים ממנו והלאה. האחד פנימה אל מרכיבי הגוף, והשני מן האורגניזם הבודד ועד לביום או ביוספרה. ברמת חקר הגוף תחומים רבים הכוללים את הביוכימיה והביולוגיה המולקולארית (גנטיקה) העוסקות במולקולות הבונות את התאים ופועלות בהן; הביולוגיה של התא העוסקת בתאים ובאברונים; ההיסטולוגיה והפיסיולוגיה העוסקות ברקמות; המורפולוגיה והאנטומיה העוסקות ברמת האיבר והרקמה.

האקולוגיה עוסקת למעשה בכוון השני של העלייה במורכבות, מרמת הפרט של האורגניזם, דרך האוכלוסייה, החברה, המערכת האקולוגית (אקוסיסטמה), יחידת הנוף והביוספרה.

הגדרות למדרג המורכבות באקולוגיה:

אוכלוסייה (population) - אוסף של פרטים הנמנים על אותו מין ביולוגי באזור מסוים. לדוגמא - כל דגי אלמוגית השוליים החיים בחוף אילת. גודל האוכלוסייה משתנה לאורך זמן כתוצאה משינויים עונתיים, מיחסי גומלין עם יצורים אחרים ומתהליכים אקראיים. גודל האוכלוסייה תלוי בארבעה תהליכים מרכזיים: שיעור הילודה, שיעור התמותה, שיעור ההגירה פנימה (immigration) ושיעור ההגירה החוצה (emigration). חוסר איזון בין תהליכים אלה עלול לגרום להתפוצצות אוכלוסייה או להכחדה.

חברה (community) - אוכלוסיות של מינים שונים החיים בצוותא. לדוגמא - חברת הדגים (כל המינים השונים) בשונית האלמוגים באילת. מבנה החברה במקום מסוים יכול להשתנות כתוצאה מתהליכים שונים כמו הפרעות סביבתיות.

מערכת אקולוגית, אקוסיסטמה (ecosystem) - כוללת, בנוסף לחברת היצורים, את כל גורמי הסביבה הדוממים המקיפים אותה (כמו התשתית הפיסית, טמפרטורה וכו'). לדוגמא - שונית האלמוגים.

יחידת נוף (landscape) - אסופה של מערכות אקולוגיות שונות. לדוגמא - החוף הרדוד באילת (שיכול לכלול את השונית, קרקעיות חוליות ומשטחי עשב ים).

ביוספרה (biosphere) - כלל המערכות האקולוגיות על פני כדור הארץ.

אם כך, האקולוגיה הנה תחום רחב ביותר שבתוכו תתי-התמחויות רבים. ישנם חוקרים העוסקים באקולוגיה של אוכלוסיות, כאלה העוסקים באקולוגיה של חברות, ואחרים החוקרים את האקולוגיה של יחידות נוף שלמות. ישנם תחומים נוספים של אקולוגיה שהינם ייחודיים יותר כמו אקולוגיה כימית, אקולוגיה של התנהגות ועוד. יש חוקרים העוסקים בפיתוח מודלים מתמטיים שיוכלו להסביר תופעות בטבע שלא ניתן לחקור אותם בעזרת ניסויים, או שיוכלו לתת תחזיות לתהליכים הנמשכים עשרות, מאות ואולי אלפי שנים - הרבה מעבר ליכולת הניסוי והחקירה של מדענים בשטח. דוגמא אחת לכך היא המחקר על השפעת התחממות כדור הארץ על היצורים באזורי אקלים שונים. החוקרים בתחום זה משתמשים בידע הפיסיקלי על הכוחות המניעים את האקלים ומנסים לחזות מה יהיו התנאים בכדור הארץ בעוד חמישים או מאה שנה. בשילוב הידע הקיים היום על הגורמים המשפיעים על מערכות אקולוגיות שונות ועל יצורים ספציפיים, מנסים האקולוגים המשתמשים במודלים לחזות כיצד יושפעו מערכות אלו כתוצאה מן השינויים האקלימים - כמו עלית טמפרטורת מי הים, או ירידה במליחות בשל המסת הקרחונים. כמובן שאלה הינן רק תחזיות והן מותנות בהבנה, המועטה יחסית עדיין, של האופן בו פועלות מערכות שלמות ומורכבות ביותר. גורם נוסף שפוגם בתחזיות הוא האקראיות. קשה מאוד לענות על השאלה באיזו מידה משפיעים גורמים אקראיים על התפתחות תהליכים.

מרבית החוקרים מתמחים במערכת אקולוגית או יחידת נוף מסוימת. החלוקה הרחבה ביותר היא בין אקולוגיה יבשתית לבין אקולוגיה ימית. עקרונות רבים שגובשו במהלך המחקר האקולוגי ביבשה נמצאו בשנים האחרונות בלתי תקפים לתהליכים המתרחשים בים, שיכולים להיות בעלי אופי שונה לחלוטין. לשם כך יש לפתח עקרונות ומודלים מחשבתיים חדשים התואמים סביבת חיים זו.

יחסי גומלין באקולוגיה

תחום נוסף באקולוגיה עוסק ביחסי הגומלין בין אורגניזמים. ביניהם ניתן לכלול יחסי תחרות על משאבים (מזון, שטח מחיה), יחסי טריפה, יחסי הדדיות (שיתוף פעולה), יחסי טפילות ועוד. המושג סימביוזה כולל בעצם את כל יחסי הגומלין בהם מתקיים קשר קבוע והדוק בין השותפים ולכן גם הדדיות, מוטואליזם וגם טפילות נכללים בהגדרה זו.

מושגים עיקריים

תחרות - כאשר מספר פרטים או מינים נזקקים לאותו משאב/ים (למשל מזון, אור, מינרלים) המצויים בכמות מוגבלת, מתחרים האורגניזמים זה בזה, והתחרות מורידה את כשירותו היחסית של כל פרט או מין. התחרות יכולה להיות **תוך-מינית**, כלומר בין פרטים מאותו המין, או **בין-מינית**, כלומר בין מינים שונים. התחרות יכולה להיות מבוססת על כילוי המשאבים המשותפים של פרט או מין אחד על ידי השני. התחרות יכולה להתבטא גם על ידי **הפרעה** ישירה - למשל, מין אחד מפריע למין השני להימצא בשטח (מגרש אותו) או לנצל את המשאבים. תוצאות התחרות יכולות להיות או **דחיקה** של מין אחד על ידי השני, או **קיום בצוותא** במחיר צמצום אוכלוסייתו של כל מין יחסית לגודלה בגידול נפרד.

דוגמא לתחרות בין-מינית: אם שני מינים של דגים החיים בחוף הסלעי הישראלי בתוך חורים בסלע, ובסלעי מכמורת, נניח לצורך ההמחשה, מספר החורים מוגבל, הרי שחייבת להתרחש תחרות ביניהם. בסופו של דבר או שמין אחד ידחוק את השני, או שכל מין "יסתפק" במספר חורים מועט יותר - וממילא אוכלוסייתו באזור תהיה קטנה יותר מזו הפוטנציאלית לו התקיים לבדו באזור.

דוגמא לתחרות תוך-מינית: סרטני נזיר חיים בתוך קונכיות של חלזונות שמתו, ועוברים לקונכייה גדולה יותר כשהם גדלים. נאמר כי בלגונה באכזיב מצויות קונכיות רבות קטנות המאוכלסות כולן בפרטים צעירים של סרטני נזיר, אך מספר הקונכיות הגדולות נמוך יותר. לפיכך, כאשר הפרטים יתבגרו, תתקיים ביניהם תחרות על אותן קונכיות גדולות. בתחרות זו ינצחו הסרטנים ה"חזקים" או ה"נחושים" יותר. דוגמא אחרת: תחרות בין זכרים של הדג **אלמוגית שוליים** באילת על תשומת ליבן של הנקבות. תחרות זו מתבצעת על ידי חיזור נמרץ המשלב תנועה וקולות ולעיתים גם אגרסיה בין הפרטים.

טריפה – אורגניזם אחד ניזון מן האורגניזם השני. בטבע קיימים שלשה סוגי טריפה עיקריים: קרניבוריה - בעל חיים אחד אוכל בעל חיים אחר; **הרביבוריה** - אכילת חלקי צמחים; **קניבליות** - אכילת פרטי אוכלוסייה בידי בני מינם. כדי לאפשר קיום לאורך זמן של הטורף והטרף חייב להתקיים שווי משקל מספרי בין גודל אוכלוסיותיהם. אם יהיו טורפים רבים מדי - אוכלוסיית הטרף תעלם ובעקבותיה גם אוכלוסיית הטורף. אם הטורפים יהיו מעטים מדי, תגדל אוכלוסיית הטרף ללא בקרה, תחסל את משאביה ותתחיל לדעוך. בשל ההשתנות התמידית של הטבע (לדוגמא, עונתיות) שיווי משקל זה הוא דינמי מאוד ולעיתים מופר בשל גורמים סביבתיים (האדם לעיתים הינו גורם מרכזי בהפרת איזון זה).

טפילות (פרזיטיזם) - חיים בצוותא של שני אורגניזמים כאשר אחד, הטפיל, חי על חשבון האחר - הפונדקאי, ומזיק לו בכך. בניגוד לטריפה, ברוב המקרים אין הטפילים הורגים את פונדקאיהם. ברוב המקרים הפונדקאי לטפיל הוא הרבה יותר ממקור מזון. הוא עשוי לספק מחסה, אינקובטור לגידול צאצאים, כלי מעבר לפונדקאים אחרים ועוד. דוגמא לטפילות הינה של בלוט ים החי על ביטנו של הסרטן השחיין. לאחר שהתיישב על בטן הסרטן, מגדל בלוט זה ריזואידים (מעיין שורשונים) אל תוך רקמת הגוף של הסרטן וכך ניזון עליו. בה בעת הוא גם גורם לעקרות כיוון שעל בטן הסרטן מתפתחים אברי הרבייה ותוצרי הרבייה של הבלוט, במקום אלה של הסרטן. לים תיכון חדר מין בלוט שכזה ממקור אחר וגורם כך לעקרות של מרבית הפרטים של הסרטן השחיין Charybdis.

הדדיות (מוטואליזם / סימביוזה) - יחסים בין מינים שכל המשתתפים בהם מפיקים מהם תועלת. אחת הדוגמאות הבולטות להדדיות בתחום הימי הינה הקשר בין האלמוגים בוני השונית לאצות החיות בתוך רקמתם. אלמוגים אלה אינם יכולים לחיות לאורך זמן ללא האצות כיוון שהאצות מעבירות חלק מתוצרי ההטמעה (פוטוסינתזה) לרקמת האלמוג. האצה גם מגבירה את קצב השקעת השלד הגירני של האלמוג ובכך מאיצה את גידולו. אלמוג השונית מעביר לאצה 'בתמורה', כך הסתבר בשנים האחרונות, מינרלים חיוניים שהנם תוצרי התפרקות הטרף (פלנקטון) שנלכד על ידי האלמוג. דוגמא ידועה נוספת מעולם שונית האלמוגים היא ההדדיות בין דג הנקאי ודגים רבים בשונית האלמוגים. דג זה חי בזוגות ב"תחנת" ניקוי קבועה שהדגים באים אליה להתנקות. הדג ניזון מטפילים המצויים על עור הדגים, על זימיהם או בתוך פיהם (ולכן הדגים המתנקים מאפשרים לדג הנקאי להיכנס לפיהם). כך מרוויח הנקאי מזון, והדגים האחרים מרוויחים ניקוי של טפילים מטרידים.

קומנסליזם - צורה של חיי צמידות המועילה לאחד בלי להזיק לאחר. בקוֹמֶנְסָליזם קיימים שני צדדים: מפיק התועלת (קומנסָל), והמארח של הקומנסל (פונדקאי), אשר לא מפיק תועלת מן השיתוף ולא ניזוק .

הקומנסל נהנה מהפונדקאי ללא גרימת נזק. דוגמה לקומנסליזם היא אפיפיטים, צמח נפוץ בג'ונגלים. האפיפיטים הינם צמחים הגדלים על צמחים אחרים אך אינם מזיקים להם. אורח חייהם המיוחד מאפשר להם להגיע אל האור מבלי לגדול בקרקע, בעזרת שורשי אוויר מיוחדים הם קולטים את המים מהאוויר הלח שסביבם, ואת המלחים הם קולטים מאבק ומעפר המצטבר בחריצים שבקליפות העצים.

מבנה החברה האקולוגית - מארג המזון ומיני מפתח

אם כן, בית גידול או אקוסיסטמה יכולים להיות מאופיינים על ידי מספר רב של גורמים אקולוגיים, כמו התנאים הפיסיקליים השוררים בהם, האורגניזמים השונים המצויים בהם, גודל האוכלוסיות של האורגניזמים השונים ומבנה החברה. מבנה החברה כולל גם את היחסי הגומלין השוררים בין היצורים. בהקשר זה חשוב לציין את המושג מארג המזון. **מארג המזון** מתאר את הקשרים התזונתיים-אנרגטיים בין המרכיבים השונים בחברה המצויה באקוסיסטמה מסוימת - כלומר, מי ניזון ממי.

מארג המזון בנוי מרמות שונות של אסטרטגיות תזונה - הנקראות **רמות טרופיות** (**trophic levels**). הרמה הבסיסית היא זו של **היצרנים**. אלה הם בעיקר הצמחים המשתמשים באנרגיה מאור השמש ליצירת חומרי מזון. מהם ניזונים הצרכנים הראשונים שהם צמחוניים (או **הרביבורים**), אותם טורפים הטורפים הראשוניים, שמהם יכולים להיות ניזונים טורפים שניוניים וכן הלאה, עד לטורפי העל כמו הכריש בים או הנמר ביבשה. מארג המזון יכול להיות מורכב ביותר ולכלול מספר רב של אורגניזמים שלהם קשרים אנרגטיים שונים.

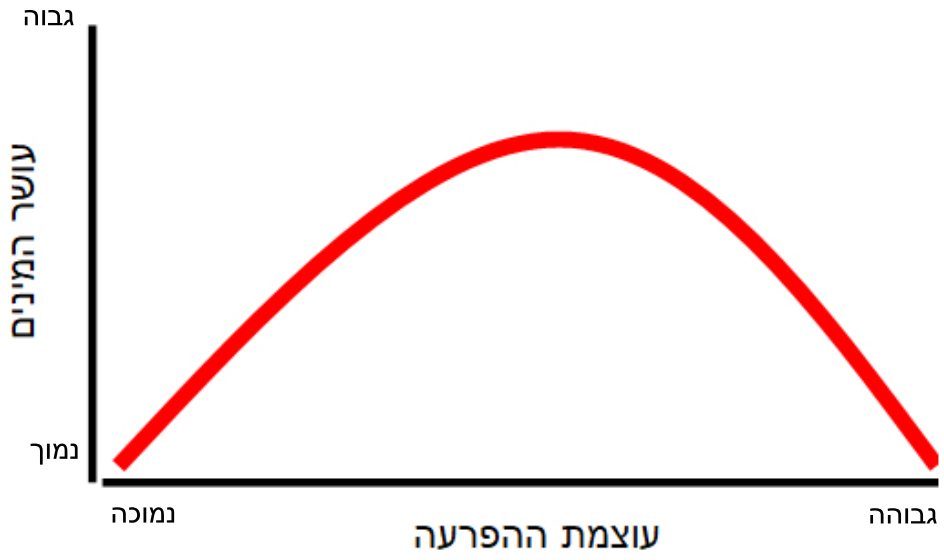
לחלק מן האורגניזמים תפקיד מכריע בקביעת מבנה החברה - הללו נקראים **מיני מפתח** (keystone species). אלה הם לרוב טורפים או הרביבורים חשובים שבלעדיים החברה תיראה שונה לחלוטין. למינים אחרים תפקיד חשוב פחות. באקולוגיה, מין מוגדר כמין מפתח אם הרחקה שלו תגרום לשינוי מכריע באופי החברה בה הוא חי, ואשר מספר הפרטים שלו קטן ביחס למידת ההשפעה של כל פרט על מבנה החברה. למשל, בחופים סלעיים מסוימים נחשבים כוכבי ים כמין מפתח. ניסויים שנערכו במקומות שונים בעולם הראו שכאשר מסלקים את כוכבי הים מן הסלעים, הצדפות שהופיעו בצורה **כתמית** (כלומר לא בצורה רציפה, אלה ככתמים) השתלטו באופן מוחלט על השטח ויצרו מרבדים צפופים, אשר דחקו מינים אחרים שהתקיימו באופן טבעי על הסלעים. כלומר, מבנה החברה השתנה מאוד עם הוצאת כוכבי הים מממנה. במחקר בצ'ילה נמצא, כי דווקא חלזונות טורפים הם מיני מפתח על הסלעים. באזורים בהם אספו המקומיים חלזונות אלה למאכל השתלטו הצדפות על הסלעים, בניגוד לאזורים הכלולים בשמורת טבע שבה אסור לאסוף חלזונות ובהם מופיעות הצדפות בצורה כתמית.

כתמיות
כיסוי שטח על ידי אורגניזמים בצורת כתמים ולא בצורה רציפה.

עושר מינים
מספר המינים הקיימים בבית גידול.

שונות בחברה אקולוגית - הפרעה סביבתית, עושר ומגוון המינים

הכתמיות (**patchiness**) בטבע מאפיינת כמעט את כל בתי הגידול והיא שמאפשרת למעשה קיום בצוותא של מינים רבים ללא השתלטות של מין דומיננטי אחד על השטח. כתמיות קיימת בטבע בסקאלות מרחביות שונות מסנטימטרים בודדים ועד לעשרות קילומטרים. בשונית האלמוגים באילת, למשל, בקנה מידה של מטרים יכולים להיות כתמים של אלמוגים קשים וכתמים של אלמוגים רכים או של סלע חשוף. בקנה מידה גדול לאורך חופי סיני ניתן לראות כי השונית אינה רציפה אלה מקוטעת והמרחק בין שוניות (כתמים) שונות יכול להיות קילומטרים ואפילו עשרות קילומטרים. כתמיות יכולה לנבוע מאופי המצע (לדוגמא, סלעים ובינהם משטחים חוליים על קרקעית הים וכל סוג מצע מאופן על ידי יצורים שונים), אך גם יכולה להיגרם כתוצאה **מהפרעות** (**disturbance**) מקומיות, כרוניות או חד פעמיות שמפנות שטחים חדשים. השטחים שהתפנו מאפשרים התיישבות של יצורים שאחרת היו נדחקים על ידי המינים הדומיננטיים. מנגנון זה שזוהה על ידי אקולוגים מאפשר קיום של עושר מינים רב. **עושר המינים** (**species richness**) בבית גידול מסוים מתאר את מניין המינים במקום. בהקשר זה חשוב לציין כי גודל או עוצמת ההפרעה יכולים לקבוע את מספר המינים במקום מסוים מתוך המאגר האפשרי בסביבה. הפרעה קטנה יכולה להיות למשל צב ים ששבר ברגליו אלמוג, הפרעה גדולה יכולה להיות הרס מוחלט של שונית אלמוגים על ידי סופת הוריקן. באין הפרעה כלל, ישתלטו כאמור על השטח היצורים הדומיננטיים, ואלה הנחותים יותר מבחינה תחרותית יכחדו. משמע - עושר המינים יהיה קטן יחסית.



איור 3

הקשר בין עוצמת ההפרעה לעושר המינים בחברה

אם מתחוללת הפרעה גדולה מאוד או שתדירות ההפרעות תהיה רבה מאוד, רוב המינים יכחדו - וגם כאן התוצאה תהיה עושר מינים נמוך. רק כאשר גודל ההפרעה בינוני, מתפנים שטחים (כתמים) מסוימים מידי פעם ומתאפשרת חדירתם של המינים הנחותים יותר לצד המינים הדומיננטיים - כך מתאפשר עושר המינים הרב ביותר (איור 3). זאת נקראת "**תיאוריית ההפרעה הבינונית**" (הועלתה לראשונה על ידי החוקר הידוע ג'וסף קונל). תיאוריה זו מנסה להסביר בין היתר את הקיום של מגוון רב של מינים בשונית האלמוגים או ביערות הגשם.

חשיבותה של ההפרעה בעיצוב החברה האקולוגית התברר רק בעשרות השנים האחרונות. בעבר נטו האקולוגים לתאר את מבנה החברה כיציב ומתפתח לכוון אפשרי יחיד של **חברת קליימקס (שיא)** המצויה בשיווי משקל יציב - שמשמעותו שהרכב המינים והשפע היחסי שלהם נשארים קבועים, וגם אם מתים פרטים בחברה, מחליפיהם הם פרטים מאותו המין. החברה מתפתחת בהדרגה, **מחברת חלוץ**, הכוללת בעיקר מינים המתרבים במהירות ובכמויות גדולות ולכן גם מתבססים מהר, ל**חברת השיא**, המורכבת ממינים שמתחרים טוב יותר על השטח ולכן דוחקים לבסוף את מיני החלוץ. תיאוריה זו טוענת כי בכל אזור אקלימי יכולה להתקיים חברת קליימקס אחת בלבד, אפילו בתנאי פתיחה שונים של **סוקצסיה**: תהליך הדרגתי בו אט אט מתחלפות החברות החל מחברה ירודה ומהירת התפתחות (חברת החלוץ הראשונית שהגיעה לבית הגידול) ועד לחברות המפותחות ביותר ומן הסתם גם האיטיות ביותר בהתפתחותן וברבייתן (חברת השיא). סוקצסיה נעצרת כשהחברה השלטת במקום היא חברת השיא. האקולוגים מודעים יותר לדינמיקה הרבה של מערכות אקולוגיות ושל השונות הרבה שלהן במרחב ובזמן. לפיכך, נהוג לתאר את רוב החברות האקולוגיות כמצויות במצב של אי-שיווי משקל אקולוגי (non-equilibrium). שינויים אלה נגרמים בשל הפרעות בקני מידה שונים, ובשל תהליכים אקראיים, והתברר גם כי תנאי ההתחלה של הסוקצסיה כן יכולים לקבוע את אופי החברה בזמן נתון.

חברת חלוץ

חברה אקולוגית המיישבת בית גידול ריק מיצורים חיים, או משרידיהם. המינים בחברת החלוץ מתאפיינים על פי רוב בכושר תחרות נמוך, כושר הפצה גבוה, גודל קטן ומחזור חיים קצר.

חברת שיא

החברה האקולוגית האחרונה בתהליך הסוקצסיה. נמצאת בשיווי משקל יציב עם הגורמים הביוטיים והא-ביוטיים של סביבתה. על פי רוב, המינים של חברת השיא הם בעלי כושר תחרות גבוה, כושר הפצה נמוך, גדולים, בעלי ביומסה גבוהה ומאריכי חיים לעומת האחרים.

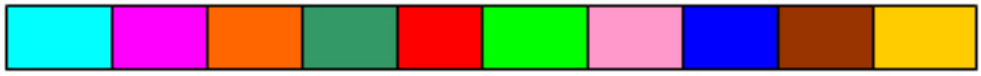
מגוון מינים
מידת השונות בין המינים הביולוגיים החיים במקום מסוים. מדד השונות מתקבל משכלול של עושר המינים ושפע הפרטים מכל מין בחברה אקולוגית.

נחזור לחוף הסלעי לשם דוגמא של חשיבות עוצמת ההפרעה לעושר המינים בחברה. באזור בו הסלעים מתכסים תדיר בחול (הפרעה גדולה או כרונית), רוב בעלי החיים המאפיינים חוף סלעי לא מצליחים לשרוד בשל שחיקה או כיסוי חונק על ידי החול ובשל כך עושר המינים יהיה נמוך. לעומת זאת, באזור החשוף יחסית לגלים (הפרעה בינונית), החול אינו יכול להצטבר ויצורים כדוגמת צדפות ובלוטים יכולים להתקיים. עם זאת, הצדפות אינן משתלטות על השטח, הן משום טריפה על ידי מין מפתח, או משום שהגלים תולשים פיסות ממרבד הצדפות השטחים המתפנים מאפשרים התיישבות של מינים פחות דומיננטיים, ובכך מתאפשר עושר מינים רב יותר. לעומת זאת, באזורים ללא גלים וללא חול (הפרעה מועטה) מיני אצות דומיננטיים יכולים להשתלט על כל השטח ועושר המינים הכולל יהיה נמוך.

עושר המינים אינו המדד היחיד לתיאור מבנה החברה. מדד נוסף נקרא **מגוון המינים** (**species diversity**) והוא כולל בתוכו גם את מניין המינים בסביבה מסוימת וגם את השפע היחסי של המינים השונים בתוך החברה - כלומר מידת השוויוניות של פיזור כלל הפרטים בין המינים השונים. שתי חברות בעלות מספר דומה של מינים, נאמר עשרה, יכולות להיות בעלות מגוון שונה מאוד זה מזה (איור 4). אם כלל הפרטים בחברה הוא מאה, בחברה א' יכולים להיות 91 פרטים ממין א' ופרט אחד מכל שאר תשעת המינים זוהי חברה בעלת שוויוניות נמוכה (מין אחד דומיננטי מאוד והאחרים נדירים) ומגוון נמוך. המקרה הקיצוני ההפוך הוא כאשר לכל אחד מעשרת המינים עשרה פרטים באוכלוסייה - כלומר שוויוניות מוחלטת וערך המגוון הגבוה ביותר האפשרי לחברה בעלת עשרה מינים. באקולוגיה פותחו מספר מדדים מתמטיים לתיאור מגוון המינים בחברה.

חברה א' - מגוון נמוך

חברה ב' - מגוון גבוה



איור 4

מגוון מינים בשתי חברות בעלות עשרה מינים - כל צבע מייצג מין וגודל המלבן מיצג את מספר הפרטים היחסי

12.2 אקולוגיה ימית

מה בין אקולוגיה ימית לאקולוגיה יבשתית?

רוב התיאוריות האקולוגיות שפותחו עד אמצע המאה העשרים התבססו כמעט באופן מוחלט על מחקרים שנעשו ביבשה. כשהחלו חוקרים לשאול שאלות הקשורות לדינאמיקה של אוכלוסיות וחברות באקוסיסטמות ימיות התברר כי העקרונות שהתגבשו לגבי אלה ביבשה אינם מתאימים תמיד לסביבה הימית. הגורם העיקרי להבדל זה הוא המדיום המימי עצמו, אופיו הכימי והפיסי, והדרך בה הוא קושר בין אוכלוסיות, חברות ואקוסיסטמות שלמות. התוצאה היא ארגון שונה מאוד של חברות ימיות מאלה היבשתיות. החיים בים מאפשרים, לדוגמא, התפתחות של צורות חיים שאינן אפשריות ביבשה. הצפיפות הרבה יותר של המים לעומת האוויר מאפשרת לאורגניזמים גדולים יחסית (לא רק חיידקים) ולחלקיקים שונים להישאר מרחפים בהם. דבר זה אינו אפשרי באוויר. תוצאה משמעותית של עובדה זו היא שבסביבה הימית התפתחה חברה שלמה של יצורים קטנים שצפה ומרחפת במים באופן קבוע, ונעה עם זרמי המים - הפלנקטון. מחוץ למים, כאמור, אין דוגמא דומה של יצורים שמרחפים באופן קבוע באוויר. כתוצאה מכך, כל החברות הימיות "רוחצות" במדיום שהוא בעצמו מכיל חברה משלו. המצאות של חברה מרחפת זו הביאה לאבולוציה של צורת חיים נוספת של יצורים שאינה קיימת ביבשה, אשר התאימה עצמה לסינון של הפלנקטון והחלקיקים מן המים לשם תזונה. בעלי החיים אלו מסננים את המזון מן המים בעזרת איברים מיוחדים המותאמים לכך. אין דוגמא דומה לכך ביבשה. האנלוגיה הקרובה ביותר היא של עכבישים, התופסים חרקים מעופפים ברשתם. מרבית בעלי החיים המסננים הינם **ישיבים** - כלומר קשורים למצע (סלע על הקרקעית, לדוגמא), כאשר כל צרכיהם, כמו מזון וחמצן, מסופקים ומובאים על ידי המדיום - המים. בעלי חיים ישיבים מסננים אינם אפשריים ביבשה כיוון שהאוויר אינו מכיל יצורים וחלקיקים אכילים המרחפים כל הזמן. לבסוף, מרבית היצורים הימים, ובמיוחד אלה הישיבים, פיתחו מחזור חיים מורכב הכולל את השלב הבוגר (שהינו קבוע מקום או ישיב, ביצורים הקשורים למצע) ושלב צעיר - **הלרווה** - שהינו קטן ונייד ויכול לרחף במים. לרווה כאלה המצויות בפלנקטון מאפשרות הפצת המינים הללו למרחקים. פועל יוצא מכך הוא שאצל רבים מיצורי הים **האוכלוסיות פתוחות** – כלומר, הקשר בין מקום 'הולדתו' של פרט מסוים למקום חיותו בשלב הבוגר, רופף ביותר. משמעות הדבר היא כי קרוב לוודאי שנקבת השושנון, אשר שמרה על הביצים שהטילה במשך ימים, לא תראה את מי מצאצאיה מתיישב בשושנה שלה או בזו שלידה. אלה, מן הרגע בו בקעו מן הביצים, נסחפים עם המים למרחקים. חשוב להזכיר כמובן שהחיים החלו למעשה בים, והיצורים ביבשה הם אלו שעברו התאמות לחיים בסביבה חדשה ו"איבדו" חלק מהתכונות שהוזכרו, בשל מגבלות החיים ביבשה. בפרק הבא נראה כי תפיסה זו שלמינים עם לרוות פלגיות יש בהכרח אוכלוסיות ימיות פתוחות הולכת ומשתנה בעקבות עדויות מדעיות חדשות.

הבדל פיסיקלי חשוב נוסף הגורם להבדל ניכר בין יצורים יבשתיים לימים הוא כוח הכבידה. בשל העובדה שבעלי חיים וצמחים ימיים צפים או מרחפים במים בזכות הצפיפות והצמיגות הגבוהים של המים, אין הם נזקקים להשקעה רבה של

המסה שלהם בבניית חומר שלדי כמו עצמות או תאית בכדי להחזיק זקופים כנגד כוח המשיכה. בנוסף לכך, בעלי חיים יבשתיים נזקקים, לצורך תנועה, להתרומם מעל האדמה כנגד כוח המשיכה בכדי לצעוד בעוד שבעלי חיים ימים שחיינים נדרשים להשקיע פחות אנרגיה בתנועה.

בתת פרק זה נדון בשני נושאים "חמים" במחקר האקולוגי הקשורים להשפעה של התנאים הייחודיים הקיימים בים על המבנה והדינאמיקה של אוכלוסיות וחברות ימיות. נושא זה חשוב במיוחד כאשר מתכננים שמורות טבע ימיות (פרק 14.3).

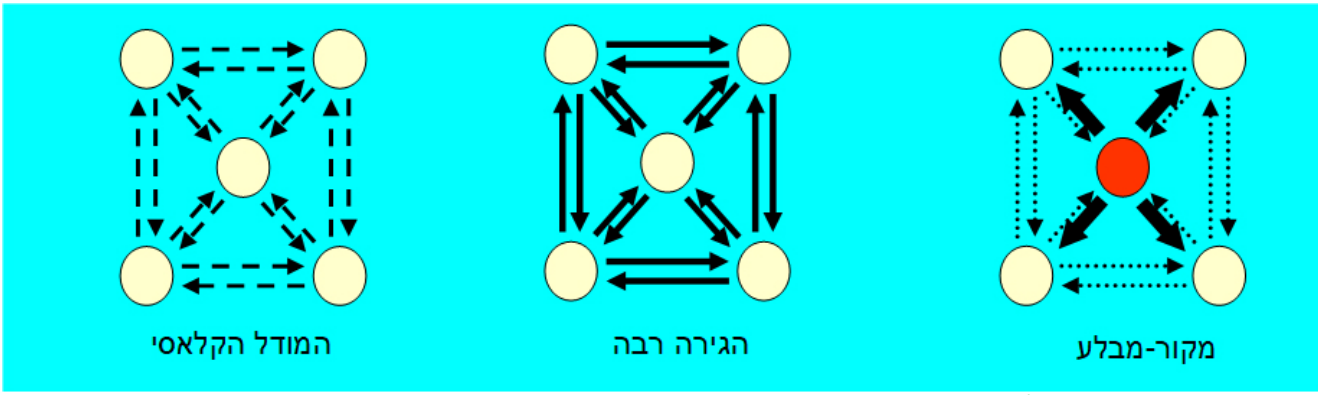
אוכלוסיות ימיות - פתוחות או סגורות?

כאמור, אחד ההבדלים המרכזיים בין מבני אוכלוסיות ימיות ויבשתיות הינו רמת **הקישוריות** (**connectivity**) שבין אוכלוסיות המצויות במקומות שונים או בכתמים שונים. כיוון שלמרב האורגניזמים החיים בים, כולל אלה הקשורים למצע, כמו אלמוגים או בלוטי ים, יש לרוות פלאגיות, תיתכן תחלופה של גנים בין אוכלוסיות או כתמים מרוחקים זה מזה על ידי מעבר של לרוות מאוכלוסיה אחת לאחרת. במקרה כזה ניתן לדבר על **אוכלוסיית-על** (**meta-population**), המורכבת מתת-אוכלוסיות רבות, שבה אין אמנם קשר בין הפרטים הבוגרים של תתי האוכלוסיות, אך מאגר הגנים שלהן מתערבב כתוצאה ממעבר של לרוות ופרטים צעירים מאחת לשנייה. חיבור זה בין אוכלוסיות יכול לשמש גם כמנגנון למניעת הכחדה מקומית של מין מסוים כתוצאה מהפרעה גדולה, מכיוון שאפילו אם יכחדו כל הפרטים הבוגרים במקום מסוים, האוכלוסייה תוכל להתחדש על ידי אספקה חדשה של צעירים מאוכלוסיות אחרות בטווח התפוצה של לרוות. ככלל, אוכלוסייה תחשב לאוכלוסיית-על אם מתקיימת הפצה חד-סטרית או דו-סטרית מוגבלת של פרטים בין אוכלוסיות המשנה, ותיתכן הכחדה אקראית בקצתן. לדוגמא, איי אלמוגים באוקיינוס השקט עוברים מידי פעם הפרעה גדולה ביותר הנגרמת כתוצאה מסערת טייפון ההורסת את כל האלמוגים בשונית ובכך מכחידה את גם את האלמוגים וגם את אוכלוסיית הדגים ויצורים אחרים התלויים בשונית. אך תוך כמה עשרות שנים תתחדש השונית ותחזור פחות או יותר למצבה הראשוני בעקבות אספקת לרוות של אלמוגים, דגים ויצורים אחרים מאיים שכנים, שלא חוו קטסטרופה שכזו. כלומר, אם ההפרעה אינה כרונית (כמו הפרעה שנגרמת על ידי האדם - זיהום לדוגמא), לאוכלוסיות וחברות בים יש כושר התחדשות רב ביותר.

בשנים האחרונות עוסקת האקולוגיה הימית רבות בדינמיקה המרחשת בתוך אוכלוסיות-על, ותפיסות מקובלות על מידת הקישוריות בתוך אוכלוסיות-על הולכות ומשתנות בעקבות שימוש בכלי מחקר חדשניים. כיום ברור כי אופי ואיכות תת-האוכלוסיות בתוך אוכלוסיית-העל יכול להיות שונה מאוד בתלות בגודל הכתם, צפיפות הפרטים בכתם ומיקומו של הכתם בתוך אוכלוסיית-העל, וכן בתנאים המקומיים השוררים באזור. לפיכך, כתמים מסוימים משמשים כ**מקור** (**source**) התורם פרטים או יחידות הפצה (לרוות בסביבה הימית, ובהקבלה - זרעים ביבשה) לכתמים אחרים המשמשים **מבלע** (**sink**). הדינמיקה של האוכלוסייה במקור ובמבלע שונה: המקור הוא הגורם המקיים את אוכלוסיית המבלע, תומך בה ומונע את היכחדותה, ובכך תורם לוויסות גודלה של אוכלוסיית העל. ברור כי כיוון ומידת המעבר בין כתמים שונים יכולים להיות בעלי דגמים שונים (איור 5).

קישוריות
הגדרת הקרבה בין פרטים מכתמים שונים בבית גידול.

אוכלוסיית-על (meta-population)
מערך של אוכלוסיות מקומיות הקשורות ביניהן על-ידי הפצה. באוכלוסיית-על אין אמנם קשר בין הפרטים הבוגרים של תתי האוכלוסיות, אך מאגר הגנים שלהן מתערבב כתוצאה ממעבר של לרוות ופרטים צעירים מאחת לשנייה.



איור 5

קישוריות בין כתמים באוכלוסיית-על. כיוון החץ מסמן את כיוון המעבר של הפרטים בין הכתמים. עובי ומידת רציפות הקו מסמנים את עוצמת ומידת המעבר של הפרטים בין הכתמים. עיגול אדום מסמן אוכלוסיית מקור

מידת הקישוריות בין אוכלוסיות או כתמים בים תלויה במשטר הזרמים באזור מסוים ובמיקום הכתם במשטר זה. מקובל לחשוב כי מיקום הכתם הוא הגורם החשוב ביותר בקביעה אם האוכלוסיות בו יהוו מקור או מבלע באוכלוסיית-העל. כתם יהיה מקור אם הוא מצוי בקדמת הזרם (upstream) ומבלע אם הוא בסוף הזרם (downstream). לאופי הכתם ולתנאים השוררים בו צריכה גם כן להיות השפעה על אופי תת-האוכלוסייה בכתם. בכתם שבו תנאים טובים (מצע מתאים, אספקת מזון רבה, שפיעות טורפים נמוכה ועוד) שרידות הפרטים וכושר הרבייה שלהם אמורים להיות גבוהים ותת-האוכלוסייה בו יכולה לשמש כמקור, אם יש לה קשר לתת-אוכלוסיות אחרות. ניתן, לפחות תיאורטית, להעריך האם כתם מסוים משמש כמקור או כמבלע של אוכלוסיית-על מסוימת על ידי מדידת התרומה של כתם זה לכלל הפרטים באוכלוסיית-על זו. הקושי העיקרי בסוג מחקר זה הוא המעקב אחרי תפוצת הלרוות ממקור התפוצה אל נקודת התיישבותן.

בעבר, כאמור, נטו לחשוב כי כל האוכלוסיות הימיות הינן פתוחות מאוד. כלומר - מידת הקישוריות ביניהן רבה ויש תחלופה רבה של יחידות תפוצה ביניהן. לפיכך, הקשר בין מידת הצלחת הרבייה של אורגניזם מסוים בכתם מסוים לבין הצלחת ההתיישבות של פרטים צעירים בכתם, מועט ביותר, כיוון שתוצרי הרבייה, בין אם רבים או מועטים, נישאים בין כה וכה במורד הזרם ומתיישבים במקומות אחרים. לאחרונה, בעזרת שימוש בשיטות אנליזה מתקדמות, הצליחו מדענים להוכיח כי ישנם כתמים שבהם אוכלוסיות סגורות הרבה יותר, כלומר, מרבית תוצרי הרבייה המשתחררים מהם, נשארים כנראה קרוב יחסית לכתם וחוזרים בסופו של דבר, כלרוות, להתיישבות באותו הכתם.

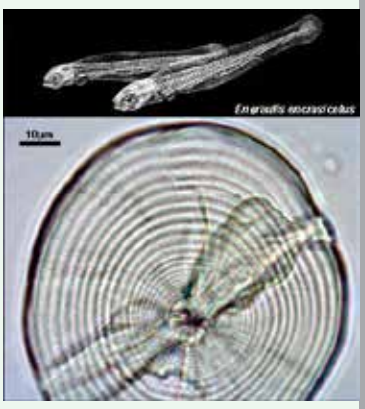
אוכלוסיות ימיות סגורות

אחת הדוגמאות הראשונות של אוכלוסייה סגורה יחסית שנחקרו היא של הדג שפתון כחול-ראש, דג שונית קריבי באי סנט-קרוי. אחד הכלים החשובים בלימוד עברם ההיסטורי של לרוות דגים הוא השימוש בחקר האוטוליטים, שהם עצמות השמע של הדג. אלה עצמות קטנות המופיעות בלרוות הדג מן היום הראשון ובכל יום מתווספת שיכבה, או טבעת גידול נוספת, לקוטר העצם, כשם שלגזע העץ נוספת כל שנה טבעת גידול (איור 6). כמו עם העצים גם אצל דגים ניתן לחתוך את העצם ולימוד הן על קצב הגידול של הלרווה - על פי רוחב הטבעת, והן על התנאים ששררו בעת הגידול בעזרת אנליזת המרכיבים הכימיים שהיו בסביבה והושקעו בטבעת בזמן התהוותה. אם כך, ניתן לבדוק את קצב גידול הלרווה בכל יום וכן את אופי או הרכב המים בהם שהתה הלרווה בשלבים השונים של התפתחותה עד התיישבותה בשונית. ידוע כי המים הקרובים לחוף שונים מאלה המצויים בים הפתוח. אלה המצויים קרוב לחוף מכילים יותר חומרי מזון וריכוז גבוה יותר של חומרים כימיים ייחודיים שמקורם יבשתי (מיקרו-אלמנטים כדוגמת כרום, המצויים במים בכמויות מזעריות). לפיכך הגודל וההרכב הכימי של האוטוליטים מהווים "חותמת" של מי חופים או חותמת של חיים במים פתוחים או כחולים.

החוקרים דגמו לרוות בשני צדדיו של האי: הצד הפונה למעלה הזרם והצד במורד הזרם בו נעים המים בתנועה סיבובית (gyre). השערתם הייתה כי לרוות העוזבות את השונית בצד בו נעים המים בצורה סיבובית יוחזקו באזור ורובן יחזרו אליה, נושאים חותמת של מי חופים. לעומת זאת, בצד שבמעלה הזרם מקור מרבית הלרוות יהיה משוניות רחוקות, לפיכך הן יצטרכו לעבור תקופה מסוימת במים הפתוחים עד הגיען לאי, ולכן יישאו חותמת של מים כחולים (איור 7). החוקרים מדדו את גודל הלרוות, את גודל האוטוליטים ואת רוחב טבעות הגידול וכן דגמו את ההרכב הכימי של האוטוליטים. התוצאות איששו את השערתם - מרבית הלרוות שגויסו בצד שבמורד הזרם היו גדולות יותר, גדלו בקצב גדול יותר (משמע ←

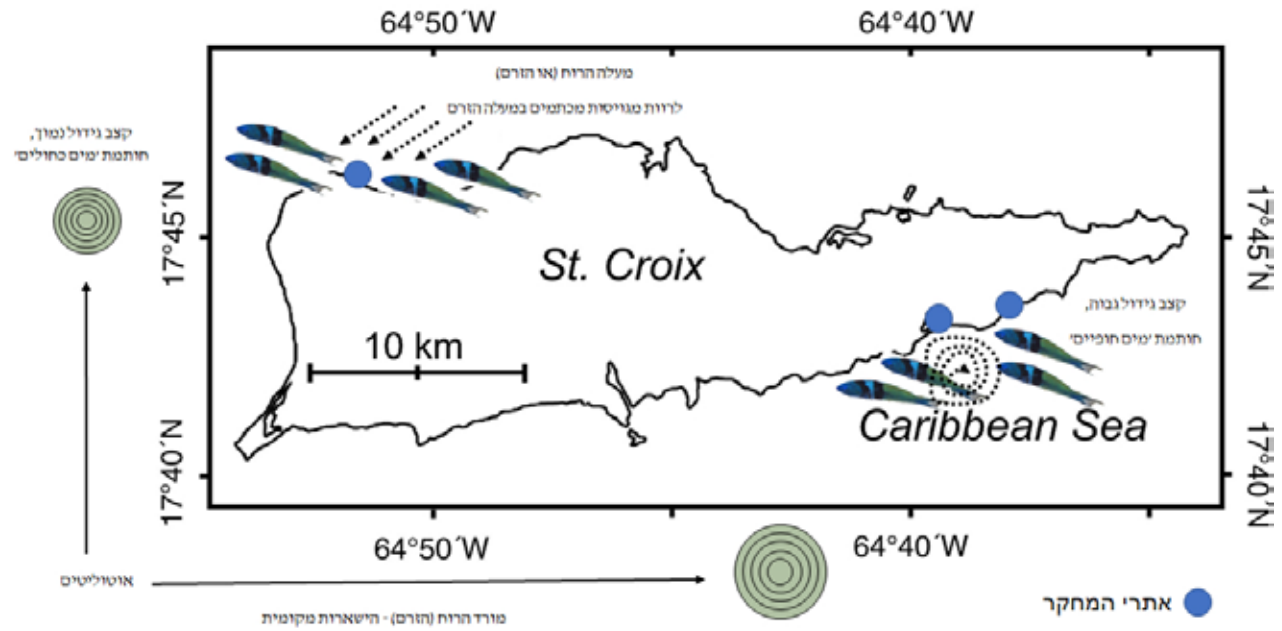
איור 6

טבעות גידול יומיות באוטוליט של לרווה של דג אנשובי (*Engraulis encrasicholus*), כפי שנקראת תחת מיקרוסקופ אופטי (Pedro Re)



איור 7

בחינת מקור הלרוות של השפתון כחול-הראש, המתגייסות לאוכלוסיית הדגים בשונית באי סנט קרוי. הקו המקווקו מציין את כיוון הזרם העיקרי



- הן ניזונו במים העשירים יותר בחומרי מזון, ליד החוף) ונשאו חותמת כימית חופית. זאת, לעומת הלרוות הקטנות יותר שהגיעו לצד שבמעלה הזרם. זו הייתה הוכחה ראשונית לקיומם של מנגנוני החזקה (retention) של לרוות בים - ולקיומן של אוכלוסיות בעלות אופי סגור יותר מכפי שחשבו בעבר. חשוב לציין כי לצורך מדידת ריכוזי המיקרו-אלמנטים נדרש פיתוח טכנולוגיות חדשניות המאפשרות מדידת חומרים בריכוזים נמוכים ביותר.

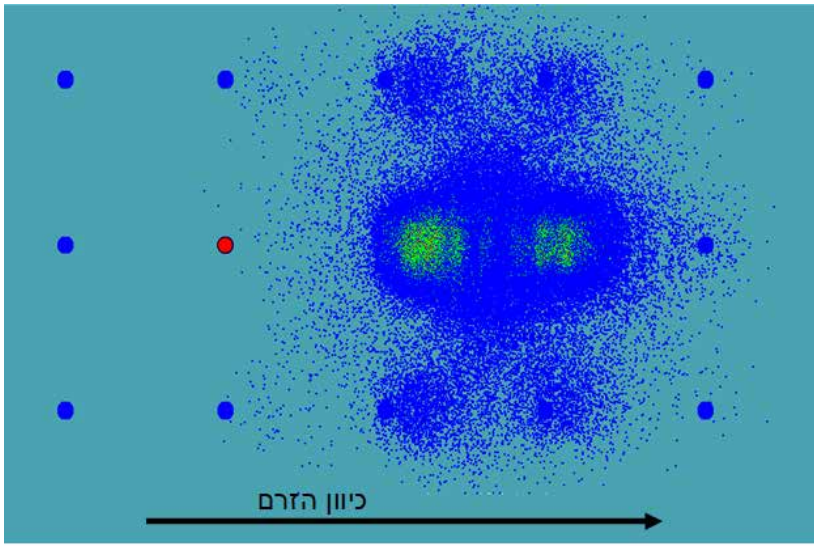
כלי נוסף למדידת מידת הקישוריות בין כתמים ואוכלוסיות הינה הגנטיקה. ברור כי ככל שמידת הקישוריות גדולה יותר כך יהיו תתי-האוכלוסיות בכתמים השונים דומות זו לזו מבחינה גנטית. ככל שהאוכלוסיות מבודדות יותר, תחלופת הגנים ביניהן תהיה נמוכה יותר, והשוני הגנטי - רב יותר.

סחיפה גנטית

הוא תהליך המשנה את המטען התורשתי של אוכלוסייה וגורם לאבולוציה. הסחיפה הגנטית היא תהליך אקראי שאינו קשור להתאמת המטען הגנטי של הפרט אל הסביבה. בתהליך זה שיעורם של אללים (נושאי הגנים) באוכלוסייה עשוי להשתנות במקרה מדור לדור ובסופו של דבר עשוי אלל להשתלט על האוכלוסייה כולה או לחילופין, להיכחד לחלוטין.

בידוד, כמו זה המתואר מעלה, בין תת-אוכלוסיות הוא מנגנון חשוב ביצירת מינים חדשים. אוכלוסיות המרוחקות מאוכלוסיות אחרות במשך דורות רבים מאוד עוברות תהליך של '**סחיפה גנטית**' ובסופו של דבר הופכות למינים חדשים. זו הסיבה שבאיים מרוחקים מאוד מוצאים צורות חיים ומינים שלא קיימים במקומות אחרים בעולם.

מודלים והדמיות מחשב משמשות גם הם היום לבירור חשיבותם של גורמים שונים בעיצוב אוכלוסיות, בין היתר, לחקר חשיבותו של מיקום הכתם – במורד או במעלה הזרם – לפיזור הלרוות באוכלוסיית-העל, ותרומתו לאוכלוסייה זו. באיור 8 ניתן לראות תוצאת הדמיה המתארת את מיקומן של מיליון לרוות של דג שלושים יום לאחר עזיבתן את כתם. כל לרווה מתקדמת בקצב מסוים ליום (שקבע המתכנת), כאשר לכיוון התנועה היומי יש מרכיב אקראי ומרכיב הקשור



איור 8

מודל הדמיה של תפוצת לרוות של דג מכתם אחד (אדום) במערך כתמים (נקודות גדולות) של אוכלוסיית-על לאחר שלושים יום משחרור הלרווות מהכתם

לכוון הזרם. למודל הוכנס גם מרכיב הקשור להתנהגות הלרוות. מחקרים של השנים האחרונות הראו שלפחות לחלק מלרוות הדגים יש יכולת לכוון עצמן לעבר השונית, כאשר הן מרגישות (לא ברור כיצד) קרובות אליה. זו הסיבה שבמודל ההדמיה המוצג באיור מתקבצות הלרוות סביב הכתמים. אורך החיים האפשרי של לרווה במים הפתוחים בטרם היא חייבת להתיישב (או שתמות) תלוי במין האורגניזם, ויכול לנוע בין מספר שעות למספר חודשים. אצל דגים, אורך החיים הממוצע שחושב הוא כשלושים יום. לכן נקבע מראש במודל כי הלרוות "יעצרו" כאמור, לאחר שלושים יום.

כל הלרוות שלא הגיעו לאחר תקופה זו לאחד הכתמים אובדות לאוכלוסיית-העל כיוון שאיבדו את יכולת ההתיישבות. מכאן, שהרוב הגדול של הלרוות אובד בסופו של דבר עוד בטרם הגיעו לכתם כלשהו. המסקנה היא שככל שהכתם מצוי בדרכם של הזרמים העיקריים באזור וקרוב יותר לאוכלוסיית המקור, לדג יש יותר סיכויים לשרוד. חשוב לציין כי חלק ניכר נוסף אובד לאוכלוסייה לאחר הגעת הלרווה לשונית והפיכתה לפרט צעיר, כתוצאה מתהליכים המתרחשים בשונית עצמה, כמו תחרות וטריפה. מודלים אחרים הדגימו כי לכתמים במעלה הזרם תרומה גדולה יותר לאוכלוסיית-העל מאשר לשוניות במורד הזרם. מודלים נוספים הראו שככל שהחזקת הלרוות סביב הכתם גדולה יותר, כך קטנה חשיבות מיקום הכתם, וגדלה חשיבות איכותו (דהיינו, התאמת המצע, כמות המזון, כמות הטורפים או, מנקות המבט האיכות סביבתית, רמת ההשפעה השלילית של האדם עליו) לתרומתו לאוכלוסיית-העל.

בקרת תפקוד החברה האקולוגית - מלמעלה למטה או מלמטה למעלה?

נושא רלוונטי נוסף במחקר הימי של חברות אקולוגיות הוא הבנת המנגנונים המבקרים את תפקוד חברות אלה. כלומר, מה הם הגורמים המשפיעים ביותר על מבנה והדינאמיקה של החברה (איזה יצורים ימצאו בה, מתי, ובאיזה כמות). שני מנגנוני הבקרה העיקריים הפועלים באקולוגיה הינם כוחות הפועלים מלמעלה למטה (top-down control) או כוחות הפועלים מלמטה למעלה (bottom-up control). **בקרה 'מלמעלה למטה'** מקורה במיני מפתח טורפים, ומשמעותה אינטראקציה של טורף-נטרף המשפיעה על כל האינטראקציות האחרות ועל מארג המזון הכללי. זה היה מודל הבקרה העיקרי המקובל באקולוגיה בשנות השישים של המאה העשרים. מצד שני, תתכן אפשרות כי כמות הטורפים ועוצמת טריפתם אינם חשובים ביותר לקביעת סוג ושפע היצורים במקום מסוים, ומה שחשוב יותר הוא כמות חומרי ההזנה (נוטריינטים) וגודלה של הרמה הטרופית התחתונה, הינו כמות היצרנים הראשוניים – הצמחים. כאן מדובר בבקרה 'מלמטה למעלה'. **בקרה 'מלמטה למעלה'** מתרחשת כאשר זמינות המשאבים היא תהליך המפתח, המשפיע העיקרי על תפקוד החברה. במקרה כזה האוכלוסיות ברמה הטרופית הגבוהות יותר מבוקרות בעיקר על ידי תחרות ולא על ידי טריפה. כאשר חוקרים חברה אקולוגית מסוימת, אחת השאלות החשובות היא אם התפקוד הכולל שלה נקבע בראש ובראשונה בבקרה מלמעלה למטה, באמצעות מיני מפתח, או על ידי בקרה מלמטה למעלה.

מרבית המחקרים בתחום זה התרחשו בעשור האחרון של המאה העשרים ועדיין נמשכים לתוך המאה העשרים ואחת, ורובם נערך באזור החוף הסלעי.

Top-Down control (בקרה מלמעלה למטה)

תהליך בקרה בחברות אקולוגיות בהן השליטה היא מלמעלה למטה: כמות גדולה של טורפים מקטינה את מספר ההרביבורים, שמגדיל את מספר הצמחים, שמקטין את כמות הנוטריינטים הזמינים.

Bottom-Up control (בקרה מלמטה למעלה)

תהליך בקרה בחברות אקולוגיות בהן השליטה היא מלמטה למעלה: כמות נוטריאנטים גבוהה בסביבה מגדילה את שפע הצמחים, שמגדילה בתורה את שפע ההרביבורים, שמגדילה את שפע הטורפים.

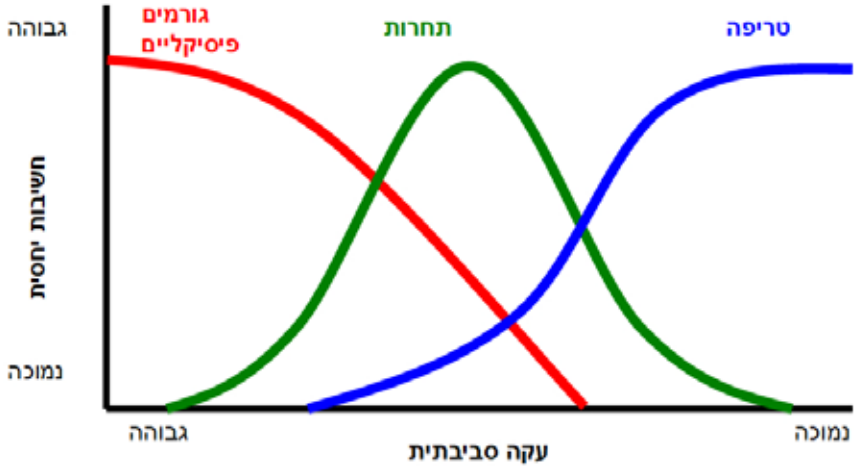
עקה

תחושת מצוקה הנובעת מפגיעה במצב האיזון של אורגניזם כתוצאה מגירוי חיצוני.

מרבית המחקרים המוקדמים יותר הדגימו כאמור את חשיבותן של בקרות מלמעלה למטה. לדוגמא, אותו מחקר שהוזכר על חשיבותו של כוכב-הים כמין מפתח הקובע את אופי החברה בחוף הסלעי במקומות מסוימים לאורך חופיה מערביים של צפון אמריקה. בהמשך, פותחו מודלים נוספים של בקרה שטענו כי בקרה מלמעלה למטה לא קיימת בכל מצב. לדוגמא, כאשר **עקה** (**stress**) כדוגמת פעילות גלים חזקה מגבילה מאוד את פעילותם של טורפים, חשיבותה של הטריפה כגורם מבקר יורדת בצורה משמעותית. ניסויים בתנאים שונים של חשיפה לגלים (חוף שקט, חוף ובו פעילות גלים בינונית, וחוף בו פעילות הגלים חזקה) הראו כי אכן ככל שהחוף מוגן יותר חשיבותם של טורפים הולכת וגדלה, וחשיבותה של תחרות בין מיני הבסיס יורדת. מודלים אלה נקראים **מודלים של עקה סביבתית** (**environmental stress models**) והם פותחו על ידי מנגי (Menge) וסטרלנד (Sutherland) באמצע שנות השבעים (איור 9). במצב של עקה גבוהה מאוד חשיבותה של התחרות יורדת גם מכיוון שהעקה עצמה מורידה את צפיפות היצורים ובכך מורידה את הצורך בתחרות על שטח ומשאבים.

בשל הצלחת מחקרי הטריפה להסביר הבדלים במבנה החברה בין סלעים חשופים ומוגנים מפעילות גלים באותו אתר, הוזנחה בחינת חשיבותם של תהליכי בקרה מלמטה למעלה. בנוסף לכך, רווחה ההנחה כי ריכוז נוטריינטים ופיטופלנקטון (מקור המזון העיקרי) וכן משטר הזרמים לאורך החופים משתנים רק בקני מידה גדולים מאוד, כך ששונות בין אתרים באותו אזור הינה זניחה ולא יכולה להסביר הבדלים בין אתרים שונים. מגבלה נוספת של המחקרים הייתה ביכולת המדידה של גורמים אוקיניים אלה בקנה מידה גדול. כאן באה לעזרה טכנולוגית החישה מרחוק (remote sensing) המאפשרת למדוד את טמפרטורת מי הים ואת ריכוזי הפיטופלנקטון מן החלל בעזרת לווינים. כמו כן פותחו מכשירים המודדים את כיוון ועוצמת הזרם למרחק רב ולאורך זמן, ומערך כזה של מכשירים יכול לתאר את משטר הזרימה באזור גדול וברמת דיוק רבה. טכנולוגיות חדישות אלה תרמו לממצאים נוספים בתחום.

עדויות ראשוניות לחשיבותן של בקרות מלמטה למעלה באו ממחקרים שנעשו בדרום אפריקה על ידי ברנץ' (Branch) ועמיתיו, ולאחר מכן גם בצפון אמריקה על ידי מנגי (Menge) ועמיתיו. חוקרים אלה הראו כי תיתכן שונות רבה ברמת



איור 9

מודל העקה הסביבתית של מנגי וסטרלנד המתארים את השינוי בחשיבותם היחסית של גורמים פיסיקליים, תחרות וטריפה כתלות בעוצמת העקה הסביבתית (כמו עוצמת מכות הגלים)

הנוטריינטים ובשל כך גם בפריחת האצות ובכל מבנה מארג המזון בקנה מידה מרחבי קטן יחסית, אזורי - כלומר, בין אתרים שונים באותו אזור גיאוגרפי. שונות זו יכולה להיות קשורה לגורמים ביוטיים, כמו הפרשת לשלשת של ציפורי ים באיים מסוימים שמעלה את ריכוז הנוטריינטים ולפיכך גורמת לפריחת אצות במים ועל הסלעים. אך בעיקר נקשרת השונות לגורמים אביוטיים, כמו תהליכי העלאת מים קרים מן העומק בסמוך לחוף (upwelling), המביאים מן העומק נוטריינטים רבים לאתרים מסוימים וגורמים בכך לפריחה מסיבית אך מקומית של אצות ובכך להעשרה וגידול של כל מארג המזון באזור. כיום מתברר גם כי במקומות בהם ישנה בקרה חזקה מלמטה למעלה - כלומר, מקומות בהם רמת היצרנות (גידול האצות ובעקבות כך כל שרשרת המזון) רבה - מתקיימת גם, כפעולת משוב, בקרה חזקה מלמעלה למטה. אכן, רק הגיוני הוא כי אוכלוסיות גדולות של טורפי מפתח גדולים יכולות להתקיים רק במקום בו יש מזון רב שלשם קיומו נדרשת יצרנות גבוהה. חוקרים רבים נוהגים לכלול כיום את מידת אספקת הלרוות של חסרי חוליות ישיבים (כמו צדפות ובלוטי ים), כחלק ממנגנון הבקרה מלמטה למעלה. הטענה היא כי גם שיעור הגעת הלרוות של **מיני מסד** מסבסד את מארג המזון בחברה החוף. משמעות הדבר היא כי במחקרים, שמטרתם להעריך את חשיבותם של מנגנוני הבקרה השונים על מבנה החברה והדינאמיקה שבה, יש צורך למדוד גורמים רבים הכוללים את כמות הנוטריינטים במים, כמות הפיטופלנקטון במים, קצבי הגידול של אורגניזמים דומיננטיים (בחוף הסלעי, בעיקר צדפות ובלוטי ים), וכן את השפעתם של טורפים והרביבורים על שרידותם של היצורים הדומיננטיים בחברה (למשל, בעזרת ניסוי הרחקת טורפים או מניעת כניסתם לחלקות מסוימות בעזרת כלובים). במקביל למדידת גורמים אלה על החוף יש צורך ללמוד את האוקיינוגרפיה (בעיקר משטר הזרמים וטמפרטורות המים) הפועלת בסמוך לחוף, שהרי היא המספקת העיקרית של מזון ולרוות אל החוף עצמו. הבנת הקשר בין התהליכים האוקיינוגרפים לתהליכים הביולוגים המתרחשים על חוף הים או קרקעיתו מהווים מוקד מרכזי במחקר האקולוגי בשנים האחרונות.

לצורך כך נדרש מחקר בקנה מידה גדול ולאורך זמן, כזה המצריך מאמץ משותף, בין-תחומי ובין-אוניברסיטאי. בכדי שניתן יהיה לנסח הכללות על תהליכים אלה רצוי גם לחזור על מחקרים דומים במקומות רבים בעולם.

הבנת השונות במבנה החברה גם במרחב וגם בזמן חשובה ביותר בהקשר של איכות הסביבה הימית. כדי להבין את טיב ומידת ההפרעה של גורמים סביבתיים מעשה ידי אדם כגון זיהום ודיג יתר, יש להבין ראשית כל את מידת השונות הטבעית ואת הגורמים האחראים עליה. ללא הכרה זו קשה יהיה לאבחן ולמדוד בוודאות את השפעת האדם על מערכות ימיות.

מיני מסד
(species basal)

הנם מינים קבועי מקום המהווים מרכיב חשוב הן ביצירת בית הגידול והן כבסיס בשרשרת המזון.

13

השפעות אנתרופוגניות על הסביבה הימית

אנתרופוגני

שמקורו בפעולות האדם ובהשפעותיהן על הטבע.

מרבית המערכות האקולוגיות הימיות, אם לא כולן, אינן מצויות כיום במצב ה"טבעי" האמיתי שלהן. פעילות האדם במאות השנים האחרונות שינתה באופן קיצוני את החברות הימיות - מחופים סלעיים, שוניות אלמוגים, דרך לב האוקיינוס ועד למעמקי הים. בפרק זה נתמקד בחמש דרכים עיקריות בהן משפיעה הפעילות האנושית על הסביבה הימית:

- ניצול-יתר של אורגניזמים ימיים (דייג יתר)
- פלישות ביולוגיות של מינים לא מקומיים
- זיהום הים
- הרס בתי גידול
- שינוי אקלים עולמי

נסקור את הגורמים הללו ונלמד לא רק כיצד הם משפיעים על אורגניזמים שונים, על מגוון המינים ועל התפקוד של חברות אקולוגיות, אלא גם מהן ההשלכות של שינויים אלו על החברה האנושית.

13.1 ניצול יתר של אורגניזמים ימיים

מיה אלסר, גיל רילוב

בימים עברו, הים נראה לבני האדם עצום ובלתי נודע ועורר תחושה כי הוא אינסופי. אפילו במאה התשע-עשרה הייתה התפיסה השלטת (גם בממסד המדעי) שהים, בשל גודלו העצום, הוא בלתי נדלה והמשאבים בו כמעט ואינם מוגבלים. בשנת 1883 כתב הביולוג והסופר האנגלי הנודע, תומאס האקסלי: **"הדגה של הימים הגדולים היא בלתי נדלית. כלומר, אין במעשיו של האדם כדי להשפיע באופן רציני על מספר הדגים"**. לכן סברו כי לעולם לא תתעורר בעיה של מחסור בשלל הדיג. כיום ישנן עדויות רבות ומצערות לכך שתפיסה זו בטעות יסודה. למעשה, ניצול יתר של אורגניזמים ימיים אינו בעיה של המאה האחרונה בלבד. ידועות דוגמאות מן ההיסטוריה הרחוקה יותר של המין האנושי של ניצול יתר של מינים מסוימים עד כדי הכחדה. אחת הדוגמאות המפורסמות הינה סיפור ההכחדה של **פרת הים של סטלר** (Steller's Sea Cow, איור 1). מין זה נחשב לגדול מבין היונקים הימיים בהיסטוריה המודרנית, מלבד הליוויתנים הגדולים ובשל גודלה העצום (הגיעה למשקל של 8-10 טון), תנועתה האיטית וחוסר יכולתה להשקיע את כל גופה מתחת למים, הפכה למטרה נוחה לציד אסקימוסים וסוחרי עורות סיביריים. אוכלוסייתה הלכה והצטמצמה לכדי כמה אלפים והחיות שנותרו התרכזו באזור שרשרת האיים האלאוטיים שבצפון האוקיינוס השקט, בין אלסקה לרוסיה. אוכלוסייה זו נתגלתה על ידי ספנים רוסים באמצע המאה השמונה עשרה, ורק עשרים ושבע שנים לאחר מכן, כנראה ב-1768, ניצודה פרת הים האחרונה ומין זה נכחד לחלוטין מעל פני כדור הארץ.

איור 1

כך, על פי איורים שנשתמרו ועצמות שנמצאו, נראתה פרת הים של סטלר (ynet)

איור 2

מוצרים משומן ליוויתנים. (מימין לשמאל) **סבון, שומן לתאורה ושמן מכונות**

רבים ממיני ה**לווייתנים** היו קרובים לגורלה של פרת הים של סטלר עד לפני כמה עשרות שנים בשל ציד נרחב על ידי מדינות רבות. שומן הליוויתנים שימש כחומר בערה למנורות, לשימון מכונות, להכנת סבונים ובשמים ואף לקטילת חרקים ולדישון (איור 2). מזיפות הליוויתן נמכרו ליצור מחוכים, שוטים, מטריות, מברשות ללשון, כפות נעליים ועוד. את מה שנותר מהגווייה, היו משליכים בחזרה לים - בארה"ב לא הייתה חיבה יתרה לבשר ליוויתנים.

הציד האינטנסיבי ביחס לקצב הרבייה האיטי של יונקים אלו, הביא לצמצום אוכלוסיות רבות של יונקים ימיים. כיום, כתוצאה מייסודן של אמנות בין לאומיות האוסרות כליל ציד לווייתנים, אוכלוסייתם של מינים רבים הולכת ומתאוששת, אך כפי שניתן לקרוא בפרק 14.2, שיקום המגוון הגנטי החיוני לעמידות האוכלוסייה, הוא עניין מורכב יותר.

לא רק היונקים, בעלי קצב הרבייה האיטי, מועמדים להכחדה כתוצאה מצייד-יתר. גם מינים רבים של דגים וחסרי חוליות, המסוגלים להתרבות בקצב מהיר, אינם עמידים בפני הכחדה. בסוף שנת 2020 מנה האיגוד הבינלאומי לשימור הטבע (IUCN) 5,652 מינים ימיים אשר נמצאים ברמות שונות של סכנה. הכחדה של בעלי חיים ימיים כתוצאה מדיג-יתר, קודמת לכל ההפרעות הפולשניות האחרות של האדם בסביבה הימית, הן בזמן והן מבחינת סדר גודל.

השיקולים המובילים את הדיג הם כמובן כלכליים - ביקוש למינים או מוצרים מסוימים, משקל גוף גבוה ועוד. בעבר, כשבים היה שפע של יצורים חיים, התרכז הדיג במינים בעלי גודל גוף גדול, השייכים בדרך כלל לרמות תזונה גבוהות. אחד מטורפי העל הגדולים, שעדיין נידוג, למרות שהדבר אינו חוקי ברוב מדינות העולם, הוא הכריש. מעריכים כי 100 מיליון כרישים בשנה נהרגים על ידי האדם מידי שנה. לכריש חשיבות גבוהה במארג המזון כטורף על: הכרישים ניזונים ממגוון יצורים ימיים ובכך מאזנים את המערכת האקולוגית והם אחראים לסילוק יצורים חולים או פצועים מהמים.

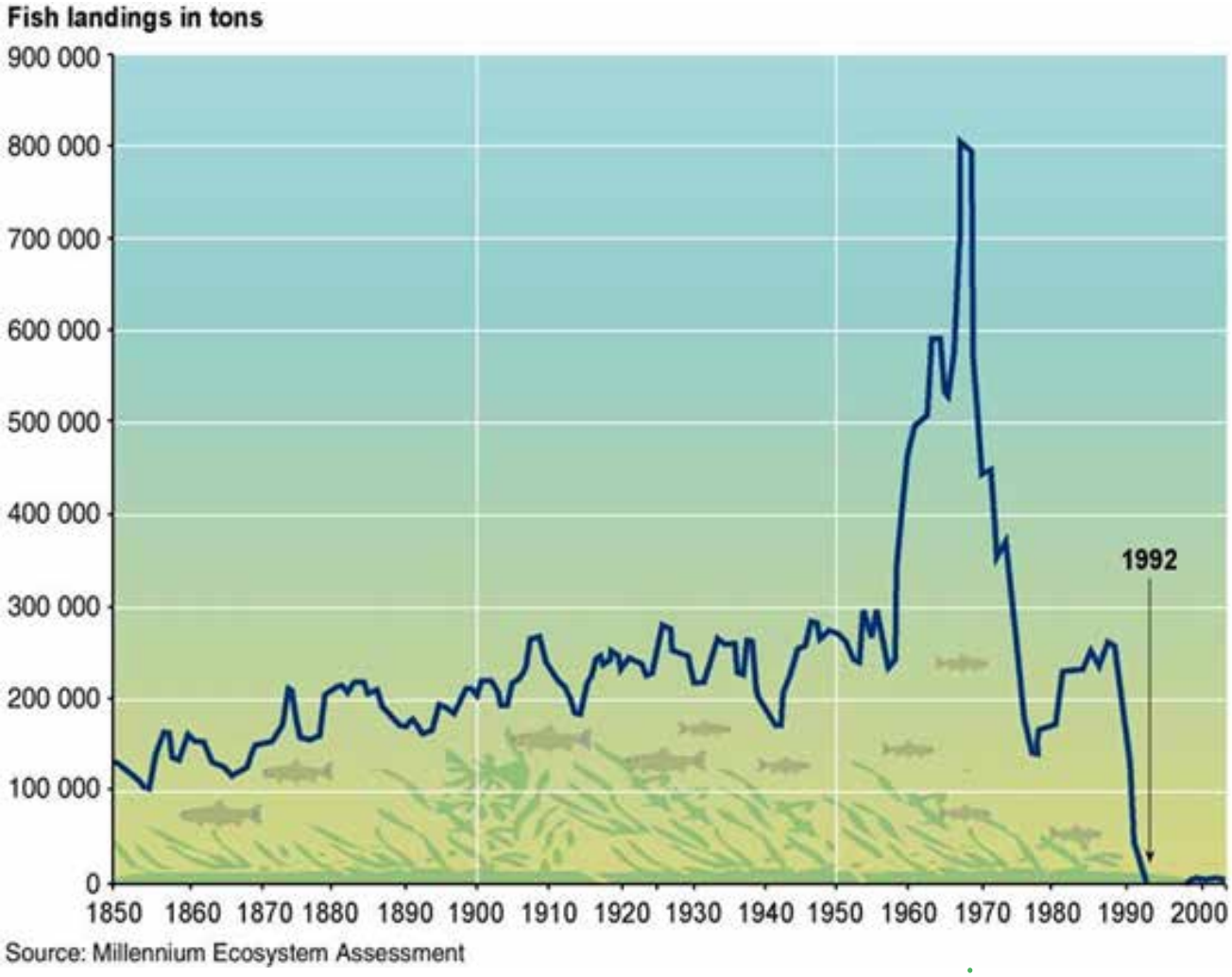
האיגוד הבינלאומי לשימור הטבע (IUCN) העריך בשנת 2018 כי 30% ממיני בכרישים והבטאים בעולם מצויים בדרגות שונות של סכנת הכחדה, רובם כתוצאה מדיג בקצב העולה על קצב הרבייה הטבעי שלהם (פעם בשנתיים-שלוש).

לשמן המופק מכבד הכריש מיוחסים 'יתרונות בריאותיים', הלסתות והשיניים משמשים ליצירת מזכרות ותכשיטים ועורו משמש בתעשיית העורות. כרישים ניצודים גם עבור בשרם המשמש במטבחים שונים ברחבי העולם, כאשר המאכל המפורסם ביותר הוא מרק סנפירי כריש, הידוע לשמצה בשל הדרך בה משיגים סנפירים אלו. גם במקומות בהם דיג הכרישים אסור, נלכדים כרישים רבים בציוד דיג (ראו הסבר על 'שלל לוואי' בסוף הפרק).

עם הזמן, היצורים הגדולים שבראש מארג המזון הלכו והתמעטו ובלית ברירה, הלכו הדייגים וירדו בשרשרת המזון לדיג של דגי הטרף הקטנים יותר, כמו סרדינים ואנשובי ובמקביל, לדיג של חסרי חוליות. או אז התברר כי אפילו אוכלוסיות של מינים מאוד נפוצים יכולות להתמוטט בתהליך הדרגתי: בתחילה מכוון הדיג לדגים הבוגרים, הגדולים ביותר, אך בדייג אינטנסיבי מספרם של אלה הולך ויורד עד שהם הופכים נדירים. בשלב הבא יסתפקו הדייגים בפרטים קטנים וצעירים יותר ולאחר זמן בקטנים עוד יותר. עם הזמן נאלצים הדייגים להתחיל ולאסוף פרטים צעירים שעוד לא הגיעו לגיל הרבייה שלהם ובכך הם פוגעים בקצב הרביה ודנים למעשה את גורלה של האוכלוסייה לאבדון.

דוגמא עצובה לקריסה מוחלטת של ענף דיג הוא זה של דג **הקוד (בקלה) האטלנטי**. דיג הקוד היה ענף דיג עיקרי לאורך החופים האטלנטיים של צפון אמריקה במשך מאות שנים. הקוד הוא דג טורף, רעבתני ומתרבה במהירות. נקבה מטילה כ-4-8 מיליון ביצים בשנה. הדג גדל מהר למדי ומגיע לאורך של 40 ס"מ אחרי שנתיים בלבד. תאוות הטרף שלו אינה יודעת שובע ופיו הפתוח תמיד בולע כל דבר הנקרה על דרכו, זוהי גם "חולשתו" שמביאה אותו בקלות יחסית אל שולחננו. הדג היה כה נפוץ לפני חמש מאות שנה, עד שעל פי דיווחים מאותם ימים יכלו הדייגים בחופי ניו-פאונדלנד בקנדה פשוט לאספו מספינותיהם בעזרת דלי ששלשלו לצד הדופן. עם הזמן, עברו לדוג את הקוד בעיקר באמצעות מערך חכות, הנפרשות מספינת הדיג לאורך כבלים ארוכים. הקוד הרעבתן בולע את הפיתיון ונתפס. הקוד ניתן לניצול כמעט מלא, אפילו הלשון, שלפוחית השחייה, הלחיים והביצים נחשבו למעדנים והשמן שהופק מהכבד, שמן הדגים המפורסם (Cod liver oil), היה למקור הנפוץ ביותר לוויטמין E וערובה לבריאות טובה.

המאה ה-20 הביאה את טכנולוגיות הדייג והשייט לשיאים חדשים. לא עוד ספינות מפרש שבריריות, חבלים וחכות, אלא ספינות דיג ענקיות עם מנועי דיזל אדירים ומפעלי עיבוד ושימור דגים על סיפונן, עם רשתות גריפה ענקיות שנגררו על פני הקרקע ופתחן הענק עשוי לבלוע כל יצור חי, עשרות טונות בכל גריפה, עם סונרים משוכללים לגילוי להקות הדגים, שהופעלו בים ומן האוויר. עם השנים מימי האוקיינוס האטלנטי הלכו ונדלדלו וספינות הדיג נאלצו לשוב ריקם (איור 3).

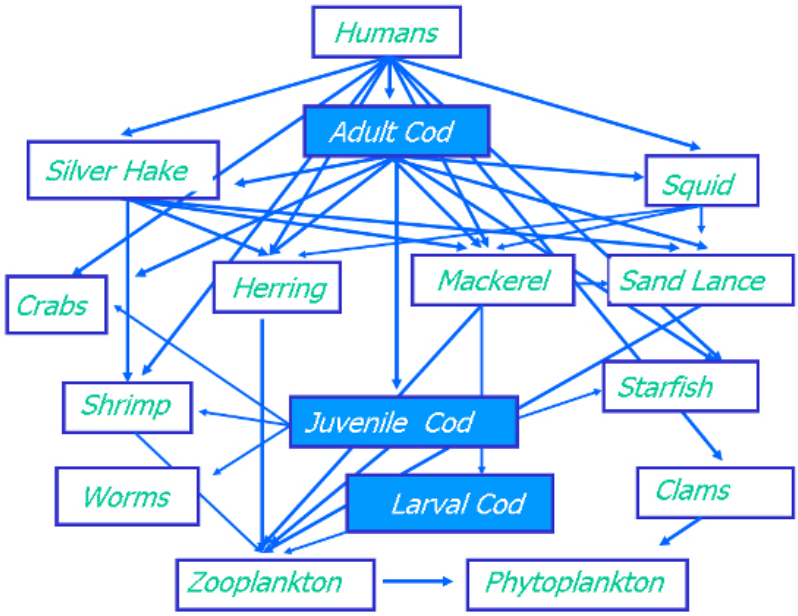


איור 3

שלל דגי הקוד, צפון האוקיינוס האטלנטי

בשנת 1992 נאסר לחלוטין דיג הקוד בחופי ניו פאונדלנד וממשלת קנדה הקציבה מיליארד וחצי דולר לתכניות הסבה מקצועית לדייגים ועובדי תעשיית הדיג. בשנת 1994 הטיל הנשיא קלינטון מגבלות שקיצצו בחצי את הכמות המותרת של דיג הקוד בניו אינגלנד ובשנת 1999 נאסר דיג הקוד לחלוטין במפרץ מיין בארה"ב. ערים נעזבו, כלי שיט קורקעו, מפעלים שותקו ומאות אלפי בני אדם איבדו את פרנסתם. מכל בחינה מעשית וכלכלית, נעלם דג הקוד ממי האטלנטי המערבי. מובן שעדיין מצויים שם דגי קוד, ואפילו נקבות מטילות ביצים, אך השפע נעלם ואיתו "תרבות הקוד" של האזור.

אחד ההסברים לחוסר התאוששות אוכלוסיית הקוד עוסק בשינוי שעברה המערכת האקולוגית עם ההיעלמות הראשונית של דגי הקוד הבוגרים: תיאוריה זו אומרת כי הפרטים הגדולים של הדג היו ניזונים בעבר על דגים טורפים קטנים יותר, שהם עצמם היו ניזונים על דגיגוני הקוד. כשאוכלוסיית דגי הקוד מנתה פרטים גדולים רבים, שמרו אלה על גודל אוכלוסייה מוגבל של מיני הטורפים הקטנים כך שאלה לא יכלו לחסל הרבה דגיגוני הקוד. עם התמעטות דגי הקוד הגדולים, התרבו אוכלוסיות הטורפים הקטנים, שירד מהם לחץ הטריפה (איור 4).



איור 4

מארג המזון של הקוד האטלנטי
(NOAA Fisheries)

כעת, למרות עצירת הדיג על הקוד, האוכלוסייה אינה גדלה מכיוון שדגיגוני קוד נטרפים טרם הגיעם לגודל רביה. אם אכן זהו התהליך המתרחש, זו דוגמא מצוינת לאופן בו דיג יתר יכול לשנות את מבנה מארג המזון והחברה כולה במערכות אקולוגיות.

גם חסרי החוליות חשופים לסכנת הכחדה במצב של דיג יתר. חילזון **אוזן הים הלבנה** (White Abalone) הוא דוגמה למין של חסר חוליות שהפך תוך שנים ספורות מנפוץ ביותר למין בסכנת הכחדה. לפני תקופת הדיג המסחרי, ניזונו תושבי חופי קליפורניה מבשר החילזון במשך אלפי שנים והקונכיות נסחרו מדרום קליפורניה עד למזרח נהר המיסיסיפי. אוזן הים הלבנה הוא חילזון צמחוני, אשר נצמד למצע סלעי בעזרת שריר הרגל שלו וכך מגן על עצמו מפני טורפים (איור 5).

בתחילת שנות ה-70', החל דיג מסחרי של חילזון זה ושלל הדיג הצטמצם מ-143,000 פאונד לשנה בסוף שנות ה-60, ל-5,000 פאונד בשנה, בסוף שנות

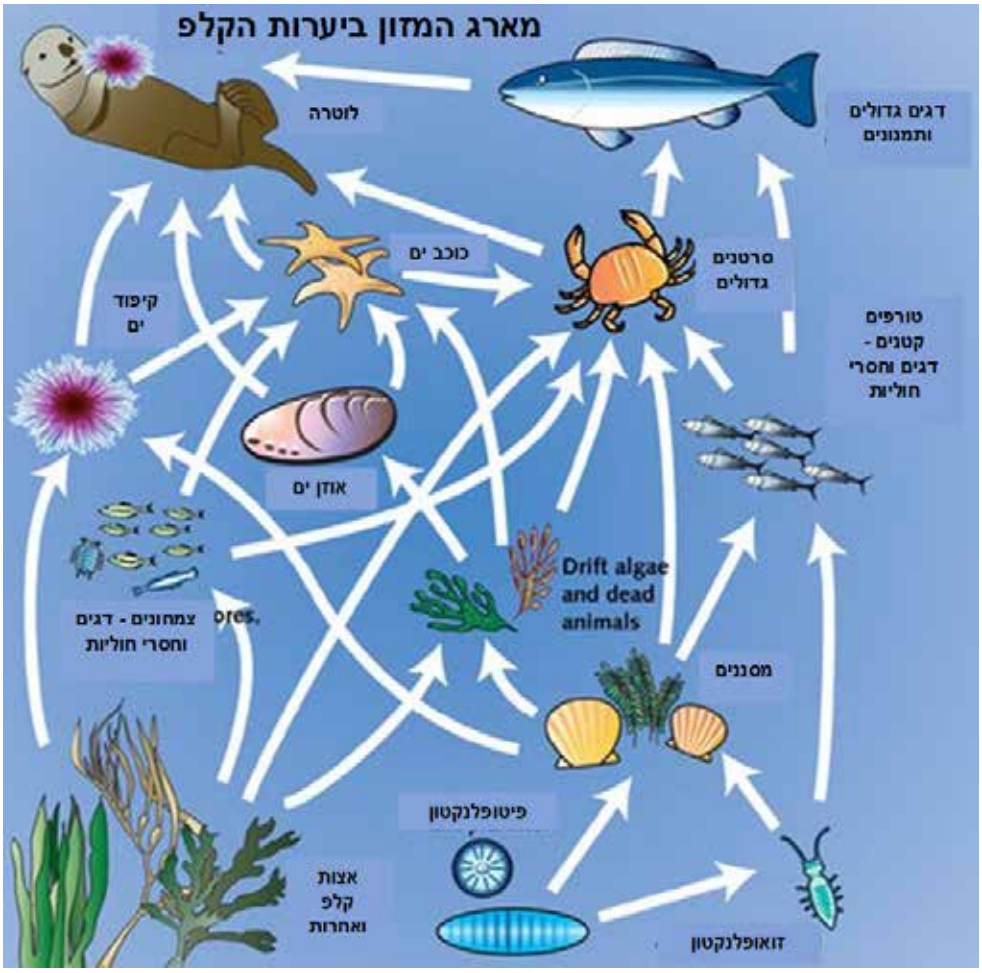
איור 5

אוזן הים הלבנה (White Abalone)
(NOAA Fisheries)

ה-70'. בשנת 1997, אסרה מדינת קליפורניה על דיג החילזון, אך למרות זאת אוכלוסיית אוזן הלבנה לא מצליחה להתאושש. הסיבה העיקרית לכך נעוצה בצורת הרבייה של מין זה: החילזון חי 35-40 שנה ומגיע לבגרות מינית בגילאים 4-6 שנים. הוא מתרבה ברבייה חיצונית, דבר המקשה על ההפריה כאשר האוכלוסייה מצטמצמת והמרחקים בין זכרים בוגרים לנקבות הולכים וגדלים. מלבד היעלמות המין, יש לאוזן הים הלבנה השפעה גם על בית גידול ימי חיוני - יער אצות הקלפ. החילזון ניזון על צמחים צמודים סלע בקרקעית יערות הקלפ ובכך מפנה מצע סלעי למגוון גדול של אצות קלפ. הגידול במגוון האצות מאפשר גם גידול במגוון היצורים החיים ביער אצות הקלפ.

יער אצות הקלפ הוא בית גידול עשיר ביותר האופייני למים קרים ומשמש מחסה ומספק מזון למגוון רב של יצורים. בית הגידול הזה מבוסס על אצות חומיות הגדלות בקצב של כ-30 ס"מ ביממה. האצה מרתקת את עצמה, בעזרת מאחזים מסועפים דמויי-שורשים לסלעים תת-ימיים, וגבעוליה המחוספסים צפים בעזרת שלפוחיות מלאות גז, לפני המים.

יערות הקלפ הם דוגמה למקרים בהם דיג היתר משפיע לא רק על מיני המטרה, אלא גם על מערכת אקולוגית שלמה: לוטרת הים היא הטורף המשמעותי ביערות הקלפ. הלוטרה טורפת בעיקר צדפות וקיפודי-ים המצויים על הקרקעית



איור 6

מארג המזון ביערות הקלפ

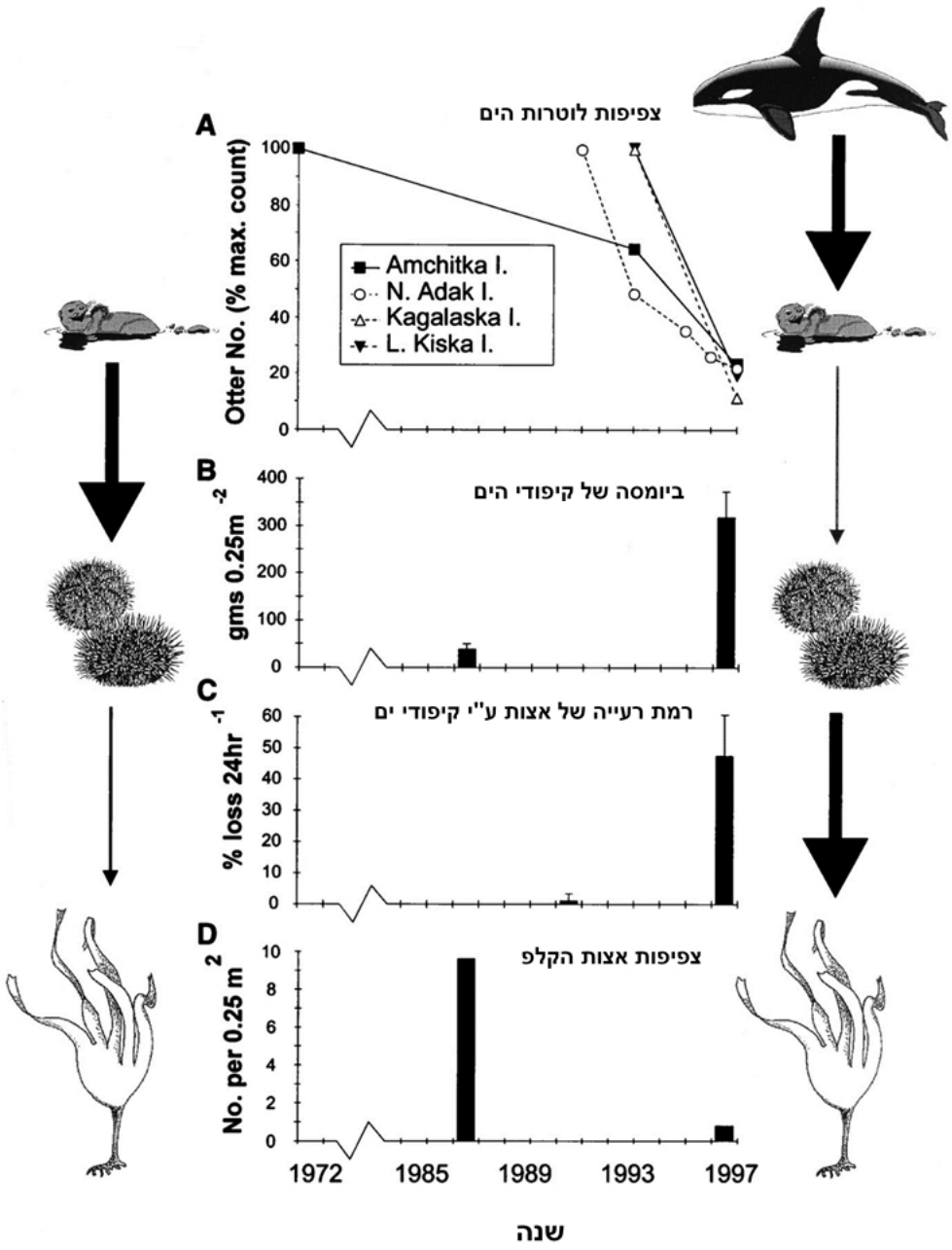
ובכך, טוענים המדענים, היא מאפשרת את קיומן של אצות הקלף הגדולות, שהן **אורגניזם המסד** של בית גידול זה - מספק התשתית הפיסית והמזון העיקרי בבית הגידול. קיפודי הים הינם צמחוניים, ומזונם העיקרי הוא אצות הקלף. הם מכרסמים את האצות בבסיסם, ואם כמות הקיפודים רבה מדי הם גורמים לניתוק האצה מבסיסה וסחיפתה מן המקום על ידי הזרמים. טריפת הקיפודים על ידי הלוטרה שומרת על אוכלוסייתם ברמה נמוכה יחסית המאפשרת את קיום יער הקלף (איור 6), משמע - לוטרת הים היא מין מפתח במערכת אקולוגית זו.

במשך עשרות שנים, עד למחצית המאה העשרים בערך, התנהל ציד נרחב של **לוטרות ים** בשל פרוותן היפה. אוכלוסיותיה הצטמצמו עד כדי כך שבמקומות רבים כבר נעלמו לחלוטין. כתוצאה מכך, גדלו מאוד אוכלוסיות קיפודי הים והם הכחידו אזורים נרחבים של יערות קלף. הקלף עצמו משמש לצרכי אדם: בני האדם קוצרים את צמרות האצות ומפיקים מהאצה מצרכים לתעשיות המזון והתרופות. אם כך, העלמות יערות הקלף פוגעת לא רק באקוסיסטמה זו ובענפי הדייג הקשורים אליה, אלא גם בתעשיית הקלף.

בתחילת המאה ה-20 הוגדרו לוטרות הים כמין בסכנת הכחדה והצייד שלהן לפרוות למסחר, נאסר. איסור הצייד אפשר התאוששות איטית ואזורים רבים יושבו מחדש על ידי לוטרות בתחילת שנות ה-70', כמויות הקיפודים הצטמצמו עם הזמן ויערות הקלף התאוששו. אך לא היה זה סוף הסיפור. בסוף שנות ה-90, שמו לב החוקרים כי אוכלוסיות הלוטרות, בעיקר באזור האיים האלאוטיים שבצפון האוקיינוס השקט, שוב הצטמצמו ובעקבותיהם יערות הקלף במספר איים.

בעקבות עלייה במספר תצפיות של טריפת לוטרות על ידי ליוויתנים קטלנים נערך מחקר משווה בין אוכלוסיית לוטרות ים שחיה בלגונה סגורה, שמנעה כניסת קטלנים, לאוכלוסיית לוטרות במפרץ קולוק (Kuluk Bay), שם נצפתה נוכחות קטלנים. האוכלוסייה שחיה בלגונה הסגורה נשארה יציבה ואילו ואוכלוסיית הלוטרות במפרץ קולוק הצטמצמה ב 76% (איור 7). ליוויתנים קטלנים ניזונים בדרך כלל מאריות וכלבי ים, העשירים בשומן, אולם מאז שנות ה-70, תועדה קריסה של אוכלוסיות אריות הים ע"ש סטלר (Steller sea lion) ופוקת המפרץ (Harbor seal) באזור אלסקה, בשל דיג יתר של מיני דגים בים הפתוח. החוקרים אסטס (Estes) ועמיתיו ייחסו את השינוי בהתנהגות האכילה של ליוויתני הקטלן לקריסה של אוכלוסיות טרפם הרגיל. יש להדגיש כי בשל מיעוט השומן בלוטרות, יחסית לכלבי ואריות הים, הערך הקלורי שלהם נמוך יותר ומספר לוטרות הים שיצטרך ליוויתן קטלן לטרוף כדי לספק את כמות האנרגיה הדרושה לו, הוא גבוה ממספר כלבי ואריות הים שנהג לטרוף בשנה.

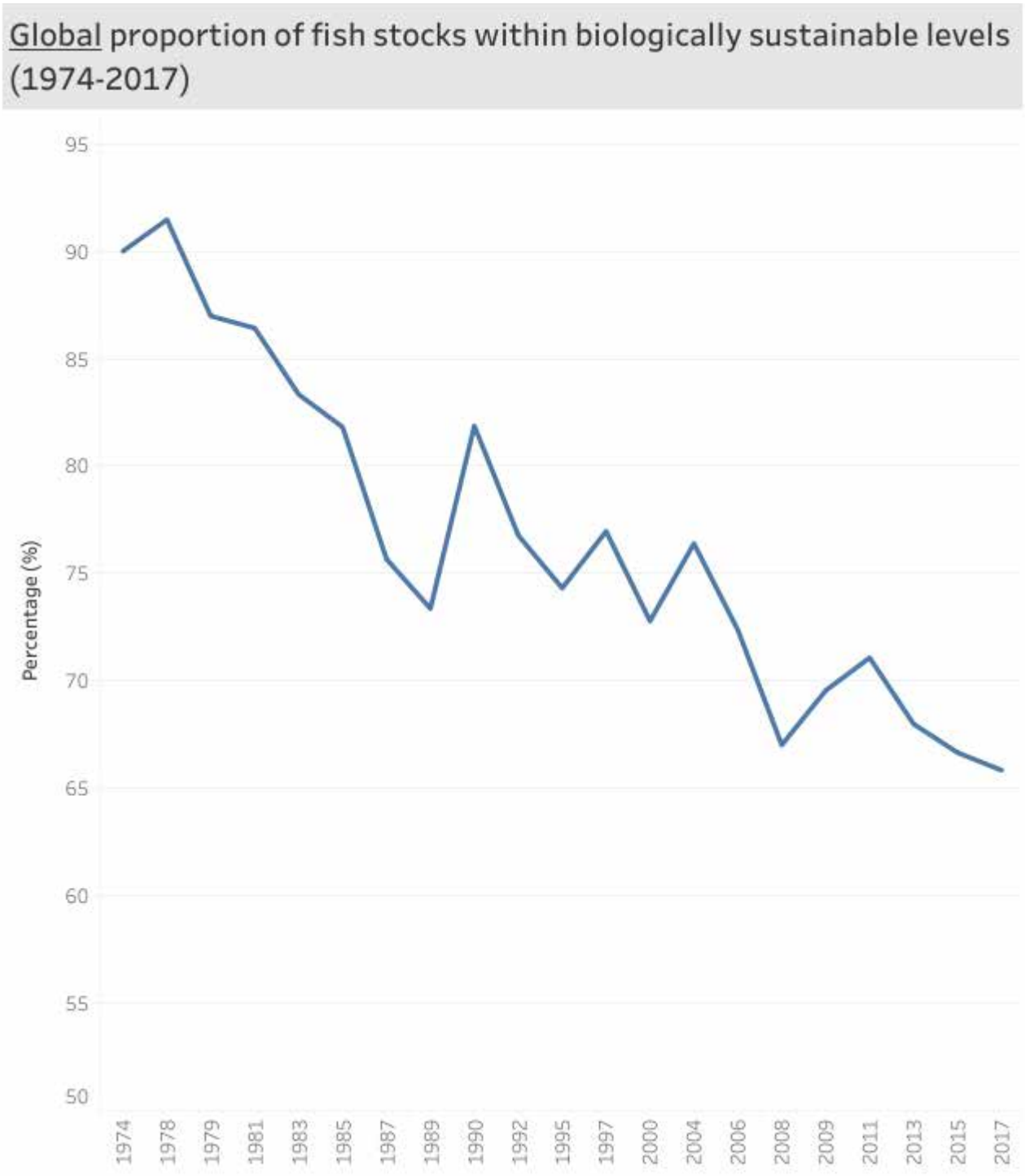
התרחיש המתואר מעלה ביערות הקלף הוא דוגמא למצב בו דיג-יתר של הטורפים במערכת אקולוגית, השפיע על כל הרמות הטרופיות במורד מארג המזון. תרחיש כזה נקרא **השתלשלות טרופית** (trophic cascade) - השפעת שינוי ברמת טרופית אחת על הרמות האחרות במארג המזון.



איור 7

(A) שינויים בצפיפות הלוטרות לאורך זמן במספר איים (עפ"י המקרא המרובע) בארכיפלג האלאוטי ושינויים מקבילים ב: (B) ביומסת קיפודי הים, (C) רמת הרעייה של אצות הקלפ על ידי קיפודי הים ו (D) צפיפות אצות הקלפ ביערות הקלפ באי Adak. שגיאה סטנדרטית מצויינת בקוי שגיאה בגרפים B ו-C.
בשולי הגרפים מאוירים תרחישי הסבר לשינויים במארג המזון: משמאל - תיאור שרשרת המזון לפני הירידה במספר הלוטרות ומימין - תיאור השינוי בשרשרת המזון עם כניסת הליוויתן הקטלן, כטורף על, למערכת האקולוגית. עובי החיצים מסמל את רמת האינטראקציה התזונתית

על פי נתוני ארגון המזון והחקלאות של האו"ם (FAO) לשנת 2017, כשליש מאוכלוסיות הדגים העולמיות נמצאות במצב של דיג-יתר (איור 8). הערכה זו מבוססת על מדד שנקרא **יבול מקסימאלי מקיים** (MSI - Maximum Sustainable Yield) - הגבול העליון לכמות הדגים שאנו יכולים לדוג מבלי לדלל את המשאב הקיים. מדד זה ייחודי לכל אוכלוסייה. אם קצב הדיג נמוך מהיבול המקסימאלי שחושב לאותה אוכלוסייה, האוכלוסייה תיחשב כבת-קיימא. אם קצב הדיג גבוה יותר, האוכלוסייה מוגדרת במצב של דיג-יתר. נכון לשנת 2015 מוערכות אוכלוסיות הדגים בנות-הקיימא בים התיכון ובים השחור רק ב-37.5%, לעומת 65.85% בממוצע העולמי.

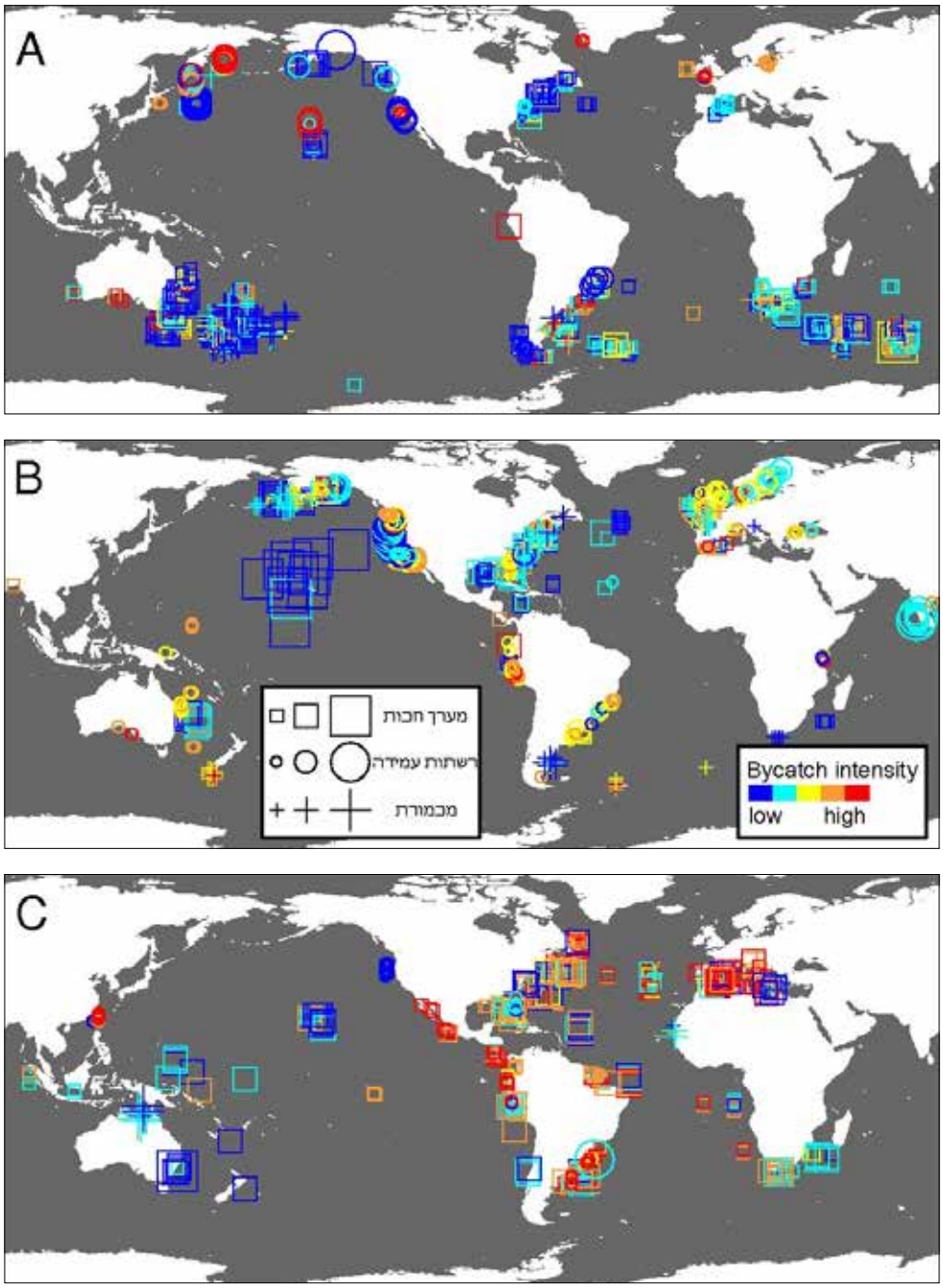


איור 8

אוכלוסיות הדגים ברות-הקיימא ירדו מ-90% בשנות השבעים, ל-66% בשנת 2017. שליש מאוכלוסיות הדגים בעולם נידוגות יתר על המידה (FAO)

דיג מכוון של מינים מסחריים הוא לא הגורם היחיד שגורם להתדלדלות אוכלוסיות ימיות. רוב שיטות הדיג אינן בררניות, ובענפי דיג רבים, נלכדים ביחד עם שלל המטרה, יצורים רבים נוספים חסרי ערך כלכלי, רובם מתים או פצועים. שלל לא מכוון זה נקרא '**שלל לוואי**'. לעיתים, שלל הלוואי אף יכול לעלות על שלל המטרה מבחינה מספרית או משקלית. שלל הלוואי כולל את כל המינים שאינם מיני המטרה וכן פרטים ממין המטרה, שגודלם נופל מן הגודל הרצוי מבחינה כלכלית. משמע, שלל הלוואי יכול להוביל לפגיעה ברבייה ולקריסת אוכלוסיות

שלל המטרה, לפגיעה במארג המזון, לפגיעה במינים מוגנים כמו דולפינים, צבי-ים ועופות (איור 9) ולפגיעה בבתי גידול, במקרים של גרירת רשתות דיג על קרקעית הים. בענפי הדיג השונים פותחו שיטות לצמצום שלל הלוואי, אך לא ניתן לבטל אותו כליל. שלל הלוואי העולמי מוערך כיום בכ-40% משלל הדיג.



איור 9

דירוג שלל הלוואי במקומות שונים בעולם, בין השנים 1990-2008, על פי שיטת הדיג:
(A) עופות ים
(B) יונקים ימיים
(C) צבי ים
(Lewison et al. 2014)

13.2 פלישות ביולוגיות של מינים אקזוטיים

דפנה בן-יוסף וגיל רילוב

תחום התפוצה הגיאוגרפי של מינים מוגבל על ידי מחסומים טבעיים דוגמת אוקיינוסים, מדבריות, רכסי הרים, נהרות ואזורים בהם מתקיימים תנאים שאינם מתאימים למחייתם. בנוסף לכך, יחסי גומלין עם מינים אחרים ובעיקר תחרות על אותם משאבים, מגבילים את תחום התפוצה של המינים השונים. צמחים, בעלי חיים ומיקרואורגניזמים ליוו את האדם למקומות שאליהם הוא נדד לאורך כל ההיסטוריה של המין האנושי. בדרך זו נעקפו פעמים רבות מחסומי התפוצה הטבעיים של המינים. **פלישות ביולוגיות** מתרחשות כאשר מין חדש נכנס לחברה אקולוגית בפעם הראשונה ומתרבה בה.

מין חדש יכול להיכנס לחברה בשתי דרכים: על ידי מעבר טבעי ממקום אחר או בעזרת האדם.

פלישות ביולוגיות טבעיות

שני מנגנוני הפצה יכולים לגרום למעברים טבעיים:

בראשון, מינים ימיים נודדים או נסחפים למקום חדש על ידי זרמי מים. אירוע כזה יכול להתרחש בשלב הפלנקטוני (ביצה, לרווה) או כפרטים צעירים או בוגרים על מצע הצף על פני המים. מצעים צפים יכולים להיות אצות, פיסות ובולי עץ או חומרים מעשי ידי אדם כמו נייר או פלסטיק. נדידת יצורים או היסחפותם למקומות חדשים מתרחשת בדרך כלל כתוצאה משינויים אקלימיים ומכונה **הרחבת טווח התפוצה** (Range Expansion). אירועים כאלו התרחשו באופן טבעי לאורך מאות מיליוני שנים ועדיין יכולים להתרחש בעת אירועים אקלימיים דרמטיים כמו אל-ניניו.

המנגנון השני הוא מעבר של אורגניזמים לאורך "מסדרונות" ימיים חדשים, כמו אלה הנוצרים כתוצאה מאירועים טקטוניים הפותחים מעברים חדשים בין אגני אוקיינוסים שונים.

פלישות ביולוגיות אנתרופוגניות

בניגוד קיצוני להרחבת טווח התפוצה הטבעי, מספק האדם במאות השנים האחרונות הזדמנויות למכביר למעבר של אורגניזמים ממקום למקום. פלישות שהן תוצאה של אירועים הקשורים לפעילות האדם נקראות **אינטרודוקציות** (**introductions**). מינים שהתבססו במקום חדש בו לא היו קיימים קודם לכן, נקראים **מינים אקזוטיים**. רק מעטים מבינהם מצליחים להתבסס, להתרבות ולהתפשט לאזורים נוספים. כאשר התפשטותם משנה את בית הגידול ומשפיעה על המינים המקומיים, הם מוגדרים כ**מינים פולשים** (invasive species).

אינטרודוקציה מתקדמת לרוב בארבעה שלבים עיקריים:

1. **שלב ההגעה (introduction)** - הזמן בו מין זר נצפה לראשונה בסביבה חדשה שאינה בית גידולו הטבעי, דוגמת האבנון המגושם שנצפה בישראל. הגעה יכולה להמשיך למצב של התבססות או להסתיים כאפיזודה חולפת.

2. **שלב ההתבססות (establishment)** - המין הזר מבסס אוכלוסייה המתרבה בבית הגידול.

3. **שלב ההתפשטות (spread)** - המין מתפשט מהאתר הראשוני לבתי גידול נוספים.

4. **שלב ההשפעה (effect)** - המין משפיע על הסביבה החדשה, משבש את האיזון האקולוגי ופוגע בתפקודו.

השלב הרביעי יכול להתרחש במקביל לשלב השני או השלישי. התפשטות מינים פולשים בסביבתם החדשה מלווה לרוב בהשפעות שליליות על האדם והסביבה. ככלל, השלבים הראשונים של הפלישה מתקדמים לאט, ואילו לאחר שלב ההתבססות, הפלישה מתקדמת בקצב מהיר.

מינים פולשים מהווים את הגורם השני בעוצמתו לפגיעה במגוון הביולוגי במערכת אקולוגית, מעצם היותם מתחרים, טורפים או טפילים של המינים המקומיים ולרוב גם מהעדר גורמי הבקרה הטבעיים של מינים אלו באזורי המוצא, שחסרים במערכת המקומית. חמור מכך, לעיתים המין הפולש משנה כליל את סביבתו הפיזית, ובכך גורם לדחיקה של המינים המקומיים. דוגמה למין פולש בעל השפעה כזו הוא הדג '**נסיכת הנילוס**' (*Lates niloticus*) אשר גרם להכחדה של עשרות מיני אמנונים באגם ויקטוריה ושינה את תנאי הסביבה.

במאה השנים האחרונות חלה עלייה דרמטית בהיקף ההתפשטות של מינים פולשים ונזקיהם, בעקבות עלייה בהיקף הסחר העולמי. שינויי האקלים צפויים להחמיר מגמה זו, מכיוון שהם עלולים להשפיע על העמידות של מינים מקומיים ובכך יאפשרו תנאים נוחים יותר לפלישה של מינים, כולל מזיקים קשים לחקלאות ונשאים של מחלות זיהומיות.

ישנן שלוש דרכים עיקריות בהן מעביר האדם יצורים ממקום למקום:

א) כלי שיט

ב) תעלות

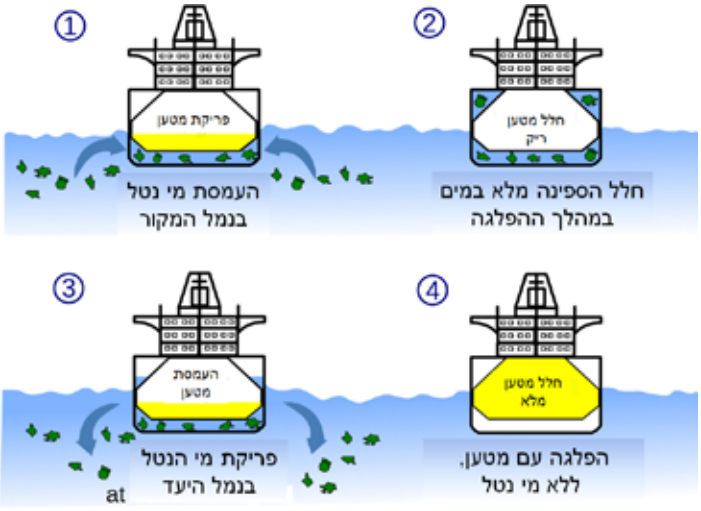
ג) חקלאות ימית, פיתיונות ומסחר ביצורי אקווריום.

אינטרודוקציה בכלי שיט

בעבר, עיקר המעברים התרחשו על ידי יצורים הנצמדים לדופני ספינות (**צמדת ים**) או חופרים בתוכם, וכך "תופסים טרמפ" מחוץ לחוף דרך מרחבי האוקיינוס. כיום עוברים אורגניזמים רבים גם ב**מי הנטל** (Ballast water) של ספינות. מי הנטל הנשאבים לספינה לצורך איזונה ותמרונה, עשויים להוות עד כדי 35% ממשקלה.

צמדת ים

חסרי חוליות ואצות היושבים על מצעים בסביבה מימית.



איור 10

(למעלה) **העברת מינים זרים על ידי מי נטל** (למטה) **מילוי התא בלרוות וביצים של מינים מקומיים בנמל המוצא (1) מי הנטל מאזנים את הספינה בעת ההפלגה ליעד אחר (2) פריקת מי הנטל כולל הלרוות והביצים של מינים זרים בנמל היעד (3) לצורך הטענת המטענים (4).** (מעובד מתוך Satir T. et al. 2011)

בעבר השתמשו בחומרים מוצקים לאיזון הספינות, אך במאה השנים האחרונות החליפו אותם המים. לפיכך, ספינה הפורקת סחורה בחוף מסוים ממלאת את מכלי מי הנטל שלה במים המקומיים בכדי לפצות על משקל הסחורה שנפרקה ולשמור בכך על יציבותה עד הגעתה לנמל חדש, לעיתים בצידו השני של האוקיינוס, להעמסה נוספת. בעת ההעמסה מחדש הן מרוקנות את מי הנטל אל הנמל ואיתם את כל "הנוסעים הסמויים", שמעבר לים (איור 10). אחד החוקרים החשובים של פלישות ביולוגיות ימיות, ג'יימס קרלטון (Carlton), חישב כי יותר מ-15,000 מינים יכולים לעבור במי נטל ברחבי העולם בכל שבוע. המזל הוא שרק מתי מעט מהם שורדים את המסע. מבין השורדים, רק אחדים מצליחים להתבסס בצורה מוצלחת בביתם החדש–אלה שהתנאים מתאימים לגידולם ורבייתם–אך למעטים אלה עשויה להיות השפעה מכרעת על הרכבם של חברות אקולוגיות.

ההשפעה האקולוגית של מינים פולשים רבים יכולה להיות רחבה, וכך גם השפעתם על האדם עצמו. דוגמאות יבשתיות לא חסרות: חיידקים ווירוסים גורמי מחלות שהתפשטו בין היבשות, יתושים (לדוגמא, יתוש קדחת הנילוס שהגיע גם לאמריקה), צמחים טפילים, ואלפי בעלי חיים. אחת הדוגמאות העצובות הינה "הפלישה הגדולה" לאיי הוואי. איים אלה מצויים במרכז האוקיינוס השקט, רחוקים אלפי קילומטרים מכל יבשה אחרת. בשל ניתוק זה התפתחו שם לאורך האבולוציה מאות

מין אנדמי

מין ביולוגי בעל תפוצה המוגבלת אך ורק לאזור מצומצם.

מינים ייחודיים שאינם מצויים בשום מקום אחר על פני כדור הארץ (**מינים אנדמיים**). בני האדם שהתקיימו שם במשך מאות שנים חיו עם הטבע בהרמוניה יחסית, אך עם הגעת אנשי המערב ואיתם מיני בעלי חיים וצמחים מתורבתים וכן מחלות רבות, השתנתה החברה האקולוגית שם ללא הכר. מינים רבים נכחדו בשל העובדה שהם חסרו את המנגנונים האקולוגים להתמודדות עם האורחים הבלתי קרואים. נחש העצים החום, נמלת האש האדומה, מזיקים חקלאיים ומיני צמחים רבים דחקו את רגלי המינים המקומיים על ידי טריפה או תחרות.

גם בים לא חסרות דוגמאות לנזקים אקולוגיים וכלכליים חמורים של פלישות ביולוגיות דרך מי נטל. אחת הדוגמאות הבולטות היא זו של **צדפת הזברה** (*Dreissena polymorpha*), מין אירופאי של צדפת מים מתוקים. באמצע שנות השמונים של המאה העשרים פרקה מכלית שהגיעה מהים הכספי את מי הנטל שלה באגמים הגדולים של אמריקה, ובכך שיחררה את צדפת הזברה ליבשת הרחוקה. הצדפה הפולשת התגלתה לראשונה בשנת 1988 באגם סנט קלייר ומאז התפשטה למקווי מים רבים ברחבי אמריקה (איור 11). כיום מכסה צדפת הזברה כל חלקה טובה ברבים ממקווי המים כולל כ-140 מינים מקומיים אותם היא חונקת ומאיימת בכך על קיומם. היא גם גורמת לנזק של מיליארדי דולרים לתעשיות סביב מקווי המים המתוקים בחוסמה את צינורות קירור שלהם.

איור 11

הפלישה של צדפת הזברה באמריקה הצפונית. (למעלה) **מסומנים באדום - האזורים בהם התפשטה הצדפה עד לשנת 2018** (Oklahoma Wildlife of Department Conservation). (למטה) **ניתן לראות כיצד היא מכסה עצמים ומינים מקומיים עד כדי חנק** (NOAA)

איור 12

מסרקנית זהרורית (*Mnemiopsis leidyi*) (דני ברחנא, מדריך החי והצומח בים התיכון, פוצקר)

דוגמא נוספת מין שנראה תמים למראה, מדוזת המסרק הקטנה והבלתי מזיקה **מסרקנית ליידי** (*Mnemiopsis leidyi*) (איור 12), הגיעה ב-1982 לים השחור מאמריקה במי נטל של ספינה, ויצרה אוכלוסיות אדירות במקום. מין זה יצר שתי בעיות גדולות, הראשונה קשורה לתזונתו. מין זה ניזון על זואופלנקטון הכולל גם את דגיגוני האנשובי וגם את המזון שלהם. כשהגיעו אוכלוסיות המסרקנית למיליארדים רבים, חיסלו המדוזות את רוב דגיגוני האנשובי ומזונם וכמעט גרמו לקריסת תעשיית דיג האנשובי במקום. בין השנים 1988 ו-1990 הייתה ירידה של 85% בשלל הדייג בחוף הטורקי של הים השחור, והנזק נאמד ב-250 מיליון דולר. בנוסף לכך, הופעתן של המדוזות עונתית וכאשר הן מתות בהמוניהן הן שוקעות לים ומפורקות על ידי חיידקים הצורכים כמויות אדירות של חמצן. בכך יכולות המדוזות המתות לגרום ליצירת אזורים שלמים שבהם ריכוז החמצן נמוך מדי לקיום יצורים רבים. כיום מהווה המסרקנית עד 95% ממשקל כלל החי בים השחור. בעשור האחרון היא התפשטה גם למזרח הים התיכון. הימצאות המסרקנית באזורנו מצביעה על יכולת ההסתגלות שלה למגוון רחב של תנאים סביבתיים. בים התיכון מגוון מינים גבוה יותר מאשר בים השחור או הבלטי ולכן סביר שהנזקים למערכת יהיו קטנים יותר, אך אין ספק שהוספת טורף למארג המזון המקומי עלולה להפר את האיזון האקולוגי.

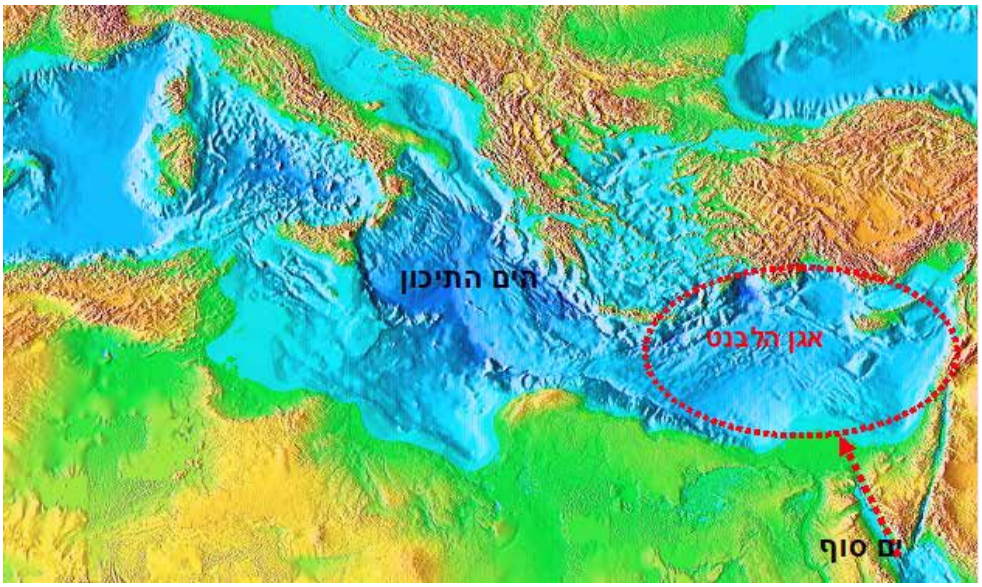
כאמור, מי נטל מהווים היום את הערוץ המרכזי למעבר של אורגניזמים ימים ממקום למקום. ראינו גם כי הנזקים של חלק מין המינים יכול להגיע למיליוני דולרים.

מה ניתן לעשות בכדי לצמצם את התופעה?

ישנן מספר דרכים לטפל בכך. הראשונה היא ריקון מי הנטל שנאספו בחוף, בים הפתוח ומילוי הספינה במים משם. הסיכוי של המינים החופיים לשרוד בים הפתוח נמוך ומי האוקיינוס שיאספו בים הפתוח כוללים כמות יצורים קטנה יותר, שסיכוי הישרדותם בחוף קטנה. הסיכון בשיטה זו גובר בזמנים של ים סוער, שבהם יציבותה של הספינה קריטית. במדינות מסוימות, כדוגמת ניו-זילנד, כבר מחויבות ספינות המגיעות מעבר לים לעשות החלפת מים לפני הגיען למימי החופין. עם זאת, קיימת בעיה של פיקוח על הספינות, על מנת לוודא שהן אכן מחליפות את המים. לשם כך יש לעשות אנליזה של איכות המים ולבחון אם אלה מים חופיים או מים של ים פתוח. רעיונות אחרים מדברים על עיקור של מי הנטל, בין היתר בעזרת סינון, הקרנה באולטרא סגול (UV), חימום ועוד. כל אלו מצריכים כמובן בנית תשתית שעולה כסף רב, בו נוטות ממשלות לחייב את תעשיית הספנות. התעשייה, מצידה, מנהלת מלחמה קשה כנגד חקיקה בנושא ונגד הפעלת שיטות אלה.

איור 13

תעלת סואץ (INSS)



איור 14

הגירה לספסית. החץ מראה את הכוון העיקרי של מעבר יצורים מים סוף (הממלכה הזואוגאורפית של האוקינוס השקט) לים תיכון (הממלכה האטלנטית). עיקר ההתנחלות של מינים ים סופיים מתרחש באגן הלבנט, אך מספר יצורים הגיעו גם רחוק יותר, עד לסיציליה

אינטרודוקציה דרך תעלות

גורם נוסף האחראי על פלישות ימיות הוא תעלות מעשה ידי אדם בין אגנים אוקיינים. כך, הווקטור העיקרי לפלישות ביולוגיות בים תיכון הוא מעבר של יצורים מים סוף דרך תעלת סואץ (איור 13). תעלה זו נחפרה במשך עשר שנים בכדי לקצר את הדרך לאוניות השטות מאסיה לאירופה ונפתחה לתנועה בשנת 1869. אך לא רק ספינות יכולות לעבור מים סוף לים תיכון בדרך זו. היום ידועים כמה מאות מינים של בעלי חיים וצמחים שעשו דרך זו גם הם (איור 14). תהליך זה של מעבר יצורים מים סוף לים תיכון נקרא **הגירה לספסית** על שם הדיפלומט והמהנדס הצרפתי פרדיננד מרי דה-לספס, שתכנן את התעלה ופיקח על כרייתה. התעלה מחברת למעשה בין **הממלכה הזואוגיאוגרפית האטלנטית** ל**ממלכת האוקיינוס ההודי והשקט**, כלומר, מפגישה מינים שלעולם לא היו נפגשים בדרך טבעית.

ממלכות זואו-גיאוגרפיות

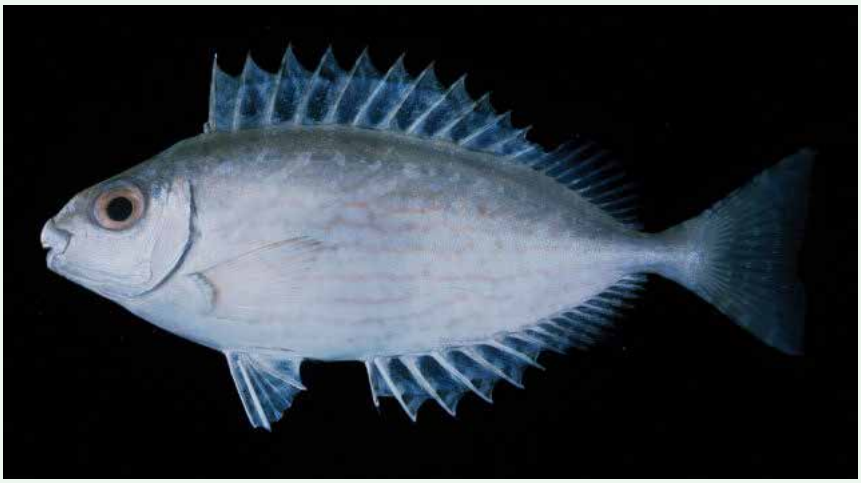
מעניין לציין את הרקע הגאולוגי של האזור: הקשר בין שתי הממלכות הזואו-גאוגרפיות של האוקיינוס האטלנטי והאוקיינוס ההודי היה קיים בתקופות קדומות כאשר הים התיכון היה חלק מ**ימת תטיס**, שחיברה בין האוקיינוס ההודי לזה האטלנטי. כתוצאה מתנועת הלוחות הטקטוניים ניתק תחילה הקשר עם האוקיינוס האטלנטי, והים התיכון נכבש בעיקר על ידי מינים טרופיים. מאוחר יותר נסגר גם הקשר לים סוף והים התיכון הפך מלוח ורדוד (ויש הטוענים כי התייבש לחלוטין). כאשר נפתח מיצר גיברלטר, לפני כ-6.5 מיליון שנה, חדרו מימיו של האוקיינוס האטלנטי לים התיכון ואיתם יצורי מים המותאמים לאקלים ממוזג, אך מאז ועד היום נישות אקולוגיות רבות נותרו פתוחות, בעיקר באגן המזרחי. למשל, מיני דגים צמחוניים שחסרים לרוב במים ממוזגים היו חסרים בחופי ישראל עד לחדירת מינים ים סופיים כדוגמת דג **הסיכן המשויש** (איור 15). הים התיכון עני בשל כך במינים לעומת האוקיינוסים, והאגן המזרחי (אגן הלבנט) של הים התיכון עני עוד יותר אפילו, יחסית לאגן המערבי של הים. זאת גם בשל המרחק מן האוקיינוס האטלנטי. עוני יחסי זה במינים במזרח הים התיכון וקיומן של נישות רבות פתוחות, הם כנראה מה שהפך את האזור ל"מושך" כל כך למינים פולשים מים סוף.

באופן עקרוני מעריכים החוקרים כי למינים הטרופים של ים סוף יש במקרים רבים יתרון תחרותי על פני המינים האטלנטיים המצויים בלבנט מכיוון שהם מורגלים יותר לתנאי הטמפרטורות והמליחות הגבוהים השוררים בלבנט וכך הם דוחקים למעשה מינים מקומיים שמקורם באטלנטי.

חשוב לציין כי באגן המזרחי של הים התיכון יש בכל זאת מגבלות לקיומם של חלק מהיצורים הקיימים בים סוף. דוגמא בולטת לכך היא של אלמוגים בוני שונית. התנאים הסביבתיים הדרושים לקיומם של אלה מאוד ספציפיים וביניהם צלילות וטמפרטורות שאינן יורדות מ-19 מעלות צלזיוס. עכירות המים והטמפרטורות שיורדות בחורף עד ל-17 ואפילו 16 מעלות בים התיכון, לא מאפשרות קיומם של אלמוגים **בוני שונית**. אך אם במסגרת ההתחממות הכוללת של כדור הארץ יעלו הטמפרטורות בלבנט מעל לטמפרטורות המינימום שצוינו, מי ידע לאן יתפתחו הדברים?

ים תטיס

(Tethys sea) היה ים קדום, אוקיינוס גדול שכיסה את דרום אירופה של היום. המדענים גורסים שים תטיס הפריד בין היבשות גונדוונה ולאוראסיה יבשות עתיקות שהתפצלו בעידן היורה מהיבשת הקדומה פנגיאה. בהמשך זזו היבשות והתקרבו זה לזה וים תטיס עצמו הלך ונעלם. מים תטיס נשארו שרידים בצורת ימים שאנו מכירים, כמו הים התיכון, הים והים השחור הכספי.

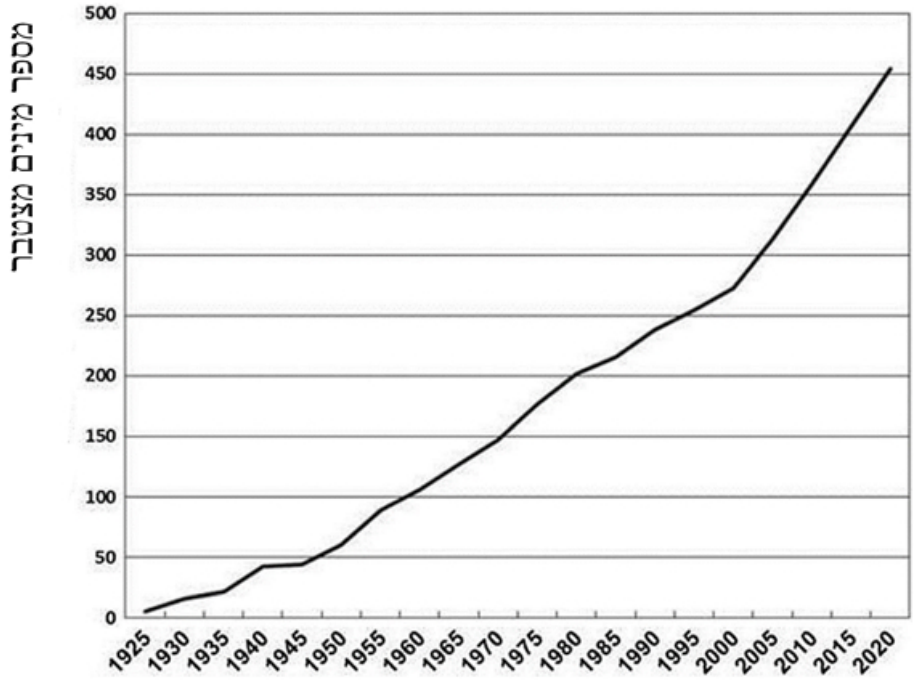


איור 15

סיכן משויש (*Siganus rivulatus*), **מין פולש שמקורו באוקיינוס ההודי** (זווית)

להגירה הלספסית השפעה מכרעת על הביולוגיה והאקולוגיה של מזרח הים התיכון, וכן גם על האדם עצמו. במאה השנה האחרונות מספר המינים שמקורם מים סוף והיגרו לים התיכון דרך תעלת סואץ הולך ועולה (איור 16). מתוך 452 המינים המהגרים שתועדו ב-2020 לאורך החוף המזרחי של הים התיכון, כ-90% הם מהגרים מים סוף. הסיבה לכך היא כפי הנראה העלייה בטמפרטורת מי הים בדרום מזרח הים התיכון (טמפרטורת המים עלתה ביותר מ-3 מעלות ב-30 השנים האחרונות). התחממות זו גורמת להעלמות מינים מקומיים ומפנה נישות אקולוגיות לחדירה והתבססות של מינים מהגרים. גורם אפשרי נוסף לעלייה במספר מינים המהגרים בשנים האחרונות הוא הרחבתה של תעלת סואץ בשנת 2015. מדובר בפרויקט החפירה הגדול ביותר שידע העולם בשנים האחרונות, שבמסגרתו נחפרו קרוב ל-250 מיליון מטרים מעוקבים. העבודות כללו חפירה של תעלה חדשה באורך 32 קילומטר במקביל לתעלה הקיימת, שאורכה 164 קילומטר, והרחבה והעמקה של 37 קילומטר נוספים. ההרחבה נועדה לאפשר תנועה דו-סטרית בקטעים ארוכים יותר של התעלה, לקצר את זמן המעבר בתעלה לחצי ולאפשר מעבר של ספינות גדולות יותר. הרחבה זו פתחה פתח למעבר נרחב יותר של מינים גם בשל תנועה מוגברת של מכולות גדולות הנושאות איתן מינים פולשים במי הנטל.

רוב המינים המהגרים מתעלת סואץ הם ממערכת הרכיכות, דגים, סרטנים ומאקרו-אצות. לחלק גדול מהמינים שנכנסו לים תיכון כבר בשנות ה-60, יש כיום אוכלוסיות מבוססות.



איור 16

מספר המינים המהגרים המצטבר לאורך חופי הים התיכון בשנים 1920-2020
(עובד מתוך Galil et al. ,2020)

איור 17

תפוצת מיני-דגים פולשים בים התיכון ומקורם. (מימין למעלה) **מספר המינים הפולשים.** (משמאל למטה) **מקורם: סגול - ים סוף, כחול - מי נטל של ספינות, ירוק - חקלאות ימית, אפור - מקור אחר.** (רוטשילד א. 2018)

מינים פולשים מהווים את אחד מהאיומים המרכזיים לשמירה על מגוון הביולוגי בים תיכון. השתלטות ודומיננטיות של כמה מהמינים וכן פגיעה במבנה בתי הגידול, מורידה את המגוון ופוגעת בעמידות המערכת האקולוגית ותפקודה. באיור 17 ניתן לראות שבמזרח התיכון מספר מיני הדגים הפולשים הגבוה ביותר (באדום). פלישת מינים לים תיכון מתרחשת לא רק מהאוקיינוס ההודי, אלא גם מהאוקיינוס האטלנטי, אם במי נטל של ספינות או כתוצאה של שחרור מינים מאקווריומים ועוד.

אחת הדוגמאות מן העשורים האחרונים היא זו של הצדפה המהגרת **בוצית ים-סופית** (*Brachidontes pharaonis*) החיה בעיקר באזור הכרית (גאות ושפל). הצדפה נראתה לראשונה בחופי הים התיכון רק שבע שנים לאחר פתיחת התעלה, אך בניגוד לצדפת הזברה צדפה באמריקה שיצרה מיד אוכלוסיות אדירות, נשארה הבוצית נדירה יחסית בחופי ישראל במשך יותר ממאה שנה, בעוד שמרבדים שלה הופיעו בסיציליה הרחוקה כבר בשנות השישים. בתחילת שנות התשעים הבוצית המהגרת השתלטה לחלוטין על רבות מ**טבלאות הגידוד** לאורך החוף הים תיכוני של ישראל, כמו באכזיב ובת ים ודחקה את המין המקומי **בוצית קטנה** (*Mytilaster minimus*), החי בעיקר על סלעי החוף (איור 18).

חלק מהמינים הפולשים הם בעלי ערך מסחרי גבוה ולכן תורמים לענף הדיג כמו למשל דג מולית הפסים (ברבוניה, *Mullus surmuletus*) שמקורו באוקיינוס

איור 18

(משמאל) **מרבדי בוצית ים-סופית** (*Brachidontes pharaonic*) (Israel's Nature Site) (מימין) **בוצית קטנה** (*Mytilaster minimus*) (idscaro)

איור 19

(מימין) **מולית הפסים** (משמאל) **חסילון יפני** (שבי רוטמן, מדריך החי והצומח בים התיכון, פוצקר)

ההודי שהפך לדג מאכל נפוץ ומבוקש בים תיכון, חסילון קריסטל (חסילון יפני, *Marsupenaeus japonicus*) (איור 19) והסיכן המשוייש.

מינים אחרים הם ארסיים ומסוכנים, כגון הזהרון ההדור (*Pterois miles*) והשפמית הארסית (*Plotosus lineatus*) (איור 20) התופסת חלק משמעותי משלל המכמורת אך אינה בעל ערך מסחרי. לשפמיות קוצים ארסיים הגורמים לפגיעה קשה. הן שוחות לרוב בלהקות מלוכדות באזורים רדודים, חוליים וסלעיים, ומסכנות מתרחצים ודייגים. בגלל הנזקים שהדג גורם לדייגים, הוא זכה לכינוי 'נסראללה'.

פולש מזיק נוסף היא מדוזת הסוכך חוטית נודדת (*Rhopilema nomadica*). מדוזה גדולה זו (60-80 ס"מ קוטר פעמון) נתגלתה לראשונה בחופי ישראל בשנת 1977. מאז ביססה המדוזה אוכלוסיות עצומות היוצרות בכל קיץ נחילים של מיליוני מדוזות הנסחפות אל החוף וכתוצאה מכך הופכת הרחצה בים לבלתי נעימה, אם לא בלתי אפשרית, ברבים מימי הקיץ. הסיבה לכך היא כי מדוזות רבות מתות ומתפרקות בסמוך לחוף, אך חלקי גופן עדיין מכילים תאים צורבים (נמטוציסטים) פעילים הפוגעים במתרחצים, צריבה שלעיתים יכולה להיות כואבת ביותר. חשוב לציין כי יש הטוענים כי למרות שמדוזה זו הינה מדוזה של האוקיינוס ההודי

איור 20

(מימין) **הדג הפולש שפמית ארסית מכונה על ידי הדייגים "נסראללה" עקב פגיעתו הרעה בציוד הדיג ובשלל הדיג** (דני ברחנא) (משמאל) **זהרון הדור, פולש בעל פוטנציאל נזק גדול, שחדר לים תיכון מהאוקיאנוס ההודי** (עמית אלסר)

במקורה, יתכן והפרטים הראשונים הגיעו דווקא במי נטל ולא דרך תעלת סואץ. בשנים האחרונות, בשל שיבוש באיזון המערכת האקולוגית בים תיכון, מתרחשת לעיתים התפרצות באוכלוסיית המדוזות, הגורמת לסתימה במסננים של תחנות הכוח וההתפלה ולפגיעה בפעילותן השוטפת (איור21).

אינטרודוקציה במעבר מוצרי חקלאות ימית ומסחר באקווריום

מסחר ב**מוצרי חקלאות ימית** הוא וקטור חשוב לפלישת מינים ימיים. משלוחים של פרטים חיים של סרטנים, צדפות, דגים ויצורים אחרים נעשים לעיתים על מצע של אצות שכולל בתוכו לעיתים מינים נוספים של בעלי חיים וצמחים. "טרמפיסטים" אלה עלולים להגיע אל הים בעת הפריקה, בצידה השני של היבשת או מעבר לים ולחדור כך למערכת אקולוגית חדשה.

גם **מסחר ביצורי אקווריום** מגביר פלישה של מינים אקזוטיים, אם בתצוגות של אקווריומים השוכנים לחוף הים ומשחררים לרוות לסביבה בתהליך שאיבת מים או ניקיון, או חובבי אקווריום שמאסו בתחביבם משחררים לעיתים את היצורים שבאקווריום ישירות אל הים.

דוגמא למקרה כזה היא האצה **שלוחית רעילה** (*Caulerpa taxifolia*) שהינה אצה פופולרית מאוד בקרב חובבי האקווריום ברחבי העולם. זהו מין טרופי בעל צבע ירוק עז המעניק חזות רעננה לאקווריום. הזן שפותח לתעשיית האקווריום שונה ממין הפרא בכך שהוא גדול יותר, גדל בקצב רב יותר, גם בטמפרטורות נמוכות

נמטוציסט

תא צורב המשמש להגנה ולתפיסת טרף וקיים בכל הפרטים במערכת הצורבים. זהו אחד התאים המורכבים ביותר בבעלי חיים, המסוגל לשגר צינורית ארס לעבר יצור סמוך ולהזריק לתוכו ארס. התאים הצורבים נמצאים ברקמת האפידרמיס של הצורב וכאשר התא מגורה, הוא משגר את צינורית הארס שלו אל המטרה.

איור 21

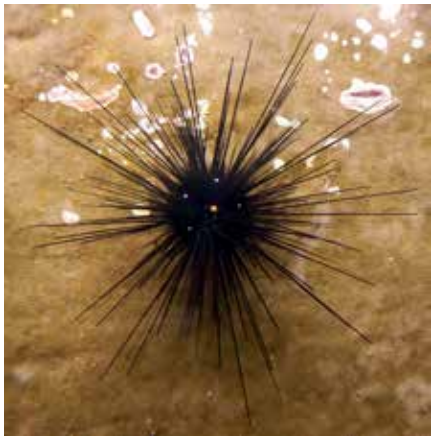
(מימין למטה) **המדוזה חוטית נודדת** (*Rhopilema nomadica*) (שבי רוטמן). (משמאל) **פינוי מדוזות ממסנני משאבות מי קירור של חברת חשמל** (רוטשילד, 2018)

איור 22

האצה הפולשת שלוחית רעילה (*Caulerpa taxifolia*)

יחסית לאלה הקיימות באזורים טרופים ויכול להתרבות רבייה אל-מינית מחתיכות שהתפרקו מצמח האם. רקמות האצה מכילות רעלן ההופך אותה לבלתי אכילה למרבית יצורי הים. גם באקווריום הגדול של מונקו השתמשו בשלוחית לקישוט התצוגות. בשנת 1984 גילה צוללן כמה צמחי שלוחית שהתבססו בקרקעית החולית בקרבת האקווריום הגדול. המסקנה היתה ברורה: באופן כלשהו, כנראה בעת ריקון אחד המכלים באקווריום אל הים, נשפכו עם המים גם כמה ענפי שלוחית. במהרה התכסו קילומטרים רבועים רבים לאורך חופי צרפת וספרד, ולאחר מכן נמצאה גם בחופי קליפורניה ובדרום אוסטרליה. השלוחית מכסה שטחי קרקעית חולית ושטחים המכוסים בעשב ים ובכך דוחקת מיני מסד מקומיים ו[משנה כליל את בית הגידול] (איור 22). באזורים בהם יצרה השלוחית מרבדים נרחבים נעלמו מינים מקומיים רבים של דגים וחסרי חוליות. היה חשש גדול שתגיע גם לחופי ישראל אך בסופו של דבר החשש לא התממש, יתכן שבשל פעילות רעייה מוגברת של דגים פולשים כגון הסיכנים.

מין פולש נוסף שחדר לים תיכון בעשור האחרון הוא קיפוד הים מהמין **נזרית ארוכת הקוצים** (*Diadema setosum*). קוציו של קיפוד הים השחור ארוכים וחדים (איור 23). דקירתו מכאיבה וביכולתה להוביל להתפתחות דלקת בשל הרעלנים המצויים על קוציו ובמי הים, ואף על פי שאינם קטלניים לבני אדם עדיין גורמים להתנפחות ואדמומיות מקומית. המין נצפה לראשונה בטורקיה ב-2009 והחל מ-2017 נצפה גם בחופי ישראל. [השערת החוקרים] היא שהוא הגיע לשם באופן אקטיבי על ידי בני אדם: אם כלרווה (פגית) במי נטל בבטן ספינה שהגיעה מהים האדום דרך תעלת סואץ או ששוחרר לים התיכון לאחר שהוחזק באקווריומים לראווה.



איור 23

קיפוד הים השחור נזרית ארוכת קוצים (*Diadema setosum*) (Wikipedia)

מקור בעייתי נוסף לחדירה של מיני בר הוא **גידול דגים בכלובים בתוך הים.** כלובים בים נפרצים לעתים קרובות בעקבות הזנחה, חבלה או סערה וכך יוצאים המוני דגים מבויתים לחופשי. בנורבגיה, שבה פועלת תעשיית הסלמון הגדולה ביותר, נמלטים מדי שנה כחצי מיליון דגי סלמון וטרוטה ולעתים הרבה יותר;

בישראל הוחזקו כלובי הדגים הראשונים במפרץ אילת, שם גודלו דגי דניס (ספרוס) ולברק, אשר מקורם בים התיכון. באחד המקרים דווח על בריחת למעלה מ-150,000 דגים למפרץ בעקבות נזק חריג לכלוב; בשנת 2008 הועברו כלובי הדגים, לאחר מאבק ציבורי שטען לזיהום המפרץ והרס שונית האלמוגים, לנמל אשדוד (איור 24) וגם כאן תועדו מספר מקרים של בריחות של הדגים מהכלובים למימי הים התיכון. הסכנה שיכולה לנבוע מבריחת דגים מבויתים אלו היא הפצה של גורמי מחלות לזני הבר וגם השתלטות על נישות אקולוגיות של אוכלוסיות מקומיות. בנוסף, עשויים דגים הגדלים בכלובים על החוף להשתנות בעקבות שנים של ביות והכלאות ולהפר את המאזן האקולוגי בסביבת הגידול של הכלוב במקרה של בריחה.

איור 24

כלובי הדגים בנמל אשדוד (אקולוגיה וסביבה)

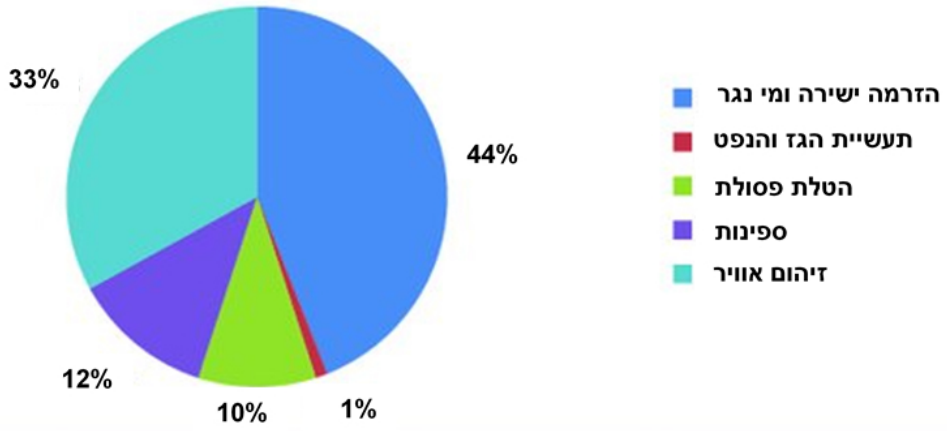
13.3 זיהום ים

מיה אלסר וגיל רילוב

ההגדרה המקובלת לזיהום ים היא זו המופיעה באמנת ברצלונה (1976) להגנה על הים התיכון מפני זיהום: "החדרה על ידי האדם, ישירות או בעקיפין, של חומר או אנרגיה אל הסביבה הימית, העלולים לגרום להשפעות מזיקות, כגון פגיעה בחי הימי, סיכון בריאות האדם, פגיעה בפעילות ימית כולל דיג, הפחתה של איכות מי הים והפרעה לכל שימוש באוצרות הים". היום, כאשר 75% מהמים המסופקים לבתים בישראל, הם מים מותפלים שמקורם מהים, עלינו לשים לב יותר מתמיד לשמירה על איכותם.

לזיהום בים מרכיבים רבים ושונים. מניתוח המקורות העיקריים לזיהום (איור 25), ניתן לראות כי עיקר הזיהום מקורו בהזרמה ישירה, מי נגר ובדיפוזיה מהאוויר. מלבד אלו, גם הטלת פסולת לים, מכלי שייט ותעשיית הגז והנפט מזהמים באופן קבוע את מי האוקיינוסים. בפרק זה נסקור את סוגי הזיהום העיקריים המשפיעים על החי הימי ועל האדם.

איור 25. ניתוח מקורות הזיהום העיקריים בים



מקור: Hondgan et al., 2019

סוגי המזהמים, מקורם והשפעתם על הסביבה הימית

נהוג לחלק את המזהמים לשמונה קבוצות עיקריות:

1. **נוטריינטים** - חומרי הזנה, הכוללים תרכובות זרחן (פוספטים) וחנקן (ניטרט, אמוניה). מקור הנוטריינטים בשפכים עירוניים ותעשייתיים, בפליטות תעשייתיות לאטמוספרה ובחקלאות (יבשתית וימית). העשרת הסביבה הימית בנוטריינטים (**אאוטרופיקציה** או **העשרת יתר**) עלולה לגרום לצמיחת יתר של אצות (איור 26) ולשינויים בחברת הפיטופלנקטון (החלפת מינים מסוימים במינים אחרים, לעיתים מזיקים).

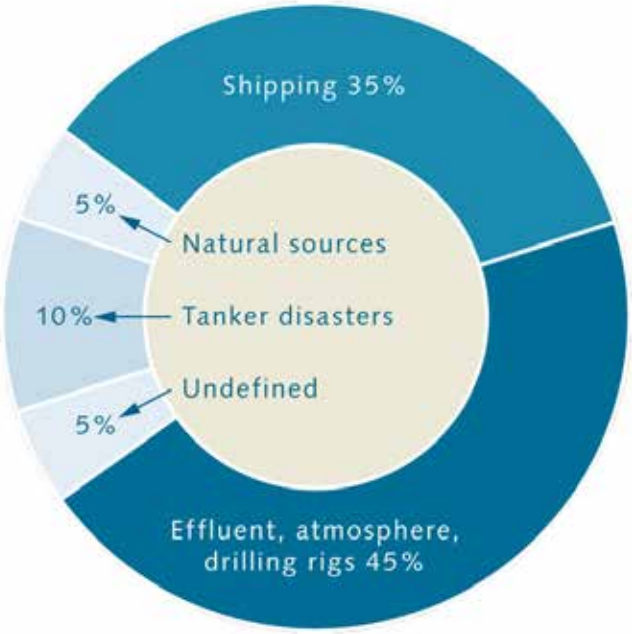
לעיתים האצות המתפתחות הינן רעילות ויכולות להצטבר בשרשרת המזון, כולל בשלל הדיג ולכן להיות מסוכנות גם לאדם. אצות רעילות מקבוצת ה**דינופלאגלטים** יוצרות לעיתים פריחות בצבע חום אדום המכונות בשם "**גאות אדומה**" (Red Tide). אצות אלו פולטות רעלנים והצטברות כמויות אדירות של **קצף דמוי ריר** המופרש מחילוקיות (אצות מיקרוסקופיות שמצויות במי הים), כמו זה שנצפה באביב 2021 לחופי איסטנבול בים מרמרה. ברוב המקרים הריר עצמו אינו מזיק - הוא מורכב מחלבונים, פחמימות ושומן. אולם במקרים מסוימים, כשהאצות נמצאות במצוקה בעקבות התחממות או שינויים בריכוזי חומרי ההזנה, החומר הרירי מצטבר בהדרגה בתאים שלהם, הן מפרישות יותר ריר לסביבתן וכשהן מתות - גם הריר שנותר בתאיהן מתפזר במים. הריר הדביק עשוי גם למשוך אליו נגיפים וחיידקים (ובהם אי-קולי) או להפוך למן שמיכה שחונקת את החיים הימיים שמתחתיו. אורגניזמים ישיבים כמו אלמוגים וספוגים, פגיעים יותר, מכיוון שהריר עוטף אותם ומונע מהם לנשום ולקלוט מהמים חומרים מזינים. במקרים של זיהום חמור בנוטריינטים, עלולה להגרם גם תמותת דגים המונית, בשל מחסור בחמצן במים.

איור 26

פריחת אצות במפרץ אילת, מרץ 2020.
(רד סי אילת)

2. **מתכות כבדות**, כגון כספית, קדמיום, עופרת וכרום. מקור המתכות בשפכים תעשייתיים, בפליטות תעשייתיות לאטמוספרה, בשריפת דלק ובמכרות. המתכות הכבדות הן רעילות ועלולות להצטבר בקרקעית הים ובשרשרת המזון, לגרום למחלות כרוניות ואף למוות. הריכוז ההתחלתי בים יכול להיות זניח אך הצמחים ואחריהם בעלי החיים הולכים ומרכזים אותם ברקמותיהם. סרטנים קטנים הניזונים מהפלנקטון הצמחי, הנפוצים ביותר במי האוקיאנוסים והימים מרכזים בגופם רעלים פי - 1,000 ויותר מריכוזם במים. הריכוז בדגים הניזונים על סרטנים גבוה אף יותר. תהליך זה של צבירת מזהמים במעלה שרשרת המזון נקרא "**הגברה ביולוגית**" (Bioaccumulation) והנפגעים העיקריים בו הם טורפי העל כמו כרישים ודולפינים. טורפי העל וביניהם האדם חשופים לריכוזי מתכות כבדות ושאר רעלים הגבוהים בהרבה מריכוזם ההתחלתי בים, הנצברים ברקמות ובאברים הפנימיים. ריכוזם של הרעלים עולה עם האורך, המשקל והגיל של טורפי העל, כשמעל ריכוזים מסוימים מתחילה פגיעה בתפקוד הנורמאלי של האורגניזמים שלא פעם מובילה לתוצאה ישירה או עקיפה של מוות. כספית למשל, הינה חומר רעיל ביותר ליצורים חיים. לכספית אין כל תפקיד ביולוגי בגוף החי ונוכחותה ברקמות (כמעט בכל ריכוז) היא בלתי רצויה ומסוכנת. כספית שמקורה בפעילות אדם קשורה בעיקר לפעילות חציבת כספית ולתעשייה (כדוגמת תעשיית הכלור-אלקלי והתעשייה הפטרוכימית). תרכובות כספית אנאורגאניות ממקור הזיהום עוברות באמצעות מתווכים (כמו מיקרואורגניזמים) למצב אורגני, ואז הן עלולות להצטבר בבעלי חיים באמצעות שרשרת המזון, ולפגוע במערכות חיוניות כמו: כבד, כליות, מערכת הרבייה, מערכת העצבים והמוח. אחד המקרים הידועים של הרעלת כספית התרחש ביפן לפני כמה עשרות שנים. דייגים כפריים נחשפו לריכוזים גבוהים של כספית שמקורה ממפעל כימי שהזרים את שפכיו לים. הכספית הצטברה בדגי המאכל עד לריכוזים גבוהים של עשרות מיליגרם לק"ג. הדייגים המקומיים אשר ניזונו מדגים על בסיס יומי, נפגעו ללא תקנה במערכת העצבים שלהם, רבים מתו בעוד אחרים נשארו נכים לכל החיים. (מחלת המינימוטה).

3. **נפט ותוצריו** - נכון לשנת 2010, 45% מזיהום הים בנפט ותוצריו מגיע מהזרמה ישירה של תעשיות פטרוכימיות ושפכים ביתיים ותעשייתיים, בדיפוזיה של תוצרי שריפת הנפט והדלק מהאטמוספירה ומאסדות קידוח; 35% מספנות, 10% מדליפות ומתאונות של מכליות נפט, 5% ממחצבים ו-5% נוספים ממקור לא ידוע (איור 27). הימצאות נפט ותוצריו בים עלולה לפגוע במגוון החי והצומח הימי עקב רעילותם והשינויים הסביבתיים שהם גורמים (כגון כיסוי המצע ובעלי החיים, חסימת מעבר אור אל מתחת לפני המים ועוד). כבר בריכוז נמוך מאוד מבחינים בהשפעותיו הרעילות - בהיותו ממיס שומנים, מסוגל הנפט לחדור לתאי הרקמות ולהרוס אותם. כמו כן חומרי הנפט המומסים במים פוגעים במערכת הנשימה של חסרי חוליות ודגים, מרעילים פגיות צעירות ומחסלים אוכלוסיות גדולות של חיידקים, החשובים לסביבה בכך שהם מפרקים באופן טבעי חומרים אורגנים מיותרים. זיהומי דלק מוכרים לציבור בעיקר בהקשר של אסונות ימיים כמו פיצוץ אסדת הנפט Deepwater Horizon במפרץ מקסיקו (2010) או מאסון הנפט במאוריציוס (2020) עקב עליית אוניית צובר על שרטון.



איור 27

דרכי זיהום הים בנפט ותוצריו.
(World Ocean Review)

כתמי הנפט הגדולים שנוצרו כתוצאה מאסונות אלה הגיעו למימי החופים ופגעו פגיעה קשה בחי ובצומח בחוף: מעופות ים ודגים ועד ליונקים ימיים וצדפות. מעבר לפגיעה האקולוגית הם גרמו לפגיעה קשה בענפי הדיג השונים לאורך החוף, וכמובן בפרנסת הדייגים. ברוב המקרים, הסביבה הימית והחופית הנפגעת מהזיהום משתקמת לאחר מספר שנים, תודות לפריקותו הביולוגית של הדלק (הדלק עובר פרוק כימי וכן פירוק ביולוגי על ידי בקטריות), אולם במקרה של הזיהום במפרץ מקסיקו, הוערך כי 10% (כ-40 מיליון ליטר) מהנפט שדלף, עדיין נמצא בקרקעית הים, גם 6 שנים לאחר האירוע ועדיין משפיע על המערכת האקולוגית במקום. מימדי הנזקים הנגרמים מזיהומי דלק אינם קשורים בהכרח לגודל הזיהום: כמות קטנה יחסית של דלק הפוגעת באזור בעל רגישות סביבתית או כלכלית גבוהה עלולה להיות הרסנית, בעוד שכמויות גדולות של דלק הנשפכות לים הפתוח ואינן פוגעות בחופים, עשויות להתפרק בתהליכים טבעיים ולהיעלם מבלי להותיר נזק.

אירוע הזפת לאורך חופי ישראל בפברואר 2021, גם הוא תוצר זיהום בנפט. הזפת הינה תוצאה של התמצקות נפט שנשפך לים. ישנן מספר דרכים להילחם בזיהומי דלק:

1. סכירת הדלק בעזרת "חוסמים צפים" ואיסופו מן הים בעזרת משאבות (יעילות השיטה מוגבלת ל-5-10% מהדלק הנשפך ובתנאי מזג אוויר קשים – עוד פחות)
2. שימוש בחומרים כימיים המפרקים ומפזרים את כתמי הדלק לטיפות זעירות השוקעות במים והופכות זמינות לתהליכי פירוק ביולוגי או כימי (חומרים אלה מרוססים ממטוסים או מכלי שיט)
3. פירוק ביולוגי בעזרת חיידקים מפרקי דלק (השימוש העיקרי נעשה בזיהום חופים). חיידקים מפרקי דלק קיימים כאמור בסביבה באופן טבעי אך פעילותם מצומצמת ויש לזרזה באמצעים מלאכותיים. השיטות לזירוז הפירוק בעזרת חיידקים נמצאות עדין בשלבי פיתוח בידי צוות חוקרים באוניברסיטת תל-אביב.

4. **חומרים אורגניים סינתטיים** - PCBs (ביפנילים עתירי כלור), PAHs (פחממנים פולי-ארומטים), חומרי הדברה (דוגמת DDT), דיאוקסין (חומר רעיל ביותר שהוא תוצר שריפה של חומרים מכילי כלור, מופיע גם בתעשיית הניר וה-PVC), חומרים המצויים בצבעים מונעים צמדת ים (דוגמת TBT) ורבים אחרים. מקורם של חומרים אלה בתעשייה או בסירות וספינות (במקרה של TBT), כאשר החדרתם לסביבה הימית נעשית באמצעות שפכים תעשייתיים וביתיים, כניסה אטמוספרית, הזרמה ישירות לים וכדומה. השפעותיהם הסביבתיות רבות: הם עלולים להצטבר בצורה כרונית בסביבה ובשרשרת המזון, לגרום לסרטן ולמחלות אחרות (חלקן גנטיות) ואף למוות.

בשנת 2004 התפרסם מאמר מקיף בעיתון Science על מזהמים אורגניים בדגי סלמון מחוות לגידול דגים ובדגים מהטבע באירופה, צפון ודרום אמריקה. הצריכה העולמית של סלמון מחקלאות ימית גדלה פי 40 בשני העשורים האחרונים והוא דג פופולרי בגלל טעמו הטוב והרמות הגבוהות של חומצות שומן אומגה-3 שנמצאות בו. המחקר מצא כי הדגים המגודלים בחוות מזוהמים יותר בחומרים אורגניים מאשר דגים שגדלו בטבע. המחברים מצאו כי מקור המזהמים הוא במזון אשר מאכילים בו את הדגים, המכיל כמות גדולה של שמן וקמח דגים, שמקורם בעיקר בדגים פלגיים קטנים המכילים את המזהמים. המסקנה העיקרית של המחברים, לאחר יישום שיטת ה EPA (סוכנות ההגנה על הסביבה) האמריקאי הייתה כי יש להגביל את הצריכה החודשית של סלמון מחקלאות ימית לעד מנה אחת (227 גר') לחודש בלבד, על אף התועלת הבריאותית שבאכילתם.

טריבוטילטין (או בקיצור TBT) הוא החומר הפעיל בצבעים המעכבים גידול של צמדת-ים על ספינות (antifouling). צבעים המכילים חומר זה יעילים במניעת התיישבות יצורים על דופן ספינות ולכן הפכו להיות פופולאריים ביותר בעשורים האחרונים של המאה ה-20. אלא, שהתברר כי ה-TBT משתחרר עם הזמן מתוך הצבע אל הסביבה הימית ופוגע ביצורים ימיים על קרקעית הים, בעיקר באזורים סגורים כמו נמלים, אפילו בריכוזים נמוכים ביותר. ב-1985 גילו בצרפת, כי בצדפות המאכל אויסטר גורם ה-TBT להתעבות הקונכייה על חשבון בשר הצדפה. מאז ואילך תוארו השפעות שלילות של TBT על מגוון רחב של אורגניזמים; ביניהם אצות, כוכבי ים, חלזונות, צדפות ודגים. ישנן עדויות כי הוא גם גורם לפגיעה במערכת החיסונית של יונקים ימיים ובכך מגביר את חשיפתם למחלות. בנקבות של חלזונות ממשפחת הארגמניים TBT גורם לעליה בריכוז הטסטוסטרון (הורמון המין הזכרי) ולכן לגידול של אברי מין זכריים (תופעה הנקראת **אימפוסקס**) ובמקרה של זיהום חמור - אף לעקרות. גודלו של איבר המין הזכרי המתפתח בנקבות ביחס לגודלו בזכרים משמש **סמן ביולוגי** (Bioindicator) לזיהום ב-TBT. קצב התפרקותו של ה-TBT איטי, ועל-כן הנזק הנגרם באזורים סגורים כמו נמלים, שם הוא נמצא בריכוזים גבוהים, חמור במיוחד. ישראל פועלת להפחתת השימוש בצבעים המכילים TBT ואוניות מודרניות אינן צבועות עוד בחומר זה.

5. **חיידקים ווירוסים** - כגון קולי צואתי, שמקורם בביוב לא מטופל. חיידקים אלה עלולים לעבור לאדם ישירות או דרך שרשרת המזון ולגרום למחלות זיהומיות. ישנם גם חיידקים ווירוסים הקיימים בים באופן טבעי אך שינויים בתנאי הים כתוצאה מפעילות האדם (לדוגמא, העשרת יתר) גורמים להתרבותם ולגרימת מחלות בבעלי חיים ימיים דוגמת דגים.

6. **פסולת מוצקה** - פסולת ימית מוצקה (Marine litter) מוגדרת באמנת ברצלונה להגנה על הים התיכון מפני זיהום כך: "כל חומר מוצק עמיד, מיוצר או מעובד (על-ידי האדם), אשר מושלך, מסולק או ננטש בסביבה הימית והחופית". הימצאותה של פסולת ימית נובעת ממספר גורמים: ניהול לוקה או חסר של פסולת מוצקה; צריכת יתר של מוצרים שאינם מתכלים; אובדן או השלכה של ציוד דיג ופסולת המיוצרת בכלי שיט; חוסר בתשתיות והיעדר מודעות של הציבור לתוצאות הפוטנציאליות של מעשיו. הנזקים של הפסולת הימית הם סביבתיים, כלכליים וחברתיים. פסולת ימית פוגעת בבעלי חיים הנתפסים בה או נחנקים ממנה, הורסת בתי גידול, ומגבירה את יכולת הנדידה של יצורים ימיים. כך היא חושפת סביבות חיים מרוחקות ומנותקות למינים פולשים, שבמצב טבעי לא היו יכולים להגיע אליהן. הפסולת פוגעת בכלי שיט, בשלל הדיג ובאמצעי דיג, בערך הכלכלי של חופי הרחצה ושל ענפי התיירות השונים המושפעים מהם, וכך פוגעת בחברות הנשענות על אותם ענפים .

פלסטיק מהווה כ-62.3% מכלל הפסולת הימית בעולם והיא רק צפויה לגדול מאוד מכיוון שהפלסטיק הוא חומר בעל פוטנציאל שרידות של מאות שנים. כמו כן - מדי שנה מיוצרת בעולם כמות פלסטיק הולכת וגדלה (היא מוערכת כיום במשקל כולל של כ-300 מיליון טונות), וכמחצית ממנה מושלכת לאחר שימוש יחיד. לנוכח ההבנה שתוך 30 שנה מרב המסה באוקיינוסים עשויה להיות פסולת הפלסטיק, הכיר האו"ם בפלסטיק הימי כבעיה עולמית. הוא קרא למדינות העולם להירתם להפחתתה בכל הדרכים ולחקור את כמותה וסוגיה, אולם עד כה לא נקבעו יעדי הפחתה עולמיים לפסולת הפלסטיק המגיעה לאוקיינוסים ולימים. חוקרים מסווגים פסולת ימית לשני סוגים עיקריים: פסולת ממקור יבשתי ופסולת מן הים. בשנת 1991 העריכה קבוצת מומחים של האומות המאוחדות להיבטים מדעיים של זיהום ימי, כי עד 80% מן הפסולת היא יבשתית. מגוון רחב של תוצרי אדם עלולים להפוך לפסולת ימית וניתן למוצאם בפסולת הנשטפת אל החוף: שקיות פלסטיק, בלונים, מצופים, חבלים, פסולת רפואית, בקבוקי זכוכית ופלסטיק, מציתים, פחיות שתיה, קלקר, ציוד דיג ורשתות, פסולת שנפלה מאוניות נוסעים ואסדות קידוח.

הפסולת הימית בישראל מנוטרת במסגרת תכנית הניטור הימית הלאומית, לאורך החופים, קרקעית הים וגוף המים. על פי דוח ניטור הפסולת הימית בישראל לשנים 2017-18, כ-90% מהפסולת יוצרה בישראל והינה ממקור מקומי. אחוז קטן מהפסולת מגיע ממקורות חיצוניים כגון מצרים, טורקיה, הרשות הפלסטינית, ירדן וסוריה ואף ממקומות מרוחקים כגון ברזיל והולנד. סביר להניח שהפסולת מהמקומות המרוחקים יותר מקורה בספינות סחר. בקרקעית הים החולית בין עומקים 20 ל-80 מ' נמצאו בעיקר חתיכות של

שקיות פלסטיק ואריזות מזון קרועות. עליה בכמות השקיות והאריזות השלמות נצפתה ככל שנדגמו בעומק רב יותר.

פסולת פלסטיק מסבה נזק לאורך כל חייה: יצורים ימיים מסתבכים בשקיות ניילון, רשתות דיג ישנות ומוצרי פלסטיק חד פעמיים (איור 28) ובולעים חתיכות קטנות של פלסטיק המרחפות במים. אולם הנזק לא מסתיים בשלב הזה. בשנים האחרונות אנו נחשפים לנזקים המצטברים ממיקרו-פלסטיק - פיסות זעירות של פלסטיק שגודלן יכול לנוע מעשרות מיקרונים בודדים ועד למילימטרים בודדים, המתקבלות כתוצאה מבליה של מוצרי פלסטיק גדולים (איור 29), עקב חשיפה לשמש, לכוחות מכאניים ופירוק ביולוגי. בזמן התפרקותו מפריש הפלסטיק חומרים הידועים כבעלי השפעה מזיקה על בריאות החי והאדם גם בריכוזים נמוכים:

- ביספנול A (BPA) - חומר המקנה לפלסטיק את גמישותו ונמצא כקשור לעלייה בסיכון להשמנה ולפגיעה בפוריות של גברים ונשים.

- פתלטים (phthalates) - קבוצה של תרכובות כימיקליות המשמשות במגוון גדול של מוצרי פלסטיק חד פעמיים. הפתלטים מופרשים מהפלסטיק בנוכחות נוזלים וידועים כבעלי השפעה על המערכת ההורמונאלית בגוף האדם וכתוצאה מכך על הפוריות.

בנוסף לחומרים המופרשים מהפלסטיק עצמו, המיקרו-פלסטיק עלול לספוח מזהמים אורגניים יציבים כמו PCB ולהגדיל את ריכוזם בגוף החי.

איור 29

פלסטיק שעבר בליה, מיקרופלסטיק

על מנת להעריך את מידת זיהום הפלסטיק והשפעתו על הסביבה הימית, דגמו חוקרים מאוניברסיטת תל אביב איצטלנים מתשעה חופים שונים בישראל. בכל החופים נמצאו בדגימות חלקיקי מיקרופלסטיק ובחלקם הגדול נמצאו פתלטים. כיום, כאשר חלק משמעותי מהמזון וממי השתייה שלנו מגיעים מהים, אנו מחויבים להשתמש בפלסטיק באחריות ולהפחית ככל הניתן את השימוש בו.

7. **זיהום תרמי** - במערכות הקירור של תחנות כוח ומפעלים אחרים נשאבים מי ים, אשר מוזרמים בחזרה לים בטמפרטורה גבוהה מטמפרטורת הסביבה. השינוי בטמפרטורת המים גורם לירידה ברמת החמצן המומס במים ולעלייה בקצב חילוף החומרים. לעלייה המלאכותית בטמפרטורת מי הים סביב תחנות הכוח ישנן השלכות על השרידות, הגידול, הרבייה והפיסיולוגיה של מינים ימיים.

8. **זיהום אקוסטי** - רעש שנוצר על ידי האדם בסביבה הימית ומשבש את ההתנהגות, הפיזיולוגיה והרבייה של אורגניזמים ימיים, עד כדי סיכון מוגבר לתמותה. בעשורים האחרונים עלתה רמת זיהום הרעש הימי באופן משמעותי, עקב נוכחות מוגברת ומועצמת של ספינות דיג, מסחר ופיתוח תשתיות כגון סקרים סייסמים וקידוחים הקשורים לתעשיית גז ונפט. רעש חריג עלול לפגום במערכות השמיעה של יצורים רבים החיים במים, ומעבר לכך, הוא עלול למסך את הקולות שמפיקים בעלי חיים ימיים כאמצעי תקשורת (**רעש ביופוני**), דבר שיכולות להיות לו השפעות מרחיקות לכת על התנהגות בעלי החיים בים ועל איכות התקשורת ביניהם.

חשוב לציין, כי לחלק מהחומרים הנחשבים מזהמים קיים גם מקור טבעי. התפרצות הר געש מכניסה לאטמוספרה חלקיקים ומתכות כבדות, השוקעים לאחר זמן לים. תהליכים טבעיים של נביעה בסמוך לחוף מביאים נוטריינטים אל האזור המואר וחומרים רדיואקטיביים נוצרים מאינטראקציה בין קרניים קוסמיות ומרכיבים באטמוספרה. כמו כן ישנן נביעות טבעיות של נפט במקומות שונים בים. לכן, חשוב לאפיין את התנאים הסביבתיים הטבעיים (הרקע הטבעי) לפני הסקת מסקנות על זיהום הסביבה ועל מקור המזהמים.

רעש ביופוני

הקולות שמפיקים בעלי חיים ימיים כאמצעי תקשורת. ליוויתנים ודולפינים משתמשים בקול כדי להעביר מידע על נדידה, רבייה, טריפה ועוד. הקולות האלו חוצים מרחקים עצומים בתוך המים ואף יכולים לחצות את האוקיינוס כולו. גם דגים, סרטנים, תמנונים ואפילו מיני פלנקטון זעירים פתחו דרכי תקשורת מבוססות קול.

13.4 הרס בתי גידול

מיה אלסר

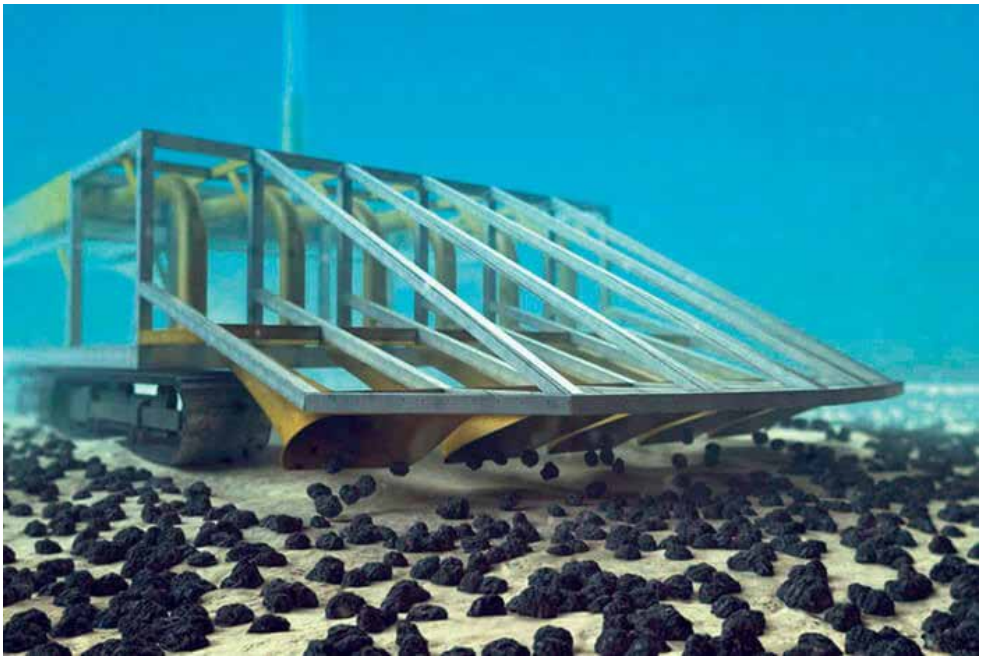
אובדן ופיצול בתי גידול ימיים נחשבים לאיום הקריטי ביותר על המגוון הביולוגי הימי. ההערכה היא כי בין השנים 1960-1995 פיתח האדם קילומטר אחד של קו חוף מידי יום וגרם לאובדן קבוע של בתי גידול ייחודיים כמו ביצות החוף, שדות עשב ים וחופי ים סלעיים. כ-20% משוניות האלמוגים בעולם אבדו וכ-20% נוספים נפגעו בעשורים האחרונים של המאה ה-20, ביחד עם כ-35% משטחי יערות המנגרובים. גידול האוכלוסייה עולמית, התפתחות הטכנולוגיה שמאפשרת לאדם להגיע לשטחים ימיים שהיו מחוץ להישג ידו עד כה ושינויי האקלים, הצטרפו לפיתוח החופים ומאיימים על בתי גידול בעלי תפקיד משמעותי בשימור המגוון הביולוגי הימי ובחייו של האדם על פני כדור הארץ.

בפרק זה ניגע בבתי הגידול החיוניים והמאוימים ביותר. נתחיל דווקא בבית גידול שהיה עלום עד לעשור האחרון והטכנולוגיה המתקדמת חשפה אותו, לא רק למחקר נרחב יותר, אלא גם לתעשיית המחצבים - הים העמוק.

ים עמוק

במשך שנים רבות עולם המחקר התבסס על הנחה עיקשת, שלפיה באזור התהומות הלחץ הגדול והחושך הנצחי לא מאפשרים חיים. אין פוטוסינתזה – אין מזון. תפיסה זו השתנתה רק ב-1977, אז התגלו חיים מורכבים של מערכת אקולוגית סבוכה ומרהיבה שניזונה מחלקיקי חומר אורגני שמטפטפים לאיטם למעמקים ומספקים מזון. ב-1984 שני מדענים אמריקאים השתמשו בקופסה קטנה כדי לחלץ בוץ מעומק של 2,500-1,500 מטר וזיהו בתוכו 798 מינים שונים, יותר ממחציתם לא היו מוכרים לאדם. ב-2019 מחקר דומה, שנערך במשך שלוש שנים באוקיינוס השקט, זיהה 347 אלף מינים, חמישית מהם לא היו מוכרים. כיום אנו יודעים כי הים העמוק מייצג למעלה מ-96% מבתי הגידול על פני כדור הארץ ותפקודו התקין הוא קריטי לרווחת המערכת העולמית.

פעילות אנתרופוגנית כגון דיג יתר, זיהום (כימי ואקוסטי) ושינויים כימיים עקב ההתחממות העולמית משפיעים בים העמוק, כהמשך של הים הרדוד. אולם הפעילות שמאיימת ביותר על בתי הגידול בים העמוק היא כריית מחצבים. העלייה ברמת החיים וגידול האוכלוסין הביאו לדרישה גוברת לאנרגיה שמקורה בדלקים, מחצבים ומינרלים, זאת במקביל להצטמצמות רזרבות הכרייה ביבשה. כבר משלהי המאה ה-19 נתפסו המצולות כפוטנציאל לכריית משאבים, מה שדחף למאמץ נרחב לחקור את הקרקעית כדי למצות את משאביה. אולם רק כיום אנחנו יודעים להעריך את העושר של אזור התהומות, שגדוש ביסודות אדמה נדירים, חלק מהם בעלי שמות לא מוכרים מאוד: לארביום, אירופיום, איטריום כמו גם אבץ, פלטינה, כסף וזהב. לפי הערכות, רק בגושים הפולימטאליים (המכונים גם **נודלות מנגן**), יש עתודות נחושת, ניקל, מוליבדן, מנגן ועוד, שיספיקו למאות שנים. עתודות הקובלט, יסוד מתכתי מבוקש, שמצויות בקרקעית הים נאמדות ב-94 אלף טונות – בערך פי 6 מהעתודות הנוכחיות על היבשה. אלו ויסודות אחרים הכרחיים לייצור מגוון רחב של מוצרי צריכה כמו מסכי סמארטפונים, סוללות או מגנטים, ושל טכנולוגיה ירוקה כמו טורבינות רוח ותאים סולאריים.



איור 30

מכונות המשמשות לכרייה בים עמוק (DSM Observer)

באיחוד האירופאי מעריכים כי טכנולוגיות חדשות שהבשילו והוזלו עם התפתחות קידוחי גז ונפט בים העמוק יאפשרו להפיק כ-10% מהיקף המינרלים והמתכות בעולם מקרקעית הים עד לשנת 2030 - מדובר בשווי שוק של כ-10 מיליארד אירו. הבעיה היא שהטכנולוגיה והלוגיסטיקה לכרייה במים עמוקים כוללות תהליכים אינטנסיביים והרסניים לסביבה: פירוק מכני של שכבות הסלע בקרקעית וגריסת החומר ודחיסתו כדי להעלות את התערובת לאסדת טיפול (איור 30). באסדה מופרדים החומרים הרצויים מהמים ומהשאריות שמושלכים חזרה לים, כשחלק מהחומרים מועברים לטיפול משני באמצעות ספינות תובלה.

פירוק שכבות הסלע בקרקעית האוקיינוס, עקירת מינים הצמודים לקרקע, הפרדה בין אוכלוסיות של מינים, שינוי ההרכב הכימי של עמודת המים ועכירותה, וזיהום רעש או אור מאסדות ההפקה והפסולת שתיצור במי הים זיהום של חלקיקים, חלקם רעילים, בדומה לזיהום האוויר התעשייתי שקיים בסביבה עירונית, משפיעים על הסביבה הפיזית והביולוגית בים.

MIDAS, קונסורציום אירופי של אוניברסיטאות, מכוני מחקר וחברות כרייה ביקש לפצות על חלק מפערי הידע על הים העמוק באמצעות מחקר רב תחומי וסקרים מקיפים. המסקנה של הפרויקט היא שיהיה קשה לשלב בין הגנה סביבתית לבין כרייה רחבת היקף. אחת הסיבות לכך היא שקצב ההתאוששות של הסביבה הוא איטי. יצורי מעמקים חיים מאות שנים: כריש גרינלנד, למשל, מגיע לבגרות מינית בגיל 150 וחי 400 שנה ויותר. אלמוגים יכולים לחיות כנראה 4,000 שנה. במעמקים אפשר למצוא עושר של מינים ייחודיים שיש להם תפקידים חשובים בתהליכים אקולוגיים גלובליים: למשל בקיבוע המתאן - גז חממה רב-עוצמה - שמשתחרר מהנביעות בקרקעית. מכיוון שבתי הגידול בקרקעית הים נוצרו בתהליכים שנמשכו מיליוני שנים ואי אפשר לחזות כיצד הם יצליחו לשוב למצבם לפני פעילות הכרייה, עלולה הכרייה להוביל לפגיעה בלתי הפיכה. החשש גובר כשמדובר בנקודות

חמות של מגוון ביולוגי כמו הנביעות ההידרותרמיות, אשר משמשות כזירה למחקר תרופתי בזכות תכונות ייחודיות של האורגניזמים הגדלים בהן, אשר יכולות לשמש לצרכים בריאותיים.
בגלל המורכבות הזו קיבל בינואר 2018 הפרלמנט האירופי החלטה ברוב מכריע הממליצה למדינות החברות באיחוד להימנע מהמשך החיפוש וההפקה וקוראת להשעיה בינלאומית של פעולות אלו עד שיתבררו היטב השפעות הכרייה והסיכונים בה. בספטמבר 2020 השיקה הנציבות האירופית ברית של כ-200 חברות וארגוני ממשל ומחקר שמטרתם למצוא מקורות אנרגיה גולמיים, תוך ניסיון למזער את ההשפעות הסביבתיות והחברתיות. עוד על כריית המחצבים בים העמוק ניתן לקרוא בכתבה הבאה.

גם קידוחי גז ונפט מאיימים על בית הגידול בים העמוק, הן בשלב הקידוח בו נפגעת הקרקעית הרכה ונוצרת הרחפה מסיבית של חול והן בשלב ההפקה בו סובל בית הגידול מזיהום כימי ברמות משתנות. גן אלמוגים נדיר באזור פלמחים עלה לכותרות לאחרונה בשל סכנת קידוחי הגז המאיימת עליו.

שוניות אלמוגים

מגוון המינים החיים בשוניות האלמוגים בעולם גדול יותר מכל מערכת אקולוגית ימית אחרת במים הרדודים, מה שהופך את שונית האלמוגים לאחת המערכות האקולוגיות המגוונות ביותר על פני כדור הארץ. למרות ששוניות האלמוגים מכסות פחות מ-1% מקרקעית האוקיינוסים, הן מהוות בית גידול לכ-25% מהמינים הימיים הידועים לאדם, בינהם כ-4,000 מיני דגים ו-700 מיני אלמוגים. כמו כן מספקות השוניות שירותים אקולוגיים חיוניים גם לאדם - דיג המבוסס על יצורי השונית מספק מזון והכנסה, פעילות כגון צלילה ושנירקול מושכת מיליוני אנשים ותורמת לכלכלת הפנאי המקומית ותרכובות המבודדות מאורגניזמים החיים בשונית משמשות בתעשייה הרפואית. שירותים אלו מוערכים בכ-400 מיליארד דולר לשנה. עם זאת, מרבית שוניות האלמוגים בעולם נמצאות תחת איום: חצי משטח שוניות האלמוגים בעולם נעלם מאז שנות החמישים ומגוון המינים בשונית ירד ביותר מ-60%, מגמה אשר צפויה להימשך עם ההתחממות העולמית.

גם שונית האלמוגים במפרץ אילת מצויה תחת לחצים, אשר פורסמו בדוח הניטור הלאומי לשנת 2020: ניכרת פגיעה בשוניות האלמוגים, הן בשל שבירת אלמוגים וכיסויים בחול שהורחף על-ידי הגלים, והן בשל פגיעת פסולת וחלקי תשתית שנסחפו מהחופים אל הים בעקבות סערת החורף הקיצונית שפקדה את חופי אילת במרץ 2020. הפגיעה המשוערת המדודה היא עד כדי 22% הפחתה בשטח האלמוגים הבריא ואולי אף יותר בשונית הרדודה. כמו כן נמשכת העלייה בטמפרטורת המים העמוקים ובטמפרטורת פני הים. הטמפרטורה המרבית שנמדדה מעל שונית האלמוגים בשנת 2020 הייתה הגבוהה ביותר שנמדדה מאז תחילת הניטור, ועמדה על $29.1^{0}C$ (הטמפרטורה הגבוהה ביותר שנמדדה לפני כן הייתה ב-2012 ועמדה על $28.4^{0}C$).

יערות מנגרובים

מנגרובים הם שיחים ועצים קשיחים הגדלים בקרקע המלוחה והבוצית של חופי הים הטרופיים והסובטרופיים של כדור הארץ (איור 31). יערות המנגרובים מכסים כ-15 מיליון דונם על פני כדור הארץ והם בעלי חשיבות אקולוגית וכלכלית רבה. יערות אלו, המשתרעים בקו הגבול שבין היבשה לים, מספקים מזון, שטחי רבייה ומקום לגידול פרטים צעירים, לאורגניזמים ימיים ויבשתיים כאחד, כולל מינים מסחריים. בנוסף, שיעור היצרנות הראשונית ביערות המנגרובים שווה ערך לזה של יערות עד טרופיים והם מאחסנים פחמן שקלטו מהאטמוספירה, בתוך השורשים, הגזעים ובקרקע הסמוכה להם.

המנגרובים ממלאים תפקיד מרכזי גם בקיימות ובפרנסת האדם עקב שימושם הגבוה למזון, עץ, דלק ותרופות. הם גם מציעים הגנה מפני אירועים קטסטרופליים כגון צונאמי, סערות טרופיות ושחיקת קו החוף על ידי גלים. למרות חשיבותם, המנגרובים נעלמים בשיעור עולמי של 1-2% לשנה ובשיעור של כ-35% במהלך

איור 31

יערות המנגרובים

20 השנים האחרונות. עליית מפלס פני הים מהווה את האיום העיקרי, בהתחשב בחשיפה הגבוהה של המנגרובים לגאות ולשפל, אך גם העלייה בטמפרטורת המים, במליחות ובריכוז גזי החממה מדאיגים לא פחות. שינויים אלו עלולים להוביל לשינויים בהרכב חברת המנגרובים ובקצב גדילתם. גם לפיתוח עירוני, חקלאות ימית, כרייה וניצול יתר של עצים, דגים, סרטנים ורכיכות חלק נכבד בפגיעה ביערות. גם פה, הפגיעה בבית הגידול מוביל לאובדן המגוון הביולוגי ולפגיעה בתפקוד המערכת האקולוגית וכתוצאה מכך, גם לפגיעה ביכולת המערכת לספק שירותים לאדם.

שדות עשב ים

עשבי ים גדלים במים מלוחים ומליחים במקומות רבים בעולם, מהאזורים הטרופיים ועד לחוג הארקטי. הם קיבלו את שמם מכיוון שלרוב המינים יש עלים ירוקים וארוכים דמויי דשא (איור 32). לעיתים קרובות מבלבלים אותם עם אצות, אולם לעשב הים יש שורשים, גבעולים ועלים והם מייצרים פרחים וזרעים. הם התפתחו לפני כ-100 מיליון שנה וכיום ישנם כ-72 מינים שונים של עשב ים. עשבי ים יכולים ליצור כרי דשא תת-ימיים צפופים, בהם מהווה עשב הים **מין מסד**. מלבד היותה אחת המערכות האקולוגיות היצרניות ביותר בעולם, שדות עשב הים מספקים מחסה ומזון למגוון גדול של יצורים, חלקם מסחריים, החל מחסרי חוליות זעירים ועד דגים גדולים, סרטנים, צבים, יונקים ימיים ועופות. הם מייצרים בכל יום 10 ל׳/מ״ר חמצן, מנקים את המים בסביבתם, מייצבים את הקרקע החולית וקולטים מידי שנה כ-83 מיליון טון פחמן דו חמצני מהאטמוספירה. גם האדם משתמש בעשב הים כבר למעלה מ-10,000 שנים לדישון שדות, לבידוד בתים וגגות, אריגת רהיטים, מילוי מזרונים ואפילו מושבי רכב. שירותים אקולוגים אלו

אורגניזם מסד

אורגניזם המספק את התשתית הפיזית והמזון העיקרי בבית גידול.

איור 32

שדות עשב ים

מדרגים את שדות עשב הים כמערכת האקולוגית השלישית בעלת הערך הגבוה ביותר בעולם ושווי השירותים שמספק דונם של עשב ים מוערך ביותר מ-$19,000 בשנה, מה שהופך אותם לאחת המערכות האקולוגיות יקרות-הערך ביותר על פני כדור הארץ.

חוקרים מעריכים כי 29% משדות עשב הים נעלמו במאה השנים האחרונות ולפחות רבע ממיני עשב הים נכנסו לרשימה האדומה של ה-IUCN במצב הכחדה או רגיש. הגורמים העיקריים המאיימים על שדות עשב הים הם העלייה בטמפרטורת המים ובשכיחות ועוצמת הסערות עקב שינויי האקלים, זיהום בנוטריינטים המגיעים מהיבשה וגורמים לפריחת אצות החוסמות את אור השמש הדרוש לצמיחת עשב הים, פגיעה של שטחים נרחבים מעוגנים שנגררים על הקרקעית ומדחפי סירות שעוקרים את העשב ממקומו ודיג יתר של דגים טורפים המווסתים את כמותם של דגים צמחונים הניזונים מעשב הים. היעלמות שדות עשב הים משפיעה על צפיפות ומגוון המינים החי בסמיכות לה. אחת הדוגמאות לכך היא התמותה ההמונית של פרות הים בפלורידה בשנה האחרונה (2021): לפחות 841 תחשי נהרות, הידועים בכינוי 'פרות ים' מתו במימי פלורידה, ארה"ב, כתוצאה ממחסור במקור המזון העיקרי של יונק זה - עשב הים.

לאורך החוף הישראלי, אחד מבתי הגידול הנמצאים בסכנה ממשית הוא החוף הסלעי:

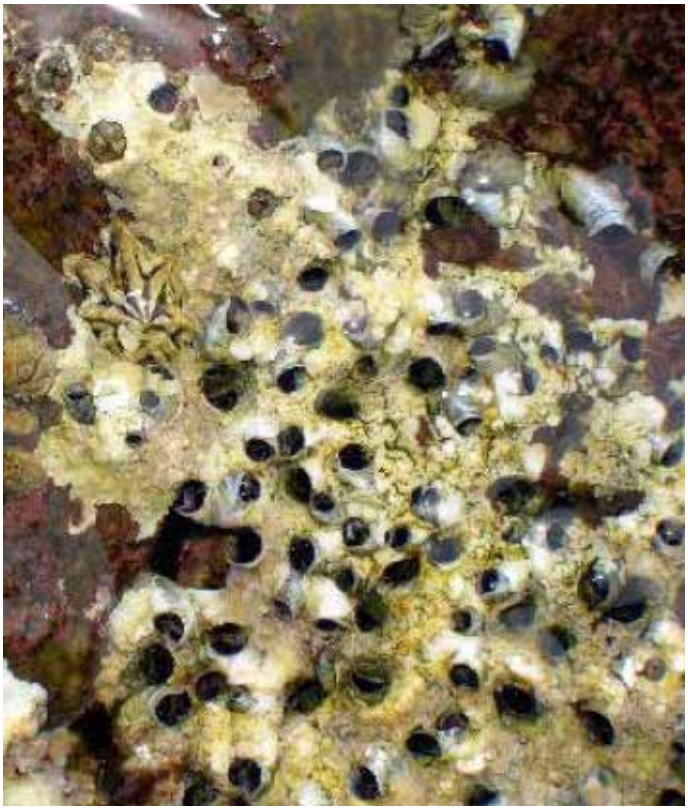
חופים סלעיים

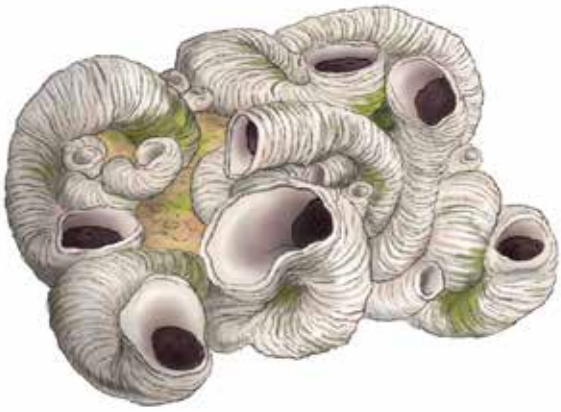
חופים סלעיים ומפורצים מהווים בית גידול עשיר ומגוון. בישראל נוצרים חופים סלעיים במקומות בהם הים חותר במצוקי הגיר או הכורכר ויוצר, לצד המצוקים, טבלאות גידוד. טבלאות הגידוד מהוות כ-10% מקו החוף הים-תיכוני בישראל ומתרכזות בעיקר בצפון הארץ - בחופי ראש הנקרה, אכזיב, שקמונה ודור-הבונים, לצד כמה טבלאות מבודדות בחופים הדרומיים כמו פלמחים ותל אשקלון. שמן של הטבלאות נובע מיצירתן על ידי פעולת הגידוד - כרסום רכס הכורכר והגיר בתהליכי בלייה טבעיים, בשילוב תהליכי התגבשות של מלח, המסה כימית ופעולת גלים, השוחקים יחדיו את הסלעים בקו המים וגורמים לנסיגת הרכס, עד להישארותה של טבלה שטוחה בגובה מפלס פני הים. את שטחי הטבלאות הייחודיים מאכלסים מאות מינים של בעלי חיים, שביניהם מתקיים מארג מורכב של קשרי גומלין: אצות, שושנות ים, חסרי חוליות, סרטנים ומגוון יצורים קטנטנים - רבים מהם ייחודיים לבית הגידול.

בשולי הטבלה הפונים לים, בולט **מבנה ביוגני** הנקרא '**כרכוב**' אשר מגן על טבלת הגידוד מבליה של מפץ הגלים ויוצר אזור של מים שקטים יותר במרכזם. במצב רגיל נמצאת הבניה הביוגנית בשיווי משקל דינמי עם תהליכי בליה. הכרכוב נוצר מקונכיות חילזון קטן הנקרא 'צינוריר בונה' (איור 33), ש"מודבקות" יחדיו על ידי אצות גירניות ויוצרות מעטה החזק יותר מסלע המקור. ברחבי הים התיכון יש כמה מינים של צינוריר, הנפרדים אלו מאלו מבחינה גאוגרפית, אולם המין המצוי באזורנו, כיום וכנראה גם בעבר, הולך ונעלם.

מבנה ביוגני

מבנה הנוצר על ידי תאים או אורגניזמים חיים.





איור 33

צינורן בונה (*Dendropoma petraeum*).
(מימין)
LOLIGO - SEE LIFE
(משמאל)
ויקיפדיה

התדרדרות מתמשכת בכיסוי החי של חלזונות אלו נצפתה כבר החל משנות ה-90 של המאה הקודמת. בשנים 2009 ועד 2014 חלה ירידה דרסטית בהופעת המין והוערך כי אוכלוסייתו נעלמה כמעט כליל. עדויות נקודתיות שנמצאו בשנים שלאחר מכן, על ידי רילוב ורשות הטבע והגנים, לקיומו של החלזון צינוריר בונה במספר אתרים לאורך החוף הישראלי, מעוררים אופטימיות זהירה.

היעלמות הצינוריר הבונה היא לא הגורם היחיד המאיים על טבלאות הגידוד. מחקר חדש, שהתפרסם לאחרונה בכתב העת המדעי, Science of The Total Environment בחן את השפעת עליית מפלס הים העולמי על בית גידול ייחודי זה. בשלב הראשון של המחקר מיפו החוקרים, בהובלתו של פרופ' גיל רילוב, חוקר במכון הלאומי לאוקיאנוגרפיה של חקר ימים לאגמים לישראל ובחוג לביולוגיה ימית באוניברסיטת חיפה, את הטופוגרפיה של טבלאות הגידוד באזורים שונים בישראל ומצאו כי גם עליה צנועה יחסית במפלס הים, של 30 סנטימטרים, תטביע 10% משטח הטבלאות - כלומר, במקום שפני הטבלאות יהיו בתוך המים חלק מהזמן וחשופות לאוויר בשאר הזמן, הן יהיו שקועות בתוך המים לכל אורך היממה. בשלב הבא בחנו החוקרים את ההשפעה שתהיה לשקיעה כזו של טבלאות הידוד על המגוון הביולוגי שמאכלס אותן, ומצאו כי רבים מהמינים שאופייניים לטבלאות הגידוד, לא הצליחו לשרוד את השקיעה אל מתחת למים.

טבלאות הגידוד הן לא רק תשתית למערכת אקולוגית עתירת מינים, אלא הן גם בעלות חשיבות כלכלית לציבור הדייגים ולתיירות, הן כאתר נופש והן בשל העובדה שחלק מטבלאות הגידוד נמצאות בסמוך לערכי מורשת כעתיקות קיסריה ועכו, ולמעשה מהוות חלק בלתי נפרד מאותם אתרים היסטוריים.

טבלאות הגידוד הן גם מרכיב חשוב בהגנה על קו החוף ומצוקיו מפני בלייה על ידי הגלים, כיוון שהן משמשות כשובר גלים טבעי. בנוסף, הן משמשות גם כאזור לקיבוע ולהשקעה של פחמן דו-חמצני ביצירת שלדים גיריים, תוך סילוקו ממי הים ומהאטמוספירה. כמו כן, חלק מטבלאות הגידוד סובבות איים קטנים, לחלקם חשיבות כמקום קינון לעופות וכמקום עצירה של מינים חולפים כמו קורמורנים.

יש לזכור כי לא רק ההרס הפיזי של בית הגידול מהווה איום על המגוון הביולוגי. לעיתים, הפעולות המתוארות מעלה גורמות לקיטוע או לחלוקה (**פרגמנטציה**) של בית הגידול וכתוצאה מכך לפגיעה:

- בגודל האוכלוסיות.
- ברבייה ובמגוון הגנטי וכתוצאה מכך לפגיעה ביכולת האוכלוסייה להסתגל לשינויים סביבתיים.
- במגוון המינים

פרגמנטציה

תהליך בו בית גידול גדול מתפרק לשטח/ים קטן/ים יותר, כאשר כל חלק מופרד ממשנהו. בתהליך זה מצטמצם שטחו הכללי של בית הגידול, היחס בין שטח פני בית הגידול לשטח השוליים שלו משתנה והחשיפה להשפעות הסביבה גדלה.

13.5 שינוי אקלים גלובאלי

מיה אלסר

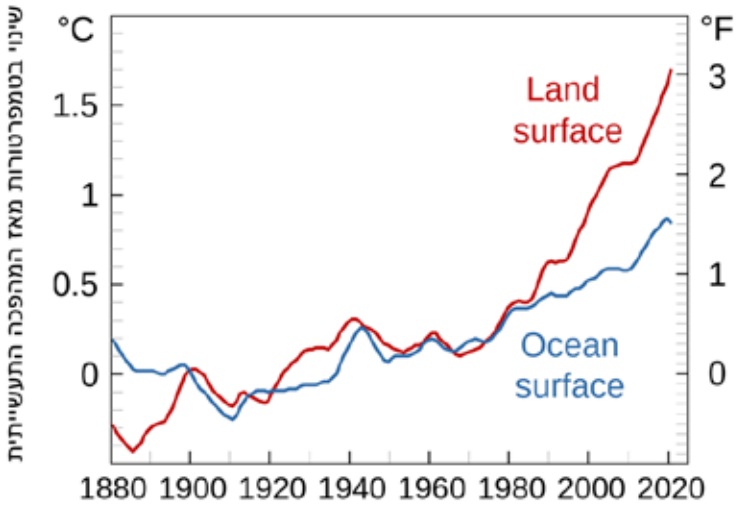
בעשרות השנים האחרונות אנו עדים לשינויים הדרגתיים באקלים העולמי אותו משייכים מרבית המדענים לפעילות האדם. שתי המגמות העיקריות בהן מדובר הינן התחממות האטמוספרה והידלדלות שכבת האוזון. לשני שינויים אלה יכולה להיות השפעה ניכרת על האקולוגיה של מערכות ימיות רבות, וכן על האדם.

התחממות כדור הארץ

התחממות האטמוספרה בכדור הארץ קשורה בעיקר לעליה בריכוזם של גזי החממה, כפי שמוסבר בפרק 7.4. התחממות כדור הארץ יכולה להסיט את האופי האקלימי של אזורים שונים על פני כדור הארץ, והתחזית הכללית היא שמזג האוויר יקצין. בפרק זה ניגע בהשלכות האפשרויות של שינויים אלו, על הסביבה הימית, וכתוצאה מכך, גם על האדם.

האוקיינוסים ממלאים תפקיד מרכזי במערכת האקלים ובאקולוגיה של כדור הארץ. מכיוון שלמים יש קיבול חום גבוה, מעל 90% מהחום העודף שנוצר באפקט החממה מצטבר באוקיינוסים ומביא לעלייה בטמפרטורת המים (איור 34).

במאמר שפורסם בפברואר 2020, סקר צוות סיני-אמריקאי שכלל 14 מדענים מ-11 מוסדות מחקר, את מגמת השינויים בטמפרטורה של האוקיינוסים בעשורים האחרונים. מבין הנתונים המספריים הרבים בדו"ח מצטיירת באופן ברור תמונת המצב המדאיגה: בין השנים 1987 ועד 2019, עלה קצב התחממות המים ב-2,000 המטרים העליונים של האוקיינוסים בשיעור גבוה פי 4.5, יחסית לתקופה מקבילה בשנים קודמות (1955-1986).



איור 34

נתוני NASA המשקפים את השינויים בטמפרטורות האוויר על פני הקרקע והים, מאז המהפכה התעשייתית. טמפרטורות פני הקרקע עלו מהר יותר מטמפרטורות האוקיינוס מכיוון שהאוקיינוס סופג כ-90% מהחום העודף שנוצר משינויי אקלים

איור 35

הוריקן 'סנדי' פוגע בחופיה המזרחיים של ארה"ב, 2012
(David L. Ryan, Boston Globe)

הטמפרטורה הממוצעת בשכבה זו בשנת 2019 הייתה גבוהה ב-0.075 מעלות צלזיוס יחסית לטמפרטורה הממוצעת בשנים 1981-2010. זה לא נשמע הרבה, אבל זה מייצג כמות עצומה של חום שנאגרת במי האוקיינוסים והשפעתה ניכרת בסביבה הימית:

- **עלייה בתדירות ובעוצמת סערות** - ימים חמים יותר מספקים אנרגיה ליותר סערות והופכים אותן לחמורות יותר. ב-2020, תועד מספר שיא של 29 סערות טרופיות והוריקנים באוקיינוס האטלנטי. סערות אלו פוגעות באזורי החוף (איור 35), גורמות לפגיעות בנפש, להרס תשתיות מעשה ידי אדם ולהרס בתי גידול חופיים, כמו שוניות אלמוגים.

סופות טרופיות: הוריקן, טייפון, ציקלון

האזור הטרופי, הנע בין קווי רוחב °20 צפון ל-°20 דרום, מקבל קרינת שמש רבה וטמפרטורת מי האוקיינוסים באזורים אלה גבוהה מזו שבאזורים המצויים דרומית או צפונית להם. האדים הרבים העולים ממי האוקיינוסים החמימים, גורמים לסופות טרופיות, שלעיתים מתפתחות לסופות עזות, הנקראות על פי האוקיינוס שמעליו הן מתפתחות: **הוריקן** באוקיינוס האטלנטי, **טייפון** באוקיינוס השקט ו**ציקלון** באוקיינוס ההודי.

בשנה ממוצעת נוצרות ברחבי העולם כ- 50 סופות טרופיות, אולם רק אחדות מהן הופכות לסופות עזות, עם רוחות שמהירותן עולה על 118 קמ"ש: אוויר לח וחם נישא מפני האוקיינוסים כלפי מעלה, ובדרכו הוא מתקרר יותר ויותר, ומתעבה. ככל שהאוויר עולה גבוה יותר, נשאב מלמטה עוד ועוד אוויר רווי אדי מים, ונוצרים עוד עננים: השקע הטרופי מתפשט ומעמיק, ושואב לתוכו עוד ועוד לחות. כאשר הסופה מגיעה אל חוף האוקיינוס, זוהי כבר סופה עזה שבכוחה להחריב את התשתיות באזורי החוף. בסופות החזקות הלחץ הברומטרי במרכז הסופה יורד מתחת ל-980 מיליבר, ובסופות מדרגות עוצמה עזות במיוחד נמדד לחץ של 940-920 מיליבר (הקטופסקל). לחץ ברומטרי כה נמוך גורם להתכנסות חזקה של הרוחות פנימה, להתפתחות עננות אנכית גבוהה, להמטרה של משקעים רבים, ולפעילות ברקים חזקה. בהשפעתו של כוח קוריוליס נוצר פיתול מסוים בזרימת האוויר (כמו בשקעים ברומטריים "רגילים") וכך נוצרת סביב מרכז השקע מעין מערבולת, והעננים מסתדרים סביבו ברצועות. לעתים, תנאי מזג האוויר אינם מאפשרים התעצמות של הסופה, והיא דועכת תוך כדי תנועתה מעל לאוקיינוס.

כאשר הסופה מגיעה ליבשה, היא הולכת ונחלשת ככל שהיא מעמיקה להתקדם לתוך היבשת. שתי סיבות גורמות לכך:

1. התנתקות הסופה מ"אספקת הדלק" שלה - אלה הם אדי המים המתאדים ממי האוקיינוס החמים.
2. החיכוך של הרוח עם היבשה - החיכוך בין האוויר ובין פני הקרקע ביבשה גדול בהרבה מן החיכוך שבין האוויר למים, ומאט את משב הרוחות. בדרך כלל, יומיים-שלושה לאחר שהגיעה ליבשה, הסופה הטרופית העזה מאבדת ממהירותה והופכת לסופה טרופית חלשה יותר.

עונת הסופות הטרופיות נמשכת מתחילת הקיץ ועד הסתיו - אם כי בכל אוקיינוס משכה שונה מעט. מקובל להעניק לסופות הטרופיות שמות, ובארה"ב נהוג לכנותן בשמות של גברים ונשים לסירוגין, לפי סדר האלפבית.

- **עלייה במפלס פני הים** - העלייה בטמפרטורות מי הים גורמת לעליה בנפח הכולל של מי הים (מים חמים תופסים נפח גדול יותר ממים קרים) וביחד עם המסת הקרחונים, יביאו לעלייה בגובה פני הים. במאה השנים האחרונות עלו פני הים בכ-20 ס"מ בלבד בממוצע, אך קצב עלייתם הולך וגובר. כיום הם עולים בכ-3.7 מ"מ בשנה, ועד סוף המאה הם צפויים לעלות בעוד 30 ס"מ עד מטר בממוצע, להציף שטחים שבהם חיים כיום מאות מיליוני אנשים, ולסכן מדינות איים שלמות.
- **שיטפונות** - אוקיינוסים חמים יותר גם משבשים דפוסי ירידת גשם, מה שעלול להוביל לשיטפונות, בצורות ושריפות טבע. הגשמים הנשטפים אל הים מביאים איתם בוץ (איור 36), פוגעים בצלילות המים ובמקרים רבים סוחפים עימם מזהמים מהיבשה כגון חומרי דשן ושמנים.
- **פגיעה בהתמוססות גזים** במי הים - ככל שהמים חמים יותר, יכולתם למוסס גזים יורדת. ישנם שני גזים אשר השינוי בריכוזם המים עלול להיות קריטי:

  - פחמן דו-חמצני. כיום סופגים האוקיינוסים כ-30% מפליטות הפחמן, ומשחקים תפקיד חשוב בהגבלת השפעתו על התחממות האטמוספירה. בגלל עליית ריכוז הפחמן הדו-חמצני באטמוספרה, האוקיינוסים קולטים

איור 36

שיטפון בנחל בצת, ינואר 2021
(יותם אלסר)

כיום יותר פחמן מכפי שהם פולטים, ושכבת המים העליונה שלהם קולטת כרבע מהפחמן הדו-חמצני שהאנושות פולטת מדי שנה. יצורי הפיטופלנקטון קולטים גם הם כמויות אדירות של פחמן דו-חמצני, אך בכל נשימה ועם כל יצור שמת ונרקב, פחמן דו-חמצני שב ומשתחרר לאטמוספרה.

- חמצן: ככל שמי הים חמים יותר, פחות חמצן יכול להתמוסס בהם. השינוי הגדול בטמפרטורת המים מתרחש בשכבת המים העליונה, אך הירידה בריכוז החמצן לא נעצרת שם: משטר הרוחות והזרמים משתנה אף הוא בחלק מהאזורים, וכך כאשר נוצר שיכוב בעמודת המים העליונה, פחות חמצן מגיע מפני השטח אל המים העמוקים, בהם מתרחשת ממילא הרבה פחות פוטוסינתזה בשל עוצמות אור נמוכות שמגיעות אליהם. אם היעדר חמצן כמעט ולא מאפשר חיים, הרי שמים דלי חמצן משנים את אורח החיים של יצורי הים במגוון צורות: הם משנים את תפוצת המינים, את מחזור הפעילות היומי, את הרגלי התזונה, את משך החיים, את דפוסי הרבייה ואת החשיפה והעמידות למחלות. טורפים כמו טונה, דג חרב, שיבוט (cod), מקרל או כרישים נדחפים מעלה לפני השטח ומארג המזון כולו משתנה; חלקם הופכים כך גם זמינים יותר לציי הדיג, על אף שהם ממילא נתונים לדיג יתר.

- **הלבנת אלמוגים** - כפי שכבר הוסבר בפרק 11, שינויי האקלים הם האיום הגדול ביותר הניצב בפני שוניות אלמוגים ברחבי העולם. התחממות המים היא אחד הגורמים לפליטת האצות השיתופיות החיות ברקמות הפוליפ, אל המים. שלד האלמוג משתקף דרך רקמת האלמוג הדקיקה והאלמוג הופך לבן. מכיוון שהאלמוג לא יכול להתקיים זמן רב ללא שותפותיו האצות, פירושו של דבר הוא ששוניות שלמות מתות תוך מספר חודשים. על משטחי האלמוגים המתים משתלטות אצות המפריעות להתאוששות חברת האלמוגים. ברור כי עם תמותת האלמוגים נעלמים גם יצורים רבים הקשורים אליהם.

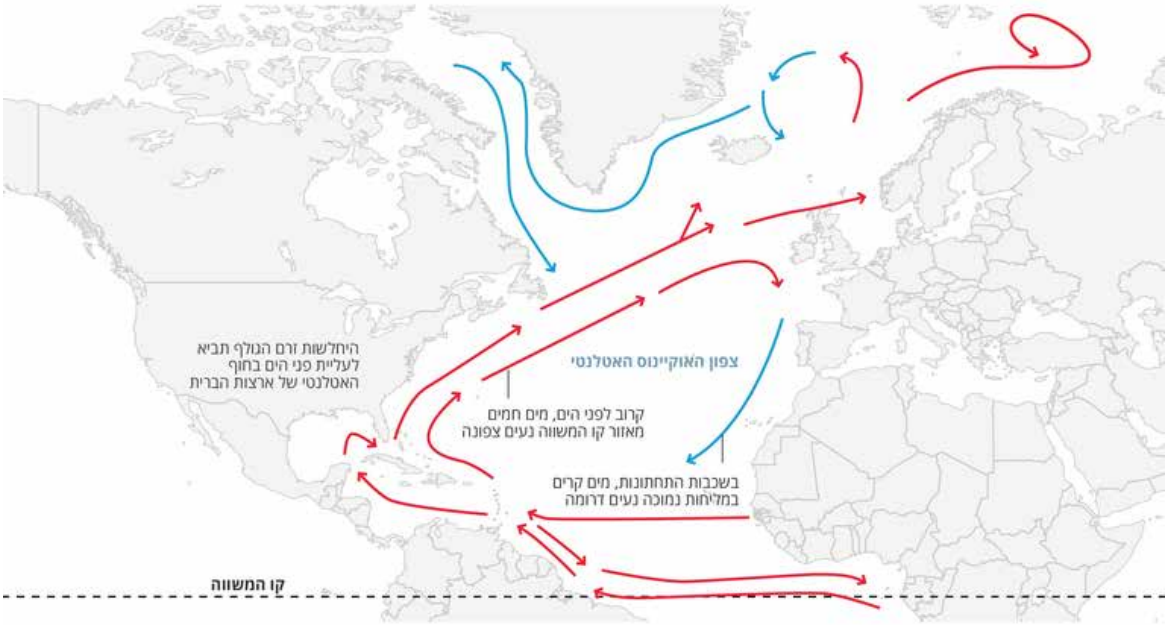
- **היעלמות מינים ושינויים בתפוצה** - רוב יצורי הים הם **פויקילותרמים**, בעלי טמפרטורת גוף משתנה, ועל כן גופם מושפע יותר מהשינויים בטמפרטורת המים. מסיבה זו, כשהטמפרטורות גבוהות, קצב חילוף החומרים של הדגים עולה - מה שגורם להם להזדקק ליותר חמצן. כאמור, מים חמים יותר מכילים פחות גזים מומסים בכלל וחמצן בפרט, מה שעלול להקשות על חלק ממיני הדגים לקבל את כל אספקת החמצן הדרושה להם. מסיבות אלו מהגרים דגים רבים לכיוון צפון או דרום ומתרחקים מקו המשווה לכיוון הקטבים או נעים באופן מקומי יותר, מחיים בשכבה העליונה של פני הים אל שכבות עמוקות יותר של המים, שם הטמפרטורות דומות יותר לאלו שהם התרגלו אליהן לאורך האבולוציה. ההגירה מתרחשת בעיקר כשהדגים גדולים יותר ולכן זקוקים ליותר חמצן. ממדי התופעה במינים השונים בקו המשווה עלולה להגיע אף לנדידה של כ-50 קילומטר בעשור. במקרים אחרים הדגים פשוט מפסיקים לגדול בשלב מוקדם ונשארים קטנים יחסית לאורך כל חייהם, כך שהם זקוקים לפחות חמצן. לתופעה זו השלכות שליליות על הישרדותם של הדגים (נקבת דג קטנה יותר מטילה פחות ביצים, למשל).

איור 37

טווסון ים תיכוני (*Thalassoma pavo*) בשמורת ים ראש הנקרה-אכזיב (עמית אלסר)

גם בישראל ניתן לראות שינויים בתפוצת דגים כתוצאה מהעלייה בטמפרטורות - הבקלה הים תיכונית למשל, הולכת ונעלמת ולעומתם, דגים אוהבי-חום, כמו הטווסון הים תיכוני (איור 37) ומינים לספסים אחרים, משגשגים. טמפרטורת המים הגבוהה, שהגיעה בקיציים האחרונים ל-32°C בחוף הים תיכוני של ישראל, משפיעה גם על חסרי חוליות: עושר מיני הרכיכות ירד בכמעט 90% בעשורים האחרונים ומינים רבים לאורך החוף לא הצליחו להסתגל לטמפרטורות הגבוהות ונעלמו. אחת הדוגמאות לכך הם קיפודי הים הסגולים (*Paracentrotus lividus*) המקומיים שסבלו מטמפרטורות המים הגבוהות בקיץ ובנוסף נאלצו להתחרות על מזונם עם דגי הסיכן המשויש שפלשו מים סוף. כל אלו הביאו להיעלמותם מחופי ישראל ובדומה למקרים אחרים שתוארו בספר, נראה כי בשנים האחרונות תופס את מקומם מין פולש מים סוף: נזרית ארוכת קוצים.

התחממות המים גורמת גם לשינוי מסלולי נדידה בעקבות מזון. ליוויתנים גדולי סנפיר (*Megaptera novaeangliae*) ואובלנות צפון אטלנטיות (*Eubalaena glacialis*) הנודדים לאורך החוף המזרחי של אמריקה, חשופים יותר לפגיעה מספינות או להסתבכות בציוד דיג, בעקבות נדידתם למים קרים יותר בחיפוש אחר מזון.



איור 38

התנועה המעגלית של מי האוקיינוס האטלנטי, החלשה ביותר באלף השנים האחרונות
(מקור: הגרדיאן, לפי (PIK) Noaa, S. Rahmstorf et al. from the Potsdam Institution for Climate Impact (Research

ביוני 2021 פקד גל חום את מערב ארה"ב וקנדה והביא למותם של מאות מיליוני יצורים ימיים - צדפות וכוכבי ים מתים כיסו את הסלעים בחופים הצפוניים של האוקיינוס השקט ודגי סלמון אדום חיפשו מפלט במי נהר וושינגטון. זה לא היה גל החום הראשון שמשפיע על יצורי הים: בשנים 2013-2015 זרמה מסה גדולה של מים חמים (כ-2.5°C מעל הממוצע) לחופי צפון האוקיינוס השקט (The Blob), פגעה באוכלוסיית דגי הבקלה בסמוך לאלסקה והסבה נזק של 100 מיליון דולר בשנה לתעשיית הדיג. גל החום גרם גם למותם של יצורים רבים אחרים, החל בפיטופלנקטון זעיר (מיקרו-אצות וציאנובקטריות), דרך כמיליון עופות ים, וכלה בלווייתנים שנשטפו מתים אל החופים.

- **פגיעה בחגורת המסוע** - ישנם מדענים הצופים כי יתכן שבעקבות התחממות מי הים באזור הקטבים, תאט ואולי אף תיפסק לחלוטין תנועתה של חגורת המסוע האוקיאנית. כזכור מפרק 7.2, חגורת המסוע הנה תנועה מעגלית של זרמים תרמוהלינים המביאים מים חמים אל הקטבים שם הם מתקררים ונעשים כבדים יותר (בשל הטמפרטורה הנמוכה ועלית ריכוז המלח) וצונחים לקרקעית הים, ולאחר מסע בן מאות שנים על קרקעית הים שוב עולים באזור קו המשווה כמים חמים. תנועת מים זו מווסתת וממתנת את האקלים העולמי. התחזית הקודרת אומרת כי התחממות האטמוספירה ומי הים יגרמו להמסת הקרחונים בקטבים ולירידה במליחות באזורים אלה, שעשויה לעצור את צניחת המים לעומק ובכך לעצירת תנועתה של חגורת המסוע.
מחקר חדש מצביע על כך שמערכת הזרמים בצפון האוקיינוס האטלנטי (AMOC), אשר מהווה חלק נכבד מזרם הגולף הממתן בחורף את מזג האוויר באירופה ובמזרח ארה"ב, נחלשה ב-15% והגיעה לרמה הנמוכה ביותר באלף השנים האחרונות (איור 38). מדענים צופים שמערכת זו תיחלש בשיעור של 34-45% אם ההתחממות העולמית תימשך ומזהירים כי היחלשות נוספת של מערכת זו עלולה לחולל עוד סופות, חורפים עזים יותר ועלייה במספרם ובעוצמתם של גלי החום והבצורות באירופה.

התדלדלות שכבת האוזון

הקרינה האולטרא סגולה (UV) מסוכנת ביותר לגוף החי. היא גורמת לתמותה ישירה של תאים וכן לפגיעה ב-DNA - החומר הגנטי בתא, היכולה להתבטא בליקוי בתפקוד מערכות הגוף וברבייה, ועלולה לגרום לתורשה של פגמים לדור הבא. כפי שנידון בפרק 7.1, שכבת האוזון מגינה על החיים בכדור הארץ מפני קרני ה-UV הקטלניות בסופגה את רוב הקרינה בשכבות הגבוהות של האטמוספרה. אך במאה האחרונה התגלה כי שכבה זו מתדלדלת כתוצאה מפליטת גזים, שרובם תוצר של פעילות האדם. ברור כי פועל יוצא של התדלדלות שכבת האוזון הינו עליה בשיעור קרינת ה-UV המגיעה לפני כדור הארץ וגם חודרת לאוקיינוסים. עליה בקרינת ה-UV עלולה לפגוע אנושות באורגניזמים החיים על החוף וגם באצות החד-תאיות החיות בגוף המים (פיטופלנקטון), שלהן תפקיד חשוב ביותר בבסיס שרשרת המזון וגם באספקת החמצן לאטמוספרה. פגיעה ביצור הראשוני של אצות אלה יכולה לפגוע לפיכך בתפקודה של המערכת האקולוגית של הים הפתוח וגם באלו של אזורי החוף. גם האצות החיות בתוך אלמוגים יכולות להיפגע כתוצאה מחשיפת יתר ל-UV, ובכך להוות תרומה שלילית נוספת לתופעת ההלבנה.

מקורות לפרק זה

Bernal,P., Ferreira, B., Inniss, L., Marschoff, J.R., Rosenberg, A. and Simcock, A. 2017. Overall Assessment of Human Impact on the Oceans. In United Nations (Ed.), *The First Global Integrated Marine Assessment: World Ocean Assessment I* (pp. 935-944). Cambridge: Cambridge University Press. DOI:10.1017/9781108186148.064.

Caesar, L., McCarthy, G. D., Thornalley, D. J. R., Cahill, N. and Rahmstorf, S. 2021. Current Atlantic Meridional Overturning Circulation weakest in last millennium. *Nature Geoscience*, **14**:118-120.

Carugati, L., Gatto, B., Rastelli, E., Martire, M. L., Coral, C., Greco, S. and Danovaro, R. 2018. Impact of mangrove forests degradation on biodiversity and ecosystem functioning**.** *Scientific Reports* **8,** 13298**.** DOI: 10.1038/s41598-018-31683-0

Demuth, B. 2019. Floating Coast: An Environmental History of the Bering Starit. W.W. Norton & Company Copyright.

Estes, J.A., Tinker, M.T., Williams, T.M. and Doak, D.F. 1998. Killer Whale Predation on Sea Otters Linking Oceanic and Nearshore Ecosystems. *Science* **282**(5388):473-476. DOI: 10.1126/science.282.5388.473

Galil, B. S., Henk, K. M., Hoffman, R. and Goren, M. 2020. Non-indigenous species along the Israeli Mediterranean coast: tally, policy, outlook. *Hydrobiologia* **848**(9), 2011-2029. DOI: 10.1007/s10750-020-04420-w(012

Halpern, B.S., Frazier, M., Afflerbach, J., Lowndes, J.S., Micheli, F., O'Hara, C., Scarborough, C. and Selkoe, K.A. 2019. Recent pace of change in human impact on the world's ocean. *Sci Rep* **9,** 11609. DOI: 10.1038/s41598-019-47201-9

Hongdan, L., Xinfei, J., Weifei, W. and Chen, S. 2019**.** Evaluation and Research Analysis of Marine Ecological Suitability. *Journal of Marine Science*: **01**(02): 39-43.

Lewison, R.L., Crowder, L.B., Wallace, B.P. Moore, J. E., Cox, T. et al. 2014. Global patterns of marine mammal, seabird, and sea turtle bycatch reveal taxa-specific and cumulative megafauna hotspots. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **111**(14). DOI: 10.1073/pnas.1318960111

Rilov, G., Peleg, O. and Guy-Haim, T. 2019. The Restructuring of Levant Reefs by Aliens, Ocean Warming and Overfishing-Implications for Species Interactions and Ecosystem Functions. In: Interactions in the Marine Benthos. Edited by Stephen J. Hawkins , Katrin Bohn , Louise B. Firth , Gray A. Williams . Chapter 9.

Satir, T., Cengiz, D. and Beşikçi, E. B. 2011. Ship Waste Reception Facility Modeling: Istanbul Ports. DOI:10.7901/2169-3358-2011-1-99

Yeager, L.A., Estrada, J., Holt, K., Keyser, S.R. and Oke, T. A. 2020. Are Habitat Fragmentation Effects Stronger in Marine Systems? A Review and Meta-analysis. *Current Landscape Ecology Reports* **5**:58-67. DOI:10.1007/s40823-020-00053-w

בן מיכאל, ר. 2018. הים שלנו נחנק. זווית, סוכנות ידיעות למדע ולסביבה.

בן מיכאל, ר. 2020. אוקיינוסים על חום גבוה. זווית, סוכנות ידיעות למדע ולסביבה.

ברנע, א. וצמל, ע. 2015. היבטים ביולוגים בתכנית הימית לישראל

סגל, י. 2020. ניטור פסולת ימית, תכנית הניטור הלאומית בים התיכון לשנת 2019. דו"ח חיא"ל H22/2020.

פישמן, ע. 2017. כמה תהיו מוכנים לשלם כדי להציל את חוף הים? זווית, סוכנות ידיעות למדע ולסביבה. פורסם ב-13.12.2017.

פסטרנק, ג. 2019. זיהום הים בישראל: מקור, טיפול ומניעה. בדוח 'הערכה אסטרטגית ימית רבתי לישראל 2018/19. המרכז לחקר מדיניות ואסטרטגיה ימית, אוניברסיטת חיפה.

פסטרנק ג, שפניר א, אריאל א וצביאלי ד. 2020. שינויים בהרכב פסולת הפלסטיק בחופי הים התיכון של ישראל בשנים 2012-2018. אקולוגיה וסביבה 11 (3).

רוטשילד, א. ופדרמן, ר. 2012. מינים פולשים בישראל - תיאור הסיכונים והמלצות למדיניות מונעת. החברה להגנת הטבע.

רוטשילד, א. (ע). 2018. שמורות טבע ימיות- תיבות האוצר של הים התיכון. החברה להגנת הטבע.

שיינין, א. פ., צמל, ע., ברנע, אץ, אדליסט, ד., קלס, ק., גפן-גלזר, ע., היאמס, ל., פרלמן, י., יהל, רץ ואנרגט, נ. 2013. דוח מצב הטבע בים התיכון 2013. ירושלים: המארג, בחסות האקדמיה הישראלית למדעים.

שר,י. 2021. כשהים טובע. זווית, סוכנות ידיעות למדע וסביבה. פורסם ב-13.8.2021.

למידע נוסף

Albano, P. G., Steger, J., Bošnjak, M., Dunne, B., Guifarro, Z., Turapova, E., ... & Zuschin, M. 2021. Native biodiversity collapse in the eastern Mediterranean. *Proceedings of the Royal Society B*, *288*(1942): 20202469.

Bevilacqua, S., Katsanevakis, S., Micheli, F., Sala, E., Rilov, G., Sarà, G., ... & Fraschetti, S. 2020. The status of coastal benthic ecosystems in the Mediterranean Sea: evidence from ecological indicators. *Frontiers in Marine Science*, 7: 475.

Fraschetti, S., Fabbrizzi, E., Tamburello, L., Uyarra, M. C., Micheli, F., Sala, E., ... & Borja, A. 2022. An integrated assessment of the Good Environmental Status of Mediterranean Marine Protected Areas. *Journal of Environmental Management*, 305: 114370.

Garrabou, J., Gómez-Gras, D., Medrano, A., Cerrano, C., Ponti, M., Schlegel, R., ... & Harmelin, J. G. 2022. Marine heatwaves drive recurrent mass mortalities in the Mediterranean Sea. *Global Change Biology*.

Rilov, G. 2016. Multi-species collapses at the warm edge of a warming sea. *Scientific reports*, *6*(1): 1-14.

Rilov, G., Peleg, O., Yeruham, E., Garval, T., Vichik, A. and Raveh Ofrat. 2017. Alien turf: Overfishing, overgrazing and invader domination in south-eastern Levant reef ecosystems. *Aquatic Conservation: marine and freshwater ecosystems*, 28(2):315-369.

Rilov, G., Fraschetti, S., Gissi, E., Pipitone, C., Badalamenti, F., Tamburello, L., ... & Katsanevakis, S. 2020. A fast-moving target: achieving marine conservation goals under shifting climate and policies. *Ecological Applications*, 30(1): e02009.

Rilov, G., Peleg, O., Guy-Haim, T., & Yeruham, E. 2020. Community dynamics and ecological shifts on Mediterranean vermetid reefs. *Marine Environmental Research*, 160: 105045.

Rilov, G., David, N., Guy-Haim, T., Golomb, D., Arav, R., & Filin, S. 2021. Sea level rise can severely reduce biodiversity and community net production on rocky shores. *Science of the Total Environment*, 791: 148377.

Yeruham, E., Shpigel, M., Abelson, A., & Rilov, G. 2020. Ocean warming and tropical invaders erode the performance of a key herbivore. *Ecology*, 101(2): e02925.

14

שימור מול פיתוח בסביבה הימית

גיל רילוב

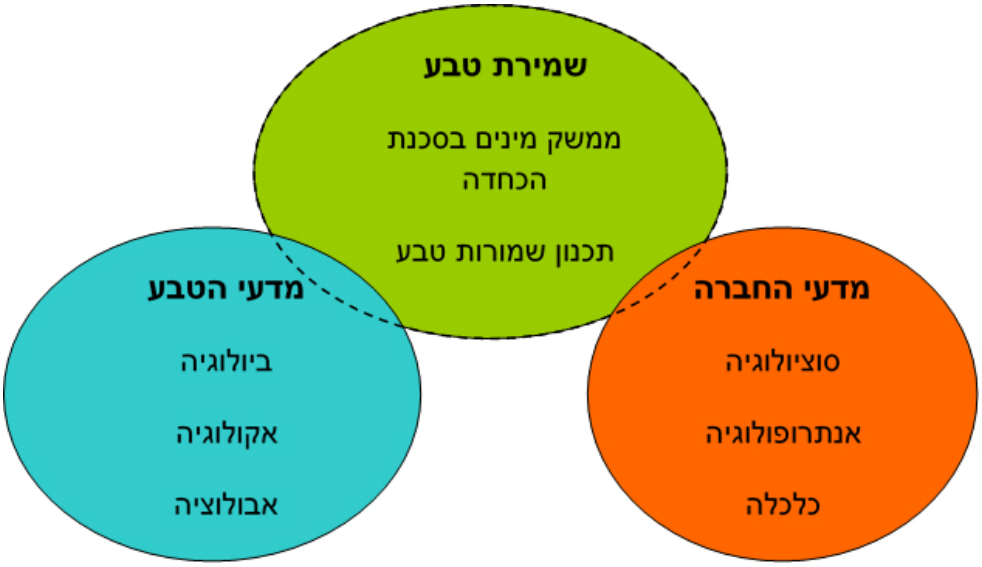
בפרקים הקודמים עסקנו בהכרת מושגי היסוד באקולוגיה כללית וימית, ערכנו הכרות עם הסוגים השונים של השפעות האדם על מערכות אקולוגית ימיות ועם היבטים שונים הקשורים לאיכות הסביבה הימית - כולל השפעות על האדם - וגם נגענו ספציפית בגורמים הפוגעים באיכות הסביבה של הים התיכון וחופי ישראל.

כעת נדון בדרכים בהן מנסים בני האדם להתמודד עם פתרון בעיות אלה. חשוב להבין כי על מנת לפתור את בעיות איכות הסביבה, ראשית יש להבין אותן היטב, ואז לפתח כלים מדעיים וטכנולוגיים להתמודד איתם. אך פיתוח כלים להתמודדות עם הבעיות הסביבתיות אינו מספיק. ללא נכונות של השלטונות והציבור להתמודד עם הבעיות וליישם את הכלים שפותחו בצורה נכונה בעזרת מדיניות ברורה וממשק (management) נכון, לא תהיה תוחלת לסביבה הימית, ולכן, לאורך זמן, גם לאיכות חיינו. בפרקים הבאים נלמד כיצד מנסה המדע להתמודד עם בעיות איכות הסביבה וכיצד רצוי לשלב את הידע המדעי עם ממשק ומדיניות נכונים.

14.1 מדע חדש: ביולוגיה של שמירת טבע

כפי שעשינו בפרקים הקודמים, נתחיל ראשית במדע. ואכן, בעשרים השנים האחרונות החל להתפתח ענף חדש במדע ושמו "**ביולוגיה של שמירת טבע**", או באנגלית **Conservation Biology**. המטרה המרכזית של מדע חדש זה הינה למצוא דרכים שיעזרו לשמור על המגוון הביולוגי של כדור הארץ. המשימות המרכזיות של מדע שמירת הטבע הן לספק את הכלים האינטלקטואלים והטכניים שיאפשרו לחברה האנושית לחזות, למנוע ולהפחית את הפגיעה האקולוגית, וליצר את הידע המדעי שעליו יתבססו התכנון והיישום של מדיניות השמירה. אם כך, הבסיס לשימור טבע נכון הוא עריכת מחקרים בסיסיים באקולוגיה בכדי להבין כיצד פועלות מערכות אקולוגיות.

תוכניות לשיקום ושימור של מינים יצליחו רק אם יהיו מבוססות על ידע של מהלך החיים ודרישות בית הגידול של מינים אלה. ממשק מערכות אקולוגיות צריך להיות מבוסס על הבנת התפתחות של חברות ותגובת האורגניזמים המרכזיים בחברה לדרגות שונות של הפרעות סביבתיות. תכנון מערך שמורות טבע צריך להיות מבוסס על ידע של הדרישות הבסיסיות של המינים בעלי טווח התפוצה הרחב ביותר; ידע על מיקום מסלולי הנדידה (או מעבר לרוות) העיקריים וחברות אקולוגיות נדירות; וידע על דגמי הפצה בין כתמים שונים. שיקום מערכות אקולוגיות פגועות דורש ידע על יחסי גומלין בין מינים, התוצאה של הפרעות קודמות, ואופיים של הכוחות העיקריים הפועלים על מערכות אלה.



איור 1

תחומי המחקר של שמירת טבע ושל התחומים הנושקים לה

כאמור, ידע אקולוגי נרחב אינו מספיק לשמירת טבע יעילה. חלק חשוב נוסף במדע שמירת הטבע הוא יישום הידע האקולוגי לבניית כלים לניטור מפגעים אקולוגים ומציאת דרכים להפחתתם, וכן לשיקום ולשימור של מינים ומערכות אקולוגיות. מדע שמירת הטבע הוא מדע רב-תחומי, הנושק לשני תחומי מדע נוספים וניזון מהם: מדעי הטבע ומדעי החברה (איור 1).

הפילוסופיה והאתיקה של שמירת הטבע

שמירת טבע הינו מושג שהתפתח במאה וחמישים השנים האחרונות. שלוש **אסכולות** פילוסופיות שונות עומדות מאחורי המוטיבציה לשמירת טבע, שתים התפתחו במאה התשע-עשרה ואחת במאה העשרים.

אתיקת שמירה רומנטית-רוחנית (Romantic-Transcendental Conservation Ethic) - אתיקה השאובה מכתביהם של פילוסופים אמריקאים כמו מויר (Muir), שדיברו באמצע המאה ה-18 על הטבע במושגים דתיים כמעט, וטענו שלטבע יש שימושים מעבר לאלה הכלכליים. הטבע לטענתם הוא מעין מקדש להתפעמות מיצירת האל, המאפשר התנקות וטיהור של נפש האדם הרחק מהמולת הציוויליזציה. מסיבות אלה, טען מויר, על האדם לשמור על הטבע במצבו הראשוני ולא לפגוע בו לצורך רווחים גשמיים וכלכליים. פילוסופיה זו הייתה הבסיס ליסודם של חלק מהארגונים הירוקים הקיימים עד היום.

אתיקת שמירת המשאבים – אתיקה שהפכה פופולרית בידי היערן פינשוט (Pinchot) בתחילת המאה העשרים. אתיקה זו מבוססת על ראיית הטבע כמכשיר המספק שירותים לשימוש האדם. פינשוט ראה רק 'משאבים' בטבע שסביבו, ולפיכך חילק בתפיסתו את הטבע למרכיבים שהיו מועילים, חסרי תועלת או מזיקים לאדם.

אתיקה
המונח אתיקה מגיע מהמילה היוונית ethos, מנהג. האתיקה היא תפיסה המתייחסת לעקרונות המוסר שלאורם עלינו לנהוג בכל מעשינו, בעיקר כשיש למעשינו השפעה על האחר.

אסכולה
קבוצה של אנשים החולקים באופן מובחן מאפיינים משותפים של רעיון.

זוהי נקודת מבט אנתרופוצנטרית (שממקמת את האדם במרכז הטבע) שבה הטבע משמש רק כמשאב להנעת המכונה הכלכלית, שתורמת לאיכות הגשמית של החיים. גישתו של פינשוט גורסת כי שימור הטבע נדרש בכדי לאפשר שוויון (פיזור הוגן של המשאבים בין משתמשים שונים, הן בהווה והן בעתיד)ויעילות, או העדר בזבוז. גישה זו הביאה ל**תפיסת השימושים הרבים** (multiple-use concept) של משאבי הטבע, שבארה"ב עדיין משמשת כבסיס ממשק משאבי הקרקע והמים. תחת תפיסה זו, יש לאפשר שימושים רבים על משאב מסוים. גישה זו כמובן עלולה ליצור קונפליקטים בין משתמשים שונים. למשל, נופשים וצוללים לעומת דייגים הרוצים ליהנות מדגי שונית האלמוגים; הראשונים מבחינה אסתטית (ולכן הדגים צריכים להישאר), והאחרונים לצורך פרנסתם (הדורשת הוצאת הדגים).

אתיקה אבולוציונית-אקולוגית – אתיקה שפותחה בידי הפילוסוף אלדו לאופולד במאה העשרים עם התפתחות המחקר האבולוציוני. לאופולד התחנך תחת הפילוסופיה של פינשוט, אך מאוחר יותר ראה אותה כבלתי מתאימה וכחסרה דיוק מדעי. התפתחות האקולוגיה והאבולוציה הראתה כי הטבע אינו פשוט אוסף של מרכיבים, שחלקם מועילים ומהאחרים ניתן להפטר, אלא מערכת מורכבת של גורמים ותהליכים הנמצאים בשיווי משקל עדין ותלויים זה בזה באיזון. התפיסה של שיווי-משקל אקולוגי התחלפה עם השנים בתפיסה הגורסת כי אי שיווי-משקל דינמי הוא המניע מערכות אקולוגיות. על פי אתיקה זו על האדם לשמר את **כל** מרכיבי המערכת ועל התהליכים המפעילים אותה. האתיקה האבולוציונית-אקולוגית היא הבסיס הפילוסופי העכשווי למדע שמירת הטבע.

למרות שנקודת המבט האבולוציונית-אקולוגית הינה הגיונית, מקיפה ומתאימה ביותר לשמירת טבע, מרבית שמירת הטבע כיום מבוססת על תערובת של שלוש גישות. רבים מהגופים האחראיים על ממשק משאבי טבע עדיין מונחים על ידי אתיקת שמירת המשאבים, בעוד שרבים מהגופים הירוקים מונעים בעיקר על ידי הגישה הרומנטית.

לרוע המזל, שימור טבע נעשה כיום על פלנטה שהמידע עליה מועט. למרות שכשני מיליון מינים תוארו עד היום על ידי האדם, ההערכה היא שבסך הכל קיימים כ-50 מיליון מינים על פני כדור הארץ. רוב מיני החרקים הקטנים, התולעים והיצורים החיים בקרקעית החולית של הים לא נמצאו ולא תוארו. טווח התפוצה הגיאוגרפי והדרישות האקולוגיות של מרבית המינים שכן תוארו אינם ידועים דיים. השכיחות של רוב המינים לא ידועה, כמו גם התנודות בגודל האוכלוסייה שלהם. בשל הקצב הגבוה בשינויים הסביבתיים, ביולוגים של שמירת טבע נדרשים לשים דגש על מחקרים היכולים לתת תוצאות משמעותיות בזמן קצר יחסית. לשם כך יש צורך להעמיד סדר עדיפויות למחקר המדעי, כך שיוכל לתת תשובות לשאלות סביבתיות לוחצות בזמן סביר. זאת, מבלי להתעלם מן הצורך בעריכת מחקרים ארוכי טווח לצורך הבנת תהליכים אקולוגים הפועלים בטווחי זמן ארוכים.

כאמור, מטרת מדע שמירת הטבע הוא להבין ולשמור על המגוון הביולוגי של כדור הארץ, אך בטרם נדון בדרכים לחקר שמירת הטבע חשוב להבין מה כולל המושג 'מגוון ביולוגי'. כמו כן חשוב להגדיר מה הן הכחדות של מינים, ולהבדיל בין הכחדות טבעיות (הדרגתיות והמוניות), והכחדות אנתרופוגניות - כלומר מעשה ידי אדם.

14.2 מגוון ביולוגי

באופן הפשוט ביותר, המגוון הביולוגי הוא מדד המתאר את מידת ה"בריאות" של הטבע. הוא כולל את כל רמות המורכבות האקולוגיות, מן הפרטים השונים באוכלוסייה, דרך מגוון המינים, ועד למגוון של מערכות האקולוגיות. המגוון הביולוגי עוסק בהרכב החברה, במבניה ובתפקודה. המושג עצמו, **מגוון ביולוגי**, **Biodiversity**, הוטבע לראשונה ב-1986 בכנס בנושא בעיר וושינגטון שבארה"ב. כעת נדון ברמות השונות של המגוון הביולוגי.

מגוון ביולוגי גנטי

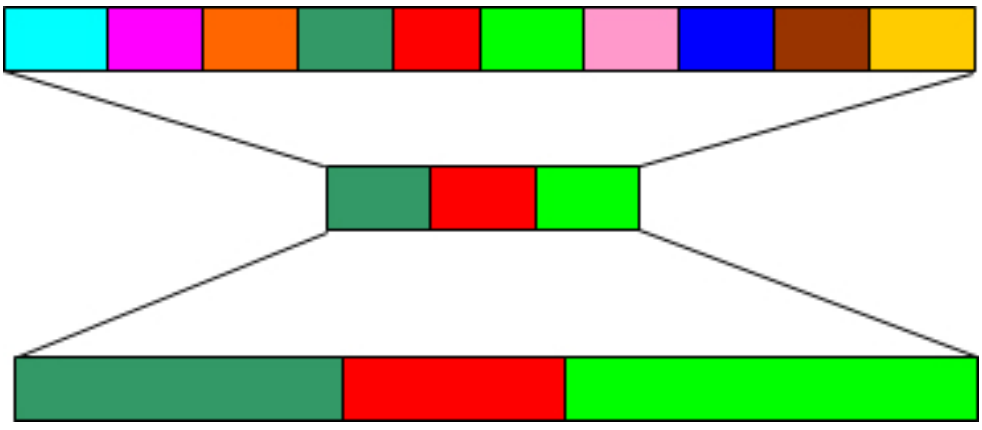
מושג זה מתאר את מידת השונות הגנטית בין הפרטים השונים של אוכלוסיית מין מסוים. ככול שהפרטים באוכלוסייה מסוימת דומים יותר גנטית זה לזה המגוון נמוך יותר ומצבה של האוכלוסייה פחות טוב.

מה פרושה של **שונות גנטית**? לשם כך נדרש רקע כללי ב**גנטיקה**, שאותו נסקור בקצרה להלן: פרטים בתוך אוכלוסייה יהיו לרוב שונים גנטית זה מזה. השונות הגנטית נובעת מכך שלפרטים השונים גנים השונים במעט זה מזה. הגנים הם יחידות על מולקולת ה-DNA , שרובן מקודדות את יצורם של חלבונים בתא. חלבונים אלה אחראיים על הביטוי של כל התכונות הפיסיות בגוף החי. לכל יצור מספר רב של גנים במולקולת ה-DNA, מכמה אלפים בחיידקים ועד למאות אלפים בצמחים ובעלי חיים. לכל גן האחראי לתכונה מסוימת, למשל צבע שיער, ישנן מספר וריאציות, הנקראות **אללים**, הגורמות לביטוי שונה של התכונה בפרטים שונים. אם כך, האללים הם צורות שונות של אותו הגן הנוצרות (כתוצאה ממוטציות) לאורך האבולוציה של המין. לדוגמא: בגן הקובע את צבע השיער באדם יש אלל לצבע שחור, אלל לצבע בלונד, אלל לצבע אדום וכו'. לכל פרט באוכלוסייה יש שני אללים לכל גן - אחד מהאם והשני מהאב. כאשר שני אללים שונים "נפגשים" בפרט מסוים קיימות מספר תוצאות אפשריות: אלל אחד יהיה השליט (**אלל דומיננטי**) והשני נשלט (**אלל רצסיבי**) ורק האלל הדומיננטי יתבטא. לדוגמא: האלל לצבע שיער שחור באדם דומיננטי על האלל לצבע בלונד ולכן, כאשר אדם מסוים מכיל את שניהם ב-DNA שלו, צבע השיער יהיה שחור. ישנם גם אללים שאין להם דומיננטיות ברורה והתוצאה (בשיער אדם) תערובת צבעים, או צבע ביניים. ישנם גם גנים בעלי מספר אללים רב (כלומר מספר רב של אפשרויות לביטוי של תכונה מסוימת), חלקם נפוצים באוכלוסייה ואחרים נדירים. כאשר נוסדת אוכלוסייה במקום חדש ומבודד (למשל אי) על ידי מספר מועט של פרטים, מספר האללים באוכלוסייה זו מן הסתם נמוך יחסית. לדוגמא, ביפן, המצויה על אי, לכל האוכלוסייה שיער שחור.

באירופה, שבה התערבבו במשך הזמן אוכלוסיות רבות ממקומות שונים, קיימים אנשים בעלי מגוון רחב של צבעי שיער. במהלך האבולוציה, כתוצאה ממוטציות (אקראיות), נוצרים עם הזמן אללים חדשים, חלקם טובים וחלקם מזיקים. רוב האללים המזיקים נעלמים עם הזמן, אך חלק מהם, שהנם נשלטים, יכולים להישאר חבויים באוכלוסייה מבלי לבוא לידי ביטוי. הסיבה לכך היא, שבכדי שהם שיוכלו לבוא לידי ביטוי, שניים מהם אמורים להיפגש באותו הפרט, וכיוון ששכיחותם נמוכה באוכלוסייה גדולה ונורמאלית, הסיכוי לכך נמוך ביותר.

אוכלוסיות בעלות מגוון גנטי רחב (מספר אללים רב) מצוידות טוב יותר להתמודדות עם תנאי סביבה משתנים לעומת אוכלוסיות בעלות מגוון גנטי מצומצם. הסיבה לכך היא שככל שהמגוון הגנטי רחב יותר, הפרטים באוכלוסייה שונים יותר זה מזה, ובהכרח עולה הסיכוי שכמה פרטים יהיו מותאמים לתנאים החדשים שייווצרו. אם כך, מגוון גנטי גבוה מהווה מעין ביטוח לחיות האוכלוסייה לטווח ארוך. במידה ותנאי הסביבה ישתנו בצורה קיצונית, באוכלוסייה מגוונת רב הסיכוי שמספר פרטים - אלה המותאמים לתנאים החדשים - יישרדו, וייסדו את הדורות הבאים באוכלוסייה. מגוון גנטי רחב חשוב מאוד גם להתמודדות עם מחלות ומגפות. כאשר המגוון רחב, עולה הסיכוי שמספר פרטים באוכלוסייה יהיו בעלי תכונות המגבירות את עמידותם למחלה. פרטים אלה יהוו את הגרעין שיאפשר את התאוששות האוכלוסייה בתנאים החדשים.

ככל שהאוכלוסייה קטנה יותר, המגוון הגנטי דל יותר, והעמידות לשינויים ולמחלות נמוכה יותר. באוכלוסיות קטנות, הפרטים המועטים מתרבים זה עם זה ושומרים על מגוון גנטי נמוך. לרבייה באוכלוסיות קטנות בעלות פרטים הדומים גנטית זה לזה, סכנה נוספת: עליה בסיכוי להתבטאות של מחלות גנטיות נדירות (הנגרמות בשל אללים מזיקים נשלטים) וירידה בפוריות. גם אוכלוסיות שהיו על סף הכחדה והתאוששו חשופות יותר לסכנות אלה למשך זמן רב יותר מאשר אותן אוכלוסיות לפני הירידה במספרן. לתופעה זו קוראים **"צוואר בקבוק גנטי"**. ניתן לתאר זאת כך: נדמיין אוכלוסייה של כלבי-ים בעלת 100 פרטים, כשכל עשרה פרטים דומים ביניהם (אך לא זהים) גנטית זה לזה יותר מאשר לקבוצות האחרות, כלומר בעלי אללים דומים רבים (פס עליון, איור 2). בעקבות ציד אינטנסיבי על האוכלוסייה נותרו כחמישה עשר פרטים משלוש קבוצות גנטיות (פס אמצעי באיור). לאחר שפסק הציד, הפרטים שנותרו מתרבים, ולאחר זמן חוזרת האוכלוסייה לגודלה המקורי, 100 פרטים. כיוון שעברה דרך "צוואר בקבוק" שבו המגוון הגנטי היה נמוך (3 מתוך 10 הקבוצות שרדו), האוכלוסייה החדשה (פס תחתון) היא בעלת מגוון גנטי נמוך יחסית לאוכלוסייה המקורית. אוכלוסייה זו תהיה רגישה יותר לשינויים סביבתיים. במשך מאות ואלפי השנים הבאות, אם תיעזב האוכלוסייה לנפשה, המגוון הגנטי ילך ויגדל בשל רבייה בין הקבוצות והצטברות מוטציות.



איור 2

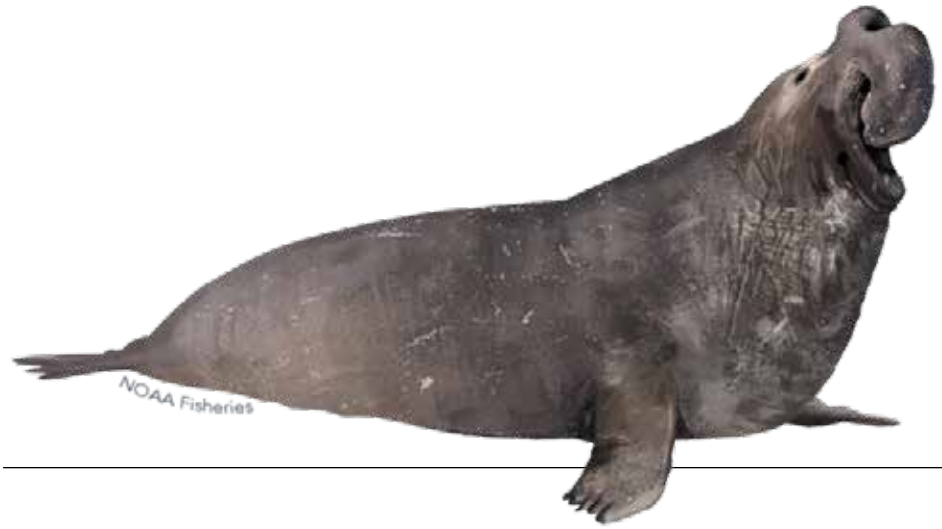
צוואר בקבוק גנטי באוכלוסייה. פס צבעים עליון - מיצג קבוצות גנטיות שונות באוכלוסייה המקורית. פס אמצעי - הקבוצות ששרדו לאחר הכחדה חלקית. פס תחתון - האוכלוסייה לאחר שגדלה, בה המגוון הגנטי נמוך יותר

איור 3

ליוויתן אובלנה צפון-אטלנטי (NOAA)

יונקים ימיים, שרבייתם איטית ושהיוו במשך שנים מטרה לציד אינטנסיבי, הם מועמדים טבעיים למעבר דרך צוואר בקבוק גנטי. אוכלוסיותיו של **ליוויתן האובלנה הצפון אטלנטית** (בלנה שחורה Right Whale, איור 3) מנו בעבר עשרות אלפי פרטים, עד לתחילת שנות ה 90 של המאה ה-19, אז הביא אותן ציד מסחרי אינטנסיבי לסף הכחדה. הלווייתן היווה מטרה אטרקטיבית וקלה במיוחד לציד, משום שהוא צורך את מזונו באמצעות סינון איטי של פלנקטון על פני המים. בנוסף, אחרי שהוא מומת, גופו צף על פני המים הודות לשכבת שומן עבה ומכאן גם שמו הלועזי, Right Whale - הליוויתן 'הנכון' לציד. נכון לסוף שנת 2018, מונה אוכלוסיית הליוויתנים הבוגרים ממין זה פחות מ-250 פרטים (מתוך מספר כולל של 409 פרטים), עם פחות מ 100 נקבות ממליטות, למרות שהציד על אוכלוסייה זו פסק כבר לפני עשרות שנים. הסיבות העיקריות למוות של פרטים ממין זה כיום הן לכידה בלתי מכוונת בציוד דיג והתנגשות בכלי שיט, אשר ביחד עם קצב רביה טבעי נמוך ומגוון גנטי שהצטמצם משמעותית בעקבות עשרות שנים של ציד, לא מאפשרים התאוששות של האוכלוסייה. בשנת 2020 עלה הליוויתן באופן רשמי מקטגוריית 'סכנת הכחדה' לקטגוריית 'סכנת הכחדה חמורה' ברשימה האדומה של האיגוד הבינלאומי לשימור הטבע (IUCN). מדובר בצעד האחרון לפני מעבר לקטגוריית "מין נכחד".

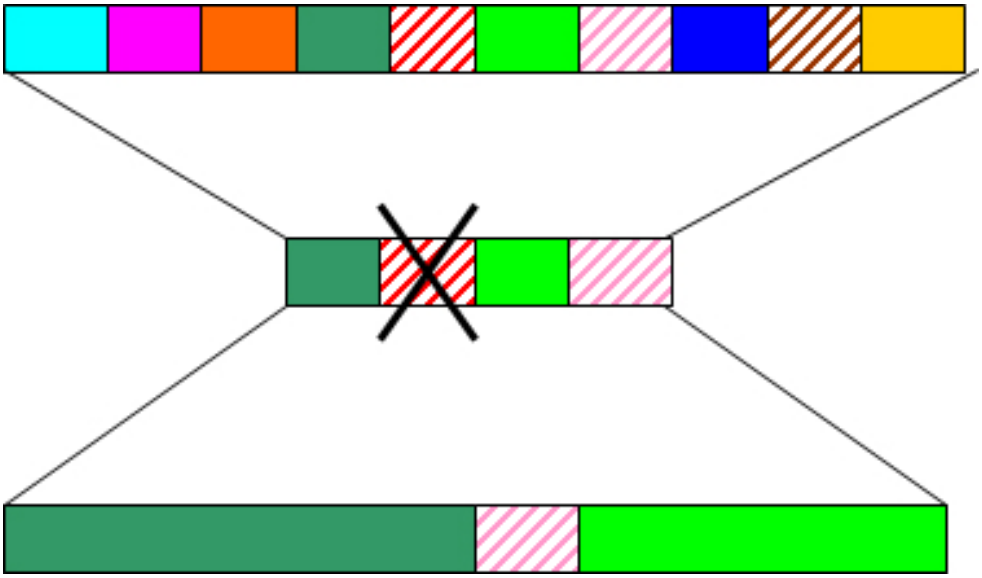
מין אחר של יונק ימי - **פיל הים הצפוני** (Northern elephant seal, איור 4) - עמד גם הוא לפני הכחדה, אך סיפורו שונה לחלוטין. אוכלוסיית פיל הים הצפוני, המצויה בחופיה המערביים של צפון אמריקה, מנתה עד למאה התשע-עשרה כחצי מיליון פרטים. ציד אינטנסיבי של פיל הים הביא להכחדה מוחלטת של המין ברוב האיים לאורך חופי היבשת ונותרו ממנו פחות מ-100 פרטים שהתרכזו על אי קטן בודד מול מקסיקו. מאז פסק הציד גדלה אוכלוסיית המין, ונוסדו מושבות חדשות לאורך חופי היבשת. כיום מונה האוכלוסייה כ- 170,000 פרטים; התאוששות מרשימה ביותר. "צוואר הבקבוק" לא פגע בכשר הרבייה של מין זה, אך המגוון הגנטי באוכלוסייה נמוך מאוד ומעמיד אותה בסכנה אם תנאי הסביבה ישתנו בצורה קיצונית (לדוגמא, עקב השתנות האקלים הגלובלי).



איור 4

פיל ים צפוני (NOAA)

יתכן כי ההבדל בכשר ההתאוששות של אוכלוסיות שני המינים קשור להיסטוריה של הכחדות קודמות של כל מין, ולהיבט נוסף, חיובי, של מעבר דרך צוואר הבקבוק. ברוב האוכלוסיות מצטברים גם אללים נשלטים נדירים בעלי השפעה שלילית היכולה לגרום למחלות או מוות אם יפגשו באותו הפרט. במהלך המעבר דרך "צוואר הבקבוק" של אוכלוסיות קטנות נכחדים רבים מן האללים השליליים המובילים למחלות ומוות. הסיבה היא שבאוכלוסייה קטנה גדל הסיכוי של זיווג קרובים (inbreeding). זיווג קרובים מגדיל את סיכוי המפגש של אללים מזיקים ובפרטים בהם נפגשים אללים אלה, באה המחלה לידי ביטוי והם מתים או שאינם מתרבים, ולכן אינם תורמים אללים מזיקים אלה לאוכלוסייה. לפיכך, אוכלוסייה ששרדה את צוואר הבקבוק "נקייה" יותר מאללים מזיקים וממחלות גנטיות (איור 5). חוקרים הציעו, שפילי הים עברו מספר "כמעט הכחדות" ו"צווארי בקבוק" באופן טבעי לאורך ההיסטוריה של המין וכך השתחררו ממרבית האללים המזיקים בגנים שלהם. לפיכך, האוכלוסייה המצומצמת של פיל הים הייתה כשירה יותר לעומת זו של הלוויתן הנכון, שכנראה עבר פחות הכחדות בעבר והאוכלוסייה שלו לכן מכילה יותר אללים מזיקים. אם אכן נכון הדבר, יתכן כי עובדה זו היא שאינה מאפשרת ללווייתן הנכון להיחלץ מצוואר הבקבוק.



איור 5

השתחררות של אוכלוסייה מאללים נשלטים מזיקים במהלך מעבר דרך צוואר בקבוק גנטי. הקבוצות הגנטית המקווקוות מכילות אללים שליליים היכולים להביא למחלות במידה ושניים יופיעו בפרט מסוים. עם התדלדלות האוכלוסייה, קבוצה אחת (חומה) נכחדה ושתים שרדו באוכלוסיית "צוואר הבקבוק". האדומה נכחדה לחלוטין כתוצאה מזווג קרובים. הוורודה שרדה דרך צוואר הבקבוק. אם תהיה "כמעט הכחדה" נוספת וייווצר "צוואר בקבוק" חדש, ישנו סיכוי רב שגם קבוצה זו תעלם. כך, במהלך מעבר דרך כמה צווארי בקבוק יכולה האוכלוסייה "להתנקות" מהאללים המזיקים

מגוון ביולוגי של מינים

מגוון ביולוגי של מינים הוא הפשוט ביותר להבנה ובמשמעותו כבר דנו בפרק 12 כאשר עסקנו במושגים עושר ומגוון מינים. התיאוריה אומרת שככל שמגוון המינים במערכת אקולוגית מסוימת גבוה יותר, המערכת יציבה ובריאה יותר. בכדי להוכיח זאת צריך לערוך ניסויים שבהם יוצרים בצורה מבוקרת צרופים שונים של מינים שבהם מספר מינים עולה באופן הדרגתי. מדדים לתפקוד המערכת ויציבותה יכולים להיות שיעור היצרנות הראשונית, עמידות להכחדה, עמידות לפלישת מינים אקזוטיים ועוד. מחקרים שנעשו בשנות התשעים הראו כי בצמחי שדה, היצרנות הראשונית והיציבות של המערכת גבוהה יותר ככל שמספר המינים רב יותר. גם במערכת סגורה המכילה מינים שונים של מיקרואורגניזמים החיים בשלולית הראו כי ככל שמספר המינים רב יותר תפקוד המערכת יציב יותר והצלחת הפלישה של מין טורף שמוסף למערכת, נמוכה יותר. בכדי לגלות אם ממצאים אלה אכן אוניברסאליים מנסים כיום לבדוק את השפעת מספר המינים על תפקוד של מערכות אקולוגיות נוספות.

חוקרים רבים טוענים כי המגוון הביולוגי גם מועיל לאדם. הכוונה בעיקר לחשיבותם של מיני צמחים ובעלי חיים המשמשים להפקת תרופות חדשות לסרטן, איידס ומחלות אחרות. כיום מושקעים מיליונים רבים בחיפוש מינים המכילים "חומרי טבע" שיכולים לשמש במחקר רפואי. רבים מן המינים הפוטנציאלים לשימוש הינם מינים קטנים או נדירים החבויים עמוק ביערות הגשם הטרופיים או במעמקי הים. קרוב לוודאי שבקצב ההכחדה המחושב הנוכחי, אנו מאבדים כמה ממינים אלה בכל שבוע. בכך אולי אובדים חומרים שיכולים היו להקל על סבלם של מיליוני בני אדם, עוד לפני שהתגלו כלל.

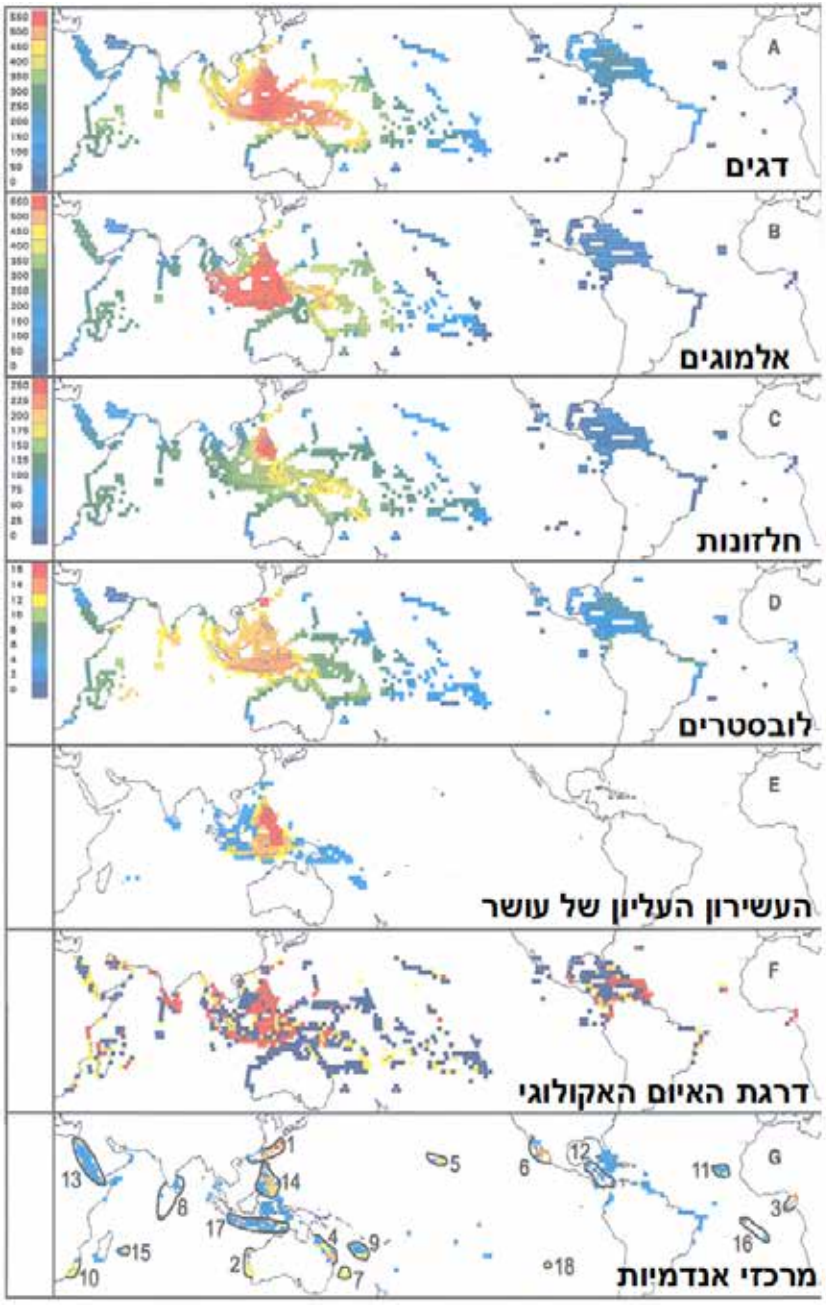
מגוון ביולוגי של חברות ומערכות אקולוגיות (אקוסיסטמות)

חברה ביולוגית מוגדרת על ידי המינים המאכלסים סביבה מסוימת ועל ידי יחסי הגומלין הקיימים בין מינים אלה. חברה אקולוגית, ביחד עם הסביבה הפיסית בה היא קיימת, היא המערכת האקולוגית. מגוון ביולוגי של אקוסיסטמות מתאר בעצם את מספר האקוסיסטמות באזור מסוים. כיוון שמערכות אקולוגיות מסוימות תלויות מאוד זו בזו, פגיעה במערכת אחת יכולה לפגוע גם במערכת אחרת. לדוגמא: מינים רבים של בעלי חיים המתגוררים כבוגרים בשונית האלמוגים מתגייסים תחילה כלרוות לשדות עשב-ים ושם הופכים לצעירים ומבלים ימים או שבועות בטרם נדידתם לשונית. במידה ויכחד שדה עשב-ים בסמוך לשונית ייעלמו מינים רבים מהשונית עצמה. כך גם הקשר הצמוד בין האקוסיסטמה של הים הפתוח ואלה של אזור החוף (השונית, החוף הסלעי, החוף החולי ועוד). כזכור, למינים רבים של יצורים החיים על החוף שלב חיים לארוולי פלגי. כמו כן, מינים רבים ניזונים על יצורים של הים הפתוח (פלנקטון) המתקרבים לחוף. פגיעה באיכות המים בים הפתוח יכולה לכן לפגוע ברבייה ותזונה של יצורים על החוף.

'נקודות חמות' של מגוון ביולוגי

המגוון הביולוגי משתנה ממערכת אקולוגית למשניה, ובין מערכות אקולוגיות דומות באזורים שונים בעולם. בקבוצות רבות של יצורים עושר המינים עולה מכוון הקטבים לעבר האזורים הטרופיים שליד קו המשווה. כיום גם מדברים על אזורים שמהווים '**נקודות חמות**' (Hot Spots) של מגוון ביולוגי. נקודות חמות הן מקומות בהם עושר המינים רב במיוחד, או אזורים בהם מספר **המינים האנדמיים** (מינים אשר תפוצתם מוגבלת לאזור מצומצם) גבוה. מטבע הדברים, אלה גם אזורים הראויים לתשומת לב מיוחדת בממשק שמירת טבע. בשנים האחרונות נעשה מאמץ לזהות את אותן נקודות חמות בבתי גידול יבשתיים וימיים.

ניקח לדוגמא את שונית האלמוגים, הידועה כמערכת האקולוגית העשירה ביותר במינים בממלכת הים. החוקרים קאלום רוברטס ועמיתיו ערכו בשנת 2002 סקירה אינטנסיבית של הספרות וחישבו את המגוון הביולוגי של מיני הדגים, האלמוגים, החלזונות והלובסטרים בשוניות האלמוגים ברחבי העולם (איור 6).
הם חישבו גם היכן מצויים האזורים בעלי מספר המינים האנדמיים הרב ביותר. מנתונים אחרים, הם דרגו גם את מידת האיום האקולוגי על ידי האדם באזורים השונים (כתוצאה מפיתוח, זיהום, דיג-יתר וכו'). תוצאותיהם מראות בבירור כי הנקודות החמות בארבעת קבוצות האורגניזמים שנבדקו מתרכזות באזור דרום-מזרח אסיה (פיליפינים, אינדונזיה, פפואה ניו-גיני, והאיים של האוקיינוס השקט) ומינים אנדמיים רבים קיימים גם באיים מרוחקים, ובאזור ים-סוף. במקביל, גם האיומים האקולוגים החמורים ביותר מתרכזים בדרום-מזרח אסיה. משמעות הדבר כי באזורים אלה יש לרכז את מרב המאמץ לשימור טבע.



איור 6

"נקודות חמות" של מגוון ביולוגי בשוניות האלמוגים ברחבי העולם. הסקלה משמאל בארבעת האיורים הראשונים מציינת בצבעים את מספר המינים

14.3 הכחדות (Extinctions)

הכחדת מינים היא תוצאה של מספר תהליכים: 1) אובדן, פיצול, וצמצום של בתי גידול טבעיים; 2) ניצול יתר; ו-3) שינויים סביבתיים ביבשה ובים (שינויי אקלים). על אלה יש להוסיף את השתנות המרכיב הגנטי, בעיקר באוכלוסיות קטנות או מבודדות, המשפיע לרעה על יכולת ההתמודדות עם קשיים סביבתיים. בסוגיית הכחדת המינים יש להבחין בין הכחדה טבעית ובין הכחדה אנתרופוגנית. **הכחדות טבעיות** התרחשו מאז ומתמיד ומוסיפות להתרחש כל העת, כחלק של אבולוציית החיים בכדור הארץ. כאשר מדובר על היעלמות של מין מאזור מסוים בלבד, זוהי **הכחדה מקומית** ובמקרים בהם נעלם המין מעל פני כדור הארץ, זוהי **הכחדה עולמית**.

הכחדה טבעית

הכחדה טבעית יכולה להתרחש בשני אופנים:

הכחדת רקע או **הכחדה הדרגתית** - היעלמות הדרגתית של מינים עקב שינויים סביבתיים הדרגתיים. עדויות מהמאובנים מצביעות על כך שמשך הקיום הממוצע של מין על פני כדור הארץ הוא 1-10 מיליוני שנה. לפיכך, אם מספר המינים המשוער בכדור הארץ הוא בסדר גודל של 10 מיליון, הרי שמידי שנה נעלם מין אחד בהכחדת רקע.

הכחדה המונית (mass extinction) - פירושה כיליון של מספר גדול של מינים, בזמן קצר יחסית, עקב אסונות טבעיים כמו התפרצות הר געש, הוריקנים ופגיעת מטאורים. הכחדה המונית יכולה להיות מקומית או עולמית, כתלות בעוצמתה ובהיקפה הגיאוגרפי. גם העדויות להכחדות המוניות באות מן המאובנים. ידוע כי הכחדות המוניות התרחשו בין העידנים פליאוזואיקון למזוזואיקון (בין תקופות הפרם והטריאס), וגם בין המזוזואיקון לקנוזואיקון, בשלהי הקרטיקון לפני כ-65 מליון שנה, עת נכחדו כל הדינוזאורים מעל פני האדמה (איור 7). אחת התיאוריות המובילות כיום בניסיון להסביר הכחדות המוניות טוענת כי מטאורים או שביטים גדולים פגעו בכדור הארץ בתקופות אלה, העלו ענני אבק אל האטמוספרה שהסתירו את קרינת השמש, וכך הורידו את כמות האור והטמפרטורות בכדור הארץ. שינויים אלה פגעו בשרידות וגידול צמחים, כך גם ביצורים הניזונים עליהם, ובסופו של דבר גם בטורפים. אסונות כאלה היו מלווים גם בשריפות ענק וגלי גאות אדירים ששטפו שטחי יבשה עצומים.

איור 7

אירועי הכחדות המוניות במהלך 500 מיליון השנים האחרונות של הפרה-היסטוריה, הסיבות המשוערות להכחדה ושעור % המינים שנכחדו

הכחדה אנתרופוגנית

הכחדות אנתרופוגניות הן הכחדות מעשה ידי אדם. יכולות להיגרם על ידי כל אחד מסוגי ההשפעות האנתרופוגניות בהם דנו בפרקים הקודמים: ניצול-יתר, זיהום, אובדן ופיצול בתי גידול ושינויי אקלים גלובליים. כל אלו גורמים לצמצום גודל האוכלוסייה ומגבירים את הסיכוי להכחדה.

תאונה דמוגרפית

אחת מדרכי ההכחדה האנתרופוגנית היא סידרת תהליכים דמוגרפיים המתרחשים באוכלוסיות שנותרו קטנות עקב ניצול-יתר או צמצום בית הגידול והתפצלותו ליחידות קטנות. פרבולוצקי מכנה הכחדה כזו '**תאונה דמוגרפית**' והיא יכולה לנבוע משתי סיבות:

1. באוכלוסיות קטנות מאוד עלולה להתרחש **הכחדה אקראית** (stochastic extinction). הכחדה זו נובעת משינויים אקראיים בשיעורי הילודה והתמותה, שבמקרים מסוימים עלולים להביא להעדר דורות חדשים באוכלוסייה והיעלמותה. באוכלוסיות קטנות גדל גם הסיכוי כי היחס בין הזוויגים יהיה שונה בצורה משמעותית מ-50:50, עובדה היכולה להקטין את ההסתברות לרבייה מוצלחת, ולהגדיל לכן את הסיכוי להכחדה אקראית. ההסתברות להכחדה אקראית של אוכלוסייה פוחתת ככל שהאוכלוסייה גדולה יותר.

2. הצטמצמות השונות הגנטית באוכלוסיות קטנות, הגורמת לעלית הסיכוי להכחדה עקב שינויים סביבתיים, ולזיווג קרובים שיכול להביא למחלות ומוות. חשוב לזכור, כי למרות ההיגיון בקיומן של הכחדות בשל תאונה דמוגרפית מסיבות גנטיות, לא נמצאה עד כה אף לא דוגמא אחת של הכחדה מסיבה זו בטבע.

הרגישות של מינים ל"תאונה דמוגרפית" תלויה בהיסטורית החיים של המין. ההכחדה תארך זמן רב יותר במינים:

- בעלי שיעור גבוה של רבייה או גיוס צעירים, המסוגלים לכן להתאושש מהר מפגיעה סביבתית
- בעלי משך חיים ארוך שסיכוייהם להיכחד בשנה מסוימת בגלל "תאונה" גנטית קטנים יחסית
- בהם ישנן תנודות קטנות בלבד בגודל האוכלוסייה לאורך זמן
- אשר להם כושר הפצה רב, או בעלי טווח ביו-גיאוגרפי רחב, יהיו רגישים פחות להכחדות

פלישת מינים אקזוטיים יכולה גם היא לגרום להכחדות מקומיות. אקולוגים רבים טוענים כי סביבות יציבות יותר נתונות פחות לפלישות של מינים אקזוטיים. למשל, בשונית אלמוגים, שהיא מערכת אקולוגית יציבה (התנאים הסביבתיים בה קבועים יחסית), ידועים מקרים מועטים של פלישות לעומת מערכות ימיות אחרות, יציבות פחות, כמו החוף הסלעי. כמו כן, ישנה עדות ברורה לכך שמינים פולשים נפוצים מאוד בסביבות מופרעות ונדירים בסביבות טבעיות, יציבות, שלא נפגעו על ידי האדם.

ישנן הערכות שונות לגבי מספר המינים שכבר נכחדו על ידי האדם במהלך מאות השנים האחרונות. סביר גם להניח כי מינים רבים, קטנים או נדירים נכחדו כתוצאה מהרס בתי גידול או מזיהום עוד בטרם התגלו. חוקרים לא מעטים טוענים שאנחנו נמצאים כרגע בעיצומה של הכחדה המונית נוספת - ההכחדה השישית, כתוצאה של פעילות האדם. חוקרים מארצות הברית ומצרפת מצאו במחקר חדש כי אחוז המינים שנכחדו במאות האחרונות גדול מזה שהערכנו בעבר - משום שרוב המחקרים התבססו על הרשימה האדומה של הארגון הבינלאומי לשימור הטבע (IUCN), אשר מתמקד ביונקים ובעופות, והזניחו את חסרי החוליות, אשר לגביהם אין לארגון נתונים מספקים כדי לקבוע את מידת הסכנה הנשקפת להם. החוקרים התמקדו בקבוצה אחרת של חסרי חוליות - הרכיכות, הכוללת את הצדפות, החלזונות, התמנונים ועוד. היות שלרבות מהרכיכות יש צדפות, שנשארות זמן רב לאחר מות הרכיכה עצמה, קל יחסית לעקוב אחריהן ולמצוא ראיות גם למינים שנכחדו לפני מאות שנים. מתוך מחקרים שהם ואחרים ביצעו על הכחדה של רכיכות, הם מעריכים שבין 10 ל-17 אחוזים ממיני חלזונות היבשה נכחדו מאז שנת 1500, מספר גבוה לפחות פי 10 מהערכת ה-IUCN. מספרים אלו מבטלים כל ספק, כך אומרים החוקרים, שאנחנו עומדים לפתחה של ההכחדה השישית.

אתגרים ומשימות של מדע שמירת הטבע

כזכור, מדע שמירת הטבע הוא מדע צעיר. בהיותו כזה, עוד לא גיבש לחלוטין את זהותו ואת מטרותיו. בשנת 2000 התפרסם ספר בשם "ביולוגיה של שמירת טבע - סדר עדיפויות למחקר בעשור הבא" בעריכת מייקל סולה (Soulé), אחד מראשוני ובכירי החוקרים העוסקים בביולוגיה של שמירת טבע, ועמיתו גורדון אוריאנס. בספר זה ריכזו העורכים מאמרים של חוקרים רבים המציגים מעיין סיכום ביניים של מצב המחקר בתחום, והמלצות לפעולה בעתיד. המלצות אלה אמורות לעזור ולקדם את המחקר ולהגביר את שיתוף הפעולה בין המדענים לבין העוסקים בממשק שמירת הטבע. בין תחומי המחקר והאתגרים שזיהו החוקרים נמנים:

1. זיהוי וממשק של מינים בסכנת הכחדה.
2. חקר שינויים אנתרופוגנים של מארגי מזון, ופיתוח של מדיניות שימור אקוסיסטמות.
3. הבנת האקולוגיה של אינטרודוקציות, ופיתוח כלי ממשק למניעה והתמודדות עם מינים פולשים.
4. שינוי סביבתי עולמי (למשל התחממות גלובלית), והשפעותיו על המגוון הביולוגי.
5. פיתוח דרכים לבחירת אסטרטגיות שימור נכונות.

כותרת אחד הסעיפים ברשימתם של סולה ואוריאנס היא: **אוקיינוסים בסכנה: סדרי עדיפויות במחקר של שמירת טבע ימית.** תחת כותרת זו נמנים כל אותם מחקרים בסיסיים הכוללים הבנה של מגוון המינים בים, הבנת האיומים הניצבים בפני מגוון זה והפעולות הנדרשות לשמירת המגוון בים, כולל שמורות טבע. סעיף אחר בספר עוסק בשיקום אקולוגי כמפתח לעתיד שמירת הטבע. בנושאים אלה נדון בהרחבה בפרק נפרד העוסק בשימוש בשמורות טבע ימיות ושוניות מלאכותיות כאמצעים לשימור אקולוגי ולשיקום של בתי גידול ימיים פגועים. בפרק הנוכחי נדון בהרחבה בסעיפים 1- מינים בסכנת הכחדה, ו-5- אסטרטגיות שימור, ובקצרה גם בסעיפים האחרים הרשומים למעלה.

זיהוי וממשק של מינים בסכנת הכחדה

המשימה הראשונה העומדת בפני חוקרי שמירת טבע היא **לזהות את המינים ובתי הגידול המצויים בסכנה הגדולה ביותר.** יש לברר את שכיחות ודגמי התפוצה של מינים החשודים כנתונים בסכנת הכחדה על מנת שניתן יהיה לתכנן את אופי השמירה עליהם. כמו כן על החוקרים לזהות, למקם ולכמת את **הגורמים והתהליכים המאיימים** על מין ספציפי, או על אזורים בעלי ערך גבוה של מגוון ביולוגי ("נקודות חמות"), כפי שראינו בדוגמא של שונית האלמוגים. זיהוי זה של אזורים רגישים מהווה מרכיב חשוב בתכנון נכון של שמורות טבע. היבט חשוב נוסף הוא מעקב אחר הדרך בה עשויים מינים בסיכון להתמודד עם שינויים בסביבה המתרחשים עקב פעילות האדם, כמו היעלמות חלקים נרחבים מבית הגידול, עליה בטמפרטורת מי הים, או שינויים עתידיים בזרמי האוקיינוס.

←

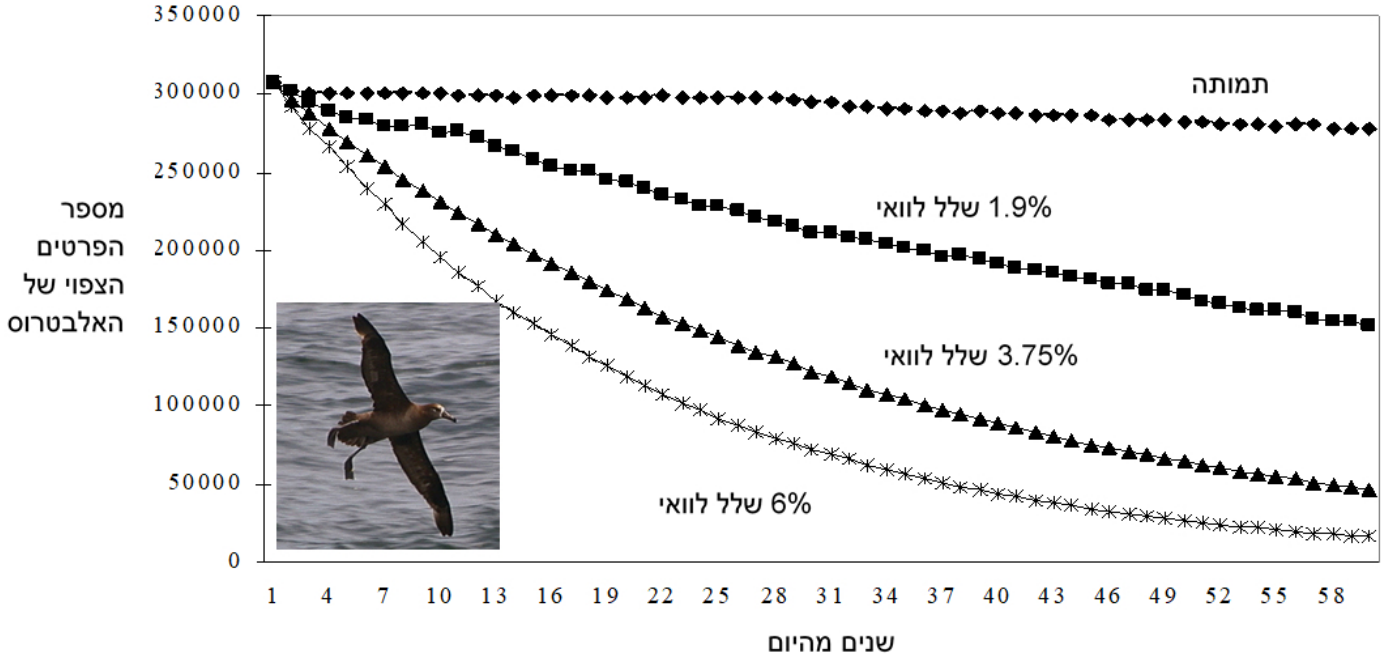
ברור כי למינים מסוימים - למשל, אלה בעלי כושר תפוצה נרחב - פוטנציאל גדול יותר להתמודדות עם שינויים לעומת מינים אחרים. חשוב ביותר גם להעריך את יעילותן של אסטרטגיות ממשק שונות בשמירה על מין ספציפי או מגוון ביולוגי.

מודלים מתמטיים ממוחשבים מהווים היום כלי חשוב לחיזוי גורל אוכלוסייה או מין מסוים החשופים לאיום אקולוגי. מודלים סטטיסטים המחשבים את ה**חיוניות** הפוטנציאלית של אוכלוסייה מסוימת (analysis viability population - או PVA) משמשים להערכת מידת עמידות אוכלוסייה מסוימת בתנאי סביבה מסוימים ותחת לחץ אנתרופוגני מסוים. הם גם מאפשרים לזהות את השלבים במחזור החיים שהינם קריטיים ביותר לשרידות האוכלוסייה (למשל, צעירים או בוגרים מתרבים). חיזוי טוב יכול לסייע לממשק מתאים, כלומר, לקבוע היכן כדאי להשקיע את מרב מאמצי שימור ושיקום מין המצוי בסכנת הכחדה. במודלים מכניסים למשוואות את שיעור הילודה והתמותה של שלבים שונים במחזור החיים של המין, כפי שנמדדו או הוערכו בשטח, ומחשבים את גודל האוכלוסייה הצפוי בעוד עשר, חמישים או מאה שנה בתנאי סביבה וממשק שונים העלולים להשפיע על גורמים דמוגרפים אלה. לדוגמא, על פי חישוב גודל אוכלוסיית **דג החרב** באוקיינוס האטלנטי בעוד שלושים שנה - ובמידה ולחץ הדיג ימשיך כשיעורו היום (100%)–והאוכלוסייה תקטן בשיעור של 50% או 0. לשם כך נחוצים נתונים על גודל האוכלוסייה והרכב הגילים שלה, ומידע על שיעור הרבייה והתמותה (הטבעית והאנתרופוגנית) בה. כאשר נתונים אלה אינם ידועים במדויק יש לבחון את תוצאות המודל תוך שימוש בצרופים שונים של גודל אוכלוסיה התחלתי ושל קצבי רבייה ותמותה שונים. המודל יספק, לפיכך, מספר הערכות לחיוניות האוכלוסייה. ככל שגדל חוסר הוודאות בנכונות נתונים המוזנים במודל, רצוי להשתמש בערך הפסימי ביותר כנקודת מוצא, בכדי להיות בטוחים שהאוכלוסייה תישמר. ברור כי אף מודל מתמטי אינו מסוגל לחזות את העתיד במדויק - במיוחד בשל העובדה שלאוכלוסיות רבות תנודות טבעיות גדולות, ולאור התחזיות על שינויים מרחיקי לכת באקלים העולמי ועל עליה בתדירות סערות היכולות לגרום אסונות טבע - אך מודלים מאפשרים לבחון את טווח האפשרויות העומדות בפני האוכלוסייה.

להלן שתי דוגמאות לחישובי חיוניות של אוכלוסיות מינים המצויים בסכנת הכחדה בהיותם שלל-לוואי במשק הדיג:

אלבטרוס שחור-רגל. עוף ים המצוי ברחבי האוקיינוס השקט. האלבטרוס מקנן על איים מרוחקים וניזון בעיקר על דגים ודיונונים בים הפתוח. המין חשוף לסכנות אקולוגיות רבות, כשבשנים האחרונות המרכזיות שבהן הן: תמותת בוגרים על קרסי דיג של מערכי חכות צפים (Longline) כאשר הם מנסים ללכוד את הפיתיון (דיונונים) באוויר או עם כניסתו למים, נתפסים על הקרס וטובעים; ותמותת צעירים בקינים, כתוצאה מזיהום מצטבר (במזון) ובליעת פסולת פלסטיק. גודל האוכלוסייה כיום מוערך ב-30,000 פרטים. חישובי PVA, שנעשו באוניברסיטת די וק (ארה"ב) לאלבטרוס, מראים כי תמותה כתוצאה מאובדן של צעירים בקינים אינה צפויה להשפיע רבות על גודל האוכלוסייה ב-60 השנה הבאות.

לעומת זאת, תמותת אלבטרוס בחכות ה-Longline בכל שיעורי שלל-לוואי שחושבו תביא לאורך זמן לקריסת האוכלוסייה; בשיעור של 6% תמותה לשנה, תתרחש התמוטטות מוחלטת של אוכלוסיית המין בפרק זמן זה (איור 8).

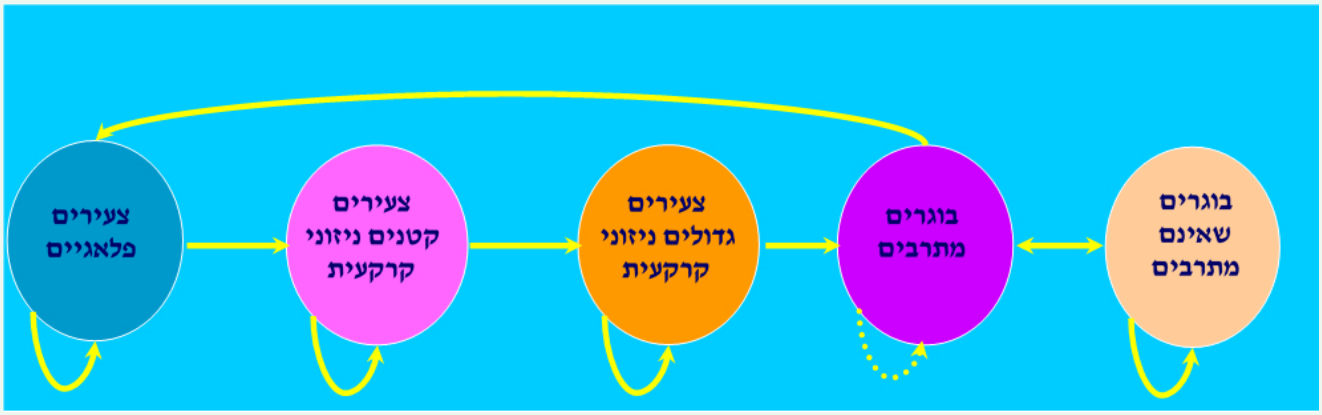


איור 8

אלבטרוס שחור-רגל בתעופה (מסגרת), וחישובי PVA הצופים את גודל האוכלוסייה של האלבטרוס בשישים השנים הבאות תחת איומי תמותה שונים (תמותה בקינים או כמרכיב בשלל)

צב הים החום (Turtle Sea Loggerhead). נקבות צב הים החום, ככל צבי הים, מטילות את ביציהן על החוף. הצעירים הבוקעים שוחים אל הים ומבלים את שנותיהם הראשונות בים הפתוח (צעירים פלאגים) ושם ניזונים. לאחר מכן הם מתקרבים אל החוף וניזונים בעיקר על יצורי קרקעית. צעירים אלה גדלים באזור החוף עד הפיכתם לבוגרים הנודדים בים וחוזרים אל החוף מידי כמה שנים לצורך רבייה (מחזור חיים זה מוצג באיור 9). מעט יחסית ידוע על העובר על הצבים בים הפתוח ועל שיעורי התמותה של צעירים שם. צב הים הקרני מצוי כיום בסכנת הכחדה וחשוף לאיומים שונים: הצעירים הגדולים והפרטים הבוגרים חשופים בעיקר לקטל בתוך רשתות מכמורתנים של דיג חסילונים המתנהל סמוך לחוף. צעירים פלאגים וצבים נודדים חשופים לקטל בעיקר על קרסי דיג מערכי חכות צפים. כמובן שגם זיהום כימי ופסולת צפה מהווים סכנה למין זה. השאלה הנשאלת היא איזה מן השלבים במחזור החיים הם קריטיים יותר לשימור אוכלוסיית המין. כלומר, היכן במחזור החיים פגיעה באוכלוסיה תהיה מסוכנת יותר? האם בשלב הצעירים הפלאגים? בשלב הצעירים הגדולים? או בשלב הבוגרים המתרבים?

אחת הדרכים להפחית את תמותת הצבים ברשתות המכמורתנים היא שיטה המאפשרת לצבים להשתחרר מן הרשת בעת גרירתה על הקרקעית. זהו מעין כלוב או מחסום עשוי משלבי מתכת הנקרא **מתקן לחסימת צבים** (TED - turtle exclusion device), המאפשר מעבר שלל המטרה (בעיקר חסילונים) אל תוך הרשת, אך חוסם את הדרך בפני הצבים ומנתב אותם אל פתח מילוט תחתון.



איור 9

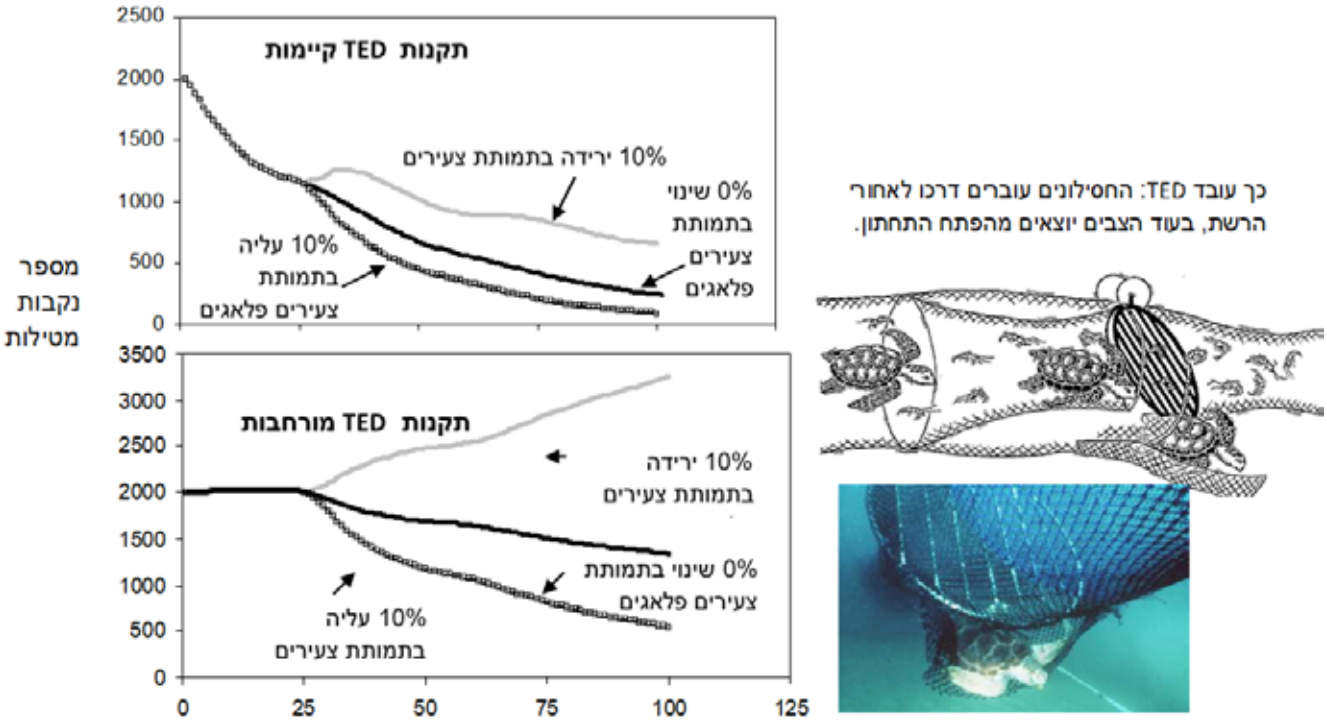
מחזור החיים של צב ים. החיצים מתארים את גורל הפרטים משנה לשנה בכל שלב חיים

חוקרים באוניברסיטת דיוק מנסים לחזות את הגורל הצפוי לאוכלוסייה בחופיה המזרחיים של ארה"ב (מספר הנקבות המטילות משמש כמדד לבריאות האוכלוסייה) תחת רמות שונות של ממשק: הורדת שיעור הקטל בדיג החכות הצפות (בעיקר צעירים פלאגים) ומכמורתנים (בעיקר בוגרים). חושבה חיות האוכלוסייה לאורך 60 שנה במידה ותמותת צבים צעירים תעלה או תרד ב-10%, או תישאר ללא שינוי, בשילוב עם תקנות ה-TED הקיימות לדיג מכמורת, או עם אכיפת תקנות TED מורחבות (TED גדולים ויעילים יותר). תוצאות ה-PVA מראות (איור 10), כי אף עם תקנות ה-TED הקיימות כיום, תוך 100 שנה יקטן מספר הנקבות המטילות בחצי, גם אם תרד תמותת הצעירים הפלאגים בעשרה אחוז. לעומת זאת, האוכלוסייה תגדל ביותר מ-50% בשילוב של ירידה בתמותת צעירים ובוגרים (תחת תקנות TED מורחבות) כאחד. ללא שינוי בתקנות ה-TED, ועם עליה מועטה בתמותה הצעירים בדיג החכות הצפות תקרוס האוכלוסייה ותעלם תוך מאה שנה.

בכדי לדעת אם אוכלוסייה או מין מסוים מסוגלים להתקיים לאורך זמן, יש צורך לחשב את גודל האוכלוסייה המינימאלי המאפשר את חיוניות המין: **אוכלוסייה מינימאלית בת-קיום** (Minimum Viable Population - או **MVP**). החוקר שאפר (Shaffer) הגדיר ב-1981 אוכלוסייה מינימאלית בת-קיום כך:

MVP - גודלה המינימאלי של אוכלוסייה מבודדת בעלת סיכוי של 99% לשרוד למשך 1000 השנים הבאות, אפילו לנוכח שינויים דמוגרפיים, סביבתיים, וגנטיים אפשריים, וקטסטרופות טבעיות.

אפשר כמובן להגדיר MVP בעל ערכים שונים מאלה. יש הגורסים שגודל האוכלוסייה המינימאלי למניעת זיווג קרובים אצל בעלי חיים גדולים הוא 50 פרטים, ולשמירת השונות הגנטית דרושים 500 פרטים לפחות. גם כאן, בכדי לחשב MVP על החוקר לדעת פרטים רבים על התהליכים הדמוגרפים ומהלך החיים של המין הנחקר.



איור 10

PVA של צב-הים הקרני בשיעורי שלל-לוואי שונים בדיג ה-Long line (תמותת צעירים בשיעורים שונים) ודיג מכמורת (תמותת בוגרים תחת תקנות TED קיימות ומורחבות)

שלב נוסף הוא לחשב את **גודל בית הגידול** הנדרש על מנת לקיים את ה-MVP. זהו **האזור הדינמי המינימאלי** (**MDA** - Minimum Dynamic Area). מידע על גודל ה-MVP יכול לעזור בתכנון של שמורות טבע, אך גם כאן, החישוב המעשי של ה-MDA קשה ביותר ודורש ידע נרחב על הביולוגיה והאקולוגיה של המין. לגבי מינים ימיים רבים שלהם מהלך חיים מורכב הכולל שלב לרוואלי פלגי, או כאלה הנודדים בכל רחבי האוקיינוס, גודל ה-MDA הראלי יכול להיות עצום ובלתי ניתן לממשק יעיל.

שאלה חשובה העומדת בפני המדענים היא מה קובע את כושר ה**הדירות** (resilience - יכולת האוכלוסייה לחזור למצבה הקודם, אחרי הפרעה) של אוכלוסיות, חברות או אקוסיסטמות שונות. כיצד כושר זה קשור לבידוד גיאוגרפי, עושר מינים, מורכבות מארג המזון, נוכחות מינים פולשים, ותפקוד מיני מפתח. כמו כן, חשוב לזהות מה מאפיין מינים עמידים לעומת מינים שהם רגישים לסכנת הכחדה. כפי שכבר הוזכר קודם, מהלך החיים והאקולוגיה של יצורים שונים יכולים להפוך אותם לרגישים יותר, או פחות, לאיומים סביבתיים. האם ניתן לזהות אזורים בהן קיימות אוכלוסיות **מבלע** וכאלה בהם קיימות אוכלוסיות **מקור**? זיהוי כזה יכול לסייע בתכנון שמירה אפקטיבי יותר של מין מסוים. למשל, אם מין של דג דקר מצוי בסכנת הכחדה, חשוב להגן על אוכלוסיות המקור שלו בהן הרבייה רבה, ובמיוחד על אזורים בהם מתרכזים הדגים הבוגרים לצורך רבייה. רק אם אזורים אלה יהיו מוגנים, יש למין סיכוי לשרוד.

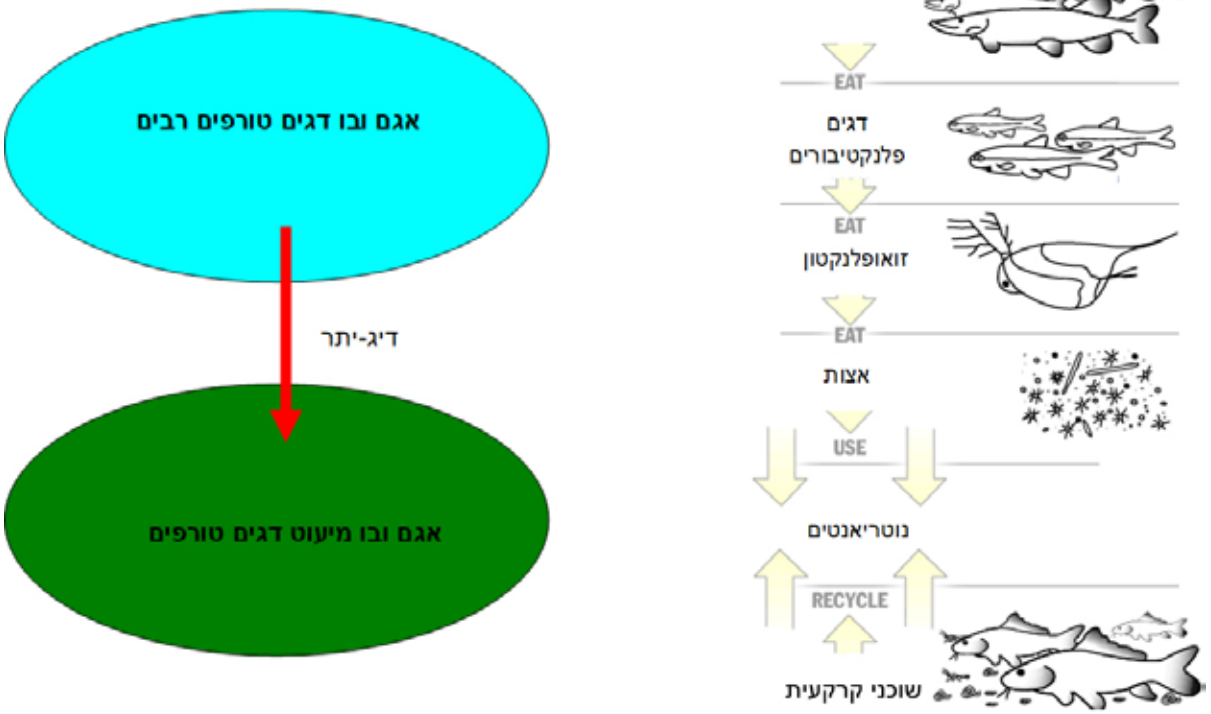
השפעות אנתרופוגניות על מארגי מזון, ושימור מערכות אקולוגיות

קיימות דוגמאות רבות בטבע על שינויים מרחיקי לכת במבנה מארגי מזון ומערכות אקולוגיות עקב השפעות אנתרופוגניות. העשרת יתר בנוטריינטים מגדילה את בסיס מארג המזון (בים: הפיטופלנקטון) וברמות זיהום גבוהות גורמת להשתלטות של מינים אופורטוניסטים, ולעיתים רעילים. ציד ודיג-יתר גורמים לפגיעה בטורפי-על, כגון כרישים ויונקים ימיים, ובכך יכולים להגדיל ישירות את כמות הצמחונים (שהשתחררו מלחץ הטריפה), בצורה עקיפה להגדיל את לחץ הרעיה ולפגוע כך ביצרנים, כפי שראינו ביערות הקלפ של צפון אמריקה עם העלמות לוטרות הים. פלישה של מינים צמחוניים או של טורפי-על יכולה גם היא לשנות את מארג המזון ואת המערכת האקולוגית בצורה קיצונית. דוגמאות לכך נמצאו למשל באגמים. באגמים מסוימים, שבהם באופן טבעי ישנם דגים טורפים רבים, כמות הדגים הפלאנקטיבורים נמוכה, כמות הזואופלנקטון לפיכך גבוהה וכמות האצות החד-תאיות עליהן ניזון הפלנקטון, נמוכה (איור 11);

התוצאה: מים כחולים וצלולים. דיג-יתר על הדגים הטורפים הגדולים גורם ל**השתלשלות טרופית** (trophic cascade - השפעת שינוי ברמת טרופית אחת על הרמות האחרות) במורד מארג המזון הגורמת לעליה בריכוז האצות החד תאיות; התוצאה: מים ירקרקים עכורים ולעיתים גם ריח חריף.

איור 11

השתלשלות טרופית במימי אגם, והתוצאה של דיג יתר על הדגים בראש מארג המזון



שינויים אקלימיים יכולים גם הם לשנות את מבנה מארג המזון. התחממות הימים, עליה בקרינת UV וכו', עלולים לפגוע באופן משמעותי ביצרנות הראשונית ולהביא בסופו של דבר לקריסת מארג המזון באזורים מסוימים. הבנת הקשר בין שינויים במארג המזון למבנה ותפקוד מערכות אקולוגיות הינה משימה חשובה של מדע שמירת הטבע לשנים הבאות. בין האתגרים העומדים בפני החוקרים ניתן למנות:

1. מציאת מאפיינים כלליים המתארים את אופי תגובתם של מינים וחברות לשינויים במארג המזון. לדוגמא, כיצד משפיעה רמת מורכבות החברה על דרך התגובה שלה לשינויים במארג המזון, או כיצד שינויים שונים במארג המזון (למשל, העשרת יתר ופלישת מין טורף) משפיעים ביחד על החברה.

2. קביעת מידת הפירוט הנדרשת לשם ייצוג נכון של מבנה ותפקוד האקוסיסטמה ומארג המזון שבתוכה. למשל, כמה מינים וקשרי גומלין ניתן להסיר מניטור וניתוח המארג מבלי לפגוע במידת הדיוק של הבנת הדינאמיקה של החברה האקולוגית, או עד כמה ניתן לקבץ מינים יחדיו ועדיין לקבל ייצוג נאמן של מארג המזון. (האם בכדי לבחון את השפעת הטריפה של חלזונות ארגמונים בחוף הסלעי יש צורך לבחון את השפעת כל מין בנפרד, או שניתן לקבץ אותם ליחידה אחת ברמת הסוג, או ברמת המשפחה?). מידע זה חשוב ביותר, כיוון שככל שהצורך בירידה לפרטים גדול יותר הופך הניטור ליקר ומסובך יותר, והמודלים למורכבים וקשים יותר לבניה והבנה. יש צורך ברור בהפשטה, השאלה היא עד כמה.

3. קביעת קני המידה המאפיינים את קשרי הגומלין במארג המזון. לשם כך, יש צורך לברר מהם המרכיבים הרלוונטיים במארג המזון המשפיעים על מבנה ומגוון החברה; לחקור את השפעת המעבר של אנרגיה, חומר ואורגניזמים בין חברות ומערכות אקולוגיות על הדינאמיקה של מארג המזון; ולבסס את קנה המידה בזמן ומרחב שבהם שינויים בחברה אקולוגית ניתנים להבחנה.

מינים אקזוטיים ושמירת טבע

כזכור, פלישה של מינים אקזוטיים היא בין הגורמים האנתרופוגנים המשפיעים ביותר על המגוון הביולוגי. 60% בקירוב ממיני בעלי החיים הרשומים בארה"ב כיום ב"תקנת המינים המצויים תחת איום או סכנת הכחדה" מאוימים על ידי מינים פולשים. מחוץ לארה"ב מערכים כי מדובר בכ-80% מהמינים. החוקרים קרוקס (Crooks) וסולה (Soulé) חזו במאמר סקירה מ-1999, כי פלישת מינים תהפוך להיות הסיבה המובילה לירידה במגוון הביולוגי, בעיקר בשל חשיפתם של בתי גידול פגועים לפלישות אלה. רוב המינים האקזוטיים המגיעים לאתר חדש אינם מתבססים בו, אך המעטים שכן מתבססים עלולים לגרום נזקים גדולים לאקולוגיה ולאדם, כפי שכבר הראינו. אחת המשימות העומדות בפני המדענים היא לזהות מה הן התכונות המאפיינות מינים פולשים ואילו חברות ובתי גידול מועדים יותר לפלישה? מידע כזה יכול לעזור בחיזוי של מינים הצפויים כפולשים. בכמה מתכונות אלה דנו כבר בפרקים הקודמים. התיאוריות האקולוגיות הקיימות כיום מאפשרות לחזות חלק מתכונות אלה; הנה כמה שמנה חוקר האינטרודוקציות לודג' (Lodge) ב-1993:

מאפיינים של פולשים מצליחים:

1. שיעור רבייה גבוה, מיני חלוץ (מינים המתיישבים ראשונים באזורים שהתפנו לאחר הפרעה), זמן דור קצר
2. בעלי תוחלת חיים ארוכה
3. שיעורי הפצה גבוהים
4. יכולת רביה אל-מינית
5. שונות גנטית גבוהה
6. **גמישות פנוטיפית** (יכולת לפתח מרכיבים צורניים ופיסיולוגיים שונים כתלות בתנאי הסביבה)
7. טווח תפוצה טבעי רחב
8. טווח רחב של העדפות מזון (דיאטה רחבה)

מאפיינים של חברות מועדות לפלישה:

1. דומות מבחינה אקלימית לבית הגידול של הפולש
2. מצויות בשלבים ראשונים של סוקצסיה
3. בעלות מגוון נמוך של מינים מקומיים
4. חסרות טורפים שיכולים להיזון על המינים הפולשים
5. חסרות מינים הדומים לפולש מורפולוגית (צורנית) או אקולוגית (פחות תחרות על משאבים)
6. בעלות מארגי מזון שבהם הקשרים בין המרכיבים השונים חלשים
7. סובלות מהפרעות אקולוגיות תכופות

ישנן חברות אקולוגיות רגישות יותר וכאלה שהן עמידות יותר לאינטרודוקציות. מודלים אקולוגים של דינאמיקת חברות צופים כמה גורמים המסכלים חדירת מינים לחברה קיימת:

1. תחרות חזקה מצד מינים מקומיים
2. נוכחות אויבים או פתוגנים בחברה המקומית, שהפולש אינו מותאם להתמודד עימם
3. העדר שותפים סימביוטיים הכרחיים (במקרים שבהם לפולש יש צורך בהם)
4. השפעות שליליות הנובעות מגודלה הקטן של אוכלוסיה מייסדת (קשיי רבייה בשל מציאת בני זוג, למשל)

הגילוי של פלישה ביולוגית יכול להתעכב באופן משמעותי אחרי הפלישה הראשונית בשל גודלה הקטן יחסית של האוכלוסייה המייסדת, המקשה על הגילוי. בנוסף לכך, למינים רבים ישנה **תקופת השהייה** (invasion lag) בטרם נעשה גידול האוכלוסייה מזורז. כזכור מהפרקים הקודמים, **הבוצית המהגרת** הים-סופית התקיימה בכמויות קטנות בחוף הסלעי הים תיכוני של ישראל במשך יותר מ-120 שנה בטרם החלה להשתלט על סלעי חוף וטבלאות גידוד רבות לאורך החוף. הסיבה להשהיה בפלישה של מינים אקזוטיים אינה ברורה עדיין ודורשת מחקר, ומחקרים המסבירים השהיות של פלישות בסביבה הימית מועטים ביותר. חלק מהמנגנונים שיכולים אולי להסביר השהייה זו הינם:

1. שיעור גדילה נמוך של המין הפולש
2. הופעת שינויים סביבתיים המזרזים את קצב הגידול של האוכלוסייה
3. הופעת שינויים גנטיים המובילים לקצבי רביה מוגברים
4. פלישה מתמשכת (אירועי פלישה רבים) של המין לאזור

שאלות וקדימויות במחקר פלישת מינים ובקרתם

בין האתגרים העומדים בפני החוקרים בתחום זה ניתן למנות את השאלות הבאות:

1. מהן רמות הסיכון שניתן לקבל לכניסת מינים בעלי פוטנציאל פלישה, עד כמה יעילות השיטות הקיימות למניעת אינטרודוקציות מקריות, וכיצד ניתן לשפר אותן?
2. מה ההבדל בגודל האוכלוסייה המינימאלית בת-קיום של פולשים בין מינים, מערכות אקולוגיות, ונסיבות התבססות שונות? האם ניתן לעשות הכללות שיוכלו לעזור בחיפוש וזיהוי פולשים?
3. מה הן התכונות המאפיינות מינים בעלי פוטנציאל התפשטות מהיר מאתר האינטרודוקציה הראשוני?
4. מדוע מערכות אקולוגיות בימים טרופיים עמידות יותר לפלישת מינים אקזוטיים לעומת מערכות בימים ממוזגים, והאם הפרעות ממושכות בימים טרו פיים ישנו דגם זה?
5. האם ישנו דמיון בין מינים פולשים שלהם השהייה דומה בקצב הפלישה?
6. כיצד משפיעה שונות גנטית על קצבי ודגמי פלישה ביולוגית?
7. כיצד משפיעה פעילות האדם באתרים בהם מופיעות פלישות על התפשטות מינים פולשים?
8. מהו הפוטנציאל לחדירת גנים של מינים פולשים לגנום של מינים מקומיים ויצירת היברידים (מינים מעורבים)? מהי ההשפעה האקולוגית של היברידים אלה? וכיצד הסיכוי לחדירה זו של גנים למינים מקומיים משתנה בין צורות רבייה ומהלך חיים שונה של מינים פולשים?

9. אילו תכונות של מינים פולשים הן המאיימות ביותר להמשך קיומם של מינים מקומיים, או לגרימת השפעות הדירות על מערכות אקולוגיות?
10. האם פלישה של מין אחד או מספר מינים משפיעה (מעודדת/מעכבת) על התבססות מינים פולשים נוספים?
11. כיצד ניתן לשלב ידע על תכונות מינים פולשים עם ידע על תכונות בית הגידול לצורך חיזוי השפעות מינים פולשים במקום מסוים?
12. כיצד עושר מינים ומורכבות מארג המינים משפיעים על השפעות מינים פולשים?
13. באלו נסיבות יכולות השפעות של פלישות מינים אקזוטיים להיות הפיכות?
14. כיצד ניתן לתכנן סדרי עדיפויות לסילוק, בקרה או שימוש במינים פולשים?
15. באילו נסיבות עלול סילוק של מין פולש להביא לתוצאות בלתי רצויות?
16. באילו נסיבות רצויה אינטרודוקציה של מין אקזוטי לצורך שיקום אקולוגי, או בקרה ביולוגית של מינים אקזוטיים אחרים?

כדוגמא לסעיף האחרון, יש חוקרים המציעים להעביר מינים צמחוניים הניזונים על השלוחית הרעילה באזור המחייה הטבעי שלה אל אזור הפלישה בים התיכון בכדי שאלה יבקרו את התפשטותה. לכאורה, זהו רעיון מצוין, אך הבעיה היא שאיננו יודעים מה עוד עלולים לאכול מינים אלו באזור הים התיכון, ועם מי הם עלולים להתחרות. עד שלא יערך מחקר אקולוגי מקיף על ההשפעות האפשריות של מינים אלה על המינים המקומיים מומלץ לא לנקוט בצעד זה.

שינוי סביבתי עולמי והשפעותיו על המגוון הביולוגי

מאז המהפכה התעשייתית משנה האדם את מרכיבי האטמוספרה, הקרקע והמים באופן שעתיד להשפיע על מערכות אקולוגיות שלמות ועל החיים בכדור הארץ בכלל. תחום מחקר זה הוא רק בתחילת דרכו, ורב בו הנסתר על הגלוי.

להלן מספר שאלות וקדימויות למחקר שמעלים חוקרים בתחום זה:

1. חקר השפעות של שינוי אקלימי עולמי, כולל השפעות ארוכות טווח על מערכות אקולוגיות שלמות.
2. האם שינויים בערכים הממוצעים של התנאים הסביבתיים (למשל טמפרטורה) חשובים יותר או פחות לשרידות מינים מאשר שינויים בתנאים הקיצוניים?
3. חקר השפעת עליה בריכוזי פחמן דו-חמצני על תפקוד מערכות אקולוגיות ימיות, כולל השפעה של ירידת pH אפשרית על קצב ההשקעה של גיר (קלציפיקציה) במינים בעלי שלד גירני פנימי או חיצוני. ירידה בקצב הקלציפיקציה יכולה לפגוע למשל בקצבי הגידול של שוניות אלמוגים.
4. כיצד חשיפה משולבת לטמפרטורות גבוהות, ריכוזי נוטריאנטים גבוהים (העשרת יתר) משפיעים על תגובת מערכות אקולוגיות לעליה בריכוזי הפד"ח?
5. חקר מחזור החנקן בטבע לאור העלייה בריכוזו עקב העשרת יתר, בעיקר בסביבות חופיות.
6. האם הצלחת פלישת מינים אקזוטיים עולה ברמות חנקן גבוהות במערכת?
7. חקר השפעות קרינת UV על המגוון הביולוגי, בעיקר באזורים הארקטיים.

בחירת אסטרטגיות שימור נכונות

תוך פחות מעשור, הפיקה הביולוגיה של שמירת טבע גוף גדול של תיאוריה המיועדת לחיזוי וממשק של מפגעים אנתרופוגנים על אוכלוסיות, מינים ומערכות אקולוגיות. בכדי להצליח במשימה זו, מדע שמירת הטבע צריך לעשות יותר מאשר להפיק תיאוריות ועקרונות. על חוקרי שמירת הטבע להשתמש בתיאוריות לצורך יצור כלים מבוססים מדעית, שיאפשרו לקיחת החלטות ברות ישום בידי מנהלי ממשק ומקבלי החלטות. בכדי להדגים את חשיבות תיאורית שמירת הטבע ולהתמודד עם ספקנותם של מנהלי ממשק, על החוקרים לבנות תוכניות ניטור מעשיות ואמינות שיגלו מגמות והשפעות אקולוגיות עיקריות ויעזרו לבחון את יעילותן של החלטות ממשק שונות. המעבר ממחקר טהור ליצור ידע שיכול לסייע בממשק שמירת טבע נותר אתגר מרכזי של מדע שמירת הטבע.

בספרם של סולה ואוריאנס מציינים פוסינגהם (Possingham) ועמיתיו כי אחת הבעיות הקיימות היום היא, שהתיאוריות האקולוגיות האמורות לסייע בפתרון בעיות של שמירת טבע הן כלליות וכוללניות מדי.

למשל, מ"**תאורית הביוגאוגרפיה של איים**", שפיתחו מקארתור ווילסון בשנות ה-60, משתמע כי:

1. שמורות גדולות טובות משמורות קטנות
2. שמורות הקשורות זו לזו (או קרובות) טובות משמורות מנותקות זו מזו

מ"**תיאורית אוכלוסיות-העל**" משתמע כי בכדי שאוכלוסיות-על יתקיימו:

1. יש להפחית את שיעורי ההכחדות המקומיות
2. להגביר את שיעורי המעבר בין כתמים
3. להגדיל את מספר הכתמים המתאימים (או להפחית את אובדן הכתמים)
4. להגדיל את מספר הכתמים המאוכלסים

"**תאורית המקור-מבלע" של** פוליאן (Pullian) מדגישה את חשיבות זיהוין של אוכלוסיות מקור (בהם גידול האוכלוסייה הוא חיובי באופן קבוע). מתיאוריה זו משתמע העיקרון של העדפת השמירה של אוכלוסיות מקור על פני אוכלוסיות מבלע.

תאוריות אלו אמנם נותנות עקרונות מנחים כללים, אך כאשר מנהל שמירת טבע בעל משאבים כספיים מוגבלים אמור לקבל החלטה מסוימת ולבחור בין מספר אלטרנטיבות ממשק, התיאוריות לא מסוגלות לספק את התשובה הנחוצה. פוסיגהם ועמיתיו נותנים את דוגמא הבאה: על מנהל ממשק שימור טבע מוטל לשקם את הצמחייה באזור מסוים, אך לרשותו עומדים אמצעים מוגבלים לעשות זאת. הוא יכול להחליט שהוא מעוניין בשיקום 10 אחוז מהשטח הקיים. השאלה העומדת בפניו היא אילו 10 אחוז מהשטח כדאי לשקם בכדי להשיג את מרב המגוון הביולוגי. נניח שבשטח קיימים שני כתמים של צמחייה טבעית, אחד גדול מהשני. השאלות העומדות בפני איש הממשק הן לאילו מן האפשרויות הבאות יש להפנות את משאבי השיקום:

1. להגדיל את הכתם הגדול
2. להגדיל את הכתם הקטן
3. לחבר בין שני הכתמים על ידי מסדרון מעבר רחב
4. ליצור כתם גדול חדש
5. ליצור כתמים רבים קטנים המפוזרים באופן שווה בשטח

התיאוריות שנזכרו למעלה אינן מספקות מידע מספיק בכדי להחליט איזו מין האפשרויות עדיפה, פרט אולי לזניחת אפשרות ה'. הסיבה לחוסר יעילותן של התיאוריות היא שהן לא מונחות על ידי עקרונות **קבלת-החלטות**. ישנו תחום מדעי המעגן באופן לוגי את דרך קבלת ההחלטות והברירה בין אלטרנטיבות, על ידי ביסוס עקרונות ברורים לכך. לצורך קבלת החלטה נכונה, ראשית יש צורך **בזיהוי ברור של מטרות השיקום**; שאלה פשוטה, שבאופן מפתיע נענית רק לעיתים נדירות בתהליך ממשק שמירת טבע.

אפילו כאשר המטרה זוהתה באופן ברור, אף אחת מן התיאוריות אינה מספקת תחזיות ברורות לדרך בה מטרות אלה צריכות להתממש. אם מטרת שימור המגוון הביולוגי היא בעיקר להפחית את הסיכוי שמינים יכחדו יש צורך באנליזות טובות של חיוניות אוכלוסיות, ואם המטרה היא בעיקר לשקם מגוון מייצג של בתי גידול יש צורך במידע נרחב על אופי השטח בו נעשה השיקום.

אחד ההיבטים החשובים בשמירת טבע הוא בחינת מידת ההצלחה של דרך ממשק מסוים ולימוד לקחים בכדי לשפר את הממשק. הדרך היחידה לעשות זו היא ניטור לאורך זמן. במקרה זה **ניטור** מוגדר כ**הערכת ביצוע** ומיועד לעזור לקבלת החלטות ול**ממשק גמיש** (adaptive management) המשתנה כתלות בתוצאות הניטור.

תיאורית-ההחלטות כבסיס לממשק נכון

במקרים מסוימים, תיאוריה זו מערבת כלים מתמטים מורכבים, אך היא גם כוללת כלים איכותיים כמו "**הערכת הסיכון האקולוגי**" (ecological risk assessment), שהוא תחום בשמירת טבע שמטרתו להעריך את הסיכון של מפגעים אקולוגים. המכנה המשותף המאחד את כל הגישות בתיאורית-ההחלטות הוא הצורך ביצירת פרוטוקול ברור של פתרון בעיות, הכולל בתוכו את השלבים הבאים:

1. הצהרת מטרות הממשק (למשל, הקטנת הסיכון שצב הים החום יכחד בחמישים השנה הבאות). כאשר ישנן מספר מטרות, יש לבחון כיצד ניתן להביא לתפוקה מרבית את כל המטרות, כאשר רובן נמדדות במדדים שונים (למשל, מגוון גנטי, סיכון לבריאות האדם וכסף).
2. ציון אפשרויות הממשק וביטוין במשתנים ניתנים לכימות ובקרה. למשל, שימוש ב-TED להורדת מספר צבי הים החומים המתים במכמורתנים ב-75% בעשר השנים הבאות, תוך הוצאת סכום כסף מסוים לצורך זה.
3. בירור המשתנים המאפיינים את מצב המערכת (לדוגמא, גודל האוכלוסייה הקיימת, מספר המכמורתנים המשתמשים ב-TED).
4. פיתוח מודל רעיוני של דינמיקת המערכת המנוהלת, ואם ניתן, פיתוח משוואות המתארות את הדינמיקה של המשתנים (למשל, חישובי PVA לצב הים). לצורך זה יש לרוב צורך בשיתוף פעולה בין ביולוג שדה לאקולוג העוסק במודלים.
5. בירור המגבלות הכובלות את המשתנים המשפיעים על הביצוע. למשל, התקציב הקיים לשיקום אוכלוסיות הצבים, מידת שיתוף הפעולה של דייגי המכמורתנים, יעילות ה-TED הקיימים.

ניטור
סדרת מדידות והערכות של מדדים סביבתיים כלשהם לצורך גילוי שינויים באזור מסוים לאורך זמן.

תאוריית ההחלטות
היא תחום בו אנשים האחראיים על ממשק מנסים להגשים מטרות מוצהרות תוך מודעות לרמות אי-הוודאות המעורבות בתהליך ההחלטה.

6. חישוב מידת האי-ודאות של כל המשתנים.
7. חיפוש פתרונות לבעיות המגבילות. לדוגמא, כיצד לעודד את שיתוף הפעולה של הדייגים עם תוכנית השיקום. כאשר כל הבעיות זוהו, יש צורך לבנות פרוטוקול או לבנות תוכנת מחשב מתמטית שתמצא את הפתרון הטוב ביותר האפשרי.

פוסיגנהם ועמיתיו מביאים דוגמה מניתוח שערכו גויקמא ומילקא (Guikema ו-Milke) ב-1999 לדרך בה גופי איכות סביבה צריכים להחליט באיזה פרויקטים להשקיע את כספם. הארגון יכול להיות גוף ממשלתי שצריך להחליט כיצד לחלק כספים בין מאה פרויקטים להגנה על מינים שונים המצויים תחת איום הכחדה. לחלופין, הגוף יכול להיות ארגון לא-ממשלתי, שצריך להכריע כמה כסף כדאי להשקיע ברכישת אזור חדש לשימור, לעומת כמה יש להשקיע בממשק ושיקום שמורות קיימות. לפי השלבים המפורטים למעלה, גויקמא ומילקא מתארים את התהליך הנדרש הבא:

1. **הצגת המטרות.** לעיתים קרובות, מטרת הגוף המנהל היא לאזן בין מטרות של פעילות נופש מול שימור מגוון ביולוגי, כמו למשל: מספר המבקרים ביום בשמורת "חוף אלמוג" באילת: רמת שביעות הרצון של המבקרים, אל מול הגנה על מינים והגנה על בית הגידול. לצורך איחוד מטרות אלה יש צורך בנתונים מהשדה ובביצוע מספר ניתוחים מתמטים כמו: השפעה אקולוגית של מבקר בודד, PVA של מינים שונים ועוד.
2. **ברור אפשרויות הממשק.** ההחלטה היא כיצד לחלק את הכסף בין הפרויקטים. המשתנה המבקר הוא כמות הכסף המנותבת לכל פרויקט.
3-4 **משתני סביבה והדינאמיקה שלהם.** יש צורך ליצור מודל המתאר את הקשר בין התקציב המנותב לכל פרויקט ומידת הצלחת כל מטרה. לשם כך יש צורך לעיתים בדעת מומחים בתחומים השונים. המודלים אמורים לתת הערכות לגבי הדינאמיקה של משתני הסביבה תחת משטר ממשק בתקציב מסוים.
5. **מגבלות.** המגבלה העיקרית היא התקציב הכולל. כלל התקציבים המחולקים צריך להיות פחות מן התקציב הכולל או שווה לו.
6. **אי וודאות.** מידת אי-הודאות של הגורמים השונים בכל פרויקט יכול לקבוע את מידת קדימותו. משקלו של פרויקט מסוים יכול לרדת אם רבה מידת אי-הוודאות בגורמים המאפיינים אותו או את מידת הצלחתו.
7. **שיטות לפתרון.** במקרה זה, משוואת המטרה נוצרת משילוב של משתני הבקרה (הכסף הנדרש לכל פרויקט) עם המגבלות ומידת אי הוודאות. הנתונים מוזנים לתוכנה מתאימה שאמורה לתת את מגוון הפתרונות האפשריים לבעיה.

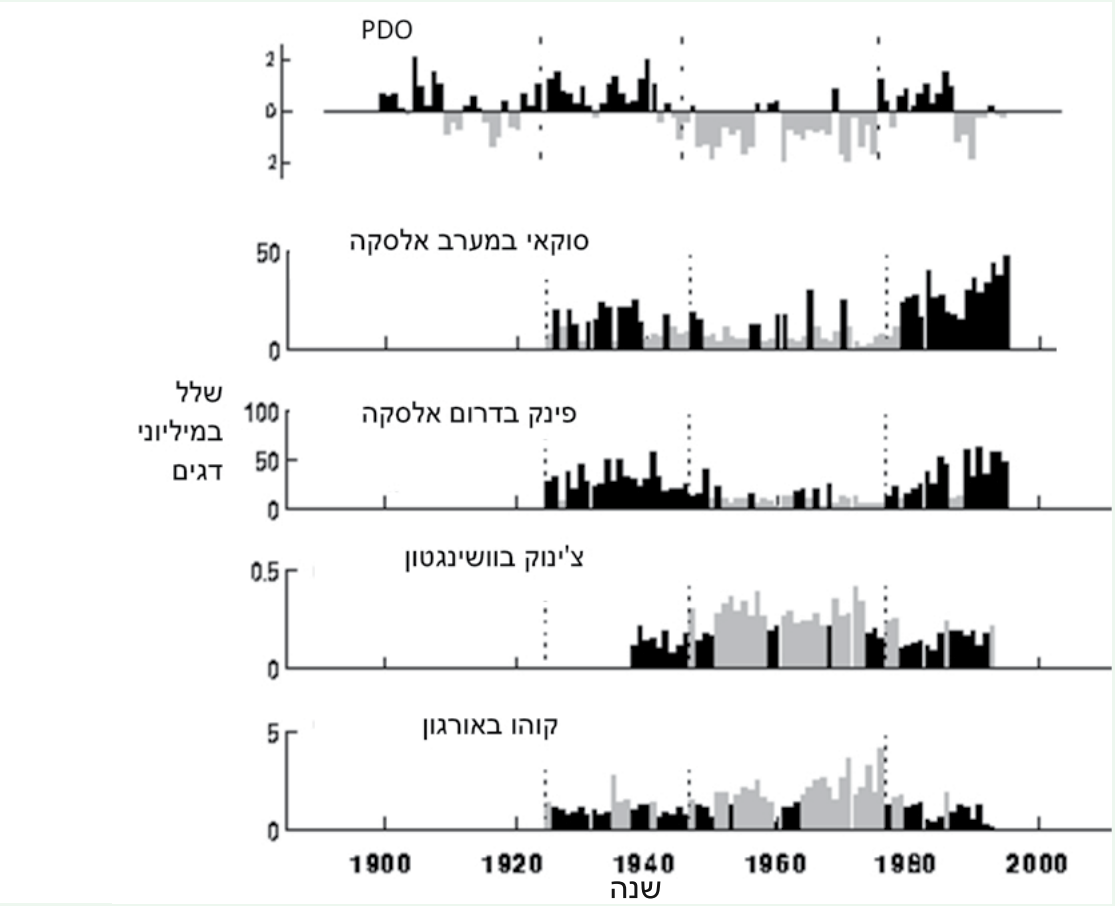
גם בתכנון של שמורות טבע עומדות בפני המתכנן החלטות רבות. נדון בדרך לקבלת החלטות בנושא זה בפרק העוסק בשמורות טבע.

ניטור והערכת ביצוע

לאחר שהתקבלה ההחלטה, יש צורך בביצוע תוכנית ניטור, לצורך הערכת ושיפור התוצאה או דרך הממשק שנבחרה. באופן אידיאלי הניטור מכוון לבחינת המדדים של מגוון ביולוגי (מינים ותהליכים) המאוימים וחסרי הוודאות ביותר. למרות שפעילויות ניטור מתבצעות בהיקף נרחב בשמירת טבע, הנתונים מתוכניות ניטור קיימות לרוב בלתי שמישים ממספר סיבות:

- פרויקטים רבים של ניטור סובלים מתכנון גרוע (השאלות שהם אמורים לענות עליהם לא נוסחו בצורה ברורה, ו/או ששיטות הניטור שנבחרו אינן מתאימות למטרות). התוצאה: נתונים לא אופטימליים;
- קני המידה של פעילות הניטור במרחב ובזמן אינם תואמים את קני המידה שבהם מסיקים מנהלי הממשק מסקנות (למשל, מסיקים מדיגום במספר אתרים קרובים ומועטים לגבי שטח גדול הרבה יותר, או מסיקים מדיגום חד שנתי לגבי התפקוד הכללי של המערכת);
- הכלים הסטטיסטיים והטכנולוגים לניתוח נתוני ניטור אינם מתקדמים יחסית;
- יש מעט מדי מן המידע הנדרש על האוכלוסיות ומהלך החיים של האורגניזמים הדורשים שימור לצורך עריכת ניטור נכון
- ישנה תפישה, בעיקר בקרב גופים ממשלתיים, שאיסוף נתונים, יותר מאשר ניתוחם והעברת הממצאים על המגמות הנמצאות, היא מטרת הניטור.

גילוי מגמות בעלות משמעות אקולוגית, וההבחנה בין השפעות האדם להשפעות מהפרעות טבעיות, בעיקר באזורים נרחבים, היא משימה קשה ביותר. דוגמא לכך היא השינויים בעשרות השנים האחרונות בגודל אוכלוסיות הסלמונים בצפון האוקיינוס השקט. בין שנות החמישים והשמונים שגשגו אוכלוסיות מיני הסלמון (צ'ינוק וקוהו) במדינות וושינגטון ואורגון שבארה"ב, בעוד ששלל הדיג של אוכלוסיות המינים הקיימות באזור אלסקה (סוקאי ופינק) היה נמוך. חוקרים שייכו הבדלים אלה בעיקר להבדלים אזוריים בשיעור דיג הסלמון. אך בשנות השמונים והתשעים התחלפה המגמה: האוכלוסיות בוושינגטון ואורגון צנחו ואלה באלסקה שגשגו. עם התקדמות המחקר האוקיינוגרפי התברר כי יתכן וחילופים אלה קשורים דווקא לתנודות אוקיינוגרפיות טבעיות בטמפרטורת מי הים, המתרחשות כל כמה עשורים. חילופים אלה בטמפרטורת המים בין שני האזורים זכו לכינוי **תנודות עשוריות פסיפיות** (PDO - pacific decadal oscillation), והם כנראה משפיעים על כשר הרבייה של הסלמונים וקובעים כך את גודל האוכלוסיות, ללא קשר לפעילות האדם. ל-PDO יש מדד המתאר את הפרש הטמפרטורות בין אזורים שונים באוקיינוס השקט. ניתן לראות (איור 11) כי ישנו מתאם בין השינויים במדד ה-PDO לבין כמות הסלמונים שנידוגו באזורים השונים, כאשר מגמת שיעור השלל הפוכה בסלמונים שנידוגו באלסקה לעומת מדינות וושינגטון ואורגון.



איור 12.

שינוים באינדקס תנודות עשוריות פסיפיות (PDO) מול שינויים בשלל הסלמונים בצפון האוקיינוס השקט. עמודות אפורות מצינות שנים שבהן ישנה סטייה מהממוצע הרב-שנתי

דוגמא זו ממחישה את חשיבות הניטור לאורך זמן. ללא רישום מדויק של כמות דגי סלמון בשלל, וללא תיעוד ברור של טמפרטורת מי הים באזורים נרחבים, לא ניתן היה לעשות את ההקשר בין השינויים הפיסיקליים לתנודות הביולוגיות. ברוב המקרים, מתקשים המדענים להשיג מימון לניטור ארוך טווח של נתונים פיסיקליים וביולוגים, אך חשיבות ניטור מסוג זה מתבררת בשנים האחרונות והתקווה היא כי מימון זה יגדל בעקבות זאת.

תכנון ניטור נכון מסתמך גם הוא על שלבי תיאורית ההחלטות:

1. **הגדרת מטרות** בצורה ברורה ומדויקת ככל האפשר. ללא הגדרה זו לא ניתן לבחון את יעילות הניטור.
2. **זיהוי עקות** טבעיות ואנתרופוגניות המשפיעות על המערכת. רק זיהוי שכזה יאפשר הבחנה ביניהן.
3. **פיתוח מודל מחשבתי** המתאר את תפקוד המערכת והמרכיבים המרכזיים בה.
4. **בחירת אינדיקאטורים לעקות.** שום ניטור אקולוגי אינו יכול למדוד את כל התהליכים האקולוגים ואת כל המינים השונים המצויים במערכת. לשם ניטור יעיל צריך לבחור תהליכים ומינים **שייצגו** ככל האפשר את מצב בריאותה של המערכת האקולוגית.

5. **בנית תוכנית דיגום** שהינה יעילה, אינפורמטיבית ואמינה ככל האפשר. יש להחליט מהי יחידת הדיגום המתאימה, ובאיזה קנה מידה מרחבי יערך הדיגום. יש לקבוע כמה אתרי דיגום יבחרו ומה מיקומם האופטימאלי כך שייצגו את המערכת באופן מהימן.
כמו כן, יש להחליט באיזו תדירות יש לדגום אתרים אלה בכדי להבחין במגמות של שינוי במגוון המינים או בגודל של אוכלוסיות ספציפיות. ישנה חשיבות גדולה לבחירות אלה, כיוון שהן יקבעו את החוזק הסטטיסטי של אבחון שינויים ומגמות הקשורים להפרעות, או לחלופין לפעולות השיקום; זאת על רקע השונות הטבעית של המערכת, ובהתחשב בשגיאות מדידה בלתי נמנעות והיעדר מידע על תהליכים ביולוגים מסוימים המתרחשים במערכת.

6. **הגדרת שיטות ניתוח נתונים.** השיטות הסטטיסטיות לבחינת השינויים הצפויים להתרחש במהלך הפרויקט חייבות להיות מתאימות. אלמלא כן, אפשרי כי השינויים לא יתגלו, או שהתוצאות והמסקנות יהיו בלתי נכונות.

7. **הבטחת קיום קשר בין תוצאות הניטור לתהליך קבלת החלטות.** נושא זה קריטי לצורך ממשק גמיש של הפרויקט. אם מתגלה כי לא מתקבלות תוצאות חיוביות תוך פרק זמן מסוים, יש לבחון שינויים או חלופות לתוכנית הקיימת. ללא ניטור נכון והעברה מהירה, מדויקת ואמינה של תוצאותיו למקבלי ההחלטות, אפשר כי יבוזבזו זמן ומשאבים רבים לחינם.

במקרים רבים, נדרש כוח אדם רב לביצוע ניטור אפקטיבי. כוח אדם זה לרוב אינו כולל בתוכו מדענים ולכן הוא נדרש לעבור הכשרה יסודית בשיטות העבודה המשמשות את הניטור. בנוסף לכך נדרשים מעקב צמוד ו"בקרת איכות" של העבודה והנתונים המתקבלים לאורך כל הפרויקט.

משימות רבות עומדות בתחום מחקר זה של בנית תוכניות ממשק שמירת טבע. על עיקר המאמץ צריך להתרכז בבניית מודלים מתאימים שיסייעו לתכנון והערכת הצלחת תוכניות שיקום. לתוך מודלים אלה חשוב לשלב גם ערכים חברתיים וידע על התנהגות אנושית. לשם כך יש צורך במחקר רב-תחומי המשלב את מדעי הטבע והחברה. כמו כן, יש לפתח עקרונות שיעזרו לבחור מדדים סביבתיים ומינים אינדיקאטורים לצורך ניטור.

15

שיקום ושימור הים

גיל רילוב

לאחר שדנו בתפקידה של הביולוגיה של שמירת טבע, וסקרנו את חשיבותו של ממשק בר-קיימא, נדון כעת בפרקטיקה של שמירת טבע, ונתרכז בנושא של שימור על היבטיו השונים, ובכלים שמפתחים החוקרים בעשורים האחרונים לשם השגת מטרות הממשק. חשוב להבחין בין **שמירה** (**preservation**) של בתי גידול בריאים בכדי שלא יתדרדרו עקב פעילות האדם, לבין טיפול באופנים שונים במערכות אקולוגיות פגועות.

בספרות מתוארות שלש גישות לטיפול במערכות אקולוגיות פגועות, הערוכות כאן בסדר עולה לפי מידת הדמיון למערכת האקולוגית הטבעית בסופו של התהליך:

הבראה (rehabilitation) - החזרת השטח לשימוש יצרני לאחר הפרעה.

שיקום (reclamation) - ניסיון להחזיר מערכת טבעית הרוסה למצב יצרני כלשהו, או למצב יצרני המקובל על הציבור, ואפשרות לעשות בו שימוש מחדש. השיקום לא חייב להיות בהכרח מבוסס על המרכיבים הטבעיים המקוריים של המערכת. גישה זו פותחה בשל דרישות לשיקום אזורים פגועים מאוד ביבשה, והיא אכן ישימה יותר בסביבות חיים יבשתיות ופחות באלה הימיות.

שחזור (restoration) - שחזור או תיקון של המערכת האקולוגית המקורית כולה, על קשריה התפקודיים. זוהי כמובן המטרה הקשה ביותר להשגה, והחשובה ביותר בממשק שמירת טבע. הקריטריונים להשגתה כוללים : 1) יכולת קיום מתמשכת; 2) עמידות לפלישת מינים זרים; 3) יצרנות ברמה הדומה למערכת המקורית; 4) יכולת שימור נוטריינטים דומה למקור; 5) שחזור האינטראקציות הביוטיות המקוריות, בעיקר אלה הקשורות למיני המפתח.

הצלחה בפרויקט שחזור הינה הוכחה להבנתנו את האקולוגיה של בית הגידול המשוקם, אך כיוון ששחזור מלא הינו כה קשה להשגה, על אנשי שמירת הטבע להדגיש את חשיבותה של השמירה על בתי גידול בריאים קיימים.

במערכות ימיות קיימות שתי מטרות עיקריות לשימור: ממשק דיג בר-קיימא, ושמירת המגוון הביולוגי. להשגת מטרה זו נבחנות בעשורים האחרונים שתי אסטרטגיות עיקריות:

1. שימוש בשמורות טבע ימיות - האמורות לשמור על אזורים בלתי פגועים ולאפשר שיקום של בתי גידול פגועים.
2. בנית שוניות מלאכותיות, המספקות מצע להתיישבות אורגניזמים ימיים ומחקות במידה זו או אחרת את בית הגידול הטבעי.

במסגרת פעולות השימור נבחנות לעיתים אסטרטגיות נוספות כגון השבת מינים לבתי גידול שמהם נעלמו בשל פעילות האדם. השבת מינים מקובלת מאוד באקוסיסטמות יבשתיות: השבת הבאפלו לאזורים בהם נכחד באמריקה; השבת הפרא לערבות הנגב בישראל, ועוד . בים הדוגמאות לכך מועטות למדי, אך ישנם ניסיונות לשיקום אקטיבי, לדוגמא: בשונית האלמוגים באילת מתרחש בשנים האחרונות מבצע של שתילה מחדש של שברי אלמוגים לשם זירוז האכלוס מחדש של אזורי שונית הרוסים.

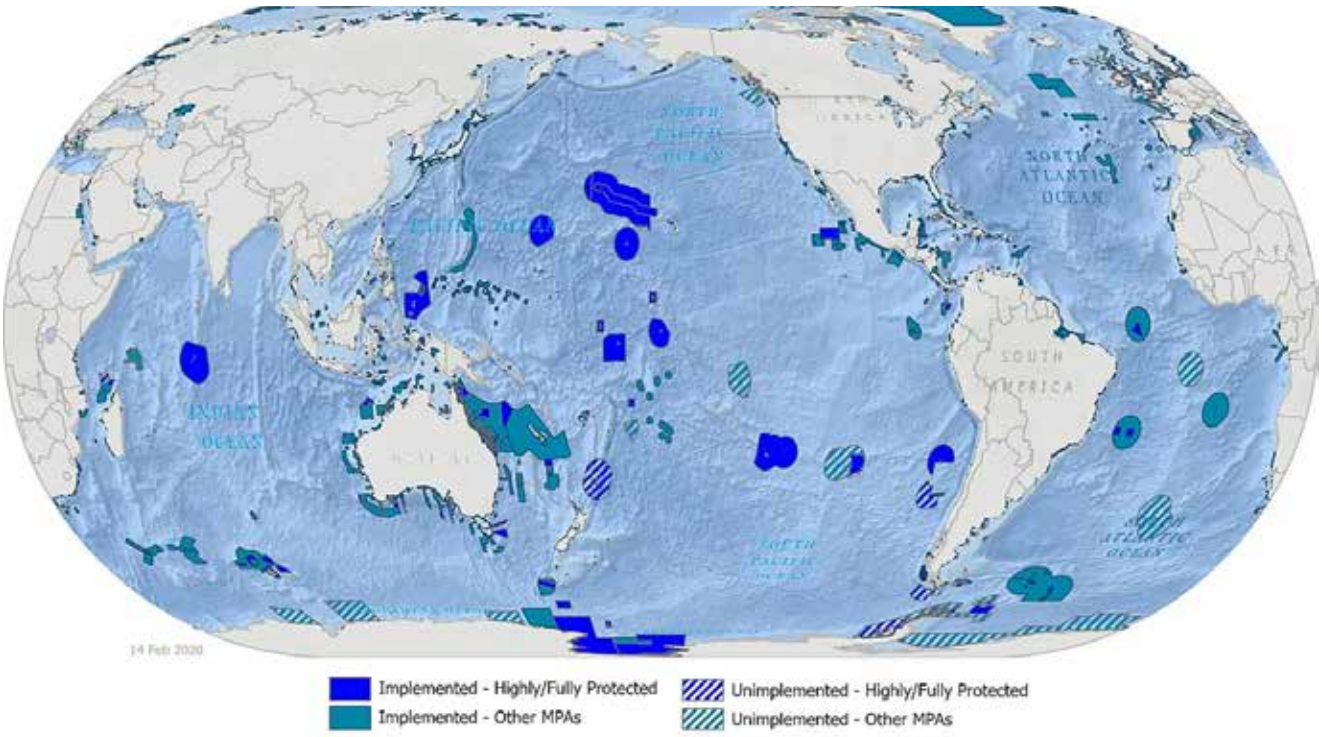
שמורות טבע ימיות

כאמור, שמורות טבע ימיות אמורות לשמש הן לעידוד ושיקום היבול של ענפי דיג מדולדלים, וכן לשימור ושיקום המגוון הביולוגי. האתגר העומד בפני המדענים היום הוא לתכנן את השמורות שיניבו את התוצאות הטובות ביותר עם המשאבים הקיימים, בהתאם למטרה אותה הציבו מנהלי הממשק.

כיום רק חלק מזערי מן האוקיינוס מוגן במידה זו או אחרת מפני פעילות האדם (איור 1). פחות מחצי אחוז משטח האוקיינוס כלול באזורים המוגדרים כשמורות טבע ימיות (marine protected area – MPA), וברוב המקרים גם אזורים אלה מנוהלים בצורה חלקית ביותר ולכן מציעים מעט מאוד הגנה.

איור 1

שמורות טבע ימיות, מדורגות על פי סטטוס ההכרזה שלהן ומצב האכיפה בהן, נכון לפברואר 2020
(Marine Protection Atlas)



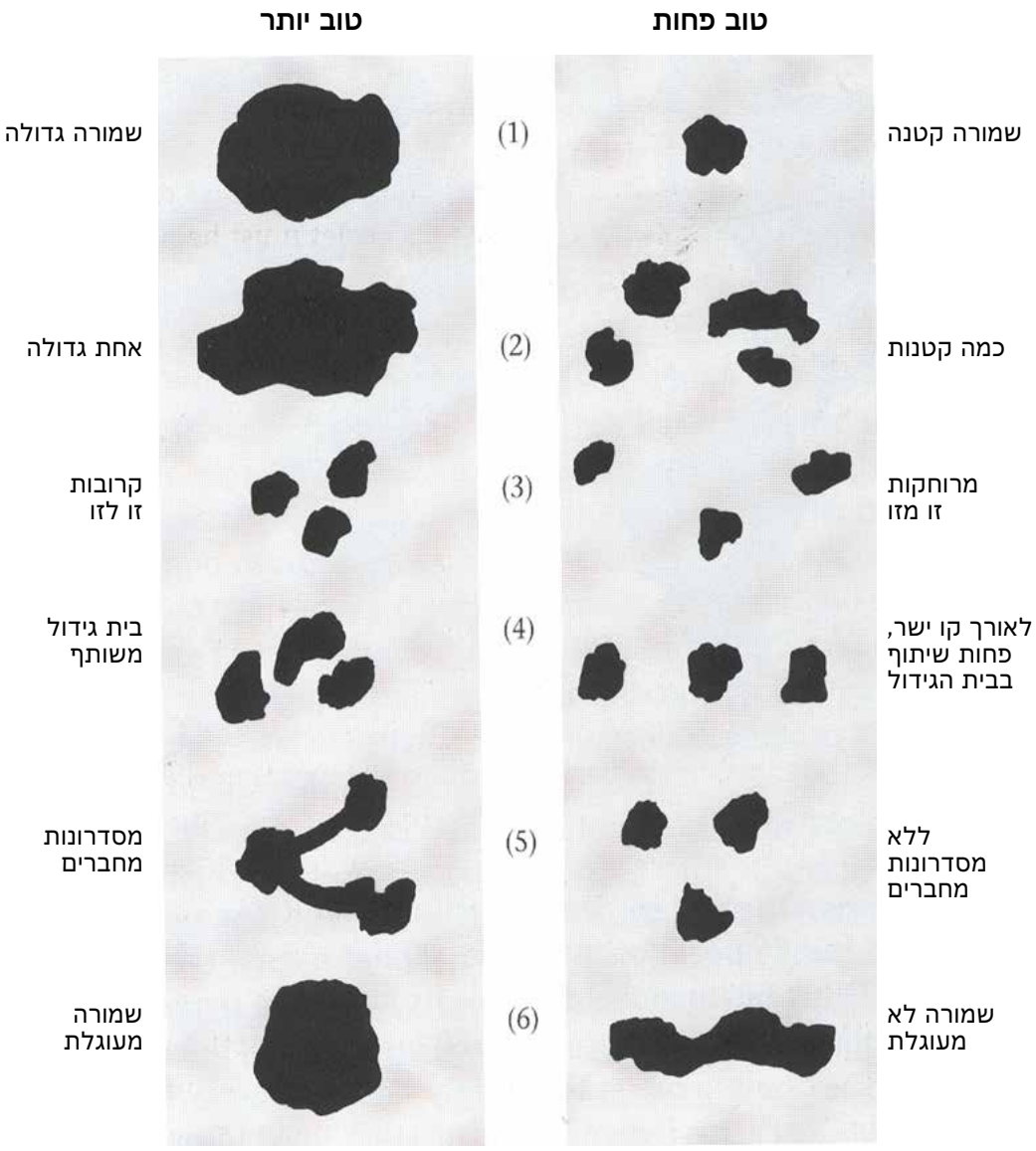
כאשר מתכננים שמורות טבע באזור מסוים יש לחשוב על גורמים שונים היכולים להשפיע על הצלחת השימור:

1. מספר השמורות
2. מיקום השמורות
3. גודל השמורות
4. מרחק השמורות זו מזו

התיאוריה האקולוגית היבשתית וניסיון רב שנים בתכנון שמורות טבע יבשתיות הביא לקביעת עקרונות כלליים בתכנון שמורות טבע, המתארים את אופיין הרצוי של השמורות, ומאפשרים סדר עדיפויות בבחירה בין קונפיגורציות שונות (איור 2). החלטות אלה אמורות להתבצע לפי תהליך קבלת ההחלטות בו דנו בפרקים הקודמים.

איור 2

עקרונות בתכנון שמורות טבע יבשתיות. רובם גם רלוונטי לשמורות ימיות



הרעיון של כמה מעקרונות אלה ברור (שמורה גדולה לעומת קטנה), והאחרים דורשים הסבר:

ישנה עדיפות **לשמורה אחת גדולה** על כמה קטנות כיוון שידוע כי שטחים גדולים יותר מכילים יותר מינים וגם קצב ההכחדה הטבעי בהם נמוך יותר מבשטחים קטנים.

הקרבה בין שמורות שונות חשובה בכדי לאפשר מעבר של פרטים בינהן ואפשרות לרבייה בין פרטים משמורות שונות (הגדלת המגוון הגנטי).

ביבשה, קיומם של **מסדרונות** מוגנים יכול לאפשר מעבר של מינים הולכי קרקע הדורשים שטחים נרחבים, כאלה הנודדים ועוד, ובכדי לאפשר את הרבייה בין פרטים משמורות שונות.

בשמורה מעוגלת יהיו פחות **השפעות שוליים** (edge effect). השפעות שוליים הן השפעות של הסביבה שמחוץ לשמורה על השוליים החיצוניים של השמורה. ככל שהצורה מעוגלת יותר, יחס שטח הפנים להיקף גדול יותר ולכן השפעת השולים קטנה.

כמובן שבים תכנון שמורות חייב להיות שונה באלמנטים מסוימים מזה היבשתי. הים הוא עצום בגודלו, מאוד כתמי באופיו, ומעבר של אורגניזמים רבים מאזור לאזור נעשה בשלב הלרוולי בעזרת זרמי הים, שמסלולם וכוונם משתנים. פעילות מחוץ לשמורת הטבע יכולה לפגוע בתפקוד השמורה על ידי מעבר של מזהמים או סדימנט אל תוך השמורה בעזרת המים. שאלות נוספות העומדות לפיכך בפני המתכננים הן האם להגן על:

1. אוכלוסיות מקור או מבלע?
2. אוכלוסיות במעלה או במורד הזרם?
3. אוכלוסיות במצבן הטבעי או אוכלוסיות פגועות?

בכדי לבחון את סוגיית חשיבות מיקום השמורה ניתן להשתמש במודלים מתמטיים פשוטים, שבהם קובעים החוקרים את תכונותיהם של כתמים שונים ואת מיקומם ביחס לזרם ואז בוחנים את התנהגות אוכלוסיית העל תחת שיעורי לחץ דיג שונים וממשקי שימור שונים. במודל מתמטי שניסה לבחון את היבט מיקום השמורות בהקשר של מקור-מבלע, קראודר (Crowder) ועמיתיו מצביעים ראשית על העובדה כי תרומת כתם המהווה מקור לאוכלוסיית-העל תלויה בגודל ומיקום אוכלוסיות המבלע ביחס לאותו כתם. כתמי מבלע גדולים או קרובים יותר "ירוויחו" מן המקור יותר מכתמים קטנים או מרוחקים במורד הזרם. במודל ראשוני זה (איור 3) רואים כי רוב הלרוות של מין מסוים המשתחררות מאוכלוסיית המבלע אובדות (75.4% בתנאי המודל שנבחרו) והשאר מתפזר בין כתמי המבלע השונים.

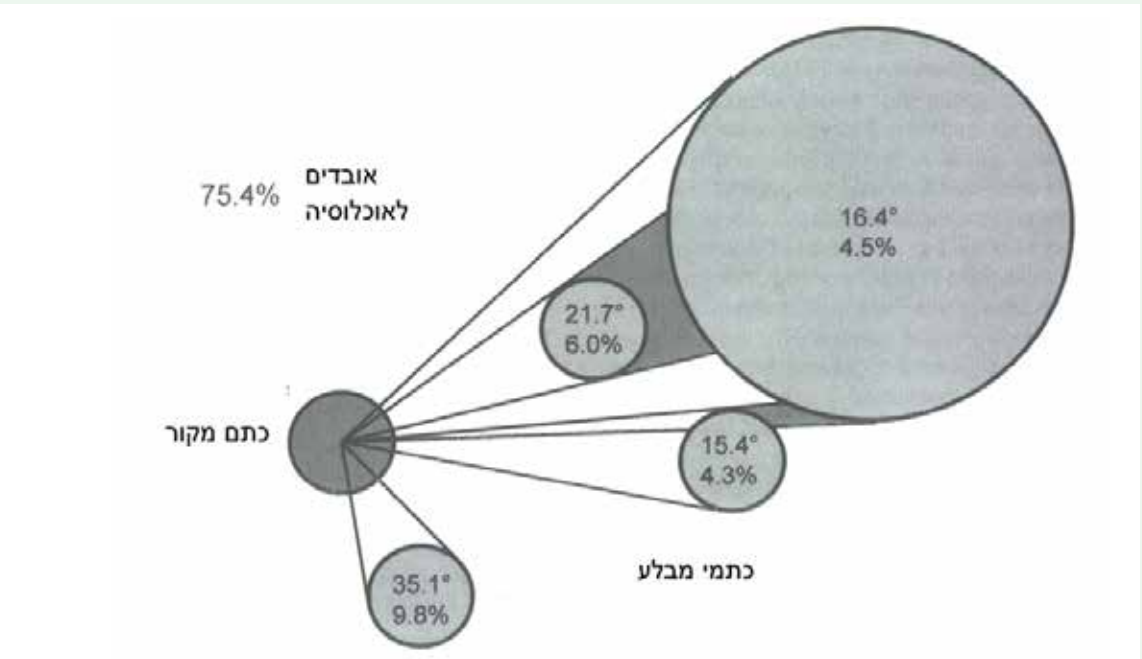
בשלב הבא תכנתו החוקרים לתוך המודל קומבינציות שונות של כתמים שחלקם מבלע וחלקם מקור והם מפוזרים במעלה או במורד הזרם (איור 4). לאחר מכן נבחרו אסטרטגיות ממשק שונות הכוללות את מידת לחץ פעילות הדיג (איזה אחוז מן הכתמים חשוף לדיג), וכמותן ומיקומן של שמורות ללא-דיג (האם ימוקמו על כתמי מקור או מבלע, במעלה או במורד הזרם).

אסטרטגיות שונות למיקום שמורות לפי אופי הכתם:

1. שמורות מוקמו על כתמים בצורה אקראית, בעוד שבכתמים אחרים מותר לדוג
2. השמורות מוקמו על כתמי מבלע
3. השמורות מוקמו על כתמי מקור

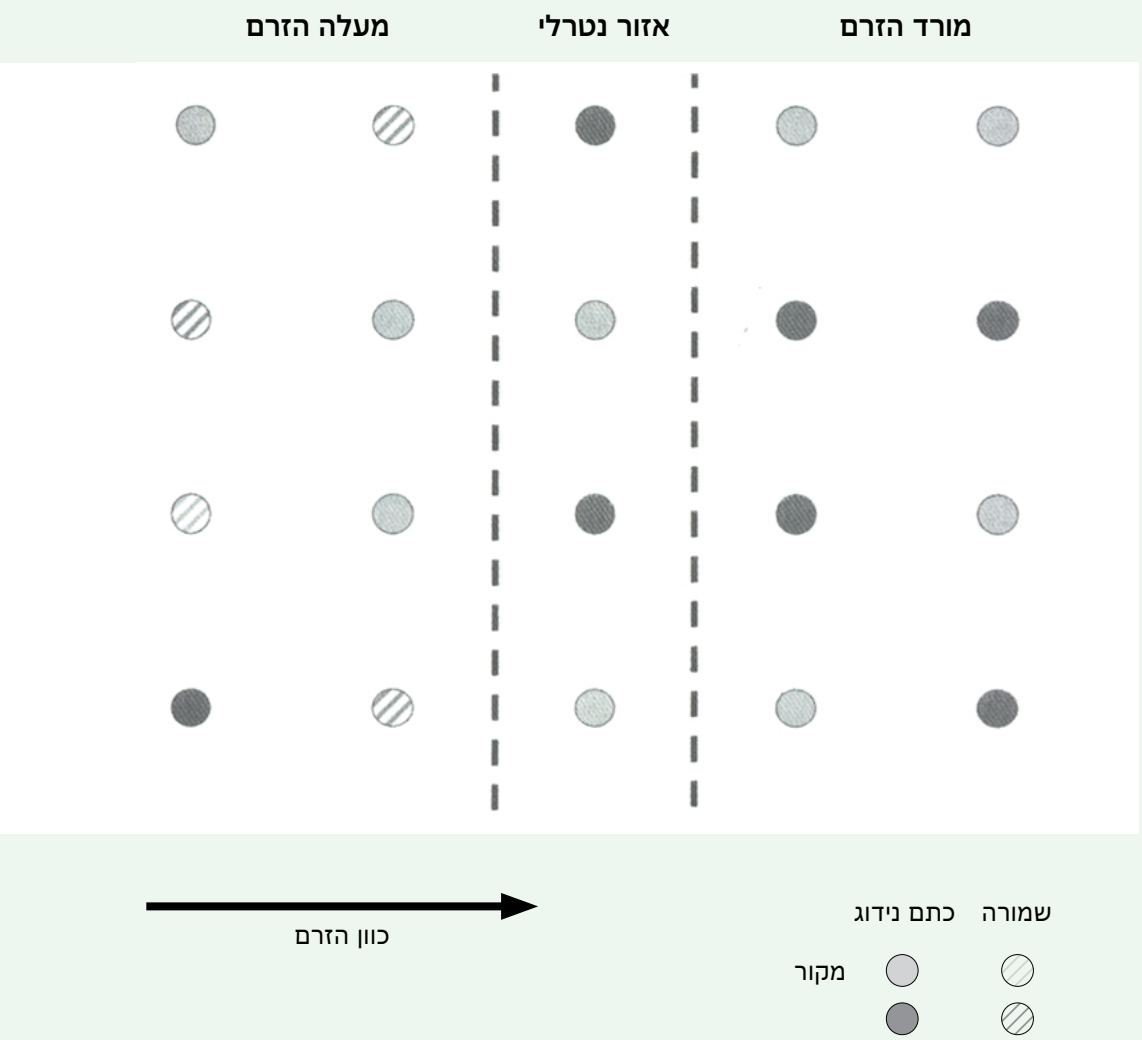
אסטרטגיות שונות למיקום שמורות לפי מיקום הכתמים בזרם:

1. שמורות במעלה הזרם
2. שמורות באזור ניטראלי
3. שמורות במורד הזרם



איור 3

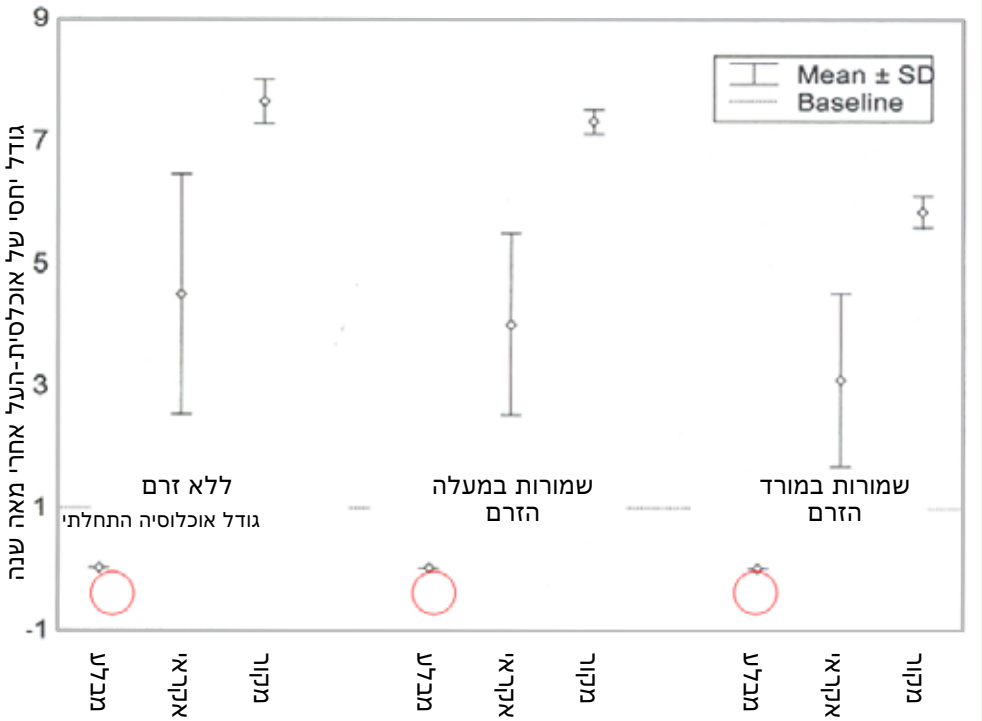
שיעור פיזור של לרוות מאוכלוסיית מקור לאוכלוסיות מבלע במרחקים וגדלים שונים



איור 4

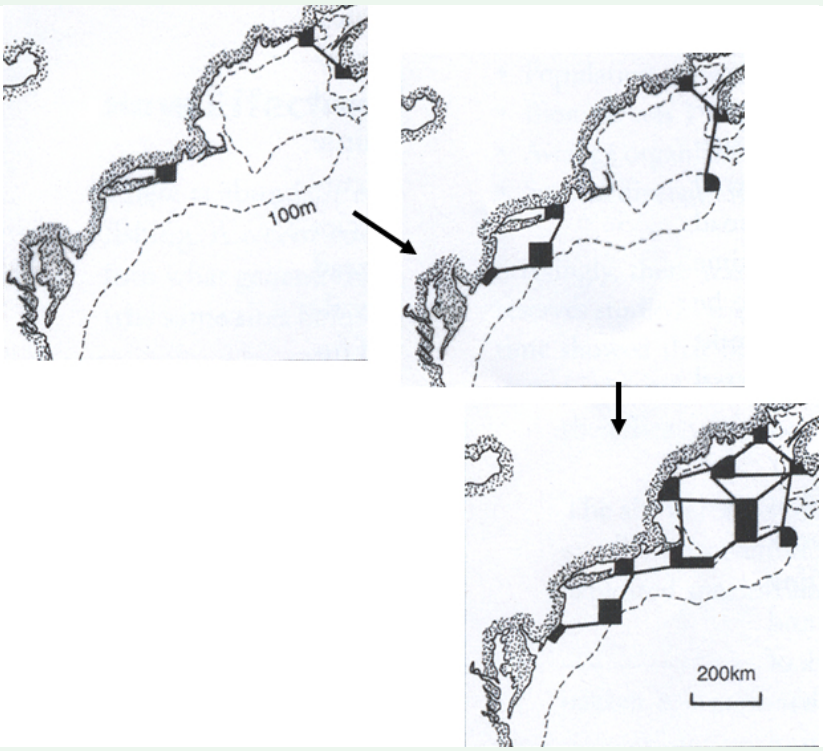
דוגמא למערך כתמים במודל הבוחן את השפעת מיקום השמורה על גודל אוכלוסיית העל. באיור, דוגמא לבחירה אחת מתוך אפשרויות רבות

לבסוף, חושב גודל אוכלוסיית העל הצפוי לאחר מאה שנה בכל אחת מן האסטרטגיות הללו, ותחת אחוזי שמירה שונים, אחוזי לחץ דייג שונים, ואחוזים שונים מכמות הכתמים המהווים אוכלוסיות מקור. השערת המודל אומרת כי כאשר כתם מסוים מהווה שמורה, לחץ הדיג שהיה עליו מוסט לכתמים האחרים (בשל השמירה לא הורידו את מספר סירות הדיג, אלא אותו מספר סירות פועל כעת על פחות כתמים ולחץ הדיג על כל כתם גדול יותר). הנתונים מראים כי שמורות הממוקמות על כתמי מקור ובמעלה הזרם יתנו את ה"תפוקה" הטובה ביותר - כלומר, את העלייה הגדולה ביותר בגודל אוכלוסיית העל יחסית לגודלה המקורי (איור 5). המודל גם מדגים כי מיקום שמורות על כתמי מבלע יכול להביא לתוצאות שליליות, כלומר לכך שגודל אוכלוסיית העל יהיה בסופו של דבר קטן יותר לעומת גודלה ללא שמורות כלל (מסומן בעיגול אדום).



איור 5

תוצאות המודל מדגימות את גודלה הסופי של אוכלוסיית-העל אחרי מאה שנה תחת אסטרטגיות שמירה שונות: מיקום שמורות על כתמי מקור או מבלע, ובמעלה או במורד הזרם. התוצאות המודגמות באיור התקבלו כאשר נתוני המודל שנבחרו היו לחץ דיג גדול (15%), 20% מהכתמים נבחרו כשמורות ו-50% מהכתמים היוו כתמי מקור. השערת המודל אומרת כי כשלחץ הדיג מורד מהכתמים השמורים הוא אינו נעלם אלא מוסט וגדל על הכתמים האחרים. העיגולים הקטנים מציינים את הערך הממוצע של 1000 "הרצות" של המודל בכל מקרה



איור 6

דוגמא למערך שמורות אפשרי לאורך צפון החוף המזרחי של ארה"ב. ככל שעולה מספר הכתמים עולים הקשרים בינהם. כאשר הפיזור נכון, מספר הקשרים עולה על מספר השמורות (לקוח ממאמר של רוברטס ועמיתיו משנת 2001)

הגישה המקובלת היום מדברת על **מערך שמורות** (**reserve network**). קלום רוברט ועמיתיו בחנו ב-2001 את אופיין הרצוי של מערכי שמורות טבע. הם מראים כי מיקום נכון של שמורות יכול להגדיל את הקשרים ביניהן. מיקום נכון של שמורות יביא לכך שמספר הקשרים בין שמורות יעלה בקצב גדול יותר ממספר השמורות המוספות (איור 6) החוקרים הגדירו כתמים כמקושרים אם מרחקם אינו

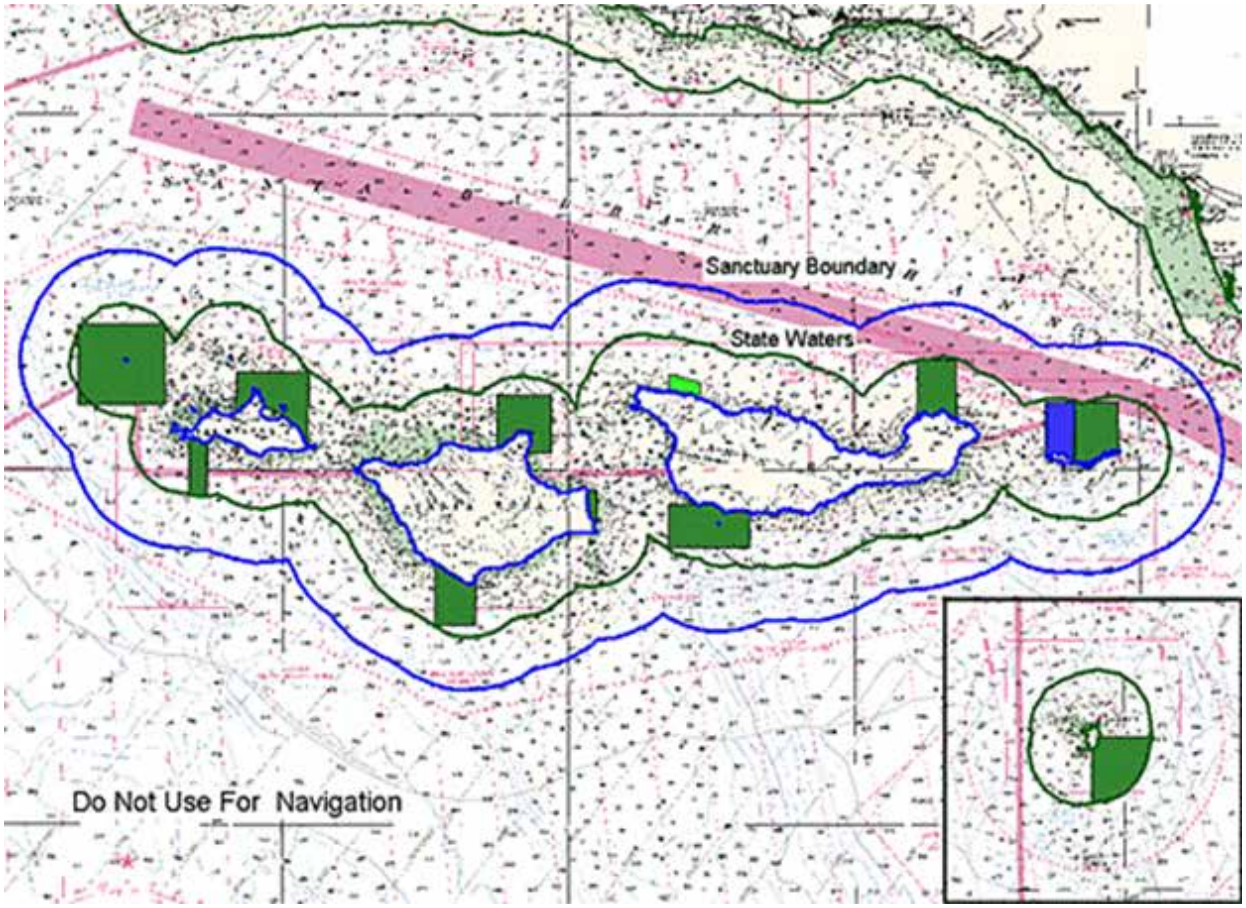
עולה על 150 ק"מ. מערך המכיל שמורות רבות בגדלים שונים ובמרחקים שונים זה מזה יאפשר:

1. קישוריות בין כתמים, שתאפשר תחלופת לארוות ומגוון גנטי
2. חזרה של כתמים בעלי אופי דומה, אשר תקטין את הסיכוי של אובדן של בית גידול מסוים בשל קטסטרופה
3. מגוון רחב ככל האפשר של תנאים ובתי גידול, אשר יגדיל את המגוון הביולוגי תחת שימור

אחד הניסיונות הראשונים ליישם גישה זו נעשה בסוף שנת 2002, אחרי מספר שנים של תכנון, באיי התעלה שמול חופי קליפורניה. אזור זה של איי התעלה נחשב עשיר ומגוון ביותר במינים ימיים, מיערות קלף צפופים, לאתרי תזונה של לווייתני ואתרי קינון של עופות ים רבים. באזור גם פרודוקטיביות עצומה התומכת בכל מארג המזון העשיר. האזורים שנבחרו כשמורות טבע, מתוך עשרות אלטרנטיבות שנבחנו, אמורים לייצג מגוון של בתי גידול שונים בסמוך לחוף ובמרחק מה ממנו (איור 7). אתרים אלה מכסים כ-20% מכלל השטח, והיוו כמובן פשרה בין הרצוי לאפשרי מבחינת כל בעלי העניין באזור, כולל אנשי שמירה, דייגים ושייטים. מומלץ להיכנס לאתר האינטרנט הרשמי, המתאר את השמורה ואת תהליך התכנון שלה, וכן את התקנות וההיבטים החינוכיים הקשורים אליה.

איור 7

תוכנית מערך השמורות שנבחר באיי התעלה מול חופי קליפורניה. שטחים בירוק כהה, אזורי שמורה ללא כל פעילות דיג. שטחים בכחול, אזורי שימור, בהם מתאפשר דיג לובסטרים חובבני ומקצועי, ודיג דגים פלאגים (לא מכמורתנים). שטחים בירוק בהיר, אזורים בהם מתאפשר דיג לובסטרים חובבני בלבד, ודיג דגים פלאגים (לא מכמורתנים)



יתרונות של שמורת טבע ימית לדיג

שמורה ימית טובה אמורה לספק את היתרונות הבאים:

1. הגדלת כמות הפרטים המתרבים: תאפשר התחדשות טובה יותר של היבול מחוץ לשמורה
2. מתן אפשרות לפרטים לגדול. לפרטים גדולים כושר רביה גדול בהרבה מלפרטים קטנים
3. גידול בכמות הפרטים מעבר לכשר הנשיאה של השמורה: תביא ל**זליגה** של פרטים (spillover effect) אל מחוץ לשמורה, שיהיו זמינים לדיג באזור זה
4. מציעה "ביטוח" כנגד אי-ודאות. תמיד יהיו אוכלוסיות מוגנות במקרה של קריסת אוכלוסיות מחוץ לשמורה
5. פחות בעיות של ניהול ממשק רב-מינים
6. אפשרויות פיקוח קלות יותר
7. קל יותר להסביר ממשק זה לקהילה האנושית לעומת מכסות על כמות הדיג וגודל הדגים

שמורות יכולות להועיל גם למינים נודדים בכך שהן נותנות:

1. הגנה על שלבי חיים קריטיים כגון הגנה על אזורי רביה והטלה והגנה על אזורי התיישבות של צעירים טרם נדידה
2. הגנה על "צווארי בקבוק" של מסלולי נדידה בהם מתרכזים פרטים רבים במסלול הנדידה
3. הגנה על בתי גידול בדרך, המאפשרים מסתור ותזונה

ברור כי אופי הניהול בתוך השמורה הינו קריטי למידת הצלחתה, ולכן חשובים ניטור שיטתי ומדויק, בכדי לבחון את מידת הצלחתה של השמורה. למשל, שונית האלמוגים, גם בתוך שמורות טבע, סובלת במקרים רבים מהרס הנגרם על ידי עוגנים של סירות תיירים וסירות דיג (איור 8), ומעודף מבקרים השוברים את האלמוגים ברגליהם ומרימים ענני חול החונקים את האלמוגים.

איור 8

סירה קשורה למצוף עגינה

קיימות מספר דרכים שבעזרתן ניתן להפחית נזקים מסוג זה. דרך למנוע נזקים מעגינה של ספינות הינה להתקין מערך של מצופים המעוגנים אל הקרקעית והסירות נקשרות אליהם. בחופי ים סוף של מצרים קיימים מערכים רבים של מצופים למטרה זו.

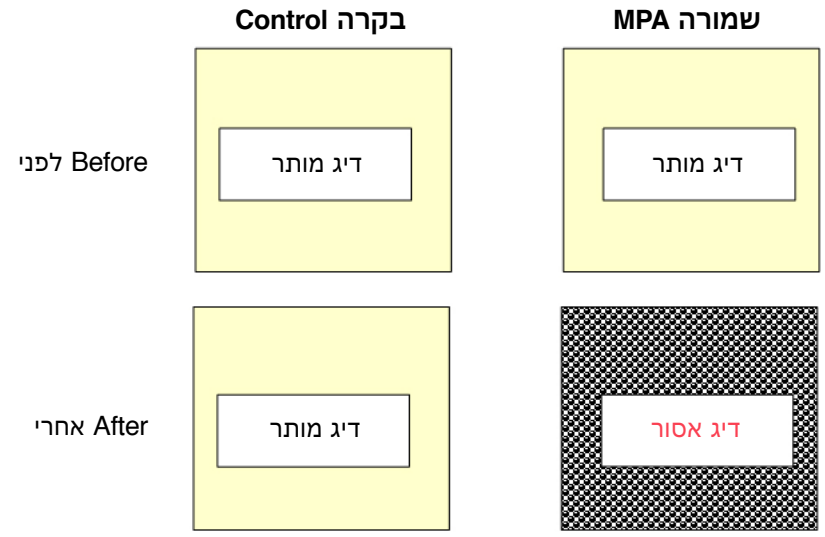
ניתן גם לווסת את כמות המבקרים בשמורה, לסגור חלקים ממנה לחלוטין וליצור מעברים מעל השונית שיאפשרו גישה למים הפתוחים שבסמוך לה מבלי לדרוך על האלמוגים בדרך, ו"לגדר" את השונית בעזרת מצופים שיסמנו גבולות אסורים למעבר. בשמורת חוף אלמוג באילת מנסים את כל הדרכים הללו. האזור הדרומי הנקרא "הגנים היפנים" סגור לצוללנים, ישנה בקרה על כמות המבקרים הכוללת (אך היא עדיין גדולה), ישנם גשרים למעבר מעל השונית, וקדמת השונית מסומנת במצופים אותם אסור לעבור (איור 9).

איור 9

שמורת חוף אלמוג. קדמת השונית מסומנת במצוף. הצילום נלקח מגשר מעבר מעל השונית

כיצד נבדוק את יעילותן של שמורות טבע?

זו אחת השאלות המרכזיות העומדות בפני המדענים ואנשי הממשק. כבר דנו רבות בכך שבכדי למדוד הצלחה של פרויקט כלשהו יש להגדיר את מטרות הפרויקט ואת המדדים להערכת הצלחתו. ניתן להגדיר יעדים קצרי מועד ויעדים לטווח זמן ארוך. התכנון הטוב ביותר של בחינת הצלחת שמורת טבע הינה שיטת ה-BACI (before/after, control/impact), כלומר בחינת מצב האזור המיועד לשימור לפני החלת השמורה ולאחריו והשוואה גם לאזורים סמוכים שאינם מיועדים לשימור (איור 10). ברוב המחקרים שהציגו נתונים על תפקודן של שמורות טבע לא ננקטה גישה זו. זאת בעיקר בשל העובדה שתוכניות הניטור החלו אחרי יסוד השמורה או בשל העדר תכנון נכון או העדר תקציבים נאותים.



איור 10

גישת BACI לניטור תפקודה של שמורת טבע

16

ישראל והים במאה ה-21

מִיה אלסר

16.1 איכות הסביבה בים התיכון ובחופי ישראל

בבואנו לדון באיכות הסביבה בים התיכון חשוב להגדיר ראשית מהי "איכות הסביבה". ניתן לומר כי איכות הסביבה של הים הינה מעין מדד למצבו של הים, המבוסס על שיפוט ערכי סובייקטיבי או, לחלופין, על מדידות מדעיות. מנקודת מבט אנושית, איכות הסביבה הימית הרצויה אינה ערך קבוע, שכן היא תלויה בשימוש שנעשה במי הים; לדוגמא, מי הים המשמשים לגידולי חקלאות ימית צריכים להיות "איכותיים" יותר ממי ים בנמל, המשמש לפעילות מסחרית. מנקודת מבט אקולוגית, כל גורם המשנה את הסביבה כתוצאה מפעילות האדם - מזיהומי נפט והרחפת סדימנט על ידי צוללים, ועד לדיג יתר של דגי טונה - פוגע בסביבה הימית.

חופים מזוהמים בערמות אשפה, כתמי שמן צפים על פני המים, או פגיעה ביצורים ימיים (למשל, תמותת דולפינים או שבירת אלמוגים בשונית) מהווים עדויות לפגיעות באיכות הסביבה הימית, שקל להבחין בהן. לעומת זאת, בסביבה הימית מתרחשים גם שינויים שאינם בולטים לעין, ולעיתים דווקא הם קשים ומזיקים יותר: נוכחות מתכות כבדות בקרקעית הים וברקמות דגים, זיהום חופי רחצה בחיידקים נושאי מחלות ועוד. במקרים אלה, איננו יכולים לראות את האיום, אך ניתן למדדו ולהשוותו לקריטריונים מדעיים, המתייחסים הן לסביבה הימית והן לבריאות האדם.

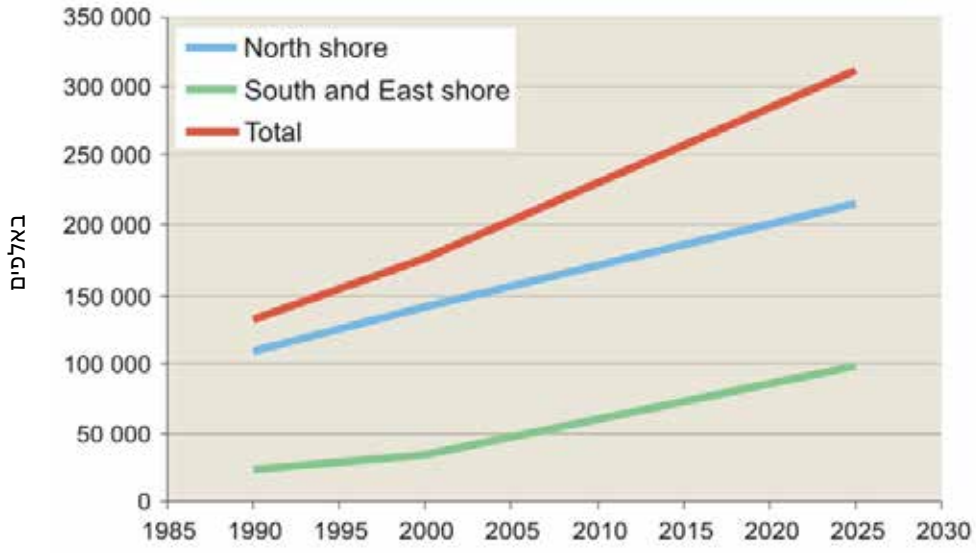
הים התיכון

ומה באשר לאיכות הסביבה הימית **בים התיכון**? הים התיכון שימש במשך אלפי שנים מקור ובסיס לצמיחתן של ציוויליזציות מגוונות שהתפתחו לחופיו. הים היה תמיד מקור חיים המספק מזון, תחבורה ותעסוקה, ושימש כגשר בין מרכזי הכוח והתרבויות לאורך ההיסטוריה האנושית. אך מקור חיים זה הולך ומשתנה במהירות בשל אותן ציוויליזציות החיות לחופיו. זהו ים קטן יחסית וסגור למחצה, ולכן מהווה אגן היקוות לכל המתרחש על היבשה שסביבו, כולל מזהמים. לים נשפכים חמישה נהרות גדולים: רון (צרפת), פו (איטליה), אברו (ספרד), אקסו (תורכיה) והנילוס (מצריים), ומאות נהרות נוספים קטנים יותר. באזור הים התיכון אקלים חם יחסית הגורם להתאיידות רבה. המים שהתאיידו מוחלפים במים המגיעים בעיקר מהאוקיינוס האטלנטי, וקצב תחלופת המים בים התיכון הוא כשמונים שנה (הזמן שלוקח לכל המים בים להתחלף). זהו ים דל בנוטריינטים וביצור ראשוני (**ים אוליגוטרופי**), ולכן אינו מהווה בסיס לפעילות דיג אינטנסיבית, יחסית למקומות רבים אחרים בעולם, אך עדיין הוא מזין רבים מהתושבים החיים לחופו. בים התיכון נמצאים כ-18% ממיני הצומח ו-7.5% ממיני החי הימי העולמי, כאשר 28% הם מינים אנדמיים.

הים התיכון

הים התיכון הוא שריד של האוקיינוס הקדום - ים תטיס - שנוצר בהתפרקות יבשת-העל פנגיאה ליבשת צפונית, **'לאורסיה'** ויבשת דרומית - **'גונדוונה'**. כיום מצוי הים התיכון באזור מפגש של שלוש יבשות: אפריקה, אסיה ואירופה ומכאן שמו: 'תיכון' משמעו אמצעי, מרכזי.

איור 1. ביקורי תיירות פנים וחוץ, 1990-2025



מקור: Estimation Plan Bleu

לאורך חופי הים התיכון (כ-46,000 ק"מ) התגוררו נכון לשנת 2015, כ-160 מיליון תושבים, ובעונת הקיץ מספרם מוכפל עם הגעת יותר מ-340 מיליון תיירים לחופיו (30% מכלל התיירות העולמית) (איור 1).

כמות תושבים זו גורמת לעומס סביבתי כבד על האזור החופי. קצב תהליכי הפיתוח, העיור והתיעוש לאורך חופיו של הים התיכון הוא מהיר ביותר ומדאיג מאוד. שטחו של הים התיכון מהווה כ-3% בלבד משטח הימים והאוקיינוסים העולמי, אך הוא מרכז על פניו כ-30% מנפח התחבורה וההובלה הימית העולמי (קרוב לרבע מיליון אוניות בכל שנה), דבר המוסיף לעומסי זיהום גבוהים.

בשל התנאים המיוחדים בים התיכון - ים סגור כמעט, עם טמפרטורות מים גבוהות בייחוד בחלקו הדרום-מזרחי, התאדות גבוהה מאד ותחלופת מים נמוכה, זיהום הים מהווה בעיה משמעותית בשל הצטברות המזהמים לאורך זמן. נוסיף לכך את העובדה, שבחופים הצפוניים שוכנות מדינות שהן מהמתועשות ביותר בעולם, בעוד שבחופים אחרים יש מדינות מתפתחות, עם אפשרויות מוגבלות לטיפול באיכות הסביבה הימית, והבעיות גדלות עוד יותר. כשליש מהאוכלוסייה חיים בקרבת החופים, ובאזור זה מרוכזת עיקר הפעילות הכלכלית, תעשיות, תחנות כח ומתקני התפלה, ובמיוחד התיירות, המכפילה את האוכלוסייה באזורים רבים בעונת הקיץ.

המרחב הימי של ישראל

המרחב הימי של מדינות רבות משפיע באופן ישיר על שגשוגן וביטחונן והוא מושפע **מתהליכים גיאופוליטיים** ושינויים סביבתיים. הקמתה של מדינת ישראל התאפיינה בבנייה ופיתוח 'עם הגב לים' ועם הגידול הדמוגרפי והתפתחות התעשייה, גברו העומס והביקוש לשימושים ופעילויות קיימים ומוכרים כגון ספורט ונופש, דיג וספנות. בעשור האחרון, הביאו גילוי ופיתוח משאבים ימיים חדשים, כגון הגז הטבעי והתפלת מי ים, להגברת הלחץ האנושי על הים, אך גם להכרה בחשיבות השמירה על משאב חשוב זה.

החל שיח מדעי, כלכלי וציבורי על 'שירותי המערכת האקולוגית הימית' החיוניים כמו - אספקת מזון מהים, מים להתפלה, גז טבעי ושירותי ויסות אקלימי. הכרה זו, יחד עם הצפי להרחבת הפעילות האנושית בים, העלו את הצורך בתכנון והסדרה של המרחב הימי, אשר יאפשרו למצות את הפוטנציאל הכלכלי במרחב הימי, תוך שימור המערכת האקולוגית ומשאבי המרחב הימי. מסיבות אלו, פרסם מנהל התכנון בשנת 2020 את מסמך המדיניות למרחב הימי בישראל, ים תיכון, אשר מפרט את המצב הקיים ומתווה המלצות למדיניות ימית חדשה לישראל.

בפרק זה נסקור את ציוני הדרך המשמעותיים במרחב הימי של ישראל: זיהום הים, שהיווה את האיום האנתרופוגני המשמעותי ביותר על הסביבה הימית; מיזם לעידוד אוכלוסיות צבי הים בחופים הים-תיכוניים של ישראל, שהיה בין הראשונים להגנת בעלי חיים ימיים וקוצר כיום את פירותיו; תקנות הדיג החדשות שהפנימו מציאות משתנה; הכרזה והגדלה של שמורות טבע ימיות כדרך התמודדות עם דיג יתר ושינויי האקלים; והפרויקט העתידי להקמת איים מלאכותיים מול חופי ישראל.

זיהום הים בישראל

עד לפני כעשור, זיהום הים ממקור יבשתיים (תעשייה וביוב) היווה את הבעיה העיקרית שעמדה בפני הסביבה הימית בישראל. מפרץ חיפה והקישון הזורם אליו, נחשבו לאחד מהאתרים המזוהמים ביותר בים התיכון ואולי בעולם. מפעל חיפה כימיקלים, אחד המזהמים העיקריים באזור, דורג בין 50 המפעלים המזהמים בעולם. רבים מנחלי החוף בישראל נמצאו בעקה רבת שנים כתוצאה מזיהום, התייבשות והסדרה. חלקם עדיין משמשים כנקזים של מי קולחין ושפכים, המוזרמים ישירות אל הים (איור 2).

עם זאת, מנקודת מבט היסטורית, אנו נמצאים כיום בעיצומו של תהליך שיפור מתמשך במצב הנחלים, עליו אמונה המנהלה הארצית לשיקום נחלים, אך תהליך זה צפוי להמשך עוד זמן רב. אם נמשיך ונעקוב אחרי הקישון כסממן מקומי, נראה כי מורד נחל הקישון מצוי בתהליך של שיקום ממושך, והפך מנחל שבו לא התקיימו חיים כלל (מלבד חיידקים), לנחל שבו ניתן למצוא שוב מיני דגים וחסרי חוליות האופייניים לנחלי החוף של ישראל. בשנת 2017 הכריע בית משפט השלום בחיפה על סגירת מיכל האמוניה של מפעל 'חיפה כימיקלים', מה שהביא להשבתת פעילות המפעל הצפוני של החברה ולשיפור משמעותי במצבו של שפך הנחל.

גאופוליטיקה

גאופוליטיקה הוא תחום מחקר המנתח את מערכת היחסים הבינלאומיים מנקודת מבט גאוגרפית. הנחת היסוד המרכזית של הגאופוליטיקה היא שמיקומה של מדינה, גבולותיה והטופוגרפיה שלה, מהווים גורמים משמעותיים בעיצוב מדיניות חוץ שלה. הגאופוליטיקה שואפת לספק הסברים להתרחשויות הבינלאומיות, ואף לחזות אותן במידת מה.

איור 2

ביוב זורם לים בת"א
1.12.2015

את מקומם של שפכי התעשייה כגורם זיהום עיקרי בים בישראל, תפשה פסולת הפלסטיק ובעיקר המיקרופלסטיק. מיקרופלסטיק הם חלקיקי פלסטיק בגודל של 0.3-5 מ"מ שמקורם בים הוא בעיקר פסולת פלסטיק ששהתה זמן רב בים. חלקיקים אלו מוסעים למרחקים ארוכים על ידי הזרמים ומסבים נזק רב, עליו הרחבנו בפרק 13.3.

ממצאי דו"ח ניטור הפסולת הימית בישראל לשנת 2019 מראים כי:

- כ-70% מהפסולת בקרקעית הים והפסולת הצפה היא חלקי שקיות ואריזות פלסטיק, ורובה בגודל מיקרו-פלסטיק.
- מקורם של חלקיקי פלסטיק גדולים מ-5 מ"מ הם בפסולת שמתפרקת לאורך זמן ביבשה, לדוגמא בגדות של נחלים, ואז נשטפת לים באירועי גשם. חלקיקים קטנים מקורם בעיקר מפלסטיק ששהה זמן רב במי הים, שכן חלקיקים אלה מוסעים מרחוק על-ידי זרמים.
- בשנת 2019 נמצאו במימי ישראל 0.7-13 מיליון פרטי מיקרופלסטיק מרחפים בקמ"ר, ריכוז גבוה בהשוואה למערב הים התיכון.
- רוב חלקיקי המיקרו-פלסטיק הצף שנמצאו בניטור, בין 50% ל-80%, היו בצבע לבן או שקוף. פלסטיק לבן או שקוף הוא בעל פוטנציאל גבוה יותר לגרום נזק אקולוגי בשל הנטייה של בעלי חיים לבלוע אותו שכן הוא דומה לסוגי המזון הצפים בים.
- בקרקעית הים התיכון, בעומק מים שבין 20 מטר ועד 1700 מטר, נצפו בעיקר חתיכות של שקיות ואריזות מזון. ריכוז גבוה במיוחד נמצא בעומק מים של 200-500 מטר (4,000-10,000 פרטים לקמ"ר). באתרים החופיים נדגמו 400-1,000 פרטי פסולת בחתך של 100 מטר חוף, כמות הנמוכה מהממוצע העולמי. הפער נובע ככל הנראה מפעולות הניקיון השוטף של החופים בישראל, לרבות החופים הפתוחים, גם במסגרת תוכנית "חוף נקי" של המשרד להגנת הסביבה.
- בדיגום חופים שבוצע בשנת 2020, בתקופת הקורונה, הופיעו פרטי פסולת חדשים כגון מסכות וכפפות, שלא נצפו לפני כן.

כמדינה החברה באמנת ברצלונה, מחויבת מדינת ישראל לתכנית ההפחתה האזורית מפסולת ימית וחופית. על פי תוכנית זו, חובה על המדינות החברות לנקוט שורה ארוכה של פעולות כדי למזער את ממדי תופעת הפסולת הימית ואת השפעותיה המזיקות על הסביבה הימית של הים ועל האוכלוסייה השוכנת לחופיו.

מזהם נוסף, שהיה נפוץ בעבר וקיווינו שלא נפגוש עוד, הופיע באזורנו לאחרונה - הזפת. בחודש פברואר 2021, בזמן ימי סערה וגלי ים גבוהים במיוחד, החלו להישטף כמויות גדולות של זפת לאורך החוף הים-תיכוני של ישראל, מראש הנקרה בצפון ועד זיקים בדרום. מקור הזיהום היה ככל הנראה בדליפה של מאות טונות של נפט גולמי בתחום המים הכלכליים של ישראל. זפת היא חומר צמיגי מאוד בצבע שחור או חום, העשוי תרכובות אורגניות כבדות ולא נדיפות. לרוב זהו תוצר לוואי הנותר בסופו של תהליך זיקוק חומר אורגני כמו פחם ונפט. לאורך זמן, כתמי הנפט הצפים על פני המים מאבדים מהרכיב הקל שלהם המתנדף לאטמוספרה, צמיגותם עולה והם נעשים לזפת. זפת אינה מסיסה במים והיא דביקה מאוד. התכונות האלה הופכות אותה למפגע משמעותי בסביבה הימית והחופית. היא עלולה לכסות משטחי סלע נרחבים המשמשים בית גידול ליצורים רבים, לאטום את פני החול ואף להיצמד לבעלי החיים עצמם. רגישים במיוחד הם בעלי החיים שנוהגים לשהות על פני המים, כמו עופות וצבי ים. הם טובלים ישירות בשכבת הנפט כאשר הם נוחתים על פני המים או עולים דרכם כדי לנשום אוויר.

מעבר לפגיעה הפיזית המיידית בבעלי החיים, דליפות נפט וזפת טומנות בחובן נזקים ארוכי טווח משמעותיים לא פחות. העיקרי מביניהם הוא שחרור של חומרים רעילים לסביבה, והם ממשיכים להיפלט מגושי הזפת במשך שנים, גם אחרי שהם נספחו לחוף. הרעילות הגבוהה נובעת בין השאר מתרכובות פחמימנים ארומטיים טבעתיים (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons ובקיצור PAH). הן נקראות כך כיוון שאטומי הפחמן בהן מסודרים במבנים של טבעות, ואחד המאפיינים שלהן הוא ריח בולט. רעילותן הגבוהה נובעת מכך שהמבנה המולקולרי שלהן דומה מאוד לזה של אחד ממרכיבי ה-DNA, החומר התורשתי של כל היצורים החיים (חוץ מכמה נגיפים). בשל כך, התרכובות האלה מסוגלות לחדור אל תוך מולקולת ה-DNA ולשבש את תהליכי השכפול שלה בתאים. אצל בני אדם נמצא כי חשיפה לתרכובות PAH מעלה משמעותית את הסיכוי לחלות בסרטן ובמחלות כלי דם וכן לפגיעה בהתפתחות העובר. מחקרים שעקבו אחר השלכותיהן של דליפות נפט שהתרחשו בחופי אלסקה ובמפרץ מקסיקו על בריאות בעלי חיים, מצאו כי תרכובות PAH שנפלטו לסביבה פגעו בהתפתחות הלב אצל דגים, דבר שהוביל למותם עוד בשלב הביצה או לבקיעה של דגיגים חולים וחלשים. נזקים התפתחותיים כתוצאה מחשיפה לתרכובות PAH נמצאו גם אצל יונקים ימיים, קיפודי ים וחסרי חוליות נוספים. להשפעות האלה עלולות להיות השלכות מרחיקות לכת על מארג המזון בים, ולכן הן עלולות להוביל לשינויים אקולוגיים נרחבים.

איור 3

צב ים בוגר בשמורת-ים ראש הנקרה (עמית אלסר)

הצלת צבי הים

צבי הים הם מינים בסכנת הכחדה עולמית. בעבר, התקיימה בישראל אוכלוסייה מפוארת בת אלפי פרטים של צב ים חום *Caretta caretta* (איור 3) וצב ים ירוק *Chelonia mydas*, אולם כתוצאה מציד שהתרחש כאן בראשית המאה העשרים למטרות מאכל או שימושים מסחריים בשריונם, ובשל הפגיעה המתמשכת בחופי הארץ, הגיעו מינים אלה לסף הכחדה גם בישראל. בעקבות צמצום אוכלוסיותיהם בעולם, הכריז הארגון הבינלאומי לשמירה על הטבע (IUCN) על כל מיני צבי הים כנתונים בסכנת הכחדה, בעוד הארגון הבינלאומי למניעת סחר בבעלי-חיים מוגנים (CITES) אסר לסחור בבשרם או בשריונם.

צב הים הירוק וצב הים החום נודדים ממערב הים התיכון, שם הם ניזונים, אל חופיו המזרחיים, המשמשים חופי ההטלה. הצבים הירוקים והחומים מקננים בחופי הים התיכון שבשטח מדינת ישראל, כמו גם בחופי המדינות השכנות (סוריה, לבנון, מצרים, קפריסין, טורקיה ויוון). נקבת צב ים חום מטילה כ-2 קינים, אחת לשנתיים לערך, אשר בכל אחד מהם כ-80 ביצים. נקבת צב ים ירוק מטילה כ-3 קינים, אחת לשלוש שנים לערך, אשר בכל אחד מהם כ-130 ביצים. בתנאים טבעיים, רק צאצא אחד בממוצע יגיע לבגרות מינית ויוכל בעצמו להעמיד צאצאים. מבין יתר הצאצאים - חלקם ייטרפו טרם הבקיעה, אחרים ימותו בים על ידי טורפים טבעיים או כתוצאה מפעילות אנושית. השתלטות האדם על חופי ההטלה גורמת לפגיעה נוספת במאמץ הרבייה, כשנקבות צבים מתקשות להטיל בשל תאורה, רעש ובנייה על החוף, וכן כאשר **אבקועים** מאבדים את דרכם לים כשהם עוקבים אחר תאורה מלאכותית. לפיכך, שיפור השרידות של הביצים המוטלות צפוי להאיץ את קצב ההתאוששות של האוכלוסייה.

בישראל, פועלים צוותי הרשות לשמירת הטבע והגנים לעידוד רבית צבי-הים המקננים בחופים, מאז שנת 1979. בשלב הראשון, הסתכמה העשייה בסיורי-חוף

אֶבְקוּעַ
אֶבְקוּעַ (באנגלית hatchling) הוא שם כולל בביולוגיה לצאצאים של בעלי חיים (בעיקר זוחלים, אך גם פרוקי-רגליים ובעלי חיים נוספים), הבוקעים מביצה כשהם דומים בצורתם לפרט הבוגר ומסוגלים לתפקד באופן עצמאי.

איור 4

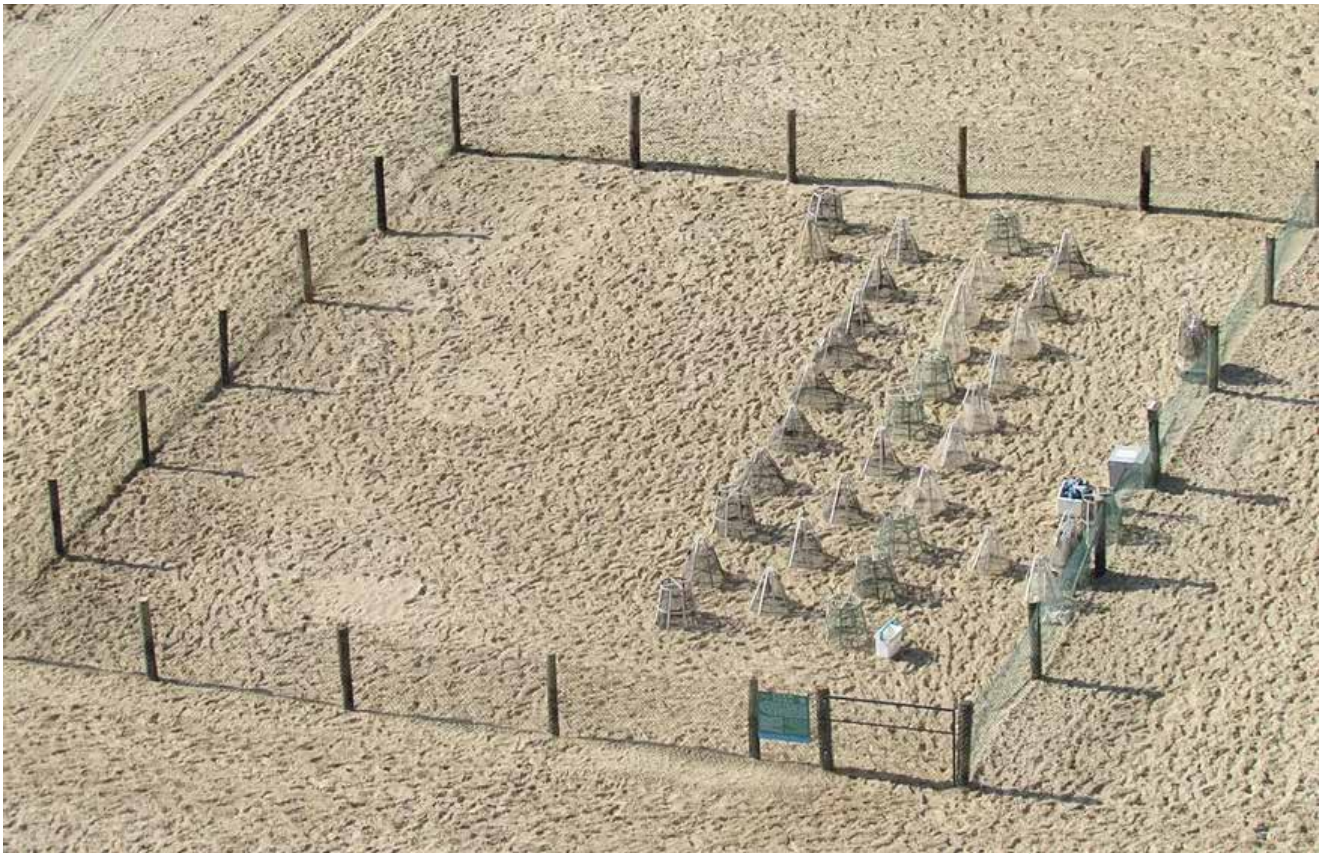
עקבות צבת ים ירוקה
(יניב לוי,
המרכז להצלת צבי ים)

מזדמנים, בעיקר בצפון הארץ, באיתור קינים, סימונם ומעקב אחריהם במשך העונה. עיקר הפעילות רוכזה בחוף הכרמל, שנחשב אזור ההטלה החשוב ביותר. המידע שנאסף, הצביע על מגמת ירידה במספר קיני צבי הים, ועורר את הצורך בהכנת תוכנית מימשק רב-שנתית להגנתם ולעידוד רבייתם בחופי ישראל. תוכנית זו הוכנה במהלך שנת 1992 ויצאה לדרך בשנת 1993. מאז ועד היום, מקיימים פקחי ומתנדבי הרשות סיורי סריקה בעונת ההטלה (מאמצע מאי ועד סוף אוגוסט) בכל החופים שאינם בנויים או סגורים מטעמי ביטחון (איור 4).

כל קן שמאותר, נשלף מגומת ההטלה, מונח בצידנית ומובל אל אתר חלופי מוגן, מגודר ומשולט. בחוות הקינים, נחפרת גומה מלאכותית, שמידותיה תואמות את אלו של הגומה המקורית, ובתוכה מוטמנות הביצים. חוות הקינים עמדו תחת פיקוח והשגחה של פקחי הרשות, על-מנת להבטיח הגנה על המשך התפתחותן התקינה של הביצים ובקיעתן. בעונת הבקיעה, מחודש אוגוסט ועד אוקטובר, מתנדבי רשות הטבע והגנים מאיישים את חוות ההדגרה מידי לילה, ומחכים להגחת האבקועים. עם ההגחה, פותחים המתנדבים את כלוב המתכת שמכסה את הקן, סופרים את האבקועים ומלווים אותם בזחילתם אל הים (איור 5).

איור 5

אבקוע ממין צב ים ירוק זוחל אל הים
(יניב לוי,
המרכז להצלת צבי ים)



איור 6

חוות הדגרה בחוף גלים
(אייל כהן,
המרכז להצלת צבי ים)

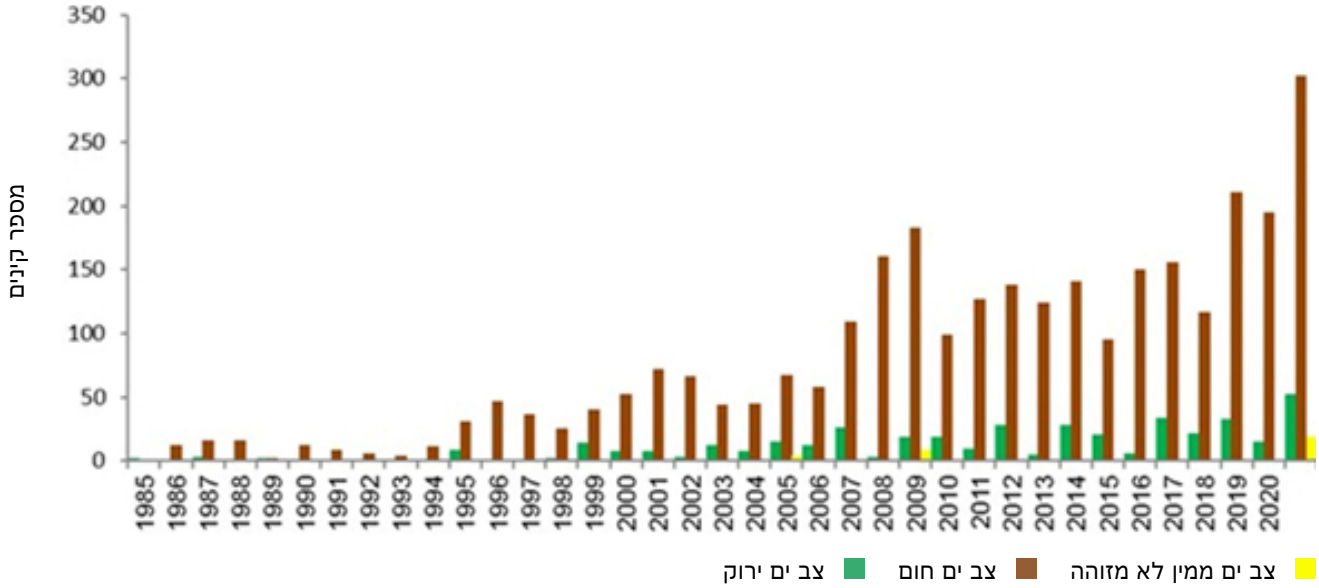
העתקת הקינים לחוות מגודרות (איור 6) וההשגחה על האבקועים הזוחלים אל הים מגדילה את מספר הצאצאים המשתחררים לים על ידי מניעת טריפה של הביצים והאבקועים בעודם בחוף, ומניעת תמותה של אבקועים בעקבות זחילה לכיוון לא נכון. בנוסף, מיקום חוות ההדגרה בשמורות טבע חופיות צפוי להשפיע בטווח הארוך על הנקבות המטילות שיחזרו להטיל בחופים אלו, שכן נקבות צפויות להטיל בחוף בו בקעו.

משנת 1998 ניתן לראות מגמת עלייה הדרגתית במספר הקינים של צבי הים המאותרים בחוף (איור 7), ועמה עליה במספר הצבונים שמשולחים לים.

פרויקט העתקת הקינים פעיל מזה 30 שנה, בדומה לפרק הזמן הדרוש להגעה לבגרות מינית בצבי ים. בהתאם לזה, בשנים האחרונות ניכרת עליה הדרגתית במספר ההטלות בחופי הארץ, בעיקר בקרב נקבות צב הים החום.
בשנת 2020 אותרו בעונת ההטלות כ-380 קיני נקבות צבי ים לאורך חופי הארץ - שיא של כל השנים! 7,856 אבקועי צבי ים בקעו מהקנים ושוחררו לים.

בשנת 1999 הוקם המרכז הארצי להצלת צבי ים במטרה לשקם ולהשיב לטבע צבי ים פגועים, לאחר החלמה והתאוששות. מרכז ההצלה פועל לשיקום אוכלוסיות צבי הים המקומיות בדרכים מגוונות: הגנה פיזית על הביצים המוטלות בחופים, שיקום אוכלוסיית צב הים הירוק באמצעות טיפוח וקיום גרעין רבייה של מין זה, סקרים ומחקר, חינוך, הסברה והעלאת מודעות באמצעי התקשורת, ובקיום סיורים מודרכים לקהל. באתר המרכז ניתן לעקוב אחר צבי ים שהוצמד להם משדר לוויני, כדי ללמוד על מרחב המחיה שלהם וטווחי הנדידה.

איור 7. מספר קיני צבי הים שנמצאו לאורך החוף הים-תיכוני של ישראל



על פי נתוני המרכז הארצי להצלת צבי-ים, רשות הטבע והגנים

במהלך חורף 2018-19 הוחפו לאורך כל חופי הים התיכון בישראל 250 צבי ים, מרביתם נמצאו מתים. הצבים שהוחפו משתייכים לשני המינים הנפוצים באזורינו: צב ים חום וצב ים ירוק. היחס בין המינים בהחפות היה דומה ליחס בין המינים בשכיחותם באזור (1:4 צב הים הירוק והחום בהתאמה). מתוך הצבים שהוחפו בחורף 2018-19, 48 צבים הוחפו חיים אך פגועים או פצועים מסיבות שונות. כחלק מתהליך האבחון עברו בדיקות מרובות, כולל **CT** של כל הגוף. תוצאות האבחון האחרון הראו כי 50% מהצבים סבלו מטראומה ברקמות רכות (ריאות ואוזן תיכונה) האופיינית לפגיעות הדף. אוכלוסיות שני מיני הצבים נמצאות בישראל תחת איום גבוה (צב הים הירוק מוגדר בסכנת הכחדה והחום מוגדר כעתידו בסכנה) כך ששיעור ההחפות הגבוה מדאיג. העובדה כי החורף הנידון לא היה חריג בעוצמתו, יחד עם המספר הגבוה של צבים פגועי הדף, העלתה השערה כי הסיבה לכך היא השפעה אנושית יוצאת דופן.

דיג יתר

על פי דוחות ומחקרים מהשנים האחרונות מתברר כי שלל הדיג בים התיכון כולו הולך ופוחת, כאשר בישראל מדווחת ירידה של כ-45 אחוז בשלל הדיג. כאשר כמות הדגה יורדת באופן משמעותי, לא רק אספקת המזון מן הים נפגעת, אלא היציבות של כל המערכת האקולוגית הימית מתערערת. הדגים הם חלק ממארג מזון מסועף, וכאשר הם נעלמים, המינים שניזונים מהם, כמו כרישים, דולפינים ולווייתנים, נפגעים אף הם. אחת הסיבות המרכזיות לירידה בשלל הדיג בים התיכון היא דיג יתר, בנוסף למספר גורמים נוספים, כמו חדירה של מינים פולשים מים סוף תוך דחיקתם של מינים מקומיים, התחממות הים התיכון כחלק משינוי האקלים, זיהום הים ופגיעה בבתי גידול, הקמת תשתיות חופיות ותשתיות ימיות ועוד. דיג יתר הוא מצב שבו כמות הדגים הנתפסת בשיטות הדיג השונות,

גדולה מיכולת ההתחדשות של האוכלוסייה הטבעית, ועל כן שלל הדיג יורד ולא עולה גם כשמעלים את מאמץ הדיג (יותר סירות דיג, יותר שעות מנוע, מנועים חזקים יותר וסירות גדולות יותר). דיג יתר מקטין את אוכלוסיות הדגים בים ופוגע בכושר ההתרבות שלהם. במצב זה, הדייגים בעצם עלולים לפגוע בפרנסתם במו ידיהם.

בעקבות מהלך ציבורי שקרא לבצע רפורמה בדיג בים (מהלך שהחל בקמפיין של החברה להגנת הטבע וכלל, בין השאר, עתירות לבג"ץ כנגד המדינה), הגיש משרד החקלאות לכנסת תקנות דיג חדשות שאושרו בסוף 2016 בוועדת הכלכלה. עיקרי הרפורמה החדשה בענף הדיג כוללים את צמצום צי ספינות המכמורת והפסקת דיג המכמורת בצפון הארץ (מחוף דור וצפונה) תוך מתן פיצוי לדייגים שהוצאו מהים ומספר הגבלות נוספות, הנוגעות להגדלה של העומק המינימלי לדיג על ידי ספינות מכמורת (מחוף דור דרומה), כדי למנוע פגיעה ברכסי הכורכר הימיים ובסלעים שהם בתי גידול חשובים לדגים ולבעלי חיים ימיים נוספים; קביעת תקופות שבהן תיאסר פעילות דיג, כדי לאפשר את הִתְרבות הדגים (עונת הרבייה) ואת גדילת הצאצאים הצעירים והצטרפותם לאוכלוסייה הבוגרת (עונת הגיוס); איסור דיג בספינות מכמורת בעונת הגיוס למשך 90 ימים, כדי להקטין את אחוז הדגים הקטנים הנתפסים ברשתות ומושלכים בחזרה אל הים, ולצמצם משמעותית את הפגיעה בצבי הים ובערכי טבע נוספים; וכן הגבלת גודל עיני רשתות הדיג (כלומר, החורים ברשתות) למקובל באגן הים התיכון, כדי שתתאפשר תפיסת דגים גדולים יותר לאחר שהגיעו על פי רוב לבגרות מינית והעמידו צאצאים. בנוסף, נקבעה מכסת שלל יומית מקסימלית לדיג ספורטיבי.

כיום ענף הדיג בים התיכון מספק כ-2% בלבד מצריכת הדגה בישראל. ייבוא, חקלאות מים וחקלאות ימית צפויים להמשיך ולהיות ספקי הדגה העיקריים ברמה המשקית. ניהול נכון של ממשק הדיג יכול לשפר את רווחת הדייגים ואת מצב המערכת האקולוגית, ובמקביל לכך לתת יתרון למינים מקומיים.

התחממות מזרח הים התיכון

אגן הלבנט במזרח הים התיכון מאופיין בערכי טמפרטורה ומליחות קיצוניים וביכוזים נמוכים במיוחד של נוטריינטים ומיקרו-אצות (**אולטרה-אוליגוטרופי**). לפי תחזיות אקלימיות, הטמפרטורה במזרח הים התיכון צפויה לעלות בעשרות השנים הבאות. התחממות זו משפיעה על מידת השיכוב התרמי ועל טמפרטורות פני המים, ובמיוחד בים הרדוד. השינויים הגלובליים משפיעים גם על המליחות והחומציות של מי הים וגורמים לשינויים במשטר הזרמים של מסות המים בים התיכון ובעקבות כך לשינויים ברמת החמצן המומס והנוטריינטים ובהתאם על המערכת האקולוגית בכלל.

דו"ח של המכון לחקר ימים ואגמים על מצב הים התיכון לשנת 2016-2017, קובע שהים התיכון מתחמם בקצב של 0.1°C ו-0.008‰ בשנה בממוצע - ובסך הכול הוא התחמם בכשלוש (!) מעלות צלזיוס בשלושת העשורים האחרונים. טמפרטורת המים בים התיכון מגיעה בשנים האחרונות לשיא של 31.5°C בכל שנה, טמפרטורה שבעבר הייתה נדירה באזור. מידע מוגבל מן העבר,

לצד פעולות ניטור וסקרים הנעשים היום, מצביעים על כך שיצורים ימיים שעד לפני כעשור או שניים היו נפוצים באזורנו הולכים ונעלמים, או שכבר נעלמו לחלוטין. דוגמה לכך הם קיפודי הים שהיו נפוצים מאוד בחופי ישראל, כמו בשאר הים התיכון ואחת ההשערות להיעלמותם היא חוסר יכולתם לשרוד טמפרטורות הגבוהות מ-30.5°C.

תופעה נוספת המתגברת בעקבות התחממות המים היא חדירת מינים פולשים רבים מים סוף לים התיכון דרך תעלת סואץ אשר משפיעה על המערכת האקולוגית המקומית. רבים מהמינים המקומיים אינם מותאמים לטמפרטורות השיא החדשות של הים, ואילו המינים הפולשים שנבחנו יכולים לשרוד בטמפרטורות גבוהות יותר. בשל כך, בעולם חם יותר למינים הפולשים מים סוף יתרון והם מצליחים להתרבות ולשגשג בבתי הגידול המקומיים, ולהחליף את המינים שהיו נפוצים בעבר. לחלק מן הפולשים יש תכונות חדשות לחלוטין במערכת, ולכן יכולה להיות להם השפעה מרחיקת לכת על תפקוד המערכת האקולוגית כולה. אחד החששות בהקשר זה הוא שהמינים הפולשים משנים את הרכב המערכת האקולוגית של מזרח הים התיכון - אשר מבוססת על אקלים סוב-טרופי ובהתאם מקיימת מינים ייחודיים המאפיינים אקלים שכזה - והופכים אותה לבעלת מאפיינים טרופיים אשר אינם תומכים במינים אלה.

ההתחממות המים גורמת גם לשינויים בתהליכים פיזיקליים: בשנת 2020 התרחש אחד האירועים היותר נדירים בים התיכון, סופת הוריקן בדרגה 1, שפגעה באי כרתים. אירוע זה מכונה 'Medicane' ("מדיקן" - שילוב בין ים תיכון להוריקן) (איור 8). בנוסף דווח כי ב-20 השנים האחרונות עלה מפלס הים התיכון ב-6 ס"מ, תופעה העלולה לפגוע בקרקעות חקלאיות באזורים רבים דוגמת דלתת הנילוס, המאופיינת בצפיפות אוכלוסייה גבוהה ביותר.

איור 8

סופת הוריקן בדרגה 1 שפגעה באי כרתים 17.9.2020
(מקור: WJTV News)

הקמה והגדלה של שמורות טבע ימיות בישראל

בתקופה זו, המכונה אנתרופוקן (Anthropocene) בה גורם האדם לשינויים מרחיקי לכת בכדור הארץ, נתונות המערכות האקולוגיות בכלל, והימיות בפרט, ללחצים ואיומים סביבתיים רבים בו זמנית (איור 9). אלה משנים את הטבע באופן מהותי. חלק מן הלחצים הם מקומיים, ויש למדינת ישראל יכולת לצמצם אותם בצורה משמעותית (למשל, זיהום מן היבשה או ממפעלי שופכין, הרס בתי גידול ודיג יתר), וחלקם נובע משינויים אזוריים או עולמיים, אשר למדינת ישראל אין יכולת מעשית למנוע אותם (שינוי אקלים גלובלי, ובמידה רבה, פלישות מינים זרים הנובעת מפעילות האדם). מחקרים רבים הראו כי חשיפה ללחץ מסוג אחד יכולה לפגוע בעמידות (resilience) המערכת האקולוגית בפני לחצים מסוגים אחרים (למשל, זיהום כימי יכול לפגוע בעמידות לעקת חום). כך, חשיפה רבה או ממושכת ללחצים מקומיים על מערכות אקולוגיות חופיות עלולה לפגוע בעמידותן ללחצים הקשורים להיבטים שונים של שינוי האקלים הגלובלי, כמו התחממות הים או התגברות אירועים קיצוניים כמו סופות .לפיכך, לשמורות ימיות יכולה להיות חשיבות עצומה בהגברת חוסנן של מערכות אקולוגיות ימיות ללחצים חיצוניים הנובעים משינוי אקלים או פלישת מינים מזיקים על ידי כך שהן מפחיתות את הלחצים המקומיים. התיאוריה אומרת כי מערכת אקולוגית שבה מארג מזון שלם יותר ושבה בית הגידול אינו פגוע, אמורה להיות יציבה יותר מול לחצים חיצוניים ולספק בצורה שלמה יותר שירותי מערכת חשובים לרווחת האדם, כמו מזון, מחזור תרכובות חנקן, קליטת פחמן דו-חמצני, הנאה מן הטבע ועוד.

מאמצע שנות השישים ועד ראשית שנות האלפיים הוכרזו בישראל שבע שמורות ימיות קטנות, ששטחן הכולל (10.4 קמ"ר) הוא כרבע אחוז משטח ישראל בים התיכון, והן משתרעות בדרך כלל מקו החוף ועד למרחק כמה מאות מטרים מערבה לתוך הים. השמורות האלה מגִנות על רוב האיונים (שרטונים וסלעים שבולטים מעל לפני הים) מול חופי ישראל ועל בתי הגידול של אזור הגאות והשפל ושל סביבת המים הרדודים (בעומק מטרים ספורים עד כ-20 מטרים), אך אינן מגנות על חלקים מייצגים של כלל הסביבה הימית.

איור 9

לחצים מקומיים וגלובליים פועלים בצורה סינרגית ומגבירים את ההשפעה השלילית על המערכת האקולוגית
(שמורות טבע ימיות)

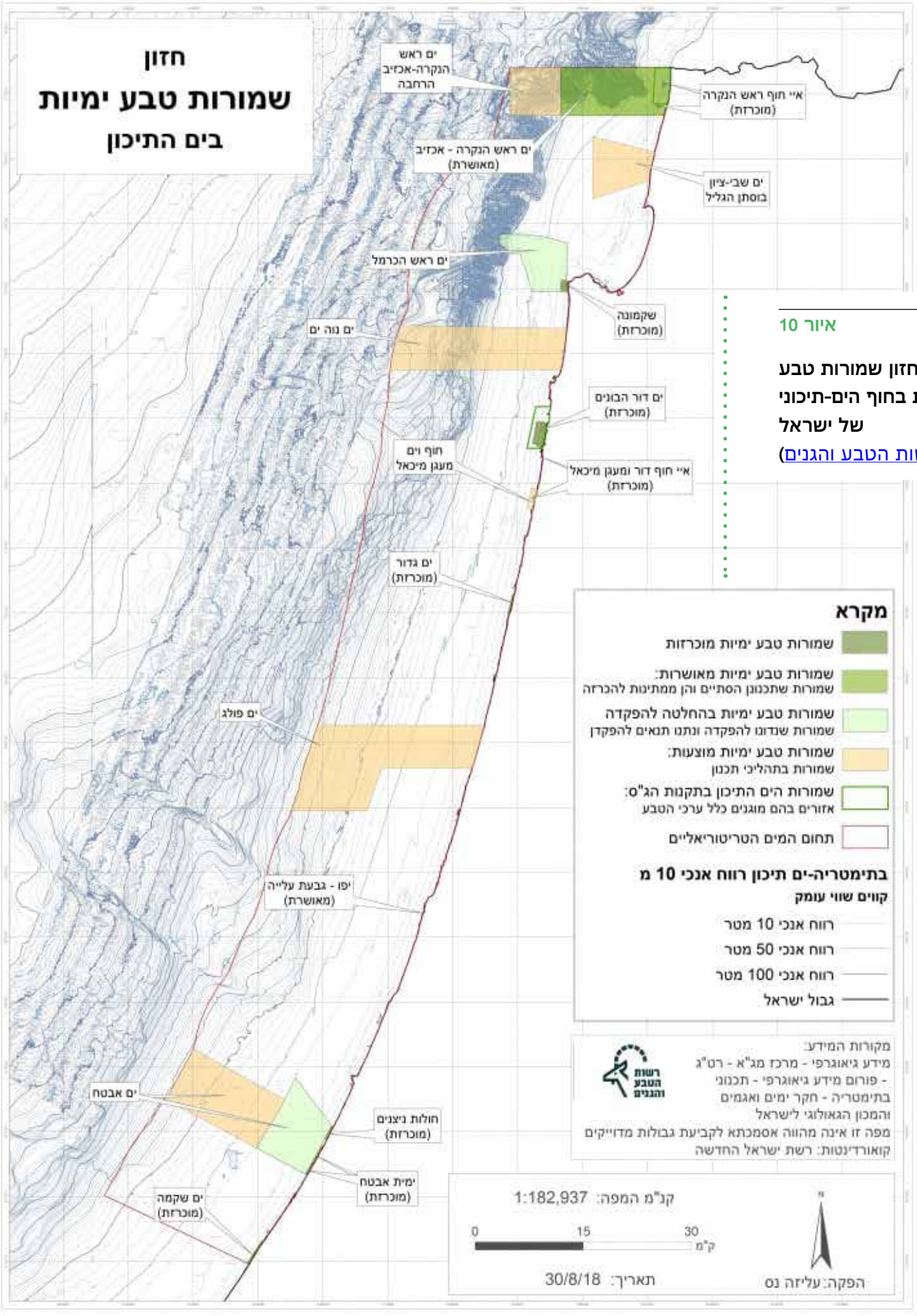
כבר ב-1968 נוספו על שמורות הטבע האלה שתי "שמורות ים תיכון": אזורים ימיים מוגנים בראש הנקרה-אכזיב ובחוף הכרמל, שכל ערכי הטבע בהם מוגנים. גבולן המערבי של שמורות הים התיכון נקבע ל-2,000 מטרים מקו החוף. אף על פי כן, שטחם הכולל של כל האזורים השמורים ביחד אינו מגיע לאחוז אחד מכלל השטח הימי של ישראל, זאת למרות שמדינת ישראל חתומה על אמנות בינלאומיות שבהן התחייבה לשמר 10% משטחה הימי עד לשנת 2020. לצורך מימוש מחויבות זו, מקדמת רשות הטבע והגנים הכרזת שמורות טבע באזורים שונים לאחר איסוף מידע, ניתוחו והכנת תכנית אב.

בסך הכל מוצעים הכרזתן ותפעולן של שמורות טבע ימיות בהיקף של 20% מכלל שטח המים הריבוניים של ישראל בים התיכון (איור 10). בהתאם לנתונים שנאספו מתוכננת הקמתן של שמורות טבע ימיות שישמרו אזורים מייצגים מבתי הגידול הימיים המאפיינים את ישראל - אזורים בעלי תשתית רכה של חול נודד לצד אזורים שתשתיתם טינית, וכן חלקים נרחבים מבתי הגידול הייחודיים כגון רכסי כורכר תת-ימיים, אזורים בעלי מסלע קשה מיוצב וטבלאות הגידוד באזור הגאות והשפל. בתי גידול נדירים, כגון קניונים תת-ימיים ורכסי הרים המשתפלים אל הים וממשיכים מתחת לפני המים, יכללו במלואם בשטחי השמורות.

בפברואר 2017 הוכרזה תכנית להרחבתה של שמורת ים ראש הנקרה-אכזיב, כך שתשתרע עד למרחק של 15 ק"מ מקו החוף. השמורה מגינה על החי והצומח בטבלאות גידוד על קו החוף, בחופים חוליים וברכסי כורכר טבועים, על אזורי קרקעית סלעית ורכסי כורכר תת ימיים וכמו גם על קניון תת-ימי עמוק, היחידי מסוגו מול חופי ישראל, שבו עומק הקרקעית מגיע לכ-850 מ' במרחק של קילומטרים ספורים מקו החוף.

באפריל 2021 הוכרזה גם שמורת טבע ים-ראש כרמל שמטרתה להגן על קרקעית הים באזור בו משתפל רכס הכרמל הגירני לים התיכון ומקיים בית גידול עשיר בעל מגוון מינים המיוחד לו.

שתי שמורות אלו הן השמורות הימיות הגדולות בישראל, נכון לעת כתיבת ספר זה.



איור 10

חזון שמורות טבע ימיות בחוף הים-תיכוני של ישראל
([רשות הטבע והגנים](#))

פרויקט עתידי - איים מלאכותיים

אחת התוכניות הגרנדיוזיות לפיתוח בישראל הינה בניית איים מלאכותיים מול חופי ישראל. רעיון בנית איים הוא שובה לב, במיוחד במדינה כישראל, בה מצוקת הקרקע חמורה כבר היום, וצפויה להחמיר אף יותר. לכאורה עשויה בניית איים מלאכותיים סמוך למרכזים עירוניים ותעשייתיים להוות פתרון מושך למחסור בקרקע למגורים, למסחר, לעסקים וכיוצא בזה. כמו כן, ניתן יהיה להעביר אליהם מתקנים טורדניים הבנויים כיום בלב הערים. ביולי 1997 הוחל בסקר "מיזם איים מלאכותיים" מטעם המדינה לבדיקת אפשרויות המימוש של רעיון בניית האיים. ועדת היגוי בדקה היתכנות לבניית איים מלאכותיים לאורך החופים ומצאה כי קיימת היתכנות כלכלית, סביבתית, משפטית וטכנולוגית לבניית איים. בדוח נקבע כי התוכנית מתאימה לשימושים רבים ביניהם שדות תעופה ותעשייה, וכי ישנה מגבלה בחומרי מילוי להקמת אי כזה, וכי נדרשת תוכנית מתאר להקמת איים כאלה. בהמשך הוקמה ועדה מקצועית להמשך בדיקת היתכנות לבניית איים מלאכותיים. הוועדה הגישה ביולי 2007 מסמך מדיניות בהתבסס על ניתוח כלכלי, בו הצביעה על הכדאיות בהקמת מתקני תשתית קטנים יחסית עם העדפה לתחנות כוח, מסוף אחסון גז טבעי נוזלי ומתקן התפלת מי ים. עד היום עלה הרעיון להקמת איים מלאכותיים במספר רשויות מקומיות, ביניהן תל-אביב, נתניה וגם בבת ים, אך אלה מעולם כמובן מעולם לא התקדמו. בשנת 2014 פרסם שמואל וייס, בוגר המכללה לבטחון לאומי, דוח מקיף הסוקר שלל היבטים בנושא. בינואר 2018 התקבלה החלטה למנות צוות בראשות המועצה הלאומית לכלכלה, במטרה להמליץ לממשלה היכן קיימת היתכנות להקמת אי מלאכותי ראשון.

חשוב להבין כי היזמים הישראלים מתבססים על הניסיון הרב שנצבר בארצות אחרות, אך יש לזכור כי האזור המול-חופי הישראלי אינו דומה לזה שבארצות אלה. איים לא קיימים לאורך חופי ישראל, ומשתמע מכך לדעת חוקרים רבים, שהם אינם יציבים בתנאי הים שלנו. איים אינם סתם ערמות עפר בלב הים- הם חייבים לעמוד בתהליכי הרס, גריפה ומפולת, ונתונים להשפעת זרמים, גלים, רעידות אדמה ותנועות קרקע. אחזקת אי לאורך זמן עלולה להיות יקרה מאוד, שכן הסביבה הימית הקרובה לחוף הינה דינמית ביותר, התהליכים המתרחשים בה הם רבי עוצמה, מהירים מאוד ומשפיעים על שטחים נרחבים.

לבניית איים כמו אלה המתוכננים בישראל אין תקדים בעולם. מקור ראשי של אי ודאות הנוגע לאיים המתוכננים, הינו העובדה כי מדובר במקרה ראשון בעולם של תכנית לבניית אי מלאכותי בים פתוח וסוער. כל האיים המלאכותיים, מרביתם ביפן, המשמשים לשדות תעופה או לצרכים אחרים, ניבנו בתוך מפרצים או בתחום שטחי מים מוגנים אחרים. ביפן, כעקרון, לא בונים איים בים הפתוח, וגם בהולנד, שם נצבר ניסיון רב שנים בייבוש הים, אין בונים איים כאלה. מבחינה זו, ישראל עתידה להיות שפן ניסיון בקנה מידה עולמי. סכנת התרחשותם של נזקים כמו חדירת מים, פגיעה מרעש אדמה, שקיעה או סדקים, שכבר אירעו לא פעם באיים ביפן, דורשת מקדמי בטחון גבוהים מהרגיל. לכן מדאיגות במיוחד שתי עובדות - האחת, שבנית האיים בישראל מתוכננת על קרקעית ים הכוללת גם שכבות של חול ובוץ, והשנייה, שבסיס האי אמור להיות חומר מילוי רך. הניסיון היפני הוכיח כי איים שנבנו

כך הם הפגיעים ביותר. עד שלא נדע בוודאות כיצד להימנע מנזקים כאלה, החלטה על השקעה בבניית איים בישראל עלולה להוות הימור גם מבחינה זו.

מומחים אחדים טוענים כי האי צפוי לגרום נזק גדול לחופי הארץ, שאין כל ודאות כי ניתן יהיה למנעו. החול, שהינו הסיבה העיקרית ליופיים וערכם של חופי הארץ, מצוי עד לעומק מים של 15-20 מטר בתוך הים. כל הפרעה לתנועתו בתחום מים זה עלולה להתבטא בנזק לחוף. בישראל, כפי שכבר ראינו, קיים ניסיון מצטבר של שנים בדבר הנזקים הקשים לחופים שגרמה הקמת מבנים ימיים, כמו נמל אשדוד או המרינות בהרצליה ובאשקלון. הקמת מבנים ימיים גדולים המתוכננים בעתיד, כמו הרחבת נמל אשדוד ובנית נמל עזה, תחמיר עוד יותר את הנזקים הללו. הדבר מחייב שמחסום ימי עצום כמו האי המלאכותי ימוקם כולו מחוץ לתחום הסעת החולות, כדי שלא לגרום לנזק ודאי נוסף. הניסיון המצטבר מלמד כי כדי שמבנה ימי לא ישפיע על המתרחש ברצועת המים שבינו ובין החוף, תנאי הכרחי לכך (אם כי לא תמיד מספיק) הינו שמרחקו מהחוף יהיה לפחות פי שניים מרוחבו. אחרת, גם אם האי ימצא מחוץ לתחום הסעת החולות, הוא צפוי להשקיט את המים הסמוכים לחוף, ולגרום בכך לפגיעה בתנועת החול אל החופים ולהצטמצמותם. לכך עלולות להיות תוצאות לוואי שונות, כמו התמוטטות מצוק הכורכר, וכן הצטברות פסולת ואצות (זאת, כזכור, בחופי הרחצה העמוסים ביותר בארץ). התוצאה תהיה פגיעה מסיבית בחופים, בעיקר מצפון לאי. דו"חות מסוימים מצביעים על כך כי הקמת האי עתידה לגרום להרס מוחלט של החופים במרחק של מעל 10 ק"מ מצפון לאי, ובעקבות זאת לכרסום מצוק הכורכר עד כדי קריסתו.

המתנגדים לבניית האיים מציינים גם את השפעתם הנופית השלילית של האיים המתוכננים. כדי להגן עליו מסערות הים, יהיה האי חייב להיבנות כשהוא מוקף בחומת מגן בגובה 17 מטר (מעל 5 קומות), מעליה ייבנו המבנים והמתקנים השונים. ההדמיות שנעשו ממחישות באופן ברור כיצד דמותו המלאכותית של האי תקטע את קו האופק, ותבלוט על רקע הנוף הימי השטוח (איור 11). הפגיעה הזו לא תיחסך מכל תושבי גוש דן, הן אלה שיתהלכו על החוף, והן אלה שימצאו פנימה יותר בתוך היבשה.

איור 11

הדמיות של אחדים מן המודלים של האיים המלאכותיים שתוכננו מול חופי תל-אביב.
(למעלה) **איור של אי מגורים מול תל-אביב. גודלו ק"מ מרובע.**
(למטה) **הדמיה של אחד המודלים של אי שדה התעופה מול חופי צפון תל-אביב**

16.2 חוקים ואמנות לשימור הסביבה הימית, בישראל ובים התיכון

במציאות שבה מדינת ישראל הולכת ומפתחת תלות בים בכל הקשור למשק המים (התפלה), למשק החשמל (גז), לתשתיות, לנתיבי תחבורה ושינוע (כ-98% מחומרי הגלם מיובאים דרך הנמלים) ולשירותי נופש ופנאי, חלה על המדינה החובה להבטיח שהמשך הפיתוח יהיה בר-קיימא. על חובה זו להיות מעוגנת בחוק, מכוח אמנות עליהן ישראל חתומה ואותן אישררה: מכוח אמנת המגוון הביולוגי, שהמדינות החברות בה גיבשו תכנית אסטרטגית (Targets 2010 Aichi), הכוללת 20 מטרות, בהן יעד של הכרזה על 10% אזורים מוגנים ימיים עד לשנת 2020, יעדי שיקום מערכות אקולוגיות ימיות ועוד; מכוח אמנת ברצלונה והפרוטוקולים הנלווים אליה; ומכוח חברותה של ישראל ב-OECD.

בפרק זה נסקור את החקיקה הלאומית בישראל, כמו גם **אמנות בינלאומיות** עליהן היא חתומה, הרלוונטיות לשימור הסביבה החופית והימית במים הים-תיכוניים ומימי ים-סוף.

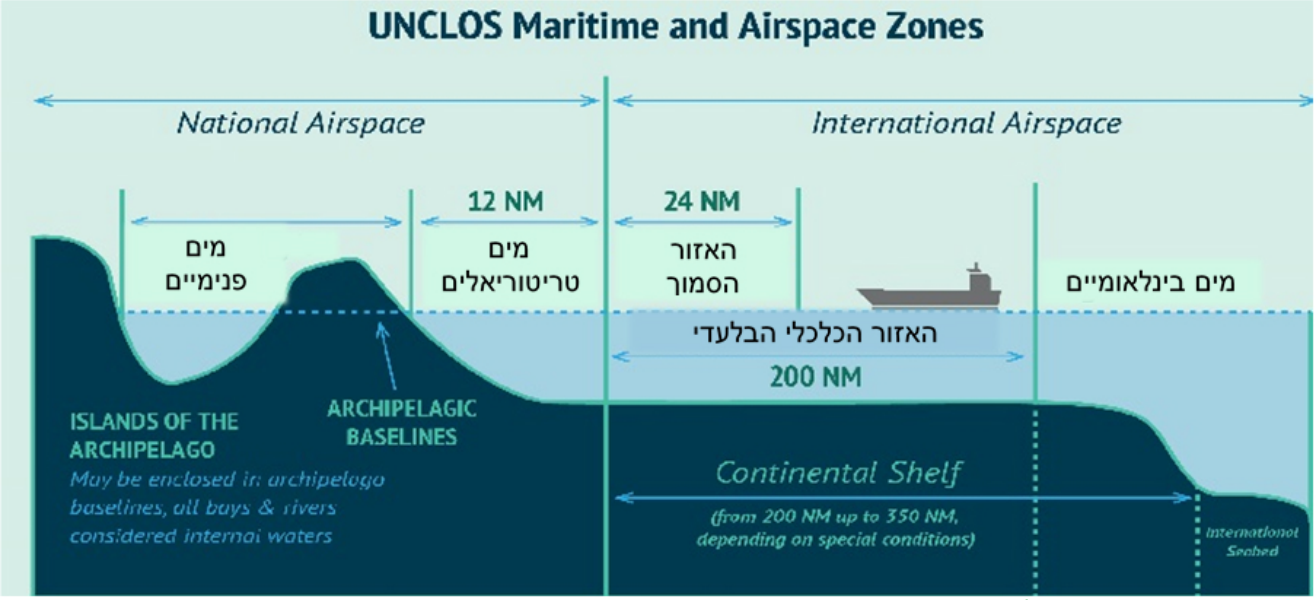
אמנת חוק הים
(UNCLOS - United nations Convention on the Law of the Sea 1982)

אמנת חוק הים כוננה מסגרת כוללת לשימוש ולפיתוח של הימים והאוקיינוסים ומשאביהם ומהווה מסגרת מאחדת להסכמים ספציפיים הנוגעים לחוקי הים. היא מגדירה את הזכויות והחובות של המדינות בשימוש במרחב הימי ומטרות ועקרונות להגנה ולשימוש מקיים בסביבה הימית והחופית. על האמנה חתומות 160 מדינות (ישראל אינה צד לאמנה, אך על פי חוות דעת המשנה ליועץ המשפטי לממשלה (2013) "היא מקבלת על עצמה את הוראותיה של אמנת הים, לרבות ההוראות הנוגעות לאזורים הימיים. האמנה הגדירה חמישה אזורים (איור 12) שבהם המדינות יכולות להפעיל את ריבונותן וסמכויותיהן ברמות משתנות, ובצעד זה הרחיבה את זכויות מדינות החוף בניהול משאבי הים:

- **מים פנימיים** - המים בצד היבשתי של קווי הבסיס לפיהם נמדדים האזורים הימיים.
- **המים הטריטוריאליים** (מימי החופים - Territorial Sea) - רצועת הים לאורך החוף, ברוחב 12 מייל ימיים (22 ק"מ) מקווי הבסיס. בתחום המים הטריטוריאליים יש למדינות ריבונות מלאה.
- **האזור הסמוך** (Contiguous zone - 12) מייל נוספים לאחר קו המים הטריטוריאליים, שבהם יש למדינה סמכות בנושאי זיהום, מיסוי, מכס והגירה.
- **האזור הכלכלי הבלעדי** (מים כלכליים - EEZ, Exclusive Economic Zone) ברוחב של עד 200 מייל ימי (כ-370 קילומטרים) מקווי הבסיס ובכפוף לזכויות מדינות אחרות. באזור זה יש למדינות זכויות למחקר, לניצול, לשימור ולניהול משאבים טבעיים (כגון דיג, קידוחי גז ונפט, אנרגיית רוח וגלים), כולל חובות להגן על הסביבה הימית.

אמנה בינלאומית

אמנה בינלאומית היא למעשה חוזה, קשר משפטי, הנוצר בין שתי מדינות ויותר ונובע מהסכמה בינהם. עם סיום גיבוש ההסכם וכתיבתו, המדינות חותמות על האמנה, צעד פורמלי טקסי המאמת את הסכמת המדינה. מרגע שמדינה חתמה על אמנה היא מחויבת להימנע מפעולות שיש בהן להכשיל את מטרת האמנה. רק לאחר שהמדינה אישררה את האמנה בבית המחוקקים שלה, נכנסת האמנה לתוקף.



איור 12

חלוקה לאזורים, על פי אמנת חוק הים (Marine Gyaan)

- **מדף היבשת** (Continental shelf) - המדרון בשולי היבשה הנמשך מתחת לפני המים עד למרחק 200 מייל ימיים מהחוף או עד שחל בו שינוי חד בזווית השיפוע ולא יותר מ-350 מייל ימי (כ-650 קילומטרים).
- **מים בין-לאומיים** (High Sea) האזורים שמחוץ לטווח המים הכלכליים, שלאף מדינה אין אפשרות לתבוע בהם ריבונות כלשהי.

אמנת המגוון הביולוגי (CBD)

הבסיס העיקרי לחובה לשמור על המגוון הביולוגי היא אמנת המגוון הביולוגי שאושררה על ידי ישראל בשנת 1995. בוועידה העשירית של המדינות החברות באמנה (2010) אומצה על ידן תכנית אסטרטגית, משופרת וממוקדת, הכוללת 20 מטרות ברורות (Aichi Biodiversity Targets) שתאריך היעד להגשמתן היה שנת 2020 לכל המאוחר. חלק מהמטרות מתייחסות ישירות לשמירת המגוון הביולוגי בים, ובהן:

- המטרה השישית של התכנית קובעת כי עד שנת 2020 כל מאגרי הדגים, חסרי החוליות והצמחים הימיים ינוהלו וינוצלו באופן בר-קיימא וחוקי. הניהול יתבצע תוך יישום גישות התופסות את המערכת האקולוגית בשלמותה, כך שיימנע דיג יתר, יושמו תכניות ויינקטו אמצעים לשיקום מינים על סף הכחדה. יימנעו השפעות שליליות משמעותיות של דיג על מינים בסכנה ועל מערכות אקולוגיות פגיעות. השפעות הדיג על מאגרי דיג, מינים ומערכות אקולוגיות יישמרו בטווח של מגבלות אקולוגיות בטוחות.

- המטרה העשירית של התכנית היא למזער את לחצי הפיתוח המרובים על שוניות אלמוגים ועל מערכות אקולוגיות פגיעות אחרות המושפעות משינויים אקלימיים או מהחמצת הים, עד לשנת 2015. אמצעי חשוב להשגתה הוא קיום תכניות ניטור של המגוון הביולוגי לאורך החופים (בנוסף לניטור הזיהום בים התיכון).
- המטרה ה-11 מתייחסת להגדלת שטח האזורים המוגנים עד לשנת 2020. היעד הוא הגנה של 10% משטח אזורי החוף והים, בייחוד באזורים בעלי חשיבות מיוחדת למגוון הביולוגי ולשירותי המערכת האקולוגית.

אמנת ברצלונה

אמנת ברצלונה להגנה על הים התיכון מפני זיהום (Barcelona Convention for the Protection of the Marine Environment and the Coastal Region of the Mediterranean), שנחתמה בשנת 1976 ונכנסה לתוקף ב-1978, חודשה והפכה ביוני 1995 לאמנה להגנה על הסביבה הימית וחופי הים התיכון. אמנת ברצלונה נועדה לשמש אמצעי למעקב ופיקוח שוטפים על מצב הים התיכון, זיהוי בעיות סביבתיות קיימות ומקורן. האמנה מחייבת את המדינות החברות בה לנקוט בכל האמצעים הדרושים על מנת לצמצם את זיהום הים ולהגן על הסביבה הימית. שותפים באמנה

באמנה 22 חברות: אלבניה, אלג'יריה, בוסניה והרצגובינה, קרואטיה, קפריסין, מצרים, צרפת, יוון, ישראל, איטליה, לבנון, לוב, מלטה, מונקו, מרוקו, סלובניה, מונטנגרו, ספרד, סוריה, טוניס, טורקיה והאיחוד האירופי. בנוסף לגוף האמנה, כוללת אמנת ברצלונה שבעה פרוטוקולים, המפרטים את הצעדים המעשיים שמוטל על המדינות לנקוט כדי למנוע את זיהום הים התיכון ולהגן על סביבתו:

1. פרוטוקול בדבר מניעת זיהום הים התיכון בפסולת המוטלת מאוניות ומכלי טיס. ישראל חתמה על הפרוטוקול המקורי ב-1976 ואשררה אותו ב-1984. בישראל מהווה החוק למניעת זיהום ים (הטלת פסולת) התשמ"ג-1983 והתקנות לפיו מ-1984 את המסגרת המשפטית לפיה מיושמות הוראות הפרוטוקול.
2. פרוטוקול בדבר אזורים מוגנים במיוחד והמגוון הביולוגי בים התיכון - עוסק בהגנה על בעלי חיים וצמחים ים תיכוניים הנמצאים בסכנת הכחדה ועל אזורים שלמים הנחשבים חיוניים לקיומם ודורשים הגנה ייחודית. ישראל חתמה על הפרוטוקול המקורי בשנת 1982 ואשררה אותו ב-1987.
3. פרוטוקול בדבר הגנת הים התיכון מפני זיהום הנובע מניצול מדף היבשת - עוסק בפעולות ובאמצעים הנדרשים למניעת זיהום הים התיכון כתוצאה מפעולות קידוח ומחיפושי נפט ומחצבים על קרקעית הים. ישראל חתמה על הפרוטוקול בשנת 1994 אך טרם אשררה אותו.

4. פרוטוקול בדבר מניעת זיהום הים התיכון עקב מעבר בין-גבולי של פסולת מסוכנת - עוסק במניעת זיהום ים כתוצאה מייצוא ומייבוא של פסולות מסוכנות, המיוצרות לרוב במדינות המערביות המפותחות וה"מיובאות" לצורכי סילוק וקבורה במדינות לא מפותחות. ישראל לא חתמה על פרוטוקול זה.

5. פרוטוקול בדבר שיתוף פעולה במניעת זיהום ים מאוניות ותגובה במקרי חירום - הפרוטוקול מחייב את המדינות לשתף פעולה במקרי חירום ובמקרה של תאונות הכרוכות בדליפת שמנים וחומרים מסוכנים לים וכן הוא עוסק בצעדים למניעת אירועים מסוג זה. ישראל חתמה על הפרוטוקול המעודכן ואשררה אותו בשנת 2014.

6. פרוטוקול בדבר מניעת זיהום ים ממקורות יבשתיים - עוסק בהגנה על הים מהזרמת שפכים ומהחדרת פסולת, שמקורם ביבשה. בשנים האחרונות בוצעו שינויי החקיקה והתקנות הנדרשות לאימוץ השינויים המקצועיים המתקדמים שהוכנסו לפרוטוקול ב-1996, ובשנת 2009 אשררה ישראל את התיקון.

7. פרוטוקול בדבר ניהול אינטגרטיבי של אזורי חוף בים התיכון - מטרתו העיקרית היא לוודא כי לאורך כל חופי הים התיכון מתבצע ניהול אינטגרטיבי של הסביבה החופית, הכולל הן את הים והן את החוף. הניהול האינטגרטיבי מתייחס למאפיינים אקולוגיים, כלכליים ושימושי קרקע המיוחדים לכל אזור. בנוסף לכך, מתייחס הפרוטוקול גם ליחסי הגומלין בין המדינות השונות ומעודד העברת מידע ושיתוף פעולה בתחומים השונים. הפרוטוקול אושרר בישראל בפברואר 2016.

חוק השמירה על הסביבה החופית (2004)

שנות ה-90 היו רעות במיוחד לחופים. בהעדר חקיקה ייעודית הם הפכו למשכן הקבע של מיזמי ענק - ודי לציין את מגדלי חוף הכרמל, שכונת "סי אנד סאן" בתל אביב, ומרינות מסחריות שבעורפן מגורי יוקרה כמו זו שבהרצליה. אלו נבנו באופן מובהק עבור מעטים על חשבונם של רבים, וחרף מחאותיהם של האחרונים. ב-2004 נחקק חוף החופים - שהגדיר באופן חד משמעי כי כל תכנית חדשה לבינוי בתחום הסביבה החופית (300 מטרים מקו החוף) תעלה לדיון בוועדה לשמירה על הסביבה החופית (הולחו"ף) וכי לא ניתן יהיה לממש תכניות בתחום חוף הים - במרחק 100 מטרים מקו המים.

יש להדגיש כי החוק אינו חל רטרואקטיבית על תוכניות שאושרו קודם לכן. משמעות הדבר היא כי תוכניות בניין עיר שאושרו לפני חקיקתו עדיין יכולות להתממש לכשיבחרו בכך בעלי הקרקע, להם יש זכויות על אחוזי בנייה, גם אם תוכניות כאלו לא היו מאושרות כיום. וכך, סביב כל אחת מהתוכניות הללו מתגבש מאבק נפרד.

תכנית מתאר ארצית (תמ"א) 1

בשנת 2020 אושרה תכנית מתאר ארצית המאחדת למעלה מ-300 תוכניות מתאר ארציות, כולל תמ"א 13 לים התיכון. מטרתה להנגיש את המידע התכנוני ולאפשר מבט כולל שיסייע בהסדרת מערכות הפיתוח, התשתיות, הסביבה והמגורים במדינה, ובנוסף תקדם איחוד ושילוב תשתיות מסוגים שונים.

התכנית איגדה את השטחים הפתוחים לסוגיהם - שמורות טבע, גנים לאומיים, יערות, נחלים וחופים - לכדי מכלול אחד. חופי הים קיבלו מעמד מיוחד בתמ"א 1 ונקבע כי חוף הים הוא "נחלת הכלל"; חופי הים הם המרחב הציבורי הרחב, הרציף והנגיש ביותר, המיועד להנאת כלל-הציבור במדינת ישראל. התוכנית קובעת איסור בנייה על החוף בתחום 100 מטר מקו המים, פרט לפיתוח שירותי חוף לטובת כלל הציבור וזאת במקומות מוגדרים בלבד, ובכך משאירה את מרבית שטחי החופים חופשיים ופתוחים. כמו כן, מינהל התכנון הגדיר תוספת של כ-12.6 אלף דונם שטחים בעורף החופים כשטחי חוף מוגנים.

תקנות דייג

פקודת הדייג המקורית (1937) הציגה מערכת מוקדמת של רישיונות דייג להסדרת הדייג, עד למרחק של 6 מייל ימי, ופריקת שלל הדייג בישראל. השימוש בחומרי נפץ וברעל היה אסור. עם השנים, תוקנו חוקי הדייג, ונקבעו מגבלות עומק דיג מכמורת, גודל עיני הרשת, מיני דגים וגדלים מינימליים. בשנת 2016 עברו תקנות הדיג שיפור משמעותי במטרה לסייע בהתחדשות אוכלוסיות הדגים אשר נפגעו במהלך השנים האחרונות מפעילות דייג.

מקורות לפרק זה

Cramer, W., Guiot, J., Fader, M., Garrabou, J., Gattuso, J. P., Iglesias, A., ... & Xoplaki, E. 2018. Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. Nature Climate Change, 8(11), 972-980. DOI: 10.1038/s41558-018-0299-2

Yeruham, E., Rilov, G., Shpigel, M. and Abelson. 2015. Collapse of the echinoid Paracentrotus lividus populations in the Eastern Mediterranean—result of climate change? Sci Rep 5, 13479. DOI: 10.1038/srep13479

ארז, ח. 2013. חקיקה וכלים משפטיים להגנת המגוון הביולוגי - מחקר משווה: הסביבה הימית - כלים להגנתה. החברה להגנת הטבע (ע"ר).

וייס, ש. 2014. איים מלאכותיים בחופי ישראל, אבן דרך בהתפתחות מדינת ישראל? קתדרת חייקין לגאוסטרטגיה, אוניברסיטת חיפה.

חרות, ב. ורהב, א. 2017. תכנית הניטור הלאומית של ישראל בים התיכון לשנים 2016/17 - ניטור שינויי אקלים והמערכת ההידרוגרפית (חלק ו). חקר ימים ואגמים לישראל בע"מ, דוח H48a/2017.

יהל, ר. ואנגרט, נ. 2014. מדיניות שמירת הטבע בים התיכון: שמורות טבע ימיות ככלי מרכזי לשימור הסביבה והמגוון בים התיכון. בתוך: הוד הים: יציבות ושינוי במערכות הימיות של ישראל. נגה סטמבלר (ערי). בהוצאת העמותה הישראלית למדעי הימים.

לוי, י. 2004. סיכום פעילות לעידוד אוכלוסיות צבי הים בחופים הים-תיכוניים של ישראל - קיץ 2004. רשות הטבע והגנים, מסמך פנימי, 32 עמ'.

סגל, י. 2020. תכנית הניטור הלאומית בים התיכון - דוח ניטור פסולת ימית לשנת 2019. חקר ימים ואגמים לישראל בע"מ, דוח H22/2020.

קרניאל, צ. 2020. מסמך מדיניות למרחב הימי של ישראל, ים תיכון. מנהל התכנון.

רילוב, ג. 2018. שמורות טבע ימיות, עוגן בעידן דינמי ומשתנה. החברה להגנת הטבע.

מקורות נוספים

אתר מכון דוידסון - שחור בעיניים: הסכנות של זיהום זפת.

זווית, סוכנות ידיעות למדע וסביבה - ים חם.

> In the end, we will conserve only what we love,
> we will love only what we understand,
> and we will understand only what we are taught.
>
> **Baba Dioum, 1968**

"בסופו של דבר, נשמר רק את שנאהב, נאהב רק את שנבין
ונבין רק את שנִלמד."

זהו ציטוט של מהנדס היערות הסנגלי באבא דיום באסיפה הכללית של ה-IUCN (האיחוד הבינלאומי לשימור הטבע) שהתקיימה בניו דלהי בשנת 1968. למרות שנאמרו לפני יותר מ-50 שנה, דבריו עדיין מאוד רלוונטיים ומשקפים את תפקידו הבסיסי של החינוך בשימור.

אנו תקווה כי הבנתם את הכתוב בספר זה, שדרכו למדתם לאהוב את הים אפילו יותר ושתשכילו לשמור עליו בכל דרך בה תבחרו.