



חקר ימים ואגמים לישראל
ISRAEL OCEANOGRAPHIC &
LIMNOLOGICAL RESEARCH

KLL

NIO

דו"חות חיא"ל IOLR REPORTS

NCM

ISRAEL OCEANOGRAPHIC & LIMNOLOGICAL RESEARCH LTD. (PBC)
POB 9753 HAIFA 3109701, ISRAEL +972-4-8565200

WWW.OCEAN.ORG.IL
INFO@OCEAN.ORG.IL

חקר ימים ואגמים לישראל בע"מ (חל"צ)
תד 9753 חיפה 3109701 04-8565200

הערכת השפעות סביבתיות של מתקני אנרגיה מתחדשת
במרחב הימי של ישראל בים התיכון ואמצעים להפחתת
השפעות שליליות

הערכת השפעות סביבתיות של מתקני אנרגיה מתחדשת במרחב הימי של ישראל בים התיכון ואמצעים להפחתת השפעות שליליות

דו"ח חיא"ל H/34/2023

דור אדליסט^{1,2}, דברת רשף², רותם זלינגר³, איל רהב⁴, תמר גיא-חיים⁴

¹ אוניברסיטת חיפה

² המרכז האקדמי רופין

³ International Institute for Applied Systems Analysis, Austria

⁴ המכון הלאומי לאוקיינוגרפיה, חקר ימים ואגמים לישראל

מוגש למשרד האנרגיה והתשתיות

אוגוסט 2023

ES-09-26

1	סקירה שיטתית להערכת השפעות מקורות אנרגיה מתחדשת במרחב הימי של ישראל בים התיכון ואמצעים להפחתתן.	5
1.1	תקציר	5
1.2	מטרות	6
1.3	מושגים	6
2	מבוא	8
2.1	סוגי אנרגיות מתחדשות בים:	11
2.1.1	רוח	11
2.1.2	גלים	12
2.1.3	זרמים	13
2.1.4	מתקני חלפי חום (OTEC)	13
2.1.5	שמש	14
2.1.6	גידול אצות	16
2.1.7	מתקנים משולבים	16
2.2	הסביבה המקבלת: הים התיכון הישראלי והמאפיינים הייחודיים לו	17
2.2.1	מאפיינים פיסיקליים	17
2.2.2	מאפיינים ביולוגיים ואקולוגיים	18
2.2.3	שינויי אקלים	20
2.2.6	שמירת טבע	21
2.2.7	הים העמוק	22
2.3	מינים רגישים	23
2.3.1	עופות ים	23
2.3.2	יונקים ימיים	25
2.3.3	צבי ים	29
2.4	רכיבים נוספים בסביבה המקבלת	30
2.4.1	דגים, דיג וחקלאות ימית	30
2.4.2	המצע הרך	32
2.4.3	המצע הקשה	33
2.5	עבודות קודמות בישראל שנגעו בנושא השפעת מתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת	35
2.6	הצורך בסקירה ומשמעותה	36
3	מתודולוגיה	36
3.1	שיטות הסקירה הסיסטמטית	36
4	תוצאות	39
4.1	מיפוי סיסטמטי של הספרות העולמית	39
4.2	השפעות עיקריות של מתקנים בים	42
4.2.1	התנגשות והילכדות	42
4.2.2	דחיקה	47
4.2.3	רעש	50
4.2.4	זיהום אור	54

54.....	4.2.5	שדות אלקטרומגנטיים
60.....	4.2.6	שינויים בבתי גידול בקרקעית
68.....	4.2.7	שינויים בבתי גידול בעמודת המים
70.....	4.2.8	השפעות נוספות
71.....	5	דיון ומסקנות
71.....	5.1	הערכת מצב הידע - איכות ופערי מידע
72.....	5.2	השפעות צפויות בים התיכון בישראל
74.....	5.3	השפעות צולבות ומצטברות
75.....	5.4	קונפליקטים והזדמנויות – אסטרטגיות להפחתת השפעות המתקנים
76.....	5.4.1	הפחתת הסיכון להתנגשות והילכדות
76.....	245.	הפחתת השפעות דחיקה
76.....	5.4.3	הפחתת השפעות רעש
77.....	5.4.4	הפחתת השפעות שדות אלקטרומגנטיים
77.....	5.4.5	שינויים בבית הגידול בקרקעית
78.....	5.4.6	שינויים בעמודת המים
78.....	5.4.7	הפחתת השפעות תאורה
78.....	5.5	המלצות ניטור ונושאים למחקר עתידי
80.....	5.5.2	התנגשות
81.....	5.5.3	כבלים וקרינה אלקטרומגנטית
78.....	5.6	סיכום ממצאים עיקריים

1.1 תקציר

מתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת נמצאים בתנופת פיתוח ברחבי העולם בשנים האחרונות. מרבית המתקנים מתבססים על ניצול אנרגיית רוח וזרמי גאות, ולצידם גם מתקנים לניצול אנרגיית שמש, גלים ומחלפי חום. מרבית המתקנים מחוברים אל החוף וביניהם כבלים להולכת חשמל. לצורך איסוף נתונים הנדרשים לגיבוש תוכנית למזעור השפעות שליליות מהצבת מתקנים בים, בשנת 2022 בוצעה סקירת ספרות אסטרטגית של הידע הקיים בעולם. הספרות העולמית תואמת את היקפי הפריסה של המתקנים מבחינה מרחבית וכמותית, נכון לכתיבת הדו"ח (2023), משמע מרביתה עוסקת בהשפעות של מתקני אנרגיית רוח וזרם, בעיקר בצפון אירופה, ארה"ב וסין. לצורך עבודה זו, נותחו הממצאים של 684 פרסומים רלוונטיים, מהם עולות ההשפעות אפשריות העיקריות הבאות: (1) התנגשות ו/או לכידה של בעלי חיים, כולל התנגשות עופות ים ועופות נודדים בטורבינות רוח באוויר, והתנגשות יונקים ימיים בטורבינות זרם מתחת לפני הים. הילכדות היא נדירה, ומתרחשת בעיקר בהקשר שאיבת בעלי חיים ימיים לטורבינות זרם ומחלפי חום, שפחות רלוונטיים לישראל. התנגשות גורמת לפגיעה או אף למוות בעלי חיים; (2) דחיקה של בעלי חיים כגון יונקים או עופות מהאזור, שתגרום לאבדן זמני או קבוע של בית גידול. במקרה של עופות, השלכות אנרגטיות בשל שינוי נתיבי תעופתם עלולה להיות משמעותית. דחיקת דיג מהאזור תגרום לרוב לשימור משאבי דגה בתוכו ולהגברת מאמץ הדיג סביבו. דחיקת יונקים ימיים על ידי מתקני אנרגיה מתחדשת ימיים מתרחשת בעיקר בגלל רעש; (3) רעש יגרום לפגיעה פיסית ולירידה בשמיעה ותקשורת של יונקים ימיים ויצורים נוספים, בעיקר בעת החדרת כלונסאות לקרקע בעת ההקמה (בעצמה של מעל 200 דציבל), ופחות מכך בעת התפעול, מאידך רעש בעת התפעול עשוי לעודד התיישבות חסרי חוליות ופיתוח צמדה; (4) שדות אלקטרומגנטיים מהכבלים יהיו ככל הנראה בעלי השפעה נמוכה ומקומית, בעיקר בקרקעית, אך הם עלולים להשפיע גם על מיני דגים, צבי-ים וחסרי-חוליות; (5) בסיסי מתקנים ימיים עשויים לשמש כשונית מלאכותית ומצע להתיישבות צמדה ימית וכן כמקור להתקבצות דגים וחסרי חוליות. לכך עשויות להיות השפעות מקומיות חיוביות משמעותיות של העשרה, אבל גם פוטנציאל להתיישבות של מינים, כולל מינים פולשים, שרלוונטי במיוחד עבור הים התיכון הישראלי; (6) כמו כן עלולים להתרחש שינויים סדימנטולוגיים מקומיים, בעיקר במורד הזרם, כולל ארוזיה של סדימנט מהחופים ככל שהמתקנים קרובים אליהם וגם שינויי מפלס במפרצים, שפחות רלוונטיים לישראל; (7) שינויים מקומיים בבתי גידול בעמודת המים, בעיקר ביצרנות וזרימה, יתכנו בעקבות השפעות של הצללה, זרם, אור וטמפרטורה, שעשויים להיות משמעותיים בעיקר במתקנים סולאריים.

בכדי להבין את ההשפעות הפוטנציאליות על המרחב הימי המקומי, תוארו מאפייני המרחב הימי הישראלי הרגישים הרלוונטיים להפרעות. רבות מן ההשפעות של מתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת (להלן, מתקנים) על הסביבה הן ספציפיות למין, לאתר ולסוג הטכנולוגיה המיושמת. נסקרו אמצעי הפחתה למזעור ההשפעות השליליות השונות. אמצעי הפחתה המרכזיים כוללים: (1) תכנון, פריסה וניהול של המתקנים כחלק מתכנון המרחב הימי, תוך התייחסות לקונפליקטים והזדמנויות שהם מציגים, למשל בחינה של מידת התאימות שלהם עם שמורות טבע ימיות כהזדמנות לשטח מוגן או מוטה דיג; (2) הרחקת עופות, יונקים וצבי ים מהאזור (דחיקה מונעת התנגשות) ותזמון נכון של הבניה והפחתת הרעש בעת החדרת כלונסאות; (3) הרחקת המתקנים מהחוף להפחתת בליה חופית והתיישבות מינים מהגרים; (4) הדממת טורבינות רוח בלילות של נדידת עופות מאסיבית; (5) קבורת כבלי חשמל למניעת השפעת שדות אלקטרומגנטיים; (5) תכנון מערכי עגינה ללא כבלים רפויים להקטנת הסיכון להילכדות, וכן תכנון מבני בעל מורכבות מבנית גבוהה

להגברת אפקט השוניית המלאכותית ולעידוד התיישבות מינים מקומיים. בנוסף, יש לתכנן תכניות ניטור ייעודיות בהתאם לסוג המתקנים הנבחר ולהשפעותיו הצפויות, על פי סטנדרטים מקובלים הקיימים בספרות המדעית. תכניות אלו צריכות להתחיל עוד טרם הפריסה, בדגש על מחקרים מסוג-BACI (Before-After-Control-Impacted), ולשלב מודלים משלימים להבנת התמונה בזמן ובמרחב. על התכניות להבהיר את אופי ההשפעות ואת היקפן על הסביבה הימית. מומלץ במיוחד להסתייע ביוזמות בינלאומיות, ובראשן OES (Ocean Energy Systems) אשר הוקמו לצורך קידום והנגשת ידע בנושא זה (נספח א').

1.2 מטרות העבודה

מטרת העל של עבודה זו היא לסקור את ההשפעות הסביבתיות האפשריות של מתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת על המערכת האקולוגית בדרום-מזרח הים התיכון, ולבחון אמצעים להפחתת השפעות שליליות אלו. לשם כך נערכה סקירה שיטתית המבוססת על ספרות מחקרית נכון ל-2022, תוך בחינת הגורמים הייחודיים הרלוונטיים לסביבת דרום-מזרח הים התיכון.

העבודה משקללת את מכלול הסיכונים הפוטנציאליים שעלולים להיגרם מהמתקנים לסביבה הימית ולאורגניזמים המאכלסים אותה, הן בהיבטים פיזיקליים והן בהיבטים ביולוגיים. ההיבטים הפיזיקליים כוללים השפעות על קרקעית הים, עמודת המים והסדימנט, משטר הזרמים והגלים, ותהליכים גאומורפולוגיים חופיים. ההיבטים הביולוגיים נבחנים לאורך כל מארג המזון, החל מיצרנים ראשוניים, דרך זואופלקטון וחסרי חוליות בנתיים, ועד דגים, זוחלים, עופות ויונקים ימיים.

מטרת הסקירה היא לגבש אמצעים ושיטות להפחתת ההשפעות האפשריות כבר בשלבי התכנון המוקדמים של הפרויקטים. בנוסף, נעשה ניסיון לזהות גם השפעות חיוביות ויתרונות סביבתיים אפשריים משימוש בטכנולוגיות אלו, מעבר להפחתת פליטות גזי חממה ומזהמים. לבסוף, אותרו פערי ידע מהותיים בהבנת ההשפעות הפוטנציאליות של המתקנים בדרום-מזרח הים התיכון, וניתנו המלצות למחקר עתידי ולמדיניות בהתאם.

1.3 רשימת מושגים

AC (Alternating Current) – זרם חלופין, זרם חשמלי ההופך את כיוונו באופן מחזורי

ALAN (Artificial Light at Night) – אור מלאכותי בלילה

AWE (Airborne Wind Energy) – טכנולוגיית הפקת אנרגיית רוח באמצעות רחפנים או עפיפונים המנצלים רוחות בגובה רב להפקת חשמל.

BACI (Before After Control Impacted) – תכנון ניסוי הכולל בחינת המשתנה המשפיע לפני ואחרי הופעתו ו/או עם המשתנה או בלעדיו (ביקורת)

BID (Breakwater-integrated devices) – שוברי גלים משולבי אנרגיה

CEC / TEC (Current / Tidal Energy Conversion) – מתקן להמרת אנרגיית זרם / גאות

CIA (cumulative impact assessment) – הערכה השפעה מצטברת–

DC (Direct Current) – זרם ישר, זרם חשמלי העובר דרך תווך מוליך במגמה קבועה

DVM (Diel Vertical Migration) – נדידה אנכית יומית

(EIA) Environmental Impact Assessment) - הערכת השפעה לפרויקט בודד

(Ecosystem-Based Marine Spatial Planning) - תכנון מרחבי מבוסס מערכת

EMF (Electro Magnetic Fields) – שדות אלקטרומגנטיים

FAD (Fish Aggregating Device) – מתקן למשיכת/ התאגדות דגים

HDPE (High-Density Polyethylene) – פוליאאתילן בצפיפות גבוהה

HVAC / HVDC (High Voltage AC/DC) - הולכת חשמל במתח גבוה בזרם ישר או בזרם חלופין

MRE (Marine Renewable Energy) – הפקת אנרגיה מתחדשת בים

MSP (Marine Spatial Planning) – תכנון מרחבי ימי

OD(Overtopping Devices) – התקני הצפה

OEC (Ocean Energy Conversion) – המרת אנרגיה ימית

OES (Ocean Energy Systems) – יוזמת סוכנות האנרגיה הבינלאומית למחקר ופיתוח של אנרגיה ימית

ORED (Offshore Renewable Energy Development) – מתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת

OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) – מתקנים להמרת אנרגיית חום

OWF (Offshore Wind Farm) – חוות טורבינות רוח

OWC (Oscillating Water Column)) – ממירי תנודות בעמודת המים

Pile Driving – החדרת כלונסאות או שיגומים

PNNL (Pacific Northwest National Laboratory) – המעבדה הלאומית של צפון-מערב הפסיפי של משרד האנרגיה האמריקאי

Point absorbers – סופגי אנרגיה נקודתיים

PV (Photovoltaic) – פוטו-וולטאי

SEC (Solar Energy Conversion) – מתקנים סולאריים ימיים

WEC (Wave Energy Converter / Device) – מתקנים להמרת אנרגיית גלים

2 מבוא

המחסור הגובר באנרגיה זמינה מסופק כיום במידה רבה באמצעות שריפת דלקים מאובנים, תהליך הגורם לשחרור גזי חממה לאטמוספירה ותורם לשינויי האקלים ולנזקים סביבתיים נלווים. בעשורים הקרובים צפויה הצריכה העולמית באנרגיה להמשיך ולגדול, ובישראל אף צפויה להכפיל את עצמה בתוך כעשרים שנה. לפיכך, ממשלות וחברות מסחריות רבות פונות לפיתוח מקורות אנרגיה חלופיים, ובעיקר למקורות מתחדשים, במטרה להפחית את פליטות גזי החממה והזיהום הנלווה לשריפת דלקים מאובנים. המרחב הימי מהווה משאב שטח משמעותי ומקור פוטנציאלי לאנרגיה מתחדשת שטרם נוצל במלואו. בעתיד צפויים מתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת- ORED (להלן: מתקנים) לתפוס חלק ניכר מתמהיל ייצור האנרגיה העולמי (Sørensen, 2017). מחקרים מצביעים על כך שפוטנציאל האנרגיה המתחדשת מן הים עשוי להספיק כדי לענות על הביקוש האנרגטי העולמי במסגרת מעבר להפקה מופחתת פליטות פחמן (Pelc & Fujita, 2002, Samsó et al., 2023, Shadman et al., 2019).

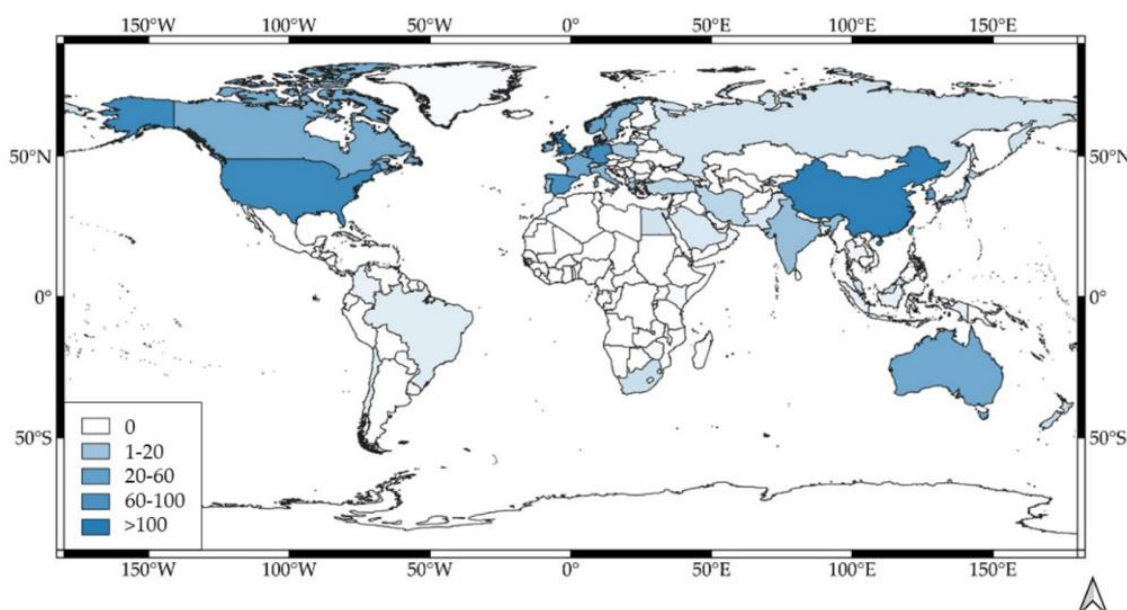
מבין סוגי המתקנים הימיים להפקת אנרגיה מתחדשת, טורבינות רוח ימיות קונבנציונליות (offshore wind) הן הטכנולוגיה הבשלה והמתקדמת ביותר, וכיום הן מהוות את הטכנולוגיה הימית הזמינה בקנה מידה מסחרי רחב. מתקנים מסוג זה פועלים, מוקמים ומתוכננים במדינות רבות בעולם (IEA, 2023; IRENA, 2023). האיחוד האירופי הציב יעד להגדלת קיבולת הרוח הימית מכ-12 GW בשנת 2021 לכ-300 GW עד שנת 2050 (European Commission, 2020; 2023). (Rusu, 2022). לעומת זאת, בתחום האנרגיה המתחדשת בים שאינה מבוססת רוח, הקיבולת המותקנת בעולם עדיין נמוכה משמעותית. על פי IRENA (2020, 2023) מרבית הקיבולת הפעילה מבוססת על ניצול אנרגיית גאות באמצעות מתקני מחסום (Tidal Barrage) בדומה לסכרים, בעוד שטכנולוגיות אחרות – כגון טורבינות גאות חופשיות (tidal stream), אנרגיית גלים (wave energy) ומערכות המרה תרמית מהים, מתקנים להמרת אנרגיית חום – (Ocean Thermal Energy Conversion – OTEC) מצויות בשלבי פיתוח, הדגמה או מסחור ראשוני. בהתאם לכך, וכפי שעלה בסקירת הספרות, גם עיקר המידע המדעי הקיים באשר להשפעות סביבתיות של מתקנים ימיים מתמקד בטורבינות רוח ימיות, ולאחריהן במתקני אנרגיית גאות (Copping & Hemery, 2020; Chen & Su, 2022). עם זאת, דוחות עדכניים מצביעים על צפי לגידול משמעותי בקיבולת טכנולוגיות אנרגיה מתחדשת בים בעשורים הקרובים, אם כי בהיקפים נמוכים משמעותית ממתקני אנרגיית רוח (IEA-OES, 2022; IRENA, 2023). בנוסף לטכנולוגיות הוותיקות יחסית, צפויות להבשיל בשנים הקרובות טכנולוגיות משלימות, ובהן מחליפי מליחות, ייצור מימן ימי, קיבוע פחמן ימי (למשל באמצעות הגברת יצרנות ראשונית של אצות או אלקליניזציה של מי ים), וכן מערכות סולאריות צפות (floating solar panels) חלק מטכנולוגיות אלו עדיין מצויות בשלבי מחקר ופילוט, אך הן נכללות בתרחישים עתידיים של פיתוח המרחב הימי (IEA, 2023 IRENA, 2023).

בעוד שהיתרונות של מקורות אנרגיה מתחדשת כאלטרנטיבה להפחתת פליטות פחמן לאטמוספירה ברורים, ההבנה באשר להשפעותיהם של מתקנים להפקת אנרגיה מתחדשת על הסביבה הימית עדיין אינה מלאה. אמנם בשנים האחרונות חלה התקדמות משמעותית, אולם סקירות עדכניות מצביעות על פערי ידע מהותיים, במיוחד ביחס לטכנולוגיות חדשות, להשפעות מצטברות (cumulative impacts) ולהשלכות ארוכות טווח על

מערכות אקולוגיות מורכבות (Gill et al., 2020; Dannheim et al., 2020; Copping et al., 2022). מרבית הידע מבוסס על מחקרים מאזורי צפון אירופה וצפון אמריקה, בעוד שההשפעות של מתקנים אלו באזורים ייחודיים כגון הים התיכון – ובפרט מזרח הים התיכון המאופיין בהתחממות מואצת, מליחות גבוהה ופלישת מינים – נחקרו במידה מצומצמת (Soukissian et al., 2017). בנוסף, חסרים נתונים אמפיריים ארוכי טווח, סטנדרטיזציה של שיטות ניטור והבנת השפעות על מארגי מזון ותהליכים אקולוגיים מערכתיים (Pisacane et al., 2018). לפיכך, חרף הגידול המשמעותי במספר המחקרים בשנים האחרונות, עדיין קיימת אי-ודאות מדעית ניכרת באשר לעוצמת ההשפעות, היקפן והשתנותן המרחבית והזמנית.

לכל סוגי המתקנים השפעות על הסביבה, שחלקן גבריות וחלקן ייחודיות למתקן. למתקנים השונים יש תשתיות נלוות שונות כגון החיבור ליבשה, מתקני אגירה, מתקני עגינה ואחרים, וגם להם השפעות ספציפיות ותלויות מקום, גודל וסוג מתקן. הטכנולוגיות המעורבות חדשות יחסית, חלקן לא נבדקו, וחסרים אחידות תקנון ותקנים של השיטות להערכה ולניטור. למרות זאת, הפיתוח הטכנולוגי המוגבר של מתקנים ימיים בעשורים האחרונים הביא למספר הולך וגדל של מחקרים המדגישים את ההשפעות של מתקנים אלו על הסביבה (Copping et al., 2020; Farr et al., 2021). למשל, בסקירת ספרות ששקלה את האינטראקציות בין גורמי עקה, השפעות שליליות, קולטנים ותגובותיהם, נמצא שרוב המחקרים הם סקירות תיאורטיות ומודלים, אם כי ניסויים ותצפיות בשטח ובמעבדה מתחילים להצטבר (Martínez et al., 2021). עיקר הספרות לגבי השפעות של טורבינות רוח, למשל, מגיעה מאירופה, ארה"ב וסין (איור 1) ונמצאת במגמת עליה.

פעילויות ההפקה של אנרגיה מתחדשת בים עשויות להתבצע בטווח רחב של עומקים מקו החוף ועד לים הפתוח ומעבר למדף היבשה, והן מגוונות מאוד באופיין. קיימים כמה תרחישים אפשריים לכל פעילות, וכפועל יוצא מכך גם ההשפעות הסביבתיות הן מורכבות (Inger et al., 2009), על אחת כמה וכמה כאשר בתי הגידול שונים כל כך זה מזה (קרקעית רדודה או עמוקה, עמודת המים, אופי בית הגידול וכו'). ללא רגולציה מתאימה וללא פיקוח על ביצוע הנחיות סביבתיות. חלק גדול מהשינויים הצפויים לבתי הגידול מהקמת המתקנים הימיים להפקת אנרגיה מתחדשת דומים למדי לאלו שקורים כתוצאה מהקמת מתקני אנרגיה פוסילית, לדוגמה רעש מהחדרת כלונסאות (Pile driving) ותנועת כלי שיט בשלב ההקמה, תאורה בלילה, הפיכת בית גידול של מצע רך אופקי למצע קשה מורכב ואנכי, מערכות עגינה שגורמות לשינויים בסדימנט בקרקעית, מיצוף בעמודת המים וכו' (Hemery et al., 2021). חלק אחר מהשינויים הנגרמים מהמתקנים הימיים להפקת אנרגיה מתחדשת שונה לחלוטין מאלו שמאפיינים מבני אנרגיה פוסילית. למשל מתקני הפקת אנרגיית רוח וזרם, המבוססים בדרך כלל על טורבינות להבים בעלות ציר אופקי, מהווים סיכון גבוה משמעותית להתנגשות עופות ויונקים ימיים בטורבינות רוח וזרם בהתאמה, מאשר מבנים סטטיים. גם כבלים להולכת חשמל, חלקים נעים או שינויי זרימה שמשפיעים על הפאונה בעמודת המים ולעתים על עמודת המים עצמה, עשויים להיות שונים בתכלית.



איור 1. חלוקה במרחב של הפרסומים המדעיים בנושא אנרגיית רוח בים שעלו ב- Web Of Science. המספרים מייצגים מספר פרסומים בתחום בין השנים 1995-2021 (Chen et al., 2022)

הבנת ההשפעות הסביבתיות של מתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת היא קריטית עבור פיתוח בר-קיימא ורגולציה יעילה שלהם (Sørensen, 2017). סקירה זו הינה צעד ראשון והכרחי בישראל לקראת פיתוח ורגולציה של מתקנים להפקת אנרגיה מתחדשת בים. כאשר המתקנים מתוכננים ומנוהלים כראוי, הם עשויים לתרום למגוון הביולוגי המקומי ואף להועיל לסביבה הרחבה יותר כשוניות מלאכותיות שממשות לשיקום מערכות אקולוגיות שנפגעו, או כאזורים מוגנים דה פקטו, גם עקב הצללה של תא השטח, הרחקת כלי שיט, ובשל שילוב אלמנטים מטיבים לסביבה כגון – גומחות וחספוס בבסיס המתקנים. המתקנים משפיעים על התנהגות בעלי חיים, מושכים או דוחים אותם, משמשים להתיישבות ועשויים אף לשמש להגברת המגוון הביולוגי כשוניות מלאכותיות. יש לציין שבאגן הלבנט, יותר מכל מקום אחר בכדה"א, שוניות מלאכותיות ואזורים מוגנים (למשל, מפעילות דיג) עלולים לשמש כבית גידול גם למינים מהגרים וביניהם גם מינים פולשים שנוק בצדם (Galil, 2017). לשם הבנת או חיזוי מגוון ההשפעות של כל מתקן על המגוון הביולוגי המקומי יש צורך במחקר רב ובינתחומי, בעיקר בכל מה שנוגע לבחירת מיקום המתקנים ותכנון מרחבי. בהתאם לתוצאות מחקרים אלו ניתן יהיה למקד את התכנון במזעור השפעות שליליות ובמיקסום תועלות פוטנציאליות. עם זאת, עבור חלק מהטכנולוגיות – ובעיקר מערכות אנרגיית גלים, טורבינות זרמי גאות OTEC, וטכנולוגיות גרדיאנט מליחות – אומדן ההשפעות עדיין מאתגר, בשל מספרם המצומצם של מתקנים פעילים בקנה מידה מסחרי בעולם, היעדר נתוני ניטור ארוכי טווח, והקושי המובנה במחקר ימי להפריד בין השפעות המתקן לבין גורמים חיצוניים והשפעות מצטברות (Mavraki et al., 2021).

מתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת עשויים לשנות את הדינמיקה הטבעית של המערכות האקולוגיות הימיות. השינויים המתוארים והנמדדים השכיחים ביותר הם רעש, התנגשות, שינוי בית גידול, שינויים בדינמיקה הידרו-משקעית ובגלים. השינויים המתוארים והשכיחים ביותר במחקרים כוללים רעש תתי-ימי, סיכון להתנגשות, שינוי בית גידול, וכן שינויים בדינמיקה ההידרודינמית, בהסעת משקעים ובמשטר הגלים. הקולטנים הפוטנציאליים של שינויים אלו כוללים יונקים ימיים, דגים, עופות ים, חברות בנתיות, וכן את עמודת המים והסדימנט עצמם. תגובות שתועדו בספרות ברמת הפרט והמערכת כוללות שינויי התנהגות,

פציעה או תמותה, שינויים במגוון הביולוגי (ירידה או עלייה), שינויים במארג המזון, וכן השפעות על זרימה ותהליכים חופיים (Copping & Hemery, 2020).

לאחר זיהוי רכיבי ההשפעה הסביבתית, הספרות מדגישה את הצורך בפיתוח אסטרטגיות ניטור והפחתה שמטרתן לאתר, למנוע או למזער נזקים אפשריים, במסגרת גישה אדפטיבית לניהול סביבתי (Copping et al., 2020). אנרגיית האוקיינוס מהווה אמנם הבטחה להפחתת פליטת CO₂ לאטמוספירה, אך מתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת מחויבים גם במזעור ומניעה של השפעות ישירות (Gill et al., 2020). יישום טכנולוגיות ניטור והפחתה נאותות דורש מאמצים רב-תחומיים כדי להבטיח שמירה על מערכות אקולוגיות בריאות ומתפקדות. הפגיעה הפוטנציאלית בבית הגידול תשתנה בהתאם לסוגו וגודלו של המתקן, מיני בעלי החיים, מיקום סוג ומצב בית הגידול (כלומר רגישותו להפרעה והאם קיימים בו כבר גורמי-עקה), ותקופת ההצבה (Martínez et al., 2021; Miller et al., 2013).

פיתוח התחום של אנרגיה מתחדשת בים נמצא בשלבים מוקדמים, ובנוסף להשפעות הסביבתיות קיימת אי ודאות רבה גם סביב ההשפעות הכלכליות והחברתיות של הצבת המתקנים (Raoux et al., 2018) (Stelzenmüller et al., 2021). מידע על השפעות כאלו הינו חיוני לתהליכי תכנון, מיקום ורישוי ולשם הבנת הדינאמיקה הכלכלית והחברתית בקהילה (Copping & Hemery, 2020). סקירה זו אמנם מתמקדת בהשפעות סביבתיות, אבל מאחר והמתקנים משפיעים על אינדיקטורים כלכליים-חברתיים שעשויים בתורם להשפיע על הסביבה, לדוגמא דרך הדרה או עידוד של פעילות דיג, נכללו כאן גם כמה אספקטים כלכליים-חברתיים כאלו (Tsai et al., 2022). השפעתם הפוטנציאלית של מתקנים כגון טורבינות רוח ומתקנים להפקת אנרגיה מזרמים, מגלים, ממחלפי חום ומאנרגיית שמש על המערכות האקולוגיות, בתי הגידול והביוטה נסקרת כאן באופן הוליסטי, לצד מיפוי ספרות סיסטמית שמציג את מצב הידע בעולם כיום עבור מתקנים שונים ורכיבים ביוטיים ואביוטיים שונים בסביבה הימית.

2.1 סוגי אנרגיות מתחדשות בים

2.1.1 אנרגיית רוח

טורבינות רוח מייצרות חשמל על ידי שימוש באנרגיית הרוח על מנת לסובב להבים או מתקנים דומים ולהמיר את האנרגיה הקינטית של הרוח בעזרת מחולל (גנרטור) לאנרגיה חשמלית. הטכנולוגיה המסחרית הקונבנציונלית מתבססת על טורבינות עם ציר אופקי ולהבים אנכיים. מרבית הטורבינות עושות שימוש בעמודי פלדה בודדים (Monopile) שמתחברים לכלונסאות שנעוצות בקרקעית הים, או מותקנות על סבכה (Jacket) בדומה לאסדות קידוח. חוות טורבינות רוח נמצאות כיום בשימוש נרחב מכל אנרגיה ימית אחרת. מגמת עליה מעריכית נרשמה בפריסתן ובגדלן בעשורים האחרונים, וזו מתוכננת להאיץ עוד יותר בעתיד הקרוב (Abramic et al 2022). מרבית הטורבינות המוקמות כיום עדיין נעוצות בקרקעית באמצעות כלונסאות, מרביתן בעומקים של 10-40 מ', והעמוקות עד לעומק מים של 80 מ' (Karlsson et al., 2022). במים עמוקים יותר, תחום החוות הצפות נמצא בעלייה משמעותית בשנים האחרונות (Farr et al., 2021) ואלו עשויות להיות מעוגנות גם בעומקים של 1000 מ' (Maxwell et al., 2022).

בנוסף לטורבינות רוח קונבנציונליות, בשנים האחרונות מתפתחת טכנולוגיה המכונה אנרגיית רוח אווירית (Airborne Wind Energy, AWE) המבוססת על הפקת אנרגיה מרוחות בגבהים של מאות מטרים באמצעות רחפנים, עפיפונים או כנפיים קשורות בכבל לקרקע או לפלטפורמה ימית. מערכות אלו פועלות על ידי תנועה

מחזורית במסלולים דינמיים (למשל בתבנית "שמונה"), היוצרת מתיחה בכבל המחובר לגנרטור, או באמצעות טורבינות קטנות המותקנות על גבי הכלי המעופף. הטכנולוגיה נמצאת כיום בשלבי פיתוח והדגמה מוקדמים, עם מספר פיילוטים יבשתיים וימיים מצומצמים, אך טרם הגיעה לפריסה מסחרית רחבת היקף. יתרונותיה הפוטנציאליים כוללים שימוש מופחת בחומרי גלם, היעדר יסודות קבועים בקרקעית הים וגישה לרוחות חזקות ויציבות יותר בגובה רב. עם זאת, ההשלכות הסביבתיות שלה – ובפרט ביחס לעופות נודדים, בטיחות תעופתית ואינטראקציות עם משתמשי מרחב ימי אחרים – עדיין אינן מובנות דיין ודורשות מחקר ייעודי (Bruinzeel et al., 2018).

2.1.2 אנרגיית גלים

הפקת אנרגיה מגלים עשויה ללוש צורות רבות, וההשפעות הסביבתיות של המתקנים יהיו תלויות במיקום, בסוג ובגודל המתקן. מבין סוגי המתקנים הקיימים כיום ניתן למנות מתקני Attenuator – מבנים צפים מוארכים הממוקמים לרוב במים עמוקים יחסית ופועלים ביעילות באתרים בעלי גובה גל משמעותי ממוצע של כ-1.5–2 מ' ומעלה, ובפרט בתנאים של 2–3 מ' ויותר. מתקנים אלה מוצבים בדרך כלל הרחק מהחוף, באזורים המאופיינים באנרגיית גלים גבוהה ויציבה. בהינתן שמשטר הגלים בחופי מזרח הים התיכון מתון יחסית, עם גובה גל משמעותי ממוצע הנמוך מערכים אלה ועם אירועי גלים גבוהים נדירים יחסית, יישומם של מתקני attenuator בקנה מידה מסחרי בישראל נראה פחות סביר בתנאים הנוכחיים.

טכנולוגיות אחרות מיוצגות על ידי מספר תצורות עיקריות של ממירי אנרגיית גלים. שוברי גלים משולבי אנרגיה (BID- Breakwater-integrated devices) משלבים מערכות הפקת חשמל במבנים חופיים קיימים או מתוכננים, ומנצלים את אנרגיית הגלים המתנפצת על המבנה; הם לרוב מוצבים בקרבת החוף ויכולים להשתלב בתשתיות נמלים ומעגנים. ממירי תנודות (Oscillating Water Column – OWC) מבוססים על תא חלול שבו תנודות פני המים דוחפות עמודת אוויר דרך טורבינה, ובכך מייצרות חשמל. מתקנים אלה יכולים להיות משולבים במבנים חופיים או מוצבים כיחידות צפות או קבועות בקרקעית. סופגי אנרגיה נקודתיים (Point absorbers) הם מצופים או גופים קומפקטיים הצפים על פני המים ומנצלים תנועה אנכית יחסית בין המצוף לבין עוגן או מסה אינרציאלית תתימית. הם מתאימים לפריסה מודולרית ויכולים לפעול במים רדודים או עמוקים, בהתאם לתכנון. התקני הצפה (Overtopping devices) אוספים מים העוברים מעל סף מבני עקב פעולת הגלים, מאגרים אותם במפלס גבוה יותר ומזרימים אותם חזרה דרך טורבינה הידרואלקטרית. מתקנים אלה דורשים לרוב מבנה מסיבי יחסית ונפוצים יותר באזורים בעלי אנרגיית גלים גבוהה. מרבית המערכות יכולות להיות מוצבות כיחידות צפות המעוגנות לקרקעית באמצעות כבלים או עוגנים, או כמתקנים קבועים המחוברים לקרקעית הים או למבנה חופי סטטי, כגון מזח או שובר גלים. טכנולוגיות משולבות תשתית חופית, כגון מתקני OWC המשולבים בשוברי גלים קיימים או סופגי אנרגיה נקודתיים (point absorbers) בקנה מידה קטן, עשויות להיות רלוונטיות יותר בתנאים של אנרגיית גל נמוכה עד בינונית כמו בים התיכון הישראלי. עם זאת, גם עבור טכנולוגיות אלו נדרש ניתוח כלכלי-אנרגטי מפורט, שכן הפוטנציאל הכולל באזור מוגבל בהשוואה לאזורי אוקיינוס עתירי אנרגיית גלים. באגן הים התיכון פרויקטים של ממירי אנרגיית גלים (Wave Energy Converter / Device, WEC) מתקיימים לרוב בקנה-מידה ניסויי/הדגמתי, ובדרך כלל קרוב לחוף או משולבים בשוברי גלים ובתשתיות נמל – זאת בשל שילוב של משאב גלים מתון יחסית ועומקי מים גדולים במרחק קצר מהחוף, המאתגרים מתקני offshore מסיביים. מתקן פיילוט כזה נפרס ע"י חברת Eco Wave Power בישראל (ביפו) החל מ-2018 ואף חובר לאחרונה לרשת החשמל ומזרים בה חשמל ירוק מגלי הים (איור 2). מתקני החברה מבצעים המרת אנרגיית גלים באמצעות

לוחות או יחידות צפות הקשורות למבנה חופי או פלטפורמה, ומנצלים את תנודות הגלים להנעת גנרטור. פיילוטס נוספים כוללים את SINN Power בנמל הרקליון בכרתים, באיטליה בוצעו ומבוצעים ניסויים והטמעות במסגרת מתקנים משולבי שובר-גלים, כגון REWEC3 בנמל Civitavecchia המבוסס על עקרון OWC – Oscillating Water Column כחלק ממבנה השובר. בנוסף, באיטליה הותקנו גם מערכות WEC (Wave Energy Converters) ייחודיות בים פתוח, כגון ISWEC שמדגימה המרה של אנרגיית גלים באמצעות מתקן צף. יחד, דוגמאות אלו ממחישות כי בים התיכון הדגש הנוכחי הוא על פתרונות חופיים/נמליים או פרויקטי הדגמה נקודתיים, כאשר היתכנות מסחרית רחבת-היקף עדיין תלויה בשיפור טכנולוגי, כלכלי ורגולטורי ובהתאמה למשטר הגלים המקומי.



איור 2. מתקני אנרגיית גלים שנפרסו ברחבי הים התיכון (WEC wave energy converters).
מקור: (Dialyna & Tsoutsos, 2021).

2.1.3 אנרגיית זרם – Current / Tidal Energy Conversion (CEC/TEC)

ישנם מספר סוגי מתקנים להמרת זרמי ים שניתן להשתמש בהם ביישומי הפקת אנרגיה; מרביתם מתמקדים בזרמי גאות במפרצים (Onoufriou et al., 2019), אך אלו אינם רלוונטים לישראל בשל משרעת הגאות הקטנה והיעדר מפרצים. בים הפתוח ישנם מתקנים צפים בעומקים שונים, המעוגנים לקרקעית בעזרת עוגני משקל, מתקנים מקובעים שנעוצים בקרקעית על ידי כלונסאות ושילובים שלהם. בדרך כלל האנרגיה מופקת בהם ממדחפים בעלי ציר אופקי (עם גובה וכיוון משתנה או קבוע) וכן מדחפים שמאפשרים זרימת מים דו כיוונית. ניתן לשלב את שני סוגי המדחפים עם כל אחת משלוש השיטות העיגון. מתקנים הנעוצים בקרקעית על ידי כלונסאות הינם הנפוצים ביותר וקיים עבורם ידע הנדסי אמין, אך הם מוגבלים למים רדודים יחסית. מתקני זרם כלכליים דורשים בדרך כלל מהירויות זרימה של 1 מ"ש לפחות לאורך פרקי זמן משמעותיים, בעוד שבחופי ישראל מהירויות הזרימה האופייניות בים התיכון נמוכות משמעותית מערך זה ברוב הזמן. לפיכך, הפוטנציאל להפקת אנרגיה מזרמי ים פתוחים בישראל מוגבל יחסית.

2.1.4 מתקני מחליפי חום להפקת אנרגיה (Ocean thermal energy conversion – OTEC)

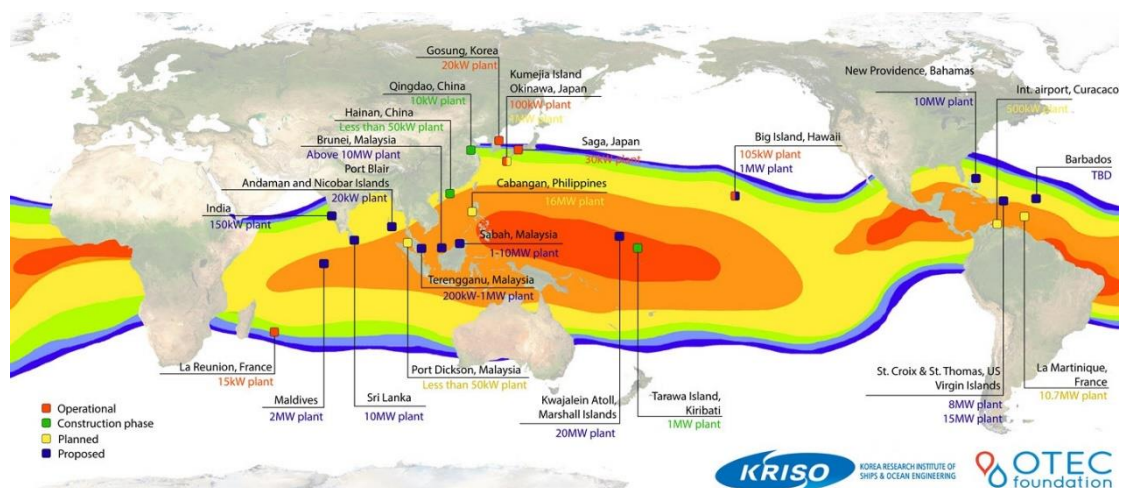
במתקני ניצול תרמי, נפחים גדולים מאד של מי עומק קרים ומי פני שטח חמים מוסעים ומוחלפים בכדי לנצל את הפרשי הטמפרטורות ביניהם. הפרשי הטמפרטורות האלו גבוהים במיוחד ליד קו המשווה (איור

3). מתקנים אלו שואבים כמויות גדולות של מי ים קרים מעומקים גדולים (< 1 ק"מ) ומי ים עיליים בפני השטח כדי להפעיל ייצור מחזור חשמל יציב (שלא כמו רוח, שמש זרם או גלים, מתקני ניצול תרמי פועלים 24/7), ממקור אנרגיה נקי ללא פליטות פחמן שמשוגל לספק רמות מסיביות של אנרגיה. יעילותה התאורטית של מתקנים אלו מוגבלת עלידי יעילות קרנו η :

$$\eta = 1 - \frac{T_c}{T_h}$$

כאשר T_h מייצג את טמפרטורת מי השטח ו T_c את טמפרטורת מי העומק (בקלווין). לצורך היתכנות טכנולוגית וכלכלית מקובל כי נדרש הפרש טמפרטורות של כ- 20°C לפחות לאורך רוב ימות השנה.

בים התיכון בכלל, ובאגן הלבנטיני מול חופי ישראל בפרט, מתקיים בקיץ הפרש טמפרטורות אופייני של כ- $12-16^\circ\text{C}$ בין פני השטח ($28-31^\circ\text{C}$) לבין מים עמוקים בעומק של מאות מטרים ($14-16^\circ\text{C}$). בחורף ההפרש קטן משמעותית עקב ערבוב אנכי, ולעיתים עומד על 3°C בלבד. לפיכך, תנאי הסף התרמיים הנדרשים להפעלה יעילה של מתקני OTEC אינם מתקיימים באזור זה באופן רציף שנתי.



איור 3. אזורים בעולם לפי הפרשי טמפרטורות בין פני השטח למי העומק, ומחלפי חום שמנצלים אותם (OTEC). סקלת הצבעים: כחול – פוטנציאל נמוך או לא מתאים, צהוב – פוטנציאל נמוך–בינוני, כתום – פוטנציאל טוב, אדום – פוטנציאל גבוה מאוד. מקור: (Ikegami & Jalihal, 2023)

2.1.5 אנרגיית שמש (Solar Energy Converter (SEC), פאנלים סולאריים צפים בים (Offshore PV)

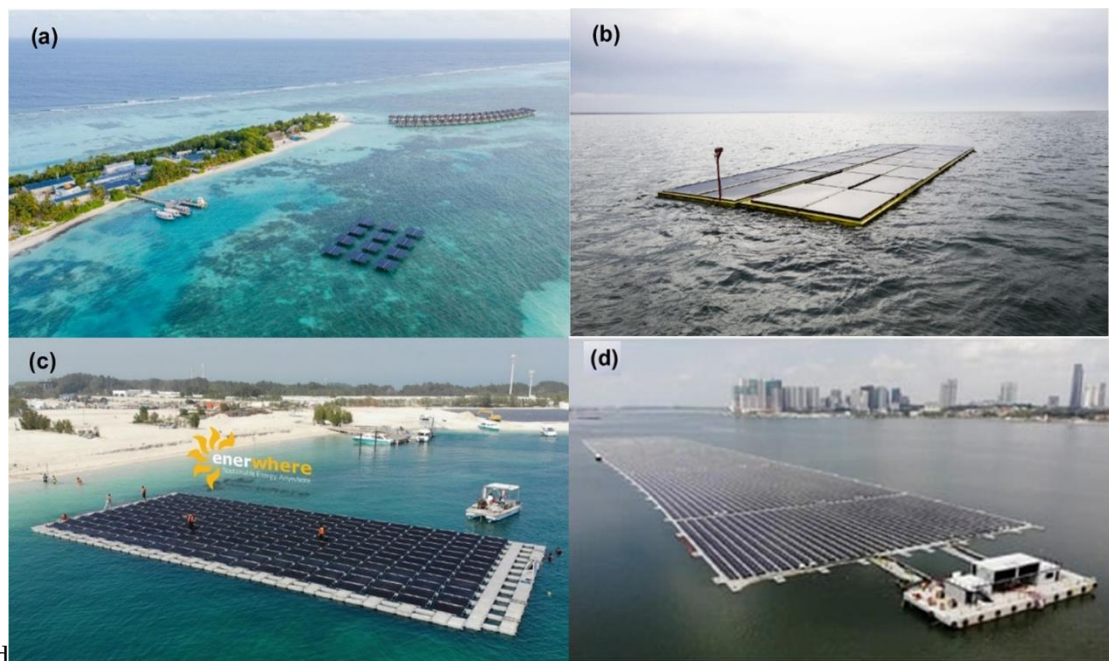
פריסת מתקנים סולאריים ימיים הנה שדה פיתוח ומחקר חדש של הפקת אנרגיה מתחדשת בים, ונמצאת בעליה חדה בשנים האחרונות. בדומה לאנרגיית הרוח, הטכנולוגיה להפקת האנרגיה עצמה דומה לזו שמתחרשת ביבשה, אם כי מערכות העיגון וההולכה שונות, וכך גם השפעותיהם על הסביבה (Hooper et al., 2021a). קיימות דוגמאות למערכות, בעיקר ניסיוניות, מלגונות טרופיות (האיים המלדיביים), פיורדים מוגנים (נורבגיה), הים הצפוני הפתוח (הולנד), אזורים קרובים לחוף במפרץ הפרסי (דובאי), ופרויקטים בסין ובסינגפור (איור 4). כתוצאה מהחדשנות והביזור בתחום המתפתח, נוסו דגמים בתצורות שונות למדי זו מזו (Oliveira-Pinto & Stokkermans, 2020) – מתקנים מעגליים, רבועים משושים או משולשים, על מצופים נפרדים קטנים שתומכים בפאנלים בודדים, או במשטחים קשיחים וגדולים יותר (איור 4).

בישראל עניין רב לפוטנציאל של טכנולוגיה זאת עקב מחסור בשטח יבשתי להצבת הפנלים לעומת משאב שטח משמעותי במים כלכליים לצד ערכי קרינת השמש גבוהים מאוד לאורך רב השנה, וגם כי הפאנלים הכהים בים לא מורידים את ערכי אלבידו של הסביבה, להבדיל מפאנלים סולאריים ביבשה.

הרכיבים העיקריים במערכות אלו (Oliveira-Pinto & Stokkermans, 2020) כוללים את אמצעי ההצפה (בעיקר פלסטיק ובעיקר HDPE High-Density Polyethylene), הפאנלים הסולאריים (לרוב סיליקון, גבישים וזכוכית), מערכות העגינה (כבלי פלדה, פלסטיק ושרשראות) וציוד חשמלי כמו שנאים ומערכות הולכה (כבלים). מתקני אנרגיית שמש בים סווגו ב 3 קבוצות עיקריות (Oliveira-Pinto & Stokkermans, 2020) :

1. מצופים מלבניים בודדים מפוליאתילן בצפיפות גבוהה (HDPE) המחוברים באמצעות פינים. טכניקת חיבור זו מתאימה לגלים קטנים עד 1 מ' ושאינם פוגשים את המתקן בזווית אלכסונית. גובה וזווית הגלים למתקן, כמו גם גודל המתקן יכולה להוביל להתהפכותם או ללחצים בחיבורים. סוג ציפה זה אינו מתאים לסביבה של ים פתוח.

2. מסגרות צינוריות תומכות, מפלדה מגולוונת ויחידות PV פאנלים סולאריים (פוטו-וולטאיים) בזווית הטיה קבועה. מתקנים בטכנולוגיות צינורות תומכים מפלדה מגולוונת או ממברנות מצויים כיום בתהליכי מחקר ופיתוח, וכנראה יהיו פתרון אמין יותר בתנאי גלים. פרויקט Swimsol Solar Sea 1500 יכול לעמוד בגלים עד גובהו 1.5–2 מ'. הוא מורכב מסגרת אלומיניום ומתקן ציפה עשוי קלקר. יחידות PV שלו מותקנות עם הטיה של 10° (Oliveira-Pinto & Stokkermans, 2020).



איור 4. פנאלים סולאריים צפים במלדיבים (a), בים הצפוני (b), באיחוד האמירויות (c) ובסינגפור (d). עובד מתוך : (Hooper et al., 2021a)

3. פתרונות חדשניים שונים, כגון שימוש בממברנות. מערכות גמישות, כגון לוחות דקים אלסטיים של מודולים סולאריים על מסגרת פולימר מחוזק בסיבים (Song et al., 2023), או יריעות פוטוולטאיות צפות דקות וגמישות, בהם מוזערו הכוחות על מערכות העגינה מתאימים יותר לסביבה הימית. הסביבה הקרירה תורמת

להגדלת תפוקת החשמל ונראה שהמלח ששוקע על היחידות לא מהווה בעיה (Oliveira-Pinto & Stokkermans, 2020).

ההצבה של מתקנים סולאריים צפים בסביבה הימית דורשת התאמה לתנאי הגלים, הרוחות והזרמים בסביבה זו. לבתימטריה ולעומק השפעה ניכרת על שיטת העגינה האפשרית. קיימות מערכות עגינה החולקות נקודות עיגון (עגינת בנק) או כאלו שמשתמשות בנקודות עגינה בודדות (מתאים לאזורי גלים נמוכים ומים רדודים יחסית). עגינות בנק יכולות להוות פתרון פשוט וזול ואף להקטין את השפעת הפרויקט על הביוטה המקומית (Sara Oliveira-Pinto 2021). עד כה רק שני פרויקטים עמדו בהצלחה בגלים בגובה של מעל 5 מ' (Ferraro et al., 2023).

טכנולוגיות מסחריות בפרויקטים משולבי מחקר מתפתחות גם הן: (1) מערך SUNdy - משושים עשוי מחצלת קצף ועליה סרט דק גמיש וקל, של מודולים סולאריים, המיועד לאוקיינוסים (2) מתקן Heliofloat - משטח קל משקל עשוי חומר שקוף, המרחף ברובו על המים עם פאנלים על חלקו העליון. מותקן על כריות אוויר מחומר רך וגמיש המשמש להגברת ציפה ולמזעור השפעה על החי הימי (Oliveira-Pinto & Stokkermans, 2020). (3) קונסורציום בלגי שהוקם כדי לבנות פרויקט מתקן אנרגיה סולארית צף נוסף בים הצפוני, בקרבת חוות חקלאות וחוות רוח ימיות (Sara Oliveira-Pinto 2021). המערכות המחקריות עוסקות כרגע ביעדי הספקים של כ 1 מגה-ואט. במעבר לשלבים מסחריים ידרוש להגדילן מאוד כדי ליצר כדאיות כלכלית.

מחד ביצועי מתקנים סולאריים צפים בים יכולים להיות טובים בכ 13% בהשוואה למערכות יבשתיות עקב קירור טבעי, מאידך מודלים מצביעים על כך שצמדה ימית ואולי גם מרבצי המלח בקו המים ובאזור ההתזה עלולים לחספס את פני שטח המבנה, להשפיע על העברת האור, להגדיל מקדמי גרירה ולשנות הידרודינמיקה. הצמדה הימית משנה את פיזור החום ועלולה להגביר קורוזיה ובכך ולקצר את חיי המתקן וקווי העגינה ב - 20% (Hooper et al., 2021a).

2.1.6 גידול אצות

גידול אצות (מיקרואצות ומאקרואצות) נבחן מזה שנים כמקור לדלקים מתקדמים (advanced biofuels) בזכות פוטנציאל פיריון גבוה ליחידת שטח ואפשרות שימוש במים מליחים/מיים ובשטחים שאינם חקלאיים. עם זאת, בפועל מרבית הייצור המסחרי של אצות כיום מופנה לשווקים בעלי ערך כלכלי גבוה (מזון, תוספי תזונה, קוסמטיקה, פיגמנטים וחומרי הזנה), בעוד שתחום הדלקים נותר ברובו בשלב ניסויי/הדגמות – בעיקר בשל עלויות גידול, קציר (harvesting), ייבוש ועיבוד גבוהות, ואתגרים הנדסיים בגימלון (scaling up). דלקים נוזליים "Drop-in" (דיזל מתחדש/דלק סילוני בר-קיימא) יכולים להיווצר משמנים אצות לאחר hydroprocessing (בדומה למסלולי שמנים/שומנים אחרים), אך הזמינות והעלות של שמן אצות עדיין מגבילות (Yang et al., 2016). מסלולים נוספים כוללים עיבוד תרמוכימי/ביוכימי של ביומסה אצתית, אך גם כאן דוחות טכנולוגיה עדכניים מדגישים שהתקדמות קיימת, אך הפער הכלכלי עדיין משמעותי ותלוי מאוד בשילוב תוצרי-לואי בעלי ערך (biorefinery) (Kruger et al., 2022).

בישראל קיימת פעילות מו"פ ויישומים ניסויים סביב גידול אצות, בעיקר בהקשרים של שימוש במיים/מים מליחים, שילוב עם פליטות CO₂ ו biorefinery לתוצרי ערך. חברת Seambiotic מפעילה פיילוט בריכות גידול מיקרואצות בסמוך לתחנת הכוח באשקלון, כחלק מתפיסה של שימוש בפד"ח תעשייתי לגידול אצות

(עם דגש רחב יותר על עיבוד ביומסה). קיימת פעילות מחקרית ויישומית במרכזי חיא"ל בחיפה ובאילת בתחום ביוטכנולוגיית האצות. אך בישראל—בדומה לעולם—התחום מתאים כיום בעיקר לפיילוט/מו"פ וליישומי נישא (למשל שילוב טיפול בשפכים/הפחתת פד"ח/תוצרי ערך), בעוד שהמרה לדלק כתחליף משמעותי לדלקים פוסיליים עדיין מוגבלת כלכלית ולקנה-מידה מצומצם (Fernand et al., 2017; Reznik & Israel, 2012).

שימוש בגידול אצות לקיבוע פחמן אטמוספרי ואגירתו יסקר בדו"ח נפרד.

2.1.7 מתקנים משולבים ומאפיינים של מתקנים ימיים ככלל

תשתיות ימיות, ודאי בים הפתוח, כוללות לרוב מתקנים גדולים שעבודה רבה מושקעת ביציבותם המבנית בסביבות עתירות אנרגיה שמצריכות סטנדרטים גבוהים של בטיחות. על כן התשתיות האלו מהוות הזדמנות לשילוב מספר סוגי מערכות או שילוב עם שימושים נוספים. גם מתקני גז ונפט או תשתיות אחרות שהגיעו לסוף חייהן מהווים הזדמנות לפריסת מתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת באופן שיפחית את ההשפעות השליליות בזמן הקמת האתר והכנסת כלונסאות. לדוגמא, שימוש באסדות ותשתיות כאלו לפריסת מתקנים בגובה שמעל למשברי הגלים עשוי לפתור הרבה מהבעיות שמאפיינות פריסת פאנלים סולאריים בים (Rosa-Clot, 2020). בים התיכון הישראלי נפרס בנמל יפו פיילוט של מתקני אנרגיית גלים משולבים בפאנלים סולאריים (Dialyna & Tsoutsos, 2021). שילובים אחרים עשויים להיות של מספר מתקני אנרגיה שונים ביחד (Hooper et al., 2021a). שילוב של המערכות עם מתקני חקלאות ימית שעשויים להרוויח ממתקני העגינה היציבים ואיגום התשתיות עם מתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת (Buck et al., 2017), שילוב עם שמורות ימיות (Allen et al., 2019) או עם דיג (Sanders et al., 2017; de Figueiredo Xavier T et al., 2022). שילוב שימושים עשוי גם לצמצם את טביעת הרגל המרחבית, כגון פריסת מתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת בין טורביות רוח (Hooper et al., 2021a).

החקלאות הימית בישראל מתמקדת כיום רובה ככולה בגידול דגי דניס בכלובים. מרביתם בתוך נמל אשדוד בכלובים שהועברו מים סוף ב-2008, ומיעוטם בים הפתוח מול מכמורת ומול פלמחים. למרות שטחים משמעותיים שהוגדרו לפיתוח חקלאות ימית (מנהל התכנון, 2022), החזון של ייצור עשרות אלפי טונות בשנה בחקלאות הימית בישראל טרם הוגשם. מאחר ומתקנים מסוימים, על מערכות העגינה שלהם, עשויים לפתוח אופציות לשילוב חקלאות ימית (Buck et al., 2017; Wang et al., 2021), יש לבחון שיתוף פעולה כזה על מדף היבשת הישראלי המצומצם והצפוף.

2.2 הים התיכון הישראלי כסביבה מקבלת: המאפיינים הייחודיים

מיקומה של ישראל בדרום מזרח הים התיכון מציב מספר אתגרים וכן הזדמנויות לפיתוח ופריסת מתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת בהיבט הסביבתי, ופרק זה מציג מספר תכונות ייחודיות של הסביבה הימית בישראל שיש לשים לב אליהן בהקשר זה.

2.2.1 מאפיינים פסיקליים

הים התיכון הישראלי, כחלק מן האגן הלבנטיני בדרום מזרח הים התיכון, מאופיין במערכת פיזיקלית חמה ומלווה יחסית, עם גרדיאנטים עונתיים חדים בשכבה העליונה. טמפרטורת פני הים נעה בקיץ סביב 28–31°C ובחורף כ-17–20°C, בעוד שטמפרטורת מי העומק (מאות מטרים ויותר) יציבה יחסית סביב 14–16°C לאורך השנה (Ozer et al., 2017; Pinardi & Masetti, 2000). מליחות פני השטח גבוהה יחסית (כ-38–39.8)

כתוצאה ממאזן אידיי חיובי והיעדר זרימת נהרות משמעותית, ומתגברת לעומק באגן המזרחי (Kress et al., 2014). המשטר הדינמי נשלט על ידי הזרימה הכללית מזרחה של מים אטלנטיים (Modified Atlantic Waters) בשכבה העליונה, יצירת מערבלים בסקאלה בינונית (mesoscale eddies), והשפעת רוחות צפונית-מערביות עונתיות (Herut et al., 2000; Ozer et al., 2022). משרעת הגאות והשפל באזור נמוכה מאוד (עד 40 ס"מ), ולכן תרומת אנרגיית הגאות זניחה בהיבט פיזיקלי (Gertman et al., 2008). בחורף מתרחש ערבוב אנכי מעמיק עד עשרות-מאות מטרים, בעוד שבקיץ מתפתחת תרמוקלינה רדודה וברורה, היוצרת הפרשי צפיפות חדים בין שכבת הערבוב לפני הים לבין מי הביניים והעומק. למעט אירועי סערה חורפיים, בהם גובה הגל המשמעותי (Hs) עשוי להגיע ל-5–7 מ' ואף יותר באירועים חריגים (Goldsmith & Sofer, 1983), משטר הגלים לאורך החוף הישראלי מתון יחסית. רוב ימות השנה מאופיינים בגובה גל משמעותי של כ-0.5–1.5 מ'. גם מהירויות הזרימה בים הפתוח נמוכות בדרך כלל (סדרי גודל של 0.1–0.3 מ"ש' בשגרה). מכלול מאפיינים אלה מגדיר מערכת ימית יציבה יחסית, בעלת אנרגיית גלים וזרמים מתונה בהשוואה לאוקיינוסים פתוחים, אך עם דינמיקה פעילה והשפעה אקלימית אזורית מובהקת.

ריכוזי החמצן המומס במים העליונים של האגן הלבנטיני גבוהים בדרך כלל וקרובים לרוויה אטמוספירית, בשל ערבוב חורפי ואורור יעיל של המסה העליונה. גם במי הביניים והעומק נשמרים ריכוזי חמצן חיוביים יחסית) לרוב מעל $180\text{--}200\ \mu\text{mol/l}$ וזאת בשל היווצרות מי ביניים מאזוריים (Levantine Intermediate Waters) באגן המזרחי. אירועי היפוקסיה ($\text{DO} < 2\ \text{mg/L}$) נדירים ביותר במים הפתוחים של האזור, ונצפים בעיקר במערכות חופיות סגורות או באזורים מושפעים מעומס אורגני מקומי. לפיכך, בניגוד לימים סגורים אחרים, הסיכון להיווצרות אזורי "מים מתים" אזוריים עם מחסור חמור בחמצן, אזוריים היפוקסיים בים הפתוח הישראלי נמוך (Kress et al., 2014).

לאורך החוף הישראלי קיים מיעוט מפרצים, לגונות ואסטוארים משמעותיים. המשמעות התכנונית היא היעדר אזוריים מוגנים טבעיים להצבת מתקנים ימיים, ולכן כל פריסה צפויה להתבצע במים פתוחים, תוך חשיפה לסערות חורף ולאירועי קיצון. מצד אחד, מצב זה מעלה את האתגר ההנדסי (עמידות לעומסי גל ורוח, עיגון, יציבות), ואת הסיכון לאובדן או נזק למתקן. מצד שני, מאחר שמשטר האנרגיה ההידרודינמית באזור נמוך יחסית ברוב ימות השנה, סיכונים אלו נמוכים בהשוואה לאזורים אנרגטיים.

לכן, מאפייניו הפיזיקליים של הים התיכון הישראלי עשויים להשפיע הן על תפקוד המתקנים והן על הסביבה הימית. מצד אחד, תנאי הרקע של זרמים חלשים יחסית, משרעת גאות קטנה ומשטר גלים מתון ברוב ימות השנה עשויים להפחית עומסים הידרודינמיים ולתרום ליציבות מבנית של מתקנים. מצד שני, אירועי קיצון עונתיים, כגון סערות חורף, עלולים לגרום לערבול מוגבר, הסעת סדימנטים ושינוי זמני בדפוסי זרימה מקומיים, ובכך להשפיע על פיזור פליטות, חומרים או חום מהמתקנים. בנוסף, התקנת תשתיות עשויה לשנות באופן מקומי את שדה הזרימה, ליצור אזורי הצללה הידרודינמית ולהשפיע על ערבוב אנכי, במיוחד באזורים רדודים או סמוכי חוף. במערכות רגישות לעונתיות, כגון זו של הלבנט, שינויים קטנים במבנה השכבות או בערבוב עשויים להשפיע על דינמיקת החום, המליחות והחמצן, ועל כן יש להביא בחשבון השפעות פוטנציאליות אלו בתכנון ובהערכת ההשפעה הסביבתית.

2.2.2 מאפיינים כימיים ביולוגיים ואקולוגיים

האגן הלבנטיני, ובכלל זה הים התיכון הישראלי, מאופיין באופן טבעי בעוני בחומרי דשן (אוליגוטרופיה), הנובע מריחוקו ממקור המים האטלנטיים העשירים יחסית, מאזן אידיי חיובי, ומיעוט מקורות מים מתוקים

באזור אקלימי מדברי. בעשורים האחרונים מוגדר האזור אף כ"אולטרה-אוליגוטרופי" (Thingstad et al., 2005). עד לסכירת נהר הנילוס בסכר אסואן ב-1964, הוזרמו לדרום-מזרח הים התיכון כ-80–85 מיליארד מ"ק מים בשנה בממוצע, כולל שיטפונות עונתיים שסיפקו סדימנטים ונוטריינטים בכמויות משמעותיות. אירועים אלו הפחיתו את המליחות (עד לכ- 36 יחידות מליחות) והעשירו את היצרנות באופן משמעותי בדרום-מזרח האגן (Gertman & Hecht, 2002). לאחר הסכר חלה ירידה חדה בשטף הנוטריינטים לים (Azov, 1991). במקביל, הסדרת נחלי החוף ושאבת יתר בישראל צמצמו עוד יותר את תרומת המים המתוקים המקומיים. כתוצאה מכך, היצרנות הראשונית בלבנט נמוכה יחסית לשאר חלקי הים התיכון (Reich et al., 2022), ביומסת הפלנקטון נמוכה (Hazan, 2018) וכמות הצרכנים הראשוניים מוגבלת (Belkin et al., 2022) בהשוואה למרכז ומערב הים התיכון, ריכוזי כלורופיל a נמוכים משמעותית לאורך רוב ימות השנה.

רבים מבעלי החיים בלבנט הינם קטנים מבני מינם במרכז ומערב הים התיכון, וזאת בהתאמה ליצרנות הנמוכה ולטמפרטורות הגבוהות (Sonin et al., 2007).

בתי הגידול הרגישים ביותר בישראל כוללים בעיקר מצע קשה. החל בטבלאות הגידול בקו המים, רכסי הכורכר הטבעיים על מדף היבשת וגני הספוגים שעליהם, וכלה באלמוגי העומק ובריכות התמלחת בים העמוק שאותרו לאחרונה בהפרעת פלמחים (Makovsky et al., 2020), המצע הקשה מכיל ביוטה עשירה ומגוונת, גם אם קרוב לחוף היא מורכבת בעיקר מדגים וחסרי חוליות מהגרים. תוך שקלול גישות ביוטיות ואביוטיות, המצע הקשה הוכר לרב כרגיש ביותר מבין 68 בתי הגידול שאותרו בסא"ס (גיאופרוספקט & חיא"ל 2016, 2023, Tom et al.), ואף הוכר ככזה בתכנון המרחב הימי (מנהל התכנון, 2022). אזורים מייצגים של בתי הגידול האלו מוגנים כיום בעקבות הכרזת שמורות ימיות חדשות גדולות, מגבלות דיג שונות ושטחים מיועדים לשימור. נכון ל-2023, השטחים המוגנים הימיים בישראל מהווים כ-6% מהמים הטריטוריאליים, עם יעד להרחבה משמעותית בשנים הקרובות.

משרעת הגאות והשפל בישראל נמוכה מאד, והזרמים לאורך החוף הינם לרב חלשים. המשטר הזה גם מכתיב אזור ליטורל קטן, ובכללו החוף החולי והמסלע. היעדר משטחי הצפה גדולים משמע שבתי הגידול החשובים ברצועת החוף הינם מצומצמים, ובולטות בהם בעיקר טבלאות הגידול המהוות בתי גידול רגישים במיוחד (גיאופרוספקט & חיא"ל 2016; שיינין וחוברי 2013a). בים התיכון הישראלי חסרים מספר בתי גידול ייחודיים ורגישים שנפוצים בשאר חלקי הים התיכון, כגון עשבי ים (בעיקר מהמין *Posidonia oceanica*) ומרבדי האצות הגירניות מצומצמים (Maerl beds and coralligenous habitats).

המינים המאכלסים מצע קשה ורדוד שונים מהותית מאלה המאכלסים את הקרקעית הרכה או העמוקה. המצע הקשה (טבלאות גידול, רכסי כורכר טבעיים, מצוקי סלע וגני ספוגים) תומך בחברות אקולוגיות עשירות של חסרי חוליות ישיבים כגון ספוגים, אלמוגים רכים וקשים, צינורנים ואצטלנים, וכן באצות מקרופיטיות. בתי גידול אלו משמשים גם כאתרי מסתור, רבייה והזנה לדגים דמורסליים ולמינים קריפטו-בנתיים. לעומתם, הקרקעית הרכה (חול, טין ובוץ) מאופיינת בחברות אינפאונה ואפיפאונה של רכיכות (צדפות וחלזונות), סרטנים, תולעים רביזיפיות וקיפודי ים חופרים, וכן בדגים שטוחים ומיני דמורסליים מותאמים לסביבה סדימנטרית. בעומקים גדולים מתוספות חברות ייחודיות כגון אלמוגי עומק ובריכות תמלחת. עמודת המים מאוכלסת בחברות פטופלנקטון וזואופלנקטון מגוונות המהוות את בסיס מארג המזון הימי ותומכות בדגים פלאגיים ובטורפים מרמות טרופיות גבוהות.

בין המינים הרגישים והמוגנים בים התיכון הישראלי בולטים שלושה מיני צבי ים (הירוק, *Chelonia mydas*, החום *Caretta caretta* והגלדי *Eretmochelys imbricata*, כאשר הירוק והגלדי מצויים בסיכון גבוה), מספר מיני יונקים ימיים (בעיקר דולפינים ולווייתנים קטנים בעמודת המים העליונה), וכן דגי סחוס – כרישים ובטאים – אשר כולם מוגדרים כערכי טבע מוגנים בישראל. בקרקעית בולטים חסרי חוליות ישיבים רגישים כגון ספוגים ואלמוגים, ולצדם מינים נידים בעלי חשיבות אקולוגית וכלכלית כגון לובסטרים וקיפודי ים.

מיני עופות ים פלאגיים כגון חמסנים, יסעורים וסולות נפוצים לרוב במרחק גדול יותר מהחוף, בעוד שעופות חופיים (שחפים, שחפיות ועופות מים נוספים) מרוכזים לאורך קו החוף ובאזורים רדודים. נדידת עופות מעל הים התיכון הישראלי מתרחשת בעיקר בסתיו דרומה ובאביב צפונה, עם ריכוזי תנועה בולטים בדרום ובמרכז רצועת החוף ובאזור חוף הכרמל (מירוז, 2013; אופיר, 2022).

למרות היצרנות והביומסה הנמוכות, עושר המינים הכולל אינו בהכרח נמוך, אלא מאופיין בדומיננטיות של מינים תרמופיליים מהגרים. חברות אקולוגיות רבות במדף היבשת הרדוד נשלטות כיום על ידי מינים מהגרים, בעיקר ממוצא אינדו-פסיפי, שחדרו דרך תעלת סואץ (Rilov & Galil, 2009; Edelist et al., 2013a). האזור הוכר כאחד מגופי המים הנפלים ביותר בעולם. מעל 500 מינים חדשים של רכיכות, סרטנים, אצות ודגים התבססו במדף היבשת הישראלי. מתוך כאלף מינים פולשים בים התיכון כולו, מעל מחציתם הגיעו דרך תעלת סואץ (Galanidi et al., 2023). שינוי ביוטי זה כמעט חד-כיווני ומואץ, במיוחד על רקע התחממות מי הים (Albano et al., 2021). באזורים רבים עד עומק של כ-100 מ', חלק ניכר מהמינים המקומיים נדחקו או הוחלפו. מצב זה מקשה על חיזוי תגובת המערכת להוספת גורמי שינוי נוספים (כגון תשתיות ימיות), אך סביר שמינים אופורטוניסטיים – רבים מהם מהגרים – ייהנו ממצעים קשים מלאכותיים (Rilov & Galil, 2009).

בשל אופיו האולטימטי של הים התיכון הישראלי, כל שינוי בזמינות נוטריינטים או בתנאי הסביבה המקומיים עשוי להוביל לתגובות אקולוגיות משמעותיות. מתקנים ימיים עשויים להשפיע על המערכת באמצעות מספר מנגנונים, לרבות יצירת מצעים קשים מלאכותיים, שינוי תנאי זרימה מקומיים, והחדרה אפשרית של חומרים או חום לעמודת המים. מצעים אלו עלולים לשמש מוקדי התיישבות למינים אופורטוניסטיים, ובפרט למינים פולשים תרמופיליים, ובכך לשנות את הרכב החברות המקומיות ולהאיץ תהליכי פלישה. בנוסף, שינויים מקומיים בערבוב או בזרימה עשויים להשפיע על פיזור פלנקטון, ביצים ולרוות, ועל זמינות מזון לצרכנים ראשוניים. במערכות דלות בנוטריינטים, גם תוספות קטנות של חומר אורגני או אנאורגני עלולות לגרום לשינויים בפרודוקטיביות המקומית, כולל פריחת אצות מקומיות. לצד זאת, מתקנים עשויים גם ליצור אפקטים חיוביים מסוימים, כגון הגדלת מורכבות מבנית המספקת בתי גידול חדשים, אולם השפעות אלו תלויות בהקשר המקומי ובאופי התשתית. לפיכך, הערכת ההשפעות האקולוגיות מחייבת התייחסות למאפייני הרקע הייחודיים של המערכת הלבנטית, ובפרט לרגישותה לשינויים סביבתיים גם בהיקפים קטנים יחסית.

2.2.3 זיהום ושינויי אקלים

באופן כללי, זיהום תעשייתי כרוני ממקורות יבשתיים (כגון מפרץ חיפה או שפד"ן) פחת משמעותית בעשורים האחרונים (דוח חיא"ל, 2021). עם זאת, המערכת האקולוגית במדף היבשת חשופה לזיהומים נקודתיים ואירועי קיצון (כגון אסון הזפת ב-2021), וכן לעומסים מתמשכים של זיהום פלסטיק (Segal, 2022) ונגר עירוני (Goldshleger et al., 2015). מקורות נוספים כוללים תמלחות מי-התפלה (Belkin et al., 2015) ודליפות

מקומיות. אף שהעומס הכללי ירד, המערכת האולטרה־אולטרו־רופית רגישה במיוחד לכל תוספת נוטריינטים או מזהמים (Rahav et al., 2018).

התחממות, המלחה והחמצת מי דרום מזרח הים התיכון הנן תופעות שמתרחשות במהירות גבוהה יחסית בים התיכון (Ozer et al., 2017), והן מעמידות את המערכות האקולוגיות הימיות בפני שינוי מואץ. בפרט, התחממות המים פועלת בסינרגיה עם הגירת מינים ומעודדת התבססות של עוד מינים תרמופיליים (Givan et al., 2018) ובמקביל מפחיתה את יכולתם של מינים שאינם תרמופיליים להתמודד עם שינויים מצרפיים ובכללם הצבת מתקנים (Gissi et al., 2021).

2.2.4 שמירת טבע

למרות היצרנות הנמוכה, העדר אנדמיות מובהקת, עומסי פלסטיק ופסולת ימית, ופיתוח משמעותי של תשתיות גז טבעי בעשור האחרון, חלה התקדמות חסרת תקדים בהגנה על המרחב הימי של ישראל. במסגרת התכנון הימי הלאומי (תמ"א 37ח) הוכרזו והורחבו בשנים האחרונות שמורות טבע ימיות ואזורים מוגנים בהיקף משמעותי, המהווים כיום אחוז גבוה יחסית משטח המים הטריטוריאליים בהשוואה לחלקים אחרים בים התיכון (מנהל התכנון, 2022).

לצד הרחבת השמורות, יושמו תקנות דיג חדשות הנחשבות מהמחמירות באזור הים התיכון (לרבות סגירות עונתיות, מגבלות עומק ואיסור על שיטות דיג מסוימות), חוזקה האכיפה הימית, קודם תכנון מרחבי ימי מבוסס־מערכת אקולוגית (MSP) וחלה הפחתה משמעותית בזיהום ממקורות תעשייתיים יבשתיים (דוחות חי"א"ל, 2021). מכלול צעדים אלו תרם לשינוי מגמה חיובי בניהול הסביבה הימית.

פריסת מתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת בקרבת שמורות או בתוכן עשויה להשפיע במספר מישורים:

1. **השפעות ישירות** – רעש, צל, שינוי זרמים, הפרעה לקרקעית והנחת כבלים.
 2. **השפעות עקיפות** – שינוי דפוסי דיג, יצירת אזורי אי־דיג בפועל, ואפקט שונות מלאכותיות. בהנחה שהמתקנים יוצבו מחוץ לשמורות, ותיאסר סביבם פעילות דיג מטעמי בטיחות, הם עשויים לתפקד בפועל כמתקני צבירת דגים (FADs) וליצור ריכוזי ביומסה מקומיים. מחקרים מצביעים כי אזורים סגורים לדיג סביב תשתיות עשויים להגדיל צפיפות דגים מקומית (Stelzenmüller et al., 2016; Shimada et al., 2022). עם זאת, ריכוז דגים סביב מבנים קשיחים אינו שקול בהכרח לעלייה בביומסה, ולעיתים מדובר ב"אפקט משיכה". יתרה מכך, מבנים ימיים מלאכותיים עשויים לשמש כאבני דילוג (stepping stones) להתפשטות מינים לא־מקומיים בכך שהם מוסיפים מצע קשה חדש במרחב שבו הוא לעיתים נדיר, יוצרים רציפות מרחבית בין אתרים מרוחקים ומאפשרים התיישבות והתרחבות הדרגתית של אורגניזמים ישיבים ובעלי שלבי חיים לרווחיים קצרים. בנוסף, מבנים אלו עשויים לשנות זרמים ותנאים מיקרו־סביבתיים ולהפחית תחרות ראשונית, ובכך להעדיף מינים אופורטוניסטיים – תכונה נפוצה בקרב מינים פולשים. באזורים שבהם פלישות ביולוגיות כבר שכיחות, כמו דרום־מזרח הים התיכון, תשתיות ימיות חדשות עלולות להאיץ את קצב ההתפשטות של מינים מהגרים ולהקל על חדירתם גם לשטחים סמוכים רגישים (Adams et al., 2014).
- הספרות האירופית על חוות רוח ימיות מצביעה על כך שקונפליקטים תכנוניים עיקריים נוגעים לחשש מפגיעה בערכי טבע ובאתרי Natura 2000 וכן לשיקולי נוף ותיירות (Sanders et al., 2017). במקרים רבים, מיקום חוות הרחק מהחוף הפחית קונפליקט נופי אך חייב העברת כבלים דרך אזורים חופיים רגישים.

מחקרים מסוימים מציעים כי בתכנון זהיר, ניטור ארוך טווח והפרדה פונקציונלית (למשל אזורי חיץ), מתקנים ושמורות יכולים להתקיים זה לצד זה, אולם הדבר תלוי בהיקף הפיתוח, רגישות בתי הגידול ומבנה המערכת האקולוגית המקומית. במרחב ימי קטן וצפוף בפעילויות כמו בישראל, הימנעות מוחלטת מקרבה בין תשתיות לשמורות תהיה מאתגרת, ולכן נדרש תכנון מרחבי משולב והערכת השפעות מצטברות.

2.2.5 מאפיינים אקולוגיים של הים העמוק

הים העמוק הלבנטיני (עמודת המים והקרקעית שמעבר לאזור הפוטי) הינו עני למדי ומתאפיין במגוון מינים נמוך וביומסה נמוכה לעומת הים הרדוד (Galil, 2004). החי בים העמוק באגן המזרחי של הים התיכון עני מזה שבאגן המערבי, אך מתקיימים בו ספוגים, דגי קרקעית, שושנות ים, סרטנים, קווצי עור ותולעים (Danovaro et al., 2010). למרות זאת, בים העמוק הישראלי מתגלים עוד מינים ככל שהמחקר מתקדם (Goren et al., 2008; Idan et al., 2018), יש בו בתי גידול ייחודיים ובהם גני ספוגים בעיקר במדף היבשת (Idan et al., 2018), אלמוגי עומק על המדרון, ואף מערכות אקולוגיות ייחודיות של בריכות מלח ואזורי אומנה לכרישי עומק שנמצאו לאחרונה בים העמוק בהפרעת פלמחים (Makovsky et al., 2020). בנוסף, טווח העומקים של מיני הלבנט רחב במיוחד (eurybathic species) והם נמצאים גם בעומקים רדודים מאשר במערב ים תיכון או ימים אחרים (Galil, 2004).

המערכת האקולוגית של מזרח הים העמוק בים התיכון מאופיינת בתלות גבוהה באספקת חומר אורגני מוסע לטרלית מהמדף ומהשכבות העליונות (Guy-Haim et al., 2022) ובקצב מטבולי נמוך יחסית, המותאם לתנאי מחסור ממושכים (Danovaro et al., 2010). תנאים אלו מובילים לכך שחברות אקולוגיות רבות בים העמוק מתאפיינות בקצבי גדילה איטיים, בתוחלת חיים ארוכה וברגישות גבוהה להפרעות. למרות הביומסה הנמוכה, הים העמוק מהווה מאגר משמעותי של מגוון ביולוגי, כולל מינים אנדמיים ומינים שטרם תוארו למדע. עם זאת, חלקים נרחבים מהמערכת נותרים בלתי נחקרים, וקיים פער ידע משמעותי בנוגע לתפוצה, תפקוד ומידת הקישוריות בין בתי הגידול השונים. מורכבות זו, לצד הקושי בגישה ובדיגום, הופכת את הערכת מצב המערכת ואת חיזוי תגובתה להפרעות לאתגר משמעותי.

פריסת מתקנים להפקת אנרגיה מתחדשת בים העמוק עשויה להשפיע על מערכות אקולוגיות רגישות אלו במספר דרכים. פעולות התקנה ועיגון עלולות לגרום להפרעה פיזית לקרקעית, לרבות פגיעה בבתי גידול איטיים ומתמחים כגון אלמוגי עומק וספוגים, אשר התאוששותם מהפרעה עשויה להימשך שנים רבות ואף עשרות שנים (Roberts et al., 2006; Danovaro et al., 2010). בנוסף, יצירת תשתיות קשיחות עשויה לשנות את מבנה בית הגידול המקומי ולשמש מצע להתיישבות אורגניזמים, תוך שינוי הרכב חברות הקרקעית (Coolen et al., 2020). תהליכים נלווים כגון רעש תת-ימי, פליטות חום או חומרים, ושינויים מקומיים בזרימה ובשקיעת חלקיקים עשויים להשפיע על אורגניזמים בעמודת המים ובקרקעית, לרבות על תהליכי הזנה, רבייה ופיזור (Inger et al., 2009). במערכות המאופיינות בזמינות אנרגטית נמוכה וברגישות גבוהה, גם הפרעות מקומיות עשויות להיות בעלות השפעות ארוכות טווח (Danovaro et al., 2010). מנגד, תשתיות עשויות ליצור מורכבות מבנית חדשה ולשמש בתי גידול חלופיים, אולם תרומתן האקולוגית תלויה בהקשר המקומי ובדינמיקת ההתיישבות והגיוס (Petersen & Malm, 2006). לפיכך, תכנון מתקנים בים העמוק מחייב גישה זהירה, הנשענת על עקרון הזהירות המונעת ועל צמצום אי-הוודאות המדעית.

2.3 מינים רגילים

2.3.1 עופות ים

זהות ומגוון: במרחב הימי של ישראל תועדו כ־34 מיני עופות ים, הכוללים עופות ים פלאגיים "אמיתיים" (החולפים/שוהים בים הפתוח ומגיעים לחוף בעיקר לקינון) לצד עופות חופיים ועופות מים. בין הקבוצות הבולטות:

- יסעוריים (Procellariiformes) למשל יסעור מצוי (*Puffinus yelkouan*) ומינים נוספים של יסעורים ויסעורונים.
- סולות (Sulidae) עופות ים גדולים הניזונים בדיג צלילה.
- שחפים ושחפיות (Laridae, Sternidae) קשורים יותר לאזור החופי והמדף.
- חמסנים (Stercorariidae) פלאגיים בחלקם, ולעיתים נלווים לשיירות דיג.

הידע על עופות ים בים הפתוח הישראלי עדיין חלקי, משום שחלק ניכר מהמידע נאסף מהחוף או מסקרים ייעודיים נקודתיים, ורוב המינים אינם מקננים בישראל — ולכן תמונת התפוצה המרחבית עשויה להיות מוטת/חלקית (פרלמן, 2013).

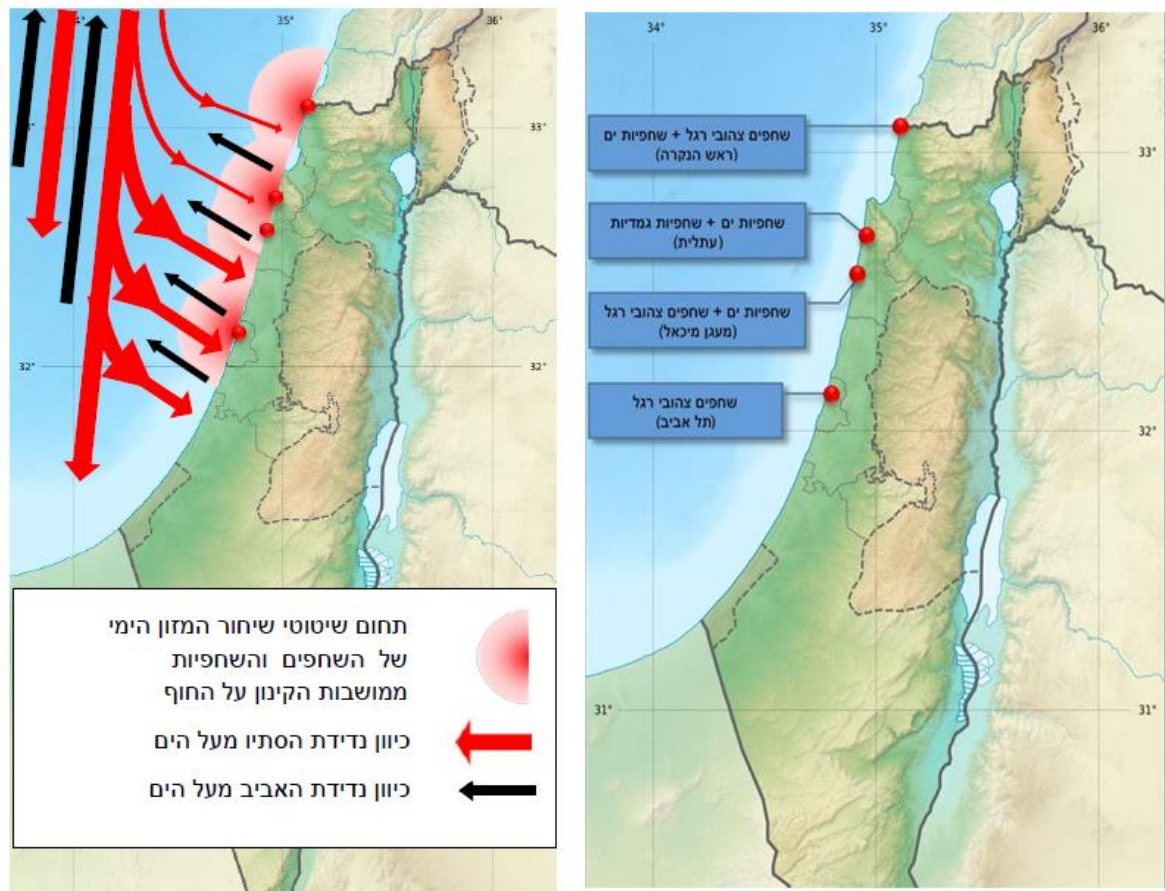
תפוצה ודפוסי שימוש במרחב: עופות החוף (כגון שחפים ושחפיות) פעילים בעיקר לאורך החוף, הכרית והמדף הרדוד, בעוד יסעורים וסולות קשורים יותר למרחב הפלאגי ולעיתים גם לים העמוק. קיימים ריכוזים מקומיים סביב: חוות דגים ומבנים ימיים (מזון זמין/דגים מרוכזים) וספינות דיג (שלל מושלך/דגים פצועים). על מעט האיונים ובמסלע שבחוף הכרמל ובאכזיב קיימות מספר מושבות קינון של שחפים ושחפיות, ומקומות אלו ראויים במיוחד לשימור (מנהל התכנון, 2022).

בנוסף לעופות הים, ישראל ממוקמת על אחד מצירי הנדידה העיקריים של עופות מעל לים התיכון, שאליו מתנקזים מספר צירי נדידה בין המרחב האירו-אסיאתי והאפריקאי (אופיר, 2022) וביניהם גם מינים מוגנים או רגילים יבשתיים. הם נודדים, בדרך כלל מהים אל החוף מעל למדף היבשה, או במקביל אליו, כשבסתיו נפח הנדידה גבוה יותר, כיוונה מהים אל החוף בעוד נדידת האביב הקטנה יותר מתרחשת בכיוון ההפוך (אור 5 - אופיר, 2022). במקרים רבים הנדידה מתנקזת לאזורי מעבר עיקריים בדרום ובמרכז רצועת החוף, וכן באזור הכרמל (מירוז, 2013; אופיר, 2022). בחלק מהמינים ניכרת תנועה לילית משמעותית, דבר המעלה רגישות לתאורה ולסיכונים התנגשות.

סטטוס שימור: חלק מהמינים נחשבים נדירים במרחב הישראלי; חלקם בעלי סטטוס שימור לאומי או בינלאומי רגיש (למשל מינים מסוימים של יסעורים). אין כיום הערכה מקומית מלאה של גודל אוכלוסייה/מספר זוגות מקננים למרבית המינים הפלאגיים.

סיכונים אפשריים ממתקני אנרגיה מתחדשת ימיים: מתקני אנרגיה ימיים עשויים להשפיע על עופות ים בשלבי הפרויקט השונים. בשלב ההקמה מתרחשת הפרעה זמנית באזורי מנוחה ותזונה כתוצאה מפעילות כלי שיט, רעש ותנועה מוגברת במרחב. בנוסף, כלי שיט עשויים למשוך עופות בחיפוש אחר מזון, בין אם עקב פעילות דיג ובין אם בשל פסולת אורגנית, ובכך להגביר את הסיכון לפגיעה מכנית. בשלב ההפעלה, אחד הסיכונים המרכזיים הוא התנגשות במבנים או בלהבים מסתובבים, בעיקר במערכות גבוהות כגון טורבינות רוח; הסיכון עולה בתקופות נדידה לילית ובתנאי ראות ירודה. תאורת אזהרה על גבי המתקנים עלולה אף היא למשוך עופות, במיוחד בלילה או בערפל, ולהגביר את הסיכון להתנגשות. נוסף על כך, עופות עשויים לשנות מסלולי תעופה ולעקוף אזורי תשתיות (displacement) תופעה העלולה להיות כרוכה בעלות אנרגטית

מצטברת ובהשלכות אקולוגיות. בשלב התחזוקה, פעילות חוזרת של כלי שיט ועבודות שירות עשויה לשמר הפרעה כרונית, בעיקר כאשר המתקנים בסמוך למושבות קינון או לאזורי ריכוז עונתיים.



איור 5. מפות מוקדי הקינון (מימין) והמעבר (משמאל) של עופות נודדים ומקננים הידועים במרחב הים התיכון מול חופי ישראל. מקור: (אופיר, 2022)

מיעוט המידע המרחבי על אזורי מנוחה ותזונה של מיני עופות ים בים התיכון הישראלי יאתגר את הבנת ההשפעות של פריסת מתקנים ימיים להפקת אנרגיית רוח על אוכלוסיותיהם, מה שמצריך מחקר נוסף בכדי לדייק את ההתכנות ואת תכנון אזורי הפריסה במרחב הימי.

טבלה 1. עופות עיקריים במרחב הימי הים תיכוני הישראלי. מקור: (אופיר, 2022; מירוז, 2013).

קבוצות המינים	מינים מייצגים	מס' פרטים שוהים/חולפים בתחום 10 ק"מ מחופי ישראל (סדר-גודל מוערך)	דפוס תנועה אופייני (כיוון וגובה)	חודשי שיא של נוכחות
עופות-ים "אמיתיים"	יסעור גדול, יסעור מצוי, סולה צפונית, חמסן טפיל	10,000 < ~ עשרות בודדות בד"כ. מספרים גדולים יותר (מאות) נצפים בזמן סערות מערביות ובתקופות שיא של נדידה.	תנועה לכל הכיוונים (תוך שיחור מזון) בגובה נמוך (0 – 10 מ'). בעונות הנדידה תנועה בכיוון כללי צפון-דרום.	כל השנה
שחפים	שחף אגמים, שחף שחור, שחף ארמני	~1,000,000	תנועה יומית לריכוזי לינה בעומק הים (כיוון הלוך בערב וחזרה בבוקר). וכן תעופות נדידה (צפון-דרום). גובה 0 – 100 מ'.	אוקטובר - מאי
עופות מים	ברוזהים (קרקיר), חופמים (צווארון ואלכסנדר'), חופיות (קטנה ואלפינית), אנפות	500,000 (על פני עונת נדידה). מספר הפרטים עולה כשמתרחקים מס' ק"מ מהחוף.	תעופות נדידה בכיוון כללי צפון-דרום. שיא הנדידה בשעות הלילה. גובה 0 – 100 מ'.	אוגוסט-אוקטובר, מרץ-מאי.
ציפורי שיר ודומיהן	זרעית השדה, פרוש מצוי, דרור ספרדי, נחילאלי צהוב, שרקרק מצוי	>10,000,000 בעונה	תעופות נדידה בכיוון כללי צפון-דרום (בסתיו לעיתים בכיוון דרום מזרח לעבר חופי ישראל).	ספטמבר-נובמבר, מרץ-מאי
עופות המקננים בחופי ישראל	שחף צהוב-רגל, שחפית ים, שחפית גמדית	1,000 – 3,000 פרטים המקננים במושבות (אי היונים, בריכות מעגן מיכאל, אי ראש הנקרה, בריכות המלח בעתלית)	שוטטות של פרטים בפעילות קינון ושיחור מזון. מרבית התנועה הנצפית היא לאורך החופים ובטווח של כ- 3 ק"מ מהם. יש תצפיות גם בשיטותם לעומק הים עד 10 ק"מ.	אפריל - ספטמבר

עופות ים ועופות נודדים רגישים בעיקר להתנגשות, תאורה, חסימת/שינוי מסלולי תעופה, והפרעה חוזרת מכלי שיט. בתכנון יש להקפיד על איתור מוקדי נדידה וריכוז (עונתי ומרחבי), לצמצם תאורה לא חיונית (ובעיקר להעדיף תצורות תאורה פחות מושכות), ולהימנע ככל האפשר מהקמה באזורים הסמוכים למושבות קינון ו"צווארי בקבוק" של נדידה.

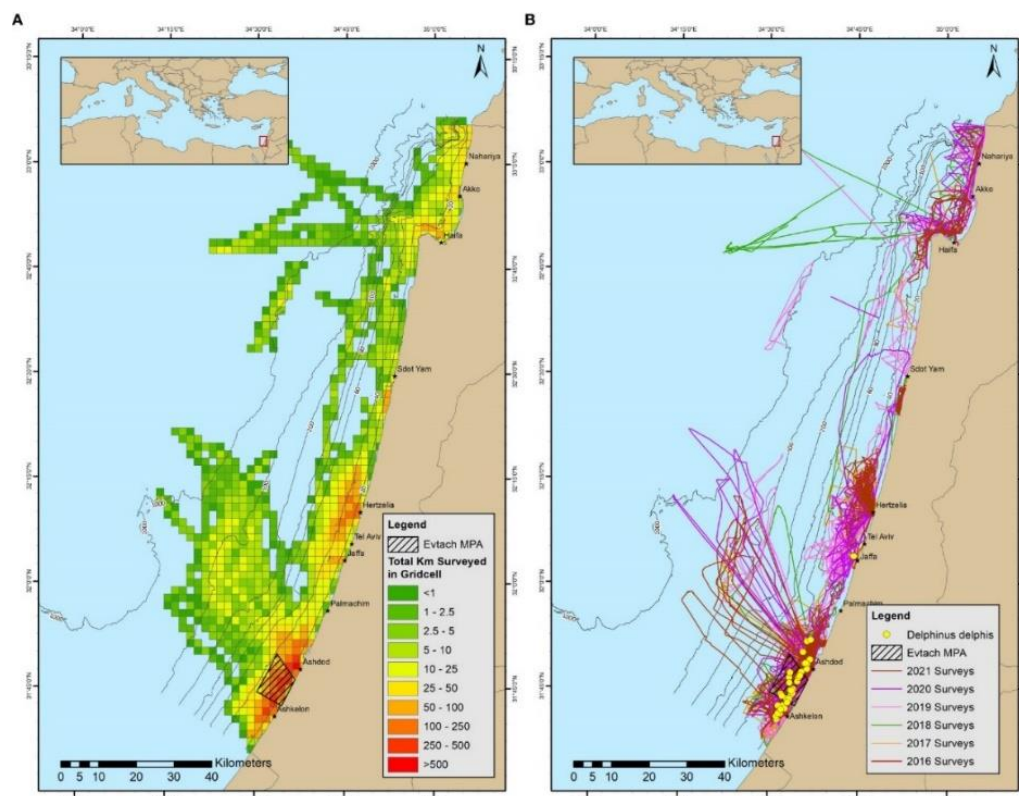
2.3.2 יונקים ימיים

זהות ומגוון: המרחב הימי הים תיכוני של ישראל התברך במגוון של יונקים ימיים, שכולם מוגנים על פי חוק בישראל, אף על פי ששכיחותם נמוכה נמוכה פי 20 מאשר באזורים אחרים בים התיכון, ככל הנראה בעיקר בשל מחסור בחומרי הזנה שמביא לכמויות דגה נמוכות (Zuriel et al., 2023). במי ישראל תועדו/נצפו/הוחפו פרטים מכ-14 מיני יונקים ימיים (כרם ואח', 2013). המינים הנצפים בתדירות הגבוהה ביותר (איורים 6 ו-7) הם:

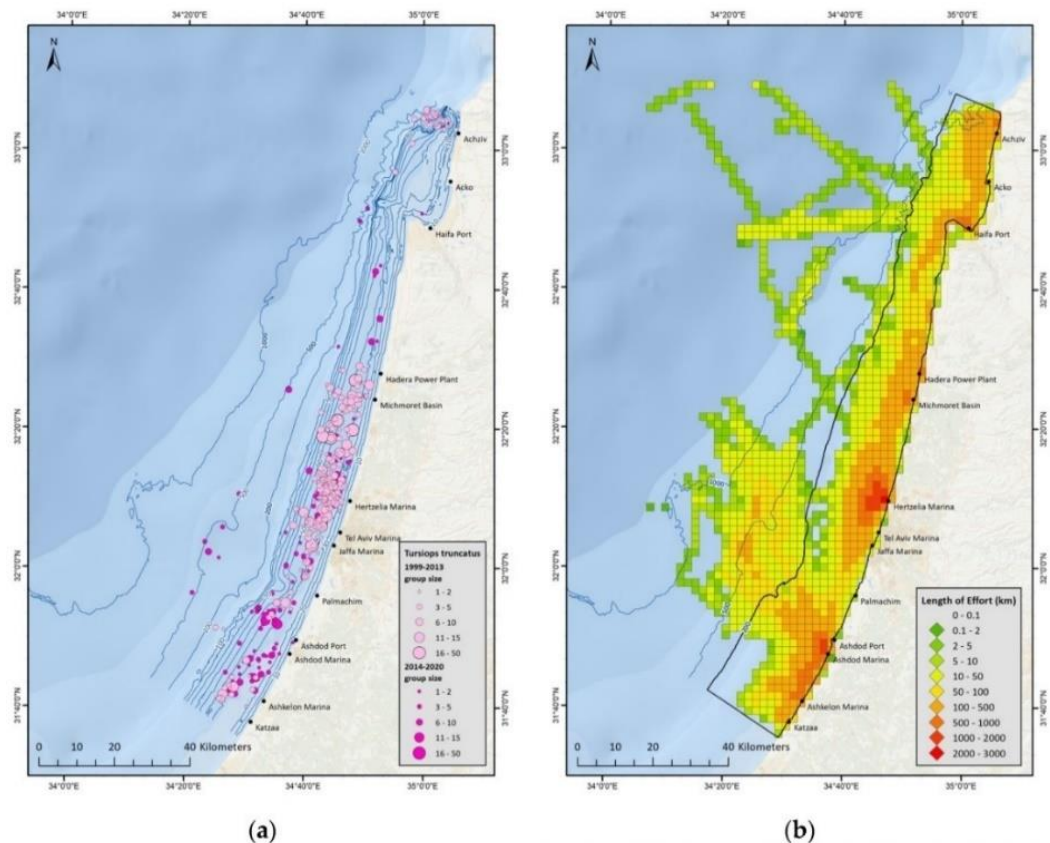
- דולפיין מצוי (*Tursiops truncatus*)
- דולפיין מצוי קצר-חרטום (*Delphinus delphis*)

מינים אלו אמנם לא מוגדרים בסכנת הכחדה על פי ארגון International Union for the Conservation of Nature IUCN, אך עדיין מדובר במיני דגל חשובים לשימור, ולפחות עבור *D. delphis* נטען כי דעיכת האוכלוסייה שלו מ-25 פרטים ב-2016 ל-15 פרטים בלבד ב-2021 מצדיקה פעולות שימור (Galili et al., 2022; Mevorach et al., 2023). בנוסף קיימים מיני עומק נדירים יותר (למשל ראשתן, זיפיוס, גרמפוס), ומקרים נדירים של כלב הים הנזירי היס-תיכוני (*Monachus monachus*).

תפוצה ודפוסי שימוש במרחב: ממחצית המאה שעברה ועד היום, נצפו בים, או נשטפו לחוף פרטים מ-14 מינים שונים של יונקים ימיים בישראל (טבלה 2). אף אחד מהמינים אינו בלעדי למרחב הימי של ישראל, ורק לשבעה מהמינים אפשר להתייחס כשוכנים קבועים או עונתיים המתרבים באזור. בתת-סדרת לויתנאי המזיפות (Mysticeti) רק הלויתן המצוי (*Balaenoptera physalus*) הוא שוכן קבע בים התיכון ואילו הלויתן הגוף (*Balaenoptera acutorostrata*) והלויתן גדל-סנפיר (*Megaptera novaeangliae*) הם מינים מזדמנים בים התיכון כולו. מבין לווייתני השיניים (Odontoceti) 7 מינים, רובם דולפינים, נחשבים לשוכני קבע במרחב הימי של ישראל (כרם ואח' 2013) ולאחרונה נמצא שהם נפוצים יותר בחורף (Zuriel et al., 2023). מבין סדרת הסנפירגליים (Pinnipedia), היו בעשורים האחרונים בחופינו מספר דווחים בודדים ונדירים של כלב הים הנזירי היס-תיכוני *Monachus monachus* שהוא ממיני היונקים הימיים הנמצאים בסכנת ההכחדה החמורה ביותר (Scheinin et al., 2011). בין המינים הרגישים ביותר לרעש, שהוא גורם הסיכון העיקרי עבורם מהקמת מתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת, בולטים בעיקר המינים מעמיקי הצלילה זיפיוס חלול חרטום וראשתן גדל ראש (כרם, 2014).



איור 6. מפת צפיפות של מאמץ הסקר (A) הנתבים (B) והתצפיות (עיגולים צהובים ב-B) של דולפינין מצוי בחופי ישראל. מקור: (Mevorach et al., 2022)



איור 7. מפת כל התצפיות של דולפין מצוי קצר חוטם מול החוף הישראלי בשנים 1999-2013 (נקודות בצבע ורוד בהיר) ובשנים 2014-2020 (ורוד כהה) (a), וכן מאמץ הסקר לאורך חופי ישראל (b). מקור: (Galili et al., 2023)

סטטוס שימור: כל היונקים הימיים מוגנים בישראל. חלק מהמינים נדירים מאוד במרחב המקומי, ובחלק מהמינים קיימים סימנים לחשש דמוגרפי מקומי (למשל ירידה בכמות הפרטים המתועדים באוכלוסייה מקומית בדולפין המצוי; Mevorach et al., 2022; Galili et al., 2023).

סיכונים אפשריים ממתקני אנרגיה מתחדשת ימיים: מתקני אנרגיה ימיים עשויים להשפיע על יונקים ימיים לאורך שלבי הפרויקט השונים. בשלב ההקמה, ובפרט בעת החדרת כלונסאות (pile driving), נוצר רעש אקוסטי חזק העלול לגרום לנזק שמיעתי זמני או קבוע בטווחים מסוימים מהמקור, בהתאם לעוצמה ולתנאי הפיזור במים. הרעש עלול גם למסך תקשורת ולשבש אקולוקציה, במיוחד בדולפינים, ובכך לפגוע ביכולת חיפוש המזון ובקשרים חברתיים. מיני לווינתאים שיישארו באזור רועש — למשל בשל צפיפות טרף גבוהה, site fidelity או אילוצים חברתיים ורבייתיים — עלולים להסתכן בפגיעה בלתי הפיכה במערכת השמע (כרם ואח', 2013). בנוסף, עשויה להתרחש דחיקה מאזורי הזנה או ממסדרונות תנועה, עם השלכות על דפוסי שימוש במרחב.

בשלב ההפעלה, רעש תפעולי מתמשך (כאשר קיים) עשוי לגרום לשינויים בשימוש בבית הגידול, בדפוסי צלילה ותנועה ולמיסוך כרוני של אותות אקוסטיים. במקביל, מבנים קבועים עשויים לשנות את משטר הטרף באמצעות אפקט "שונית מלאכותית" או בעקבות שינויי דיג (למשל אזור סגור לדיג סביב המתקנים), ובכך להשפיע על זמינות המזון ועל דפוסי נוכחות של יונקים ימיים. ממצא עדכני מישראל הראה כי דולפינים נפוצים יותר בשלושה סדרי גודל סביב חוות חקלאות ימית ובקרבת ספינות מכמורת, ובמיוחד בעונות

השבתת המכמורת (Zuriel et al., 2023), דבר המדגיש את תלות תפוצתם בזמינות מזון ואת החשיבות של תכנון מרחביזמני מושכל. בשלב התחזוקה, תנועה תכופה של כלי שירות עלולה להגדיל את הסיכון לפגיעות מכלי שיט (ship strikes), במיוחד באזורים שבהם קיימת חפיפה בין פעילות התחזוקה לבין אזורי פעילות של יונקים ימיים.

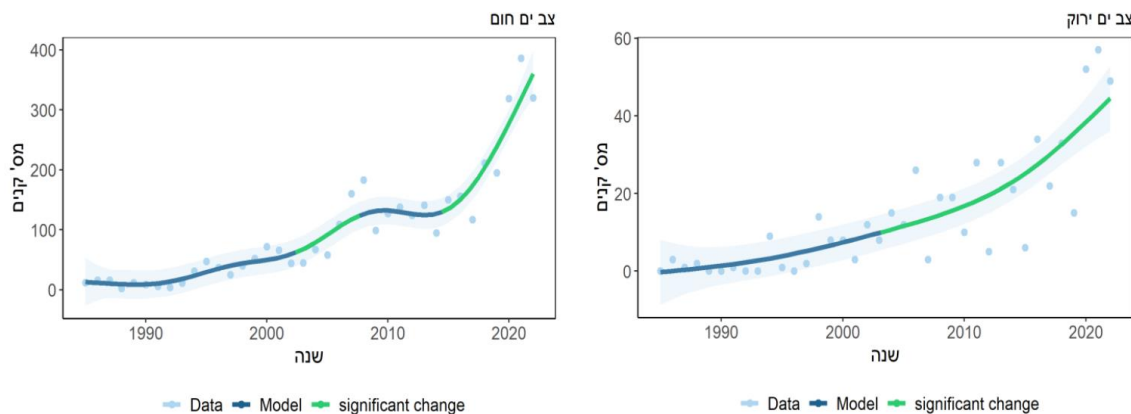
טבלה 2. מיני היונקים הימיים הידועים במרחב הימי הישראלי (מקור: כרם ואח' 2013)

שם המין	שם מדעי	אורך בוגר (מ')	תפוצה לאורך חופי ישראל	מעמד בים התיכון	קטגוריית סיכון
כלב ים נזירי ים תיכוני	<i>Monachus monachus</i>	2.8	תצפיות נדירות במי חופים	שוכן קבע	בסכנת הכחדה חמורה
לווייתן מצוי	<i>Balaenoptera physalus</i>	20	ים פתוח, נדיר	שוכן קבע/מבודד	עתידו בסכנה
ראשתן גדל-ראש	<i>Physeter macrocephalus</i>	30	ים פתוח, נדיר	שוכן קבע/מבודד	בסכנת הכחדה
לווייתן אפור	<i>Eschrichtius robustus</i>		תצפית חד פעמית	תצפית חד פעמית	בסכנת הכחדה
זיפיוס חלול-חרטום	<i>Ziphius cavirostris</i>	7	מים עמוקים, שוכן קבע, תצפיות נדירות. שכיחים יותר בפניה הצפון מערבית של המים הכלכליים	שוכן קבע	חסר מידע
גרמפוס אפור	<i>Grampus griseus</i>	4	מים עמוקים, שוכן קבע, מעט תצפיות אבל בכל הסקרים מעבר למדף היבשת נצפו בני מין זה	שוכן קבע/מבודד	חסר מידע
דולפינן מצוי	<i>Tursiops truncatus</i>	2.5-3	נפוץ במי חופים ועד 30 ק"מ מהחוף, צפוי	שוכן קבע/מבודד	עתידו בסכנה
סטנלה פסוסה	<i>Stenella coeruleoalba</i>	2.3	מים עמוקים, – שוכן קבע, תצפיות מועטות אך שכיח יחסית בהחפות	שוכן קבע/מבודד	עתידו בסכנה
דולפין מצוי קצר-חרטום	<i>Delphinus delphis</i>	1.8-2.3	ים פתוח – מי חופים, שוכן קבע, מספר הופעות להקות גדולות בחופינו	שוכן קבע/מבודד	בסכנת הכחדה
סטנו תלום-שן	<i>Steno bredanensis</i>	2.6	שוכן קבע, תצפיות נשנות דרום – מזרח הים התיכון והחפות של גורים	שוכן קבע	לא הוערך
קטלן	<i>Orcinus orca</i>	8.5-10	נדיר	שוכן קבע	בסכנת הכחדה חמורה
פוקנת הנמלים תת-מין הים השחור	<i>Phocaena phocaena relicta</i>	1.5	נדיר	שוכן קבע	בסכנת הכחדה
לווייתן גוף	<i>Balaenoptera acutorostrata</i>	8	נדיר	מזדמן	בסכנת הכחדה
עבשן קטלני	<i>Pseudorca crassidens</i>	6	מזדמן שכיח	מזדמן	בסכנת הכחדה
לווייתן גדל-סנפיר	<i>Megaptera novaeangliae</i>	17	נדיר	מזדמן	בסכנת הכחדה
דולפין מגובן אינדו-פסיפי	<i>Sousa chinensis</i>	1.8-3	מין חופי בים סוף, תצפית חד פעמית בים תיכון	מהגר לספסי	בסכנת הכחדה

במערכת אולגוטורופית כמו דרום-מזרח הים התיכון, שבה זמינות הטרף נמוכה יחסית ולעיתים מרוכזת בכתמים מרחביים קטנים, שינויים מקומיים בזמינות המזון עשויים להיות משמעותיים במיוחד עבור טורפי על כגון לווייתנאים.

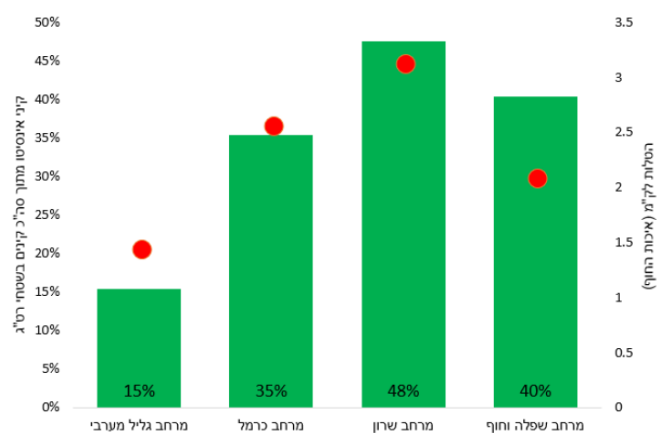
2.3.3 צבי ים

זהות ומגוון: במים ובחופי ישראל בים התיכון נפוצים שני מיני צבי ים המתרבים ומטילים ביצים: צב הים החום (*Caretta caretta*) וצב הים הירוק (*Chelonia mydas*). צב הים הגלדי (*Dermochelys coriacea*) נחשב אורח נדיר באזור ואינו מטיל בחופי ישראל. צב הים החום נפוץ משמעותית יותר מצב הים הירוק. בעשורים האחרונים ניכרת עלייה במספר ההטלות של שני המינים (איור 8), ככל הנראה בעקבות פעולות שימור יזומות, הכוללות העתקת קינים, טיפול בצבים פצועים ושינויים בתקנות הדיג (Levi & Ribak, 2023).



איור 8. מספר ההטלות של צב ים חום וירוק בישראל. מקור: (Levi & Ribak, 2023).

תפוצה ודפוסי שימוש במרחב: בשנת 2022 תועדו 957 עליות של צבי ים לחופי הים התיכון של ישראל, מהן 372 הטלות ו-585 עליות סרק. בהערכה גסה, מספר זה משקף כ-139 נקבות של צב ים חום וכ-11 נקבות של צב ים ירוק. (Levi & Ribak, 2023) מבחינה מרחבית, איכות החופים משתנה לאורך קו החוף, כאשר חופי הצפון נחשבים פחות מתאימים להטלה, ככל הנראה בשל מיעוט חול (איור 9). פיזור הקינים לאורך החוף מעיד על העדפה לאזורים בעלי תנאי מצע מתאימים ונגישות לחוף.



איור 9. אחוז קיני צבי ים שהושארו באתרם מתוך סה"כ קינים שהוטלו במרחבי החוף השונים בשנת 2022. הנקודות האדומות מייצגות את מספר ההטלות לק"מ, פרמטר המעיד על איכות החוף להטלות צבי ים. מקור: (Levi & Ribak, 2023).

סטטוס שימור: מאמצי השימור הממושכים באזור הים התיכון הישראלי נראים כנושאים פרי, עם מגמת עלייה במספר ההטלות בשנים האחרונות. עם זאת, אוכלוסיות צבי הים נותרות רגישות לשינויים סביבתיים ולהפרעות אנתרופוגניות. רגישות זו נובעת ממחזור חיים ארוך, נאמנות לאתרי קינון (site fidelity) ותלות בבתי גידול חופיים וימיים לאורך שלבי חייהם.

סיכונים אפשריים ממתקני אנרגיה מתחדשת ימיים: למרות שמידע ישיר על השפעות תפעול מתקני אנרגיה ימיים על צבי ים עדיין מוגבל (Shumchenia et al., 2012; Souder et al., 2010), ניתן להצביע על מגגוני סיכון פוטנציאליים. בשלב ההקמה, ובעיקר בעת החדרת כלונסאות, רעש אקוסטי חזק עשוי להשפיע על התנהגות הצבים ואף לגרום לפגיעה שמיעתית בטווחים מסוימים, בהתאם לעוצמת הרעש ולתנאי הפיזור (CSA, 2022). בנוסף, תנועת כלי שיט מוגברת עלולה להגדיל את הסיכון לפגיעות מכלי שיט. בשלב ההפעלה והתחזוקה, פעילות ימית מתמשכת עשויה לשמר סיכון זה. במישור החופי, יש להביא בחשבון גם השפעות עקיפות כגון שינויים דינמיים בהסעת חול וארוזיה, העלולים לפגוע באיכות אתרי ההטלה ובנגישותם לנקבות (פישלזון, 1996). לפיכך, תכנון והפעלה של מתקנים ימיים מחייבים התייחסות למיקום, לעונתיות ולרגישות אתרי קינון ולמסדרונות תנועה ימית של צבי הים.

2.4 קבוצות טקסונומיות נוספות

2.4.1 דגים

כ 400 מיני דגים מקומיים מוכרים ממזרח הים התיכון (לעומת מעל 600 במערב), ונוספים עליהם כיום מעל ל- 100 מיני דגים מהגרים לספסים, שלמעלה ממחציתם ביססו אוכלוסיות קבע בחופי ישראל וכן מספר מינים שחדרו מהאוקיינוס האטלנטי (Edelist et al., 2013b). מיני הדגים האנדמיים בים התיכון הם מועטים וכוללים בעיקר מינים קטנים קריפטו-בנתיים השוכנים בשוניות סלעיות (Gobiidae, Blenniidae, Tripterygiidae).

מרבית דגי הים המוגדרים כרגישים או בסיכון הינם דגי סחוס – כרישים ובטאים. תוחלת החיים הארוכה, מיעוט הצאצאים והבגרות המינית המאוחרת הופכים דגי סחוס לרגישים יותר מדגי גרם (אריאל וברש 2015). כיום ישראל הינה המדינה היחידה בים התיכון שאוסרת על דיג של דגי סחוס באופן גורף, וזאת מתוקף הכרזת ערכי טבע מוגנים (2005), אם כי תקנה זו נאכפת בפועל רק משנת 2018. בראיית השפעות מתקנים ימיים על דגי סחוס, השימוש שלהם באותות חשמליים במים הופך אותם לרגישים לקרינה אלקטרומגנטית שנפלטים מכבלי הולכה (Luana et al., 2022a) (מבוסס על מחקר מעבדתי שלא בדק מרחקי השפעה).

דגי גרם (Teleostei) נבדלים מדגי הסחוס (Chondrichthyes) בעיקר באסטרטגיית הרבייה ובקצב החיים. מרבית דגי הגרם הימיים מטילים מספר רב מאוד של ביצים פלאגיות, בעלי קצב גידול והתחדשות מהיר יחסית, ולכן פוטנציאל ההתאוששות שלהם לאחר ירידה באוכלוסייה גבוה יותר. לעומתם, דגי הסחוס מתאפיינים במספר צאצאים קטן, התבגרות מינית מאוחרת וקצב התרבות איטי, ולכן פגיעים יותר ללחצי דיג ולהידלדלות. מרבית מקרי ההכחדה המתועדים של דגי גרם התרחשו במים מתוקים או במערכות סגורות, ואילו בים הפתוח לא תועד עד כה מקרה חד-משמעי של הכחדה עולמית מלאה של מין דג גרם אוקייני כתוצאה ישירה מפעילות האדם. עם זאת, מינים רבים חוו קריסות אוכלוסייה קשות, ולעיתים ממושכות, ולכן אין לראות בהם חסינים מפני פגיעה משמעותית או אובדן תפקוד אקולוגי. למרות זאת, שינויים מקומיים בזמן ובמרחב באוכלוסיות הדגים הינם דבר תדיר בשל מגוון הפרעות, וגם דיג יתר עודו

נפוץ בכלל הים התיכון (GFCM, 2022). מרבית מיני הדגים נמצאים על **מדף היבשת** בלבד והעושר והשכיחות שלהם יורדים בחדות ככל שמעמיקים מעבר לקצה המדף (Edelist et al., 2013b). המינים הנפוצים ביותר על המדף הישראלי הינם דגים קטנים אוכלי פלנקטון בגוף המים כגון מקרלים (*Scomber colias*) וטרקנים (*Trachurus spp.*) ובעבר היו גם סרדינים (*Sardinella aurita*), שנעלמו בשנים האחרונות. שווי השוק שלהם אמנם נמוך בישראל, אך הם מיני מפתח מבחינת מארג המזון.

הלבנט, ובפרט מדף היבשת הישראלי, הינו המערכת האקולוגית הימית המושפעת ביותר בכדה"א מפלישת מיני דגים. תופעה זו ניכרת **מעל הקרקעית הרכה** של כל מדף היבשת (Edelist et al., 2013b). מעל הקרקעית המדף הרכה מצטרפים אליהם מינים קטנים רבים שניזונים בעיקר על חסרי חוליות בנתיים. מבחינת הביזמסה בולטים ביותר בהם מוליות (*Mullus spp.*), גובוס (*Boops boops*), אופונים (*Upeneus spp.*), נימי (*Nemipterus randalli*), ואופירית (*Saurida undosquamis*) כאשר שלושה האחרונים הינם הנפוצים ביותר והינם מינים מהגרים.

על הסלעים עד עומק 30 מ' ניכרת נוכחות הולכת וגוברת של סיכניים (*Siganus*) מהגרים מים סוף שהינם צמחוניים ואחראים לחיסול אוכלוסיות אצות נרחבות על המדף הרדוד וככל הנראה לדחיקת הסלפית זהובת הפסים (*Salpa sarpa*) המקומית עד לנדירות יחסית. בין **הסלעים שעל המדף** וסביבם נמצאים גם הדגים היקרים והנחשבים ביותר בשוק הישראלי - הדקרים (לוקוסים), וביניהם דקרים (*Epinephelus marginatus*), (*E. costae*, *Mycteroperca rubra*), כשמין חשוב נוסף – דקר המכמורת (*Epinephelus aeneus*) דווקא מעדיף קרקעית רכה. **בגוף המים העליונים** על המדף בולטים מספר מינים בעלי ערך שגם צוללים לקרקעית, כגון סריוול אטלנטי (*Seriola dumerili*), הפלמידות טונית אטלנטית (*Euthynnus alletteratus*) וסקומברן זריז (*Scomberomorus commerson*), שהוא מהגר לספסי. בשנים האחרונות, נוכחות של מינים אלו עשויה להיות ההבדל בין שנה טובה לשנה גרועה לדיג הישראלי מבחינת הטונאז'. הרחק מהחוף במים העליונים חולפות מדי אביב להקות של דגי חרב (*Xiphias gladius*) ודגי טונה כחולת סנפיר (*Thunnus thynnus*), שנחשבו בעבר כנתונים בסכנת הכחדה אך עליה בשכיחותם העולמית הביאה לאחרונה להגדרתם ע"י ארגון IUCN כ-Low Concern. ניצולם העולמי מבוקר על ידי ארגון ICCAT, שישראל עדיין אינה חברה בו.

בים העמוק (עמודות המים והקרקעית שמעבר לאזור הפוטי) הביזמסה של הדגה פוחתת משמעותית, והיא מתאפיינת בעיקר בבקלה (*Merluccius merluccius*), מספר מינים של כרישי עומק ומיעוט יחסי של דגים.

בהקשר לפריסת מתקנים להפקת אנרגיה מתחדשת, צפויות השפעות פוטנציאליות מגוונות על דגי הים התיכון הישראלי, התלויות בסוג המתקן, מיקומו ותנאי הסביבה המקומיים. מתקנים ימיים עשויים ליצור שינוי במבנה בית הגידול באמצעות הוספת מצעים קשיחים, אשר יכולים לשמש כאזורי מסתור, רבייה והזנה לדגים, ובכך לעודד ריכוזים מקומיים של פרטים (אפקט "שונית מלאכותית") ואף להשפיע על דפוסי תנועה והתנהגות (Petersen & Malm, 2006; Reubens et al., 2014). עם זאת, ריכוזים אלו עלולים גם להגביר פגיעות ללחצי דיג מקומיים. בנוסף, פעילות המתקנים כרוכה ביצירת רעש תת-ימי, בעיקר בשלבי הקמה אך גם במהלך התפעול, אשר עשוי להשפיע על תקשורת, ניווט והתנהגות של דגים (Popper & Hawkins, 2019). שדות אלקטרומגנטיים הנפלטים מכבלי הולכה תת-ימיים עשויים להשפיע במיוחד על דגי סחוס הרגישים לאותות חשמליים, אך גם על מינים נוספים (Gill et al., 2005; Luana et al., 2022a). שינויים מקומיים בזרימה ובערבוב עשויים להשפיע על פיזור פלנקטון, ביצים ולריות, ובכך על הצלחת הרבייה והגיוס לאוכלוסייה. מנגד, במערכות דלות במבנה פיזי כמו מדף היבשת הישראלי, תוספת של מורכבות מבנית עשויה

לתרום למגוון מקומי, אך גם להקל על התבססות מינים פולשים אופורטוניסטיים. לפיכך, ההשפעה הכוללת של מתקנים אלו על קהילות הדגים צפויה להיות תלויה הקשר, ולכלול שילוב של השפעות חיוביות ושליליות כאחד.

2.4.2 החי במצע הרך

מרבית קרקעית המדף היבשתי של ישראל (כ־87%) מורכבת ממצע רך (מנהל התכנון, 2022). מאחר שהמצע הקשה הוגדר כבית גידול רגיש בעל ערך שימורי גבוה (גיאופרוספקט & חיא"ל, 2016), סביר כי מתקנים להפקת אנרגיה מתחדשת בים יוצבו בעיקר על גבי מצע רך, יעוגנו אליו או יוטמנו בתוכו. לפיכך, הבנת מאפייני המצע הרך והחברות הביולוגיות הקשורות בו חיונית להערכת ההשפעות הסביבתיות.

ניתן לחלק את קרקעית המדף למספר רצועות אקולוגיות בהתאם למרחק מהחוף ולעומק המים. הרצועה החופית החולית משמשת בית גידול ייחודי למספר מינים, ובהם סרטן חולון החוף (*Ocyrops cursor*), המצוי בישראל אך ורק בחופים חוליים. חפירת מחילות בחול מספקת לו הגנה מטורפים ומתנאים א-ביוטיים קיצוניים כגון חום, קור ויובש (Galil et al., 2026). רצועה זו משמשת גם אזור הטלה מרכזי לצבות ים (פישלזון, 1996), ולכן רגישה במיוחד להפרעות מכניות ולשינויים מורפו-דינמיים.

במים הרדודים (עד כ־20–30 מ') המצע החולי מאופיין בדינמיות גבוהה: תשתית חולית נודדת ולא יציבה, הנתונה להשפעת גלים וזרמים חזקים. תנאים אלו גורמים להפרעות תכופות ולחוסר יציבות סדימנטרית, המגבילים התיישבות של מינים ישיבים ומצמצמים את המורכבות המבנית ואת המגוון הביולוגי (שיינן וחובריו, 2013b). המחסור בגומחות יציבות להתיישבות מהווה גורם מגביל מרכזי להתבססות חברות עשירות.

עם ההעמקה וההתרחקות מהחוף פוחתת השפעת הגלים על הקרקעית, הסדימנט מתייצב, ועולה בהדרגה עושר המינים. עד עומק של כ־30 מ' הקרקעית לרוב חולית, ובטווח 20–50 מ' מתרחש מעבר הדרגתי למצע בוצי-טיני-חרסיתי. מעבר לעומק של כ־30 מ' הסדימנט הדומיננטי הוא טין-חרסיתי דק־גרגר שמקורו ברחופת הנילוס (פישלזון, 1996). בעומקים אלה יציבות המצע גבוהה יותר, ומאפשרת התבססות של חברות בנתיות עשירות ומגוונות יותר.

החי במצע הרך נחלק לשתי קבוצות עיקריות: אינפאונה ואפיפאונה. האינפאונה (infauna) כוללת בעלי חיים החיים בין גרגרי החול והבוץ, ובהם נציגים ממגוון מערכות: שטרגליים (Copepoda), צדפות (Bivalvia), תולעים רב-זיפיות (Polychaeta) ותולעים נימיות, נמטודות (Nematoda) (מנהל התכנון, 2022). האפיפאונה (epifauna) כוללת מינים החיים על פני המצע, ישיבים וניידים כאחד, ובהם חסרי חוליות ודגי קרקעית ממינים רבים.

בין המינים הרגישים במצע הרך במדף בולטים נוצת הים הזוהרת (*Pennatula rubra*) והאלמוג הרך (*Alcyonium palmatum*), המהווים מרכיבי מבנה חשובים ומספקים מורכבות תלת־ממדית מקומית. חברת הדגים וחסרי החוליות הניידים על המצע הרך במדף נשלטת עד עומק של כ־50 מ' על ידי מינים מהגרים (בעיקר לספסיים), ואילו בעומקים העולים על 100 מ' החברה של המדרון מתאפיינת בהרכב מקומי כמעט לחלוטין (Edelist et al., 2013a).

מתוך בתי הגידול בים התיכון הישראלי, בית הגידול של המצע הרך הוא המנוטר ביותר בישראל, הן במסגרת תכנית הניטור הלאומית של המשרד להגנת הסביבה והן במסגרת תכניות ייעודיות לתכנון המרחב הימי

(גיאופרוספקט & חיא"ל, 2016; מנהל התכנון, 2022), וכן באמצעות סקרי דיג מכמורת המתבצעים מזה עשרות שנים (Edelist et al., 2013a). רמת הידע הגבוהה יחסית מאפשרת בסיס השוואתי להערכת השפעות עתידיות של מתקני אנרגיה מתחדשת, אך גם מדגישה את הרגישות של מערכת זו להפרעות מכניות, לשינויי סדימנטציה ולשינויי משטר זרמים מקומיים.

2.4.3 החי על המצע הקשה

המגוון הביולוגי על המסלע הימי כולל מינים המרפדים את המצע הקשה (encrusting species), מינים הבונים שלד גירני קשיח (כגון אלמוגים), ואצות מקרופיטיות התורמות בעצמן למורכבות התלת־ממדית של בית הגידול. מינים אלה מתפקדים כ"מינים מהנדסי סביבה" (ecosystem engineers), בכך שהם משנים את תנאי הסביבה המקומיים ומכשירים את המצע להתיישבות של מינים נוספים. כתוצאה מכך, המסלע תומך גם במגוון רחב של בעלי חיים נייחים, לרבות דגים וחסרי חוליות, המוצאים בו מסתור מטורפים, אזורי רבייה ומקורות מזון (רילוב וגיא־חיים, 2013; גליל וגורן, 2013).

המסלע הימי בישראל משתרע מטבלאות הגידוד והאיונים החופיים, דרך רכסי כורכר וגיר תת־ימיים במדף היבשתי, ועד למסלע קרבוניטי במים עמוקים. המורכבות המבנית הגבוהה ובליטתן של תשתיות אלו מעל המצע הרך שמסביב מביאות לעלייה ניכרת בעושר ובשפע המינים על גביהן, בתוכן ובסביבתן. עד עומק של 30 מ' מהוות תשתיות קשות כ־25% מהשטח התת־ימי של ישראל; עד עומק 100 מ' הן מהוות כ־13% משטח המדף כולו, ושיעורן פוחת עוד יותר בים העמוק (מנהל התכנון, 2020). נדירותן היחסית בעומקים גדולים הופכת אותן לחשובות ביולוגית במיוחד, שכן כל גוש סלע עשוי לאכלס הרכב ביוטי ייחודי.

בתי גידול סלעיים מתאפיינים ביציבות מצע ובמורכבות מבנית גבוהה, המאפשרות אחיזה והתבססות של מינים ישיבים ומציעות מגוון רחב של גומחות אקולוגיות. בהשוואה לבתי גידול חוליים, המסלע תומך בעושר מינים ובביומסה גבוהים יותר (גיאופרוספקט & חיא"ל, 2016; Tom et al., 2023). בעומקים רדודים (עד כ־30 מ') מאוכלס המסלע בעיקר על ידי חסרי חוליות, דגים ואצות מהגרים, מרביתם ממוצא אינדור־סיפי. למעשה, מעל 95% מחסרי החוליות הניידים באזור זה אינם מקומיים. בהקשר של הקמת תשתיות חדשות, ניתן לטעון כי תהליך ההגירה וההתבססות של מינים לא־מקומיים כבר מתקדם מאוד באזור החופי; עם זאת, אין בכך כדי לצמצם את רגישותה של הסביבה החופית לפלישות נוספות, שכן מערכות אלו דינמיות ופגיעות להמשך שינוי בהרכב המינים.

בעומקים גדולים יותר, לקראת קצה המדף, רכסי הכורכר משמשים מצע להתיישבות של חברות בנתיות אופייניות, ובהן גני ספוגים מפותחים. בהפרעת פלמחים, בעומקים העולים על 500 מ', תועדו על המסלע הקרבוניטי מקבצי אלמוגי עומק, ובהם מינים מהסוגים *Leiopathes*, *Antipathes dichotoma*, *Callogorgia* ו־*Parantipathes larix-1 verticillata*, *Viminella flagellum* (טבלה 3). בתי גידול אלה מאופיינים ברגישות גבוהה להפרעות פיזיות, קצב התאוששות איטי וחשיבות אקולוגית ניכרת כמוקדי מגוון ביולוגי במים העמוקים.

לפיכך, בהקשר של מתקנים להפקת אנרגיה מתחדשת, בתי גידול סלעיים צפויים להיות בין הרגישים ביותר להשפעות פוטנציאליות. שלבי ההקמה, ובפרט עבודות עיגון, קידוח או הנחת תשתיות, עלולים לגרום לפגיעה פיזית ישירה במבנים ביוגניים כגון ספוגים ואלמוגים, אשר התאוששותם איטית במיוחד ועשויה להימשך שנים רבות ואף עשרות שנים. בנוסף, שקיעת סדימנטים מוגברת במהלך עבודות אלו עלולה להביא לכיסוי חלקי או מלא של אורגניזמים ישיבים, לפגוע בתהליכי סינון והזנה, ולשנות את הרכב החברה המקומית. במהלך שלב התפעול, הוספת תשתיות קשיחות עשויה להגדיל את המורכבות המבנית וליצור בתי גידול

חדשים ("אפקט שונות מלאכותית"), אשר יכולים לתמוך בהתיישבות של חסרי חוליות ודגים. עם זאת, במערכת המאופיינת בשיעור גבוה של מינים מהגרים, תשתיות אלו עלולות לשמש מוקדי התבססות והפצה של מינים פולשים אופורטוניסטיים, ובכך להאיץ שינויים בהרכב הקהילה הביולוגית. כמו כן, שינויים מקומיים בזרימה ובהידרודינמיקה סביב מבנים עשויים להשפיע על אספקת מזון, פיזור לרבות ושקיעת חלקיקים, וליצור תנאים מיקרוסביבתיים שונים מהמצב הטבעי. במים העמוקים, בהם בתי הגידול הסלעיים נדירים ובעלי חשיבות אקולוגית גבוהה, גם פגיעה מקומית עלולה להוביל לאובדן בלתי הפיך של בתי גידול ייחודיים. לפיכך, תכנון מיקום המתקנים והערכת השפעתם הסביבתית מחייבים התייחסות פרטנית לבתי גידול סלעיים, תוך יישום עקרון הזהירות המונעת והעדפה להימנעות מאזורים רגישים במיוחד.

טבלה 3. רשימת מינים צמודי מצע שנתגלו בסקרי ים עמוק בהפרעת פלמחים ונכללו ברשימת מיני המפתח של GFCM. מקור: (SPNI, 2020). 1. תפוצה יחסית – נפוץ (C), לא נפוץ (U) או מזדמן (O); 2. מצב אזורי – נדיר (r), אנדמי (e) או בסיכון (t); 3. מצב מקומי – אוכלוסייה מקומית חשובה (R), אזור חשוב לרבייה (B), לתזונה (F), לחורף (W) או לנדידה (M).

Species	1 - Relative abundance (C) (U) (O)	2 - Regional status (r) (e) (t)	3 - Local status (R) (B) (F) (W) (M)	4- IUCN category	International Agreements	Mediterranean VME indicator taxa (GFCM)
<i>Leiopathes glaberrima/ Leiopathes sp.</i>	C	R, E*, T *If the new species is valid, manuscript in review.	R, B	EN	CITES Annex II, Protocol SPA/BD Annex II, EU Regulation Trade wild fauna and flora Species (B), Bern Convention (III)	+
<i>Antipathes dichotoma</i>	C	R, E, T	R, B	NT	CITES Annex II, Protocol SPA/BD Annex II, Bern Convention (III)	+
<i>Swiftia pallida</i>	C	R, E	R	DD		+
<i>Viminella flagellum</i>	C	R, E	R	NT		+
<i>Parantipathes larix</i>	R	R, E, T	R	NT	CITES Annex II, Protocol SPA/BD Annex II	+
<i>Isidella elongata</i>	C	R, Nearly Endemic, T	R	CR	Protocol SPA/BD Annex II	+
<i>Callogorgia verticillata</i>	R	R	R	NT	Protocol SPA/BD Annex II	+
<i>Funiculina Quadrangularis</i>	C	R	R, B	VU		+
<i>Desmophyllum dianthus</i>	R	R, E	R	EN	CITES Annex II, EU Regulation Trade wild fauna and flora species (B)	+

2.5 עבודות קודמות בישראל שנגעו בנושא השפעת מתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת

סקר אסטרטגי סביבתי לחיפוש והפקה של נפט ושל גז טבעי בים (סא"ס נפט וגז) (גיאופרוספקט וחיא"ל 2016): בים התיכון הישראלי בוצע ב-2018 סקר מקיף לגבי פעילות חיפוש והפקה של אנרגיות פוסיליות ובמסגרת זאת נערך מחקר נרחב של סביבה הימית של ישראל, כולל מיפוי בתי גידול במרחב הימי ורמת רגישותם. חלק מה פעילויות של חיפוש והפקת אנרגיה פוסילית שהשפעתן על הסביבה מהותית, אינן רלוונטיות עבור מתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת, לדוגמא רעש ימי מפעילויות החיפוש, פעילויות הקידוח עצמן והזרמות לים העלולות לנבוע מהן או דליפת הידרוקרבונים אל הסביבה הימית. לעומת זאת, ולמרות הבדלים מהותיים בסוג המתקנים, רבות מההשפעות יהיו דומות, בעיקר בכל הנוגע לעצם נוכחות המתקנים במים ועיגונם לקרקעית, תנועת כלי שיט אליהם וסביבם בשלבי ההקמה והתפעול ופריסת צנרת הולכה אל החוף. ההשפעות הסביבתיות העיקריות שהסא"ס ייחס לנוכחות מבנים במים, שנמצאו כרלוונטיות למתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת (אם יהיה מדובר במבנים ותשתיות בקנה מידה דומה) הינן:

1) פגיעה פיזית בקרקעית – אסדות הפקה עם עיגון לקרקעית צפויות לגרום נזק פיסי לקרקעית באזורי העיגון. הפגיעה הפיסית בקרקעית והשלכותיה תלויות בגודל משטח המגע ובסוג המצע: בסביבת קרקעית רכה הפגיעה זמנית והפיכה, בסביבת מצע קשה הפגיעה תהיה נקודתית אך לא הפיכה.

2) בסביבת קרקעית רכה בעומקי מים העולים על 1,000 מ' יוותרו "צלקות עגינה" (אנומליות של הקרקעית) לאחר עזיבת אסדת הקידוח במשך שנים עקב תנאים של זרמים חלשים וסדימנטציה נמוכה.

3) קיים פוטנציאל להעברת מינים פולשים במקרים שבהם שונעה אסדה מאתרים מרוחקים.

מסמך המדיניות למרחב הימי (מנהל התכנון, 2022): הפקת אנרגיה מזרמים, גלים ורוח זוהה כפוטנציאל חשוב ובר קיימא לניצול עתידי של משאבי הים במסמך המדיניות, אך מבלי שנבדק הפוטנציאל עצמו, והמסמך הצביע על פער ידע בולט בהיעדר מדידות רוח במרחב הימי (בניגוד ליבשה) לשם קידום מדיניות בנושא ומציאת היתכנות כלכלית, הנדסית וסביבתית. טורבינות רוח צפות המעוגנות לקרקעית גם במים שאינם רדודים ושיפור ביעילות האנרגטית והכלכלית שלהן זוהו במסמך כהזדמנויות עיקריות לסקטור, לצד שילוב עם סקטורים נוספים כגון חוות גידול דגים, תשתיות לטיפול בגז טבעי על בסיס תמ"א 37/ח' ואחרים באזורים שהוגדרו עבור מתקנים ניסיוניים.

תכנית ימית לישראל (הטכניון, 2015): במסמך נכתב כי "כל עוד אין היקף משמעותי של אנרגיות ממקורות מתחדשים (כמו שמש ורוח), פיתוח מקורות הגז הטבעי בים התיכון הוא בעל חשיבות עליונה." למרות שנעדר פירוט, המסמך הציע שההשפעה הסביבתית העיקרית תהא שינוי נופי, על יונקים ימיים ועופות ים, ללא פגיעה משמעותית בבתי גידול ויצורים בקרקעית ובעמודת המים (תחנות כוח בים, באיור 10).



איור 10. תאימות וקונפליקטים בין שימושים למשאבי טבע ולערכי מורשת ותרבות במרחב הימי. מקור: (טכניון, 2015)

2.6 הסקירות הקודמות שפורסמו בספרות המדעית

ההשפעות של מתקני אנרגיה ימית נסקרו במאמרים רבים בספרות העולמית, ואף בוצעו סקירות כלליות וסקרים שיטתיים שונים, למשל (Chen & Su, 2022) עבור חוות רוח, שממצאיהם מתוארים כאן בהרחבה, אבל הנושא טרם נסקר בעברית, טרם נסקר עם ההגדרה הרחבה של כל סוגי מתקני האנרגיה וההשפעות הסביבתיות שלהם, וטרם נסקר מהפרספקטיבה של הים התיכון, ודאי לא הישראלי.

פערי הידע בתחום אכן הוזכרו גם בעבודות קודמות לתכנון המרחב הימי של ישראל, אך הן לא כללו ניתוח מעמיק של הנושא. סקירה זו שלנו נועדה לתת מענה ממוקד ומובנה לפער זה, כחלק מהיערכות אסטרטגית לפיתוח אנרגיה מתחדשת ימית בישראל תוך שמירה על הסביבה הימית.

3 מתודולוגיה

3.1 סוג המחקר

המתודולוגיה שנבחרה לסקירת ספרות בנושא ההשפעות התבססה על מיפוי סיסטמטי ואפיון של המחקר מסוג PECO – אוכלוסייה מושפעת, סוג החשיפה, ביקורת (אם קיימת כזו) ותוצאה.

סוג המחקר - מפה סיסטמטית (Systematic map) – סקירה של תפוצת והתפלגות הפרסומים באנגלית בספרות העולמית שנוגעים להשפעות מתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת על הסביבה הימית בעשורים האחרונים.

אפיון המחקר - PECO (Population, Exposure, Comparator, Outcome):

Population: Marine environment – אוכלוסייה: הסביבה הימית, כולל כל רכיבי הפאונה והפלורה וכן בתי הגידול באוויר, בעמודת המים ובקרקעית.

Exposure: MRE installations – חשיפה: מתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת. אמנם מבנים ימיים אחרים ומחקרים גנריים עשויים להיות רלוונטים לנושא, אבל המחקר עוסק במתקני אנרגיה מתחדשת ימית בלבד מהסוגים שהוגדרו. מאמרים שעסקו, למשל, באסדות גז ונפט, טורבינות רוח ביבשה או זרם בנחלים נפסלו בתהליך הסינון, אלא אם כן נמצאו בהם אמצעי הפחתה רלוונטים למתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת.

Comparator: Marine environment with no MRE installations – ביקורת: הסביבה הימית ללא מתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת, בקרבת המתקנים או לפני הקמתם. מאחר ומחקרי BACI (Before-After-Control-Impacted) מסוג זה נדירים ביותר, היעדר ביקורת לא היווה עילה לפסילת מאמרים בתהליך הסינון

Outcome: Marine environment change – תוצאה: שינויים בסביבה הימית ואמצעים להפחתתם. גם שינויים בהתנהגות בני אדם שמשפיעים בתורם על הסביבה הימית נלקחו בחשבון.

3.2 שיטות הסקירה הסיסטמטית

הוגדרו מחרוזות החיפוש של הסקר. בתהליך זה בוצעו מספר הרצות לשם דיוק התוצר וקבלת מספר מאמרים גבוה מספיק כדי לכלול את כל התחום הנסקר, ונמוך מספיק בכדי שניתן יהיה לעבור על המאמרים ולסנן אותם בשלבים הבאים (בין 5,000 ל- 10,000 מאמרים נחשבת לכמות סבירה (Martínez et al., 2021)). מילות החיפוש חולקו על ידי מפעיל השימוש "AND" לשלוש קבוצות עיקריות: 1. המתקן (גורם השינוי), 2. התוצאה (השינוי הנגרם), 3. הסביבה המקבלת:

Search terms and Boolean operators for MRE impacts on the marine environment:

("Marine renewable energ*" OR "Offshore wind energ*" OR "Ocean energ*" OR "Offshore renewable energ*" OR "offshore wind" OR "Wave energ*" OR "Tidal energ*" OR "Tidal turbine*" OR "Ocean current energ*" OR "OTEC" OR "Ocean thermal energ*" OR "offshore solar" OR "Floating Solar" OR "Marine Photovoltaics" OR "Submarine cable*") AND ("Environmental impact*" OR "Environmental change" OR "Ecological impact*" OR "Impact assessment" OR "Artificial reef*" OR "Collision risk" OR "Fish Aggregating Device*" OR "Habitat alteration*" OR "Habitat change*" OR "Energy removal" OR "Electromagnetic field*" OR "Marine noise" OR "Acoustic impact*") AND ("Marine environment*" OR "Marine ecosystem*" OR "Mediterranean Sea" OR "Marine biodiversity" OR "Species diversity" OR "Protected species" OR "Receiving environment" OR "Benthic habitat*" OR "Pelagic habitat*" OR "Seabird*" OR "Marine Mammal*" OR "Sea turtle*" OR "fish*" OR "Invertebrate*")

- נכתב קוד ב-R לשם חילוץ המאמרים הרלוונטים על פי מילות החיפוש, והחילוץ בפועל בוצע מבסיס המידע של Elsevier (Scopus) בדצמבר 2022. הקוד לוקח את כל הספרות שהורדה ממנוע החיפוש, הופך אותה לקובץ עבודה (DATASET), ומסנן את הספרות באופן ראשוני להפחתת כפילויות ומאמרים בשפה זרה. במקביל מתבצעת הבחנה בין שמות המחברים ומילות המפתח (בידוד). התכנה מאפשרת גם ניתוח ויזואלי (ענן מילים) על פי מילות מפתח הכי נפוצות, ומעקב אחרי מילות מפתח לפי שנים דרך טבלאות וגרפים - שלב זה בוצע כמובן רק לאחר הסינון הסופי של המאמרים.

- תוצאות החיפוש הראשוני ב- Scopus עברו הסרת כפילויות, סינון ראשון על פי כותרות המאמרים וקריאת התקציר. הסינון בוצע על ידי שלושה סוקרים שביניהם נערך מבחן להשוואה בין אופן קבלת ההחלטות שלהם (Kappa Inter-Rater Agreement Test), ונמצאה בו התאמה גבוהה של ≥ 0.9 .

- הסינון בוצע על פי קריטריונים של רלוונטיות ואיכות (טבלה 4).

טבלה 4: שיקולים לביצוע סינון המאמרים.

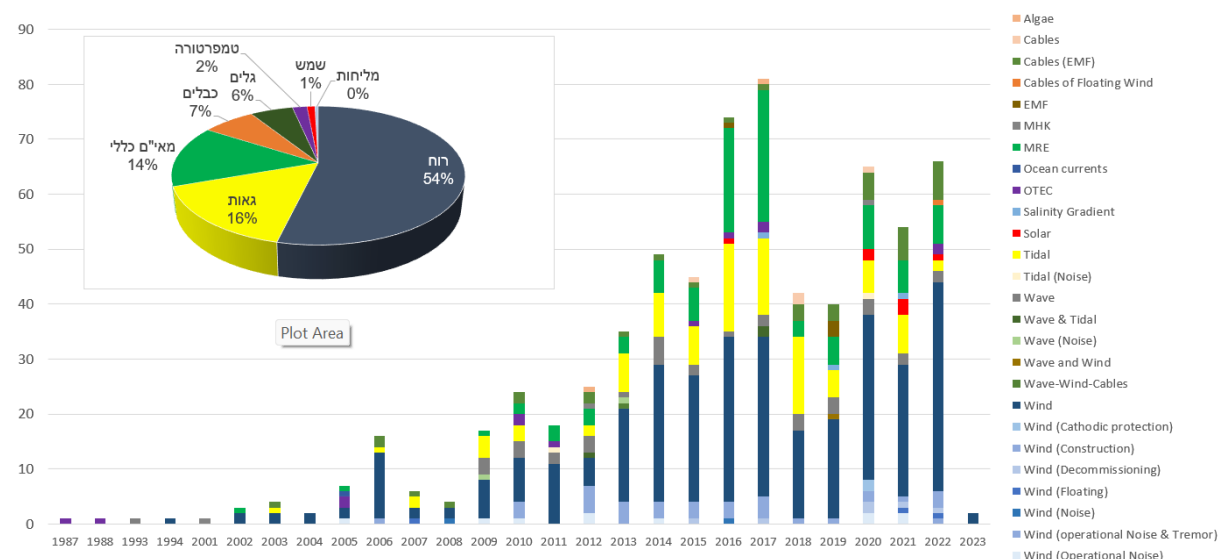
סיבות לדחיית מאמרים	סיבות להכללת מאמרים
נושא לא רלוונטי	מתאר השפעת מתקני אנרגיה מתחדשת על הסביבה הימית
לא רלוונטי לסביבה הימית (אוכלוסייה)	שיטות עבודה לתיאור השפעות על הסביבה והפחתתן
לא רלוונטי לאנרגיה מתחדשת ימית (חשיפה)	שיטות להפחתת נזקים מהמתקנים לסביבה הימית
לא מתאר השפעות על הסביבה (תוצאה)	
תיאורטי בלבד	
איכות ירודה	

- בשלב הסינון השני בוצע סינון על פי קריאת הטקסט המלא של 772 המאמרים. מאחר ולא עבור כל המאמרים ניתן היה לאתר את הטקסט המלא (כ- 15%), נעשה עבור חלקם שימוש בתקציר בלבד. ניתנה קדימות למאמרים מחקריים וניסויים וכן למאמרי סקירה, מאמרים שמפרטים דרכים למזעור נזקים לסביבה הימית, וסקרים אסטרטגים. מאמרים מלפני 2017 שלא צוטטו בכלל או כמעט לא צוטטו נבדקו שנית, ובסוף התהליך נותרו 684 מאמרים, עבורם פורטו: (1) החשיפה (סיג המתקן), (2) האוכלוסייה/קולטן, (3) האם קיימת במאמר רפליקציה של התוצאות, (4) סיכום הממצאים העיקריים, (5) המיקום, (6) סוג הפרסום (סקירה, ניסוי, BACI, תצפית, מודל, פרספקטיבה וכו').
- עקב מיעוט מתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת בים התיכון באופן כללי והיעדרם הכמעט מוחלט בלבנט, לא אותרו מאמרים שתיארו השפעות מתקנים על הים התיכון הישראלי. לכן, הגישה לסינון הייתה אינקלוסיבית (ז"א אם היה ספק, המאמר נכנס לסקירה) וכללה לעתים גם מינים שאינם נמצאים באזורנו, אבל שניתן להקיש מהתהליכים בהם לגבי תוצאות צפויות דומות או דרכים למיתון ההשפעות. לכן גם הוכנסו לסקירה ידנית מספר עבודות מפתח בעברית שרלוונטיות להבנת ההשפעות של מבנים בים על הסביבה המקומית שלנו ולהיכרות אתה. עבודות אלו נותחו בנפרד בעת כתיבת המסמך המסכם, בכדי להיצמד למתודולוגיה שנקבעה, של חיפוש ומילות חיפוש בשפה האנגלית.
- בשלב ההתאמה לים התיכון הישראלי, נוספו פרסומים שנוגעים למרחב הימי הישראלי, גם בשפה העברית, ואלו שולבו בטקסט ואיורים בפרקים הרלוונטיים.
- לצורך ניתוח סמנטי-ביבליומטרי של כלל המאמרים בוצעה ויזואליזציה של התוצאות לאחר הסינון בעזרת תכנת VOSviewer (van Eck & Waltman, 2010).

4 תוצאות

4.1 מיפוי סיסטמתי של הספרות העולמית

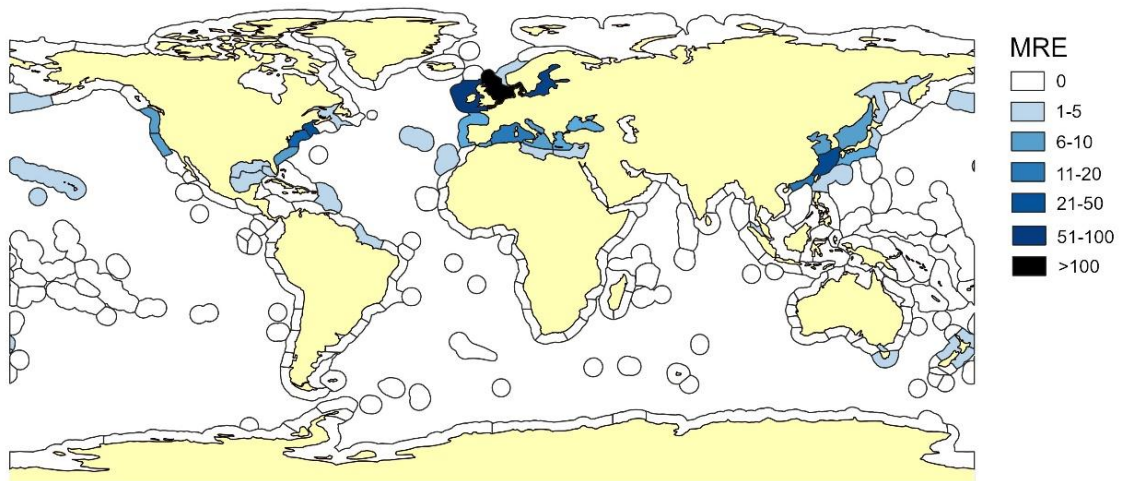
תוצאות החיפוש הראשוני לפי מילות המפתח ב- Scopus כללו 7,011 מקורות. נמצאו והוסרו 88 כפילויות, ולאחר ביצוע הסינון הראשוני אותרו 772 מקורות רלוונטיים לתחום, כולל ספרים, פרקים, מאמרים, דו"חות ופרסומים אחרים. לאחר קריאת הטקסט המלא, הוסרו 88 מאמרים נוספים בשל חוסר רלוונטיות ובאנליזה הסופית נותרו 684 מקורות. מתוכם, 493 היו מאמרים, 74 פרסומים בכנסים, 68 מאמרי סקירה, 42 פרקים ו- 5 ספרים. מפרסומים בודדים בעשור הראשון של המאה ה- 21 ניכרה עליה ניכרת במספר הפרסומים הרלוונטיים עד לשיא של כ- 80 פרסומים בשנת 2017, ומאז במפתיע התיישרות של העקומה ואף ירידה קלה. בהתאם למתרחש בתחום, מרבית הפרסומים (54%) עסקו באנרגיית רוח, 16% באנרגיית זרם (כמעט כולה זרמי גאות) ו- 14% נוספים עסקו במתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת באופן כללי (איור 11). בלעדיהם הכמעט מוחלט מחלפי מליחות, מתקנים ימיים להפקת אנרגיה סולארית, ו- OTEC, וזאת בהתאמה לנדירות המתקנים הקיימים.



איור 11. חלוקה לפי שנים וסוגי מתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת ב- 684 פרסומים שנמצאו בסקר הספרות

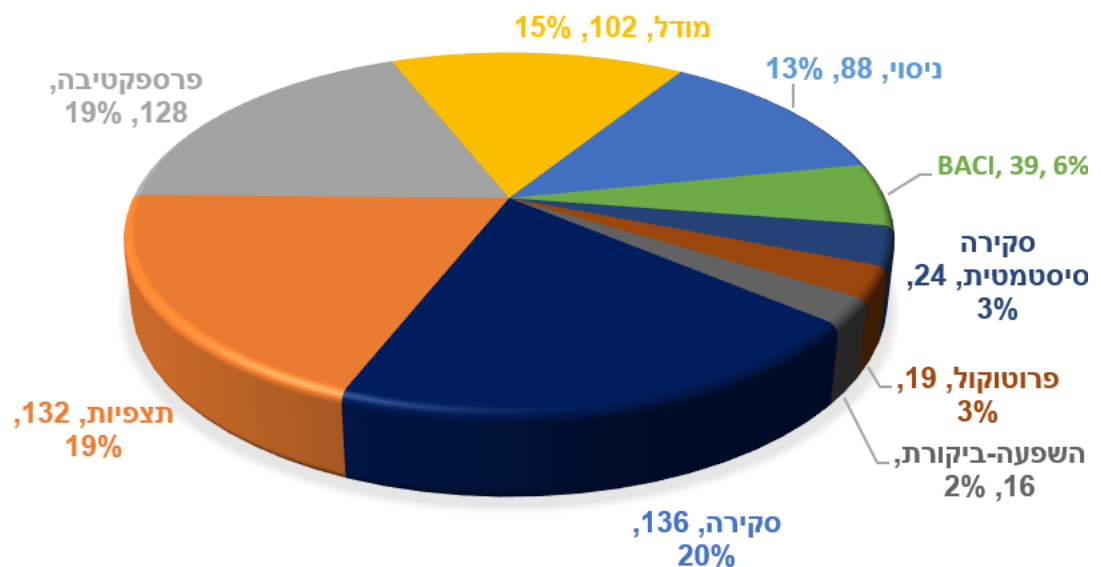
מספר הפרסומים עלה כצפוי עם השנים, אם כי הערכים המרביים הושגו בשנים 2016-7 עם פרסומם של מספר ספרים ומאמרי סקירה רבים בשנים אלו ובמפתיע נראה כי לאחרונה הצטמצמה העלייה בפרסומים בנושא מתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת שאינה אנרגיית רוח (איור 11) ובעיקר במתקני גאות. מתוך הפרסומים, 267 (כ- 40%) היו מחקרים שכללו תצפיות עם חזרות, מרביתם מאמרים שעסקו בהשפעות של אנרגיית רוח וזרם. מתקני OTEC (המרת אנרגיית חום) ומתקני אנרגיית גלים הראו אחוז רפליקציה נמוך יותר (רק כ- 30%) ואילו פרסומים על כבלים נטו להיות מחקריים-ניסויים ועם אחוז גבוה של רפליקציה (65%). כצפוי, מחקרי BACI וניסויים הראו אחוז גבוה במיוחד של רפליקציה (כ- 95%) וכך גם תצפיות (כ- 70%).

מבחינה גיאוגרפית מרבית המאמרים עסקו, כצפוי, במתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת בצפון אירופה ובעיקר בימים הצפוני והבלטי, כשגם בארה"ב ובסין נערכו סקירות ומחקרים רבים, וזאת בהתאם לרמת הפיתוח הגוברת והולכת של המתקנים באזורים אלו (איור 12).



איור 12. מספר פרסומי מתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת (MRE), לפי אזורים גאוגרפיים (Marine Eco-Regions) ב- 684 פרסומים שנמצאו בסקר הספרות

הפרסומים הראו התפלגות כמעט שווה בין מאמרי סקירה, תצפית, פרספקטיבה, מודלים וניסויים (איור 13). כ- 5.5% (38 מאמרים) היו כאלו שכללו תצפיות לפני-אחרי ובאתרי המתקנים מול אתר ביקורת (BACI). כ- 3.5% (24 מאמרים) היו מפות סיסטמטיות, סקירות אסטרטגיות, מטא-אנליזות, ואנליזות ביבליומטריות.



איור 13. התפלגות לפי שנים וסוגי מתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת ב- 684 פרסומים שנמצאו בסקר הספרות

כשליש מהפרסומים עסקו במערכות הימיות באופן כללי, כשמרביתם מאמרי סקירה שנגעו בכל הקולטנים האפשריים. בהם מאמרים רבים (כמה עשרות) עסקו במסגרות רגולטוריות שונות, באמצעי ניהול שונים,

הניתוח הסמנטי מראה גם שדיג, הגנה מדיג והמגוון הביולוגי מופיעים בצימוד קרוב בחלק העליון של האזור, גם הם בעיקר בהקשר טורבינות רוח. קולטנים משניים הם כלבי הים בתחתית האזור שקשורים גם להתנגשות עם טורבינות גאות וגם להחדרת כלונסאות, פגיות (כנראה בעיקר של דגים) בהקשר EMF, וגם הקרקעית הרכה והסעת סדימנט באמצע האזור, שמושפעים ממספר סוגי מתקנים. בולטות בהיעדרן שוניות מלאכותיות שיוצרות מצע קשה, ויש לשער שהמילה מקלט בחלק העליון של האזור ומקושרת לביומסה ולמגוון ביולוגי מחליפה אותן.

4.2 תוצאות הסקירה: השפעות סביבתיות עיקריות של מתקנים בים

4.2.1 התנגשות והילכדות

מתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת מהווים סיכון התנגשות לעופות ים ועופות נודדים מעל המים, וכן ליונקים ימיים, צבים, דגים ועופות ים מתחת למים (Boehlert & Gill, 2010b). הילכדות עשויה להתרחש בכבלי הולכה בעמודת המים, במערכי עגינה, ובחלקים נעים של טורבינות זרם או ממירי אנרגית גלים. עם זאת, הילכדות הינה ככל הנראה נדירה למדי, ופרק זה יתמקד בהתנגשות.

התנגשות של עופות בטורבינות רוח מעל המים נפוצה הרבה יותר מהתנגשויות תת מימיות והיא מתועדת היטב - כ- 100 מאמרים בתוצאות דנו בהתנגשות עופות ים במתקנים, בעיקר טורבינות רוח.

בתוך המים קיים קושי להעריך הן את תדירות ההתנגשויות והן עד כמה יכולים בעלי החיים להימנע מהן במהירויות זרם שונות, ובהיעדר מידע התנהגותי כזה, מרבית המידע מגיע אלינו ממודלים שמדמים את ההתנהגות שלהם בקרבם (Waggitt et al. 2014). עד היום כמעט שלא תועדו התנגשויות תת מימיות של יונקים, צבים או עופות עם טורבינות רוח וזרם (Copping et al., 2020), ובהינתן המעט הידוע לנו כיום, הצפי הוא שכהתנגשויות מתחת למים מתרחשות, הן מסתיימות לרב בפציעות קלות (Copping et al., 2020). ניתן להשתמש במודלים תלת ממדיים הן עבור התנגשות בטורבינות זרם מתחת למים או טורבינות רוח מעל למים בעזרת אלגוריתמיקה נומרית של התפלגות השכיחויות של בעלי החיים שנצפים סביבם (Schmitt et al., 2017) או במודלים אחרים שמסייעים להדמיית הסיכונים.

4.2.1.1 התנגשות עופות ים

בשנת 2013 בוצעה הערכה ראשונה מקיפה של השפעת מתקנים ימיים על עופות ים בישראל במסגרת תמ"א 37 ח (מירוז, 2013). בשנת 2022 עבודה של החברה להגנת הטבע (אופיר, 2022) הרחיבה ותיארה את ההשפעות הפוטנציאליות. נדידת העופות מעל לים התיכון הישראלי מתרחשת דרומה בסתיו וצפונה באביב, לרוב תוך חציית החוף בדרום-מרכזה של המדינה. היא מתאפיינת בתנועה בעיקר בלילה (מירוז, 2013) במהירויות של 40–100 קמ"ש, שבהן התנגשות במבנים קשיחים עלולה להיות קטלנית (Drewitt & Langston, 2008). מאפיינים פיזיים של מערכת הראייה בעופות, לצד פעילות לילית ותאורה מלאכותית, מגבירים את הסיכון להתנגשות. כמו כן, אורות אזהרה על מבנים אמנם נדרשים לבטיחות תעופתית, אך עשויים למשוך עופות ולהעלות את הסיכון להתנגשות (Fox & Petersen, 2019).

מסקרי מכ"ם עולה כי מספר העופות החוצים את שמי הים התיכון הישראלי בלילה עשוי להגיע עד כ-40,000 פרטים לק"מ קו חוף. עם זאת, גובה הנדידה מושפע באופן בולט מכיוון ומהירות הרוח, ורוב התנועה מתרחשת בטווח של 500–2,500 מ' (מירוז, 2013) — גבהים העולים בדרך כלל על תחום הפעולה של מתקני

אנרגיה ימיים כגון טורבינות רוח (שגובה הלהבים שלהן נמוך משמעותית מכך). לפיכך, חלק ניכר מהנדידה אינו חשוף ישירות לסיכון התנגשות עם מתקנים אלה.

עם זאת, הסיכון אינו מתבטל לחלוטין. ראשית, חלק מהעופות — ובמיוחד בסתיו — נודדים מתחת ל-900 מ', ובאביב ישנם פרטים הנודדים גם בגבהים נמוכים מ-100 מ'. שנית, עופות מנמיכים עוף לפני נחיתה על היבשה, לרוב לקראת סוף הלילה, ובשלב זה הם עשויים לעבור בגבהים החופפים לטווח הפעולה של מתקנים ימיים. בנוסף, מיני עופות ים פלאגיים ועופות חופיים פעילים ממילא בגבהים נמוכים מעל פני הים, ולכן חשופים יותר לסיכון פוטנציאלי. בעבודת החלה"ט זוהו 240 מיני עופות יבשה הנודדים בלילה מעל הים (אופיר, 2022). קבוצה זו הוגדרה כבעלת רמת סיכון גבוהה יחסית, בעיקר בשל תעופה לילית מהירה, הסתמכות מוגבלת על אותות חזותיים והפחתה ביכולת להימנע ממכשולים בתנאי ראות לקויה. לפיכך, הערכת הסיכון להתנגשות צריכה להיות ממוקדת בעופות הנודדים בגבהים נמוכים, בעופות ים פעילים סמוך לפני המים, ובפרקי זמן של הנמכת עוף לפני נחיתה, ולא בכלל הנדידה האווירית הגבוהה.

בנוסף אל העופות הנודדים קיימים גם מינים אקוטיים (כדוגמת ברווזים) שאף הם נודדים, מינים חופיים פלאגיים למחצה (למשל שחפים ושחפיות) וכן עופות פלאגיים לחלוטין (עופות ים "אמיתיים" כגון סולות ויסעורים) שמשתמשים במרחב האווירי שמעל לים התיכון בכל עונות השנה. כעיקרון, גובה התעופה הטיפוסי הינו קריטי להערכת הסיכונים, מה שהופך עופות ים אמיתיים שמעופפים נמוך כמו שחפים, עיטמים, סולות וחמסנים לרגישים במיוחד. העופות הפלאגיים מעופפים בגובה נמוך, בדרך כלל עד 100 מ' ועבור מינים רבים (בדרך כלל עופות הים הגדולים יותר) לא יותר מ-13-8 מ' בעת פעילויות חיפוש מזון (Borkenhagen et al., 2018). רגישותם לפגיעות טורבינות רוח גבוהה בעיקר בעת סערות חורף ובעת ראות לקויה (Brabant et al., 2015). גם חופמאים נמצאו בארה"ב כמעופפים אמנם במהירויות גבוהות, אך גם בגובה נמוך, בטווח 0.7-10.5 מטרים מעל פני הים ובממוצע 2.6 מטרים, כך שהם נמצאים בד"כ מתחת לגובה הלהבים המזערי, שלרוב נע בין 20 ל-50 מ' (Stantial & Cohen, 2015). לדוגמא, מחקר בגרמניה מצא שמרבית עופות הים (70%) עפו מתחת לגובה הלהבים (30 מ') באופן קבוע אבל 30% - בעיקר שחפים, עפו גם בגובה הלהבים (Borkenhagen et al., 2018). עופות ים עלולים להיפגע גם מלהבי טורבינות זרם מתחת למים. עם זאת, בסקרים שניסו לכמת את ההתנגשויות האלו חלו לרב עיוותים בתוצאות עקב נקודות תצפיות שונות או מרוחקות, תנאי ים וראות משתנים, ניתוח ללא נתוני היעדרות (נוכחות עופות במקום שכיחות שלהם) ועוד (Waggitt et al., 2014; Waggitt & Scott, 2014).

מרבית התמותה של עופות ים נגרמת מהתנגשות עם להבי הטורבינות. חדות הראיה של עופות בשילוב מהירות התגובה שלהם מאפשרת להם לעקוף מכשולים ולהימנע מהם, או לרדוף אחרי טרף תוך כדי מעוף גם בתנאי תאורה נמוכים (May et al., 2017). יחד עם זאת, מאחר ולעופות ראייה צידית טובה לעומת ראייה קדמית לקויה ובהינתן הפרדת הניגודיות החלשה שלהם, הסיכון להתנגשות בהחלט קיים ובלילה הוא אף גבוה יותר (טבלה 5).

מידת הפגיעה בעופות ים עדיין חסרה ברמת האוכלוסייה, אבל ברמה המקומית קיימות הערכות רבות – לדוגמא עבור 5 מיני שחפים הוערך כי ההסתברות שלהם לפגיעה בלהבים בים הצפוני הינה בין 0.0016-0.005% (Rezaei et al., 2023). גובה התעופה הטיפוסי (תלוי-מין) הינו קריטי להערכת הסיכונים, מה שהופך עופות ים אמיתיים שמעופפים נמוך כמו שחפים, עיטמים, סולות וחמסנים לרגישים במיוחד לפגיעה על ידי להבות של טורבינות רוח (Borkenhagen et al., 2018). יחד עם זאת, סימולציות ומודלים שונים של חוות בים הצפוני האנגלי הראו שלפריסתן תהיה השפעה מועטה על סולות (*Morus bassanus*) ברמת האוכלוסייה,

הן מבחינת דחיקה והן מבחינת התנגשות בסדרי הגודל המתוכננים, ושרק אם ייפרסו טורבינות רוח בשטח גדול פי 10 מהשטח המתוכנן ובאזורים חשובים יותר לעופות ייתכנו השפעות משמעותיות ברמת האוכלוסייה (Warwick-Evans et al., 2018).

טבלה 5. ריכוז ההשפעות היחסיות ממתקנים ימיים כמחוללי סיכון לעופות בים התיכון הישראלי – הערכת ההשפעה המקומית, על פי הסקירה של חברה להגנת הטבע (אופיר, 2022)

סוג המתקן	גורמי סיכון פוטנציאליים	ההשפעה הצפויה לפי קבוצות המינים הרגישים		
		נודדי יום	נודדי לילה	פלאגיים למחצה
טורבינות רוח	פגיעת להבים	4	5	4
	התקני תאורה ²	0	4	?
	אפקט הריף	0	0	5
	הססת מסלול (רתיעה/משיכה) ³	4	5	2
	תפיסת בית גידול	?	?	3
	שדה אלקטרומגנטי	?	4	?
אסדות גז/נפט	התנגשות בגוף המתקן	2	5	2
	התקני תאורה ²	0	5	?
תרנים, כבלים ומיתרים	התנגשות בגוף המתקן	4	5	3
	התקני תאורה ²	0	5	?

¹ הערכת ההשפעה משקללת את: א. עוצמת ההפרעה ברמת הפרט; ב. מידת הנוכחות של כל קבוצת מינים במרחב המקומי; ג. מידת חיוניות האזור עבור כל מין. הציון ניתן כהערכת מומחה על בסיס סקירת הספרות העדכנית.

² כגורם משיכה או כגורם משבש בהתמצאות ובתנועה.

³ רלבנטי במערך מתקנים גדול.

במחקר שנערך בים הצפוני הבלגי, הוערך שבתסריט קיצון של 10,000 טורבינות רוח, אוכלוסיות שחפים ושחפיות עלולות להיפגע משמעותית מהפריסה, ושבלילה בודד של נדידת ציפורי שיר בתנאים מסוימים עלול סדר הגודל של ההתנגשויות להגיע למאות אלפים (Brabant et al., 2015). בניטור של 46 חוות רוח ברחבי העולם נצפו 72 התנגשויות קטלניות של ברבורים ואווזים בטורבינות, מרביתם בים הצפוני באזור גרמניה, במהלך השנה הראשונה לאחר ההקמה (Rees & Rees, 2012).

חשוב להדגיש שהתנגשות בטורבינות רוח באופן כללי (כולל ביבשה) גורמת לתמותת עופות שהיא בשני סדרי גודל נמוכה, למשל, מקווי מתח גבוה, ונמוכה בשלושה סדרי גודל מזו שנגרמת על ידי חתולים (Loss et al., 2015). למרות זאת, בארה"ב למשל תמותת ציפורים (וכן תמותת יונקים ימיים) שימשה ומשמשת כחסם לפיתוח בידי מתנגדים לאנרגיות מתחדשות, תומכי אנרגיה פוסילית ומתנגדי אקלים, בטענות לחוסר צדק אקלימי ופגיעה חברתית (Amerson et al., 2022), כך שלצד ספקולציות על פוטנציאל עצום של הפגיעה (אופיר, 2022), חשוב מאד לבסס גם את העובדות, מספרי הפגיעה הסבירים ולאחר הפריסה את ההערכות בפועל, ולא רק את המספרים המרביים המשוערים. אותה גישה יש לאמץ גם עבור התנגשות יונקים ימיים (Amerson et al., 2022). בנוסף על כך, הולכות ומצטברות בספרות בשנים האחרונות גם תצפיות של עופות

נודדים שמשמשים במתקנים ימיים כנקודות מנוחה שעשויות להיות משמעותיות (Robinson Willmott et al., 2023) ולסייע להם לצלוח את הים ולשרוד את הנדידה (שהתמותה הטבעית בה גבוהה למדי, בעיקר אצל ציפורים צעירות).

ניתן לבצע הבחנה בין סוגי מתקנים שונים ומאפייניהם הפיזיים בעת הערכת הסיכון לעופות. רמת הסיכון אינה אחידה ותלויה במספר פרמטרים מרכזיים:

1. **גובה תחום הפעולה (Rotor-swept zone)** - גובה הלהבים הוא הפרמטר הקריטי ביותר. טורבינות רוח מודרניות בים פועלות לרוב בטווח של כ-20–50 מ' מעל פני הים בגובה הלהב התחתון, ועד כ-200–300 מ' בקצה העליון, תלוי בדגם. מרבית הנדידה האווירית (500–2,500 מ') אינה חופפת לטווח זה ולכן אינה מצויה בסיכון ישיר. לעומת זאת, עופות ים פלאגיים, שחפים, שחפיות, סולות וחמסנים, וכן עופות בשלב הנמכת עוף לפני נחיתה, פועלים בטווח גבהים החופף לאזור הסיכון.

2. **מבנים דינמיים לעומת מבנים סטטיים** - הסיכון הגבוה ביותר מיוחס ללהבים נעים של טורבינות רוח. מבנים סטטיים (תורנים, מצופים, פלטפורמות) גורמים בעיקר לסיכון התנגשות פסיבית או למשיכת עופות לצורך מנוחה. טורבינות זרם תתימיות מהוות סיכון בעיקר לעופות צוללים (כגון סולות וקורמורנים), אך עומק הפעולה והיקף המפגש בפועל מצמצמים את ההסתברות להתנגשות ביחס לטורבינות רוח עיליות.

3. **יציבות מבנית ותנועתיות** - מתקנים צפים עשויים לנוע בגלים וברוח. תנועה זו עשויה להשפיע על תפיסת המכשול בעיני העוף ועל יכולת ההימנעות. עם זאת, מרבית העדויות מצביעות על כך שהגורם המשמעותי יותר הוא תנועת הלהבים ולא תנועת הבסיס הצף.

4. **תאורה** - לתאורה תפקיד כפול: (1) אורות מהבהבים אדומים (כמקובל בבטיחות תעופתית) נמצאו כמפחיתים משיכה יחסית לאורות לבנים קבועים, ו-(2) תאורה רציפה או חזקה במיוחד עלולה למשוך עופות נודדים בלילה ולהגדיל סיכון התנגשות, בעיקר בתנאי עננות נמוכה או ערפל (Fox & Petersen, 2019).

לפיכך, הסיכון אינו פונקציה של עצם קיומו של מתקן ימי, אלא של חפיפה מרחבית ותפקודית בין תחום הפעולה של המתקן לבין גובה, התנהגות ודפוסי תעופה של המינים הרלוונטיים. במרחב הים התיכון הישראלי, שבו עיקר הנדידה מתרחשת בגבהים גבוהים, הסיכון הפוטנציאלי מרוכז בעיקר בעופות ים המעופפים בגובה נמוך דרך קבע, פרקי זמן של הנמכת עוף לפני נחיתה, תנאי מזג אוויר קשים (סערות חורף, ראות נמוכה), ותאורה בלתי מותאמת. גישה זו מאפשרת הערכת סיכון דיפרנציאלית לפי סוג מתקן (רוח, זרם, גלים), גובהו, מיקומו ועונות השנה, במקום התייחסות אחידה לכלל הנדידה האווירית (טבלה 6).

כיבוי סלקטיבי של טורבינות רוח בעת לילות של נדידת עופות מאסיבית סומן כאחת הדרכים המבטיחות להפחתת סיכוני התנגשות (Christophersen, 2011; Pollock et al., 2021).

טורבינות רוח בעלות קוטר רוטור גדול יותר נוטות להסתובב במהירות סיבובית נמוכה יותר (RPM נמוך), מאחר והן מפיקות יותר אנרגיה בכל סיבוב. מהירות סיבוב נמוכה עשויה להפחית את הסתברות ההתנגשות עבור חלק ממיני העופות, במיוחד מינים גדולים או כאלה בעלי כושר תמרון מוגבל (Marques et al., 2014; May et al., 2015). עם זאת, הגדלת קוטר הרוטור מגדילה באופן משמעותי את שטח הסריקה האנכי (swept area) ואת גובה הציר (hub height), ובכך עשויה להרחיב את אזור החפיפה עם שכבות תעופה שונות של עופות ים ועופות נודדים (Johnston et al., 2014; Thaxter et al., 2017). לכן, אין לקבוע באופן גורף כי טורבינות גדולות בטוחות יותר; יש להעריך את הסיכון בהתבסס על אינטראקציה בין גודל הטורבינה, גובה התעופה בפועל, דפוסי נדידה ותנאי מזג אוויר.

פתרונות טכניים כגון צביעת אחד מלהבי הטורבינות בצבע שחור או בדגם מפוספס (Rezaei et al., 2023) ושימוש בתאורה אולטרה-סגולה עשויים להפחית תמותת עופות נודדים ועופות ים (May et al., 2015).

טבלה 6: סיכוני מתקני אנרגיה מתחדשת לעופות – הבחנה לפי מאפיינים פיזיים

סוג מתקן	מאפיין פיזי מרכזי	קבוצות עופות רגישות	מנגנון סיכון עיקרי	תנאים מחמירים	רמת ודאות מדעית
טורבינות רוח עיליות (Offshore wind)	תחום חיתוך להבים 20–300 מ'	עופות ים נמוכי תעופה (שחפים, שחפיות, סולות, חמסנים), עופות בהנמכת עוף	התנגשות בלהבים נעים	לילה, ראות לקויה, סערות, תאורה רציפה	גבוהה
טורבינות רוח עיליות (Offshore wind)	להבים נעים במהירות גבוהה	עופות תעופה מהירה בלילה	כשל זיהוי מכשול	עננות נמוכה, ערפל	גבוהה
טורבינות רוח עיליות (Offshore wind)	תאורת אזהרה	עופות נודדים ליליים	משיכה לאור → ריכוז יתר והתנגשות	עננות נמוכה, לילה ללא ירח	בינונית-גבוהה
מבנים סטטיים (תורנים, מצופים, פלטפורמות)	גוף קשיח ללא תנועה	עופות ים, שחפים	התנגשות פסיבית	לילה, ריכוזי עופות גבוהים	בינונית
מבנים סטטיים (תורנים, מצופים, פלטפורמות)	משטחי מנוחה	עופות נודדים תשושים	שינוי דפוסי תנועה וריכוזים	סערות, נדידה ארוכה	נמוכה-בינונית
טורבינות זרם תת-ימיות	להבים תת-ימיים נעים	עופות צוללים (סולות, קורמורנים)	פגיעה בעת צלילה	אזורי טרף מרוכז	נמוכה-בינונית
מתקני גלים (Wave energy converters)	חלקים נעים סמוך לפני המים	עופות ים נמוכי תעופה	התנגשות במבנים/כבלים	ים סוער	נמוכה
כבלי הולכה עיליים (אם קיימים בחיבור לחוף)	קווי תמסורת עיליים	עופות גדולים, עופות מים	התנגשות/התחשמלות	נדידה לילית	גבוהה (בהקשר יבשתי)

בהקשר של הים התיכון הישראלי, רוב נדידת העופות מתרחשת בגבהים של מאות עד אלפי מטרים, אולם חלק מהמינים – בעיקר עופות ים, וכן עופות יבשה בשלב ההנמכה לקראת נחיתה בחוף – טסים בגבהים נמוכים מ־150 מ', ולעיתים אף מתחת ל־100 מ' (מירוז, 2013). גבהים אלה חופפים לגובה הסריקה של טורבינות מודרניות (כ־20–250 מ' מעל פני הים, בהתאם לדגם). בנוסף, תנאי ראות מוגבלת, רוחות נגדיות ותנועה לילית מגבירים את סיכון ההתנגשות (Drewitt & Langston, 2008; Marques et al., 2014). לכן, בהקשר המקומי, גובה הטורבינה ומיקומה ביחס למסדרונות נדידה חופיים חשובים יותר מהשיקול של מהירות סיבוב בלבד.

4.2.1.2 התנגשות והילכדות של יונקים ימיים, צבי ים או דגים

הסיכון להילכדות מגה-פאונה במערכי עגינה ככלל הוא נמוך, במיוחד כאשר מערכות העגינה מורכבות מאלמנטים עבים שמתוחים חזק, מה שגם מקטין את החיכוך עם הקרקעית. הסיכון מעט גבוה יותר כאשר מדובר במערכות שמשלבות שרשראות עם חבלי ניילון או מצופים נלווים, וגם הוא נמוך אלא אם כן מדובר במערכות שאינן מתוחות וכאשר החבלים אלסטיים ובעלי קוטר קטן (Harnois et al., 2015) (ראו גם פרק 4.2.5.5).

הילכדות של בעלי חיים בטורבינות תת ימיות הינה תלויה מהירות זרם והשרידות של מקרים כאלו נמצאת במתאם הפוך למהירות (Amaral et al., 2015; Horne et al., 2022). כך למשל, במסצ'וסטס, שלוש שנים של סקרים אוויריים הניבו 196 תצפיות של לווייתנים צפון אטלנטיים (*Eubalena gracialis*) באתר המיועד להקמת חוות רוח, ומתוכם 34 נקבות מיניקות עם גורים. הלווייתנים הוגדרו כמשתמשים קבועים עם עונתיות ברורה, מה שאיפשר לתכנן את פריסת חוות הרוח ותקופות הבניה בהתאם (Leiter et al., 2017).

בישראל עצמת הזרמים הנמוכה וזרמי גאות לא משמעותיים באזורנו, כך שייתכנות של הצבת מתקנים להפקת לאנרגיה זרם היא נמוכה. בהתאם לכך, ולצפיפות הנמוכה באופן כללי של יונקים ימיים במי ישראל, הסיכון להתנגשות קטלנית כזו גם במקרה הלא סביר של פריסה נרחבת הינו זניח.

4.2.2 דחיקה

דחיקת בעלי חיים על ידי מתקנים ימיים עשויה להתרחש באוויר עבור עופות ים ועופות נודדים, ובמים עבור יונקים ימיים ויצורים נודדים אחרים, כגון דגי פלאגיים גדולים (למשל טונות ודגי חרב), כרישים ובטאים נודדים, צבי ים, להקות דגים קטנים פלנקטבוריים, ואף מינים נודדים עונתית של חסרי חוליות כגון דיונונים. מינים אלה עשויים לשנות דפוסי תנועה, אזורי הזנה או מסלולי נדידה בתגובה לרעש תתימי, נוכחות מבנים, שינויי זרימה מקומיים או פעילות כלי שיט (Gill et al., 2005; Teilmann & Carstensen, 2012; Russell et al., 2014; Benjamins et al., 2015; Petersen et al., 2006; Dierschke et al., 2016; Furness et al., 2013). עם זאת, דחיקה מרחבית בקנה מידה משמעותי — כלומר שינוי במסלולי נדידה או אובדן שימוש בבית גידול רחב — מתועדת בעיקר כאשר מדובר בחוות צפופות או בפריסה מרחבית נרחבת, שבהן מצטברת השפעה אזורית (Masden et al., 2009; Warwick-Evans et al., 2018; Cook et al., 2014). לדחיקה למרחק משמעותי עלולות להיות משמעותות אנרגטיות, בשל הארכת מסלולי תעופה או שחייה ועלייה בעלויות מטבוליות, וכן בשל אובדן אזורי הזנה, במיוחד כאשר מדובר בבית גידול איכותי ומוגבל מרחבית (Masden et al., 2009; Furness et al., 2013). מאידך, דחיקה מפחיתה את סיכויי ההתנגשות הישירה עם להבי טורבינות, ולכן עשויה להפחית תמותה מיידית, אף כי במחיר פוטנציאלי של עלויות אנרגטיות מצטברות (Dierschke et al., 2016).

4.2.2.1 דחיקת עופות

דחיקה של עופות מחוות הרוח אמנם מפחיתה את סכנת התנגשות, אך, אם החווה מוצבת על נתיב הנדידה או אזור שיחור, הסטה של נתיבי נדידה שלהם (בעיקר במקרה של עופות ים) מהווה סיכון להשלכות אנרגטיות וסב-לתאליות, כתלות במרחק הדחיקה. ההשפעה היא תלויה מין. בים הצפוני נמצא שעופות ים גדולים קלאסיים כגון סולות אלקות ואוריות נמנעו מאזורי החוות (ירידות של 64-85% בתפוצה). ודווקא שחפים ושחפיות נמשכו לאתרים ועלו פי 5-9 (Vanermen et al., 2015). סימולציות ומודלים שונים של חוות רוח הראו שגם לפריסה נרחבת תהיה השפעה מועטה על סולות (*Morus bassanus*) ברמת האוכלוסייה, הן

בבחינת דחיקה והן בבחינת התנגשות בסדרי הגודל המתוכננים בים הצפוני היום, ושרק אם ייפרסו בשטח גדול פי 10 מהמתוכנן ובאזורים חשובים יותר לעופות ייתכנו השפעות ברמת האוכלוסייה (Warwick-Evans et al., 2018). כמו כן נמצא שחוות רוח קטנות וקרובות לחוף יגרמו ליותר דחיקה וסיכון של עופות (במחקר שהתמקד בקטיפניות (Scoters) מאשר חוות גדולות ורחוקות מהחוף (Loring et al., 2014). בחוות רוח באנגליה לא נמצאה דחיקה משמעותית של שחפים שחורים (*Larus fuscus*) מאזורי חוות רוח, אם כי כן נמצאה הימנעות בתוך שטח החווה מהטורבינות עצמן (Thaxter et al., 2018). בתכנית הניטור של חוות רוח בגרמניה נמצאה דחיקה משמעותית (ירידה של 75-92% בשכיחות בשטח החווה) בחמישה מיני עופות ים (Welcker & Nehls, 2016). בים הצפוני נצפתה דחיקה של ברבורים ואווזים מהחווה לטווחים של 100-600 מ'. תמרוני חמיקה ושינוי נתיבי טיסה נצפו ממטרים בודדים ועד 5 ק"מ מהחווה. 50-100% מהלהקות והעופות לא נכנסו לאזור שבין הטורבינות (Rees & Rees, 2012). בנוסף, טורבינות רוח בחוות גדולות נמצאו כיוצרות ביניהן מיקרו-אקלים אווירי בו הלחות והטמפרטורות עולות והראות מופחתת (Rezaei et al., 2023), מה שעלול להגביר את הסיכון להתנגשות לעופות שנמצאים בתוכו, אך להקטין אותו אם הם מחוץ לו (על ידי דחיקה).

בברווזים מוגנים (*Gavia stellata*) אמנם נמצאה דחיקה והימנעות משטח חוות רוח בים הצפוני בגרמניה, אך נמצא שלא היה בכך בכדי לגרום לפגיעה בהם ברמת האוכלוסייה (Vilela et al., 2021). מדדי דחיקה שונים מראים שמיני ברווזים אחרים דווקא מושפעים ברמת האוכלוסייה מהצורך לעקוף את החוות ואבדן בית הגידול, אבל השפעות כאלו פחות קל לראות בעין מאשר התנגשויות אז הן מקבלות פחות תשומת לב (Furness et al., 2013). דחיקה כזו עשויה להיות גם עונתית, למשל נמצא במחקר BACI (Before After Control Impacted) בדרום הים הצפוני שאוריות (Kittiwakes) ושחפים פחתו ב- 45-63% ובעיקר באביב ובעונת הרבייה באזור החווה לעומת התקופה שלפני ההקמה (Peschko et al., 2020). דחיקת עופות ים עשויה להיות גם אנכית, לדוגמה בחוות רוח בנורווגיה עלה משמעותית גובה התעופה של עופות נודדים כאשר הופעלה תאורת UV למניעת התנגשות (May et al., 2017).

בישראל, עיקר הנדידה מתרחשת בגבהים של 500–2,500 מ', מעל תחום הלהבים של טורבינות רוח ימיות. עם זאת, קיימים שלושה מצבים שבהם דחיקה עשויה להיות רלוונטית במיוחד:

1. עופות ים פלאגיים המעופפים בגובה נמוך דרך קבע (שחפים, שחפיות, סולות וחמסנים) – קבוצה משמעותית בים התיכון הישראלי.
2. שלבי הנמכת עוף לפני נחיתה על החוף, בעיקר בדרום ומרכז החוף – אזורים שבהם חוצים עופות רבים את קו החוף.
3. אירועי מזג אוויר קיצוניים, שבהם עופות נודדים בגבהים נמוכים יותר.

בהינתן שמספר העופות החוצים את שמי הים התיכון הישראלי בלילה עשוי להגיע לעשרות אלפים לק"מ קו חוף (מירוז, 2013), גם דחיקה מרחבית מתונה עלולה לייצר הארכת מסלולים משמעותית אם תתרחש במוקדי מעבר צרים. מנגד, במרחב פתוח ורחב ללא "צווארי בקבוק" טופוגרפיים בים עצמו, ייתכן כי פוטנציאל הדחיקה האזורית קטן יותר מאשר בים הצפוני, שם החוות ממוקמות לעיתים בין אזורי שיחור מוגדרים ומושבות קינון. לכן, בהערכת סיכון לישראל יש להבחין בין: דחיקה מקומית תפעולית (הימנעות משטח הטורבינות), דחיקה אזורית לאורך נתיבי נדידה, והשפעה דמוגרפית מצטברת ברמת אוכלוסייה.

הספרות מצביעה על כך שדחיקה משמעותית ברמת אוכלוסייה מתרחשת בעיקר בפריסות צפופות ובהיקף מרחבי גדול, ולכן צפיפות, פריסה לינארית רציפה והצבה במסדרונות נדידה מהווים משתנים תכנוניים קריטיים גם בהקשר הישראלי.

4.2.2.2 דחיקת יונקים ימיים

בסקר מומחים בינלאומי רחב היקף שכלל 194 משיבים מ־28 מדינות, דחיקת יונקים ימיים מבתי גידול בסביבת חוות רוח דורגה כאחת מארבע ההשפעות הסביבתיות המרכזיות של אנרגיה ימית, לצד השפעות מצטברות, סיכון התנגשות לעופות ורעש תתימי (Green et al., 2022). דחיקה של יונקים ימיים עשויה לנבוע בראש ובראשונה מרעש תתימי, ובעיקר בשלב ההקמה בעת החדרת כלונסאות, אך גם מרעש תפעולי מתמשך מטורבינות, מכבלי הולכה ומפעילות כלי שיט סביב המתקנים. בנוסף, נוכחות פיזית של מבנים במים, שינוי זרימה מקומיים (במיוחד במתקני זרם), ושדות אלקטרומגנטיים מכבלי הולכה עשויים להשפיע על דפוסי תנועה ושימוש במרחב, ישירות או בעקיפין דרך השפעה על טרף.

במצבים שבהם מתרחשת דחיקה, קיימת חשיבות להקשר המרחבי הרחב. אם בעלי החיים נדחקים מאזור החווה לעבר אזורי ספנות אינטנסיביים, עלול להיווצר מצב של סיכון מצטבר, שבו הימנעות ממתקן האנרגיה מגדילה חשיפה לרעש כרוני ולפגיעות מכלי שיט. לפיכך, הוצע לשקול התאמות תכנוניות, לרבות שינוי זמני או קבוע של נתיבי ספנות בתקופות רגישות כגון שלב ההקמה (Petruny et al., 2016). השפעות הדחיקה עשויות להיות משמעותיות במיוחד כאשר הן מצטרפות ללחצים קיימים כגון ספנות, דיג, זיהום והתחממות המים, באופן היוצר השפעות מצרפיות על אוכלוסיות קטנות או מבודדות.

עם זאת, הספרות אינה מצביעה על דחיקה עקבית בכל המקרים. במאמר של Palmer et al. (2021) נמצא כי תגובות הימנעות היו תלויות בעוצמת הפעילות באתר, כאשר "פעילות מתקנים מוגברת" התייחסה למצבים של תחזוקה אינטנסיבית, תנועת כלי שיט מוגברת או תנאי מזג אוויר קשים המגבירים רעש ותנועת מבנים צפים. במחקרים רחבי היקף באנגליה (Onoufriou et al., 2019) ובצפון אירלנד (Joy et al., 2018) לא נמצאו הבדלים מובהקים סטטיסטית בתפוצת כלבי ים לפני ואחרי הקמת טורבינות גאות. עם זאת, בעת זרימה חזקה דרך הטורבינות נרשמה הימנעות של 11-68% בטווח של 0.2–2 ק"מ, תופעה אשר במקביל הפחיתה את סיכון ההתנגשות.

לצד תופעות דחיקה, קיימת בספרות גם אפשרות של משיכה (attraction) למתקנים ימיים בטווח הארוך. מבנים תתימיים עשויים לשמש כריפים מלאכותיים, לעודד הצטברות ביומסה של דגים ולהוות מוקדי ציד לטורפי על, לרבות יונקים ימיים. קיימות עדויות לשימוש במבנים ימיים כאזורי חיפוש טרף, בעיקר לאחר התייצבות אקולוגית של האתר (Russell et al., 2014). עם זאת, בשלב ההקמה ובשלבים מוקדמים של ההפעלה, השפעת הרעש הדומיננטית נוטה לגרום להימנעות זמנית, כך שיייתכן רצף בזמן שבו מתרחשת תחילה דחיקה ולאחר מכן התאקלמות ואף משיכה חלקית.

צפיפות היונקים הימיים במים הכלכליים של ישראל נמוכה יחסית לאזורים אחרים בים התיכון, והאוכלוסיות קטנות ומבודדות (Zuriel et al., 2023). לפיכך, גם שינויי תפוצה מקומיים עשויים להיות בעלי משמעות ברמת אוכלוסייה. בנוסף, רצועת החוף מאופיינת בנתיבי ספנות פעילים לנמלי חיפה ואשדוד, ולכן דחיקה לכיוון אזורים אלה עלולה להגביר חשיפה לרעש כרוני ולסיכון פגיעה מכלי שיט. מאידך, במערכת אוליגוטרופית כמו דרום־מזרח הים התיכון, שבה זמינות הטרף מוגבלת ומרוכזת לעיתים בכתמים מרחביים קטנים, כל שינוי מקומי בביומסת הדגים סביב מתקנים עשוי להיות משמעותי עבור טורפים מרמות טרופיות

גבוהות. אם יתפתח אפקט ריף מלאכותי משמעותי, ייתכן אף שינוי בדפוסי שימוש במרחב של דולפינים, בדומה להתכנסותם סביב חוות דגים וספינות מכמורת.

4.2.2.3 דחיקת דגים

טורבינת זרם עשויות לדחוק גם דגים מסביבתן בעת פעולה אינטנסיבית. לדוגמא נמצאה דחיקה אופקית של מעל 140 מ' מהטורבינות בצפון מזרח ארה"ב ברוחות חזקות (Grippe et al., 2020) כאשר הסיכון ברמת האוכלוסייה מטורבינה בודדת או חווה קטנה נמצא כזניח, אבל השפעת הדחיקה המצטברת עלולה להיות משמעותית עבור מערכי ענק מרובי טורבינות.

4.2.3 השפעות רעש

ההשפעות הסביבתיות העיקריות המיוחסות לטורבינות נוגעות לרעש בעת הקמתן (נעיצת הכלונסאות) ולפגיעת הלהבים בעופות בעת תפעולן. רעשים מהכנסת הכלונסאות עשויים להגיע למעל 200 דציבל ומהירות הלהבים האופיינית בקצותיהם עשויה להגיע למעל 200 מטרים לשנייה, ומכאן שהחשש לפגיעה בעופות נודדים ובחי הימי, ובעיקר יונקים ימיים ברור.

בעלי חיים ימיים משתמשים בקול כמו ביבשה – לתקשורת חיזור וחברות, בכדי לנווט, למצוא מזון ולהימלט מטריפה. יחד עם זאת, התקדמות הקול בים מהירה פי 5 מאשר באוויר, ועל כן השפעות של רעש חזק בים עלולות להיות מזיקות יותר ואף קטלניות (Copping & Hemery, 2020).

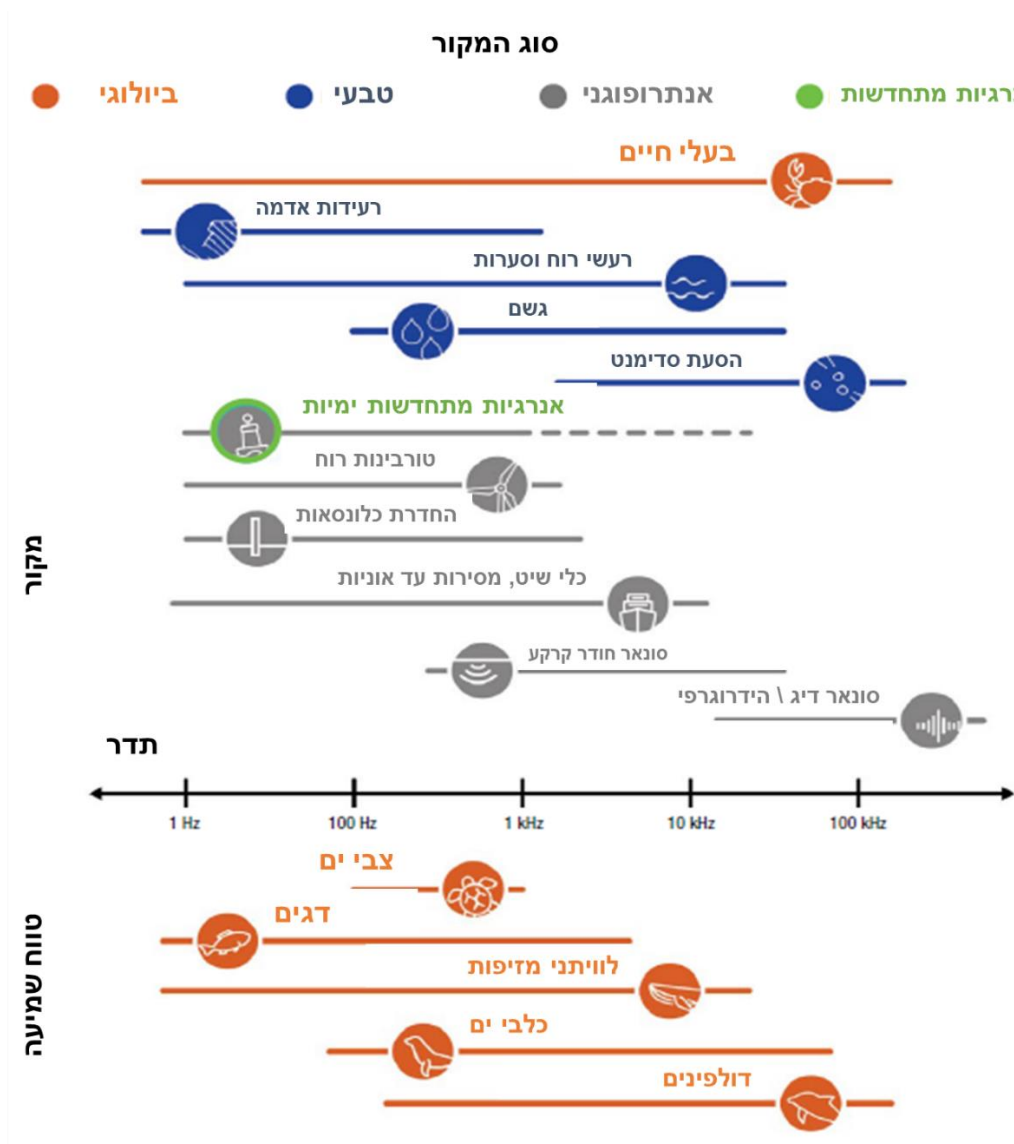
4.2.3.1 רעש בשלבי ההקמה

הרעשים בעת החדרת הכלונסאות נחשבים לאחת ההשפעות העיקריות על החי הימי, ומידת הפגיעה שלהם תלויה גם בתדר, שחופף את זה שבעלי חיים משתמשים בו (איור 16) וגם בעוצמה, שעשויה להגיע על מעל ל-200 דציבל בקרבת הפטישים (Verfuss et al., 2016).

רעש ורעידות תת-ימיים משפיעים במיוחד על מינים רגישים אקוסטית כמו יונקים ימיים (ACCOBAMS, 2012) וייתכן שגם מיני דגים מסוימים בהם רעש עלול להשפיע על תקשורת תוך-מינית, או לגרום לפגיעה ואף תמותה (Popper et al., 2022). הרעש בשלבי החדרת כלונסאות עלול לגרום לפגיעה פיסית ודחיקה משטחי ים (Huang, 2022). רעש בשלב ההפעלה של מתקני אנרגיה מתחדשת (טורבינות רוח, מתקני זרם, ממירי אנרגיית גלים, כבלי חשמל תת ימיים ומערכות אגירה ותשתית נלוות) עלול לגרום למיסוך תקשורת ושינויים התנהגותיים בדגים (Halvorsen et al., 2012), חסרי חוליות (Bolte et al., 2012; Popper et al., 2022) ויונקים ימיים (Harwood et al., 2016).

הרבה מהמאמרים שנסקרו מתמקדים בקביעת ספי הרעש הגורמים לפגיעה פיזיולוגית או להטרדה התנהגותית של יונקים ימיים, מהם ניתן לגזור את רדיוס הסף סביב מקור הרעש, בהינתן עקומות דעיכת הרעש עם המרחק ממנו (Verfuss et al., 2016). עם זאת, אין רדיוס השפעה אוניברסלי, שכן זה תלוי בעוצמת המקור, בתדר, במשך החשיפה, במאפייני ההתפשטות האקוסטית המקומיים וברגישות הקבוצתית של המין. לדוגמה, עבור החדרת כלונסאות בעוצמת מקור אופיינית של $230 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa @ } 1\text{m}$, חישוב לפי מודל דעיכה כדורית ($\log_{10} r^{20}$) מצביע על כך שסף של 180 dB עשוי להתקבל במרחק של כ-300 מ' מהמקור, סף של 160 dB (המשויך לעיתים לשינוי התנהגותי) במרחק של כ-3 ק"מ, וספים נמוכים יותר (כגון 140 dB) בטווחים של עשרות קילומטרים. במים רדודים, כדוגמת מדף היבשת הישראלי, דעיכת הרעש עשויה להיות מתונה יותר (קירוב של $\log_{10} r^{15}$), ולכן רדיוסי ההשפעה התיאורטיים עשויים להיות גדולים אף יותר. בפועל, בליעה, החזרות מהקרקעית ומפני השטח, ורעש רקע גבוה (למשל מנתיבי ספנות) מצמצמים את הטווח

האפקטיבי, אך עדיין מדובר בהשפעה פוטנציאלית בקנה מידה של קילומטרים ואף עשרות קילומטרים עבור תגובות התנהגותיות.



איור 16. תדרים של רעשים טבעיים (ביולוגיים ופיסיים) ורעשים ממקור אנתרופוגני בסביבה הימית, לצד טווח השמיעה של חיות ימיות. הקו המקווקו של מתקנים ימים להפקת אנרגיה מתחדשת מייצג אי ודאות לגבי טווח התדרים העליון, שתלוי גם בסוג המתקן. מקור: (Copping et al., 2020).

באנגליה נרשמה ירידה משמעותית בנוכחות פוקנות (*Phocoena phocoena*) בתוך וסביב חוות רוח בזמן הבנייה. במחקר זה לא נמצאו הבדלים סטטיסטיים מובהקים בין שלב טרום הבנייה לשלב התפעול, כך שהשפעה הוגדרה כזמנית (Vallejo et al., 2017). עם זאת, מחקרים אחרים מצביעים על דחיקה מתמשכת. כך למשל, שבע שנים לאחר הקמת חוות בים הבלטי עדיין ניכרה ירידה בנוכחות פוקנות ובפעילותן האקוסטית, והאוכלוסייה לא חזרה לערכי הבסיס (Teilmann & Carstensen, 2012). באופן דומה, בים הצפוני באנגליה תועדה דחיקת כלבי ים מאזור החווה והפחתה בעלייתם לחוף לרבייה, ללא התאוששות ניכרת גם חמש שנים לאחר ההקמה (Skeate et al., 2012). מנגד, קיימים גם מקרים של חזרה ואף משיכה למתקנים,

ככל הנראה בשל אפקט ריף מלאכותי, זמינות מזון מוגברת או הפחתת תנועת כלי שיט בתוך שטח החווה; כך דווחה נוכחות פוקנות מוגברת בחוות בים הצפוני (Scheidat et al., 2011).

משמעות רדיוסי ההשפעה חשובה במיוחד לנוכח גודלה המצומצם של המערכת והאוכלוסיות הקטנות יחסית של יונקים ימיים במים הכלכליים של ישראל. רדיוס הטרדה של מספר קילומטרים עשוי לחפוף אזורי ספנות פעילים, אזורי דיג או אזורי הזנה מצומצמים, ולכן גם דחיקה זמנית עלולה לשאת משמעות אקולוגית. מנגד, ייתכן כי בטווח הארוך, אם יתפתח סביב המתקנים ריכוז דגים משמעותי, תתרחש התאקלמות ואף שימוש חוזר באזור, בדומה לדפוסים שנצפו סביב חוות דגים. לפיכך, הערכת רדיוס ההשפעה צריכה להיות משולבת בהקשר מרחבי כולל ולא להישען על סף אקוסטי בלבד.

התקנים למיתון רעשים מפעילויות החדרת כלונסאות ניתנים לשימוש על, ליד או אף הרחק ממקור הרעש. שיטה חדשה שהוכחה כיעילה עושה שימוש במהדהדי הלמהולץ – מעין תריסים שמפחיתים את הרעש ב-6-7 דציבלים, ובתוספת מסכי בועות עשויה להביא להפחתה ב-15-14 דציבלים ואל מתחת לסף הנזק ליונקים ימיים (Elzinga et al., 2019).

4.2.3.2 רעש בשלב התפעול

הקולות המופקים מטורבינות רוח בשלב ההפעלה נמצאו ברוב המחקרים מתחת לספים הרגולטוריים שנחשבים מסוכנים ליונקים ימיים בארה"ב, והסבירות לשינויי התנהגות משמעותיים נחשבת נמוכה יחסית, במיוחד בהשוואה לשלב ההקמה (Copping & Hemery, 2020). עם זאת, Copping et al (2020) מדגישים כי הרעש התפעולי אינו אחיד בין טכנולוגיות שונות של אנרגיה ימית. בעוד שטורבינות רוח קבועות מייצרות רעש רציף יחסית ובעוצמות נמוכות עד בינוניות, מתקנים אחרים – כגון ממירי אנרגיית גלים או זרמים – עשויים לייצר חתימה אקוסטית שונה, הכוללת רכיבים מכניים מחזוריים, רעידות מבניות, ותנודות הנובעות מתנועת חלקים במגע ישיר עם המים. כלומר, אין בהכרח יותר רעש מאשר בטורבינות רוח, אלא פרופיל רעש שונה, שעשוי להיות רלוונטי יותר לתדרי השמיעה של מינים מסוימים.

בהשוואה למקורות אנתרופוגניים אחרים, הרעש התפעולי של מתקני אנרגיה מתחדשת נמוך משמעותית מזה של החדרת כלונסאות, ולעיתים אף נמוך מרעש כלי שיט מסחריים או דיג. לעומת זאת, חוות חקלאות ימית מייצרות רעש מתמשך מתנועת כלי שיט תפעוליים, משאבות, מדחסים ומערכות האכלה, ולעיתים גם רעידות מבניות מהמתקנים עצמם. במקרים מסוימים, רעש תפעולי של חווה פעילה עשוי להיות דומה או אף גבוה מהרעש הרציף של טורבינת רוח בודדת, במיוחד בקרבת המתקן. עם זאת, בשני המקרים מדובר לרוב ברעש כרוני מתון יחסית, ולא באירועי רעש אימפולסיביים בעוצמה גבוהה.

הרעש מממירי אנרגיית גלים, הנחשב לאחת ההשפעות העיקריות של מתקנים אלו, נמוך בהרבה מרעשי הקמה. עוצמתו לרוב עולה כאשר הים סוער יותר, אך באותם תנאים גם רעש הרקע הטבעי (ambient noise) מהגלים עולה, ולכן עשוי למסך חלקית את רעש המתקן (Patrício et al., 2009). מספר המחקרים המוגבל בתחום מצביע על כך שעוצמות הרעש תלויות מאוד בטכנולוגיה ובתצורת ההתקנה. למשל, בשוודיה נמצא כי דגים ויונקים ימיים יכלו לשמוע רעשי תפעול בתדרים הנמוכים מ-1 קילוהרץ רק בטווח של פחות מ-40 מ' ממקן מסחרי פעיל (Hartnett et al., 2013). ממצא זה מדגיש כי רדיוס ההשפעה ההתנהגותית בשלב ההפעלה עשוי להיות מצומצם יחסית, במיוחד בהשוואה לשלבי הבנייה.

מעבר להשפעות הישירות על יונקים ימיים ודגים, לרעש תתימי עשויות להיות גם השלכות אקולוגיות עקיפות. קולות תתימיים משמשים אות להתיישובות לפגיות (לרבות) של חסרי חוליות, כגון צדפות, ולכן שינוי בנוף האקוסטי המקומי עשוי להשפיע על דפוסי הצימדה (fouling) ולהגביר התיישובות ביוטה על

המתקן וסביבו (Popper et al., 2022). בכך, הרעש עשוי להשפיע לא רק על טורפי על אלא גם על תהליכי סוקסציה ראשוניים המשפיעים על מבנה החברה האקולוגית.

בין פערי הידע המרכזיים בתחום ניתן למנות את מיעוט המחקרים האמפיריים ארוכי הטווח, השונות הגבוהה בין טכנולוגיות שונות של מתקנים, והתגובה המינית הספציפית של בעלי חיים שונים לתדרים ולעוצמות שונות (Patricio et al., 2009; Copping et al., 2020). לסיכום, הרעש התפעולי של מתקני אנרגיה מתחדשת בים נחשב בדרך כלל נמוך ביחס לשלבי ההקמה ולמקורות רעש ימיים אחרים, אך מאופיין בפרופיל תדרים שונה ותלוי טכנולוגיה; לפיכך, הערכת השפעתו חייבת להיות תלויה-אתר ותלויה-מין, ובמיוחד במערכת רגישת ואוליוגטרופית כמו דרום-מזרח הים התיכון.

4.2.4 השפעות של זיהום אור

זיהום אור נחקר עד כה באופן מוגבל יחסית בהקשר של מתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת, אך קיים גוף ידע רחב יותר הנוגע להשפעות תאורה מלאכותית על מערכות אקולוגיות ימיות ומבנים ימיים בכלל (Jägerbrand & Bouroussis, 2021). אור מלאכותי משפיע על בעלי חיים באמצעות פוטוסקסיס חיובי או שלילי, עלול לשנות דפוסי תנועה וניווט, ולהשפיע על יחסי טריפה, רבייה והתנהגות הן מעל פני המים והן מתחתם (Witherington & Martin, 2003; Haerwood & Horrocks, 2008).

במתקני רוח ימיים, תאורת אזהרה לילית נדרשת מטעמי בטיחות אווירית וימית. עם זאת, נמצא כי סוג התאורה, עוצמתה, ספקטרום האור ודפוס ההבהוב משפיעים באופן משמעותי על סיכון ההתנגשות. Hüpopp et al. (2006) הראו כי מינים נודדים ליליים, במיוחד ציפורי שיר (Passerines), חופמאים ומיני שחפים, נמשכים למקורות אור קבועים בעוצמה גבוהה בתנאי ראות ירודה (ערפל, עננות נמוכה), ככל הנראה בשל בלבול ניווטי. גם יסעורים ועופות ים פלאגיים מסוימים דווחו כרגישים לאור חזק בלילה. לעומת זאת, תאורה מהבהבת (intermittent flashing) בעוצמה נמוכה נמצאה כמפחיתה את משיכת העופות ביחס לתאורה רציפה. Christopher et al. (2011) הציעו כי שימוש בתאורת LED אדומה מהבהבת בעצימות נמוכה, במקום תאורה קבועה בעוצמה גבוהה, עשוי להפחית את הסיכון להתנגשות. בנוסף, נמצא כי כיוון התאורה כלפי מטה או שימוש בגופי תאורה ממוסכים (shielded fixtures) מפחיתים זליגת אור לשמים ולמרחקים גדולים. מחקרים ניסיוניים הצביעו גם על פוטנציאל לשימוש באור אולטרה-סגול מכוון כלפי מעלה, אשר הפחית התקרבות עופות בכ-27% בהשוואה לתאורה בתחום הנראה (May et al., 2017), אם כי המחקרים הדגישו כי יש צורך במחקר נוסף לפני יישום רחב.

אור מלאכותי בלילה (Artificial Light at Night – ALAN) משפיע גם על עמודת המים. לרוות של דגים, של סרטנים ושל חסרי חוליות רבים מפגינות פוטוסקסיס חיובי ונמשכות למקורות אור, דבר העלול לשנות דפוסי פיזור וגיוס. משיכה זו עשויה להגביר טריפה מקומית ולהשפיע על הישרדותן. בנוסף, פלנקטון זואופלנקטוני מבצע נדידה אנכית יומית (Diel Vertical Migration) המבוססת בין היתר על אותות אור; תאורה מלאכותית עלולה לשבש דפוס זה, להשאיר פרטים בשכבות רדודות בלילה ולהגביר חשיפה לטורפים.

שינויים בעוצמת ובספקטרום האור עשויים גם להשפיע על פיטופלנקטון הרגיש לאור, ולגרום לשינויים מקומיים בהרכב החברה ובקצבי יצרנות. במחקרים חופיים נמצא כי תאורה מלאכותית עשויה להגדיל ביומסה של מיני פיטופלנקטון אופורטוניסטיים ולהפחית מגוון מקומי, אם כי הידע עדיין מוגבל (Jägerbrand & Bouroussis, 2021).

4.2.5 השפעת שדות אלקטרומגנטיים

מספר כבלי חשמל והתקשורת המונחים בקרקעית הים גדל בהתמדה בעשורים האחרונים. מתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת מייצרים חשמל המחייב הולכה לחוף באמצעות כבלי חשמל תתיימיים, וכבר כיום קיימות תשתיות נרחבות להעברת חשמל ותקשורת בין מדינות ואיים דרך כבלים ימיים. מאחר שכמעט כל מתקן ימי להפקת אנרגיה מתחדשת מחייב פריסת כבלי הולכה, הבנת השפעותיהם הסביבתיות — לרבות שדות אלקטרומגנטיים, חימום מקומי של הסדימנט ופגיעה פיזית בקרקעית בעת ההנחה — היא רכיב מהותי בכל הערכה סביבתית של פיתוח עתידי בים.

4.2.5.1 רקע

הזרם והמתח בכבלי הולכת חשמל יוצרים שדות אלקטרומגנטיים מלאכותיים (Klimley et al., 2021). כבלי חשמל בזרם ישר (DC) ובזרם חילופין (AC) פועלים לרוב בתדר של 50–60 הרץ ומייצרים שדות מגנטיים מחוץ לכבל, למרות שכבות הבידוד. עוצמת השדה פרופורציונלית לעוצמת הזרם בכבל ויורדת עם המרחק ממנו. ניתן לחשב את טווח ההשפעה באופן פיזיקלי: בסביבה הקרובה לכבל, הדעיכה אינה אקספוננציאלית אלא מתוארת בקירוב כחוקי-חזקה (בקירוב $1/r$ למוליך ישר ארוך). דעיכה אקספוננציאלית במי ים (skin effect) קיימת עקרונית בשדות הרמוניים בתדר 50–60 הרץ, אך עומק החדירה במי ים הוא מסדר גודל של עשרות מטרים, ולכן בטווחים של מטרים בודדים צורת הדעיכה נשלטת בעיקר על ידי הגאומטריה של המוליכים ולא על ידי בליעת המדיום.

למשל, כבלים המעבירים זרם של A1000, הקבורים בעומק של 0.3–3 מ', מייצרים שדות מגנטיים בקרקעית הים בטווחים של 70–670 μT , 3–180 μT ו-3–170 μT (מיקרוטסלה) בהתאמה, עבור מערך של כבלים חד-פאזיים בקוטר 15 ס"מ, כבלי AC תלת-פאזיים וכבלי DC דו-קוטביים בקוטר 27 ס"מ עם רווח של 12 ס"מ בין מוליכים (Luana et al., 2022b). ההבדלים נובעים מביטול חלקי של השדות בין מוליכים סמוכים: בכבל חד-פאזי ללא מוליך חוזר סמוך, השדה גבוה משמעותית; בכבל דו-קוטבי או תלת-פאזי, מתרחש ביטול הדדי המצמצם את השדה מחוץ לכבל ומאיץ את הדעיכה המרחבית.

בהתבסס על חישוב עבור זרם של A1000, אם נבחר סף סטייה מקובל של 5 μT מעל השדה הגאומגנטי (שהוא באזורנו עשרות μT), מתקבל בתרחיש שמרני של מוליך יחיד רדיוס תיאורטי של כ-40 מ'. לעומת זאת, בתרחיש ריאלי יותר של כבל DC דו-קוטבי או AC תלת-פאזי עם ביטול בין מוליכים, אותו סף צפוי להתקבל בטווח של כ-5–15 מ' מהכבל בלבד. אם נבחר סף מחמיר יותר של 1 μT , הרדיוס התיאורטי למוליך יחיד עשוי להגיע לעשרות מטרים רבות, אך בכבלים מסחריים מרובי מוליכים צפוי להישאר בדרך כלל בטווח של עשרות מטרים לכל היותר.

שדות אלקטרומגנטיים של כבלי High-Voltage Direct Current (HVDC) יוצרים עיוות תלת-ממדי הדרגתי של השדה המגנטי של כדור הארץ. עיוות זה מצטמצם עם המרחק מהכבל ומהקרקעית, ותועד אמפירית לרוב בטווח של פחות מ-5 מ' מכל צד בכבלי DC, וכ-10 מ' מכל צד בשדות AC, בעוד השדה החשמלי עשוי להימדד עד כ-100 מ' מכל צד (Hutchison et al., 2018).

לפיכך, אף שכבלי חשמל הם רכיב כמעט ודאי בכל מתקן אנרגיה ימי, וטווח ההשפעה המגנטי שלהם ניתן לחישוב תיאורטי, בפועל מדובר בהשפעה מקומית יחסית — בדרך כלל בקנה מידה של מטרים עד עשרות מטרים — התלויה בעוצמת הזרם, עומק הקבורה, תצורת המוליכים וסף הרגישות הביולוגי הנבחן.

4.2.5.2 השפעה של שדות אלקטרו-מגנטיים על ניווט ונדידה

שדות אלקטרומגנטיים (EMF) קיימים באופן טבעי בסביבה הימית כחלק מהשדה הגאומגנטי של כדור הארץ (כ-20–70 μT), אולם כבלי חשמל תתימיים ומתקני אנרגיה מתחדשת מייצרים שדות מלאכותיים נוספים. מרבית הסקירות העדכניות מצביעות על כך שההשפעות המתועדות כיום של שדות אלקטרומגנטיים מכבלי הולכת חשמל תתימיים הן בדרך כלל מקומיות, חלשות יחסית ולעיתים זמניות, במיוחד כאשר מדובר במתקנים בודדים או בשדות קטנים (Copping et al., 2020; Copping et al., 2021). עוצמות השדה הנמדדות בסמיכות של מטרים בודדים מכבלי HVDC או HVAC קבורים הן לרוב בטווח של עשרות עד מאות מיקרו-טסלה, כלומר באותו סדר גודל של השדה הטבעי או עד פי כמה ממנו, והן דועכות במהירות עם המרחק (Hutchison et al., 2018; Luana et al., 2022b). לפיכך, מרבית ההשפעות האפשריות צפויות להיות מקומיות ומוגבלות מרחבית.

יחד עם זאת, פערי ידע משמעותיים עדיין קיימים, בעיקר בכל הנוגע להשפעות כרוניות, להשפעות מצרפיות ולהשלכות ברמת האוכלוסייה והמערכת האקולוגית. לפיכך, בדומה לשיח הקיים סביב חשיפה אנושית לקרינה לא-מייננת, נותר איזודאות מדעית המחייבת גישה זהירה (Levitt et al., 2021).

שדות אלקטרומגנטיים אנתרופוגניים, לרבות אלו הנוצרים מכבלי AC ו-DC תתימיים, עלולים לשנות או לעוות את השדה המגנטי הטבעי של כדור הארץ. מינים רבים – בהם דגי סחוס, דגי גרם, סרטנים, רכיכות, צבי ים ויונקים ימיים – משתמשים באותות חשמליים ובשדה המגנטי לניווט, לאיתור טרף ולתהליכי התמצאות מרחבית (Klimley et al., 2021; Luana et al., 2022b). הוצעו שתי דרכי שיבוש עיקריות: (1) פגיעה בתפקוד קולטנים מגנטיים או אלקטרורצפטיביים, ו-(2) יצירת "מידע מגנטי מטעה" (misleading magnetic information) העלול לגרום לפרט לפרש את מיקומו או כיוונו באופן שגוי (Klimley et al., 2021). במינים רבים טרם זוהו הקולטנים המגנטיים ברמה הפיזיולוגית, ולכן המנגנונים המדויקים של ההשפעה אינם מובנים במלואם. עם זאת, מדידות שדה אמפיריות של עוצמה, נטייה (inclination) וקוטביות בקרבת כבלים מאפשרות לאפיין את פוטנציאל העיוות המרחבי של השדה הטבעי ולהעריך את משמעותו הביולוגית (Hutchison et al., 2020a).

עדויות ניסיוניות מצביעות על רגישות גבוהה יחסית לשינויים קטנים בשדה המגנטי. בניסויי "תזוזה מגנטית" (magnetic displacement) הראו כי צבי ים חום (*Caretta caretta*), צלופח אירופאי וסלמון ורוד משנים אוריינטציה לאחר חשיפה קצרה (5–10 דקות) לשינויים של פחות מ-5% בעוצמה ובנטייה המגנטית (Klimley et al., 2021). בניסויים אחרים נמצא כי חשיפה לשדות מגנטיים אנתרופוגניים בעלי שיפועים חדים שיבשה את תגובת הניווט התקינה בטרוטת הקשת (*Oncorhynchus mykiss*) ובצבי ים חומים, אם כי משך ההשפעה לא כומת (Klimley et al., 2021). מנגד, במחקרי שדה על כבלי HVDC (כ-200 KV) לא נמצאה פגיעה מובהקת בהצלחת נדידה של סלמון צעיר במפרץ סן פרנסיסקו, אף שנצפתה סטייה מרחבית קלה במסלול (Gillson et al., 2022), ובמחקר נוסף בדרום-מזרח ארה"ב לא נמצאה השפעה מהותית על נדידת סלמון וחדקן ירוק (Copping et al., 2021). ממצאים אלה מרמזים כי ייתכנו השפעות התנהגותיות עדינות גם כאשר לא נמדדת פגיעה ברמת ההצלחה הדמוגרפית.

בהקשר של מתקני אנרגיה ימית, נדרשת תשומת לב מיוחדת לאזורים רגישים אקולוגיים – לרבות אזורי רבייה והטלה, שפכי נהרות, מים רדודים ונתיבי נדידה ידועים של דגים וצבי ים (Hutchison, Gill et al., 2020). עדויות לכך שבעלי חיים משתמשים בשיפועים מגנטיים ליצירת "מפה מגנטית" (topotaxis) – כפי שהודגם בלובסטרס קוצניים, צבי ים, צלופחים ודגי סלמונית – מחזקות את הצורך לבחון השפעות פוטנציאליות גם כאשר טווחי ההשפעה הפיזיקליים מצומצמים (Klimley et al., 2021).

לסיכום, הספרות הקיימת מצביעה על כך שהשפעתם של שדות אלקטרומגנטיים מכבלי חשמל תתימיים היא לרוב מקומית ומוגבלת במרחב, אך בשל רגישותם המוכחת של מינים מסוימים לשינויים עדינים בשדה המגנטי והיעדר ידע מלא על מנגנוני הקליטה, נדרש יישום זהיר של עקרון הזהירות המונעת.

4.2.5.3 השפעות התנהגותיות, פיזיולוגיות וגנטיות של קרינה אלקטרומגנטית על דגים

ההשפעות המתועדות השכיחות ביותר של קרינה אלקטרומגנטית (EMF) בדגים הן התנהגותיות. דגי סחוס, ובפרט כרישים ובטאים, רגישים במיוחד לשדות חשמליים ומגנטיים בשל קיומן של אמפולות לורנציני – איברים אלקטרורצפטיביים המאפשרים גילוי שדות חשמליים חלשים ביותר, עד רמות של 1 nV/m , בתחום תדרים נמוך (Fisher & Slater, 2010). אמפולות אלו משמשות לניווט על בסיס קוטביות השדה הגאומגנטי, לאיתור טרף וטורפים ולזיהוי אותות ביו-חשמליים בתחום $0-15 \text{ Hz}$.

במחקרים מעבדתיים ושדה נצפו תגובות של משיכה או הימנעות משדות מגנטיים, שינויי מהירות שחייה ועלייה בפעילות סמוך לכבלים פעילים (O'Connell et al., 2011; Luana et al., 2022b). עם זאת, עוצמת התגובה תלויה במין, בגיל, בעוצמת השדה ובתדירותו. במחקרי שדה בעוצמות רלוונטיות למתקני אנרגיה (כ-50–150 μT) נמצאו לרוב שינויים התנהגותיים עדינים ומקומיים בלבד, ללא עדות לשינויי נדידה רחביהיקף או לפגיעה דמוגרפית (Copping et al., 2021). במינים מסוימים אף דווחה התרגלות לחשיפה חוזרת לגירוי מגנטי, למשל בכרישים לימוניים (*Negaprion brevirostris*) בתנאי מעבדה (O'Connell et al., 2011), דבר המרמז על גמישות התנהגותית.

עם זאת, בניסויי מעבדה בעוצמות גבוהות בהרבה (mT) תועדו תגובות חזקות יותר, לרבות משיכה של פגיות חמור ים אטלנטי (*Melanogrammus aeglefinus*), צלופח אירופי (*Anguilla anguilla*) ולובסטרים לשדות של 2.8 mT (Cresci et al., 2022). חשוב להדגיש שעוצמות אלו גבוהות בסדרי גודל מהשדות הנמדדים סביב כבלי אנרגיה קבורים. בשדה הטבעי נמצא כי כרישים מפרקתניים (*Ginglymostoma cirratum*) וטריגונים דרומיים (*Dasyatis americana*) עזבו אזורים מושפעים, ללא עדות ברורה להתרגלות (O'Connell et al., 2011). ממצאים אלו מדגישים כי התגובה תלויה הקשר, מין ועוצמה.

בקרב דגים בנתיים, ובפרט שלבי חיים מוקדמים הצמודים לקרקעית, הסבירות לחשיפה ממושכת גבוהה יותר. תריסנית קוצנית (*Raja clavata*), מין בנתי המצוי גם בחופי ישראל בעומק 10–60 מ', נמצאה מגיבה לשדות מגנטיים ניסיוניים, כולל עלייה בפעילות סמוך לכבל מופעל (Luana et al., 2022b). דחייה משדות עשויה תאורטית להסיט מסלולי נדידה, בעוד שמשיכה עלולה לגרום לשהייה באזור שאינו אופטימלי מבחינת משאבי מזון ולפגיעה אנרגטית פוטנציאלית.

השפעת הקרינה האלקטרומגנטית על שלבי התפתחות מוקדמים של דגים עשויה להיות קצרת או ארוכת טווח, ונבדקה בעיקר בניסויי מעבדה. ההשפעה תלויה במאפייני השדה (סטטי לעומת מתחלף), בעוצמתו, במשך החשיפה ובשלב ההתפתחותי בעת החשיפה (Sedigh et al., 2019; Cresci et al., 2022). רגישות פגיות משתנה בין מינים ושלבי אונטוגנזה.

השפעות תועדו בשינויי קצב לב עוברי, שינויים בצריכת חמצן, קיצור או הארכת משך הדגירה, שינויי קצב בקיעה והפרעות בהתפתחות האוזן הפנימית בעוברי פורל הקשת (Formicki et al., 2021) (*Oncorhynchus mykiss*). בחלק מהמקרים העוברים שהוקרנו היו אף ארוכים וכבדים יותר, ולעיתים ניידים יותר. במינים אחרים, כגון פורל הים (*Salmo trutta*), דג זברה ודג לבן אירופי (*Coregonus lavaretus*), דווחה האטה בהתפתחות עוברית בשדות סטטיים, ככל הנראה עקב שינוי בקצב חילוף החומרים.

עם זאת, יש להבחין בבירור בין ניסויים שבוצעו בעוצמות קיצוניות (למשל 10 mT או יותר) לבין עוצמות רלוונטיות למתקני אנרגיה מתחדשת (עשרות עד מאות μT). מרבית ההשפעות החמורות יותר, כגון עלייה בתמותת עוברים או שינויים מטבוליים משמעותיים, תועדו בעוצמות הגבוהות בהרבה מהשדות האופייניים לכבלים תתימיים קבורים. בעוצמות של $50\text{--}150\ \mu\text{T}$, למשל בדגי קרקע מסדרת הדקראים, לא נמצאו שינויים מובהקים בהעדפה מרחבית (Copping et al., 2021).

קיימים דיווחים על שינויים בביטוי גנים, במדדי עקה חמצונית ובמסלולים תאיים בדגים שנחשפו לשדות מגנטיים בתנאי מעבדה (Levitt et al., 2021; Formicki et al., 2021) (נספח ב'). עם זאת, מרבית מחקרים אלו בוצעו בעוצמות גבוהות ובחשיפות ממושכות שאינן מייצגות תנאי שדה בסמוך למתקני אנרגיה מתחדשת. בעוצמות רלוונטיות ($\geq 100\text{--}200\ \mu\text{T}$) כמעט ואין עדויות להשפעות גנטיות יציבות או לשינויים תורשתיים. לפיכך, אף שקיימת אפשרות תאורטית להשפעה מולקולרית תחת חשיפה ממושכת או בעוצמות גבוהות במיוחד, אין כיום בסיס אמפירי מוצק המצביע על סיכון גנטי משמעותי באזורים סמוכים לכבלי אנרגיה מסחריים קבורים.

למרות ריבוי ניסויי המעבדה, מעט מאוד מחקר נערך על דגים בוגרים בתנאי שדה בעוצמות רלוונטיות לכבלי אנרגיה, וכמעט שלא קיימים מחקרי שדה ארוכי טווח הבוחנים השפעות על הישרדות וגיוס באוכלוסיות טבעיות.

לסיכום, הספרות המדעית מצביעה על כך שהשפעות שדות אלקטרומגנטיים על דגים הן בעיקר התנהגותיות ומקומיות בעוצמות האופייניות למתקני אנרגיה מתחדשת תתימיים. השפעות פיזיולוגיות וגנטיות משמעותיות תועדו בעיקר בתנאי חשיפה קיצוניים שאינם מייצגים תנאי שטח. רגישות גבוהה יחסית קיימת בדגי סחוס ובשלבי חיים מוקדמים הצמודים לקרקעית, אך היקף ההשפעה האקולוגית ברמת האוכלוסייה טרם הוכח. לפיכך, הסיכון הכולל מוערך כיום כנמוך ומוגבל מרחבית, תוך צורך בהמשך מחקרי שדה ארוכי טווח במינים מקומיים, במיוחד באזורים סמוכים לאתרי רבייה והטלה.

4.2.5.4 השפעות קרינה אלקטרומגנטית על החפה של לווייתנים

החפת לווייתנים (whale stranding), בין אם של פרטים בודדים ובין אם של קבוצות (mass strandings), היא תופעה מורכבת שלרוב מסתיימת בתמותה. לאורך השנים הוצעו לה מגוון מנגנונים אפשריים, ובהם גורמים טופוגרפיים, מחלות, רעש אנתרופוגני (בייחוד סונאר צבאי בתדרים בינוניים), בלבול חברתי, דחיקה התנהגותית ואף אינטראקציות עם טרף (Southall et al., 2008; D'Amico et al., 2009; Fernández et al., 2005). בנוסף להשפעות אקוסטיות, הוצעה גם השערה גאופיזיקלית שלפיה הפרעות בשדה המגנטי של כדור הארץ – למשל כתוצאה מסופות שמש – עשויות לשבש ניווט מגנטי בלווייתנים ולהגביר סיכון להחפה. Granger et al. (2020) מצאו מתאם סטטיסטי בין אירועי סערות שמש לבין אירועי החפה מסוימים בצפון האוקיינוס האטלנטי, והציעו כי שינויים קצרים אך חדים בעוצמה ובמבנה השדה הגאומגנטי עשויים להשפיע על מינים המשתמשים בניווט מגנטי. עם זאת, מדובר בקורלציה ולא בהוכחת סיבתיות, והמנגנון הביולוגי הישיר טרם הודגם.

סקירות עדכניות מציינות כי קיימות עדויות לכך שלווייתנים, כמו גם מינים ימיים אחרים, עשויים לעשות שימוש במידע מגנטי לצורך התמצאות מרחבית רחבת-היקף (Klimley et al., 2021). אם ניווט זה מבוסס על זיהוי שיפועים (gradients) בעוצמה או בנטייה (inclination) של השדה המגנטי – תהליך

המכונה magnetic topotaxis – הרי שתיאורטית כל עיוות מרחבי מקומי של השדה עשוי להוות מקור לבלבול ניווטי.

ניתן לשער ששדות אלקטרומגנטיים תוצר מקורות אנתרופוגניים, למשל מכבלי הולכת חשמל תתימיים במתח גבוה (HVDC או HVAC), עשויים ליצור עיוותים מקומיים בשדה המגנטי בעלי משמעות ביולוגית. מחקרי שדה מראים כי כבלי HVDC יוצרים סטייה מקומית בשדה המגנטי בטווח של מטרים עד עשרות מטרים מהכבל (Hutchison et al., 2018; Hutchison et al., 2020a). טווח זה קטן משמעותית מטווחי הניווט האוקייניים של לווייתנים, ולכן סביר כי אם קיימת השפעה – היא תהיה מקומית בלבד. עם זאת, באזורים רדודים או בעלי טופוגרפיה מורכבת (למשל מדפים יבשתיים רדודים), שבהם לווייתנים עלולים להיכנס למבנה גאומגנטי משתנה סמוך לחוף, לא ניתן לשלול לחלוטין תרומה פוטנציאלית של עיוותים מקומיים לבלבול ניווטי, במיוחד בשילוב עם גורמי סטרס נוספים. חשוב להדגיש כי עד כה לא הודגם קשר סיבתי ישיר בין כבלי חשמל תתימיים לבין אירועי החפת לווייתנים, והספרות מצביעה על כך שגורמים אקוסטיים (בפרט סונאר צבאי) הם גורם סביר יותר לאירועי החפה המוניים של לווייתני מקור (beaked whales) (Fernández et al., 2005; D'Amico et al., 2009). ההשערה המגנטית נותרת בשלב זה בגדר מנגנון אפשרי אך לא מוכח.

לסיכום, קיימת היתכנות תיאורטית לכך שהפרעות בשדה המגנטי – טבעיות או אנתרופוגניות – ישפיעו על ניווט לווייתנים, אולם העדויות האמפיריות לקשר ישיר בין שדות אלקטרומגנטיים מכבלים תתימיים לבין החפת לווייתנים הן מוגבלות ביותר. בהיעדר הוכחה סיבתית, ובשל הטווח המרחבי המצומצם יחסית של השפעת הכבלים, הסיכון מוערך כיום כנמוך, אך ראוי להמשיך ולנטר באזורים רגישים ובקרבת אזורי חוף רדודים שבהם מתרחשים אירועי החפה בתדירות גבוהה.

4.2.5.5 השפעה על צמדה ימית

השפעת שדות אלקטרומגנטיים על חסרי חוליות ימיים נבחנה בעיקר בתנאי מעבדה, בטווחי עוצמה משתנים – חלקם רלוונטיים לכבלי אנרגיה תתימיים (עשרות עד מאות μT), וחלקם בתנאי קרינה קיצוניים (mT).

במחקר של Jakubowska-Lehrmann et al (2022) נבדקה החשיפה של הצדפה *Cerastoderma glaucum* לשדות מגנטיים סטטיים ומתחלפים בעוצמות בטווח המאות μT ועד mT (בהתאם לסוג החשיפה). תחת שדה סטטי נצפתה ירידה ברמת הסינון ובאנרגיה הזמינה לרבייה בהשוואה לביקורת. קצב הפרשת האמוניה ירד משמעותית, אך לא נצפה שינוי בקצב הנשימה. בחשיפה לשדה מתחלף נצפתה ירידה בפעילות האנזים Acetylcholinesterase, ללא שינוי מובהק באנזימים נוגדי חמצון או ברמות חמצון שומנים. עם זאת, נמדדה עלייה בקרבוקסילציה של חלבונים, עדות לנזק חמצוני ולפוטנציאל נאורוטוקסי. חשוב לציין כי חלק מההשפעות תועדו בעוצמות גבוהות מהשדות האופייניים לכבלים קבורים, ולכן ההשלכה האקולוגית הישירה למתקני אנרגיה מחייבת זהירות בפרשנות.

במחקר אחר, Harsanyi et al (2022) חשפו פגיות לובסטרים (*Homarus gammarus*) וסרטנים קצרי-בטן (*Cancer pagurus*) לשדה מגנטי בעוצמה גבוהה של 2.8 mT – כלומר כ- 40 – 100 פעמים חזק יותר מהשדה הגאומגנטי וכסדר גודל אחד לפחות מעל עוצמות אופייניות של כבלי HVDC קבורים (בדרך כלל 100 – $300 \mu\text{T}$ בסמיכות לקרקעית). בעוצמה זו נצפה מעבר לא סדיר של תעלות יונים בממברנות, שינוי בנפח הביצים, פגיות קטנות יותר, יותר עיוותים מורפולוגיים, ירידה ביכולת השחייה ועלייה בתמותה, וכן פגיעה

פוטנציאלית בגיוס ובפיזור. עם זאת, משך ההתפתחות העוברית וההירות השחייה האנכית לא השתנו. מאחר שמדובר בעוצמת שדה קיצונית ביחס לרוב מתקני האנרגיה התתימיים, ממצאים אלו מייצגים תרחיש חשיפה מרבי ולא תנאי שדה טיפוסיים.

לסיכום, הנתונים הקיימים מצביעים על כך שהשפעות אלקטרומגנטיות על צמדה ימית וחסרי חוליות עשויות להופיע בתנאי חשיפה קיצוניים (מיליטסלה או בתנאי חשיפה ממושכים ומבוקרים במעבדה), אך בעוצמות השדה הטיפוסיות לכבלים תתימיים קבורים (מיקרו-טסלה) צפויות ההשפעות להיות מקומיות, תלויות-מין ומוגבלות, כאשר איהוודאות המדעית נוגעת בעיקר לחשיפה כרונית ארוכת-טווח ולשלבי חיים רגילים.

4.2.5.6 השפעות נוספות של כבלי הולכת חשמל על הסביבה הימית

הערכת הסיכון הכוללת לביוטה הימית מנוכחות כבלי הולכת חשמל תתימיים מצביעה לרוב על רמת סיכון נמוכה, במיוחד בשלב התפעול השוטף. עם זאת, שלב ההתקנה – ובעיקר קבורת הכבלים בקרקעית – כרוך בהפרעה פיזית ישירה למצע, הרחפת סדימנטים ופגיעה נקודתית בבתי גידול בנתיים. הפרעה זו מדורגת כבעלת סיכון בינוני, ברמת ודאות גבוהה יחסית, אך היא מקומית וזמנית ברוב המקרים, ותלויה בסוג הקרקעית, עומק הקבורה והיקף העבודות. לאחר שלב ההתקנה, הכבל הקבור עצמו אינו צפוי ליצור סיכון גבוה לביוטה. יתרה מכך, במקרים בהם האזור סביב הכבל נסגר לדיג מכמורת מטעמי בטיחות, עשוי להיווצר אפקט עקיף של “שמורה” או “אפקט שונית”, כלומר הפחתת לחץ דיג על הקרקעית והצטברות ביומסה מקומית. אפקט זה תלוי כמובן באכיפה בפועל של מגבלות השימוש. בהקשר זה יש לציין כי במקרים מסוימים כבלי הולכה הועברו גם דרך אזורים מוגנים ואף בקרבת אתרי Natura 2000 באירופה, תוך יישום רגולציה סביבתית ייעודית (Sanders et al., 2017).

השפעות שליליות פוטנציאליות נוספות כוללות השראת שדות אלקטרומגנטיים, אשר עלולות להשפיע בעיקר על דגי סחוס ודגים דיאדרומיים המשתמשים באותות מגנטיים וחשמליים לניווט. סיכון זה מדורג לרוב כבינוני, אך ברמת ודאות נמוכה עד בינונית, בשל מיעוט ראיות להשפעות דמוגרפיות או אקולוגיות רחבות היקף בתנאי שדה (Taormina et al., 2018). לעומת זאת, השפעות כגון זיהום כימי מהכבל, פליטת חום, רעש תפעולי, הרחפת סדימנט משנית או הסתבכות בעלי חיים נחשבות בדרך כלל לנמוכות עד זניחות, במיוחד כאשר הכבל קבור ומוגן בהתאם לסטנדרטים הנדסיים ורגולטוריים מקובלים (Taormina et al., 2018).

לסיכום, הסיכון העיקרי מכבלי הולכת חשמל תתימיים מתמקד בשלב ההתקנה ובהפרעה המקומית לקרקעית, בעוד שבשלב התפעול השוטף מרבית ההשפעות הישירות נחשבות מוגבלות מרחבית ובעלות סיכון נמוך, בכפוף לתכנון, קבורה ורגולציה מתאימים.

טבלה 7. סינתזת השפעות פוטנציאליות של כבלים תת ימיים על קולטנים שונים בזמן הנחה/תחזוקה/פירוק ובזמן פעילות הכבלים. עבור כל אינטראקציה, ההשפעה תוארה כזניחה, נמוכה, בינונית או גבוהה. BUR = כבל קבור, LD = מונח, Dyn – דינאמי (בעמודת המים), מתוך: (Taormina et al., 2018). שחור: אין השפעה. המספרים מייצגים את רמת הביטחון (1=גבוה).

	Physical habitat			Invertebrates			Fish			Elasmobranch and Diadromous Fish			Marine mammals		
	Installation / Decomissioning / Maintenance														
	Bur	LD	Dyn	Bur	LD	Dyn	Bur	LD	Dyn	Bur	LD	Dyn	Bur	LD	Dyn
Seabed disturbance	①	①		①	①		②	①							
Sediment resuspension	①			①	①		①	①		①	①				
Chemical pollution				①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①
Underwater noise				②	②	②	①	①	①	①	①	①	①	①	①
	Operation														
	Bur	LD	Dyn	Bur	LD	Dyn	Bur	LD	Dyn	Bur	LD	Dyn	Bur	LD	Dyn
Reef effect		①	②		①	②		①	②		①	②			
Reserve effect	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①
Chemical pollution				①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①
Electromagnetic fields				③	③	③	②	②	③	②	②	③			②
Heat emission				②	①	①									
Entanglement									②			②			②
Extent of impact	Negligible			Low			Medium			High					
Uncertainty	① Low			② Medium			③ High								

4.2.6 שינויים בבתי גידול בקרקעית

4.2.6.1 אפקט השונית המלאכותית, הגברת ביומסה ומגוון המינים

הגידול העולמי בפריסת מתקני אנרגיה ימיים יוצר שטח מצע חדש ונרחב להתיישבות אורגניזמים ימיים, ולכן "אפקט השונית המלאכותית" (artificial reef effect) הפך לאחד הנושאים המרכזיים בספרות העוסקת בהשפעות סביבתיות של מתקנים אלו. בסקירות רבות מודגש כי עצם הוספת מצע קשה למערכות הנשלטות לעיתים קרובות על ידי מצע רך מגדילה את המורכבות המבנית ואת זמינות הנישות האקולוגיות, ומניעה תהליכי סוקסיה של חברות צמודות-מצע (fouling) המובילות להגברה מקומית של שפע, ביומסה ולעיתים גם עושר מינים (Langhamer, 2012; Degraer et al., 2020b; Miller et al., 2013; Martínez et al., 2021). טביעת הרגל האקולוגית הראשונית של מתקנים אלו מתוארת לעיתים כ"אובדן מצע טבעי" (לרוב רך) והחלפתו בבית גידול קשה חדש, אך גוף ידע מצטבר מצביע שבמרבית האתרים נמדדת תוספת נטו של ביוטה ושל פונקציות אקולוגיות סביב המתקנים, במיוחד כאשר משווים לתנאי הרקע (Degraer et al., 2020b; Martínez et al., 2021). בנוסף, עבור מינים ישיבים רבים, תוספת המצע הקשה עשויה להפחית אובדן של שלבים לרוואליים שהיו נסחפים ומתים בהיעדר מצע התיישבות מתאים, ובכך להגדיל את ההישרדות והרציפות האוכלוסייתית של מינים מקומיים ומינים מהגרים כאחד (Adams et al., 2014).

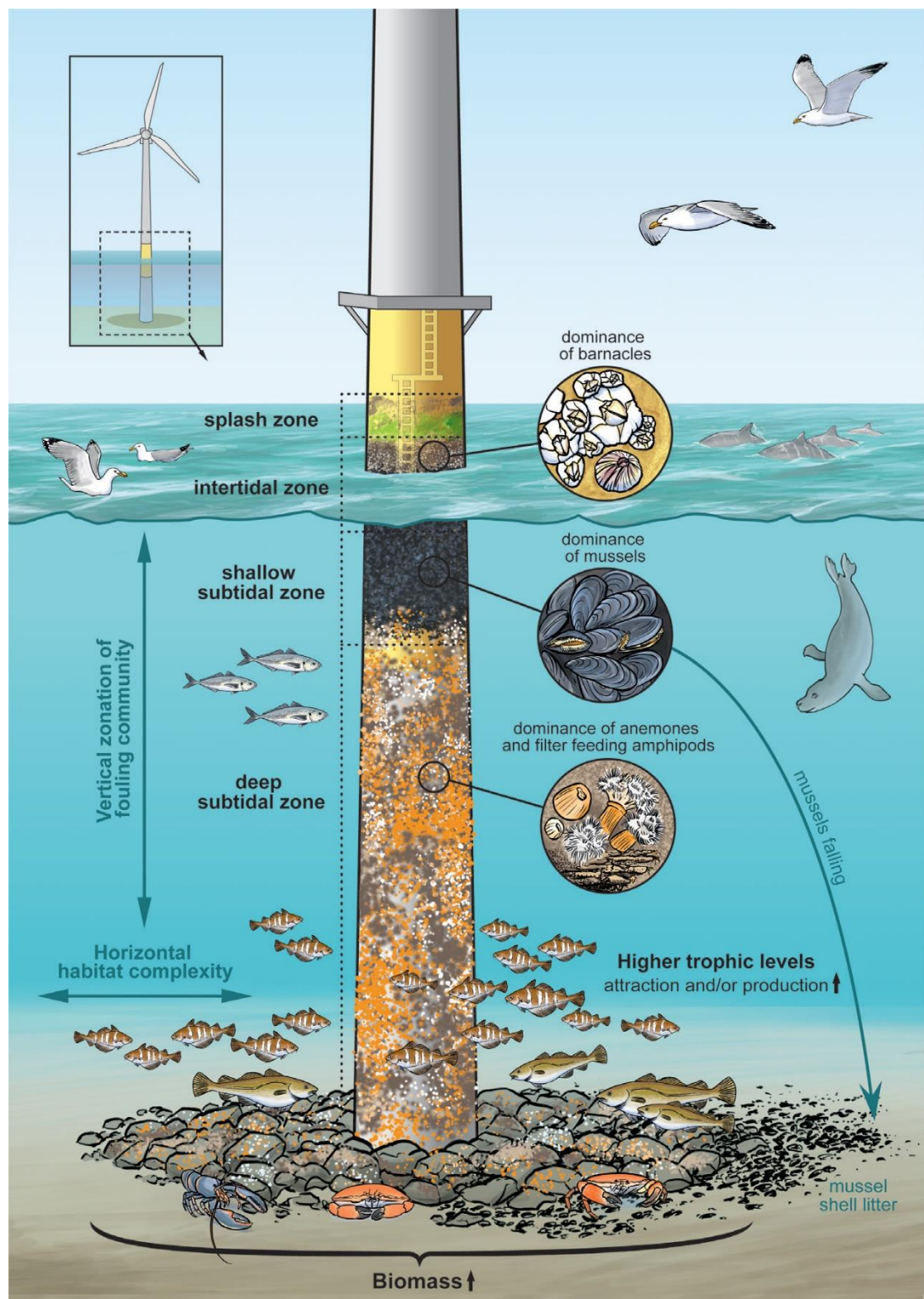
האפקט הבולט ביותר של תוספת המצע הקשה מתקיים לרוב סביב רכיבי היסוד וההגנות למניעת התחפרות (scour protection), אשר מעלים משמעותית את המורכבות המבנית בקרקעית. כך, מתקני הגנה בבסיס טורבינות רוח בים הצפוני הגרמני נמצאו כבית גידול לכמות גבוהה פי שניים של סרטנים ודגים בהשוואה לטורבינות ללא הגנות, וההגברה של ביוטה מסחרית של מיני סרטנים הגיעה עד פי שלושה מריכוזי הרקע (Krone et al., 2017). בסקרי BACI (Before–After–Control–Impact) של חוות רוח ומתקנים דומים דווח על

עליה בשלל ובשכיחות של מיני דגה מסחריים האופייניים למצע רך (למשל דגים שטוחים, רכיכות וסרטנים), לצד הופעת מיני מצע קשה שלא היו באתר לפני ההקמה, כולל מינים נדירים ומוגנים (van Hal et al., 2017; Li et al., 2023). גם בעמודת המים סביב המתקנים, בעלי חיים צמודי מצע יכולים להגביר טורבולנטיות מקומית, לשנות דינמיקת זרימה ולתרום להגדלת זמינות מזון מסונן וחלקיקי בסביבה הקרובה, כך שמתקיים "אפקט משיכה" לרמות טרופיות גבוהות יותר הניזונות על המסננים והמלקטים (Degraer et al., 2020b).

מבחינת תפקוד המערכת האקולוגית, ההתיישבות הראשונית על המצע החדש נשלטת לרוב על ידי מסננים כגון צדפות, ספוגים ואצטלנים, המגבירים סינון של חומר חלקיקי ויצירת משקעים ביוגנים (biodeposits) – גללים ופסאודוגללים pseudofaeces, חלקיקים המופרשים ע"י צדפות מבלי לעבור דרך מערכת העיכול) – המעשירים את הקרקעית בנוטריינטים ובחומר אורגני ומגבירות זמינות מזון לבנטוס ולדטריטיבורים בסביבה הקרובה (Degraer et al., 2020b). שינוי ביוטי בולט בחוות רוח ברוד-איילנד (ארה"ב) היה הגברה של המגוון הביולוגי המקושר לצמדה הימית סביב יסודות הטורבינות ברדיוס של כ-90 מ' מכל מתקן (Hutchison et al., 2020b). לתהליך זה מצטרפת גם "העשרה מלמעלה" (top-down nutrient enrichment) הנובעת מפעילות עופות ים: מבנים ימיים מושכים לעיתים שחפים, שחפיות ומינים נוספים למנוחה וללינה, והצטברות גואנו (guano) על המתקן או בסביבתו יכולה להוות מקור מקומי של חנקן וזרחן. העשרה זו עשויה להגביר יצרנות מקומית ולשנות יחסי N:P, במיוחד באזורים אוליגוטרופיים, ובכך להשפיע באופן עקיף על מארג המזון בסמיכות למתקנים. אף שהספרות הכמותית על תרומת עופות לחומרי דשן סביב חוות רוח בים עדיין מצומצמת ביחס להשפעת הביודפוזיציה של המסננים, מנגנון זה מוכר היטב במערכות אקולוגיות אחרות כגורם העשרה משמעותי, ולכן ראוי לכלול אותו במערך ניטור ובהערכת סיכונים (בהקשר של מתקנים המהווים נקודות לינה/מנוחה לעופות). במקביל, השקעת קלציום קרבונט והטמעת פחמן על ידי החברה האקולוגית הישיבה והעברתו לקרקעית (למשל דרך שקיעת גללים ורקב) עשויים לתרום באופן זעיר אך מדיד להפחתת טביעת הרגל האקלימית נטו של חלק מהמתקנים, אם כי מדובר בתרומה משנית ביחס למאזן הפחמן הכולל של פרויקט (Mavraki et al., 2020; Mavraki et al., 2021).

אפקט השוני אינו מוגבל למיני סלע בלבד. גם מיני מצע רך יכולים להרוויח מהגדלת המורכבות והוספת מצע קשה, לעיתים בטווח של עשרות מטרים ואף יותר סביב כל מתקן (van Hal et al., 2017). מחקר רחב היקף בים הצפוני מצא כי מעבר לטביעת הרגל הישירה של העמודים עצמם, לא נצפתה השפעה שלילית נטו על ביוטת המצע הרך סביב החוות; להפך, דווח על הכפלת עושר המינים ועלייה משמעותית בשכיחות הפרטים בכלל שטח החוות (Li et al., 2023). עם זאת, יש להדגיש כי הגברה זו היא סלקטיבית ותלוית-מין, ולעיתים מתבטאת בחיגור אנכי (vertical zonation) ברור: למשל, צדפות קרוב לפני המים, ועמוק יותר ספוגים, אצטלנים ולעיתים אלמוגים רכים (Degraer et al., 2020b) (איור 17). על יסוד של טורבינה בודדת בים הצפוני הוערכה הביומסה הישיבה בכ-4.3 טון על שטח פנים של כ-1,280 מ"ר (Krone et al., 2013). מאפייני ההתיישבות תלויים גם בחומר ובתכונות פני השטח (למשל ציפויים דוחי-צמדה), בזמן שחלף מאז צביעה ובסוג הפולימר/מתכת, כאשר נמצא כי חומרים מסוימים (כגון High-Density Polyethylene HDPE) עשויים לעודד התיישבות יותר מפלדה (Loxton et al., 2017; Nall et al., 2022; Want et al., 2021). בחלק מהמקרים המגוון על עמודי הטורבינה נמוך יותר מאשר על הגנות התחפרות או בולדרים סמוכים, בשל מורכבות מבנית נמוכה יותר ומרחק יחסי מהקרקעית (Wilhelmsson & Malm, 2008). גם במתקני אנרגיית

גלים – שלרוב חלק גדול מגופם בעמודת המים העליונה – דווחה צמדה עשירה מאוד: באתר באיי אורקני תועדו 135 מינים ישיבים, כולל ארבעה מינים מהגרים, עם חיגור שכלל אצות בחלק העליון ומסננים בתחתית (Nall et al., 2017).



איור 17. מבנים בים משמשים כבתי גידול לחסרי חוליות ישיבים שונים בעומקים שונים. הם מושכים טורפים כגון דגים, עופות ים ויונקים ימיים בעמודת המים, וסרטנים בקרקעית. מקור: (Degraer et al., 2020b)

מעבר להגברה המקומית, תוספת תשתיות קשיחות בים עשויה להשפיע גם על קישוריות (connectivity). מתקנים ימיים יכולים לפעול כ"אבני דילוג" (stepping stones) להתפשטות של שלבים לרואליים ומינים ישיבים בין כתמים מבודדים של מצע קשה, ובכך לשנות את רשתות הפיזור וההתבססות במרחב. מנגנון זה עשוי לתמוך בשיקום אוכלוסיות של מינים מקומיים שבהם המצע הקשה נדיר, אך באותה מידה הוא עלול להקל על התפשטות מינים לא־מקומיים, מהגרים ופולשים, במיוחד באזורים שבהם הפלישה כבר מתקדמת (Adams et al., 2014; Degraer et al., 2020b). לכן, ההשפעה על קישוריות היא דו־ערכית: היא יכולה להגדיל יציבות ותפקוד מקומי של חברות אקולוגיות, אך גם להגביר סיכוני פלישה ולשנות את הרכב החברות לאורך זמן.

באופן כללי, המערכת הבנתית רגישה יותר לשינויים הנגרמים מהצבת מתקני אנרגיה ימיים מאשר המערכת הפלאגית, בעיקר משום שהמבנים מעוגנים לקרקעית ומשנים ישירות את מאפייני המצע, ההידרודינמיקה המקומית ודפוסי השקיעה והסחיפה (van der Molen et al., 2014). יסודות המתקנים יוצרים אזורי מקלט פיזיים (refugia) ומבנה תלת־ממדי חדש על הקרקעית, המהווים סביבות אטרקטיביות למינים גדולים וניידים כגון סרטנים, רכיכות ודגי קרקעית. ככל שהמבנה מורכב יותר מבחינה הנדסית ומרחבית (למשל יסודות מסוג Jacket – איור 18), כך גדל פוטנציאל ההשפעה האקולוגית, הן מבחינת הוספת שטח קשיח והן מבחינת יצירת נישות מגוונות להתיישבות.

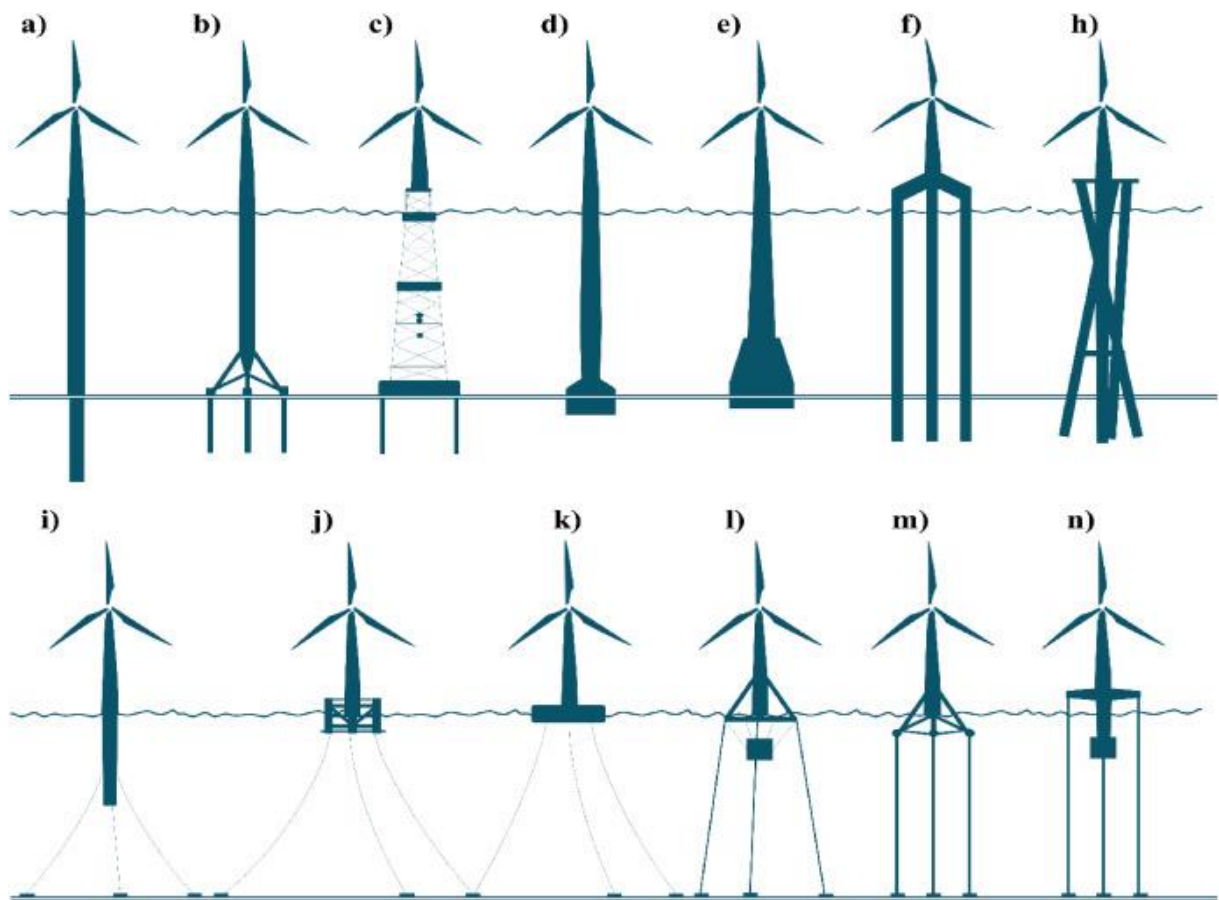
מחקרי ההשפעה של מתקני אנרגיה כשוניות מלאכותיות התמקדו בעיקר ביסודות טורבינות רוח ובאמצעי הגנה מפני התחפרות (scour protection) הסובבים אותן, וכן בהשוואה לגוף הידע שנצבר סביב אסדות נפט וגז. בהתאם לכך, מרבית המחקרים בחנו חברות בנתיות, ובעיקר מינים החיים בקרבת הקרקעית. ממצאים מצביעים על עלייה בשפע ובביומסה של מינים מסוימים, ולעיתים אף על שינוי במבנה החברה ובהרכב המינים.

שילוב שיקולי "בנייה עם הטבע" (Building with Nature) כבר בשלב התכנון עשוי למקסם השפעות חיוביות ולצמצם סיכונים סביבתיים. גישה זו הולכת ומוטמעת במדיניות סביבתית בחלק ממדינות אירופה, ובחלק מהאזורים מהווה דרישה רגולטורית בהקמת חוות רוח ימיות (Degraer et al., 2020b). במסגרת זו, נעשים ניסיונות לתכנן מבנים המדמים מאפייני מצע טבעי, הן מבחינת חומרי הבנייה והן מבחינת מורכבות מבנית. נמצא כי מבני בטון בעלי חספוס ומורכבות גבוהה תומכים בהרכב מינים עשיר ומגוון יותר בהשוואה למבני פלדה חלקים ופשוטים (Ashley et al., 2014).

מעבר לכך, מחקרים מצביעים כי בטון ימי עשוי לתרום למיתון השפעות של החמצת הים ולספק מצע מועדף להתיישבות של מינים משקיעי שלד (calcifiers). פתרונות יישומיים כבר קיימים, כגון טכנולוגיות של "בטון אקולוגי" (למשל Econcrete), המתוכננות הן בהרכב הכימי והן במבנה הפיזי כך שיקדמו התיישבות ביולוגית וישתלבו טוב יותר בסביבה הטבעית (Perkol-Finkel & Sella, 2014). עם זאת, יש להביא בחשבון כי השפעות אלו אינן חד-משמעיות, ועשויות לכלול גם סיכונים כגון העדפת מינים מהגרים או פולשים, שינוי מארג המזון המקומי או ריכוז טורפים. לפיכך, תכנון אקולוגי מושכל של יסודות המתקנים מחייב איזון בין יצירת ערך אקולוגי לבין מניעת השפעות בלתי רצויות, תוך הסתמכות על ניטור ארוך טווח והערכה אדפטיבית.

בים התיכון הישראלי, קיימים מאפיינים ייחודיים שיש להביא בחשבון בעת הערכת השפעות בנתיות של מתקני אנרגיה ימיים. המדף הרדוד (עד ~50 מ') נשלט במידה רבה על ידי מינים מהגרים לספסיאניים, שחלקם מאופיינים ביכולת קולוניזציה מהירה של מצעים חדשים (Edelist et al., 2013a; Galil et al., 2018).

לפיכך, תוספת מבנים קשיחים עשויה לא רק להגדיל מגוון מקומי, אלא גם להקל על התבססות והתרחבות של מינים מהגרים ואף פולשים.



איור 18. סוגי חיבור שונים של טורבינות רוח לקרקעית. ככל שהמורכבות המבנית גבוהה יותר, כך יגבר אפקט השוניית המלאכותית (a) מונופיל (b) חצובה (c) גיקט (d) יניקה (e) כבידה (f) base תלת רגל (h) גיקט מסובב (i) מצוף עמוד (j) חצי שקוע (k) דובר (l) מצוף מטוטלת (m) פלטפורמת רגלי מתח (n) עמוד מפותח. מקור: (Rezaei et al., 2023).

4.2.6.2 אפקט השמורה

מתקנים להפקת אנרגיה מתחדשת בים עשויים לייצר השפעות חיוביות על המערכת האקולוגית הימית באמצעות שילוב של אפקט השוניית (reef effect) והדרה של שימושים אנתרופוגניים פוגעניים כגון דיג מכמורת, ספנות אינטנסיבית ותיירות ימית. יצירת מבנים קשיחים חדשים על קרקעית רכה מגבירה מורכבות מבנית ועשויה להעלות שפע וביומסה מקומית של דגים וחסרי חוליות. במקביל, מגבלות בטיחות סביב מתקנים מובילות לעיתים קרובות להדרה בפועל של דיג וכלי שיט, ובכך נוצר "אפקט שמורה" (reserve effect). שילוב זה עשוי להוביל גם לזליגה (spillover) של ביומסה ומשאבים לשטחים סמוכים (Langhamer, 2012). עם זאת, הקשר בין מתקני אנרגיה ימיים לשימור טבע אינו חד-משמעי. במקרים מסוימים, גופי שימור תופסים מתקנים כבלתי תואמים למטרות שמורה, ושמורות קיימות אף עשויות להדיר או למנוע פיתוח מתקנים בתחומן (Spiropoulou et al., 2015; Sanders et al., 2017). מאידך, הוצע כי חוות אנרגיה ימיות יכולות לתפקד כבתי גידול מוגנים ולהוות אזורים בעלי ערך שימורי, במיוחד עבור יונקים ימיים (Jhan

Ashley et al., 2016; Oakley et al., 2022; et al., 2022), עופות ים (Allen et al., 2019), וכן דגים, חסרי חוליות ואצות (Ashley et al., 2014; Coates et al., 2014). גם כאשר אינם מוכרזים רשמית כשמורות, מתקנים מהווים לעיתים אזורים מוגנים דה־פקטו בשל מגבלות הגישה והפעילות סביבם (Ashley et al., 2014; Grecian et al., 2010).

קיים ויכוח מדעי ותכנוני סביב השאלה האם שמורה מעודדת הגדלת ייצור ביולוגי כולל (production) או ריכוז ביומסה קיימת (attraction). בנוסף, יש לבחון את האיוון בין העלייה האפשרית בביומסה ובהגנה המקומית לבין אובדן שטחי דיג מסורתיים והשלכות חברתיות-כלכליות נלוות (Degraer et al., 2020b). לפיכך, מימוש פוטנציאל "אפקט השמורה" מחייב הכרה מוקדמת בכך בשלב התכנון, שילוב שיקולים אקולוגיים וחברתיים בתהליכי קבלת החלטות, ופיתוח מנגנוני מיתון ותמיכה מתאימים (Sanders et al., 2017). לפיכך, מתקני אנרגיה ימיים אינם שמורות טבע מעצם הגדרתם, אך בתכנון נכון הם עשויים לתפקד כמרחבים משולבים של ייצור אנרגיה ושימור, בתנאי שהשפעותיהם נבחנות באופן הוליסטי ומנוהלות אדפטיבית לאורך זמן.

4.2.6.3 הפצת מינים מהגרים

שינוי בתי גידול באופן המעודד התפשטות מינים פולשים נחשב לאחד הסיכונים המשמעותיים ביותר למערכות אקולוגיות ימיות (Dafforn, 2017). כאמור, סביב מתקני אנרגיה ימיים נוצרים בתי גידול חדשים המושכים מגוון בעלי חיים – דגים, חסרי חוליות ואצות – וביניהם עשויים להימצא גם מינים מקומיים נדירים, מוגנים או בסיכון, הנהנים מהרחבת תחום מחייתם (Degraer et al., 2020b). מבנים ימיים משמשים לעיתים כ"אבני מדרג" (stepping stones) המאפשרות התפשטות הדרגתית של מינים לאורך מרחבים ימיים נרחבים (Adams et al., 2014), וכן כאזורי אומנה ואתרי רבייה היכולים לייצר אפקט זליגה (spillover) לשטחים סמוכים (Halouani et al., 2020). עם זאת, אותו מנגנון עשוי לפעול גם בכיוון שלילי: חלק מהמינים המתישבים על גבי מתקנים עלולים להיות מינים מהגרים / פולשים, אשר לאחר התבססותם על המבנה יתפשטו למערכות אקולוגיות סמוכות, לרבות אזורי רגשים (Adams et al., 2014; Langhamer, 2012). לפיכך, השאלה אינה האם תתרחש התיישבות, אלא אילו מינים ייהנו ממנה.

דוגמה להערכת סיכון כזו נבחנה בפרויקט חוות הרוח הגדולה הראשונה בקטלוניה (ים תיכון ספרדי), שבו נכללה פלישה ביולוגית ימית כאחד מקריטריוני ההערכה המרכזיים. חשוב להדגיש כי מדובר היה בהערכת סיכון מוקדמת ולא בתיעוד אמפירי של פלישה בפועל. בעוד שהפרויקט הוערך כבעל השפעה בינונית על עכירות, סדימנטציה, רעש תתי־ימי, הידרודינמיקה ושדות אלקטרומגנטיים, הסיכון להגברת פלישה ביולוגית הוערך כנמוך בתנאי האתר הספציפיים (Diez-Caballero et al., 2022). כלומר, לא נמצאה פלישה מוגברת, אלא שההסתברות לכך הוערכה כנמוכה בהקשר האקולוגי המקומי. יחד עם זאת, באזורים הרגישים במיוחד לפלישות ימיות הסיכון עשוי להיות גבוה יותר (Adams et al., 2014). הים התיכון הישראלי, ובפרט האגן הלבנטיני, מאופיין בשיעור גבוה של מינים מהגרים דרך תעלת סואץ (פלישה לספסיאנית), ולכן קיימת רגישות ייחודית להתבססות מינים מהגרים על מצעים קשיחים חדשים. בהתאם לכך, יש להדגיש את הצורך בבחינת התיישבות מינים מהגרים על מבנים קיימים (נמלים, אסדות, שוברי גלים) ובהטמעת מחקרי BACI ייעודיים במקרה של פריסת מתקנים חדשים.

סיכון נוסף נוגע לשלב הלוגיסטי: כאשר מתקנים או רכיביהם שוהים פרקי זמן ממושכים בנמלים טרם גרירתם לאתר הפריסה, הם עלולים לצבור צמדה ימית הכוללת מינים מהגרים, שכן נמלים מהוות מוקדי פלישה עולמיים. לכן מומלץ למזער את זמן השהות בנמל, ליישם תחזוקה שוטפת, ניקוי או צביעה בציפויים

מתאימים, במיוחד לאחר העברה בין אזורים ביוגאוגרפיים שונים (Want et al., 2017; Dafforn, 2017; Adams et al., 2014; Loxton et al., 2017).

מעבר לסוגיית הפלישה, הכנסת תשתית קשיחה לאזורי קרקעית רכה משנה באופן יסודי את המגוון הביולוגי באתר. חברות אקולוגיות המאכלסות מצע קשיח שונות מאלה שבמצע רך, ומבנים החודרים את פני הסדימנט עשויים לאפשר חדירה של מיני מים רדודים לאזורים שהיו מיושבים בעבר בעיקר על ידי מינים עמוקים, בעוד שעל גבי המבנה עצמו יתבססו חברות מצע קשיח אופייניות (Hooper et al., 2014; Adams et al., 2021a). גם סוג הציפוי והצבע משפיעים על דפוסי ההתיישבות – מינים מקומיים, קוסמופוליטיים או מהגרים עשויים להגיב באופן שונה לציפויי אנטיפאולינג שונים – אם כי לאורך זמן ההבדלים נוטים להיטשטש והחברות מתכנסות להרכב דומה לאחר מספר שנים (Nall et al., 2022).

התפשטות מינים על, סביב ובעזרת מתקנים צפויה להיות משמעותית במיוחד במים רדודים ובעמודת המים העליונה (Adams et al., 2014). למרות ההתקדמות המחקרית, פערי הידע עדיין ניכרים, בעיקר בנוגע לשינויים ארוכי טווח במארג המזון הבנתי, לקצבי התבססות של מינים מהגרים ולגורמים הפיזיקליים והביולוגיים המקדמים או מעכבים את הצלחתם (Dannheim et al., 2020; Adams et al., 2014).

4.2.6.4 שינויים הידרודינמיים ושינויים בהסעת סדימנט

מתקנים מקובעים לקרקעית הים משנים את משטר הזרימה והסעת הסדימנט סביבם, במיוחד באזורים המאופיינים בזרמים חזקים. עיקר המחקרים בתחום זה מתמקדים בטורבינות זרמי גאות (Tidal Stream Turbines) ובמתקני מחסום לגאות (Tidal Barrage), שכן טכנולוגיות אלו פועלות ישירות בתוך שדה הזרימה ומשנות אותו באופן מובנה. היתכנותן של טכנולוגיות אלה בישראל נמוכה מאוד בשל משרעת גאות קטנה יחסית בים התיכון. באזורים שבהם הותקנו מתקנים כאלה דווח על שינוי במשרעת הגאות (Hakim et al., 2013), ועל תהליכי סדימנטציה או ארוזיה מוגברת – קבועים או מחזוריים. כך למשל, במתקן טורבינות הגאות הגדול בעולם בסיחווה (Si-hwa), דרום קוריאה, נמצא כי החווה משנה באופן דו־יממתי את דפוסי ההצטברות והארוזיה במפרץ בהתאם למחזור הגאות (Kim et al., 2017). בצפון אנגליה נמצא כי ככל שמספר הטורבינות גדל, כך גוברת ההשפעה המקומית על ארוזיה וסדימנטציה (Martin-Short et al., 2015), וכי מיקום טורבינות סמוך לשפכי נהרות עלול להעצים שינויים בזרימה ולהשפיע על המגוון הביולוגי (Kidd et al., 2015). עם זאת, מודלים מהים הצפוני מצביעים כי האפקט המצטבר של חוות טורבינות גאות על מורפולוגיית החוף עשוי להיות מוגבל יחסית בקנה מידה אזורי (Fairley et al., 2015). לעומת זאת, בטכנולוגיות של אנרגיית גלים – ובעיקר מתקני Wave Energy Converters צפים או חצי־צפים מסוג point absorbers או attenuators המעוגנים לקרקעית באמצעות כבלי עגינה – ההשפעה ההידרודינמית הישירה על משטר הסדימנט נוטה להיות מקומית יותר. מחקרים בחופי קליפורניה הראו כי חוות גלים הממוקמות במרחק מהחוף גורמות לשינויים זניחים בדינמיקת החופים, והשפעתן על הסעת סדימנט נותרת בעיקר בסביבת העגינה הקרובה (Stiber & Beyene, 2015). מתקנים מבוססי OWC (Oscillating Water Column) המוטמעים בשוברי גלים עשויים להשפיע יותר על דינמיקת החוף המקומית, אך גם שם עיקר ההשפעה היא נקודתית.

בנוסף, השינויים שמתקנים ימיים מכניסים למערכת ההידרודינמית עשויים להוביל גם לשינויים בדפוסי סדימנטציה. בהתאם לעומק, למרחק מהחוף ולמאפייני הזרימה המקומיים, שינויים אלה עשויים להשפיע הן על עמודת המים והן על הדינמיקה החופית. בנוסף, ככל שמספר הטורבינות או היסודות באתר גדל, כך עשויה להתעצם ההשפעה המצטברת על הצטברות או גריעת סדימנט באזורים שונים (Martin-Short et al., 2015).

2015). בין התהליכים הפיזיקליים האופייניים סביב מתקנים מקובעים ניתן למנות היווצרות בורות סחיפה (scour pits) סביב היסודות כתוצאה מהאצת זרימה מקומית, וכן יצירת פלומות סדימנט (sediment plumes) במהלך שלבי ההקמה או בעקבות ערבול מתמשך. פלומות אלו עלולות להביא לכיסוי או חנק של אוכלוסיות ישיבות על מצע קשיח, אם קיים כזה באזור הזרם או ב"צל הזרם" של המתקן, ולשנות את תנאי ההתיישבות והגיוס המקומיים.

ניתן להשוות את ההשפעות ההידרודינמיות של יסודות מתקני אנרגיה ימיים לאלו של אסדות קידוח נפט וגז או מבנים תתי-ימיים אחרים המעוגנים לקרקעית. גם סביב אסדות קידוח תועדו תהליכי scour (סחיפה מקומית) והצטברות משקעים בסביבת היסודות, כתלות בעוצמת הזרם ובסוג הסדימנט. עם זאת, ברוב המקרים ההשפעות היו מקומיות והוגבלו לטווח של עשרות מטרים מהמבנה, אלא אם מדובר במבנים רחבי היקף או בשינויי זרימה אזוריים. לפיכך, בעוד שטורבינות גאות גדולות עשויות לשנות שדות זרימה בקנה מידה מפרצי, מתקני רוח או גלים בודדים, בדומה לאסדות קידוח, צפויים להשפיע בעיקר בקנה מידה מקומי. בהקשר הישראלי, שבו משרעת הגאות קטנה, והאנרגיה הדומיננטית היא של גלים מתונים יחסית ושל זרמי רקע חלשים, ההשפעות ההידרודינמיות הצפויות ממתקנים מקובעים לקרקעית צפויות להיות נקודתיות ומקומיות, אך עדיין מחייבות בחינה פרטנית בהתאם לעומק, לסוג הסדימנט ולקרבה לחוף.

4.2.6.5 השפעות של מערך העגינה על בתי הגידול בקרקעית ובסמוך לה

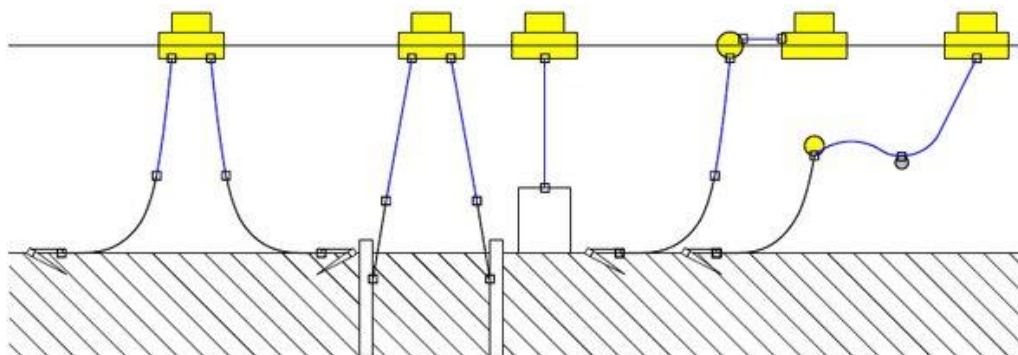
כיום, מרבית המתקנים הימיים להפקת אנרגיה מתחדשת, בין אם מדובר באנרגיית רוח או זרמי גאות, הינם מקובעים ישירות לקרקעית. עם זאת, תחום מתקנים צפים שמעוגנים לקרקעית, כגון טורבינות רוח צפות ומצופי גלים (איור 19) נמצא בעליה משמעותית בשנים האחרונות (Díaz & C, 2022; Maxwell et al., 2022). במקרים אלה מדובר על הפחתה גדולה מאד ברעש וברעידות ביחס להחדרת כלונסאות (Li et al., 2023). ללא אמצעים מיוחדים, בזמן סערות עלולות כבלי עגינה להתחכך בקרקעית הים. כל גרירה כזו של הכבלים כשהמבנה הצף נע עם הרוח והגלים תגרום לחיכוך ולשינויים בקרקעית; התוצאה תהיה נזק לחי על ובתוך הקרקעית, וכן שחרור של מלאי הפחמן הקבור בסדימנטים, כתוצאה מערבול והסעה מחדש של חלקיקים (resuspension), אשר עשוי להפוך לזמין לפירוק מיקרוביאלי ולהוביל לשחרור פד"ח לעמודת המים (Serrano et al., 2016). תכנון הולם של מערך עגינה חשוב כדי לצמצם השפעות מזיקות כאלו, למשל על ידי התקנה של מיצוף משני (איור 19).

הסיכון להילכדות מזה-פאונה במערכי עגינה ככלל הוא נמוך, במיוחד כאשר מערכות העגינה מורכבות מאלמנטים עבים שמתוחים חזק, מה שגם מקטין את החיכוך עם הקרקעית. הסיכון מעט גבוה יותר כאשר מדובר במערכות שמשלבות שרשראות עם חבלי ניילון או מצופים נלווים, וגם הוא נמוך אלא אם כן מדובר במערכות שאינן מתוחות וכאשר החבלים אלסטיים ובעלי קוטר קטן (Harnois et al., 2015). בכדי לצמצם פגיעה בבתי גידול רגישים או עשירים, מומלץ להעדיף מערכי עגינה מתוחים בעלי אלמנטים עבים ומינימום רכיבים נלווים, ולהימנע ככל האפשר מתצורות הכוללות חבלים דקים/אלסטיים היוצרים לולאות, וכן למקם את המערכים הרחק מבתי גידול רגישים ומסלע מורכב (Harnois et al., 2015).

בנוסף על אלו, בעיקר כתוצאה מקורוזיה, עשויה להתרחש זליגת חומרי בלייה לסביבה הימית (ראו 4.2.7), שעלולה לגרום להשפעות מקומיות.

בעוד שעגינה בודדת גורמת להפרעה מקומית ונקודתית יחסית, מערכי עגינה עשויים ליצור השפעה מצטברת ומרחבית רחבה יותר. חפיפה בין אזורי הגרירה של כבלים ועוגנים עשויה להוביל להפרעה כרונית לקרקעית, לפגיעה מתמשכת בבתי גידול בנתיים, ולהגברת תהליכי ערבול סדימנטים ושחרור פחמן אורגני. כתוצאה

מכך, במערכי עגינות עשויות להתפתח השפעות שאינן ליניאריות, לרבות שינוי מתמשך בהרכב החברה הבנתית ובתפקוד האקולוגי של המערכת המקומית.



איור 19. סוגי מערכי עגינה שונים למתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת שכוללים עוגני כבידה, עוגנים שמוחדרים לקרקעית, מיצוף משני, שרשראות (בשחור) וחבלים (בכחול). מקור: (Harnois et al., 2015)

4.2.7 שינויים בבתי גידול בעמודת המים

בדומה להשפעות בקרקעית, גם בעמודת המים מתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת עשויים לשנות את ההידרודינמיקה ואת מאזן האנרגיה של המערכת: הם מגבירים ערבול מקומי, מפחיתים או "מוציאים" אנרגיה מהגלים ומהזרמים, ויוצרים הצללה (למשל "צל גלים" וצל אור), ובכך משנים תנאי בית גידול בעמודת המים (Copping et al., 2020). לשינויים אלו יש השלכות סביבתיות ישירות ועקיפות: ערבול מוגבר עשוי להחליש שיכוב (stratification), לשנות זמינות נוטריינטים באזור הפוטי, להשפיע על יצרנות ראשונית ועל מבנה רשת המזון; לעומת זאת הפחתת אנרגיית גלים/זרמים עשויה להפחית הפרעה פיזית בעמודת המים ובקרקעית, לשנות דפוסי סדימנטציה ולשנות תהליכים ביוגיאוכימיים מקומיים (Dorrell et al., 2022).

מתקנים עשויים להשפיע על הסיכון להיווצרות פריחות אצות רעילות (HABs) באופן עקיף, דרך שינוי זמינות נוטריינטים, ערבול, שיכוב וזמן שהייה של המים (Daewel et al., 2022; van Berkel et al., 2020). ההשפעה הפוטנציאלית המשמעותית ביותר קשורה למערכות המבצעות שאיבת מים עמוקים, כגון OTEC, העלולות להעשיר את השכבה הפוטית בנוטריינטים (Taquet et al., 2020). במתקני רוח וגאות, ההשפעות הן בעיקר הידרודינמיות ועשויות לשנות את הרכב חברת הפלנקטון, אך אין עדות ישירה לעלייה בפריחות מזיקות.

מבנים בעלי שטח ונפח משמעותיים בעמודת המים העליונה (למשל מתקנים צפים) עשויים לתפקד בפועל כ-FAD (Fish Aggregation Device), כלומר להתאגדות דגים סביב המבנה (Dempster & Taquet, 2004; Hooper et al., 2021a). מנגנון מרכזי לכך הוא שינוי הזרימה: המבנים הופכים זרימה יחסית אחידה לזרימה מערבולית ואיטית יותר במורד הזרם, יוצרים אזורי מחסה הידרודינמיים ומפחיתים עלויות אנרגטיות של שחייה ושהייה עבור דגים (Dorrell et al., 2022). ההשלכה הסביבתית היא ריכוז מקומי של ביומסה וניידות טרופית: דגים קטנים, חסרי חוליות ודגיגים מתאגדים בסביבת המתקן, ובהמשך גם טורפים גדולים (דגים טורפים, כרישים, יונקים ימיים ועופות ים) עשויים להימשך לאזור עקב זמינות טרף מוגברת (Degraer et al., 2020b). ריכוז כזה יכול להגדיל מקומית את עושר המינים ואת עוצמת האינטראקציות הטורפניות, אך

גם ליצור "מלכודת אקולוגית" או "מוקד משיכה" המעלה סיכון לדיגירת, לתחרות מוגברת ולמפגשים עם כלי שיט—כתלות ברגולציה ובמאפייני המרחב. במרחב הימי של ישראל קיימות עדויות אנקדוטליות ארוכות שנים להתקבצויות של דגים פלאגיים גדולים סביב אסדות בים העמוק, ולכן אפקט דומה סביר גם סביב מתקנים ימיים חדשים, אם כי עוצמתו תהיה תלויה במיקום, גודל ותפעול.

במים רדודים, שינויי זרימה סביב מבנים עלולים גם להעלות פלומות סדימנט וחומר מרחף, להגדיל עכירות ולהקטין חדירת אור (Baeye & Fettweis, 2015). ההשלכות הסביבתיות כאן הן כפולות: מצד אחד עכירות מוגברת עשויה להפחית יצרנות של אצות ופיטופלנקטון התלויות באור באזור הפוטי, ולפגוע בבתי גידול רגילים לאור (כאשר קיימים); מצד שני, הזרמת חומר מרחף וחומר אורגני עשויה להגביר זמינות מזון למסננים ולשנות את מאזן חומרי ההזנה—לעיתים עד כדי הגברת יצרנות מקומית, בעיקר אם החומר המרוכז זמין ביולוגית (Dorrell et al., 2022). בנוסף, עכירות והרחפת סדימנט עשויות להשפיע על דגים וחסרי חוליות רגילים דרך פגיעה בזימים, כיסוי ביצים/לריות, או שינוי יעילות טריפה חזותית.

כמו בקרקעית, גם בעמודת המים נוצרים בתי גידול חדשים באמצעות התיישבות צמדה על המבנים והשימוש בהם כשונית מלאכותית (Degraer et al., 2020b). ההשלכות הסביבתיות של "שונית בעמודת המים" כוללות עלייה מקומית במצע קשה זמין, סוקצסיה של חברות ישיבות (מסננים, אצטלנים, ספוגים ועוד), והגדלת מורכבות מבנית שמספקת מקלט ומזון לדרגות טרופיות גבוהות יותר. תהליך זה יכול להגדיל את "ההילה" האקולוגית סביב המתקן (מבחינת שפע ופעילות), אך עשוי גם לשנות את הרכב החברות האקולוגיות המקומי ולהשפיע על קישוריות (connectivity) של שלבים לרואליים ומינים ישיבים—לטובה (קישור בין כתמי מצע קשה מבודדים) או לרעה (האצת התפשטות מינים לא־מקומיים), תלוי בלחץ הפלישה המקומי ובמרחקים בין תשתיות (Degraer et al., 2020b).

בחלק מהמקרים מתקנים ימיים לא יגרמו לשינוי ניכר בדפוסי שימוש בעמודת המים. לדוגמה, במרילנד נמצא שפוקנות היו נפוצות משמעותית בחורף גם בתוך וגם מחוץ לחוות רוח ועסקו בשיחור מזון באותן שעות הן בתוך והן סביב החוות (Wingfield et al., 2017). תוצאה כזו מרמזת שהתגובה הביולוגית אינה "חובה" אלא תלויה במשטר טרף, בעונתיות, בעוצמת ההפרעה ובמאפייני בית הגידול. מנגד, כאשר משלבים מתקנים עם חקלאות ימית, הילות ההאכלה עשויות להתרחב עקב זמינות מזון מוגברת (Dempster & Taquet, 2004), וההשלכה הסביבתית יכולה להיות הגברת שינויים ביוגיאוכימיים (העשרת נוטריינטים וחומר אורגני), שינויי חמצון בקרקעית, ושינוי במבנה רשת המזון המקומית—תלוי בעומס ההזנה ובפיזור (Buck et al., 2017).

השפעת המבנים על ערבול והידרודינמיקה היא עצמה דינמית: התיישבות חסרי חוליות ישיבים (כגון צדפות) מגדילה את חספוס המשטח ומגבירה יצירת מערבולות, ולכן יכולה לחזק את שינויי הזרימה לאחר התבססות הצמדה (Karlsson et al., 2022). עם זאת, באזורים שבהם עמודת המים מעורבלת היטב באופן טבעי, תוספת ערבול ממבנה עשויה להיות שולית יחסית; לעומת זאת בים הפתוח, שבו שיכוב עונתי הוא תכונה מרכזית, ערבול נוסף עשוי לשנות את עומק שכבת הערבול, להשפיע על זמינות נוטריינטים באזור הפוטי, ולגרום לשינויים בייצור ראשוני ובעיתוי פריחת (Dorrell et al., 2022). לפי הערכות סדרי גודל, השטף החלקיקי והשינוי בסדימנטציה עשויים להיות התגובה החזקה ביותר לתשתיות גדולות, אחריהם שינויי גלים (צל גלים), ולאחר מכן שינויים ביוגיאוכימיים מקומיים בעוצמה נמוכה יותר (Dorrell et al., 2022).

במקרים של פריסה נרחבת במיוחד (חוות גדולות או ריבוי חוות באזור), ייתכנו גם השלכות אזוריות ברמה האטמוספירית-אוקיינית, כגון שינוי מיקרואקלים: הפחתה בעוצמת הרוח, שינוי במשקעים, שינוי בטמפרטורת האוויר בגובה ושינוי בטמפרטורת פני הים, לצד שינוי בהחלפת חום בין האטמוספירה לים (Akhtar et al., 2022). בים הצפוני הודגש כי עד 2015 השפעות אלו היו מקומיות ומוגבלות לשטח החוות, אך בתרחישי פריסה מאסיביים הועלתה האפשרות לשבירת שיכוב בעונות מסוימות באזורים נרחבים יותר (Carpenter et al., 2016). ההשלכה הסביבתית האפשרית של שינויי שיכוב בקנה מידה אזורי היא שינוי במשטר היצרנות, בעיתוי פריחות פלנקטון ובהתפלגות חמצן וחומר אורגני בעמודת המים.

סוגי מתקנים שונים משפיעים בצורה שונה. טורבינות גאות/זרם עשויות להפחית מקומית את מהירות הזרם במורד הזרם, ולעיתים לשנות סדימנטציה; בהקשרים מסוימים דווח אף על ירידה בסדימנטציה (Ross et al., 2021), וייתכן שינוי בשיכוב עונתי כתלות במאזן בין הפחתת זרימה לבין ערבול שנוצר סביב הרוטור (De-Dominicis et al., 2017). ההשלכות הסביבתיות תלויות במקום: שינוי בזרימה עשוי להשפיע על הפצת לרוות, על פיזור מזון וחומר מרחף, ועל תנאי בית גידול למינים תלויי זרם. בממירי אנרגיית גלים, "צל הגלים" הוא השפעה מרכזית: בחוף הפסיפי של ארה"ב הוערך כי פריסה במרחק של כ-1 ק"מ מהחוף עשויה להפחית את עוצמת הגלים בכ-1%, וכי ניתן לצמצם השפעות על החוף באמצעות ריווח מותאם של המתקנים בהתאם למשטר הגלים (Flanagan et al., 2022). ההשלכה הסביבתית של שינוי משטר גלים היא פוטנציאל לשינוי סחיפת חוף/ארוזיה, דינמיקת סדימנטים, ומורפולוגיית חופים—בעיקר אם מדובר בפריסה צפופה או רחבת היקף.

לבסוף, שינויי זרמים וגלים בקנה מידה מצטבר עשויים להביא גם לשינויים אזוריים (עשרות עד מאות ק"מ) בעוצמה ובכיוון זרמי חוף, לשינויי ארוזיה או סדימנטציה, לפיזור גלים ולהשפעות על מורפולוגיית חופים (Miller et al., 2013). לכן, בעוד שמתקן בודד צפוי לגרום להשפעות מקומיות בעיקרן, פריסה רחבה מחייבת הערכה מצטברת (cumulative impact assessment) המשלבת מודלים הידרודינמיים, ביוגיאוכימיים ואקולוגיים, לצד תכנון מרחבי ורגולציה תפעולית.

4.2.8 השפעות של זיהום בשמנים ופסולת מוצקה

סביב מערך משמעותי של מתקני אנרגיה ימיים צפויה להתקיים תנועה ימית ערה של כלי שיט העוסקים בשינוע, התקנה, תחזוקה ותמיכה תפעולית. השפעתם הסביבתית צפויה להיות דומה לזו של תשתיות ימיות אחרות (למשל אסדות קידוח והפקה), וכוללת סיכון לזיהום בפסולת מוצקה, דליפות דלק ושמן, רעש, תאורה לילית, ופעילויות חפירה ועיגון (Kulkarni & Edwards, 2022).

ממחקרי ניטור בחוות רוח ימיות בטאיוואן (Yang & Lin, 2022) עולה כי שלב ההקמה מלווה בעלייה מקומית בעכירות, בסיכון לדליפות שמנים וחומרי סיכה, ובהצטברות פסולת תפעולית (כבלים, פלסטיק, חומרי אריזה). עם זאת, כאשר יושמו נהלי ניהול סביבתי קפדניים, לרבות פיקוח הדוק על כלי שיט, מערכות מניעה ודיווח על דליפות, ותכנית איסוף פסולת סדורה – ההשפעות נמצאו מקומיות וזמניות ברובן.

בנוסף להשפעות ישירות מתנועת כלי שיט, יש להביא בחשבון גם השפעות ארוכות טווח הנובעות מקורוזיה של יסודות, עוגנים ומערכות עגינה. כתוצאה מקורוזיה והגנה קתודית, עלולה להתרחש זליגת חומרי בלייה למים, בעיקר באזור המגע מים-אוויר שבו קצב הקורוזיה גבוה יותר. היקף הדלק תלוי בסוג המתכות ובשיטת ההגנה הקתודית, כאשר שימוש באנודות הקרבה מאלומיניום או אבץ עשוי להביא לשחרור מצטבר של כמויות משמעותיות של מתכות – המוערכות אף באלפי טונות בשנה בחוות רוח גדולות (Rezaei et al.,).

(2023). במרבית המקרים מדובר בדילול מהיר בעמודת המים, אך בסביבות רדודות או בעלות חילוף מים מוגבל תיתכן הצטברות מקומית בסדימנט.

5 דיון ומסקנות

5.1 תמונת פערי הידע בנושא השפעות סביבתיות של מתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת

סקירת הספרות נרחבת כללה 233 מאמרים בנושאים רלוונטיים. ריבוי הפרסומים לגבי הערכות פערי הידע בתחום הנסקר, מלמדים על תחום ידע הולך וגדל ופערים הולכים ומצטמצמים בנושאים; בעוד שבנושאים רבים הפערים עדיין משמעותיים.

הנושאים להשלמת פערי ידע מפורטים להלן, לפי סדר חשיבות מדעי וניהולי (מהשפעות מערכתיות רחבות ובלתי־רדודיות ביותר להשפעות נקודתיות יותר):

- מפלים טרופיים והשפעות מערכתיות מצרפיות** - פער הידע הגדול ביותר נוגע להשפעות עקיפות ומדורגות (cascading trophic effects), שבהן שינוי פיזי בקרקעית או בעמודת המים מתגלגל דרך מארג המזון ומשפיע על רמות טרופיות גבוהות יותר (Dannheim et al., 2020). בעוד שהשפעות ישירות (כגון אובדן מצע או תוספת מצע קשה) מתועדות יחסית היטב, ההשלכות המערכתיות – שינוי ביצרנות, ההשפעה על מיקרואגוזמים, פלנקטון, שינוי יחסי טורף-נטרף, שינוי קישוריות בין בתי גידול והפצת מינים מהגרים – אינן מובנות דיין.
- קיימת אירודאות לגבי: הבחנה בין production ל-attraction אמיתי, קנה המידה המרחבי של ההשפעות, אינטראקציה עם שינויי אקלים ולחצי דיג, והשפעות מצרפיות של פריסה נרחבת.**
- שינויי הידרודינמיקה והשפעות בעמודת המים** - השפעות על עמודת המים נחקרו פחות מהשפעות בקרקעית (Shields et al., 2011). קיימים פערים משמעותיים בהבנת: שינויי ערבול ושיכוב, שינויי יצרנות פלאגית, אינטראקציות עם שינויי אקלים, והשפעות מצרפיות של מספר סוגי מתקנים באזור אחד. נדרש מחקר ממוקד ביחסי מינים-הידרודינמיקה בקנה מידה של מתקן ושל מערכת אקולוגית שלמה.
- השלכות ברמת המין והאוכלוסייה הרחבה** - ברוב המחקרים ההערכות נעשות ברמת האתר המקומי בלבד. הערכות השפעה ברמת המין מעבר לאוכלוסייה המקומית נדירות ולרוב חסרות (Taormina et al., 2018). פער זה קריטי במיוחד עבור: מינים נודדים, מינים ארוכי חיים, ומינים רגישים עם קצב התאוששות איטי.
- השפעות קרינה אלקטרומגנטית והשפעות תרמיות של כבלים** - למרות התקדמות משמעותית במחקר בסיסי, עדיין קיימים פערים ניכרים (Copping & Hemery, 2020): מחקרים מועטים על מספר מצומצם של כבלים, מספר מוגבל של מינים נבדקים, חוסר במחקרי שדה ארוכי־טווח, וחוסר התמקדות במינים רגישים (Taormina et al., 2018).
- נדרשת הבנה עמוקה יותר של מנגנוני ניווט והתמצאות** (Gill et al., 2012), במיוחד בדגים דיאדרומיים (דגים הנודדים בין מערכות מים מתוקים לים). בהינתן רדיוס ההשפעה המצומצם של שדות EMF, הסבירות להשפעה רחבת היקף מוערכת כנמוכה, אך איהודאות הביולוגית עדיין קיימת.

ההשפעה התרמית של כבלי החשמל על חברת הקרקעית כמעט ולא הוערכה אין-סיטו (Taormina et al., 2018). נדרשים מחקרים ייעודיים, ולא רק ניסויי מעבדה.

5. **רעש ממתקני גלים** - פערי הידע כוללים (Patrício et al., 2009): חזרה על מספר קטן של מחקרים קיימים, שונות גבוהה בין סוגי מתקנים, תגובות שונות בין מינים.

6. **הצללה וזיהום אור** - השפעת הצללה כמעט ולא נחקרה בים, ורוב המחקרים עוסקים במים מתוקים (Cuce et al., 2022; Sahu et al., 2016). אין כיום בסיס מספק להערכת השפעות הצללה של מתקנים סולאריים ימיים על יצרנות פלאגית. לא נמצאו מחקרים ייעודיים הבוחנים השפעות זיהום אור במתקנים ימיים – מעט מחקרים התייחסו לכך בהקשר של משיכת/דחיקת עופות.

7. **השפעות מתקנים סולאריים צפים** - בתצפיות בים בצפוני לא נמצאו השפעות מובהקות (Ferraro et al., 2023), אך ההשפעה תלויה בגודל הפרויקט, עומק, מרחק מהחוף ותנאים הידרו-אוקיאנוגרפיים מקומיים. נדרש מחקר ייעודי תלוי-אתר.

5.2 השפעות צפויות בים התיכון בישראל

סדרי הגודל של ההשפעות הסביבתיות הצפויות ממתקנים להפקת אנרגיה מתחדשת בים התיכון הישראלי תלויים במספר גורמים מרכזיים: סוג הטכנולוגיה (רוח, גלים, זרמים, פאנלים סולאריים צפים), היקף וכמות המתקנים, תצורת הפריסה המרחבית, עומק ההתקנה, וכן ברגולציה שתוסדר בשלב ההקמה והתפעול. השפעות נקודתיות של מתקן בודד עשויות להיות מוגבלות ומקומיות, אולם בתרחישי פריסה רחבה או מצרפית עשויות להיווצר השלכות מערכתיות משמעותיות יותר.

מרבית בתי הגידול הרגישים בים התיכון הישראלי – ובפרט מסלע קרקעית ומבנים קרבונטיים – מצויים באזורים רדודים יחסית ובקרבה לחוף, לצד ריכוזים נקודתיים נוספים בעומקים גדולים יותר. לפיכך, המלצה תכנונית עקרונית היא להרחיק מתקנים מאזורי החוף הרגישים, ובכך להפחית סיכונים לפגיעה במסלע רגיש, להפחית השפעות על נתיבי נדידת עופות חופיים (במקרה של טורבינות רוח), לצמצם את פוטנציאל תפקודם כאבני מדרך (stepping stones) למינים פולשים, ולהקטין שינויים הידרודינמיים וסדימנטריים באזורי חוף דינמיים.

עם זאת, להרחקת מתקנים מהחוף קיימות גם השלכות נגדיות. אזורים מרוחקים יותר מהחוף חופפים לעיתים לאזורי מחיה ושיחור של עופות ים פלאגיים, וכן עשויים להיות משמעותיים יותר ליונקים ימיים ולדגים פלאגיים. בנוסף, הגדלת המרחק מהחוף מחייבת תשתיות הולכה ארוכות יותר, המגדילות את שטח ההשפעה הפוטנציאלי של כבלי חשמל (כולל שדות אלקטרומגנטיים והשפעה תרמית מקומית), וכן את היקף ההפרעה הזמנית לקרקעית בעת קבורתם. חשיבות גבוהה יש לתזמון בניית התשתית הימית – לדוגמה יש לשאוף להחזיר כלונסאות בעונות פחות רגישות ובאזורים פחות רגישים מבחינת צבי ים ויונקים ימיים, משמע להפחית פעילות באביב ובקיץ, מאחר ונתגלה לאחרונה שיונקים ימיים נמשכים במיוחד לספינות מכמורת ומתקני חקלאות ימית (Zuriel et al., 2023).

ההשפעות הפוטנציאליות של סוגי מתקנים שונים מסוכמות במטריצה כללית (טבלה 8), אולם יש להדגיש כי מדובר בהערכה עקרונית. לצורך קבלת החלטות מושכלת נדרש מחקר ייעודי, ממוקד-אתר וממוקד-טכנולוגיה, שיבחן את ההשפעות המרכזיות הצפויות בהתאם לתצורת הפריסה המתוכננת. מחקרים אלו ניתן ואף מומלץ לבצע במסגרת כלי התכנון וההערכה הקיימים, לרבות מסגרות תכנון מרחב ימי והערכות סביבתיות אסטרטגיות (ראו נספח א').

טבלה 8. השפעות משוערות עיקריות של מתקנים להפקת אנרגיה מתחדשת על הסביבה הימית בישראל על פי גורם ההשפעה, אפקט ההשפעה, מקור האנרגיה והקולטן, 0 = אין השפעה, 1 = השפעה נמוכה, 2 = השפעה בנונית, 3 = השפעה משמעותית. אופי ההשפעה: שלילית (-), חיובית (+), או דו-כיוונית ($\pm$). חשוב לציין שגם השפעות משמעותיות עשויות להיות מקומיות או זמניות, ובכדי להבין את ההשפעה ברמת האוכלוסייה/המין/החברה נדרש מחקר ייעודי.

הערות	מקור אנרגיה					קולטן	אפקט השפעה	גורם השפעה	סוג
	ט	חשמל	זל	ס	מ				
בהינתן פריסת אנרגיית זרם גורם משמעותי	0	0	0	0	0	מערכות אקולוגיות ומארג המזון	התנגשות והילכדות של אורגניזמים	סיכון מכאני	-
	0	0	1	1	ט	יונקים ימיים וצבי ים			-
	3	0	0	0	ט	עופות ים והתווך האווירי			-
	0	0	1	1	2	דגים			-
	0	0	0	0	0	חי בקרקעית רכה			-
	0	0	0	0	0	חי על הקרקעית קשה			-
	0	0	0	0	0	חי בעמודת המים			-
	0	0	0	0	0	חי בסביבה החופית			-
השפעה עקיפה	1	1	1	1	1	מערכות אקולוגיות ומארג המזון	דחיקה זמנית	רעש בעת ההקמה	$\pm$
	1	1	1	1	1	יונקים ימיים וצבי ים			-
	3	1	0	0	ט	עופות ים והתווך האווירי			-
	1	1	1	1	1	דגים			-
	2	2	2	2	2	חי בקרקעית רכה			-
	1	1	1	1	1	חי על הקרקעית קשה			-
	0	0	0	0	0	חי בעמודת המים			-
	0	0	0	0	0	חי בסביבה החופית			-
השפעה עקיפה	1	1	1	0	1	מערכות אקולוגיות ומארג המזון	דחיקה ושינוי התנהגות	רעש בעת התפעול	-
	1	1	1	0	1	יונקים ימיים וצבי ים			-
	3	0	0	0	ט	עופות ים והתווך האווירי			-
	2	2	2	0	2	דגים			-
	2	2	2	0	2	חי בקרקעית רכה			-
	1	1	1	0	1	חי על הקרקעית קשה			-
	1	1	1	0	1	חי בעמודת המים			$\pm$
	0	0	0	0	0	חי בסביבה החופית			-
לא ידוע	0	0	0	0	0	מערכות אקולוגיות ומארג המזון	שיבושים בתנועה ובניווט	שינויים בשדה הקרינה האלקטרומגנטית	-
	1	1	1	1	1	יונקים ימיים וצבי ים			-
	0	0	0	0	0	עופות ים והתווך האווירי			-
	1	1	1	1	1	דגים ודיג			$\pm$
	1	1	1	1	1	חי בקרקעית רכה			-
	2	2	2	2	2	חי בקרקעית קשה			-
	1	1	1	1	1	חי בעמודת המים			-
	0	0	0	0	0	חי בסביבה החופית			-
מפל טרופי, השפעה עקיפה	2	2	2	2	1	מערכות אקולוגיות ומארג המזון	שינוי ביצרנות ראשונית מקומית	שינויים הידרודינאמיים ובהסעת הסדימנט, הצללה	-
	1	0	0	0	0	יונקים ימיים וצבי ים			-
	1	0	0	0	0	עופות ים והתווך האווירי			-
	2	0	0	0	0	דגים ודיג			-
	1	2	2	1	1	חי בקרקעית רכה			-
	1	2	2	1	1	חי בקרקעית קשה			-
	2	2	2	1	1	חי בעמודת המים			-
	1	2	2	0	0	חי בסביבה החופית			-
התחפרות מקומית סביב הרגליים ומערכות העגינה, העשרה מקומית והגברת המגוון הביולוגי, גידול בחסרי חוליות, משיכת דגים, החלפת קרקעית רכה בקשה ואבני דרך למינים מהגרים	2	2	2	2	2	מערכות אקולוגיות ומארג המזון	אפקט שוניית מלאכותית, עליה בביומסה	שינוי מצע (רך לקשה)	$\pm$
	1	1	1	1	1	יונקים ימיים וצבי ים			$\pm$
	0	0	0	0	0	עופות ים והתווך האווירי			$\pm$
	2	2	2	2	2	דגים ודיג			$\pm$
	3	3	3	3	3	חי בקרקעית רכה			$\pm$
	3	3	3	3	3	חי בקרקעית קשה			$\pm$
	0	0	0	0	0	חי בעמודת המים			$\pm$
	1	1	1	1	1	חי בסביבה החופית			$\pm$

הערות	מקור אנרגיה					קולטן	אפקט השפעה	גורם השפעה	סוג
	נזק	שמע	סליל	סליל	יטל				
גורם למשיכה, בלבול, עליה בהתנגשות	1	1	1	1	0	מערכות אקולוגיות ומארג המזון	זיהום אור, שינוי התנהגות לילית	אורות בטיחות, תאורת שירות, רפלקציות ממשטחים	-
	2	2	2	2	0	יונקים ימיים וצבי ים			±
	2	2	2	2	0	עופות ים והתווך האווירי			±
	0	0	0	0	0	דגים ודיג			-
	0	0	0	0	0	חי בקרקעית רכה			
	0	0	0	0	0	חי בקרקעית קשה			
	2	2	2	2	0	חי בעמודת המים			
	0	0	0	0	0	חי בסביבה החופית			
מעט ידוע על ההשפעות של מתקנים מבחינה תרמית. קיימת ודאות להשפעה במקרה יישום OTEC (מוצג כאן). מרבית הספרות על גורמי הולכה עוסקת בבנק התרמי לכבלים עצמם כתוצאה מקבורה ופחות לסביבה, ולא נראה שיש להם השפעה משמעותית. פוטנציאל שינוי מיקרוביאלי.	0	0	0	0	2	מערכות אקולוגיות ומארג המזון	יצירת גרדיאנט תרמי מקומי, שינוי מקומי בשיכוב עמודת המים	ריאקציות וגורמי הולכה אקסותרמיים	-
	0	0	0	0	0	יונקים ימיים וצבי ים			-
	0	0	0	1	0	עופות ים והתווך האווירי			-
	0	0	0	0	2	דגים ודיג			-
	1	1	1	1	1	קרקעית רכה			-
	0	0	0	0	0	קרקעית קשה			-
	0	0	0	0	2	עמודת המים			-
	0	0	0	0	2	הסביבה החופית			-
דליפות שמן בקנ"מ קטן בהקמה\פירוק (אין אחסון שמנים בקנ"מ גדול במתקנים) דומות לתאונות שפך מכלי שיט בהקמת מתקנים בים באופן כללי; מלבד בהינתן יישום OTEC ובו תאונות שפך גדולה של אמוניה או נזל קירור אחר בזמן ההפעלה, השפעות צפויות להיות מקומיות וזמניות	1	1	1	1	2	מערכות אקולוגיות ומארג המזון	תגובות פיזיולוגיות לזיהום ים	שפכים - שמן וכימיקלים אחרים (זיהום נקודתי)	-
	1	1	1	1	1	יונקים ימיים וצבי ים			-
	1	1	1	1	1	עופות ים והתווך האווירי			-
	1	1	1	1	2	דגים			-
	1	1	1	1	1	חי בקרקעית רכה			-
	1	1	1	1	2	חי על הקרקעית קשה			-
	1	1	1	1	2	חי בעמודת המים			-
	1	1	1	1	2	חי בסביבה החופית			-
יכול להעלות יצרנות מקומית/משיכת דגים, אך גם לעודד פריחות/שינוי מקומי	1	1	1	1	0	מערכות אקולוגיות ומארג המזון	העשרה בנטרייטים, שינוי קישוריות	ביופאולינג (צמדה), לשלשת עופות על מתקנים/פאנלים	±
	0	0	0	0	0	יונקים ימיים וצבי ים			±
	0	0	0	0	0	עופות ים והתווך האווירי			±
	1	1	1	1	0	דגים			±
	1	1	1	1	0	חי בקרקעית רכה			±
	1	1	1	1	0	חי על הקרקעית קשה			±
	1	1	1	1	0	חי בעמודת המים			±
	0	0	0	0	0	חי בסביבה החופית			±
עצמה תלויית גודל וצפיפות מתקנים	2	2	2	2	1	מערכות אקולוגיות ומארג המזון	משיכה והתקבצות	צל/מחסה זרימה; מבנה תלת-ממדי; טרף סביב הצמדה	±
	3	3	3	3	2	יונקים ימיים וצבי ים			+
	3	3	3	3	2	עופות ים והתווך האווירי			+
	3	3	3	3	3	דגים ודיג			+
	0	0	0	0	0	חי בקרקעית רכה			
	0	0	0	0	0	חי בקרקעית קשה			
	2	2	2	2	1	חי בעמודת המים			
	0	0	0	0	0	חי בסביבה החופית			±

5.3 השפעות מצטברות

השפעות מצטברות (cumulative impacts) נדונו בהרחבה בספרות, אך הן מאופיינות ברמות איזודאות גבוהות (Hemery et al., 2021). לעיתים רחוקות בלבד מוגדרות דרישות ברורות להיקף וסוג הנתונים הדרושים להערכתן באופן מספק (Caine, 2020). אחת המסגרות המקיפות להערכת השפעות מצטברות (CIA – Cumulative Impact Assessment) עבור מתקני אנרגיה מתחדשת ימיים פותחה באנגליה (Willstead et al., 2017), והיא מדגישה את הצורך במעבר מהערכת מתקן בודד במסגרת רישוי, להערכה אזורית משולבת המבוססת על ניטור ארוך-טווח ומתודולוגיה מתואמת.

האופי המפרקי של תהליכי רישוי – המתמקדים במתקן ספציפי ולא במערכת האקולוגית כולה – אינו מעודד בחינה מלאה של ההשפעות המצטברות של פיתוחים ימיים מתחדשים (Caine, 2020), למרות שחקיקת הערכת ההשפעה הסביבתית של האיחוד האירופי מחייבת עקרונית התייחסות אליהן. לצורך הערכת השפעות מצרפיות נדרשות לרוב גישות מותאמות מקרה, הכוללות מערכות ניקוד, חוות דעת מומחים, תרחישים ומודלים מרחביים, תוך שילוב מיקום המתקנים ביחס ללחצי רקע אחרים ברמת האוכלוסייה והמין (Goodale et al., 2019). מודלים אזוריים שבחנו את כלל הים הצפוני לשנים 1999–2050 הראו כי אזורים רגילים במיוחד מבחינת שילוב השפעות על המערכת האקולוגית, עופות ים ויונקים ימיים, מרוכזים בדרום הים הצפוני (אנגליה–צרפת) ובמזרחו (גרמניה–דנמרק), והדגישו כי הפחתת השפעות מצטברות והגנה על מחזורי החיים של מינים נודדים מחייבות שיתופי פעולה בינלאומיים (Guşatu et al., 2021).

עם זאת, חשוב לציין כי במקרים מסוימים שילוב אפקט השונייה המלאכותית במסגרת הערכות מצטברות הראה כי תוספת מצע קשה והגברת ביומסה מקומית עשויות למתן חלק מההשפעות השליליות המצטברות (Nogues et al., 2021). כלומר, ההשפעה המצטברת אינה בהכרח שלילית באופן חד-כיווני, אלא תלויה באיזון בין השפעות דחיקה והפרעה לבין השפעות יצירת בית גידול חדש.

לסיכום, באזורים רגילים במיוחד או בתרחישי פריסה צפופה ללא תכנון מרחבי משולב, קיימת סבירות לפגיעה במגוון, לשינוי מארג המזון ולהאצת פלישות. עם זאת, תכנון מבוסס-אזור, ויסות צפיפות מתקנים, ניטור מתואם ושילוב שיקולי קישוריות ומסדרונות אקולוגיים עשויים להפחית משמעותית את הסיכון להשפעות מצטברות שליליות.

5.4 המלצות להפחתת השפעות שליליות של מתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת

פיתוח מתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת בים התיכון הישראלי מחייב איזון בין צורכי האנרגיה הלאומיים לבין שמירה על המערכת האקולוגית הימית, המאופיינת ברגישות מרחבית גבוהה, מסדרון נדידה ייחודי ומגוון בתי גידול מוגבלים בשטחם. מרבית ההשפעות הפוטנציאליות אינן תלויות רק בסוג הטכנולוגיה, אלא בעיקר באופן הפריסה, המיקום, הצפיפות, שלבי ההקמה והתפעול, והמסגרת הרגולטורית המלווה את הפרויקט. לפיכך, המלצות להפחתת השפעות צריכות להינתן כבר בשלב התכנון האסטרטגי (SEA), ולא רק במסגרת הערכת השפעה לפרויקט בודד (EIA), ולשלב עקרונות של תכנון מרחבי מבוסס-מערכת (ecosystem-based marine spatial planning).

בחירת הטכנולוגיה צריכה להתבסס על התאמה לאזור מבחינת עומק, משטר גלים וזרמים, רגישות ביולוגית וקונפליקטים עם שימושי ים אחרים. למשל, באזורים רדודים וחוליים ניתן לשקול טכנולוגיות עיליות או מבוססות עמודים, תוך הימנעות ממסלע רגיש; באזורים עמוקים יותר יש לבחון חפיפה עם אזורי פעילות של עופות ים ויונקים ימיים.

המיקום צריך להיקבע תוך הימנעות מאזורים בעלי רגישות גבוהה – מסדרונות נדידה חופיים, אזורי רבייה, גני ספוגים או אלמוגי עומק, ובתי גידול מוגנים. בנוסף, יש לבחון את הקישוריות האקולוגית והאפשרות ליצירת "מחסום מרחבי" או פגיעה ברציפות בתי גידול.

גם התצורה המרחבית חשובה: פריסה מדורגת ומרווחת עשויה להפחית אפקט מחסום ודחיקה, בעוד פריסה צפופה ורציפה עלולה להגביר השפעות מצטברות. יש לשקול האם עדיף מספר קטן של מתקנים גדולים לעומת ריבוי מתקנים קטנים, תוך בחינת חפיפה אנכית עם גבהי תעופה, שטח סריקה והשפעות הידרודינמיות.

לבסוף, יש לשקלל את אורך תשתיות ההולכה הנדרשות, השפעתן האלקטרומגנטית והתרמית, ואת סיכוני הקבורה והתחזוקה. במקרים רבים, בחירה מושכלת של מיקום יכולה להפחית באופן משמעותי את עוצמת ההשפעות, יותר מאשר התאמות טכנולוגיות בשלב מאוחר.

5.4.1 הפחתת הסיכון להתנגשות והילכדות

- כיבוי סלקטיבי של טורבינות רוח בעת לילות של נדידת עופות מאסיבית.
- להעדיף מספר קטן יותר של טורבינות גדולות על פני ריבוי טורבינות קטנות, כדי לצמצם את מספר מוקדי הסיכון, אך רק בכפוף להערכת חפיפה אנכית עם גובה התעופה המקומיים.
- להרחיק מתקנים מאזורי חפיפה מובהקים עם מסדרונות נדידה חופיים.
- לבצע מודלי Collision Risk מותאמים לנתוני מכ"ם מקומיים ולעונות השנה.
- לשלב אמצעי ניהול אדפטיביים כגון השבתה יזומה בעונות שיא נדידה או בתנאי ראות קשים.
- פתרונות טכניים כגון צביעת אחד מלהבי הטורבינות בצבע שחור או בדגם מפוספס ושימוש בתאורה אולטרה-סגולה עשויים להפחית תמותת עופות נודדים ועופות ים.
- הרחקת טורבינות למרחק של כ-8-12 ק"מ מהחוף תפחית את הסיכון לעופות נודדים, שמנמיכים טוס בקרבת החוף לקראת נחיתה, ולעופות שמקננים בחוף, כמו חופמאים, שחפיות ושחפים. אמנם מתקנים רחוקים מהחוף יחפפו יותר שטחים שמאכלסים עופות ים, אבל הסיכון והמישקול של אלו צריך להיות נמוך יותר בנתיבי נדידה המוניים כמו בישראל.
- להפחתת הילכדות בעלי חיים ימיים במערכי עגינה וכבלים חופשיים בעמודת המים יש למזער את נוכחותם ולבחור מערכות בהן הכבלים עבים ומתוחים.

5.4.2 הפחתת השפעות דחיקה

- הימנעות מהקמת מתקנים באזורי ליבה של שיחור מזון, רבייה, ריכוזי נדידה, או מסדרונות אקולוגיים.
- שמירת מסדרונות תנועה – תכנון פריסה המותירה רצועות פתוחות רחבות בין קבוצות מתקנים, והימנעות מפריסה צפופה.
- תזמון פעולות החדרת כלונסאות (pile driving) לעונות פחות רגישות מבחינה אקולוגית, ולהימנע ככל הניתן מביצוע באביב ובקיץ, שבהם מתקיימות פעילויות רבייה, הזנה והטלה של צבי ים, וכן פעילות מוגברת של יונקים ימיים.
- תכנון המתקנים חייב להתבצע כחלק מתהליכי תכנון מרחב ימי (MSP) בכדי להימנע מדחיקת בעלי חיים רגישים כגון עופות ים או יונקים ימיים מאתרי המחיה שלהם.

5.4.3 הפחתת השפעות רעש

- קביעת ספי רעש רגולטוריים (noise thresholds) ברורים וביצוע ניטור אקוסטי בזמן אמת.
- הרחקת בעלי חיים רגישים בעזרת רעשים חלשים יותר טרום ההקמה, למניעת פגיעה בהם בעת ההקמה (ramp up).
- שימוש בטכניקות החדרה בעלות חתימה אקוסטית נמוכה יותר בהשוואה להחדרת כלונסאות, באמצעות: Vibro-piling (Vibratory hammering) – יצירת תנודות בתדירות גבוהה יחסית (בדרך כלל 10–40 Hz) המקטינות את החיכוך בין הכלונס לסדימנט ומאפשרות שקיעה הדרגתית אל תוך

הקרקע; Drilled foundations / Pre-drilling – קידוח מקדים של החור והצבת היסוד בתוכו; Suction bucket foundations – “דלי יניקה” הננעץ בקרקע באמצעות יצירת תת-לחץ, כמעט ללא רעש אימפקטי; Hydraulic pressing – החדרה בלחץ הידראולי רציף.

- שימוש בהתקנים למיתון רעשים מפעילויות החדרת כלונסאות, לדוגמא, מסכי בועות (bubble curtains), מסכי בידוד אקוסטיים (noise mitigation screens), שרוולי בידוד סביב הכלונסאות, או מהדהדי הלמהולץ המשמשים להפחתה של רעש בתדרים מסויימים.
- יצירת מוקדי משיכה זמניים ומבוקרים ליונקים ימיים הרחק מאזורי העבודה, ובכך לצמצם סיכון לחשיפה לרעש ולהפרעה ישירה.

5.4.4 הפחתת השפעות שדות אלקטרומגנטיים

- מומלץ לקבור כבלי כוח על מנת להפחית את השפעתם על הביוטה הימית בקרבתם. עומק הקבורה ייקבע באמצעות הערכת סיכוני קבורת כבלים באתר (Cable Burial Risk Assessment) המבוססת על סקר סדימנטים, דינמיקת קרקעית, שימושי ים וסיכוני עוגנים/דיג.
- מומלץ לא לפרוש כבלי כוח גדולים על מסלע מורכב, לא בנתיבי נדידה של צבי ים אל חופי הטלה וכן בקרבת ריכוזי דגי סחוס, ככל שאלו ידועים, ובטווחי בטחון התואמים את הממצאים (עשרות עד מאות מטרים).
- כבלי DC נחשבים ליוצרי שדות אלקטרומגנטיים חזקים מאלו של כבלי AC אך לשדות ה-AC החשמליים יש “טווח ארוך” יחסית. יש לשקלל פרט זה במערך השיקולים שיקבעו באיזה כבלים ייעשה שימוש.
- לצמצום שדות אלקטרומגנטיים יש להעדיף תצורות שמבטלות שדה מחוץ לכבל: כבלי HVAC תלת-ליבתיים/תצורת trefoil צפופה, ובמערכות DC להעדיף HVDC דו־קוטבי עם מרווח מינימלי בין המוליכים ואיזון זרמים.
- במקטעים סמוכים לאזורי רגישות ידועים (דגי סחוס/בתי גידול קריטיים) יש לשקול שילוב עומק קבורה מוגבר או פתרונות מיגון/כיסוי מקומיים.

5.4.5 שינויים בבית הגידול בקרקעית

- יש להימנע מהצבת מתקנים על גבי בתי גידול רגישים, ובפרט מצעים קשים טבעיים, שוניות סלע, אזורי אלמוגים רכים או ריכוזי מינים נדירים. במידת האפשר, יש להעדיף פריסה על מצע רך שאינו מאכלס חברות ייחודיות או מוגנות.
- יש לפעול לעידוד שימושים משולבים ברי קיימא כשטחים מוטי פיתוח או שימור על פי מטרות הניהול על מנת לעודד את אפקט השוניית המלאכותית המשמש להגברת המגוון הביולוגי בקרקעית ובעמודת המים. מתקנים בעלי מורכבות מבנית גבוהה, הכוללים נישות, חספוס ומגוון מיקרובינטי גידול, צפויים לתרום להגברה הזו.
- בעת תכנון המתקנים יש להעדיף חומרים ותצורות המדמים מצע טבעי (למשל בטון בעל טקסטורה מחוספסת ומורכבות מבנית גבוהה), ולהימנע ככל האפשר ממשטחים חלקים ואחידים המקדמים התיישבות של מינים קוסמופוליטיים או פולשים.
- מיקום מתקנים במרחק מספק מהחוף עשוי להפחית את הסיכון להשפעות על זרימת סדימנט חופית, על תהליכי ארוזיה והסעת חול, וכן להפחית את הסיכון לשמש כאבני מדרך למינים פולשים

בקרב אזורי חוף רגישים. עם זאת, יש לאזן זאת מול השפעות אפשריות במים עמוקים יותר ובבתי גידול פלאגיים.

- המלצה לשלב מתקנים עם חקלאות ימית משולבת (IMTA) של (למשל: אצות, צדפות, דגים). עם זאת, יישום גישה זו מחייב ביצוע ניטור ומחקר מקיפים, בדגש על השפעות שינויים בריכוזי נוטריינטים על המערכת האקולוגית המקומית.

5.4.6 שינויים בעמודת המים

- בפריסה נכונה, מתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת עשויים לתרום למיתון מקומי של אנרגיית גלים ולהפחתת בליית חוף, במיוחד כאשר הם ממוקמים באזורים חשופים לסערות. עם זאת, יש להעריך מראש את ההשפעה המצטברת על דינמיקת הזרמים והסעת הסדימנט, כדי למנוע שינוי לא רצוי במשטר החופי.
- יש לבחון אפשרות לשילוב תשתיות (co-location), למשל הצבת מתקנים סמוך למוצאי מי קירור של תחנות כוח חופיות, באופן שיאפשר מיתון תרמי, שיפור ערבול או ניצול משותף של תשתיות הולכה — תוך הקפדה על הערכת השפעות מצטברות על טמפרטורה, מליחות, חמצן ומבנה הטרופי בעמודת המים.
- במתקני מחליפי חום להפקת אנרגיה (כגון OTEC או מערכות קירור/חימום ימי), מומלץ לתכנן את עומק פליטת המים כך שצפיפות מי המוצא תהיה דומה לצפיפות מי הסביבה (neutral buoyancy discharge). תכנון כזה מפחית ערבול אנכי בלתי מבוקר, מקטין יצירת פלומות תרמיות ומצמצם השפעה על שיכוב מקומי ועל פלנקטון.

5.4.7 הפחתת השפעות תאורה

- יש לצמצם תאורה עודפת למינימום הנדרש לצורכי בטיחות ותפעול, במיוחד כאשר האור מופנה כלפי מעלה (סיכון לעופות נודדים) או חודר לעמודת המים (השפעה על נדידה אנכית יממית בפלנקטון, והשפעות מצטברות במארג המזון).
- יש להעדיף תאורה ממוסכת (shielded lighting) ומכוונת כלפי מטה בלבד, כדי לצמצם זליגת אור לשמים ולמרחקים גדולים.
- מומלץ להשתמש בתאורת LED בתחום אורכי גל אדומים-כתומים (590–750 ננומטר), אשר השפעתם נמוכה יחסית על רוב האורגניזמים הימיים ועל עופות נודדים, ולהימנע ככל האפשר מתאורה לבנה-כחולה בעוצמה גבוהה.
- יש להעדיף תאורה מהבהבת בעצימות נמוכה על פני תאורה רציפה בעוצמה גבוהה, במיוחד בתאורת אזהרה לטורבינות רוח, בהתאם להנחיות בטיחות אווירית.
- מומלץ לשלב טיימרים, חיישני תנועה ומערכות עמעום (dimming) להפחתת זמן ועוצמת ההארה.
- יש להימנע משימוש בזרקורים חזקים או בהארה קבועה של אזורי עבודה שאינם פעילים.
- יש לשלב ניטור ייעודי לבחינת השפעות התאורה על הביטה המקומית, במיוחד בעונות נדידה ובאזורים רגישים, כחלק מתכניות ניטור מסוג BACI.

5.5 המלצות ניטור ונושאים למחקר עתידי

5.5.1 המלצות ניטור וצמצום פערי ידע

מערכת ניטור אפקטיבית למתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת חייבת להיות: אחידה ומתואמת ברמה אזורית, מבוססת מודלים אך מגובה בנתונים אמפיריים, מתחילה לפני ההקמה ונמשכת לאורך חיי הפרויקט, ומתמקדת הן בהשפעות ישירות והן בהשפעות מצטברות ומערכתיות.

להלן דגשים לניטור שיאפשר החלטות מבוססות-ראיות, צמצום איזודאות וניהול אדפטיבי של השפעות מתקנים להפקת אנרגיה מתחדשת בים התיכון הישראלי:

1. האחדת שיטות וניהול מידע

יש לפעול להאחדת שיטות הניטור והמחקר בהתאם לסטנדרטים איכותיים קיימים, ולהתבסס על גוף הידע הקיים לצורך תכנון ניטור יעיל וממוקד (Copping & Hemery, 2020). מומלץ להקים מאגרי מידע לאומיים או אזוריים שירכזו את כלל הנתונים הנאספים מפרויקטים שונים בפורמט אחיד. מאגרים אלו ימנעו אובדן מידע עם סיום פרויקט, יאפשרו ניתוח מגמות ארוכות טווח ויתרמו להבנת השפעות מצטברות (Caine et al., 2020; Willsted et al., 2017).

2. תכנון ניסויי ומחקרי

מחקרי BACI (Before–After–Control–Impact) נמצאו יעילים במיוחד להבנת השפעות מתקנים ימיים, ומומלץ לתכנן ולהתחיל בניטור בסיסי עוד בטרם פריסת המתקנים (Copping & Hemery, 2020; Li et al., 2023). מודלים כמותיים עשויים להיות כלי מרכזי בהכוונת הניטור, אך יש לזהות את המודלים המתאימים לכל סוג מתקן ולכל קולטן, ולכילם מול נתונים אמפיריים מהשטח (Alexander et al., 2016; Amerson et al., 2022). מודלים להערכת סיכון התנגשות, למשל, מבוססים לרוב על תדירות תצפיות ועל הנחות בדבר הימנעות והתנהגות. לפיכך, יש לאסוף נתונים אמפיריים מקומיים על דפוסי תנועה, הימנעות והתחמקות של מינים רלוונטיים (למשל צבי ים לעומת יונקים ימיים), שכן התנהגות זו משתנה בין אזורים ומינים (Amerson et al., 2022).

3. ניטור המגוון הביולוגי בדגש מינים מוגנים ורגישים

יש להתאים תכניות ניטור קיימות למינים מוגנים בהתאם לסוגי המתקנים המתוכננים, ולהתחיל בניטור מוקדם ככל האפשר. במקרה של תוספת מצע קשה ותפקודו כשונית מלאכותית, יש לבצע מידול וניטור ייעודי של השפעותיו על מינים רגישים, כולל משיכת טורפים או שינויים במארג המזון (Edelist & Spanier, 2009).

ניטור אקוסטי פאסיבי (PAM) מהווה כלי מרכזי לניהול סיכונים ליונקים ימיים, ויש לשלב מערכות ניטור נייחות כחלק מאסטרטגיית הניהול (Van Parijs et al., 2021). גישה זו כבר יושמה בישראל (Zuriel et al., 2023) וניתן להרחיבה למתקני אנרגיה מתחדשת.

תיוג אקטיבי (טלמטריה אקוסטית או לוויינית) הוכיח עצמו ככלי יעיל להבנת דפוסי תנועה של כרישים וצבי ים בישראל (Levi & Ribak, 2023; אריאל & ברש, 2015), ויכול לסייע בזיהוי חפיפה מרחבית עם אתרי הקמה ותפעול. לדוגמה, תיוג כלבי ים באנגליה הראה כי פרטים נעו למרחקים של 6–46 ק"מ מאתרי בנייה ונחשפו לרמות רעש של 147–169 דציבל במהלך החדרת כלונסאות (Hastie et al., 2016), נתון המדגיש את חשיבות ההבנה המרחבית של חשיפה.

4. קרינה אלקטרומגנטית והשפעות גנטיות

בהינתן פערי הידע הקיימים, יש לבצע מחקר ייעודי באתרים המתוכננים להקמה לבחינת השפעות אפשריות של קרינה אלקטרומגנטית על מינים רגישים ומוגנים, לרבות בחינה של מדדים גנטיים ומולקולריים בתנאי שדה.

5. בתי גידול בקרקעית

כאשר המתקנים ממוקמים בקרבת בתי גידול של חסרי חוליות רגישים בקרקעית, יש לכלול אותם במפורש בתכנית הניטור, הן על גבי המבנים והן בסביבתם הקרובה, ולבחון השפעות ישירות ועקיפות.

6. ניטור סביבתי מחייב לכל מתקן

יש לחייב כל פרויקט בניטור סביבתי מקדים הכולל סקר ביולוגי כימי ופיזיקלי בסיסי, ולאחריו ניטור מתמשך בשלב ההקמה והתפעול. ניטור זה צריך לכלול מדדים פיזיקליים (רעש, זרמים, עכירות), ביולוגיים (עושר מינים, ביומסה, דפוסי תנועה) ותפקודיים (מארג מזון, קישוריות), ולהיות מתואם למסגרות תכנון אזוריות.

5.5.2 דגשים לניטור ציפורים נודדות ועופות ים סביב מתקנים

נוכח חשיבותו של הים התיכון הישראלי כמסדרון נדידה מרכזי וכאזור פעילות של עופות ים, נדרש מערך ניטור ייעודי, רב־שנתי ומשולב, שיאפשר הערכת סיכונים מדויקת וניהול אדפטיבי של מתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת ויכלול את הדגשים הבאים:

- **מסגרת רגולטורית ותכנונית** - החקיקה האירופית מחייבת ביצוע הערכות סביבתיות אסטרטגיות (SEA) ברמה הלאומית עבור תכניות חוות רוח ימיות, והערכות השפעה על הסביבה (EIA) לפרויקטים בודדים העלולים להשפיע על עופות. מומלץ להגדיר מסגרת רגולטורית דומה בישראל, שתכלול דרישות ניטור אחידות, ספי פעולה (thresholds) ותכנית ניהול אדפטיבי.
- **מיפוי מסדרונות נדידה בתלת־ממד** - יש לעשות שימוש נרחב בנתוני מכ"ם אזוריים וצבאיים (מכ"ם מזג אוויר, בקרת תעבורה אווירית ומערכות צבאיות), כדי להגדיר מסלולים, גבהי תעופה והתנהגות של עופות נודדים, ולמפות מסדרונות נדידה בתלת־ממד (Fox et al., 2006). שילוב נתונים אלו עם נתוני מזג אוויר יאפשר זיהוי תנאים המגבירים סיכון (ראות נמוכה, רוחות נגדיות, עננות נמוכה).
- **סקרים אוויריים וימיים להערכת שימוש בבית גידול** - באמצעות סקרים אוויריים וימיים שיטתיים ניתן לאמוד צפיפות עופות ים כמדד לזמינות בית גידול, ולהעריך אובדן פיזי של בית גידול עקב דחיקה, או לחלופין תוספת בית גידול כתוצאה מאפקט שונית מלאכותית. ניטור זה צריך לכלול השוואה בין אזורי חווה לאזורי ביקורת.
- **ניטור אורך טווח והשפעות מצטברות** - מחסור בניטור אורך טווח מקשה על הבנת השפעות מצטברות. יש לייסד תכניות ניטור רב־שנתיות של עופות ים ועופות נודדים, ולא להסתפק במחקרים נקודתיים טרום־הקמה. הניטור צריך להעריך במקביל דחיקה, התנגשות והשפעות מצטברות של אובדן בית גידול (Rees & Rees, 2012; Rezaei et al., 2023). תוצאות הניטור צריכות להיות זמינות לציבור ולחוקרים, כדי לאפשר למידה מצטברת.
- **מחקר מפורט של נתיבי טיסה וחפיפה אנכית** - יש לבצע מחקרים מפורטים של נתיבי טיסה בקרבת החוף ובאזורי תכנון לפני פריסה, הן בעונות נדידה והן בעונות פעילות מקומית של עופות ים. נתונים אלו צריכים לשמש כקלט למודלים להערכת סכנת התנגשות (Collision Risk Models), תוך שילוב גבהי תעופה והתנהגות הימנעות (Rees & Rees, 2012).
- **הערכת השלכות אנרגטיות ודמוגרפיות** - יש להבין את העלויות האנרגטיות של תגובות הימנעות ושל דחיקה מבית גידול, במיוחד עבור עופות ים המקננים או משחרים מזון באזור. רק שילוב של נתוני תנועה, הוצאות אנרגטיות ומודלים דמוגרפיים יאפשר חיזוי השפעות ברמת האוכלוסייה.

- **שיפור פרמטרי הימנעות במודלי סיכון** - מודלי סיכון התנגשות מוגבלים לעיתים בשל היעדר נתונים ספציפיים למין על שיעורי הימנעות, דחיקה והתנהגות התחמקות. לכן יש צורך דחוף באיסוף נתונים אמפיריים על תגובות מינים מקומיים למתקנים, ועל השלכות שינוי בתי גידול ונתיבי תעופה עבור מיני מפתח (Fox et al., 2006).
- **תעדוף מינים רגישים** - יש להגדיר מראש את מיני העופות המרכזיים הנוכחים באזורי התכנון, ולהעריך עבורם את הסיכון במונחים של: דפוסי תעופה וגובה, נטייה להימנעות או משיכה, רגישות לאובדן בית גידול, וסיכון להתנגשות.

בישראל, יש לקדם מחקרים ייעודיים של מאפייני הנדידה, השהות וההתנהגות של בעלי כנף במרחב הימי, מאחר ועד היום לא בוצעו מחקרים להערכת השפעתם של מתקנים ימיים לאורך חופי ישראל, וזאת בכדי שישמשו בסיס ידע לדיוני תכנון טרם הקמתם (אופיר, 2022). מירוז (2013) הציע קווים מנחים לתכנית ניטור לעופות נודדים בישראל (טבלה 9), וניתן לעדכןם ולהרחיבם בהתאם לטכנולוגיות החדשות ולפריסות הימיות המוצעות.

טבלה 9. קווים מנחים לתכנית ניטור מקדמית של השפעת מתקנים ימיים על עופות ים. מקור: (מירוז, 2013).

פערי המידע	פרמטרים נבדקים	פעולות לביצוע	עזרים/הערות
היקף נדידת היום בגזרת המתקנים	מספר העופות החולפים בחלוקה למינים ומרחק מהחוף	זיהוי וספירה של עופות חולפים על ידי צפרים שיוצבו על האסדות	עזרים אופטיים קונבנציונליים (משקפת וטלסקופ)
היקף נדידת היום והלילה בגזרת המתקנים	מספר העופות החולפים בחלוקה למינים ומרחק מהחוף	הפעלת מערכת אלקטרואופטית	
תזמון הנדידה	זיהוי גלי נדידה עיקריים	הפעלת הסוקרים לאורך כל תקופת הנדידה (אוגוסט – נובמבר)	
הערכת מספר העופות ומגוון המינים שבסיכון להתנגשות	אילו מיני עופות וכמה פרטים חולפים במעוף נמוך בגזרת המתקנים	רישום מדויק של החולפים ע"פ מרחקם מהאסדה	הערכת צופה בסיוע המערכת האלקטרואופטית
מספר העופות המתנגשים בפועל במתקנים הקיימים	מספר התנגשויות (במתקן/לילה)	חיפוש פגרים בקרבת המתקנים מידי בוקר (מרבית התאונות מתרחשות בלילה)	יתכן צורך בהתקנת משטחים לאיסוף פגרים
השפעת תנאי מז"א וראות על ההסתברות להתנגשות עופות במתקנים	השפעת רוח, תנאי ראות ומשקעים על עוצמת הנדידה, גובה הנודדים ומרחקם מהאסדות	איסוף נתוני תחנות מטאורולוגיות ורישום מדויק של תנאי מז"א וראות במקביל לאיסוף נתוני הנדידה.	דורש ניתוח אחר להבנת הקשר בין התנאים הסביבתיים לאירועי נדידה חריגים

5.5.3 דגשים לניטור השפעות כבלים וקרינה אלקטרומגנטית

נוכח פערי הידע הקיימים ביחס להשפעות שדות אלקטרומגנטיים (EMF) הנובעים מכבלי הולכת חשמל תת-ימיים, נדרש מערך ניטור מבוסס-סיכון המשלב אפיון הנדסי, מדידות שדה אמפיריות ומחקר ביולוגי ייעודי.

- **אפיון הנדסי מוקדם של השדות** - יש לאפיין מראש את תצורת השדות האלקטרומגנטיים הצפויים בהתאם לסוג המערכת: זרם חילופין (AC) לעומת זרם ישר (DC), כבל בודד לעומת מערך כבלים, תצורת תלת-פאזי לעומת HVDC דו-קוטבי, ומרווחי מוליכים. מאפיינים אלו משפיעים באופן מהותי על עוצמת השדה, תבניתו המרחבית וקצב דעיכתו (Luana et al., 2022b). אפיון זה צריך להוות בסיס לתכנון תכנית הניטור ולהגדרת נקודות דיגום.
- **מדידות שדה אמפיריות במרחב ובזמן** - יש לבצע מדידות בפועל של עוצמות השדה המגנטי והחשמלי לאחר התקנת הכבלים, הן בעמודת המים והן בקרקעית, ובטווחים אופקיים ואנכיים הרלוונטיים לחשיפה פוטנציאלית של בעלי חיים. המדידות צריכות לשקף שינויים בעומס הזרם לאורך זמן (עומסי שיא לעומת עומס בסיס), ולהיות מקושרות לעומק הקבורה ולמאפייני המצע (Formicki et al., 2021). ניטור זה חיוני לאימות תחזיות המידול ולהפחתת איודאות.
- **מחקרי מינון-תגובה ומידול אקולוגי** - קיים צורך בביצוע מחקרי מינון-תגובה (Dose-Response) בסיסיים במינים מקומיים כולל רגישים, במטרה לזהות ספי תגובה, טווחי רגישות וסוגי תגובות (התנהגותיות, פיזיולוגיות או מולקולריות). מחקרים אלו צריכים להבחין בין חשיפה לשדות בעוצמות קיצוניות שאינן רלוונטיות לתנאי שטח, לבין עוצמות אופייניות לכבלי אנרגיה תתי-ימיים. בנוסף, מומלץ לפתח כלי מידול המשלבים את תוצאות מחקרי המינון-תגובה עם מודלים מרחביים ואקולוגיים, כדי להעריך השלכות ברמת האוכלוסייה ולא רק ברמת הפרט (Copping & Hemery, 2020). שילוב זה חיוני במיוחד עבור מינים נודדים או דיאדרומיים.
- **ניטור ארוך טווח והשפעות מצטברות** - יישום מחקר וניטור ארוך טווח יאפשר להעריך השפעות מצטברות, ובפרט השפעות על שלבי חיים רגישים כגון ביצים, פגיות ושלבים עובריים (Luana et al., 2022b). ניטור זה צריך לכלול השוואה בין אזורים עם כבלים פעילים לאזורי ביקורת, וכן לבחון אינטראקציות אפשריות עם גורמי לחץ נוספים כגון רעש, התחממות מקומית או שינויי מצע.

5.6 סיכום ממצאים עיקריים

סקירת הספרות המקיפה שנערכה בדו"ח זה מצביעה על כך שמתקנים ימיים להפקת אנרגיה מתחדשת אינם צפויים, ככלל, לגרום לפגיעה מערכתית קריטית במערכת האקולוגית הימית – וזאת בתנאי שמיקומם ייבחר בקפידה, תוך הימנעות מאזורים רגישים במיוחד, ותוך יישום רגולציה סביבתית מחמירה ואמצעי הפחתה מתאימים (Hemery et al., 2021). עם זאת, ההשפעות אינן אחידות: מינים מסוימים וקבוצות פונקציונליות מסוימות עשויים להיפגע יותר מאחרים, ובמיוחד בטווחי זמן קצרים עד בינוניים.

ההשפעות הנחקרות ביותר בעולם הן סיכוני התנגשות בעופות וביונקים ימיים, וכן השפעות רעש תתי-ימי בשלב ההקמה. לצד אלו, הולך ומצטבר ידע בנוגע להשפעות שדות אלקטרומגנטיים מכבלי הולכה, שינויים הידרודינמיים וסדימנטולוגיים, ושינויים בבתי גידול כתוצאה מהוספת מצע קשה מלאכותי. עם זאת, חלק ניכר מהמחקרים נערכו בשלבים מוקדמים של פיתוח אתרים, כאשר המערכת האקולוגית טרם הגיעה לשיווי משקל חדש. לפיכך, הדפוסים שתועדו עד כה משקפים במקרים רבים השפעות קצרות טווח או שלבי הסתגלות ראשוניים, ולא בהכרח מצב יציב ארוך טווח (Rezaei et al., 2023).

בהקשר של הים התיכון הישראלי, ייחודיותו האוקיאנוגרפית והאקולוגית – מערכת אולטרה-אוליגוטרופית, התחממות מואצת, פלישת מינים תרמופיליים ושיעור גבוה של מצע קשה רגיש – מחייבת זהירות מיוחדת. מתקנים עשויים להוות מוקדי שינוי מקומיים משמעותיים, הן דרך יצירת שוניות מלאכותיות והעשרת בתי

גידול, והן דרך יצירת "אבני מדרג" למינים מהגרים ופולשים. מאידך, הרחקת דיג מאזורים מסוימים עשויה ליצור אפקט דמוי שמורה ימית ולהיטיב עם חלק מהמינים המקומיים.

קיימת אירודאות מדעית ניכרת בנוגע להשפעות מצטברות, להשפעות ארוכות טווח ולתגובות ברמת אוכלוסייה ומארג מזון. לפיכך, פיתוח עתידי מחייב תכנון מוקדם משולב, יישום גישת ניהול אדפטיבית, וניטור ארוך טווח – רצוי בגישת BACI – שיאפשר אבחנה בין תנודתיות טבעית לבין השפעות אנתרופוגניות.

בסיכומו של דבר, מתקני אנרגיה מתחדשת בים מהווים הן מקור פוטנציאלי להפחתת פליטות גזי חממה והן גורם שינוי סביבתי שיש לנהל בזהירות. המפתח לפיתוח בר-קיימא טמון בתכנון מרחבי מושכל, התאמת טכנולוגיה לאתר, רגולציה ברורה, ושקיפות נתונים שתאפשר למידה מצטברת לאורך זמן.

להלן סיכום המציג נקודות חשובות המסכמות את הממצאים העיקריים לפי נושאים:

1. התנגשות והילכדות

- סיכון משמעותי בעיקר לעופות נודדים ולעופות ים (טורבינות רוח).
- סיכון פוטנציאלי ליונקים ימיים וצבי ים בטורבינות זרם.
- ניתן להפחית סיכון באמצעות תכנון מיקום, השבתה יזומה בלילות נדידה, וטכנולוגיות הרתעה.

2. דחיקה ואובדן בית גידול

- רעש והפרעה עלולים לגרום לדחיקת יונקים ימיים ועופות.
- השלכות אנרגטיות לעופות עקב הארכת נתיבי תעופה.
- דחיקת דיג עשויה ליצור אפקט שמורה מקומי.

3. רעש תתימי

- עוצמות גבוהות במיוחד בשלב החדרת כלונסאות (>200 דציבל).
- פגיעה אפשרית בשמיעה ובתקשורת של יונקים ימיים.
- שלב התפעול לרוב בעל השפעה נמוכה יותר.

4. שדות אלקטרומגנטיים (EMF)

- השפעה מקומית בעיקר בקרקעית.
- רגישות אפשרית בדגי סחוס, צבי ים וחלק מחסרי החוליות.
- קבורת כבלים ושימוש ב-HVDC דוקטבי מפחיתים השפעה.

5. שינויי בית גידול – מצע קשה ושוניות מלאכותיות

- יצירת מצע להתיישבות חסרי חוליות ישיבים ודגים.
- פוטנציאל העשרה מקומית.
- סיכון להתיישבות מינים פולשים – רלוונטי במיוחד לים התיכון הישראלי.
- שינויים בהרכב המינים המקומי, לעיתים עם דומיננטיות של מינים אופורטוניסטיים.
- השפעה אפשרית על מארג המזון דרך שינוי זמינות טרף והגברת מורכבות מבנית.

6. שינויים הידרודינמיים וסדימנטולוגיים

- השפעות מקומיות על זרימה והסעת סדימנט.
- סיכון מוגבר בקרבה לחוף (בליה חופית).
- רלוונטיות גבוהה לתכנון מיקום.

7. השפעות בעמודת המים

- הצללה (במתקנים סולאריים) עשויה להשפיע על יצרנות.
- שינויים מקומיים בזרימה ובערבוב.
- פוטנציאל להשפעה מקומית על עושר והרכב הפלנקטון.
- השלכות אפשריות על מארג המזון הפלאגי ועל קישוריות בנתית-פלאגית.

8. השפעות מצטברות

- קושי בהערכתן בשל מחסור בנתוני ארוכי טווח.
- צורך בשילוב מודלים אקולוגיים עם ניטור אמפירי.
- חשיבות לשיתוף פעולה אזורי ובינלאומי.

9. איודאות ופערי ידע

- מחסור במחקר באגן הלבנטיני לעומת צפון אירופה.
- מחסור בנתוני BACI ארוכי טווח.
- חסרים בנתונים ברמת אוכלוסייה ומארג מזון.

10. עקרונות מפתח לפיתוח בר־קיימא

- תכנון מרחבי מוקדם והימנעות מאזורים רגישים.
- התאמת טכנולוגיה לתנאים האוקיאנוגרפיים המקומיים.
- רגולציה סביבתית מחייבת וברורה.
- ניטור ארוך טווח ושקיפות נתונים.
- ניהול אדפטיבי מבוסס ראיות.

6 נספחים

6.1 נספח א. יזמת האנרגיה הבינלאומית

Ocean Energy Systems (OES) הינה תכנית בין-ממשלתית גדולה לשיתוף פעולה בין מדינות שנוסדה ב-2001. התכנית הוקמה על ידי סוכנות האנרגיה הבינלאומית (IEA) בפרזי ושותפים בה האיחוד האירופי, אנגליה, ארה"ב וכעשרים מדינות נוספות.

לשם פיתוח והנגשת הידע בתחום השפעות אנרגיה מתחדשת על הסביבה הימית, פותח על ידי OES, בביצוע משרד האנרגיה האמריקאי והמעבדה הלאומית של צפון הפסיפי PNNL, בסיס מידע מחקר ועבודה בשם **Tethys**. תטיס משלבת מאגר מחקרים גדול ומפורט עם יכולות ניתוח מתקדמות של השפעות שונות ועוסקות בשוטף בכל סוגי ההשפעות של מתקנים להפקת אנרגיה מתחדשת על הסביבה הימית. במאגר קיימים מעל 200 בסיסי נתונים זמינים להשוואה ומטא-אנליזה ממקומות שונים בעולם, מאגר ספרות מקצועית וטכנית, ומעל 8,400 פרסומים - מאמרים, ספרים, פרקים ודו"חות טכניים וגם כלי ניתוח מתקדמים שלהם: כלים לבחינת יעילות אמצעי ניטור ואמצעי הפחתת השפעה, ניתוח חוזקות וחולשות, כלים לבחינת השפעות מצטברות בשלבי הפרויקט השונים ועוד. ניתן לסנן את החיפוש לפי סוג הפרסום, הטכנולוגיה (סוג המתקן), הקולטן (סביבה או טקסון), שנת הפרסום, הארץ, המיקום והזמינות (איור 20). מאד רצוי לשלב את הכלי לבחון הצעות לפרויקטים חדשים לגופם, תוך שימוש בכלים שהתכנית מציעה.

Current Search

8444 results found

Content Type

- ☐ Journal Article (4210)
- ☐ Report (2426)
- ☐ Conference Paper (460)
- ☐ Book Chapter (327)
- ☐ Thesis (232)
- ☐ Presentation (216)
- ☐ Project Site (138)
- ☐ Book (86)
- ☐ Website (73)
- ☐ Workshop Article (64)
- ☐ Research Study (56)
- ☐ Summary (50)
- ☐ Magazine Article (48)
- ☐ Guidance (39)
- ☐ Video (17)

Receptor

- ☐ Human Dimensions (2684)
- ☐ Birds (1994)
- ☐ Marine Mammals (1005)
- ☐ Fish (994)
- ☐ Bats (902)
- ☐ Physical Environment (721)
- ☐ Invertebrates (565)
- ☐ Ecosystem Processes (345)
- ☐ Reptiles (134)
- ☐ Terrestrial Mammals (75)

Year Published

- ☐ 2024 (1)
- ☐ 2023 (83)
- ☐ 2022 (437)
- ☐ 2021 (510)
- ☐ 2020 (732)

(Show more)

Technology

- ☐ Wind Energy (4867)
- ☐ Fixed Offshore Wind (2245)
- ☐ Land-Based Wind (1861)
- ☐ Floating Offshore Wind (279)
- ☐ Marine Energy (2960)
- ☐ Tidal (1055)
- ☐ Wave (818)
- ☐ OTEC (94)
- ☐ Riverine (91)
- ☐ Ocean Current (48)
- ☐ Salinity Gradient (19)

(Show more)

Country

- ☐ United States of America (1814)
- ☐ United Kingdom (1078)
- ☐ Canada (258)
- ☐ Germany (240)
- ☐ Denmark (174)
- ☐ Spain (156)
- ☐ Netherlands (142)
- ☐ Australia (113)
- ☐ China (112)
- ☐ Sweden (107)

(Show more)

Attachment

- ☐ PDF on Tethys (3991)

Cumulative impacts of offshore windfarms

Abstract

Offshore windfarms intrude upon an environment already heavily affected by human activities such as shipping and fishing. As they are large and complex installations and given the large numbers planned, offshore windfarms can be expected to have significant impacts on marine ecosystems with long lasting effects from both construction and operation. Environmental impacts of offshore windfarms include destruction of the sea bottom and benthic communities, disruption of migrating species such as birds via barrier effects, and disturbance of sound sensitive marine species through increased underwater noise. The various impacts affect species both concurrently and sequentially at different life stages and should therefore be assessed from a cumulative perspective.

Click here to view the book *Ecological Research at the Offshore Windfarms alpha version: Challenges, Results and Perspectives*.



Book Chapter

Title: Cumulative impacts of offshore windfarms

Author: Denman, H. J., Hensch, T.

Publication Date: January 1, 2014

Book Title: Ecological Research at the Offshore Windfarms alpha version: Challenges, Results and Perspectives

Chapter: 17

Pages: 151-168

Publisher: Springer

Affiliation: Federal Environment Agency (Umweltbundesamt - UBA), German Federal Agency for Nature Conservation (BfN)

Technology: Wind Energy, Fixed Offshore Wind

Receptor: Physical Environment

Document Access

Webster: External Link 0

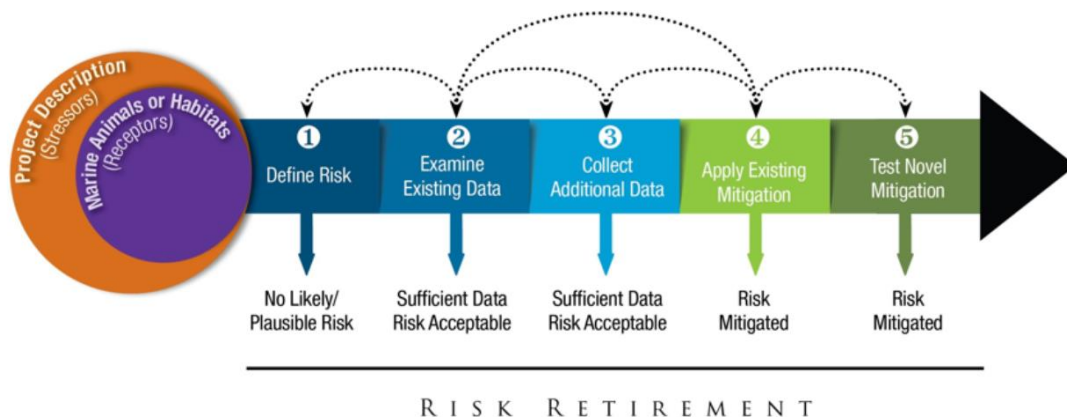
Citation

Denman, H. J., Hensch, T. (2014). Cumulative impacts of offshore windfarms. In *Ecological Research at the Offshore Windfarms alpha version: Challenges, Results and Perspectives*.

איור 20. חיפוש בבסיס הנתונים של טטיס לפי נושאים (ימין) ודוגמה להורדת מאמר (שמאל). מקור:

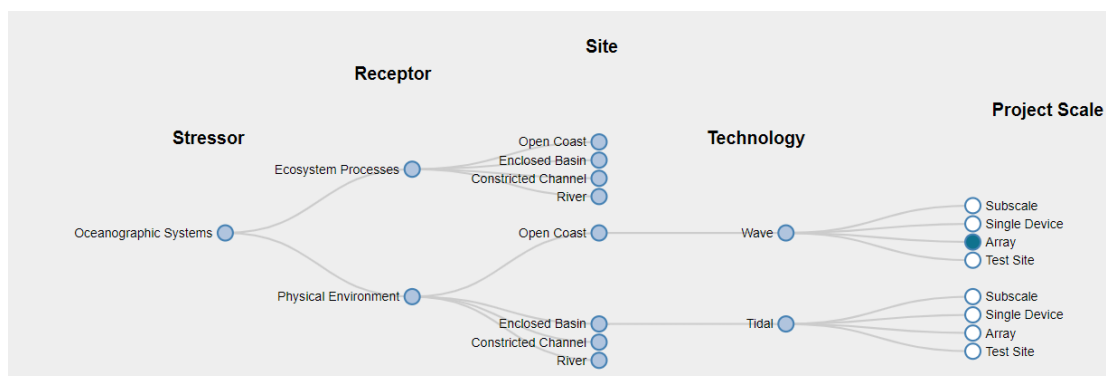
<https://tethys.pnnl.gov>

טתיס משמשת גם ליישום הגישה הפרגמטית להבנת הסיכונים וניהולם, דרך איתור הגישות שיאפשרו הפרשת סיכונים (Risk retirement) ופיתוח בר קיימא שממזער או מונע את ההשפעות המזיקות (איור 21).



איור 21. הדרך להפרשת סיכונים: סוג המתקן והרצפטור מכתיבים את הגדרת הסיכון, בחינת הנתונים הקיימים, איסוף נתונים נוספים אם נדרש, אמצעי הפחתת ההשפעות ובחינתם. מקור: <https://tethys.pnnl.gov>

באתר גם מטריצה שפותחה עבור כל סוג השפעה ומסגרת נדרשת לבחינת שישה סוגי השפעות עיקריים (התנגשות, רעש, EMF, שינוי בתי גידול בעמודת המים ובקרקעית ודחיקה) ואיתור השיטות הטובות ביותר להפחתת הסיכונים עבורם (איור 22).



איור 22. מטריצת השפעות: דוגמה של בחירת השפעה, במקרה זה של מערך אנרגיית גלים בים הפתוח על הסביבה הפיסית. תוצאת החיפוש היא סיכום ספרות של מספר עמודים וטבלה עם המאמרים המובילים בתחום, דוגמאות בולטות למחקרי מפתח, תובנות ומסקנות עיקריות שעולות מהם, והמלצות הפחתת השפעה רלוונטיות. מקור: <https://tethys.pnnl.gov>

המערכת פשוטה לתפעול והשימוש בה מאד נוח ומומלץ לכל העוסקים בתחום וגם לאזרחים שרוצים ללמוד עוד. החוקרים השותפים בפרויקט פרסמו בשנים האחרונות עשרות מאמרי סקירה שעלו גם בחיפוש שלנו, וכוללים כל רכיב משפיע ומושפע, ויצרו למעשה את ה-State of the Art בנושא (A. Copping & Hemery, 2020).

בנוסף על Tethys ובמקביל, הוקמה יזמת Triton על ידי משרד האנרגיה האמריקאי בכדי לבצע ניסויים בשדה לכימות וניטור ההשפעות הסביבתיות של פיתוח מתקנים להפקת אנרגיה מתחדשת על הסביבה הימית ולבחון ולפתח מתודולוגיות שונות בתחום (Amerson et al., 2022). בסדרת ניסויים ומחקרים זו (TFiT) נבדקו טכנולוגיות רבות וגובשו כללים לשימוש בהן.

קישוריות, תקשורת וגישה למידע:

הגישה לכמויות מידע בלתי מבוטלות בתחום אפשרית היום והיא לרב חינמית ופתוחה לציבור, למפתחים, לחוקרים ולמקבלי החלטות ובעלי עניין שונים בתחום. המידע גם מרוכז בצורה נוחה להתמצאות במספר מאגרים

- מומלץ שפרויקטים שמפתחים מתקנים להפקת אנרגיה מתחדשת בים יגבשו, יציגו ויפעילו תכניות לשיתוף ותקשור מידע לציבור ולמקבלי החלטות ומסגרות להידברות עם קהלי יעד ובעלי עניין ספציפיים (Amerson et al., 2022).
- בתכניות אלו יוצג המחקר הרלוונטי להשפעות הסביבתיות של המתקנים באופן פתוח לביקורת ומשוב לשם ביסוס אמון בין המפתחים לרגולטורים ולבעלי עניין אחרים.
- מומלץ להקים לשם כך אתר ייעודי באינטרנט, וכן פלטפורמות מתאימות ברשתות חברתיות, וובינרים, ניוזלטרים ובלוגים, דרכם ניתן לנטר גם את הצלחת הפצת המידע והעניין הציבורי, וגם לקבל משוב.

6.2 נספח ב. השפעות שדות על הסביבה הימית

טבלה 1. מחקרי השפעת שדות אלקטרומגנטיים (א"מ) מכבלי כח שאותרו בסקר הספרות – על פי סוג, תדר ועוצמת השדה הנמדד, ומידת ההשפעה שלו. בהנחה שהשדה המגנטי של כדה"א כעוצמת ייחוס הוא כ- $50\mu T$, ושכבלים מייצרים לרב שדה של כ- $100-200\mu T$, שימוש בשדות של מעל $2mT$ מדמה מצבי קיצון. EMF=Electro Magnetic Field. SMF=Static Magnetic Field. דירוג 0 זניח 4 חזק מאוד.

מקור	גורם נבדק	סוג השדה הנבדק	תדר בניסוי [Hz]	טווח עוצמת השדה	סוג השפעה	הערות	משמעותיות השפעת הקרינה (דרוג מ 0-4)
1	פגיות דגי מקק	EMF	500	$150\mu T$	גנטית	יש בקעו מוקדם	זניח (0)
1	פגיות דגי מקק	EMF	50	$1mT$	גנטית	ירידה באורך ומשקל	זניח (0)
1	מינון צפוני	SMF		$10mT$	גנטית	אין	משמעותי (2)
1	דגי זברה	EMF	50	$30\mu T$	גנטית	אין נבדקו תמותה ומומים מצטברים.	זניח (0)
1	דגי זברה	EMF	50	$100\mu T$	גנטית	אין נבדקו תמותה ומומים מצטברים.	זניח (0)
1	דגי זברה	EMF	50	$200\mu T$	גנטית	אין נבדקו תמותה ומומים מצטברים.	זניח (0)
1	דגי זברה	EMF	50	$400\mu T$	גנטית	אין נבדקו תמותה ומומים מצטברים.	זניח (0)
1	דגי זברה	EMF	50	$800\mu T$	גנטית	אין נבדקו תמותה ומומים מצטברים.	זניח (0)
1	דגי גרם	EMF	500	$1.4 - 1.6\mu T$	גנטית	יש הכפיל תמותת עוברים, ברמה נמוכה פי כ 25 מהשדה של כדור הארץ. לא ברור איך נמדד, אם כלל את השפעת כדה"א ומה המשמעות.	חזק ומשמעותי מאוד (4)
1	פורל קשת	SMF	-	$5.5mT$	גנטית	אין על הישרדות לררות	הפרש קטן (1)
1	פורל קשת	SMF	-	$10mT$	גנטית	אין על הישרדות לררות	משמעותי (2)
1	פורל קשת, פורל הים, סלמון אטלנטי	SMF	-	$2mT$	גנטית	יש חדירות מעטפת ביצים גדלה	זניח (0)
1	פורל ים, מטיאס, דג לבן אירופאי	SMF	-	$1, 3, 5 mT$	גנטית	יש נפח הביצים גדל	הפרש קטן (1)
1	פורל ים	SMF	-	$4mT$	גנטית	יש עלייה בתדר ועוצמת התכווציות לב עוברים, בסוף ירידה	הפרש קטן (1)
1	דג לבן אירופאי	SMF	-	$4mT$	גנטית	יש ירידה בקצב לב עוברים ובסוף חזרה לנורמה	הפרש קטן (1)

1	קרפיון, דג לבן אירופי, פורלים	SMF	-	51-70mT	גנטית	יש	לעוברים נגרמה עלייה מתמשכת בקצב הלב	משמעותי מאוד (3)
1	דג לבן אירופאי, שפמנון אפריקאי	SMF	-	51-70mT	גנטית	יש	לעוברים נגרם עיכוב בהופעת פיגמנט בעיניים	משמעותי מאוד (3)
2	צדפות מול כחול	EMF	-	300μT	התנהגות	אין	התנהגות האכילה	זניח (0)
2	צדפות מול כחול	MF	-	47μT	התנהגות	אין	התנהגות האכילה	זניח (0)
3	לובסטר	-	-	2.8mT	גנטית	יש	לרוות קטנות, דפורמציות ושינויי מין	זניח (0)
4	בקלה, צלופח אירופאי, לובסטר		לא צוין	2.8mT	התנהגות	יש	נמשכו / הגיבו	זניח (0)
4	לובסטר אירופאי, הרינג אטלנטי, פורל קשת,	MF	-	200μT	התנהגות	אין	אין שינוי בהעדפה מרחבית	זניח (0)
4	דגי צלופח	SMF	-	50 - 150μT	התנהגות	אין		זניח (0)
5	תריסנית קוצנית	MF	50	450μT	התנהגות	יש	עליה בפעילות ובאינטראקציות בין-אישיות	זניח (0)
6	צדפות	SMF	-	15mT	התנהגות	יש	ירידה בסינון (אכילה) ובקצב הפרשת האמוניה	משמעותי (2)
6	צדפות	EMF	לא צוין		פיזיולוגיה	יש	עיקוב בפעילות Acetylcholinesterase	

מקור	גורם נבדק	סוג השדה הנבדק	AC / DC	התדר בניסוי	טווח עוצמת השדה	סוג השפעה	הערות	משמעותיות הקרינה (דרוג מ 0-4)
1	פגיות דגי מקק	EMF	AC	500Hz	150μT	גנטית	בקעו מוקדם	זניח (0)
1	פגיות דגי מקק	EMF	AC	50Hz	1mT	גנטית	ירידה באורך ומשקל	זניח (0)
1	מינון צפוני	SMF	DC		10mT	גנטית		משמעותי (2)
1	דגי זברה	EMF	AC	50Hz	30800-μT	גנטית	נבדקו תמותה ומומים מצטברים.	זניח (0)
1	דגי גרם	EMF	AC	500Hz	1.4 - 1.6μT	גנטית	הכפיל תמותת עוברים, אבל נמדדה רמה נמוכה פי כ 25 מהשדה של כדור הארץ. לא ברור אם עדיין יש השפעה, איך מדדו אותה, האם זה כלל את השפעת כדה"א ומה המשמעות.	לא ברור
1	פורל קשת	SMF	DC	-	5.5mT	גנטית	על הישרדות לרוות	הפרש קטן (1)
1	פורל קשת	SMF	DC	-	10mT	גנטית	על הישרדות לרוות	משמעותי (2)
1	פורל קשת, פורל הים, סלמון אטלנטי	SMF	DC	-	2mT	גנטית	חדירות מעטפת ביצים גדלה	זניח (0)
1	פורל ים, מטיאס, דג לבן אירופאי	SMF	DC	-	1, 3, 5 mT	גנטית	נפח הביצים גדל	הפרש קטן (1)
1	פורל ים	SMF	DC	-	4mT	גנטית	עלייה בתדר ועוצמת התכווצויות לב עוברים, בסוף ירידה	הפרש קטן (1)
1	דג לבן אירופאי	SMF	DC	-	4mT	גנטית	ירידה בקצב לב עוברים ובסוף חזרה לנורמה	הפרש קטן (1)
1	קרפיון, דג לבן אירופי, פורל ים	SMF	DC	-	51- 70mT	גנטית	לעוברים נגרמה עלייה מתמשכת בקצב הלב	משמעותי מאוד (3)

1	דג לבן אירופאי, שפמנון אפריקאי	SMF	DC	-	51-70mT	גנטית	יש	לעוברים נגרם עיכוב בהופעת פיגמנט בעיניים	משמעותי מאוד (3)
2	צדפות מול כחול	EMF	DC	-	300μT	התנהגות	אין	התנהגות האכילה	זניח (0)
2	צדפות מול כחול	MF	-	-	47μT	התנהגות	אין	התנהגות האכילה	זניח (0)
3	לובסטר	-	-	-	2.8mT	גנטית	יש	לרוות קטנות, דפורמציות ושינויי מין	זניח (0)
4	בקלה אטלנטית, צלופח אירופאי, לובסטר			לא צוין	2.8mT	התנהגות	יש	נמשכו / הגיבו	זניח (0)
4	לובסטר אירופאי, הרינג אטלנטי, פורל קשת,	MF	DC	-	200μT	התנהגות	אין	אין שינוי בהעדפה מרחבית	זניח (0)
4	דגי צלופח	SMF	HVDC	-	50 -150μT	התנהגות	אין		זניח (0)
5	תריסנית קוצנית	MF	DC	50Hz	450μT	התנהגות	יש	עליה בפעילות ובאינטראקציות בין-אישיות	זניח (0)

6	צדפות	SMF	DC	-	15mT	התנהגות	יש	ירידה בסינון (אכילה) ובקצב הפרשת האמוניה	משמעותי (2)
6	צדפות	EMF	AC	לא צוין		פיזיולוגיה	יש	עיקוב בפעילות Acetylcholinesterase	

המקורות: ¹(Formicki et al., 2021), ²(Albert et al., 2022), ³(Harsanyi et al., 2022), ⁴(Cresci et al., 2022), ⁵(Luana et al., 2022), (Jakubowska-Lehrmann et al., 2022)⁶

7. רשימת מקורות

ACCOBAMS. (2012). *Scientific synthesis of the impacts of underwater noise on marine and coastal biodiversity and habitats*.

Adams, T. P., Miller, R. G., Aleynik, D., & Burrows, M. T. (2014). Offshore marine renewable energy devices as stepping stones across biogeographical boundaries. *Journal of Applied Ecology*, 51(2), 330–338. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12207>

Albert, L., Maire, O., Olivier, F., Lambert, C., Romero-Ramirez, A., Jolivet, A., ... & Chauvaud, S. (2022). Can artificial magnetic fields alter the functional role of the blue mussel, *Mytilus edulis*?. *Marine Biology*, 169(6), 75. <https://doi.org/10.1007/s00227-022-04065-4>

Akhtar, N., Geyer, B., & Schrum, C. (2022). Impacts of accelerating deployment of offshore windfarms on near-surface climate. *Scientific Reports*, 12, 18307. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22868-9>

Albano, P. G., Steger, J., Bošnjak, M., Dunne, B., Guifarro, Z., Turapova, E., Hua, Q., Kaufman, D. S., Rilov, G., & Zuschin, M. (2021). Native biodiversity collapse in the eastern Mediterranean. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 288(1942). <https://doi.org/10.1098/rspb.2020.2469>

Alexander, K. A., Meyjes, S. A., & Heymans, J. J. (2016). Spatial ecosystem modelling of marine renewable energy installations: Gauging the utility of Ecospace. *Ecological Modelling*, 331, 115–128. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.01.016>

Allen, S., Banks, A. N., Caldow, R. W. G., Frayling, T., Kershaw, M., & Rowell, H. (2019). Developments in understanding of red-throated diver responses to offshore wind farms in marine special protection areas. In *Marine protected areas: Science, policy and management* (pp. 573–586). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102698-4.00029-0>

Amaral, S. V., Bevelhimer, M. S., Čada, G. F., Giza, D. J., Jacobson, P. T., McMahon, B. J., & Pracheil, B. M. (2015). Evaluation of behavior and survival of fish exposed to an axial-flow hydrokinetic turbine. *North American Journal of Fisheries Management*, 35, 97–113. <https://doi.org/10.1080/02755947.2014.982333>

Amerson, A. M., Harris, T. M., Michener, S. R., Gunn, C. M., & Haxel, J. H. (2022). A summary of environmental monitoring recommendations for marine energy development that considers life cycle sustainability. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(586). <https://doi.org/10.3390/jmse10050586>

- Ashley, M. C., Mangi, S. C., & Rodwell, L. D. (2014). The potential of offshore windfarms to act as marine protected areas: A systematic review of current evidence. *Marine Policy*, 45, 301–309. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2013.09.002>
- Azov, Y. (1991). Eastern Mediterranean—a marine desert? *Marine pollution bulletin*, 23, 225–232. [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(91\)90679-M](https://doi.org/10.1016/0025-326X(91)90679-M)
- Baeye, M., & Fettweis, M. (2015). In situ observations of suspended particulate matter plumes at an offshore wind farm, southern North Sea. *Geo-Marine Letters*, 35, 247–255. <https://doi.org/10.1007/s00367-015-0404-8>
- Belkin, N., Guy-Haim, T., Rubin-Blum, M., Lazar, A., Sisma-Ventura, G., Kiko, R., Morov, A. R., Ozer, T., Gertman, I., Herut, B., & Rahav, E. (2022). Influence of cyclonic and anticyclonic eddies on plankton in the southeastern Mediterranean Sea during late summertime. *Ocean Science*, 18(3), 693–715. <https://doi.org/10.5194/os-18-693-2022>
- Belkin, N., Rahav, E., Elifantz, H., Kress, N., & Berman-Frank, I. (2015). Enhanced salinities, as a proxy of seawater desalination discharges, impact coastal microbial communities of the eastern Mediterranean Sea. *Environmental Microbiology*, 17(10), 4105–4120. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.12979>
- Benham, C. F., Beavis, S. G., Hendry, R. A., & Jackson, E. L. (2016). Growth effects of shading and sedimentation in two tropical seagrass species: Implications for port management and impact assessment. *Marine Pollution Bulletin*, 109(1), 461–470. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.05.027>
- Boehlert, G. W., & Gill, A. B. (2010). Environmental and ecological effects of ocean renewable energy development. *Oceanography*, 23(2), 68–81. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2010.46>
- Bolle, L. J., de Jong, C. A. F., Bierman, S. M., van Beek, P. J. G., van Keeken, O. A., Wessels, P. W., van Damme, C. J. G., Winter, H. V., de Haan, D., & Dekeling, R. P. A. (2012). Common sole larvae survive high levels of pile-driving sound in controlled exposure experiments. *PLoS ONE*, 7, e33052. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0033052>
- Borkenhagen, K., [Author initials unclear], & Garthe, S. (2018). Estimating flight heights of seabirds using optical rangefinders and GPS data loggers: A methodological comparison. *Marine Biology*, 165, 17. <https://doi.org/10.1007/s00227-017-3273-z>
- Brabant, R., Vanermen, N., Stienen, E. W. M., & Degraer, S. (2015). Towards a cumulative collision risk assessment of local and migrating birds in North Sea offshore wind farms. *Hydrobiologia*, 756, 63–74. <https://doi.org/10.1007/s10750-015-2224-2>

- Bruinzeel, L., Klop, E., Brenninkmeijer, A., Bosch, J. (2018). Ecological Impact of Airborne Wind Energy Technology: Current State of Knowledge and Future Research Agenda. In: Schmehl, R. (eds) Airborne Wind Energy. Green Energy and Technology. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1947-0_28
- Buck, B. H., Krause, G., Pogoda, B., Grote, B., Wever, L., Goseberg, N., Schupp, M. F., Mochtak, A., & Czybulka, D. (2017). The German case study: Pioneer projects of aquaculture-wind farm multi-uses. In *Aquaculture perspective of multi-use sites in the open ocean* (pp. 253–354). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51159-7_11
- Buenau, K. E., Garavelli, L., Hemery, L. G., & Medina, G. G. (2022). A review of modeling approaches for understanding and monitoring the environmental effects of marine renewable energy. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(1), 94. <https://doi.org/10.3390/jmse10010094>
- Burger, J., Gordon, C., Lawrence, J., Newman, J., Forcey, G., & Vlietstra, L. (2011). Risk evaluation for federally listed (roseate tern, piping plover) or candidate (red knot) bird species in offshore waters: A first step for managing the potential impacts of wind facility development on the Atlantic Outer Continental Shelf. *Renewable Energy*, 36, 338–351. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.048>
- Caine, C. A. (2020). The race to the water for offshore renewable energy: Assessing cumulative and in-combination impacts for offshore renewable energy developments. *Journal of Environmental Law*, 32, 83–109. <https://doi.org/10.1093/jel/eqz031>
- Cao, Z., Liang, X., Deng, Y., Wang, C., Wang, L., Zhu, R., & Zeng, J. (2021). Influence of multi-layered sediment characteristics on the thermal performance of buried submarine high-voltage cables. *Ocean Engineering*, 242, 110030. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110030>
- Carpenter, J. R., Merckelbach, L., Callies, U., Clark, S., Gaslikova, L., & Baschek, B. (2016). Potential impacts of offshore wind farms on North Sea stratification. *PLoS ONE*, 11, e0160830. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160830>
- Chen, C.-H., & Su, N.-J. (2022). Global trends and characteristics of offshore wind farm research over the past three decades: A bibliometric analysis. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(10), 1339. <https://doi.org/10.3390/jmse10101339>
- Christiansen, N., Daewel, U., Djath, B., & Schrum, C. (2022). Emerging risks of large-scale offshore wind farms on North Sea stratification and primary production. *Frontiers in Marine Science*, 9, 830927. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.830927>

- Christophersen, T. (2011). Ten years of development of offshore-windparks in the German North Sea: Interim results of an investigation on possible effects on birds and harbour porpoises. *Naturschutz und Landschaftsplanung*, 43, 301–307.
- Coates, D. A., Deschutter, Y., Vincx, M., & Vanaverbeke, J. (2014). Enrichment and shifts in macrobenthic assemblages in an offshore wind farm area in the Belgian part of the North Sea. *Marine Environmental Research*, 95, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2013.12.008>
- Coolen, J. W., Bittner, O., Driessen, F. M., van Dongen, U., Siahaya, M. S., de Groot, W., ... & van der Weide, B. (2020). Ecological implications of removing a concrete gas platform in the North Sea. *Journal of Sea Research*, 166, 101968. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2020.101968>
- Copping, A. E., Hemery, L. G., Overhus, D. M., Garavelli, L., Freeman, M. C., Whiting, J. M., Gorton, A. M., Farr, H. K., Rose, D. J., & Tugade, L. G. (2020). Potential environmental effects of marine renewable energy development—the state of the science. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(11), 879. <https://doi.org/10.3390/jmse8110879>
- Copping, A. E., Hemery, L. G., Viehman, H., Seitz, A. C., Staines, G. J., & Hasselman, D. J. (2021). Are fish in danger? A review of environmental effects of marine renewable energy on fishes. *Biological Conservation*, 262, 109297. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109297>
- Copping, A., & Hemery, L. (2020). *OES-Environmental 2020 state of the science report: Environmental effects of marine renewable energy development around the world* (Report for Ocean Energy Systems). <https://doi.org/10.2172/1632878>
- Cresci, A., Perrichon, P., Durif, C. M. F., Sørhus, E., Johnsen, E., Bjelland, R., Larsen, T., Skiftesvik, A. B., & Browman, H. I. (2022). Magnetic fields generated by the DC cables of offshore wind farms have no effect on spatial distribution or swimming behavior of lesser sandeel larvae (*Ammodytes marinus*). *Marine Environmental Research*, 176, 105609. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2022.105609>
- CSA. (2022). *Assessment of impacts to marine mammals, sea turtles, and ESA*.
- Cuce, E., Cuce, P. M., Saboor, S., Ghosh, A., & Sheikhnejad, Y. (2022). Floating PVs in terms of power generation, environmental aspects, market potential, and challenges. *Sustainability*, 14(2626). <https://doi.org/10.3390/su14052626>
- Dafforn, K. A. (2017). Eco-engineering and management strategies for marine infrastructure to reduce establishment and dispersal of non-indigenous species. *Management of Biological Invasions*, 8, 153–161. <https://doi.org/10.3391/mbi.2017.8.2.03>
- Dähne, M., Tougaard, J., Carstensen, J., Rose, A., & Nabe-Nielsen, J. (2017). Bubble curtains attenuate noise from offshore wind farm construction and reduce temporary habitat loss for

harbour porpoises. *Marine Ecology Progress Series*, 580, 221–237. <https://doi.org/10.3354/meps12257>

Dannheim, J., Bergström, L., Birchenough, S. N. R., Brzana, R., Boon, A. R., Coolen, J. W. P., Degraer, S., Gill, A. B., Hutchison, Z. L., Jackson, A. C., Janas, U., Martin, G., Raoux, A., Reubens, J., Rostin, L., Vanaverbeke, J., Wilding, T. A., & Degraer, S. (2020). Benthic effects of offshore renewables: Identification of knowledge gaps and urgently needed research. *ICES Journal of Marine Science*, 77, 1092–1108. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz018>

Danovaro, R., Batista Company, J., Corinaldesi, C., D’Onghia, G., Galil, B., Gambi, C., Gooday, A. J., Lampadariou, N., Luna, G. M., Morigi, C., Olu, K., Polymenakou, P., Ramirez-Llodra, E., Sabbatini, A., Sardà, F., Sibuet, M., & Tselepidis, A. (2010). Deep-sea biodiversity in the Mediterranean Sea: The known, the unknown, and the unknowable. *PLoS ONE*, 5(8), e11832. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0011832>

De-Dominicis, M., O’Hara Murray, R., & Wolf, J. (2017). Multi-scale ocean response to a large tidal stream turbine array. *Renewable Energy*, 114, 1160–1179. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.058>

de Figueiredo Xavier, T. W., Gorayeb, A., & Brannstrom, C. (2022). Participatory methodologies and the production of data on artisanal fishing in areas with offshore wind farm projects in Ceará, Brazil. *Sustentabilidade em Debate*, 13, 181–194. <https://doi.org/10.18472/sustdeb.v13n1.2022.40625>

Degraer, S., Carey, D. A., Coolen, J. W. P., Hutchison, Z. L., Kerckhof, F., Rumes, B., & Vanaverbeke, J. (2020). Offshore wind farm artificial reefs affect ecosystem structure and functioning: A synthesis. *Oceanography*, 33(4), 48–57. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2020.405>

Degraer et al., 2020b

de Groot, J., Campbell, M., Ashley, M., & Rodwell, L. (2014). Investigating the co-existence of fisheries and offshore renewable energy in the UK: Identification of a mitigation agenda for fishing effort displacement. *Ocean & Coastal Management*, 102, 7–18. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.08.013>

Dempster, T., & Taquet, M. (2004). Fish aggregation device (FAD) research: Gaps in current knowledge and future directions for ecological studies. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 14(1), 21–42. <https://doi.org/10.1007/s11160-004-3151-x>

Dialyna, E., & Tsoutsos, T. (2021). Wave energy in the Mediterranean Sea: Resource assessment, deployed WECs and prospects. *Energies*, 14(16), 4764. <https://doi.org/10.3390/en14164764>

- Díaz, H., & [Second author unclear]. (2022). Multicriteria decision approach to the design of floating wind farm export cables. *Energies*, 15(6593). <https://doi.org/10.3390/en15186593>
- Díez-Caballero, K., Troiteiro, S., García-Alba, J., Vidal, J. R., González, M., Ametller, S., & Juan, R. (2022). Environmental compatibility of the Parc Tramuntana offshore wind project in relation to marine ecosystems. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(898). <https://doi.org/10.3390/jmse10070898>
- Dolman, S., & Simmonds, M. (2010). Towards best environmental practice for cetacean conservation in developing Scotland's marine renewable energy. *Marine Policy*, 34, 1021–1027. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2010.02.009>
- Dorrell, R. M., Lloyd, C. J., Lincoln, B. J., Rippeth, T. P., Taylor, J. R., Sharples, J., Polton, J. A., Scannell, B. D., Greaves, D. M., Hall, R. A., & Simpson, J. H. (2022). Anthropogenic mixing in seasonally stratified shelf seas by offshore wind farm infrastructure. *Frontiers in Marine Science*, 9, 830927. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.830927>
- Eaves, S. L., Staines, G., Harker-Klimeš, G., Pinza, M., & Geerlofs, S. (2022). Triton field trials: Promoting consistent environmental monitoring methodologies for marine energy sites. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(177). <https://doi.org/10.3390/jmse10020177>
- Edelist, D., Rilov, G., Golani, D., Carlton, J. T., & Spanier, E. (2013). Restructuring the sea: Profound shifts in the world's most invaded marine ecosystem. *Diversity and Distributions*, 19(1), 69–77. <https://doi.org/10.1111/ddi.12002>
- Edelist, D., & Spanier, E. (2009). Influence of Levantine artificial reefs on the fish assemblage of the surrounding seabed. *Mediterranean Marine Science*, 10(1).
- Elzinga, J., Mesu, A., [Other authors unclear], Jansen, E., & Nijhof, M. (2019). Installing offshore wind turbine foundations quieter: A performance overview of the first full-scale demonstration of the ADBM underwater noise abatement system. In *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference* (Paper 29613-MS). <https://doi.org/10.4043/29613-ms>
- European Commission, *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Commission Work Programme 2020 - A Union that strives for more*, COM(2020) 37 final, 29.1.2020, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52020DC0037>
- European Commission: Directorate-General for Research and Innovation, Directorate-General for Energy, Kuzov, T., Shtjefni, D., Kuokkanen, A. et al., *SET plan progress report 2023 – Coordinated energy research and innovation for a competitive Europe*, Black, C.(editor) and Tan, B.(editor), Publications Office of the European Union (2023), <https://data.europa.eu/doi/10.2760/956347>

- Fairley, I., Masters, I., & Karunarathna, H. (2015). The cumulative impact of tidal stream turbine arrays on sediment transport in the Pentland Firth. *Renewable Energy*, 80, 755–769. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.03.004>
- Farr, H., Ruttenberg, B., Walter, R. K., Wang, Y. H., & White, C. (2021). Potential environmental effects of deepwater floating offshore wind energy facilities. *Ocean & Coastal Management*, 207, 105611. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105611>
- Felix, A., Hernández-Fontes, J. V., Lithgow, D., Mendoza, E., Posada, G., Ring, M., & Silva, R. (2019). Wave energy in tropical regions: Deployment challenges, environmental and social perspectives. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(219). <https://doi.org/10.3390/jmse7070219>
- Fernand, F., Israel, A., Skjermo, J., Wichard, T., Timmermans, K. R., & Golberg, A. (2017). Offshore macroalgae biomass for bioenergy production: Environmental aspects, technological achievements and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 35–45.
- Ferraro, A., Vlaswinkel, B., Roos, P., & Nelissen, M. (2023). Environmental observations at the first offshore solar farm in the North Sea. *Sustainability*, 15, 6533. <https://doi.org/10.3390/su15086533>
- Fisher, C., & Slater, M. (2010). *Effects of electromagnetic fields on marine species: A literature review*. <https://documents.pub/document/1-effects-of-electromagnetic-fields-on-marine-species-a-literature-review.html>
- Flanagan, T., Wengrove, M., & Robertson, B. (2022). Coupled wave energy converter and nearshore wave propagation models for coastal impact assessments. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(370). <https://doi.org/10.3390/jmse10030370>
- Formicki, K., Korzelecka-Orkisz, A., & Tański, A. (2021). The effect of an anthropogenic magnetic field on the early developmental stages of fishes: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(3), 1210. <https://doi.org/10.3390/ijms22031210>
- Fox, A. D., Desholm, M., Kahlert, J., Christensen, T. K., & Petersen, I. K. (2006). Information needs to support environmental impact assessment of the effects of European marine offshore wind farms on birds. *Ibis*, 148, 129–144. <https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.2006.00510.x>
- Fox, A. D., & Petersen, I. K. (2019). Offshore wind farms and their effects on birds. *Dansk Orn. Foren. Tidsskr*, 113(2019), 86–101.
- Furness, R. W., Wade, H. M., & Masden, E. A. (2013). Assessing vulnerability of marine bird populations to offshore wind farms. *Journal of Environmental Management*, 119, 56–66. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.01.025>

- Galanidi, M., Aissi, M., Ali, M., Bakalem, A., Bariche, M., Bartolo, A. G., ... & Zenetos, A. (2023). Validated inventories of non-indigenous species (NIS) for the Mediterranean Sea as tools for regional policy and patterns of NIS spread. *Diversity*, 15(9), 962. <https://doi.org/10.3390/d15090962>
- Galil, B. (2017). Eyes wide shut. In *Management of marine protected areas: A network perspective* (pp. 187–206). <https://doi.org/10.1002/9781119075806.ch10>
- Galil, B. S. (2004). The limit of the sea: The bathyal fauna of the Levantine Sea. *Scientia Marina*, 68(Suppl. 3), 63–72. <https://doi.org/10.3989/scimar.2004.68s363>
- Galili, O., Goffman, O., Roditi-Elasar, M., Mevorach, Y., Bigal, E., Zuriel, Y., Haitovich, Y., Hadar, N., Markovich, M., Vardimon, D., Reininger, D., Marco, S., Morick, D., Ratner, E., Tchernov, D., & Scheinin, A. (2023). Two decades of coastal dolphin population surveys in Israel, eastern Mediterranean. *Biology*, 12(2), 328. <https://doi.org/10.3390/biology12020328>
- Galparsoro, I., Menchaca, I., Seeger, I., Nurmi, M., McDonald, H., Garmendia, J. M., Pouso, S., & Borja, Á. (2022). *Mapping potential environmental impacts of offshore renewable energy* (ETC/ICM Report 2/2022). European Topic Centre on Inland, Coastal and Marine Waters.
- Gertman, I., & Hecht, A. (2002). Annual and long-term changes in the salinity and the temperature of the waters of the South-eastern Levantine Basin. *CIESM Work Ser*, 16.
- GFCM. (2022). *The state of Mediterranean and Black Sea fisheries 2022*. <https://doi.org/10.4060/cc3370en>
- Giakoumi, S., Katsanevakis, S., Albano, P. G., Azzurro, E., Cardoso, A. C., Cebrian, E., Deidun, A., Edelist, D., Francour, P., Jimenez, C., Mačić, V., Occhipinti-Ambrogi, A., Rilov, G., & Sghaier, Y. R. (2019). Management priorities for marine invasive species. *Science of the Total Environment*, 688, 976–982. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.282>
- Gill, A. B., Gloyne-Phillips, I., Neal, K. J., & Kimber, J. A. (2005). The potential effects of electromagnetic fields generated by sub-sea power cables associated with offshore wind farm developments on electrically and magnetically sensitive marine organisms. *Journal of Fish Biology*, 66(1), 1–14. <https://doi.org/10.1111/j.0022-1112.2005.00576.x>
- Gill, A. B., Bartlett, M., & Thomsen, F. (2012). Potential interactions between diadromous fishes of U.K. conservation importance and the electromagnetic fields and subsea noise from marine renewable energy developments. *Journal of Fish Biology*, 81, 664–695. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2012.03374.x>

- Gill, A. B., Degraer, S., Lipsky, A., Mavraki, N., Methratta, E., & Brabant, R. (2020). Setting the context for offshore wind development effects on fish and fisheries. *Oceanography*, 33, 118–127. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2020.411>
- Gillson, J. P., Bašić, T., Davison, I., Riley, W. D., Talks, L., Walker, A. M., & Russell, I. C. (2022). A review of marine stressors impacting Atlantic salmon (*Salmo salar*), with an assessment of the major threats to English stocks. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 32, 509–542. <https://doi.org/10.1007/s11160-022-09714-x>
- Givan, O., Edelist, D., Sonin, O., & Belmaker, J. (2018). Thermal affinity as the dominant factor changing Mediterranean fish abundances. *Global Change Biology*, 24(1), e80–e89. <https://doi.org/10.1111/gcb.13835>
- Goldshleger, N., Maor, A., Garzuzi, J. and Asaf, L., 2015. Influence of land use on the quality of runoff along Israel' s coastal strip (demonstrated in the cities of Herzliya and Ra'anana). *Hydrological Processes*, 29(6), pp.1289-1300. <https://doi.org/10.1002/hyp.10220>
- Goldsmith, V., & Sofer, S. (1983). Wave climatology of the southeastern Mediterranean. *Israel Journal of Earth Sciences Jerusalem*, 32, 1-51.
- Goren, M., Mienis, H. K., & Galil, B. S. (2008). Not so poor—more deep-sea records from the Levant Sea, eastern Mediterranean. *Marine Biodiversity Records*, 1, e43. <https://doi.org/10.1017/S1755267206005203>
- Granger, J., Walkowicz, L., Fitak, R., & Johnsen, S. (2020). Gray whales strand more often on days with increased levels of atmospheric radio-frequency noise. *Current Biology*, 30, 135–158. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2020.01.028>
- Grecian, W. J., Inger, R., Attrill, M. J., Bearhop, S., Godley, B. J., Witt, M. J., & Votier, S. C. (2010). Potential impacts of wave-powered marine renewable energy installations on marine birds. *Ibis*, 152, 683–697. <https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.2010.01048.x>
- Green, R. E., Gill, E., Hein, C., Couturier, L., Mascarenhas, M., May, R., Newell, D., & Rumes, B. (2022). International assessment of priority environmental issues for land-based and offshore wind energy development. *Global Sustainability*, 5, e14. <https://doi.org/10.1017/sus.2022.14>
- Grippo, M., Zydlewski, G., Shen, H., & Goodwin, R. A. (2020). Behavioral responses of fish to a current-based hydrokinetic turbine under multiple operational conditions. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 645. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08596-5>
- Guşatu, L. F., Menegon, S., Depellegrin, D., Zuidema, C., Faaij, A., & Yamu, C. (2021). Spatial and temporal analysis of cumulative environmental effects of offshore wind farms in the North Sea basin. *Scientific Reports*, 11, 10125. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89537-1>

- Guy-Haim, T., Stern, N., & Sisma-Ventura, G. (2022). Trophic ecology of deep-sea megafauna in the ultra-oligotrophic Southeastern Mediterranean Sea. *Frontiers in Marine Science*, 9, 857179. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.857179>
- Haerwood, A., & Horrocks, J. (2008). Impacts of coastal development on hawksbill hatchling survival and swimming success during the initial offshore migration. *Biological Conservation*, 141, 394–401. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2007.10.017>
- Hakim, A. R., Cowles, G. W., & Churchill, J. H. (2013). The impact of tidal stream turbines on circulation and sediment transport in Muskeget Channel, MA. *Marine Technology Society Journal*, 47, 122–136. <https://doi.org/10.4031/MTSJ.47.4.14>
- Halouani, G., Villanueva, C. M., Raoux, A., Dauvin, J.-C., Ben Rais Lasram, F., Foucher, E., Le Loc'h, F., Safi, G., Aраignous, E., Robin, J.-P., & Niquil, N. (2020). A spatial food web model to investigate potential spillover effects of a fishery closure in an offshore wind farm. *Journal of Marine Systems*, 212, 103434. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2020.103434>
- Halvorsen, M. B., Casper, B. M., Woodley, C. M., Carlson, T. J., & Popper, A. N. (2012). Threshold for onset of injury in Chinook salmon from exposure to impulsive pile driving sounds. *PLoS ONE*, 7, e38968. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0038968>
- Harnois, V., Smith, H. C. M., Benjamins, S., & Johanning, L. (2015). Assessment of entanglement risk to marine megafauna due to offshore renewable energy mooring systems. *International Journal of Marine Energy*, 11, 27–49. <https://doi.org/10.1016/j.ijome.2015.04.001>
- Harsanyi, P., Scott, K., Easton, B. A. A., de la Cruz Ortiz, G., Chapman, E. C. N., Piper, A. J. R., Rochas, C. M. V., & Lyndon, A. R. (2022). The effects of anthropogenic electromagnetic fields (EMF) on the early development of two commercially important crustaceans: European lobster (*Homarus gammarus*) and edible crab (*Cancer pagurus*). *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(5), 564. <https://doi.org/10.3390/jmse10050564>
- Hartnett, M., O'Brien, N., Fallon, D., & Nash, S. (2013). Characteristics of the operational noise from full scale wave energy converters in the Lysekil project: Estimation of potential environmental impacts. *Energies*, 6, 2562–2582. <https://doi.org/10.3390/en6052562>
- Harwood, J., King, S., Booth, C., Donovan, C., Schick, R. S., Thomas, L., & New, L. (2016). Understanding the population consequences of acoustic disturbance for marine mammals. In *Advances in experimental medicine and biology* (Vol. 875, pp. 417–423). https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2981-8_49
- Hastie, G. D., Russell, D. J. F., McConnell, B., Thompson, D., & Janik, V. M. (2016). Multiple-pulse sounds and seals: Results of a harbor seal (*Phoca vitulina*) telemetry study during wind farm

construction. In *Advances in experimental medicine and biology* (Vol. 875, pp. 425–430). https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2981-8_50

Hazan, O., et al. (2018). Mesopelagic prokaryotes alter surface phytoplankton production during simulated deep mixing experiments in Eastern Mediterranean Sea waters. *Frontiers in Marine Science*, 5. [Missing article number/pages.]

Hemery, L. G., Copping, A. E., Overhus, D. M., Hansen, D., Göçmen, T., Tedeschi, E., & Blavette, A. (2021). Biological consequences of marine energy development on marine animals. *Energies*, 14(24), 8460. <https://doi.org/10.3390/en14248460>

Herut, B., & Galil, B. S. (2000). *Herut_Galil_2000*. [Insufficient bibliographic details provided.]

Hooper, T., Armstrong, A., & Vlaswinkel, B. (2021). Environmental impacts and benefits of marine floating solar. *Solar Energy*, 219, 11–14. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.010>

Horne, N., Culloch, R. M., Schmitt, P., Wilson, B., Dale, A. C., Houghton, J. D. R., & Kregting, L. T. (2022). Providing a detailed estimate of mortality using a simulation-based collision risk model. *PLoS ONE*, 17, e0276757. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0276757>

Huang, S. L. (2022). Unstated impacts of the green energy industry on the habitat of a coastal delphinid: Turbid-turbulent wakes induced by offshore wind turbine foundations. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 32, 1787–1796. <https://doi.org/10.1002/aqc.3888>

Hutchison, Z. L., Gill, A. B., Sigray, P., He, H., & King, J. W. (2020). Anthropogenic electromagnetic fields (EMF) influence the behaviour of bottom-dwelling marine species. *Scientific Reports*, 10, 4219. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60793-x>

Hutchison, Z. L., Secor, D. H., & Gill, A. B. (2020). The interaction between resource species and electromagnetic fields associated with electricity production by offshore wind farms. *Oceanography*, 33, 96–107. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2020.409>

Hutchison, Z., Sigray, P., & King, J. (2018). *Electromagnetic field (EMF) impacts on elasmobranch (shark, rays, and skates) and American lobster movement and migration from direct current cables*. BOEM. [URL provided was incomplete; keep original if needed.]

Idan, T., Shefer, S., Feldstein, T., Yahel, R., Huchon, D., & Ilan, M. (2018). Shedding light on an East-Mediterranean mesophotic sponge ground community and the regional sponge fauna. *Mediterranean Marine Science*, 19(1), 84–106. <https://doi.org/10.12681/mms.13853>

Ikegami, Y., & Jalihal, P. (2023). *Task 11 – Ocean thermal energy conversion*. <https://report2018.ocean-energy-systems.org/main-achievements-in-2018/task-11-ocean-thermal-energy-conversion/>

- Inger, R., Attrill, M. J., Bearhop, S., Broderick, A. C., Grecian, W. J., Hodgson, D. J., Mills, C., Sheehan, E., Votier, S. C., Witt, M. J., & Godley, B. J. (2009). Marine renewable energy: Potential benefits to biodiversity? An urgent call for research. *Journal of Applied Ecology*, 46(6), 1145–1153. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2009.01697.x>
- IOLR, & Geoprospect. (2016). סקר אסטרטגי סביבתי לחיפוש ולהפקה של נפט ושל גז טבעי בים.
- IRENA. (2020). *Fostering a blue economy: Offshore renewable energy*. <https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Fostering-a-blue-economy-Offshore-renewable-energy>
- Jägerbrand, A. K., & Bouroussis, C. A. (2021). Ecological impact of artificial light at night: Effective strategies and measures to deal with protected species and habitats. *Sustainability*, 13(11), 5991. <https://doi.org/10.3390/su13115991>
- Jakubowska-Lehrmann, M., Białowas, M., Otremba, Z., Hallmann, A., Śliwińska-Wilczewska, S., & Urban-Malinga, B. (2022). Do magnetic fields related to submarine power cables affect the functioning of a common bivalve? *Marine Environmental Research*, 179, 105700. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2022.105700>
- Jhan, H., Lee, H., & Ting, K. (2022). The potential compatibility of designating offshore wind farms within wider marine protected areas—Conservation of the Chinese white dolphin regarding fishers' perception. *Fishes*, 7(195). <https://doi.org/10.3390/fishes7040195>
- Joy, R., Wood, J. D., Sparling, C. E., Tollit, D. J., Copping, A. E., & McConnell, B. J. (2018). Empirical measures of harbor seal behavior and avoidance of an operational tidal turbine. *Marine Pollution Bulletin*, 136, 92–106. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.08.052>
- Karlsson, R., Tivefålh, M., Duranović, I., Martinsson, S., Kjølhamar, A., & Murvoll, K. M. (2022). Artificial hard-substrate colonisation in the offshore Hywind Scotland Pilot Park. *Wind Energy Science*, 7, 801–814. <https://doi.org/10.5194/wes-7-801-2022>
- Karpouzoglou, T., Vlaswinkel, B., & Van der Molen, J. (2020). Effects of large-scale floating (solar photovoltaic) platforms on hydrodynamics and primary production in a coastal sea from a water column model. *Ocean Science*, 16(1), 195–208. <https://doi.org/10.5194/os-16-195-2020>
- Kidd, I. M., Fischer, A., Chai, S., & Davis, J. A. (2015). A scenario-based approach to evaluating potential environmental impacts following a tidal barrage installation. *Ocean & Coastal Management*, 116, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.06.016>
- Kim, H., Lee, H., Lee, S., Jung, D., & Moon, D. (2010). Mitigation of environmental impact of power-plant discharge by use of ocean thermal energy conversion system. In *OCEANS'10 IEEE Sydney* (Paper 5603973). <https://doi.org/10.1109/OCEANSSYD.2010.5603973>

- Kim, J. W., Ha, H. K., & Woo, S. B. (2017). Dynamics of sediment disturbance by periodic artificial discharges from the world's largest tidal power plant. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 190, 69–79. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.03.029>
- Klimley, A. P., Putman, N. F., Keller, B. A., & Noakes, D. (2021). A call to assess the impacts of electromagnetic fields from subsea cables on the movement ecology of marine migrants. *Conservation Science and Practice*, 3(7), e436. <https://doi.org/10.1111/csp2.436>
- Kress, N., Gertman, I., & Herut, B. (2014). Temporal evolution of physical and chemical characteristics of the water column in the Easternmost Levantine basin (Eastern Mediterranean Sea) from 2002 to 2010. *Journal of Marine Systems*, 135, 6–13. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2013.11.016>
- Krone, R., Dederer, G., Kanstinger, P., Krämer, P., Schneider, C., & Schmalenbach, I. (2017). Mobile demersal megafauna at common offshore wind turbine foundations in the German Bight (North Sea) two years after deployment—Increased production rate of *Cancer pagurus*. *Marine Environmental Research*, 123, 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.11.011>
- Krone, R., Gutow, L., Joschko, T. J., & Schröder, A. (2013). Epifauna dynamics at an offshore foundation—Implications of future wind power farming in the North Sea. *Marine Environmental Research*, 85, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2012.12.004>
- Kruger J.S., Wiatrowski M., Davis R.E., Dong T., Knoshaug E.P., Nagle N.J., Laurens L.M.L. and Pienkos P.T. (2022). Enabling Production of Algal Biofuels by Techno-Economic Optimization of Co-Product Suites. *Front. Chem. Eng.* 3:803513. <https://doi.org/10.3389/fceng.2021.803513>
- Kulkarni, S. S., & Edwards, D. J. (2022). A bibliometric review on the implications of renewable offshore marine energy development on marine species. *Aquaculture and Fisheries*, 7(2), 211–222. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2021.10.005>
- Lammerant, L., Laureysens, I., & Driesen, K. (2020). *Potential impacts of solar, geothermal and ocean energy on habitats and species protected under the Birds and Habitats Directives: Final report*. <https://doi.org/10.2779/784760>
- Langhamer, O. (2012). Artificial reef effect in relation to offshore renewable energy conversion: State of the art. *The Scientific World Journal*, 2012, 386713. <https://doi.org/10.1100/2012/386713>
- Leiter, S. M., Stone, K. M., Thompson, J. L., Accardo, C. M., Wikgren, B. C., Zani, M. A., Cole, T., Kenney, R. D., Mayo, C. A., & Kraus, S. D. (2017). North Atlantic right whale (*Eubalaena glacialis*) occurrence in offshore wind energy areas near Massachusetts and Rhode Island, USA. *Endangered Species Research*, 34, 45–59. <https://doi.org/10.3354/esr00827>

- Levitt, B. B., Lai, H. C., & Manville, A. M. (2021). Effects of non-ionizing electromagnetic fields on flora and fauna, Part 2: Impacts—How species interact with natural and man-made EMF. *Reviews on Environmental Health*, 37(3), 327–406. <https://doi.org/10.1515/reveh-2021-0050>
- Levi, Y., & Ribak, O. (2023). *סיכום עונת רבייה של צבי הים 2022*.
- Li, C., Coolen, J. W. P., Scherer, L., Mogollón, J. M., Braeckman, U., Vanaverbeke, J., Tukker, A., & Steubing, B. (2023). Offshore wind energy and marine biodiversity in the North Sea: Life cycle impact assessment for benthic communities. *Environmental Science & Technology*, 57(16), 6455–6464. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c07797>
- Loring, P. H., Paton, P. W. C., Osenkowski, J. E., Gilliland, S. G., [Co-author unclear], & McWilliams, S. R. (2014). Habitat use and selection of black scoters in southern New England and siting of offshore wind energy facilities. *Journal of Wildlife Management*, 78, 645–656. <https://doi.org/10.1002/jwmg.696>
- Loxton, J., Macleod, A. K., Nall, C. R., McCollin, T., Machado, I., Simas, T., Vance, T., Kenny, C., Want, A., & Miller, R. G. (2017). Setting an agenda for biofouling research for the marine renewable energy industry. *International Journal of Marine Energy*, 19, 292–303. <https://doi.org/10.1016/j.ijome.2017.08.006>
- Luana, I. G., et al. (2022a). Electromagnetic fields generated by subsea cables: Effects on elasmobranchs and other marine organisms (laboratory-based evidence). *Marine Environmental Research*, 176, 105609. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2022.105609>
- Luana, A., Frédéric, O., Aurélie, J., Laurent, C., & Sylvain, C. (2022b). Insights into the behavioural responses of juvenile thornback ray *Raja clavata* to alternating and direct current magnetic fields. *Journal of Fish Biology*, 100(3), 645–659. <https://doi.org/10.1111/jfb.14978>
- Makovsky, Y., Bialik, O. M., Neuman, A., & Rubin-Blum, M. (2020). *Rare habitats at the seafloor of Palmahim Disturbance—Mapping and characterization for the purpose of conservation*.
- Martínez, M. L., Vázquez, G., Pérez-Maqueo, O., Silva, R., Moreno-Casasola, P., Mendoza-González, G., López-Portillo, J., MacGregor-Fors, I., Heckel, G., Hernández-Santana, J. R., García-Franco, J. G., Castillo-Campos, G., & Lara-Domínguez, A. L. (2021). A systemic view of potential environmental impacts of ocean energy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149, 111332. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111332>
- Martin-Short, R., Hill, J., Kramer, S. C., Avdis, A., Allison, P. A., & Piggott, M. D. (2015). Tidal resource extraction in the Pentland Firth, UK: Potential impacts on flow regime and sediment transport in the Inner Sound of Stroma. *Renewable Energy*, 76, 596–607. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.079>

- Mavraki, N., Degraer, S., & Vanaverbeke, J. (2021). Offshore wind farms and the attraction–production hypothesis: Insights from a combination of stomach content and stable isotope analyses. *Hydrobiologia*, 848, 1639–1657. <https://doi.org/10.1007/s10750-021-04553-6>
- Mavraki, N., Degraer, S., Vanaverbeke, J., & Braeckman, U. (2020). Organic matter assimilation by hard substrate fauna in an offshore wind farm area: A pulse-chase study. *ICES Journal of Marine Science*, 77, 2681–2693. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaa133>
- Maxwell, S. M., Kershaw, F., Locke, C. C., Conners, M. G., Dawson, C., Aylesworth, S., Loomis, R., & Johnson, A. F. (2022). Potential impacts of floating wind turbine technology for marine species and habitats. *Journal of Environmental Management*, 307, 114577. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114577>
- May, R., Åström, J., Hamre, J., & Dahl, E. L. (2017). Do birds in flight respond to (ultra)violet lighting? *Avian Research*, 8, 33. <https://doi.org/10.1186/s40657-017-0092-3>
- May, R., Reitan, O., Bevanger, K., [Co-author unclear], & Nygård, T. (2015). Mitigating wind-turbine induced avian mortality: Sensory, aerodynamic and cognitive constraints and options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 170–181. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.002>
- Methratta, E. T. (2020). Monitoring fisheries resources at offshore wind farms: BACI vs. BAG designs. *ICES Journal of Marine Science*, 77, 890–900. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaa026>
- Mevorach, Y., Scheinin, A., Galili, O., Santostasi, N. L., & Tchernov, D. (2022). Common dolphins (*Delphinus delphis*) in Israel: Unique dynamics of a critically endangered population. *Frontiers in Marine Science*, 9, 916950. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.916950>
- Miller, R., Hutchison, Z. L., Macleod, A. K., Burrows, M. T., Cook, E. J., Last, K. S., & Wilson, B. (2013). Marine renewable energy development: Assessing the benthic footprint at multiple scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(8), 433–440. <https://doi.org/10.1890/120089>
- Nall, C. R., [Co-author unclear], Cottier-Cook, E. J., & Guerin, A. J. (2022). Influence of coating type, colour, and deployment timing on biofouling by native and non-native species in a marine renewable energy context. *Biofouling*, 38, 729–745. <https://doi.org/10.1080/08927014.2022.2121209>
- Nall, C. R., [Co-author unclear], & Guerin, A. J. (2017). Characterisation of the biofouling community on a floating wave energy device. *Biofouling*, 33, 379–396. <https://doi.org/10.1080/08927014.2017.1317755>

- Nogues, Q., Raoux, A., Araignous, E., Chaalali, A., Hattab, T., Leroy, B., Ben Rais Lasram, F., David, V., Le Loc'h, F., Dauvin, J.-C., & Niquil, N. (2021). Cumulative effects of marine renewable energy and climate change on ecosystem properties: Sensitivity of ecological network analysis. *Ecological Indicators*, 121, 107128. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107128>
- Oakley, J. A., Jenkins, R. E., Thomas, T., Williams, A. T., & Phillips, M. R. (2016). Assessing harbour porpoise populations in south-west Wales: Data issues and implications for conservation and management. *Ocean & Coastal Management*, 119, 45–57. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.09.011>
- O'Connell, C. P., Abel, D. C., Gruber, S. H., Stroud, E. M., & Rice, P. H. (2011). Response of juvenile lemon sharks, *Negaprion brevirostris*, to a magnetic barrier simulating a beach net. *Ocean & Coastal Management*, 54(3), 225–230. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2010.11.006>
- O'Laughlin, C., [Co-author unclear], & Milligan, T. G. (2014). Flocculation and sediment deposition in a hypertidal creek. *Continental Shelf Research*, 82, 72–84. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2014.02.012>
- Oliveira-Pinto, S., & Stokkermans, J. (2020). Marine floating solar plants: An overview of potential, challenges and feasibility. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Maritime Engineering*, 173(4), 120–135. <https://doi.org/10.1680/jmaen.2020.10>
- Onoufriou, J., Brownlow, A., Moss, S., Hastie, G., & Thompson, D. (2019). Empirical determination of severe trauma in seals from collisions with tidal turbine blades. *Journal of Applied Ecology*, 56, 1712–1724. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13388>
- Ozer, T., Gertman, I., Kress, N., Silverman, J., & Herut, B. (2017). Interannual thermohaline (1979–2014) and nutrient (2002–2014) dynamics in the Levantine surface and intermediate water masses, SE Mediterranean Sea. *Global and Planetary Change*, 151, 60–67. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.04.001>
- Ozer, T., Gertman, I., Gildor, H., & Herut, B. (2022). Thermohaline temporal variability of the SE Mediterranean coastal waters (Israel)–long-term trends, seasonality, and connectivity. *Frontiers in Marine Science*, 8, 799457. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.799457>
- Ozkan, C., Mayo, T., & Passeri, D. L. (2022). The potential of wave energy conversion to mitigate coastal erosion from hurricanes. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(124). <https://doi.org/10.3390/jmse10020143>
- Palmer, L., Gillespie, D., MacAulay, J. D. J., Sparling, C. E., Russell, D. J. F., & Hastie, G. D. (2021). Harbour porpoise (*Phocoena phocoena*) presence is reduced during tidal turbine operation. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 31, 3543–3553. <https://doi.org/10.1002/aqc.3737>

- Patrício, S., Moura, A., & Simas, T. (2009). Wave energy and underwater noise: State of art and uncertainties. In *OCEANS '09 IEEE Bremen* (Paper 5278302). <https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2009.5278302>
- Pelc, R., & Fujita, R. M. (2002). Renewable energy from the ocean. *Marine Policy*, 26(6), 471–479. [https://doi.org/10.1016/S0308-597X\(02\)00045-3](https://doi.org/10.1016/S0308-597X(02)00045-3)
- Perkol-Finkel, S. (2014). *Ecologically active concrete for coastal and marine infrastructure: Innovative matrices and designs*. <https://doi.org/10.1680/fsts597571139>
- Perry, R. L., & Heyman, W. D. (2020). Considerations for offshore wind energy development effects on fish and fisheries in the United States: A review of existing studies, new efforts, and opportunities for innovation. *Oceanography*, 33, 28–37. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2020.403>
- Peschko, V., Mendel, B., Müller, S., Markones, N., Mercker, M., & Garthe, S. (2020). Effects of offshore windfarms on seabird abundance: Strong effects in spring and in the breeding season. *Marine Environmental Research*, 162, 105157. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.105157>
- Petersen, J.K. and Malm, T., 2006. Offshore windmill farms: threats to or possibilities for the marine environment. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 35(2), pp.75-80. [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2006\)35\[75:OWFTTO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2006)35[75:OWFTTO]2.0.CO;2)
- Petruny, L. M., Wright, A. J., & Smith, C. E. (2016). Renewables, shipping, and protected species: A vanishing opportunity for effective marine spatial planning? In *Advances in experimental medicine and biology* (Vol. 875, pp. 815–820). https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2981-8_100
- Pinardi, N., & Masetti, E. (2000). Variability of the large scale general circulation of the Mediterranean Sea from observations and modelling: a review. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 158(3-4), 153-173. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(00\)00048-1](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(00)00048-1)
- Pisacane, G., Sannino, G., Carillo, A., Struglia, M. V., & Bastianoni, S. (2018). Marine energy exploitation in the mediterranean region: steps forward and challenges. *Frontiers in Energy Research*, 6, 109. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00109>
- Pollock, C. J., Lane, J. V., Buckingham, L., Garthe, S., Jeavons, R., Furness, R. W., & Hamer, K. C. (2021). Risks to different populations and age classes of gannets from impacts of offshore wind farms in the southern North Sea. *Marine Environmental Research*, 171, 105457. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2021.105457>

- Popper, A. N., & Hawkins, A. D. (2019). An overview of fish bioacoustics and the impacts of anthropogenic sounds on fishes. *Journal of Fish Biology*, 94(5), 692–713. <https://doi.org/10.1111/jfb.13948>
- Popper, A. N., Hice-Dunton, L., Jenkins, E., Higgs, D. M., Krebs, J., Mooney, A., Rice, A., Roberts, L., Thomsen, F., Vigness-Raposa, K., Zeddies, D., & Williams, K. A. (2022). Offshore wind energy development: Research priorities for sound and vibration effects on fishes and aquatic invertebrates. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 151, 205–215. <https://doi.org/10.1121/10.0009237>
- Quinby-Hunt, M. S., Sloan, D., & Wilde, P. (1987). Potential environmental impacts of closed-cycle ocean thermal energy conversion. *Environmental Impact Assessment Review*, 7, 169–198. [https://doi.org/10.1016/0195-9255\(87\)90035-7](https://doi.org/10.1016/0195-9255(87)90035-7)
- Rahav, E., & Bar-Zeev, E. (2017). Sewage outburst triggers *Trichodesmium* bloom and enhance N₂ fixation rates. *Scientific Reports*, 7(1), 41381. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04622-8>
- Rahav, E., Raveh, O., Hazan, O., Gordon, N., Kress, N., Silverman, J., & Herut, B. (2018). Impact of nutrient enrichment on productivity of coastal water along the SE Mediterranean shore of Israel: A bioassay approach. *Marine Pollution Bulletin*, 127, 559–567. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.12.048>
- Raoux, A., Dambacher, J. M., Pezy, J.-P., Mazé, C., Dauvin, J.-C., & Niquil, N. (2018). Assessing cumulative socio-ecological impacts of offshore wind farm development in the Bay of Seine (English Channel). *Marine Policy*, 89, 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2017.12.007>
- Rees, E., & Rees, E. C. (2012). Impacts of wind farms on swans and geese: A review. *Wildfowl*, 62, 37–72.
- Reich, T., Ben-Ezra, T., Belkin, N., Tsemel, A., Aharonovich, D., Roth-Rosenberg, D., ... & Sher, D. (2022). A year in the life of the Eastern Mediterranean: Monthly dynamics of phytoplankton and bacterioplankton in an ultra-oligotrophic sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 182, 103720. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2022.103720>
- Reubens, J. T., Degraer, S., & Vincx, M. (2014). The ecology of benthopelagic fishes at offshore wind farms: A synthesis of 4 years of research. *ICES Journal of Marine Science*, 71(3), 1–11. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fst175>
- Rezaei, F., Contestabile, P., Vicinanza, D., & Azzellino, A. (2023). Towards understanding environmental and cumulative impacts of floating wind farms: Lessons learned from the fixed-bottom offshore wind farms. *Ocean & Coastal Management*, 243, 106772. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106772>

- Reznik, A. and Israel, A. (2012). Fuel from seaweeds: rationale and feasibility. In *The Science of Algal Fuels: Phycology, Geology, Biophotonics, Genomics and Nanotechnology*. 341-354. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Rilov, G., & Galil, B. (2009). *Marine bioinvasions in the Mediterranean Sea—History, distribution and ecology*. CIESM. <http://www.ciesm.org/>
- Roberts, J. M., Wheeler, A. J., & Freiwald, A. (2006). Reefs of the deep: the biology and geology of cold-water coral ecosystems. *Science*, 312(5773), 543-547. <https://doi.org/10.1126/science.1119861>
- Robinson Willmott, J., Forcey, G., & Vukovich, M. (2023). New insights into the influence of turbines on the behaviour of migrant birds: Implications for predicting impacts of offshore wind developments on wildlife. *Journal of Physics: Conference Series*, 2507(1), 012006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2507/1/012006>
- Rosa-Clot, P. (2020). FPV and environmental compatibility. In *Floating PV plants* (pp. 101–118). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817061-8.00009-9>
- Ross, L., Sottolichio, A., Huybrechts, N., & Brunet, P. (2021). Tidal turbines in the estuarine environment: From identifying optimal location to environmental impact. *Renewable Energy*, 169, 700–713. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.039>
- Rusu, E. (2022). Marine renewable energy: An important direction in taking the green road towards a low carbon future. *Energies*, 15, 5480. [Provided URL was a search link; ideally replace with the article landing page.]
- Sahu, A., Yadav, N., & Sudhakar, K. (2016). Floating photovoltaic power plant: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 815–824. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.051>
- Samsó, R., Crespin, J., García-Olivares, A., & Solé, J. (2023). Examining the potential of marine renewable energy: A net energy perspective. *Sustainability*, 15(10), 8050. <https://doi.org/10.3390/su15108050>
- Sanders, N., Haynes, T., & Goriup, P. D. (2017). Marine protected areas and offshore wind farms. In *Management of marine protected areas: A network perspective* (pp. 263–280). <https://doi.org/10.1002/9781119075806.ch14>
- Scheidat, M., Tougaard, J., Brasseur, S., Carstensen, J., van Polanen Petel, T., Teilmann, J., & Reijnders, P. (2011). Harbour porpoises (*Phocoena phocoena*) and wind farms: A case study in the Dutch North Sea. *Environmental Research Letters*, 6, 025102. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/2/025102>

- Schmitt, P., Culloch, R., Lieber, L., Molander, S., Hammar, L., & Kregting, L. (2017). A tool for simulating collision probabilities of animals with marine renewable energy devices. *PLoS ONE*, 12, e0188780. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0188780>
- Sedigh, E., Heidari, B., Roozati, A., & Valipour, A. (2019). The effect of different intensities of static magnetic field on stress and selected reproductive indices of the zebrafish (*Danio rerio*) during acute and subacute exposure. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 102, 204–209. <https://doi.org/10.1007/s00128-018-02538-1>
- Segal, Y., Gertner, Y., Sisma-Ventura, G., Zurel, D., & Herut, B. (2022). The state of beach litter pollution during the COVID-19 pandemic: A case study of the Israeli coasts. *Coastal Management*, 50(4), 372-384. <https://doi.org/10.1080/08920753.2022.2078177>
- Serrano, O., Ruhon, R., Lavery, P. S., Kendrick, G. A., Hickey, S., Masqué, P., Arias-Ortiz, A., Steven, A., & Duarte, C. M. (2016). Impact of mooring activities on carbon stocks in seagrass meadows. *Scientific Reports*, 6, 23193. <https://doi.org/10.1038/srep23193>
- Shadman, M., Silva, C., Faller, D., Wu, Z., de Freitas Assad, L. P., Landau, L., Levi, C., & Estefen, S. F. (2019). Ocean renewable energy potential, technology, and deployments: A case study of Brazil. *Energies*, 12(19), 3658. <https://doi.org/10.3390/en12193658>
- Shields, M. A., Woolf, D. K., Grist, E. P. M., Kerr, S. A., Jackson, A. C., Harris, R. E., Bell, M. C., Beharie, R., Want, A., Osalusi, E., Gibb, S. W., & Side, J. (2011). Marine renewable energy: The ecological implications of altering the hydrodynamics of the marine environment. *Ocean & Coastal Management*, 54, 2–9. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2010.10.036>
- Shumchenia, E. J., Smith, S. L., McCann, J., Carnevale, M., Fugate, G., Kenney, R. D., King, J. W., Paton, P., Schwartz, M., Spaulding, M., & Winiarski, K. J. (2012). An adaptive framework for selecting environmental monitoring protocols to support ocean renewable energy development. *The Scientific World Journal*, 2012, 450685. <https://doi.org/10.1100/2012/450685>
- Sisma-Ventura, G., Herut, B., Silverman, J., Katz, T., Rubin-Blum, M., & Rahav, E. (2021). P fluxes and prokaryotic cycling at benthic boundary layer in the deep southeastern Mediterranean Sea. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126(4), e2020JG006110. <https://doi.org/10.1029/2020JG006110>
- Skeate, E. R., Perrow, M. R., & Gilroy, J. J. (2012). Likely effects of construction of Scroby Sands offshore wind farm on a mixed population of harbour *Phoca vitulina* and grey *Halichoerus grypus* seals. *Marine Pollution Bulletin*, 64, 872–881. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.01.029>
- Song, J., Kim, J., Chung, W. C., Jung, D., Kang, Y. J., & Kim, S. (2023). Wave-induced structural response analysis of the supporting frames for multiconnected offshore floating photovoltaic units

installed in the inner harbor. *Ocean Engineering*, 279, 113812. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113812>

Sonin, O., Spanier, E., Levi, D., Patti, B., Rizzo, P., & Andreoli, M. G. (2007). Nanism (dwarfism) in fish: A comparison between red mullet *Mullus barbatus* from the southeastern and the central Mediterranean. *Marine Ecology Progress Series*, 343, 221–228. <https://doi.org/10.3354/meps06917>

Soukissian, T., Denaxa, D., Karathanasi, F., Prospathopoulos, A., Sarantakos, K., Iona, A., et al. (2017). Marine renewable energy in the Mediterranean Sea: Status and perspectives. *Energies*, 10(10), 1512.

Sørensen, B. (2017). *Renewable energy: Physics, engineering, environmental impacts, economics and planning* (5th ed.).

Souder, H. C., Li, Y., & Thresher, R. (2010). Marine hydrokinetic turbine technology and the environment: Device-biota interactions. In *MTS/IEEE Seattle OCEANS 2010* (Paper 5664055). <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2010.5664055>

Spiropoulou, I., Karamanis, D., & Kehayias, G. (2015). Offshore wind farms development in relation to environmental protected areas. *Sustainable Cities and Society*, 14, 305–312. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.05.006>

SPNI. (2020). *FRA proposal—The Palmahim Disturbance cold water coral gardens and cold seeps*. www.mafish.org.il/english

Stantial, M. L., & Cohen, J. B. (2015). Estimating flight height and flight speed of breeding piping plovers. *Journal of Field Ornithology*, 86, 369–377. <https://doi.org/10.1111/jofo.12120>

Stelzenmüller, V., Diekmann, R., Bastardie, F., Schulze, T., Berkenhagen, J., Kloppmann, M., Krause, G., Pogoda, B., Buck, B. H., & Kraus, G. (2016). Co-location of passive gear fisheries in offshore wind farms in the German EEZ of the North Sea: A first socio-economic scoping. *Journal of Environmental Management*, 183, 794–805. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.08.027>

Stelzenmüller, V., Gimpel, A., Haslob, H., Letschert, J., Berkenhagen, J., & Brüning, S. (2021). Sustainable co-location solutions for offshore wind farms and fisheries need to account for socio-ecological trade-offs. *Science of the Total Environment*, 776, 145918. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145918>

Stiber, B., & Beyene, A. (2015). Impact of wave energy conversion on sediment transport. In *ECOS 2015—28th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*.

- Suari, Y., & Brenner, S. (2015). Decadal biogeochemical history of the south east Levantine basin: Simulations of the river Nile regimes. *Journal of Marine Systems*, 148, 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2015.02.004>
- Taormina, B., Bald, J., Want, A., Thouzeau, G., Lejart, M., Desroy, N., & Carlier, A. (2018). A review of potential impacts of submarine power cables on the marine environment: Knowledge gaps, recommendations and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 380–391. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.026>
- Taquet, M., Sancho, G., & Gilibert, D. (2020). Environmental and ecological impacts of ocean thermal energy conversion (OTEC): A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110315. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110315>
- Teilmann, J., & Carstensen, J. (2012). Negative long term effects on harbour porpoises from a large scale offshore wind farm in the Baltic: Evidence of slow recovery. *Environmental Research Letters*, 7, 045101. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/045101>
- Thaxter, C. B., Ross-Smith, V. H., Bouten, W., Masden, E. A., Clark, N. A., Conway, G. J., Barber, L., Clewley, G. D., & Burton, N. H. K. (2018). Dodging the blades: New insights into three-dimensional space use of offshore wind farms by lesser black-backed gulls *Larus fuscus*. *Marine Ecology Progress Series*, 587, 247–253. <https://doi.org/10.3354/meps12415>
- Thingstad, T. F., Krom, M. D., Mantoura, R. F. C., Flaten, G. F., Groom, S., Herut, B., ... & Zohary, T. (2005). Nature of phosphorus limitation in the ultraoligotrophic eastern Mediterranean. *Science*, 309(5737), 1068–1071. <https://doi.org/10.1126/science.1112632>
- Tom, M., Lubinevsky, H., & Kanari, M. (2023). Integrative data system for monitoring biota and natural habitats in the Israeli Eastern Mediterranean marine environment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(9), 1068. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11693-w>
- Tsai, H.-H., Tseng, H.-S., Huang, C.-K., & Yu, S.-C. (2022). Review on the conflicts between offshore wind power and fishery rights: Marine spatial planning in Taiwan. *Energies*, 15(22), 8768. <https://doi.org/10.3390/en15228768>
- Vallejo, G. C., Grellier, K., Nelson, E. J., McGregor, R. M., Canning, S. J., Caryl, F. M., & McLean, N. (2017). Responses of two marine top predators to an offshore wind farm. *Ecology and Evolution*, 7, 8698–8708. <https://doi.org/10.1002/ece3.3389>
- van der Molen, J., Smith, H. C. M., Lepper, P., Limpenny, S., & Rees, J. (2014). Predicting the large-scale consequences of offshore wind turbine array development on a North Sea ecosystem. *Continental Shelf Research*, 85, 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2014.05.018>

- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523–538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Vanermen, N., Onkelinx, T., Courtens, W., de Walle, M., Verstraete, H., & Stienen, E. W. M. (2015). Seabird avoidance and attraction at an offshore wind farm in the Belgian part of the North Sea. *Hydrobiologia*, 756, 51–61. <https://doi.org/10.1007/s10750-014-2088-x>
- van Berkel, J., Burchard, H., Christensen, A., Mortensen, L. O., Petersen, O. S., & Thomsen, F. (2020). The effects of offshore wind farms on hydrodynamics and implications for marine ecosystems. *Oceanography*, 33(4), 108–117. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2020.410>
- van Hal, R., Griffioen, A., & van Keeken, O. (2017). Changes in fish communities on a small spatial scale: An effect of increased habitat complexity by an offshore wind farm. *Marine Environmental Research*, 126, 26–36. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2017.01.009>
- Van Parijs, M. S., Baker, K., Carduner, J., Daly, J., Davis, G. E., Esch, C., Guan, S., Scholik-Schlomer, A., Sisson, N. B., & Staatterman, E. (2021). NOAA and BOEM minimum recommendations for use of passive acoustic listening systems in offshore wind energy development monitoring and mitigation programs. *Frontiers in Marine Science*, 8, 760840. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.760840>
- Verfuss, U. K., Sparling, C. E., Arnot, C., Judd, A., & Coyle, M. (2016). Review of offshore wind farm impact monitoring and mitigation with regard to marine mammals. In *Advances in experimental medicine and biology* (Vol. 875, pp. 1175–1182). https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2981-8_147
- Vilela, R., Burger, C., Diederichs, A., Bachl, F. E., Szostek, L., Freund, A., Braasch, A., Bellebaum, J., Beckers, B., Piper, W., & Nehls, G. (2021). Use of an INLA latent Gaussian modeling approach to assess bird population changes due to the development of offshore wind farms. *Frontiers in Marine Science*, 8, 701332. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.701332>
- Waggitt, J. J., Bell, P. S., & Scott, B. E. (2014). An evaluation of the use of shore-based surveys for estimating spatial overlap between deep-diving seabirds and tidal stream turbines. *International Journal of Marine Energy*, 8, 36–49. <https://doi.org/10.1016/j.ijome.2014.10.004>
- Waggitt, J. J., & Scott, B. E. (2014). Using a spatial overlap approach to estimate the risk of collisions between deep diving seabirds and tidal stream turbines: A review of potential methods and approaches. *Marine Policy*, 44, 90–97. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2013.07.007>
- Wang, H. Y., Fang, H. M., & Chiang, Y. C. (2021). Study on the coexistence of offshore wind farms and cage culture. *Water*, 13(1960). <https://doi.org/10.3390/w13141960>

- Wang, Z., & Tabeta, S. (2017). Numerical simulations of ecosystem change due to discharged water from ocean thermal energy conversion plant. In *OCEANS 2017—Aberdeen* (pp. 1–5). <https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2017.8084610>
- Want, A., Bell, M. C., Harris, R. E., Hull, M. Q., Long, C. R., & Porter, J. S. (2021). Sea-trial verification of a novel system for monitoring biofouling and testing anti-fouling coatings in highly energetic environments targeted by the marine renewable energy industry. *Biofouling*, 37, 433–451. <https://doi.org/10.1080/08927014.2021.1928091>
- Want, A., Crawford, R., Kakkonen, J., Kiddie, G., Miller, S., Harris, R. E., & Porter, J. S. (2017). Biodiversity characterisation and hydrodynamic consequences of marine fouling communities on marine renewable energy infrastructure in the Orkney Islands Archipelago, Scotland, UK. *Biofouling*, 33, 567–579. <https://doi.org/10.1080/08927014.2017.1336229>
- Warwick-Evans, V., Atkinson, P. W., Walkington, I., & Green, J. A. (2018). Predicting the impacts of wind farms on seabirds: An individual-based model. *Journal of Applied Ecology*, 55, 503–515. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12996>
- Welcker, J., & Nehls, G. (2016). Displacement of seabirds by an offshore wind farm in the North Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 554, 173–182. <https://doi.org/10.3354/meps11812>
- Wilhelmsson, D., & Malm, T. (2008). Fouling assemblages on offshore wind power plants and adjacent substrata. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 79, 459–466. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.04.020>
- Willsted, E., Gill, A. B., Birchenough, S. N. R., & Jude, S. (2017). Assessing the cumulative environmental effects of marine renewable energy developments: Establishing common ground. *Science of the Total Environment*, 577, 19–32. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.152>
- Wingfield, J. E., O'Brien, M., Lyubchich, V., Roberts, J. J., Halpin, P. N., Rice, A. N., & Bailey, H. (2017). Year-round spatiotemporal distribution of harbour porpoises within and around the Maryland wind energy area. *PLoS ONE*, 12, e0176653. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176653>
- Yang, C., Li, R., Cui, C., Liu, S., Qiu, Q., Ding, Y., ... & Zhang, B. (2016). Catalytic hydroprocessing of microalgae-derived biofuels: a review. *Green Chemistry*, 18(13), 3684–3699. <https://doi.org/10.1039/C6GC01239F>
- Yang, H., & Lin, C. Y. (2022). Promising strategies for the reduction of pollutant emissions from working vessels in offshore wind farms: The example of Taiwan. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(5), 621. <https://doi.org/10.3390/jmse10050621>

Zheng, X., Ge, Y., Lu, Z., Cao, C., Zhou, P., Li, S., Chen, J., Liu, Z., Chen, Y., & Yang, Y. (2022). Study on buried depth protection index of submarine cable based on physical and numerical modeling. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(2), 137. <https://doi.org/10.3390/jmse10020137>

Zuriel, Y. E., Levi Avshalom, N., van Rijn, I., Livne, L., Galili, O., Tchernov, D., Scheinin, A. P., & Kerem, D. (2023). Multi-year passive acoustic monitoring of coastal dolphins along the Israeli Mediterranean shallow shelf reveals the impact of marine fish farms and trawling patterns on their habitat utilization. *Marine Environmental Research*, 188, 106014. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2023.106014>

אופיר, א'. (2022). ניתוח סיכונים לבעלי כנף ממתקנים ימיים.

אריאל, ב', וברש, ע'. (2015). תכנית פעולה להגנה על כרישים ובטאים בים התיכון בישראל.

ברנע, א', ויהל, ר'. (2016). עולם חבוי בין גרגרי החול — המצע הרך בים התיכון.

גיאופרוספקט, וחיא"ל. (2016). סקר אסטרטגי סביבתי לחיפוש ולהפקה של נפט ושל גז טבעי בים (עמ' 1–259) [דוח].

גליל, ב', גורן, מ'. (2013). שונית הצינורניים בחוף הים-תיכוני של ישראל – השונית שאבדה. בתוך נ' סטמבלר (עורכת), *הוד הים: יציבות ושינוי במערכות הימיות של ישראל*. עמ' 133–144.

חיא"ל. (2021). תכנית הניטור הלאומית בים התיכון לשנת 2021 – ניטור זיהום ים. <https://acrobat.adobe.com/link/review?uri=urn:aaid:scds:US:ab99baa1-2051-36f1-add7-05ed4ab230af>

טכניון. (2015). תכנית ימית לישראל.

<https://msp-israel.net.technion.ac.il/files/2015/11/Israel-Marine-Plan-.pdf>

כרם, ד'. (2014). עולם הדממה: הצורך בהגבלת הרעש בים. *אקולוגיה וסביבה*, 62.5–61, (1).

כרם, ד', שיינין, א', גופמן, ע', אלסר, מ', והדר, נ'. (2013). יונקים ימיים בים התיכון ובצפון ים סוף. בתוך נ' סטמבלר (עורכת), *הוד הים: יציבות ושינוי במערכות הימיות של ישראל*. עמ' 188–198.

כנרי, מ', תום, מ'. (2021). עדכון בתי גידול רגילים בהפרעת פלמחים ובסביבתה.

לבין, צ', אבישר, א', ואחרים. (2017). זיהום אור וצמצומו – רקע מדעי, תמונת מצב ודרכי פעולה אפשריות [דוח]. האגודה הישראלית לאקולוגיה ולמדעי הסביבה.

מנהל התכנון (2022). מסמך חזון מדיניות למרחב הימי של ישראל / ים תיכון. https://www.gov.il/he/Departments/policies/sea_policy_suggest

מירוזה, א'. (2013). חוות דעת אורניתולוגית למתקנים הימיים מול חופי ישראל.

סטמבלר, נ', כרם, ד', ושר, ד'. (2014). *השפעת כריית חול ימי על אורגניזמים* (33 עמודים) [דוח]. האגודה הישראלית לאקולוגיה ולמדעי הסביבה.

פישלזון, ל'. (1996). החיים במים. בתוך ב' אלוך (עורך), *החי והצומח של ארץ ישראל* (כרך 4).

פרלמן, י'. (2013). מבט מעמיק על עופות הים – דוגמה מניטור אזרחי: מגמות בזמן ובמרחב בתפוצת עופות ים סמוך לחוף הים התיכון בישראל. בתוך א' שיינין (עורך), *דוח מצב הטבע בים התיכון* (עמ' 100–108). המארג, בחסות האקדמיה הישראלית למדעים.

רוטשילד, א', אופיר, א', שבתאי, ע', ואחרים. (2023). ניתוח סיכונים לציפורים ממתקנים ימיים מול חופי ישראל. *אקולוגיה וסביבה*, 14.

רילוב, ג', גיא-חיים, ת'. (2013). שוניות סלעיות בליטורל חופי הים התיכון הישראלי – אקוסיסטמות בשינוי פאזה. בתוך נ' סטמבלר (עורכת), *הוד הים: יציבות ושינוי במערכות הימיות של ישראל*. עמ' 145–168.

שיינין, א', צמל, ע', ברנע, א', אדליסט, ד', קלס, ק', גפן-גלזר, ע', היאמס, ל', פרלמן, י', יהל, ר', ואנגרט, נ'. (2013). *דוח מצב הטבע בים התיכון* [דוח].