



משרד התשתיות הלאומיות
המכון הגיאולוגי

היווצרות הבורות לאורך חופי ים המלח

דניאל וקס, יוסף יחיאלי, ולדימיר שטיבלמן, אריה איתמר,
גדעון בר, מרק גולדמן, אלי רז, מיכאל ריבקוף, אורי שטנר





היווצרות הבורות לאורך חופי ים המלח

סיכום ממצאי השלב הראשון של המחקר

דניאל וקס¹, יוסף יחיאלי¹, ולדימיר שטיבלמן²
אריה איתמר¹, גדעון בר¹, מרק גולדמן²,
אלי רז¹, מיכאל ריבקוף², אורי שטנר¹

1 - המכון הגיאולוגי

2 - המכון הגיאופיזי

<u>עמוד</u>	<u>תוכן עניינים</u>
1	תקציר
3	1. הקדמה
3	2. רקע
3	2.1 רקע כללי
5	2.2 רקע הידרוגיאולוגי
7	3. מנגנונים גיאולוגיים היוצרים בורות בפני השטח
10	3.1 מנגנון מכני (ארוזיבי - Piping)
13	3.2 מנגנון כימי (יצירת קרסט)
13	4. ירידת מפלס ים המלח ומשמעותה לגבי היווצרות הבורות
16	5. שיטות המחקר
17	6. תוצאות המחקר
17	6.1 השתרעות הבורות במרחב ובזמן
20	6.2 נתוני שדה
21	6.3 האגן הדרומי - אזור בריכות האידוי של מפעלי ים המלח
22	6.4 סקרים גיאודטיים
23	7. גיאופיסיקה - מדידות בתת-הקרקע
23	7.1 רפרקציה סייסמית
24	7.2 רפלקציה סייסמית בהפרדה גבוהה
24	7.3 סקרים אלקטרומגנטיים (TDEM)
27	7.4 סקרי מיקרוגרבימטריה
28	7.5 רדאר חודר קרקע (GPR)
31	8. קידוח בדרום נחל חבר (HEVER 1)
34	9. דיון
35	9.1 עדויות להימצאות חללים בתת-הקרקע
35	9.2 ההשתרעות המרחבית של שכבת המלח בתת-הקרקע
37	9.3 מתי נוצרו החללים
38	9.4 השפעה אפשרית של סידוק ושבירה
39	9.5 התנאים הגיאולוגיים וההידרוגיאולוגיים בהם נוצרים החללים והבורות
42	10. סיכום ומסקנות
45	11. המלצות ועיקרי תוכנית עבודה להמשך
45	11.1 זיהוי ומיפוי של אזורי הסיכון
46	11.2 ניטור ומעקב במרחב ובזמן
46	11.3 בחינת אמצעים ושיטות להאטת ההמסה האינטנסיבית של שכבת המלח בתת-הקרקע
47	הבעת תודה

רשימת ציורים

- 4 ציור 1. מפת מיקום אתרי בורות ואתרים בהם בוצעו סקרי רפרקציה סייסמית.
- 6 ציור 2. חתך הידרוגיאולוגי סכמתי של תת-הקרקע
- 8 ציור 3. a. ירידת מפלס ים המלח בשנים 1930-2000.
b. ירידת מפלס מי התהום בשנים 1971-1989
- 9 ציור 4. מנגנון אפשרי להתפתחות בורות בפני השטח
- 12 ציור 5. מנגנון יצירת חללים בתת-הקרקע על פי Arkin and Gilat 2000
- 15 ציור 6. תאור סכמתי המציג את ההשפעה על מיקומו של הפן הביני
- 25 ציור 7. קו רפרקציה סייסמית באתר נחל חבר דרום
- 26 ציור 8. חתך גיאופיסי בתת-הקרקע בשיטת ה - TDEM
- 29 ציור 9. מפה מיקרוגרבימטרית רזידואלית (Residual) באתר נחל חבר דרום
- 30 ציור 10. מפה מיקרוגרבימטרית רזידואלית באתר עשהאל
- 32,33 ציור 11. חתכים הידרוגיאולוגיים של תת-הקרקע באתר נחל חבר דרום
- 41 ציור 12. מערכת הלחצים של האקויפרים בקרבת החוף

רשימת צילומים

- 18 צילום 1 - אתר נחל חבר צפון
- 19 צילום 2 - אתר מעיינות סמר

רשימת נספחים

- נספח 1 - איתמר ורייזמן, 2000
- נספח 2 - רז, 2000
- נספח 3 - Baer et al., 2000
- נספח 4 - Shtivelman et al., 1999
- נספח 5 - Rybakov et al., 2000
- נספח 6 - יחיאלי, 2000

הערה: בחלק מהנספחים לדוח, ישנה התייחסות של מחבריהם לגבי המנגנונים הגיאולוגיים וההידרולוגיים האחראים להיווצרות הבורות בפני השטח. התייחסות ראשונית זו מסתמכת בעיקר על הממצאים הניתנים בכל נספח בנפרד, ואין בה סיכום המבוסס על אינטגרציה וניתוח של כלל הנתונים. בדוח הנוכחי מוצגת תמונת המצב העדכנית בראיה כוללת והוא בלבד מהווה סיכום מוסמך של העבודה בשלב זה. הנספחים מובאים להצגה מפורטת של הנתונים כפי שנאספו במהלך העבודה. התקליטור המצורף מכיל את כל הדוחות שנכתבו במסגרת פרויקט הבורות (כולל מספר דוחות שלא נכללו כנספחים בדוח הנוכחי).

תקציר

לאורך חופי ים המלח נוצרו בעשור האחרון מאות בורות המהווים סיכון לנפש ורכוש, משבשים את מהלך החיים באזור ופוגעים בפיתוח ובבניה. היווצרות הבורות הנה תהליך דינמי שבמהלכו נפערים בורות חדשים באתרים צפויים ובלתי צפויים.

המשרד לתשתיות לאומיות, באמצעות המכון הגיאולוגי והמכון הגיאופיסי, יזמו וביצעו עבודה מקיפה במטרה להבין ולהכיר את המנגנונים הגיאולוגיים הפועלים בתת-הקרקע והאחראים להיווצרות הבורות בפני השטח. כוונת העבודה להצביע על דרכים ופתרונות שיאפשרו לצמצם את ממדי התופעה ולחדש את תהליכי התכנון והבנייה באזור.

במסגרת העבודה בוצעו מחקרי שדה מקיפים, ופותחו ויושמו כלים גיאופיסיים המאפשרים ללמוד על הנעשה בתת-הקרקע ועל ההשלכות הקימות לכך לגבי היווצרות הבורות. באמצעות קידוחים אומתו הנתונים שהתקבלו מהבדיקות הגיאופיסייות. שילוב של מחקרי שדה, לימוד תצלומי אוויר והמידע שהתקבל מתת-הקרקע אפשר להציע מודל הידרוגיאולוגי המציג את מכלול הגורמים והסיבות המביאים להיווצרות הבורות.

הירידה המתמשכת של מפלס ים המלח בשלושים השנים האחרונות גורמת לשינוים מהירים וחריפים בתנאים ההידרוגיאולוגיים השוררים בתת-הקרקע באזור הקרוב לחוף. עקב ירידת מפלס מי התהום, ושנוי במיקום הפן הביני, שכבת מלח המצויה בתת-הקרקע באה במגע עם מים לא רוויים במלח, שמקורם כנראה באקויפר כלוא מתחתיה, הגורמים להמסתה וליצירת חללים בתוכה. עם הזמן, תקרות החללים קורסות ובעקבותיהן המסלע הבלתי מלוכד שמעל לשכבת המלח קורס לתוך החללים. התהליך מסתיים ביצירת בורות בפני השטח.

באמצעות שיטות גיאופיסייות ניתן להבחין בשכבת המלח, בגופי מים לא רוויים בקרבתה, וברמזים לקיומם של חללים בעומק בלתי ידוע. הימצאות שכבת המלח בתת-הקרקע מהווה כנראה תנאי הכרחי להיווצרות הבורות בפני השטח, והנה בעלת השתרעות מרחבית הניתנת למיפוי. בקידוח שנעשה במסגרת המחקר בנחל חבר נחדרה בעומק 24 מטר שכבת מלח שעובייה 11 מטר, וזאת בהתאם לתוצאות הבדיקות הגיאופיזיות. בצפון ים המלח, מאזור נחל קדרון וצפונה, לא נמצאו עדויות להימצאות שכבת המלח בתת-הקרקע וגם לא נתגלו עד עתה בורות.

ההנחה היא שניתן לצמצם את ממדי התופעה ולמנוע התפתחות בורות חדשים בפני השטח על ידי הרחקת המים הלא רוויים במלח משכבת המלח. בדרך זו ניתן יהיה להקטין את קצב ההמסה של השכבה, למנוע היווצרות חללים חדשים בשכבה ו/או להאט את קצב ההתפתחות של אלה הקיימים כבר.

ההמלצות העיקריות הניתנות בדו"ח מכוונות ליצור את הכלים הנדרשים לאפשר את המשך התכנון והפיתוח באזור. באמצעות הכלים הגיאופיסיים שפותחו, המידע שנאסף והמודל ההידרוגיאולוגי שהותווה, ניתן עתה לגשת להכנת מפות מיקרוזונציה, שמטרתן להגדיר במפורט את אזורי הסיכון, ולהתמודד עם הבעיה בכלל ובאתרים נבחרים בפרט.

לצורך כך יש למפות את ההשתרעות המרחבית של שכבת המלח בתת-הקרקע ולבחון וליישם את השיטה המיקרוגרבימטרית להבחנה בקיומם של חללים בתת-הקרקע. כמו כן צריך להרחיב את המידע הקיים לגבי התנאים ההידרוגיאולוגיים הקיימים באזור. מוצע לבחון את האפשרות להשפיע ולשנות מקומית את התנאים ההידרוגיאולוגיים בעזרת קידוחים לשאיבות מים בלתי רוויים במלח כדי לצמצם משמעותית את ממדי התופעה ואת תוצאותיה. על מנת להשיג את המטרות האלה בעתיד הקרוב, יש לגשת מידית לביצוע העבודות הנדרשות, המפורטות בתוכנית העבודה המצורפת.

מכיוון שלא ניתן לשלול לחלוטין מנגנונים גיאולוגיים נוספים העשויים להתקיים במקביל, בעיקר באתר מפעלי ים המלח, מוצע לשקול ולבחון את האפשרות שחלק מהבורות שם נוצרים גם על ידי מנגנון הקשור בארוזיה מכנית (Piping).

1 . הקדמה

לאורך חופי ים המלח נוצרים בורות שעומקם מגיע עד ל - 11 מטר, וקוטרם עד כ - 25 מטרים. מפת הפריסה של אתרי הבורות מוצגת בצירוף 1. ממדי התופעה וקצב התפתחותה חורגים מתחום הבור היחיד, ומחייבים התייחסות נרחבת הן למנגנוני היווצרותה, והן לסיכונים הנובעים ממנה. התופעה שאותה ניתן להגדיר כקריסת התשתית, מהווה סיכון לנפש ורכוש ופוגעת בהליכי התכנון והבנייה באזור.

צוות מחקר רב תחומי שכלל גיאולוגים, הידרוגיאולוגים וגיאופיזיקאים הופקד על חקר התופעה. הדוח הנוכחי מסכם את המחקרים שנעשו במהלך שתי שנות מחקר, מציג את הממצאים והמסקנות שגובשו, ומחדד את מכלול ההיבטים והשאלות הפתוחות שעדיין לא זכו למענה. בפרק הסיכום מוצגות המלצות לגבי המשך העבודה. הדוח מבוסס על הנתונים המוצגים בדוחות המצורפים כנספחים ויש בו גם התייחסות למאמרים שפורסמו בנושא לאחרונה וזאת על מנת להציג תמונת מצב שלמה ועדכנית.

2 . רקע

2.1 רקע כללי

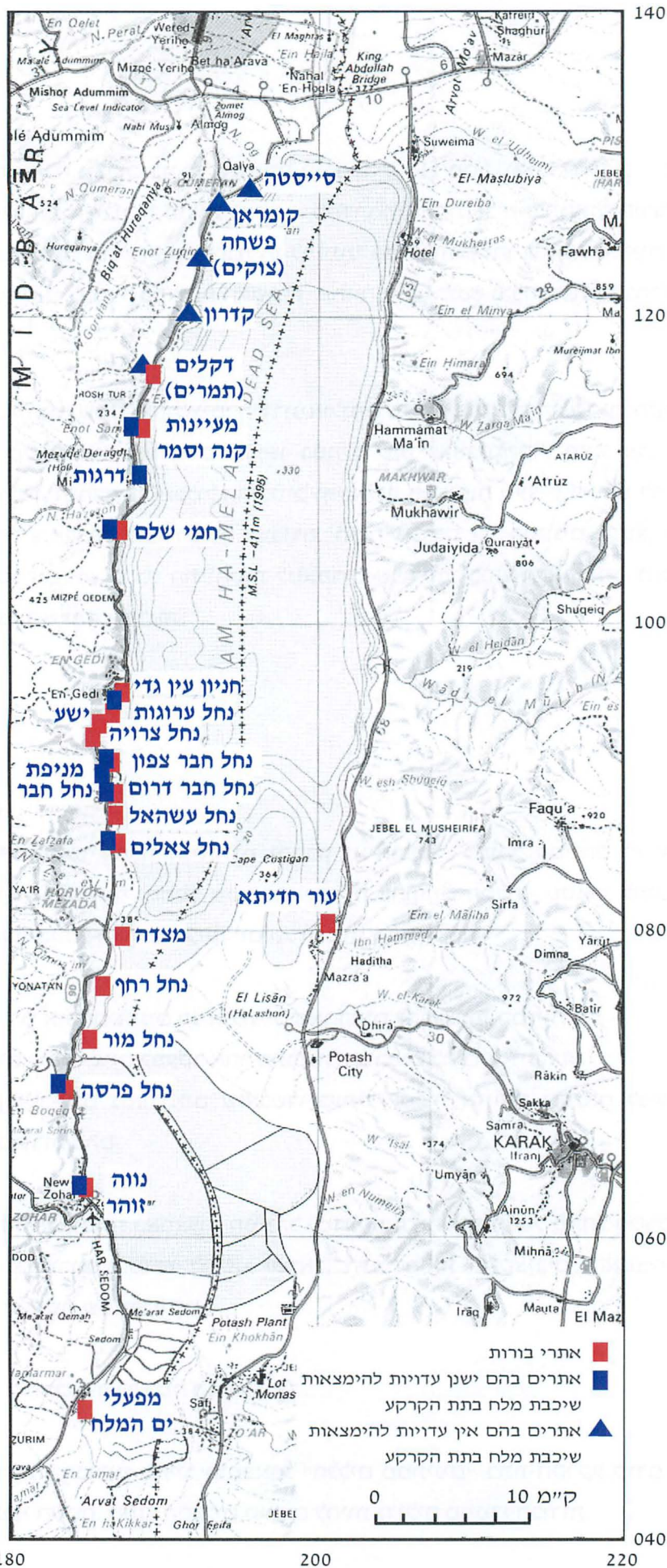
בספטמבר 1998 הגישו המכון הגיאולוגי והמכון הגיאופיזיקאי למנהל המינהל למדעי האדמה, שמונה לראשות ועדת היגוי, מסמך שכותרתו "בורות בחוף ים המלח - מסגרת לתוכנית עבודה גיאולוגית וגיאופיזיקית". היעדים העיקריים של תוכנית המחקר היו:

- א. להכיר ולהבין את המנגנונים הגיאולוגיים האחראים להיווצרות הבורות.
- ב. לפתח כלים גיאופיזיקיים למעקב אחר התופעה והגורמים לה בתת-הקרקע.
- ג. לפתח קריטריונים גיאולוגיים שיאפשרו בעתיד למפות אזורים בהתאם לפוטנציאל של התפתחות בורות בהם.

המשרד לתשתיות לאומיות באמצעות המינהל למדעי האדמה ובסיוע של מינהל מקרקעי ישראל, מע"צ, משרד התיירות והמרכז למיפוי ישראל, העמידו את התקציבים והאמצעים שנדרשו לביצוע השלב הראשון של הפרויקט.

תוכנית העבודה התבססה על כמה הנחות יסוד :

- א. אופן היווצרות הבורות מחייב הימצאות "חללים ממתניים" בתת-הקרקע קודם להיווצרות הבורות בפני השטח. ממדי החללים חייבים להיות גדולים מממדי הבורות.



ציור 1. מפת מיקום אתרי בורות ואתרים בהם בוצעו סקרי רפרקציה סייסמית. מצפון לאתר הבורות דקלים (תמרים) אין עדויות להימצאות בורות בפני השטח ואין עדויות להימצאות שכבת מלח בתת-הקרקע.

ב. ההאצה בהתפתחות הבורות בשנים האחרונות קשורה כנראה לירידה המהירה של מפלס ים המלח.

ג. לפחות לגבי חלק מהבורות העמוקים והגדולים חייבים החללים הממתינים להימצא מתחת למפלס מי התהום. התנאים הגיאולוגיים וההידרולוגיים שוללים מנגנון בו נוצרים הבורות הגדולים על ידי שטיפת חומר דק מהאלוביום.

ד. המנגנון שאומץ כהנחת עבודה מייחס את היווצרות הבורות בפני השטח לקריסת תקרת חלל תת-קרקעי שמקורו בהמסת שכבת מלח בעומק, כגון זו שאותרה בקדוח DSIF בנחל צאלים.

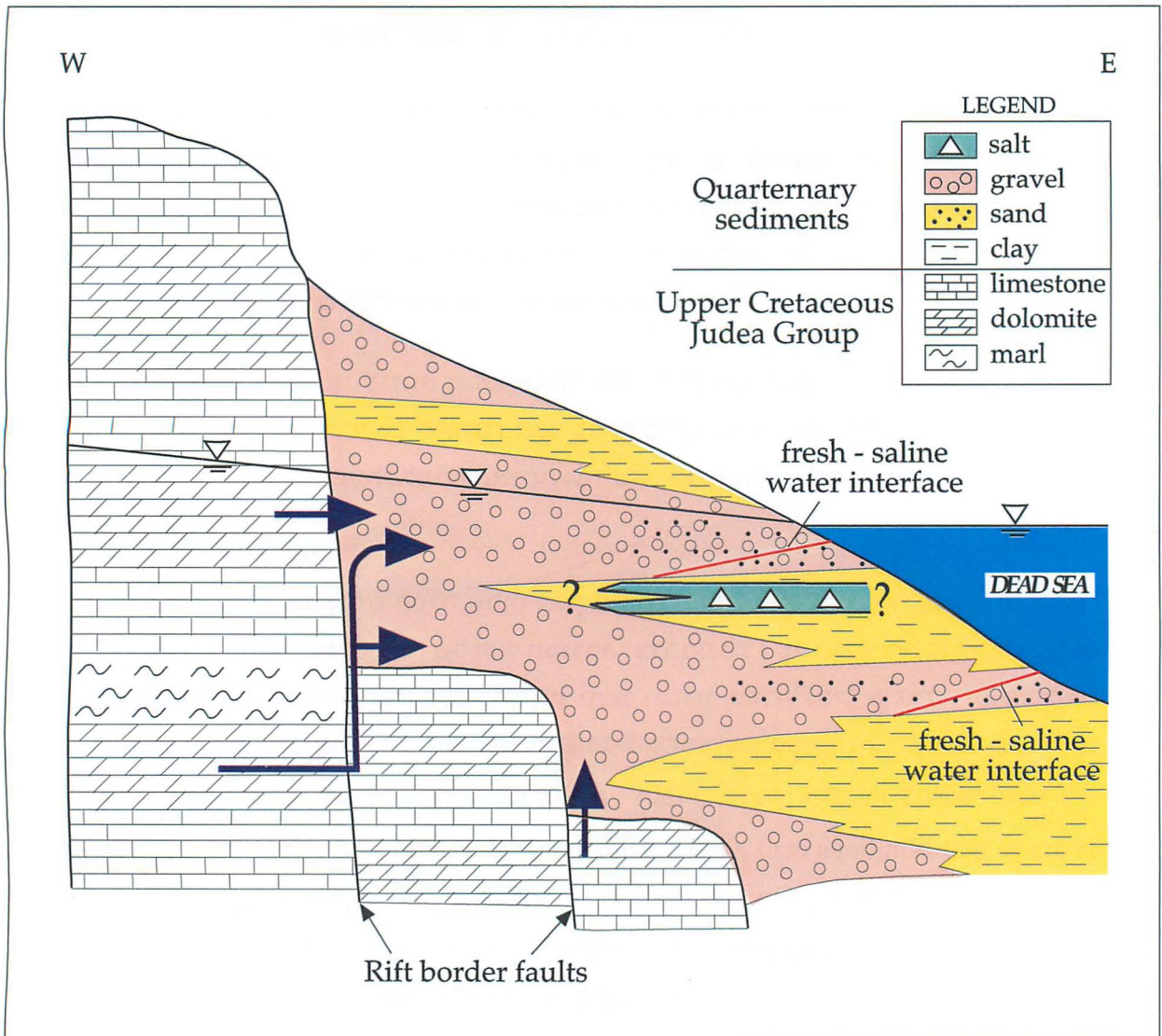
במאי 1999 הוגש לוועדת ההיגוי של הפרויקט דו"ח ביניים (וקס, רז ושטיבלמן, 1999), שסיכם את הממצאים והתוצאות של הבדיקות והמחקרים שנעשו עד להגשתו. הממצאים והמסקנות העיקריים של הדוח הצביעו שאכן בתת-הקרקע מצויה שכבת מלח בעובי של 8-12 מטר בעומק של כ- 25 מטר באגן הצפוני, ו- 40-45 מטר באגן הדרומי. מדרום לנחל חבר נמצאו עדויות גיאופיזיות להימצאות מים לא רוויים במלח מתחת לשכבת המלח הנזכרת.

הדוח המליץ על ביצוע שני קידוחי מחקר באתר הבורות מדרום לשפך נחל חבר, כדי לאמת את העדויות הגיאופיזיות. בהתאם להמלצה בוצע קידוח מחקר באתר חבר דרום. בתכנון הקידוחים ובמהלך הביצוע שלהם המינהל למדעי האדמה נעזר בד"ר ארנון חרש מתה"ל כיועץ חיצוני.

2.2 רקע הידרוגיאולוגי

אזור העבודה נמצא בבקע ים המלח שהינו חלק מהשבר הסורי-אפריקאי וטרנספורם ים המלח שלאורכו מתקיימת הסטה צפונה של הצד המזרחי. צדו המערבי של הבקע מוגבל על ידי מספר שברים נורמליים. שברים אלו מעמידים את סלעי חבורת יהודה מגיל קרטיקון מול סלעים קוורטרים השייכים לחבורת ים המלח (ציור 2) מגיל פליוקן-פלייסטוקן (זק, 1967). חבורת ים המלח נחלקת למספר תצורות, שהעליונות בהן הן תצורת הלשון, ששקעה בתקופה שבין כ- 70,000 שנה לכ- 17,000 שנה (Kaufman et al., 1992, Schramm et al., 2000) ומעליה מונחת תצורת צאלים מגיל הולוקן (Yeichieli, 1993, שטיין וחובי, 1998, כדן, 1997). שתי תצורות אלו בנויות מחילופין של סדימנטים אלוביאליים (חרסית, סילט וחלוקים) וסדימנטים אגמים (מלח, גבס וארגוניט). שכבת מלח בעובי של 6.5 מ' נמצאה בנחל צאלים בעומק של 24 מ' וגילה כ- 10,000 שנה (Yeichieli, 1993).

באזור ים המלח קיימים 3 אקויפרים עיקריים, הכוללים את אקויפר חבורת כורנוב הבנוי בעיקר מאבני חול, אקויפר חבורת יהודה הבנוי בעיקר מגיר דלומיט וחואר והאקויפר הקוורטרי הבנוי מסלעים אלוביאליים ואגמיים. האקויפר האלוביאלי מופרד מהאקויפר של חבורת יהודה על ידי סדרת העתקים של שולי הבקע. עיקר מקור המים באקויפר האלוביאלי במי גשמים שיוורדים באזור ההר ומגיעים דרך אקויפר חבורת יהודה לאקויפר האלוביאלי ומיעוטם במי שטפונות. החילופין בין סדימנטים דקי גרגר (סילט וחרסית) וגסי גרגר (חלוקים) באקויפר האלוביאלי יוצרים מספר תת אקויפרים השונים בהרכבם הכימי, במפלסם ולעתים גם בטמפרטורת המים



ציור 2. חתך גיאולוגי סכמתי של תת-הקרקע ממערב לקו החוף של ים המלח. החצים הכחולים מציינים זרימה משוערת של מי תהום מהסלעים של חבורת יהודה לעבר השכבות הצעירות של המילוי הסדימנטרי. בחלק המזרחי של החתך מצויה בתת-הקרקע שכבת מלח הממשיכה כנראה גם אל מתחת לים למרחק בלתי ידוע.

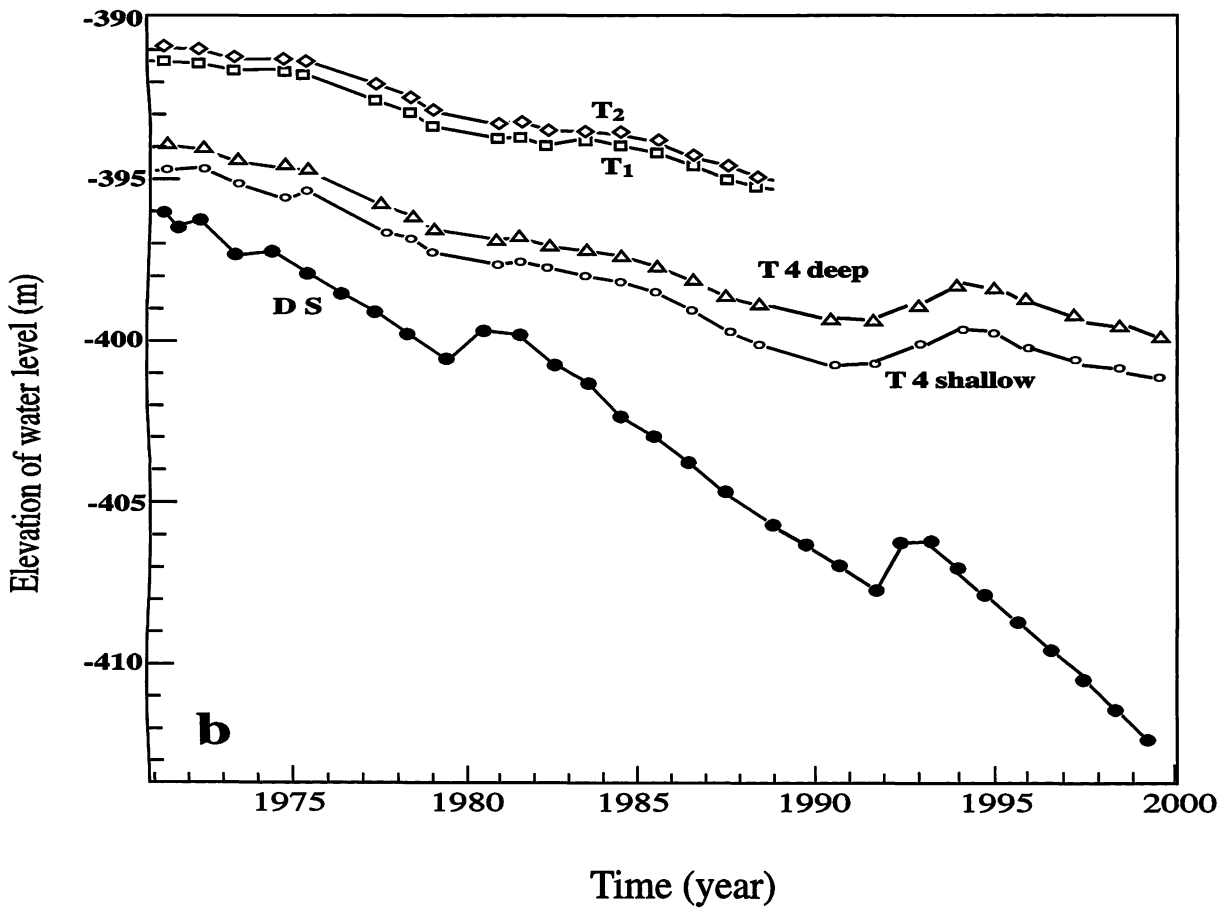
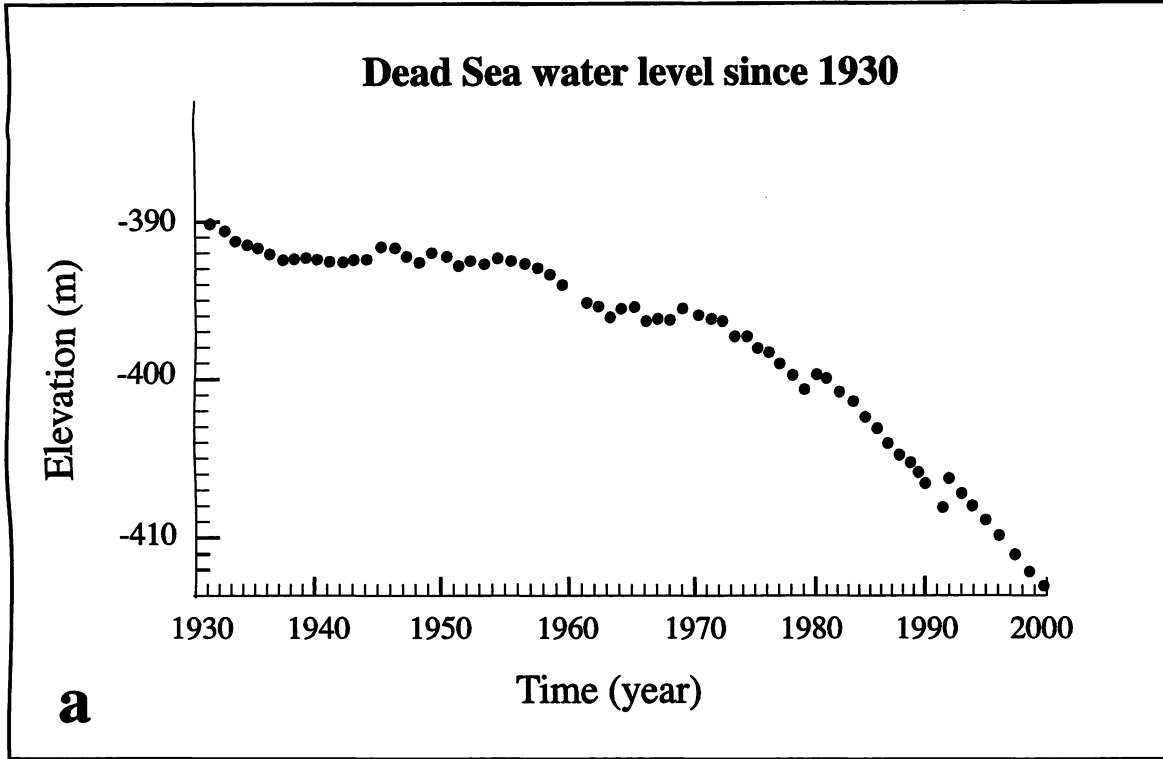
שלהם (לדוגמה באזור טורייבה, ביידא וגולדשטוף, 1972 ; Yechieli, 1993). מליחות המים משתנה בין מים מתוקים בקרבת מצוק ההעתקים למים מלוחים מאוד (במליחות מי ים המלח) בקרבת חוף הים (Gavrieli et al., 1997, יחיאלי וארד, 1997). הפן הביני (אזור המעבר בין מי ים המלח למי תהום מתוקים יותר) הנו בעל שיפוע מתון מאוד, הרבה יותר מזה שבקרבת ים רגיל, בגלל הפרש הצפיפויות הגדול בין מי ים המלח למים מתוקים (Yechieli, 2000). ירידת מפלס ים המלח, שהואצה בשנות הששים, גרמה לירידות מפלסי מי תהום (ציור 3) ולשוני במיקום הפן הביני (Yechieli et al., 1995; Salameh and El-Naser, 2000).

ירידת מפלס ים המלח הנה תוצאה של מאזן המים השלילי של האגם בעקבות שאיבות המים המוגברות בכינרת ובסביבותיה, על ידי ישראל וירדן, לצורכי השקיה ושתייה וכן שימוש במי ים המלח על ידי מפעלי ים המלח. תוצאה נוספת של מאזן המים השלילי הייתה עלייה במליחות של הים עד הגעה בתחילת שנות השמונים למעבר לרווייה למלח (הליט - מלח נתרן כלורי). לפני שנות השמונים מי ים המלח היו במליחות נמוכה במקצת מזו של מים רוויים להליט. למרות זאת, ההתייחסות בדוח למי ים המלח, גם לפני שנות הששים, כאל מים שאינם יכולים להמס כמות משמעותית של מלח. הסיבה לכך היא שמים כאלה בתת-הקרקע יגיעו לרווייה לאחר המסה מועטה של מלח ולא סביר שייצרו חללים גדולים.

3 . מנגנונים גיאולוגיים היוצרים בורות בפני השטח

יש להבחין בין שקיעות בפני השטח לבין היווצרות בורות בפני השטח. שקיעות נוצרות בתהליך הדרגתי, שאיננו קשור, ובוודאי לא מותנה בקיומם של חללים מקדימים בעלי גודל משמעותי בתת-הקרקע. בורות, לעומת זה, נוצרים כאשר תקרת חללים ממתניים בתת-הקרקע קורסת. התנאים הנדרשים לכך מחייבים מבנה תת-קרקעי רווי מים, שבו המסלע הקרסטי (שכבת המלח במקרה זה) מכוסה בחתך אלוביאלי בלתי מלוכד. באופן כללי המנגנון המוצע במקומות רבים בעולם מתייחס להגדלת הלחץ האפקטיבי על תקרת חלל קיים עקב ירידת מפלס מי התהום וכתוצאה מכך התקרה קורסת. בעקבות כך הסלעים הלא מלוכדים קורסים עד לפני השטח שבהם נוצר בור. כפי שיוסבר בהמשך, באזור ים המלח, המנגנון העיקרי קשור בהמסת המלח על ידי מי תהום ויצירת חללים בשכבה זו. בהמשך תקרת החללים קורסת והסדימנטים הלא מלוכדים מעל קורסים. אם בסלעים הלא מלוכדים שמעל לשכבת המלח קיימות שכבות מלוכדות מספיק על מנת ליצור תקרות זמניות, יוצרו חללים משניים זמניים, שיתקדמו בהדרגה כלפי מעלה, עד להיווצרות הבור בפני השטח (ציור 4).

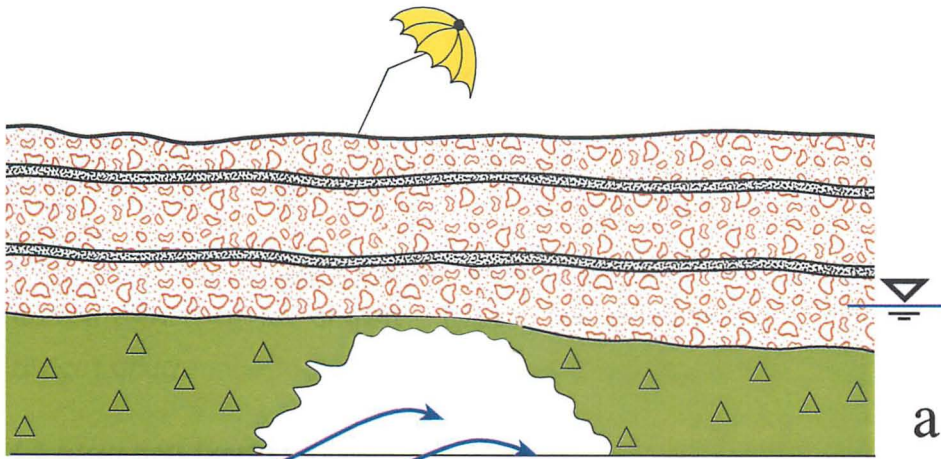
בורות רדודים יכולים להיווצר גם על ידי שקיעה הדרגתית, אלא שאז אין התמוטטות פתאומית של פני השטח, ואין הכרח בקיום חללים ממתניים בתת-הקרקע. בורות מטיפוס זה מוכרים לאורך חופי ים המלח במקביל לבורות העמוקים המיוחסים להמסת המלח.



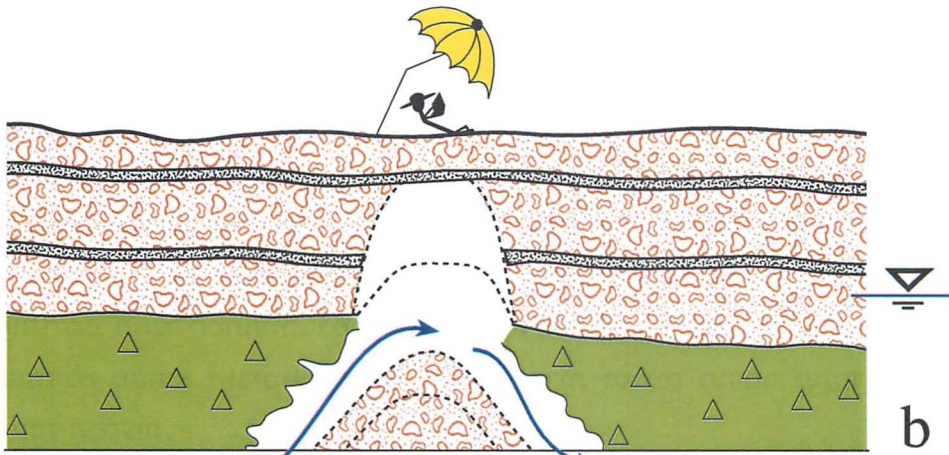
ציון 3.

a. ירידת מפלס ים המלח בשנים 1930-2000. ב- 30 השנים האחרונות קצב הירידה הואץ בעיקר כתוצאה מהקטנה משמעותית בכמות המים הזורמים לאגם מנהר הירדן.

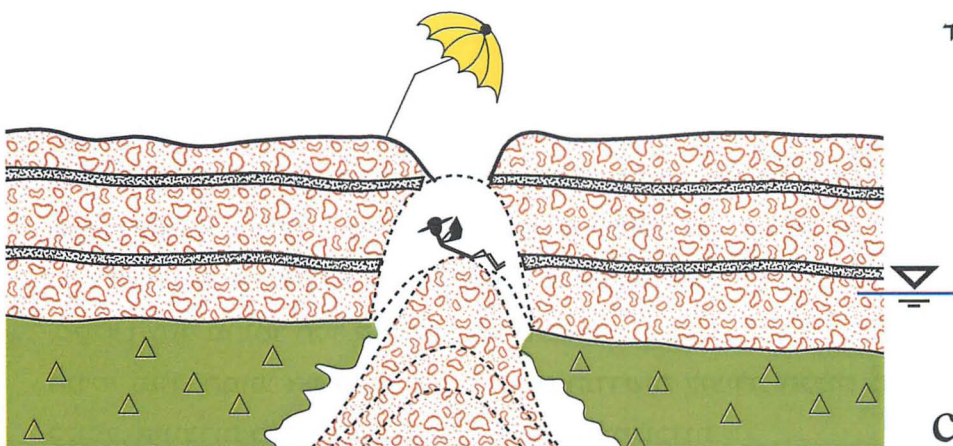
b. ירידת מפלס מי התהום כפי שנמדדה ב- 4 קידוחי תצפית הממוקמים בקרבת החוף (מרחק כ- 300 מטר מהחוף, אזור מעיינות סמר). בציור ניתן לראות שירידת מפלס מי התהום בקידוחים עוקבת אחר ירידת מפלס ים המלח (DS) באותה התקופה.




מי תהום



מי תהום



מי תהום

אלוביום לא מלוכד 

אלוביום מלוכד 

מלח 

ציור 4. מנגנון אפשרי להתפתחות בורות בפני השטח. בשלב הראשון (a) נוצרים חללי המסה בשכבת מלח. בשלב השני (b) תקרת החללים קורסת וחללים זמניים נוצרים באלוביום הלא מלוכד. בשלב השלישי (c) קורסת התקרה הזמנית באלוביום ונפתח בור בפני השטח.

בורות עמוקים הנוצרים בקריסה פתאומית, נוצרים בעיקר במרחק מהחוף, ומהווים את עיקר הבעיה עמה אנו נדרשים להתמודד. מטרת העבודה הייתה להבין כיצד ובאילו תנאים גיאולוגיים והידרוגיאולוגיים יכולים להיווצר חללים בתת-הקרקע באזור בו אנו דנים.

באופן כללי, ישנם שני מנגנונים עיקריים ליצירת חללים בתת-הקרקע: הרחקה מכנית של חומר באמצעות "ארוזיה" תת-קרקעית (Piping), ו/או תהליכים כימיים הממסים חומר, ויוצרים מערכות קרסט.

3.1 מנגנון מכני (ארוזיבי - Piping)

התנאים הבסיסיים הנדרשים לקיום מנגנון זה הם:

- א. גורם המסיע ומרחיק את החומר.
- ב. מרחב פנוי שאליו החומר מורחק.

כאמור, על מנת ליצור חלל בתת-הקרקע באמצעות מנגנון ארוזיבי חייבים להרחיק את החומר למרחב פנוי. מרחב זה יכול להימצא בפני השטח, או בעומק, בתת-הקרקע. במרבית המקרים פני השטח נמצאים במקום נמוך יותר טופוגרפית מקרקעית החלל החדש הנוצר. בתנאים מסוימים, זרימה תת-קרקעית בעלת אופי ארטזי יכולה להסיע חומר כלפי מעלה, אל פני שטח המצויים גבוה יותר מגג החלל המתהווה. במנגנון ה-Piping החלל הנוצר מתפתח לאחור, כלומר חומר מורחק בתחילה ממוצא הזרימה, ובהדרגה ההתחזרות וסילוק החומר מתקדמים במעלה הזרימה התת-קרקעית.

על מנת ליצור חלל בעל גודל משמעותי במנגנון זה חייבים להתקיים מספר תנאים:

א. קיום סדימנט בלתי מלוכד המאפשר זרימת מים משמעותית וגריפת מרכיב דק מתוך הסדימנט.

ב. על מנת להשיג אנרגיה גבוהה, המסלע צריך להיות בעל מוליכות הידראולית גבוהה ובנוסף חייב להתקיים גרדיינט הידראולית גדול. גרדיינט הידראולית גדול מתקיים בדרך כלל באתרים בעלי הפרשי גובה גדולים, כמו לאורך קירות נחלים ומצוקים, ומאחורי סכרים. תנאים כאלה לא קיימים בתת-הקרקע, מתחת למפלס טבעי של מי התהום, בתווך רווי, ולכן לא יוצרו תנאי זרימה בעל אנרגיה מספקת לגריפת סדימנטים דקים.

ג. מסלע העשוי מחומר חסר קוהזיה (לא מלוכד) ובעל גודל גרגר אחיד הוא בדרך כלל בעל חוזק הנדסי נמוך, המונע את התפתחות התנאים הנדרשים ליצירת חללים גדולים בתת-הקרקע. כלומר, היווצרות חלל מחייבת שכבות קוהזיביות מלוכדות.

ד. מסלע חסר קוהזיה הנו חסר סידוק והמוליכות ההידראולית שלו היא בין גרגרית בלבד. מוליכות זו נמוכה מאוד בחרסיות ובסילטים. בחול המוליכות גבוהה יותר אבל נדרשת אנרגיה זרימה גבוהה מאוד על מנת להסיע גרגרים בעלי גודל כזה. שוב, התנאים הנדרשים לא קיימים בדרך כלל בנסיבות טבעיות מתחת למפלס מי התהום, אלא רק מעליו.

ה. כאשר חומר דק גרגר מוסע בתת-הקרקע לעבר חללים בין גרגריים בשכבה עמוקה יותר, מדובר בכמויות קטנות יחסית. רק כאשר מתחת לשכבה הבלתי מלוכדת קיימת שכבה המכילה חללים קרסטיים, כמות החומר המסולקת מתוך שכבה נתונה יכולה להיות משמעותית, וחללים זמניים עשויים להיווצר בתוכה.

ו. ככלל, חללים גדולים בחומר בלתי מלוכד יוצרו רק כאשר קימת באותו תווך גם שכבה מלוכדת יחסית היכולה ליצור תקרה זמנית. החלל יוצר כאמור על ידי הרחקת חומר דק, והתהליך יסתיים עם היווצרות התקרה. לאחר התמוטטות התקרה לא יתקיימו יותר התנאים הנדרשים להיווצרות חלל בתת-הקרקע באותו המקום.

Arkin and Gilat (2000), הדנים בבורות בשולי ים המלח, מציעים מנגנון היווצרות מכני, המבוסס על שטיפת חומר בתת - הקרקע (Piping). ציור 5 הלקוח מעבודתם מציג את התנאים והתהליכים הגיאולוגיים הפועלים לדעתם בתת-הקרקע, והיוצרים את הבורות בפני השטח. כפי שניתן לראות, בציור אין התייחסות לממד העומק, ולמיקום מפלס מי התהום. בציור מתקיימות באותה השכבה, זו לצד זו, זרימות טורבולנטיות ולמינריות. למרות שאין התייחסות בעבודתם לתנאים ההידרוגיאולוגיים, ניתן לשער שמצב כזה צפוי להתקיים באזור הבלתי רווי, מעל למפלס מי התהום. עקב כך ניתן לעלות שורה של תהיות ושאלות לגבי המודל המוצג על ידם (ציור 5) והתאמתו למציאות הקיימת בתת-הקרקע, כדלהלן:

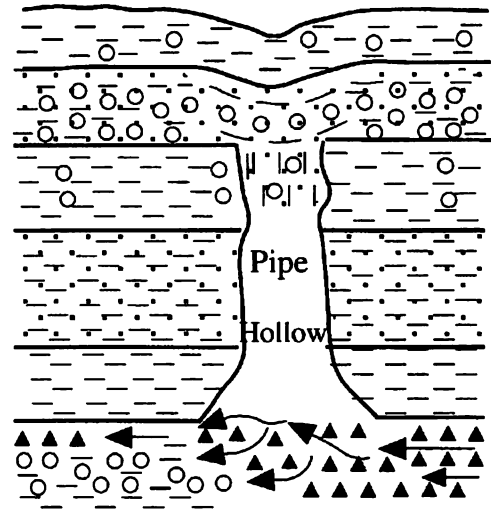
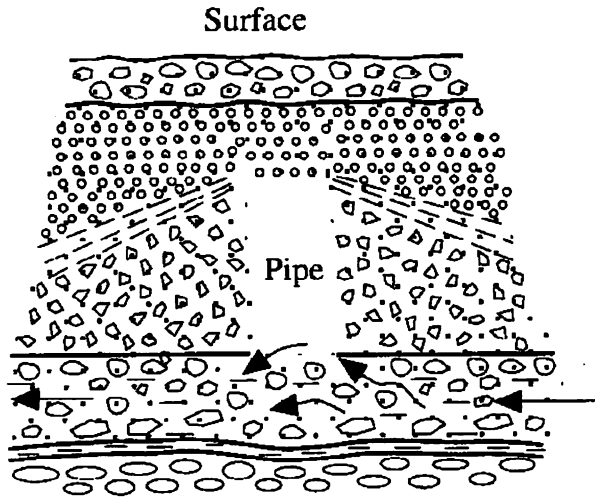
א. ב "אזורי האלוביום" הזרימה המתוארת מתרחשת בשכבה המכילה חומר גס עד סילט. לא מוסבר האם הרכב כזה של חומר מאפשר זרימה חזקה מספיק להרחקת חומר, ואין התייחסות למוליכות הידראולית וקצבי זרימה. החומר המורחק במודל המוצע מצוי מעל לשכבה ולא ברור כיצד הוא מוסע, חודר ועובר דרך השכבה שמתחת. החלל המתואר מתפתח בחומר שהרכבו גס עד דק גרגר. בחומר כזה הטקסטורה היא תמוכת גרגר, והרחקת חומר דק לא תביא לצמצום משמעותי של נפחים ויצירת חללים. במאמר לא כתוב לאן החומר מורחק, ולא ברור על סמך מה המחברים קובעים שקיימת זרימה טורבולנטית בתת-הקרקע. לא מובאות הוכחות או השערות הגיוניות לקיומה של זרימה למינרית חזקה מספיק להרחקת החומר, ואין דיון מבוסס בנושא קריטי זה.






ב. ב "אזורי הבוץ", הזרימה הטורבולנטית והלמינרית המתוארת מתרחשת בשכבת מלח. שכבות מלח בתת-הקרקע אטומות בדרך כלל, אלא אם כן הן מומסות. אין התייחסות למוליכות ההידראולית של שכבת המלח, ולאן מורחק החומר בהמשך. בכל מקרה, זרימת מי תהום ניכרת דרך המלח חייבת גם לגרום להמסה שלו ומכך מתעלמים המחברים.







ג. ארקין ומיכאלי (1995), מציינים שהבורות בשפך זוהר המסודרים בשורה, נוצרו על ידי מנגנון שטיפה. לדעתם הסידור הקווי מהווה עדות לקיומם של זרמים טורבולנטיים (זרמי שטפונות) בתת-הקרקע. הם לא מתייחסים לאפשרות שסידוק ושבירה בתת-הקרקע יכולים גם כן להוות גורם ישיר או עקיף לכך. עניין היווצרות הבורות באזור זה דורש עבודה נוספת מפורטת יותר.

מניפת סחף (אלוביום)

אזורי בוץ



- | ← Laminated flow | Turbulent flow → | |
|------------------|------------------|---|
| ← | → |  Cross bedded gravel beds, sand and silt |
| ← | → |  Gravel, sand and silt |
| ← | → |  Well graded gravel, sand and silt |
| ← | → |  Poorly graded gravel and silt. |
| ← | → |  Poorly graded gravel, silt and thin clay beds |

- | ← Laminated flow | Turbulent flow → | |
|------------------|------------------|--|
| ← | → |  Clay and sand |
| ← | → |  Gravel with sand and clay |
| ← | → |  clay and Gravel |
| ← | → |  Laminated clay, some sand |
| ← | → |  Clay with halite |
| ← | → |  Fine to coarse halite crystals |

ציור 5. מנגנון יצירת חללים בתת-הקרקע בחופי ים המלח על פי Arkin and Gilat 2000. המחברים מבחינים בין שתי סביבות גיאולוגיות בהן נוצרים החללים. הראשונה במניפות הסחף והשנייה במישורי הבוץ. בשני המקרים מדובר במנגנון המרחיק חומר בלתי מלוכד משכבה בתת-הקרקע באמצעות זרימה טורבלנטית (Piping). כתוצאה מהרחקת החומר נוצר חלל מעל לשכבה.

לסיכום, התנאים בשטח, ברב המקומות, אינם תומכים בקיומו של מנגנון מכני ליצירת חללים בתת-הקרקע, והמנגנון הכימי סביר יותר.

3.2 מנגנון כימי (יצירת קרסט):

יצירת חללים על ידי המסה כימית של הסלע ידועה היטב בסלעים קרבונטיים (גירים ודולומיטים), ובסלעים אבפוריטיים (מלח, גבס ואנהידריט) ומוכרת כמערכת קרסט במקומות רבים בעולם. על מנת להמיס מסלע בתת-הקרקע, חייבות תמיסות לא רוויות לבוא במגע עמו. האינטנסיביות של תהליך ההמסה וקצבו עומדים ביחס ישר לנפח הזרימה ולמסיסות המינרלים בוני הסלע. בתנאים שבהם הספקת התמיסה הלא רוויה והרחקת התמיסה הרוויה (לאחר ההמסה) נעשים בקצב משמעותי, יש סיכוי להיווצרות חללים גדולים. סלעים קרבונטיים וסלעים אבפוריטיים יכולים להיות בעלי חוזק מכני המתאים ליצירת חללים גדולים יחסית. כאשר תהליך ההמסה נמשך ותקרת החלל מתדקקת בהדרגה עד לנקודה שבה אין היא יכולה לשאת את המשקל שמעליה, מתרחשת הקריסה. ראוי לציין כאן את המסיסות הגבוהה והמהירה של מלח במים, המתבטאת באינטנסיביות של תהליכי ההמסה.

בשני המקרים (מנגנון מכני או כימי), נדרשת זרימת מי תהום ומוליכות הידראולית טובה של הסלעים. אין ספק כי במנגנון המכני אנרגיית הזרימה צריכה להיות גבוהה בהרבה מזו הדרושה במנגנון הכימי. הבדל חשוב נוסף בין שני המנגנונים הוא שבמנגנון הכימי לא נדרש מרחב פנוי, וזאת מאחר והחומר מוסע ומורחק כמומס במי תהום ולא כמוצק.

4. ירידת מפלס ים המלח ומשמעותה לגבי היווצרות הבורות

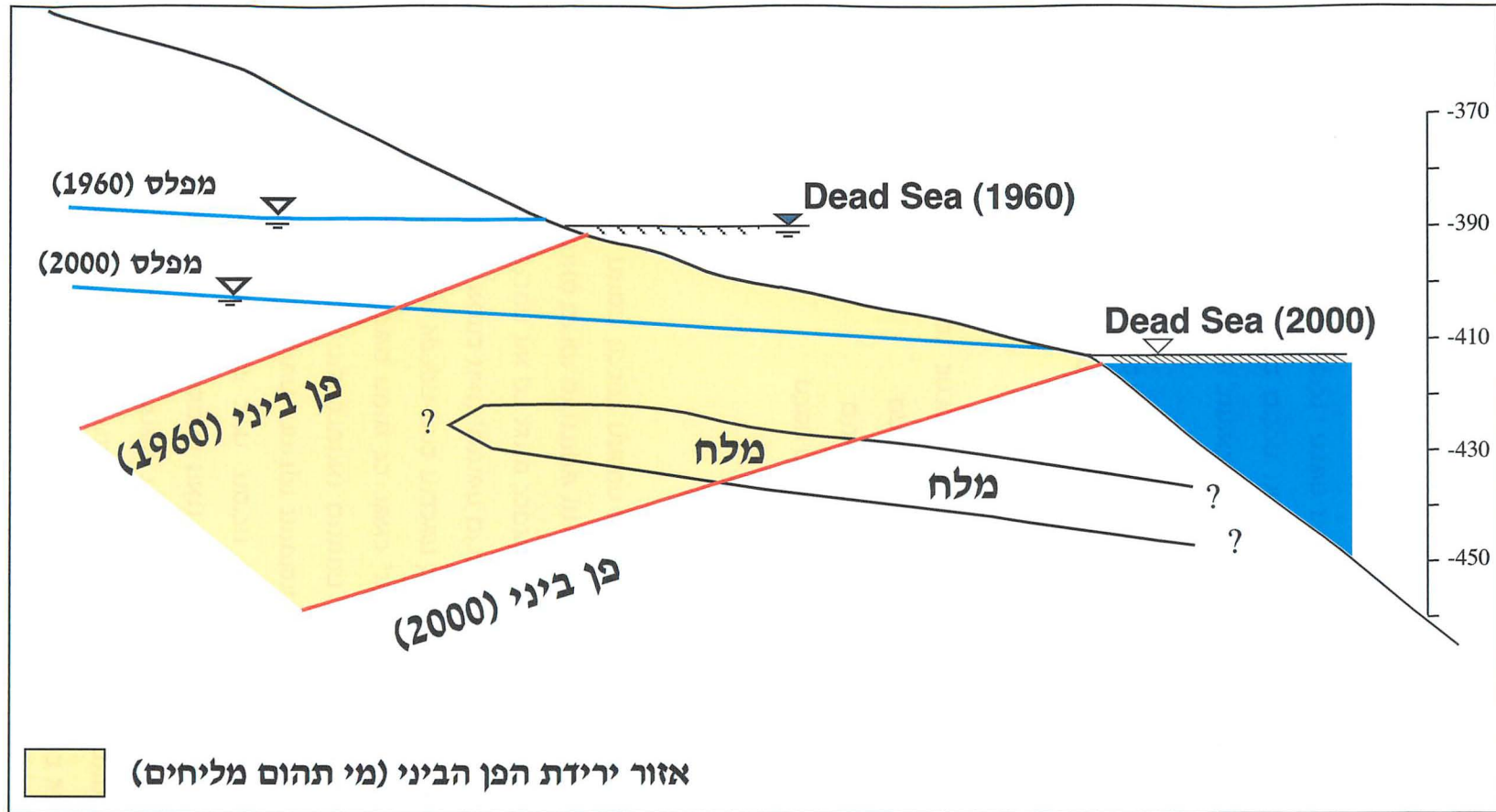
מפלס ים המלח ירד בשלושים השנים האחרונות בשיעור של כ- 20 מטר (בקצב של כ- 80 ס"מ בשנה, ציור 3). רבים מיחסיים את ההאצה שחלה בשנים האחרונות בקצב היווצרות הבורות לירידת מפלס ים המלח. בעקבות ירידת מפלס הים יורד כצפוי גם המפלס הרגיונלי של מי התהום (Yechieli, 1993, Yechieli et al, 1995).

ירידת מפלס הים מלווה בנסיגת קו החוף כלפי מרכז האגן. בחופים בהם המדרון מתון, השיעור האופקי של נסיגת החוף גדול יותר. נסיגת החוף והתכווצות האגם מלווה בשינוי במיקום נביעת מעיינות קיימים, והופעת מעיינות חדשים לאורך קו החוף. בתת-הקרקע ירידת מפלס מי תהום מלווה בשינוי מיקומו של הפן הביני, הנסוג בהדרגה כלפי מרכז האגן.

כאשר שיווי המשקל ההידראולי בין בסיס הניקוז ומפלס מי התהום מופר בצורה פתאומית וחריפה כפי שמתקיים בים המלח, ירידת מפלס מי התהום גדולה יותר כאשר מתקרבים לקו החוף. על מנת לדון בהיבטים האפשריים הקושרים בין ירידת המפלסים לתופעת הבורות יש לבחון את השינויים הרלבנטיים המתרחשים בתת-הקרקע:

- א. הרחקת מי תהום משכבות הסלע בתת-הקרקע. סלעים שהיו רוויים במים, אינם רוויים יותר. בסלעים לא קוהזיבים ניתן לצפות לדחיסת הסדימנט וצמצומו, ועקב כך לשקיעה הדרגתית של פני השטח. במידה וקימות שכבות מלוכדות בתת-הקרקע, ניתן לצפות להיווצרות חללים קטנים, זמניים, והופעת שקעים בפני השטח. בורות עמוקים (15-3 מטר) לא יתפתחו עקב תהליך זה.
- ב. הקטנת הלחץ ההידרוסטטי של מי התהום, ועקב כך עליה בלחץ האפקטיבי הפועל על השכבות בתת-הקרקע. ההשלכה העיקרית לכך היא על יציבות תקרות חללים, במידה והם קיימים. הלחץ האפקטיבי הפועל על התקרות מלמעלה גדל, ועקב כך הן קורסות.
- ג. במידה וקיימים בתת-הקרקע אקוויפרים כלואים, הקטנת עמוד המים מעל לשכבה העליונה האוטמת, מגדילה את הלחץ הפועל עליה מלמטה. בהתאם לתכונות הגיאוטכניות (כולל סידוק) של השכבה, יכולת האטימה שלה עשויה להיפגע עקב כך, והמים הכלואים יכולים למצוא את דרכם כלפי מעלה ביתר קלות.
- ד. הגדלת הגרדיאנט ההידראולי של מי התהום. הדבר עשוי לגרום להגדלת מהירות זרימת מי התהום, ועקב כך להגדלת פוטנציאל החסעה של חומר דק גרגר על ידם. במידה וקיים מרחב פתוח כל שהוא שאליו יכול להגיע החומר המוסע, יוצרו בתת-הקרקע חללים שבמוקדם או מאוחר יתמוטטו ויגרמו להיווצרות בורות או שקעים לא גדולים בפני השטח.
- ה. שינוי במיקום הפן הביני והורדתו לאופקים נמוכים יותר, עשוי להביא מים לא רוויים במלח במגע עם שכבות מלח (ציור 6). מגע כזה עשוי לגרום להמסת מלח ויצירת חללים בתוך השכבה. ממדי החללים תלויים במספר גורמים: קצב ההמסה, התכונות המכניות של שכבת המלח, ועובי השכבה. התמוטטות חללים בשכבת מלח עבה בתת-הקרקע עשויה ליצור בורות עמוקים וגדולים בפני השטח.

האזור של בריכות האידי של מפעלי ים המלח דורש התייחסות ספציפית בתוך המכלול הקשור לירידת מפלס ים המלח. בריכות אלה נמצאות מדרום ללשון, במרחק של כ- 10 קילומטר מהאגן הצפוני, בשטח החופף את האגן הדרומי של ים המלח המקורי, ואשר התייבש בגין ירידת המפלסים. פני המים בברכות המלח גבוהים ב- 20 מטר בערך מפני המים באגן הצפוני, ועומק המים בהן מספר מטרים. מאחר ומדובר בברכות מלאכותיות, שבבסיסן מצויה שכבת מלח בעובי של 4 מטר ויותר, יתכן והמים בברכות שעונים על שכבת המלח. במצב כזה יתכן כי בסיס הניקוז האזורי של מי התהום נמצא עמוק יותר, ובשיווי משקל דינמי עם מפלס ים המלח, ולא ניתן להתייחס לפני המים בברכות כאל בסיס הניקוז האזורי. מנתונים ראשוניים נראה כי לפחות תת האקוויפר העליון קשור הידראולית לברכות, והמפלסים בו מגיבים לשינויים במפלס הברכות (Yeichieli, 1993). האזור שממערב לבריכות האידי ייחקר במסגרת השלבים הבאים של הפרויקט.



פן ביני - אזור מעבר בין מים מתוקים למים מלוחים

ציור 6. תאור סכמתי המציג את ההשפעה של ירידת מפלס ים המלח על מפלס מי התהום ועל מיקומו של הפן הביני. הפן הביני מציין את מיקומו של אזור המעבר בתת-הקרקע בין מי ים המלח לבין מים פחות מלוחים. בציור ניתן לראות שהשינוי במפלס ים המלח גורם למי תהום פחות מלוחים להיות במגע עם שכבת מלח המצויה בתת-הקרקע.

5 . שיטות המחקר

ההנחה הבסיסית היא שהבורות נוצרים בפני השטח כתוצאה מתהליך גיאולוגי - הידרוגיאולוגי המתרחש בתת-הקרקע בעומק לא ידוע, אך בתחום של עד עשרות מטרים מפני השטח. על מנת להבין את התהליך חייבים להכיר ולהבין את המבנה הגיאולוגי והתהליכים הגיאולוגיים - הידרולוגיים המתרחשים בתת-הקרקע. ניתן ללמוד משהו על המתרחש בתוך זה מתוך לימוד וניתוח התופעות המתרחשות על פני הקרקע וזאת באמצעות מחקרי שדה, משולבים בלימוד תצלומי אוויר ושיטות גיאודטיות. עיקר הלימוד חייב לבוא מבחינה ישירה ועקיפה של תת-הקרקע וזאת באמצעות שיטות גיאופיסיות וקדיחה. השיטות הגיאופיסיות מתבססות על נתונים הנמדדים מפני הקרקע, פענוח הנתונים ואינטרפטציה שלהם. קיים יתרון משמעותי לשמוש מקביל בכמה שיטות גיאופיסיות, כאשר כל שיטה משלימה את התמונה המתקבלת מרעותה. קידוחים מספקים מידע ישיר על השכבות בתת-הקרקע ומאפשרים בדיקה ישירה של הסדימנטים וכן דגימת מי תהום מהאקוויפרים השונים, וזאת בתנאי שנוקטים בשיטות קדיחה ודגימה מתאימות. אך יש לזכור שהמידע המתקבל מייצג רק את הסביבה הקרובה לקידוח ולכן אין בהם כדי קבלת תמונה מרחבית מלאה. מכיוון שקידוחים יקרים מאוד לא ניתן להרבות בהם והשילוב בין שיטות גיאופיסיות וקידוחים הוא המפתח לקבלת תמונה מרחבית אמינה וטובה יותר לגבי הנעשה בתת-הקרקע.

במחקר הנוכחי ננקטו השיטות הבאות:

- א. מיפוי הפריסה של אתרי הבורות בכל מרחב חוף ים המלח.
- ב. מיפוי מפורט יותר של פריסת הבורות באתרים השונים.
- ג. תאור הבורות והתופעות הגיאולוגיות הקשורות אליהם.
- ד. לימוד ומעקב אחר התפתחות תופעת הבורות במרחב ובזמן באמצעות תצלומי אוויר מתאריכים שונים.
- ה. מחקר תת-הקרקע באמצעות שיטות גיאופיסיות.
 1. ביצוע קידוח באתר נבחר, לקיחת דגימות מים ואנליזה כימית שלהן.
 2. שימוש בשיטות גיאודטיות להבחנה בשינויים בפני השטח במרחב ובזמן.

במסגרת העבודה הנוכחית הופנה המאמץ המחקרי לאיתור שכבת מלח הנמצאת במגע עם מים לא רוויים במלח באתרי הבורות, ולהבחנה וזיהוי חללים בתת-הקרקע. המידע מתת-הקרקע התקבל מסקרים גיאופיסיים וקידוחים. עבודת השדה ולימוד תצלומי האוויר תרמו רבות להבנת ההשתרעות המרחבית של התופעה והתפתחותה בממד הזמן, תוך כדי התייחסות לירידת מפלס ים המלח ונסיגת הים.

6 . תוצאות המחקר

6.1 השתרעות הבורות במרחב ובזמן

תופעת הבורות ידועה מחופי ים המלח במזרח ובמערב. סביר להניח שבורות בודדים נוצרו לאורך חופי ים המלח לאורך תקופה ארוכה של מאות ואולי אף אלפי שנים. בירדן ישנם תיאורים העוברים מאב לבן של היווצרות בורות במאה ה - 19. יש המייחסים תיאורים שונים בתנ"ך להיווצרות בורות בחופי ים המלח. ישנן עדויות להיווצרות בורות בודדים בחוף המערבי במהלך השנים שבין 1970 ל - 1978. בהסתמך על התיאורים והעדויות המצטברים נראה כי ההאצה בהתפתחות הבורות במרחב ובזמן בחופי ים המלח בירדן ובישראל, החלה בתחילת שנות ה - 80. על פי מחקר תצלומי אוויר של החלק הצפוני של ים המלח (מצפון לבריכות האידיוי של ים המלח, איתמר ורייזמן, 2000, נספח 1), מתקבלים הנתונים הבאים לגבי ניתוח התופעה בזמן ובמרחב:

1. בהסתמך על צפיפות הבורות וצורת התפרסותם ניתן לחלק את המרחב בו מצויים הבורות לשני אזורים (ציור 1):

א. אזור צפוני, מאתר מטע התמרים (דקלים) שמצפון לשמורת קנה בצפון ועד לאתר נחל צרויה בדרום.

ב. אזור דרומי, מצפון לנחל חבר ועד לנחל מור בדרום.

לגבי האזורים הללו ניתן לציין את העובדות הבאות:

א. כמות הבורות באתרים באזור הדרומי גדולה בהרבה מכמות הבורות באתרים שבאזור הצפוני.

ב. כמות הבורות הגדולה ביותר היא בשני האתרים הדרומיים ביותר - נחל רחף ונחל מור.

ג. האתרים הצפוניים ממוקמים בקטעי חוף צרים ותלולים יחסית. האתרים הדרומיים ממוקמים באזורים מישוריים נרחבים, בעלי שיפוע מתון יחסית.

2. זמן הופעתם של הבורות וצורתם בשטח מסוכמים בטבלה 1. מטבלה זו ניתן ללמוד שאתרי הבורות הראשונים התחילו להיווצר בקצה הדרומי של האזור הדרומי כבר ב - 1982. בהמשך, בראשית שנות ה - 90 התחילו להיווצר שאר האתרים באזור הדרומי. באזור הצפוני, אתרי הבורות נוצרו לראשונה ב - 1993, והאחרון שבהם, וגם הצפוני ביותר, אתר דקלים, נוצר ב - 1999. עד לכתיבת דוח זה לא ידועים אתרי בורות מצפון לאתר דקלים. (Gilat (1999 מדווח על הימצאות בור בצפון ים המלח (אתר אטרקציה), אך בדיקה בשדה העלתה שלא מדובר בבור טבעי.

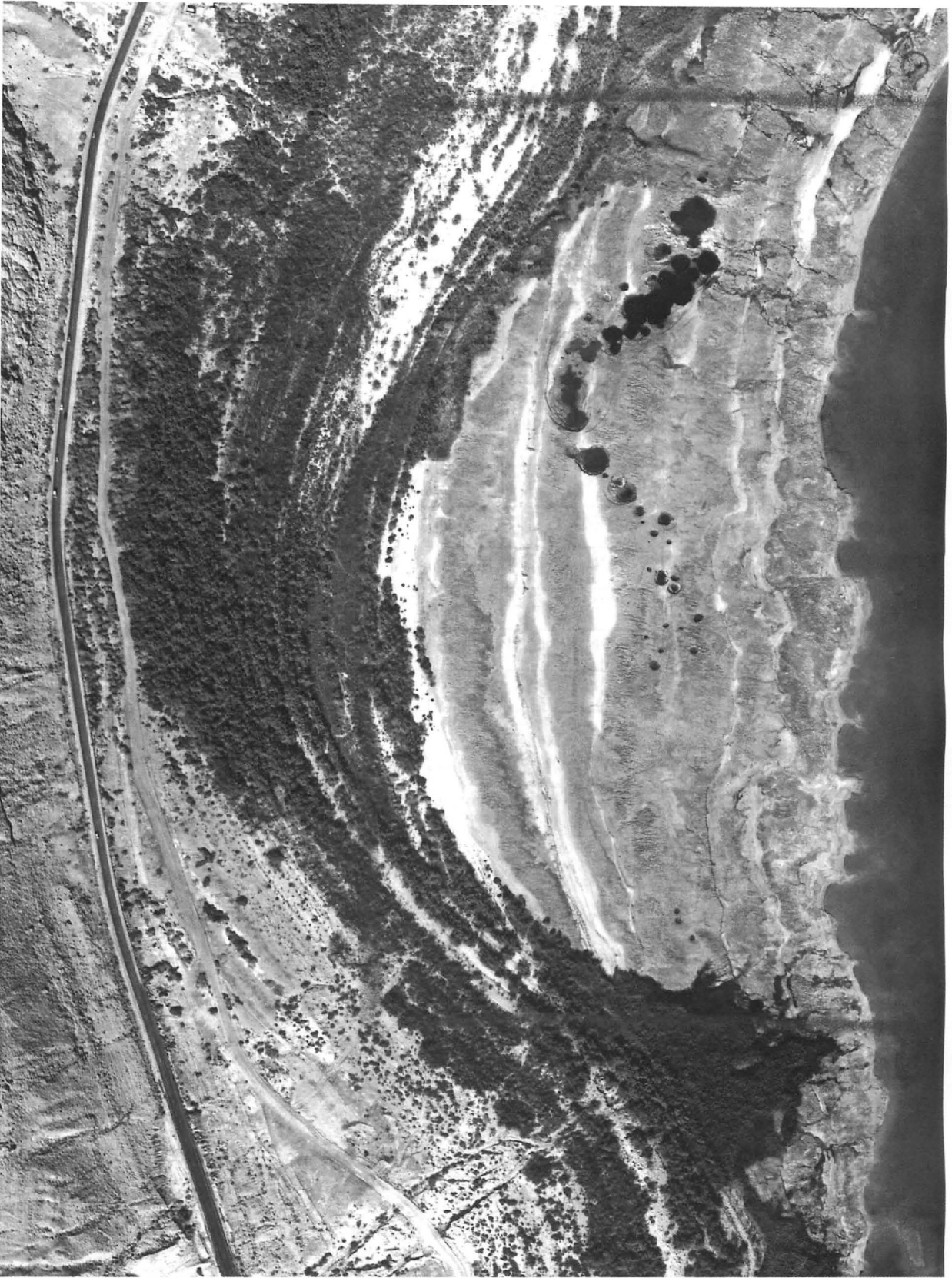
גם רז (נספח 2), מציין שניכרת מגמת התפתחות עם הזמן של אתרי בורות מדרום לצפון. הוא מבחין במגמה זו גם בסדר ההיווצרות של אתרי הבורות הצפוניים ביותר, מאתר חמי-שלם, דרך אתרי סמר ומצפה-שלם, ולבסוף אתר תמרים (דקלים).

מלימוד תצלומי אוויר (איתמר ורייזמן, נספח 1; רז, נספח 2), עולה כי בחלק מאתרי הבורות ניתן להבחין בסידור הבורות באוריינטציה מעודפת לאורך קווים ישרים (ליניאמנטים) או קווים קשתיים (תצלומים 1,2). הקווים הישרים מצויים בכיוונים שונים ביחס לקו החוף, ממקביל ועד לניצב. הקווים הקשתיים מקבילים בקירוב לקו החוף.



צילום 1.

אתר נחל חבר צפון. תצלום אוויר משנת 1995 המראה את הבורות מסודרים בשתי שורות (חצים). סידור הבורות הינו לאורכם של ליניאמנטים ישרים וקשור כנראה לכיוון מערכות סידוק ושבירה אזוריות היכולות לאפשר עליית מי תהום לא רוויים למלח לעבר שכבת המלח.



צילום 2.

אתר מעיינות סמר. תצלום אוויר משנת 1999 המראה את הבורות מסודרים במבנה קשתי שבו הצד הקעור פונה לעבר הים. גם כאן הסידור העדיף של הבורות מיוחס לקוי סידוק ושבירה. בתצלום האוויר ניתן להבחין בעדויות לצלקות גלישה והאתר ממוקם כנראה על יחידת סלע גלושה. גלישות גרביטציוניות לעבר מדרון היבשת הן שיצרו כנראה את מישורי הגלישה והסידוק הקשתיים. מישורי הגלישה והסידוק צריכים להגיע עד לשכבות החרסית שבבסיס שכבת המלח על מנת להשפיע על יצירת החללים בתוכה. סידור קשתי כה בולט של הבורות אופייני לאתר זה בלבד.

טבלה 1. מיקום הבורות בחוף ים המלח ופריסתם באתר לפי נתונים מתצלומי אוויר (איתמר ורייזמן, 2000, נספח 1).

שנה אתר	1999	1995	1993	1992	1990	1982	צורה קווית*
דקלים	X	-	-	-	-	-	מפותל
סמר	X	X	?	-	-	-	מפותל
חמי שלם	X	X	X	-	-	-	מפותל
חניון	X	?	-	-	-	-	אין
ערוגות	X	X	X	-	-	-	מפותל
צרויה	X	-	-	-	-	-	אין
חבר צפי	X	X	X	X	X	?	קוים
חבר דרי	X	X	X	X	X	?	אין
עשהאל	X	X	X	X	X	?	קוים
צאלים	X	X	X	X	X	?X	אין
מצדה	X	X	X	X	X	?X	אין
רחף	X	X	X	X	X	X	אין
מור	X	X	X	X	X	X	אין

מקרא: X יש בורות. ?X יש בורות כמעט בודאות. ? אולי יש בורות. - אין בורות.
* צורת ההופעה של מקבצי בורות עם או בלי אוריינטציה קווית.

6.2 נתוני שדה

רז, נספח 2, מציין שהרום הטופוגרפי המרבי בו מצויים בורות הוא 385- מטר, כ - 30 מטר מעל למפלס ים המלח הנוכחי. בירדן בורות מצויים ברום טופוגרפי מרבי של 380-360 מטר (נתוני הגובה הטופוגרפי בירדן אינם ברורים ודורשים בדיקה מפורטת ומדויקת יותר). באתרים ישע, מזרחית לקיבוץ עין גדי, צרויה וסמר מצויים בורות משני צדי קו החוף, כלומר גם בקרקעית הים בקרבת קו החוף, ברום של 416- מטר.

אתרי הבורות מצויים בשתי סביבות השקעה שונות, במישורי הבוץ ובמניפות הסחף. בקרבת החוף ומעט מעל למפלס הים, מצויים מישורי בוץ. באתרים המצויים בסביבה זו הבורות מסודרים לאורך קווים תת מקבילים לחוף. במניפות הסחף, האתרים מרוחקים יותר מקו החוף, גבוהים יותר, והבורות מסודרים לאורך קווים ניצבים או תת ניצבים לכיוון קו החוף. בנווה זוהר ובעין גדי מצויים אתרי בורות ממערב לכביש 90, בשאר המקומות האתרים ממוקמים ממזרח לכביש.

באופן כללי, רב המשותף על הנבדל בתכונות הבורות במישורי הבוץ ובמניפות הסחף. הממדים המרביים של הבורות במניפות הסחף ובמישורי הבוץ דומים: 11 מטר עומק ו- 25 מטר קוטר. במניפות הסחף בורות רבים יותר מגיעים לממדים הגדולים הללו בהשוואה לבורות במישורי הבוץ. לא נמצאו בורות בחלקים הפעילים היום של מניפות הסחף (פרט לבור בודד המצוי באפיק נחל חמר שנוצר לאחרונה), ולא נמצא קשר נסיבתי בין זרימות מים בפני השטח ו/או עונות השנה לבין קצב ההיווצרות או מיקום הבורות.

ההבדלים המורפולוגיים בין הבורות נובעים בין השאר מהבדלים ליתולוגיים הקיימים בקרבת פני השטח בסביבה בה הם נוצרים. הבדלים אלה באים לידי ביטוי בתכונות גיאוטכניות שונות של המסלע המשפיעות ומעצבות את הצורה הגיאומטרית של הבור. מתצפיות בדפנות הבורות ניתן לראות במקומות שכבות סלע מלוכדות בקרבת פני השטח, העשויות לשמש תקרה זמנית לחללים המצויים בתת-הקרקע באלוביום.

בבורות המצויים בקרבת קו החוף ניתן להבחין במפלס מי תהום גבוה. המפלס מצוי בעומק של מטר או שניים, וקרקעית הבור מצויה בדרך כלל בעומק רדוד של מטרים בודדים. במקומות הבורות עמוקים יותר, לדוגמא באתר סמר, שבו נמצא בור חדש שעומק קרקעיתו 10.80 מטר (נספח 2). יתכן וגם הבורות האחרים היו עמוקים יותר בראשית דרכם, ועקב היציבות הנמוכה של קירות הבוץ התמוטטו ונסתמו עם הזמן. מכאן שלא ניתן לקבוע שבאזורי הבוץ נוצרים בורות רדודים בלבד. בבורות סמוכים ניתן להבחין בהבדלים של עשרות סנטימטרים במפלס המים, דבר המעיד על הימצאות מפלסי מים שעונים, הגבוהים בעשרות סנטימטרים מהמפלס הרגיונלי.

6.3 האגן הדרומי - אזור בריכות האידי של מפעלי ים המלח

באתר מפעלי ים המלח, מרבית הבורות שנוצרו רדודים וקטנים יחסית. בסביבתם הקרובה קימות עדויות נסיבתיות הקושרות את היווצרותם לתהליכי ארוזיה תת-קרקעית (פרופ' סם פרידמן, דברים בע"פ). מדובר בסביבה שבה התנאים הגיאולוגיים וההידרולוגיים הטבעיים הופרו במידה רבה, ועקב כך נוצרו תנאים חדשים, המאפשרים זרימות חזקות יחסית של מי התהום אל עבר אגני ניקוז מקומיים בעלי קרקעית נמוכה מספיק לקליטת הסדימנטים הדקים הנשטפים. לא נכלל בקטגוריה זאת בור יחיד שנוצר במהלך שנת 1999 אשר קרקעיתו נמוכה בשיעור ניכר ביחס למפלס הנמוך ביותר של בסיס הניקוז העילי בסביבתו הקרובה. יחוס בור זה למנגנון של Piping מחייב מנגנון של סחיפת חומר דק תחת משטר הידרודינמי ארטזי, המאפשר סילוק חומר דק לאגן גבוה ממפלס קרקעית הבור. שכבת המלח באתר המפעלים מצויה בעומק גדול יחסית של 42-45 מטר מתחת לפני הקרקע. בבור שמולא מלאכותית לא נצפו עד לכתבת שורות אלה התמוטטויות חדשות, ולא נוצרו בורות נוספים בקרבתו. בהנחה כי ברכות ים המלח שעונות, יתכן ובור זה נוצר במנגנון דומה לזה המתקיים בשאר האתרים. השוני בהתפתחות הבורות באתר ספציפי זה (שהוא גם הדרומי ביותר), יכול להיות קשור לעומק הניכר של שכבת המלח, ולתנאים ההידרולוגיים המיוחדים לאזור הדרומי של אגן ים המלח.

בורות נוספים נמצאו במקומות נוספים ממערב לבריכות האידי, כמו לדוגמה באזור שפך זוהר ובמקומות אחרים.

6.4 סקרים גיאודטיים

הסקרים הגיאודטיים כללו מדידות בפני השטח באמצעות EDM (Electronic Distance Measurement), GPS (Global Positioning System), ומדידות באמצעות חישה מרוחק באמצעות הדמיית רדאר מלווינים - INSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar). המדידות נעשו במטרה להבחין בשינויים מזעריים במתווה הטופוגרפי, העשויים לסייע בהכרת והבנת התהליכים הקשורים להיווצרות הבורות. המדידות הללו עד לרגע זה, לא הצביעו על אותות מוקדמים בפני השטח קודם להיווצרות הבורות. לאחר שנוצרו הבורות, פני השטח בקרבתם עברו דפורמציה מהירה שבאה לידי ביטוי במדידות באמצעות EDM ובהופעת סדקים בקרקע.

בחינת פני השטח באמצעות INSAR הנה שיטה חדשנית שיישומה החל רק לאחרונה. התוצאות הראשוניות הנדונות להלן (Baer et al., 2000, נספח 3), מצביעות כי מדובר בכלי רב עוצמה לבחינת שינויים במורפולוגיה של פני השטח עם הזמן. הנתונים שנאספו עד כה מתייחסים לחופי ים המלח במזרח ובמערב. מדובר בשקיעות בפני השטח בשיעור של מספר מילימטרים עד כמה עשרות מילימטרים בטווחי זמן של מספר חודשים עד 7 שנים. השקיעות מיוחסות לירידת מפלס מי התהום באזור, העוקבת אחר ירידת מפלס ים המלח בשיעור של 6 מטר בתקופה הנידונה. במקומות רבים בעולם בהם מפלס מי התהום יורד בעקבות שאיבת יתר, פני השטח שוקעים, והדבר הוכח בין השאר גם במדידות INSAR דומות. שקיעה זו נגרמת עקב הקטנת הלחץ ההידרוסטטי בתת-הקרקע, ומעבר שכבות סלע לא קוהזיביות לאריזה צפופה יותר והקטנת הנפת והעובי שלהן עקב כך. אם אכן זה התהליך המתרחש בתת-הקרקע לאורך חופי ים המלח, וסביר כי אכן כך הדבר, הרי שאין קשר ישיר, אלא רק קשר נסיבתי, בין היווצרות הבורות לבין התופעה הנזכרת. שקיעות כאלה צפויות להתרחש במוקדם או מאוחר לכל אורך החוף של ים המלח, ללא קשר להופעת בורות בפני השטח. חיזוק למסקנה זו בא מהעובדה שקודם להיווצרות הבורות, לא נצפים כל שינויים בפני השטח. כלומר מדובר בשני תהליכים שונים במהותם, ובלתי תלויים, הנגרמים על ידי ירידת מפלס ים המלח.

יתכן והמסה של שכבת המלח בחלקה העליון עקב מגע עם מי תהום לא רוויים במלח אחראית בין השאר גם כן להיווצרות השקיעות הנמדדות. במקרה זה לא יוצרו חללים בתת-הקרקע בשכבות הסלע הלא מלוכדות, והרחקת מלח מגג השכבה תבוא לידי ביטוי מידי בפני השטח בשקיעות ויצירת אזורים נמוכים טופוגרפית ולא בהתמוטטות ויצירת בורות. כפי שמצוין בהמשך בחוף המערבי בצפון ים המלח לא נמצאו עדויות להימצאות שכבת מלח בתת-הקרקע, והמשך המדידות הגיאודטיות באזור זה, במטרה לבחון את התוצאות לאורך פרק זמן ארוך יותר, עשוי להצביע על אופי המנגנון הפועל בתת-הקרקע והאחראי להיווצרות השקיעות הנזכרות.

7. גיאופיסיקה - מדידות מתת-הקרקע

שלוש שיטות גיאופיסיקות יושמו במטרה לקבל מידע מתת-הקרקע:

- א. שיטות סייסמיות, רפלקציה בהפרדה גבוהה ורפרקציה. המטרה: הכרת התכונות והמבנה הגיאולוגי של השכבות בתת-הקרקע, תוך דגש על זיהוי שכבת מלח.
- ב. שיטות אלקטרומגנטיות. המטרה: הבחנה באופקי מי תהום בעלי מליחויות שונות. דגש על זיהוי אופקי מים לא רוויים למלח בתת-אקויפריס כלואים, בקרבת שכבת המלח המזוהה.
- ג. מיקרוגרבימטריה. המטרה: הבחנה בחללים בתת-הקרקע.

אתר נחל חבר דרום נבחר כאתר ניסוי לבחינת השיטות, ניתוח התוצאות ואימותן וכיול באמצעות קדיחה. באתר מספר בורות בשלבי התפתחות מוקדמים יחסית, והוא נמצא כמתאים ביותר מבחינה לוגיסטית לעבודה הנדרשת.

7.1 רפרקציה סייסמית

השיטה מאפשרת קבלת מידע באמצעות החדרת גלי דחיסה וגזירה לתת-הקרקע. המקור לגלים יכול להיות חבטה בקרקע או פיצוץ. מדידת מהירויות הגלים בשכבות השונות מאפשרת ללמוד על התכונות הדינמיות שלהן ועל מיקום הגבולות בין השכבות (עובי השכבות). מידע קודם לגבי תכונות השכבות בתת-הקרקע מאפשר במרבית המקרים גם זיהוי סוג המסלע. יכולת החדירה לעומק מוכתבת בעיקר על ידי כמות האנרגיה המועברת לתשתית. המגבלה העיקרית של השיטה נובעת מהעובדה כי זיהוי שכבה בתת-הקרקע, מותנה בכך שמהירות הגלים הסיסמיים בה תהיה גבוהה מזו של השכבה שמעליה.

וקס וחובי (1999), מציינים שחתך רפרקציה אופייני בתת-הקרקע באזור ים המלח מתאפיין ב- 3 שכבות:

- שכבה עליונה בעלת מהירות גלי דחיסה של 600-800 מטר/שניה
- שכבת ביניים בעלת מהירות גלי דחיסה של 2000-2300 מטר/שניה
- שכבה תחתונה בעלת מהירות גלי דחיסה של 2600-3600 מטר/שניה

על פי מידע ונתונים קיימים נקבע שהשכבה העליונה ושכבת הביניים עשויות סדימנטים לא מלוכדים (סדימנטים אלוביליים, וסדימנטים אגמיים). על פי מהירות הגלים בשכבה התחתונה ובהתאם למידע הגיאולוגי הקיים ההשערה הייתה שמדובר בשכבת מלח, בעלת עובי לא ידוע. על מנת לאשש השערה זו בוצע סקר רפרקציה בהר סדום ותוצאותיו העידו על כך שמהירות גלי הדחיסה בשכבת המלח בתת-הקרקע היא כ- 3000 מטר/שניה. חיזוק נוסף נמצא בעובדה שמהירות גלי דחיסה בשיעור של 3000 מטר/שניה נמדדה בעומק של כ- 20 מטר בקרבת קידוח קיים בנחל צאלים. בקידוח זה נחדרה שכבת מלח בעובי של 6.5 מטר בעומק של 24 מטר (Yecheili, 1993). לשכבת המלח טווח מהירויות סייסמיות גדול למדי (2600-3600 מטר/שניה), והסיבה לכך לא ברורה.

על מנת לבסס את השימוש בסקרי רפרקציה ככלי לזיהוי ומיפוי שכבת המלח בתת-הקרקע, בוצע סקר רפרקציה בנחל חבר דרום (Shtivelman et al., 1999, נספח 4). תוצאות הסקר הצביעו על הימצאות שכבה בעלת מהירות של 2900 מטר/שניה, בעומק של 20-30 מטר (ציור 7). בהמשך בוצע קידוח באתר (תאור מפורט של הקידוח בהמשך), שבו אכן נמצאה שכבת מלח בעומק של 24 מטר, ובעובי של 11 מטר. בכך הוכח שמהירות גלי דחיסה בשיעור של כ- 3000 מטר/שניה בתנאים האופייניים לחופי ים המלח היא אכן עדות מהימנה להימצאות שכבת מלח בתת-הקרקע.

ראוי לציין כי שיטת הרפרקציה הסייסמית אינה מאפשרת לקבוע את עובי שכבת המלח בתת-הקרקע, וזאת מאחר ומתחת לשכבת המלח צפויות להימצא שכבות סלע שמהירותן הסייסמית נמוכה יותר מזו של שכבת המלח. רק מנתוני קידוחים ניתן לקבוע את עובי שכבת המלח. מאותה סיבה לא ניתן לגלות בשיטה זו גם אופקי מלח נוספים שאולי נמצאים בעומק גדול יותר.

7.2 רפלקציה סייסמית בהפרדה גבוהה

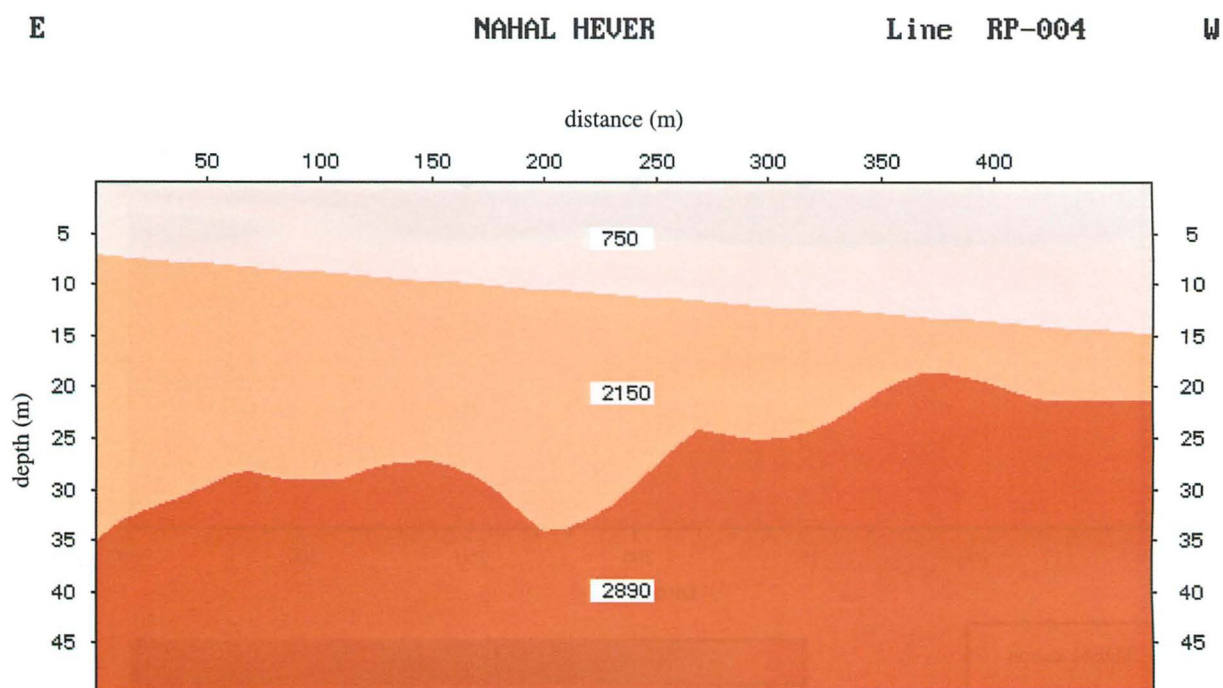
במסגרת המחקר נעשו מספר חתכי רפלקציה סייסמית בהפרדה גבוהה שמטרתם היתה לזהות דפורמציות ואי רציפויות בשכוב. כזכור, ישנן עדויות להתקבצות בורות לאורכם של ליניאמנטים בפני השטח. Shtivelman et al. (1999, נספח 4) מוצאים עדות להימצאות הפרעות בתת-הקרקע באתרי הבורות בנווה-זוהר וחבר דרום, שאותן ניתן לקשור למקבצי בורות. הקשר בין הבורות לבין אזורי הפרעה בתת-הקרקע, אם אכן קיים, מחייב בעתיד בדיקה מקיפה יותר. חשיבות אזורי ההפרעה היא בכך שהם יכולים לשמש מוליכים הידראוליים למים לא רוויים במלח, לעבר שכבת המלח.

7.3 סקרים אלקטרומגנטיים (TDEM)

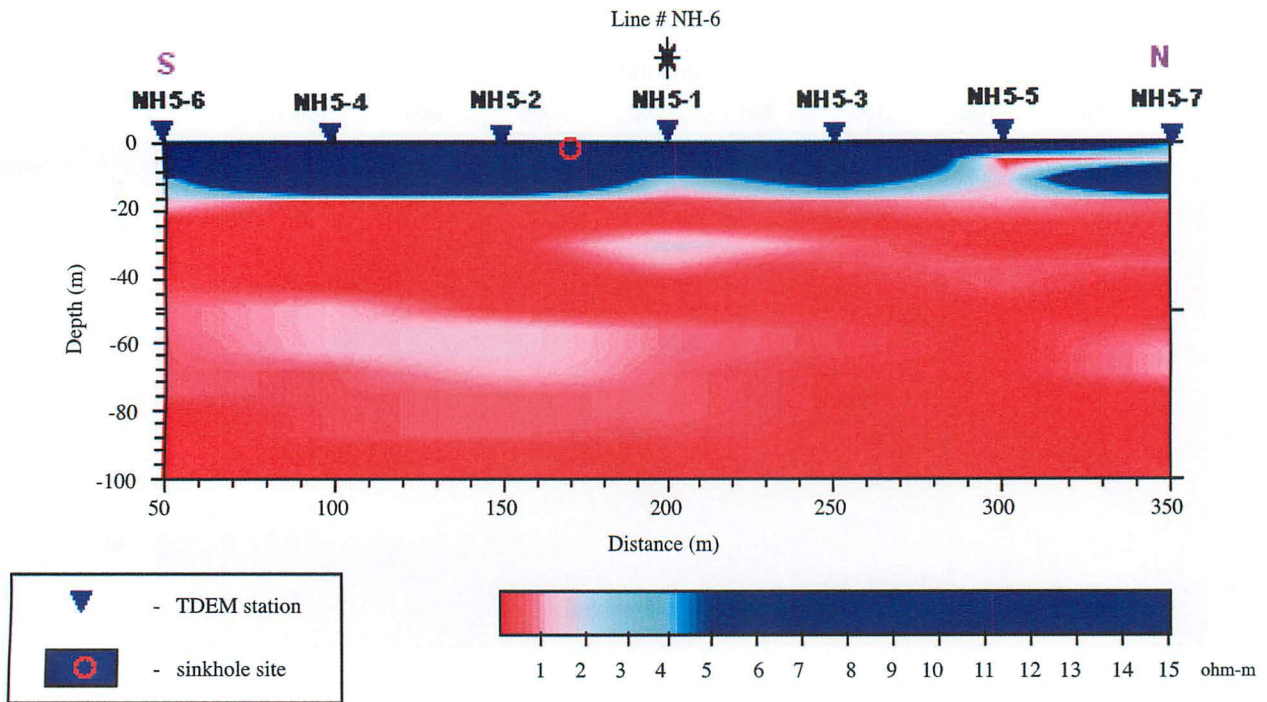
הסקרים האלקטרומגנטיים מיועדים להבחין באופקי מים בתת-הקרקע, ולזהות הבדלים ניכרים במליחותם. ההפרדה היא על פי המוליכות החשמלית שלהם כפי שהיא נגזרת מהמליחות השונה שלהם. עדות למים לא רוויים במלח, בקרבת שכבת המלח, אמורה לחזק את ההנחה שמקור הבורות בהמסה של שכבת המלח.

סקרים אלקטרומגנטיים בוצעו בעבר באזורים רבים בחוף ים המלח, והעידו על אנומליות של מוליכות חשמלית בתת-הקרקע (יחיאלי וחובי, 1998, 1997, Kaffi et al.). לצורך מחקר זה בוצעו סקרים באתר נחל חבר דרום בלבד.

ציור 8 (מתוך נספח 4), מציג חתך אופייני שהתקבל בשיטת ה-TDEM באתר נחל חבר דרום. כאמור, שיטה זו מאפשרת חדירה לעומק, והפרדה אנכית טובה בין שכבות בעלות התנגדות חשמלית שונה. ההתנגדות החשמלית של מים רוויים במלח נמוכה מ-1 אוהם/מטר בעוד שערכי התנגדות גבוהים יותר מייצגים מים פחות מלוחים או חתך לא רווי במים. חשוב לציין כי ההתנגדות החשמלית הנמוכה מאוד של שכבות סלע המכילות תמלחות, היא בעיקר ביטוי להתנגדות של המים. כלומר, להרכב הליתולוגי השפעה זניחה על ערכי ההתנגדות הנמדדים.



ציור 7. חתך גיאופיסי לאורך קו רפרקציה סייסמית שנעשה באתר נחל חבר דרום (נספח 4) המציג מעבר בין שכבות סלע בעלות מהירות שונה של גלי דחיסה. הציר האנכי מציין את העומקים בהם משתנה מהירות גלי הדחיסה במעבר בין יחידות הסלע השונות. שינוי המהירות מ- 2150 מטר/שניה ל- 2890 מטר/שניה מעיד על מעבר מסדימנטים לא מלוכדים לשכבת מלח. גג שכבת המלח הוא בעל תבליט ועומקו בתת-הקרקע משתנה מ- 20 מטר במערב ל- 35 מטר במזרח. בגלל מגבלות השיטה הגיאופיסית הנידונה לא ניתן לקבוע את עובי שכבת המלח בתת-הקרקע.



ציור 8. חתך גיאופיסי המודד התנגדות חשמלית בתת-הקרקע בשיטת ה-TDEM באתר נחל חבר דרום (נספח 4). החתך מציג שינויים בהתנגדות החשמלית (אום למטר) של השכבות בעומק. מקור השינויים בהתנגדות החשמלית נובע בעיקר משינויים במליחות מי התהום. ערכי התנגדות חשמלית נמוכים מ-1 אום למטר מרמזים על הימצאות מי תהום רוויים למלח, מי ים המלח במקרה הנידון. בחתך ניתן להבחין במפלס מי התהום בעומק של כ-18 מטר. על פי ערכי ההתנגדות החשמלית (נמוכים מאום למטר) החתך מכיל ברובו מי תהום רוויים למלח, פרט לרצועה בעומק של כ-50 מטר ועובי של כ-20 מטר שבה מי התהום תת-רוויים למלח. מדובר כנראה באקוויפר כלוא המכיל מים שמליחותם נמוכה מזו של מי ים המלח.

חתך ה- TDEM מציג ערכי התנגדות חשמלית גבוהים מ- 5 אוהם/מטר בחלק הרדוד היבש של החתך, מעל למפלס מי התהום. בעומק של כ- 18 מטר מתחת למפלס מי התהום מצויה כנראה שכבה דקה מאוד של מים במליחות בינונית, עם ערכי התנגדות של 2-3 אוהם/מטר. בעומק של כ- 20 מטר מצביעים נתוני ה- TDEM על מעבר למי תהום מלוחים מאוד עם ערכי התנגדות חשמלית של פחות מ- 1 אוהם/מטר. כדאי לציין כי על פי חתך הרפרקציה הסייסמית באתר המדידה (ציור 7), גג שכבת המלח מצוי בעומק של 20-30 מטר, כלומר, מתחת למפלס מי התהום.

בעומקים שבין 45-75 מטר (ציור 8) נמדדה התנגדות חשמלית גבוהה יותר, 1-2 אוהם/מטר, דבר המרמז על הימצאות מים פחות מלוחים. כפי שניתן לראות בציור 8, עדשה של מים פחות מלוחים מצויה גם בעומק של כ- 35 מטר. נתוני הקידוח באותו האתר מראים כי בסיס שכבת המלח באתר נמצא בעומק של כ- 35 מטר. כלומר, העדשה ממוקמת בקרבת בסיס שכבת המלח, ובאזור שבו בפני השטח מצויים בורות. על פי מיקום העדשה, יתכן והיא מציינת פריצת מים פחות מלוחים כלפי מעלה, לעבר שכבת המלח והבורות. מנתוני הקידוח מתברר שבעומק של 45 מטר (גג האנומליה של ההתנגדות הגבוהה, המציינת הימצאות מים פחות מלוחים) מצוי מעבר בין שכבת חרסית לשכבת חלוקים. זו האחרונה עשויה להוות אקוויפר כלוא בעובי של כ- 30 מטר המכיל מים תת רוויים למלח.

7.4 סקרי מיקרוגרבימטריה

מערות וחללים קרסטיים מזוהים בהצלחה במקומות שונים בעולם בעזרת סקרים מיקרוגרבימטריים. בעבודה הנוכחית יושמה השיטה בניסיון להבחין בחללים בשכבות מלח ואלוביום כאשר ההבחנה מתבססת על הבדלי צפיפות בין חומרים שונים בתת-הקרקע ובינם לבין האוויר והמים. ההבדל הגדול ביותר בצפיפות הוא בין מסלע לאוויר, כאשר מדובר במערה מעל למפלס מי תהום. ההבדל הזעום ביותר בצפיפויות יתקבל במקרה בו החלל ממוקם באלוביום רווי במים מלוחים.

Rybakov et al. (2000, נספח 5) מציג את ההיבטים השונים של סקרי המיקרוגרבימטריה, הכוללים בחינת היכולות וניתוח התוצאות שהתקבלו עד עתה. בחינת התוצאות, והסקת המסקנות, מחייבת דיון מוקדם במהות התופעה. כאשר נפער בור לראשונה בפני השטח, הוא בדרך כלל קטן בראשית דרכו, ובודד באתר. עם חלוף הזמן, הבור גדל ומצטרפים אליו בורות נוספים. למיטב ידיעתנו לא קיים אתר שבו נמצא בור אחד בלבד. בכל האתרים, ישנם מספר בורות במצבי התפתחות שונים, גדולים כקטנים. רק באתרים בהם הבורות בראשית דרכם, ניתן להניח בביטחון יחסי כי אכן קיימים חללים בתת-הקרקע. באתרים הקיימים זמן רב ואשר בהם הבורות אינם ממשיכים להתפתח יתכן כי בשלב הנוכחי לא נותרו חללים בתת-הקרקע. תצפיות באתרי בורות בחמש השנים שחלפו, מעידות על כך שאתר יכול להיות "רדום" שנתיים שלוש, ולאחר מכן מתחדשת הפעילות בבורות קיימים, ו/או נוצרים בורות חדשים. משתמע מכך שלא בכל מקום בו ישן אנומליות מיקרוגרבימטריות שליליות המיוחסות לחללים בתת-הקרקע,

חייבים להיות בורות בפני השטח. באופן דומה, לא בכל מקום בו קיימים בורות בפני השטח, חייבים להבחין באנומליות שליליות.

להלן תאור ממצאי הסקרים המיקרוגרבימטריים:

א. באתר חבר דרום, הבורות צעירים יחסית, והתפתחותם איטית (מצב זה הכתיב את הבחירה באתר כשדה ניסוי, שבו המצב הראשוני בתת-הקרקע עדיין משומר). באתר זה היינו מצפים להימצאות חללים בתת-הקרקע, וחפיפה בין אנומליות שליליות לבורות בפני השטח. זו אכן תמונת המצב (ציור 9), המראה התאמה טובה בין מיקום הבורות בפני השטח למיקום האנומליה השלילית בתת-הקרקע.

ב. תמונת המצב שונה באתר עשהאל הסמוך לאתר חבר דרום (ציור 10). כאן לא מובחן קשר ברור בין מיקום הבורות לבין אנומליות שליליות, והמסקנה המתבקשת היא שלא קיימים עתה חללים בתת-הקרקע בקרבת הבורות.

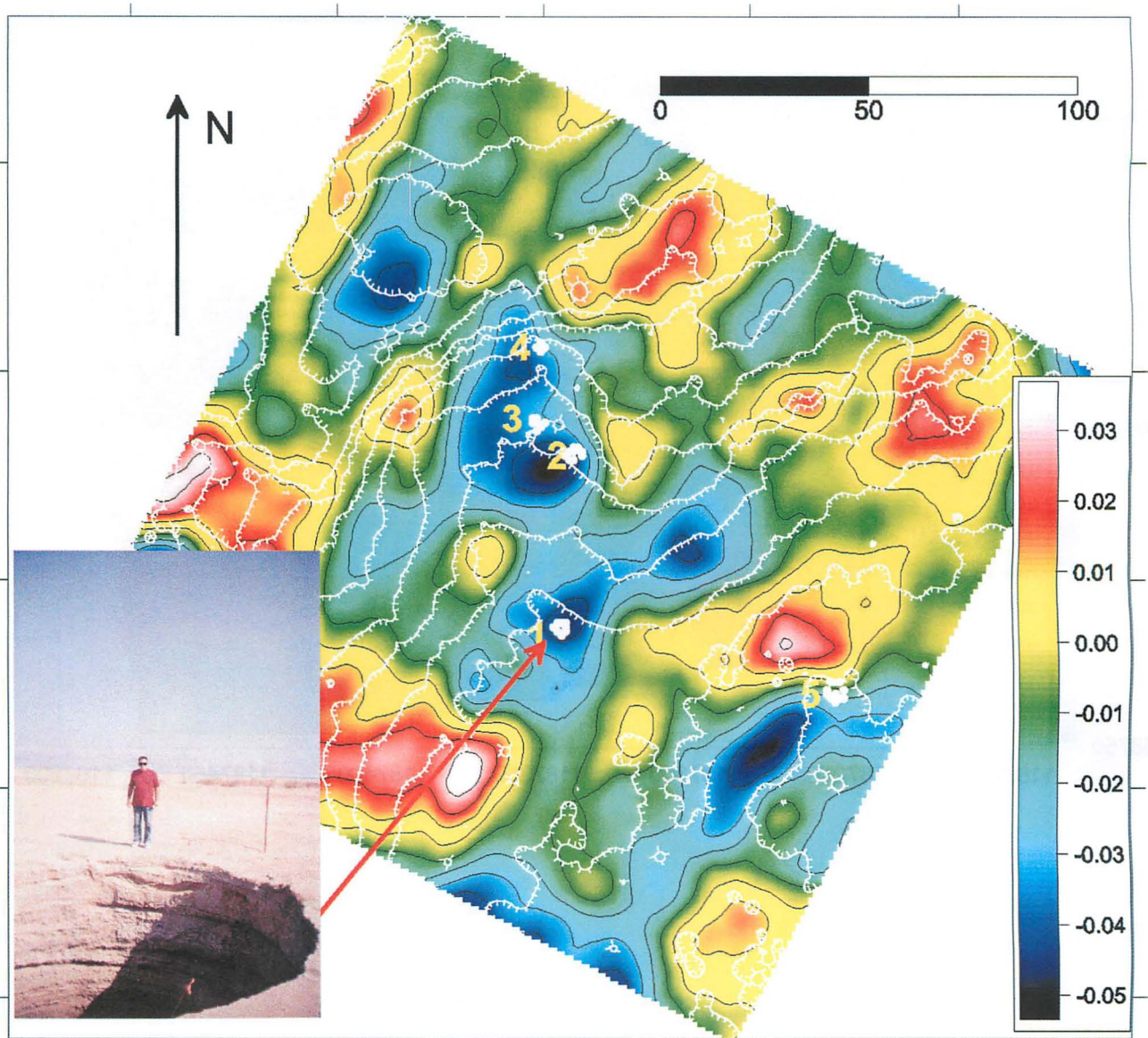
ג. תמונת מצב דומה לזו שבעשהאל קיימת באתר נווה-זוהר, שבו אין עתה אנומליה שלילית לאורך הציר שבו נוצרו הבורות בעבר. בנווה זוהר, משני צדי כביש הגישה למועצה, קיימות שתי אנומליות שליליות.

ד. בשני אתרי בורות לא קיימות כלל אנומליות שליליות, באתר נחל פרסה ובאתר מפעלי ים המלח. באתר נחל פרסה כפי שנאמר לא קיימת שכבת מלח בתת-הקרקע, ולכן אי מציאותן של אנומליות שליליות מתאימה להנחת העבודה הקושרת היווצרות חללים ממתנינים בקיום שכבת מלח. במפעלי ים המלח, כפי שנכתב קיימת שכבת מלח בעומק של כ- 45 מטר, ובור נפער ב- 1999 בפני השטח בתחום הנכלל במפה המיקרוגרבימטרית. מאז שהבור נוצר ונסתם מלאכותית, לא נפער כל בור נוסף בקרבתו. העדר אנומליות שליליות ובורות נוספים מעיד אולי שכרגע לא קיימים חללים נוספים בתת-הקרקע. יתכן והתהליך איטי יותר באזור זה, או שהבור נוצר עקב מנגנון של Piping המוכר באזור המפעלים (פרופ' סם פרידמן, בע"פ).

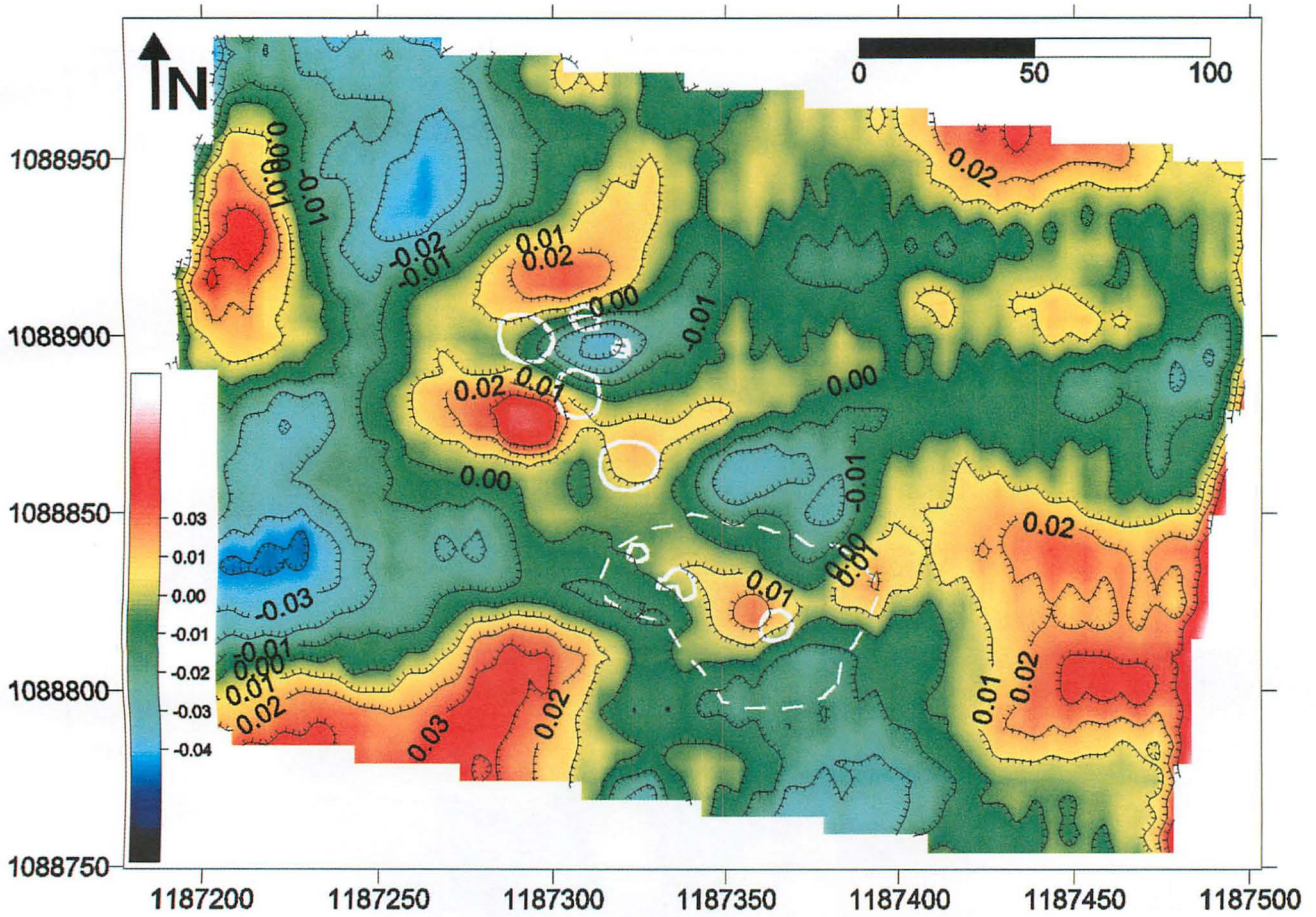
הדרך הבדוקה ביותר לעמוד על משמעות האנומליות השליליות היא באמצעות קידוחים ובדיקות גיאופיזיות אחרות. עם הזמן צפויים להיווצר בורות נוספים בחלק מהאתרים בהם בוצעו הסקרים המיקרוגרבימטריים. במידה ותהיה התאמה בין מיקום הבורות שיווצרו לאנומליות שליליות קיימות, יהיה בכך אישור לאמינות השיטה.

7.5 רדאר חודר קרקע (GPR)

בתחילת המחקר נעשה ניסיון להשתמש ברדאר חודר קרקע (GPR), ניסיון שהוכח כבעייתי. התכונות הפיזיקליות של המסלע בתת-הקרקע, והימצאות מים מליחים בקרבת פני השטח, מגבילים את החדירה לעומק של עשרות סנטימטרים עד למטרים בודדים וקיימים קשיים באינטרפטציה של הממצאים. לכן לא נעשה שימוש בשיטה זו בהמשך.



ציור 9. מפה מיקרוגרבימטרית ריזואלית (Residual) באתר נחל חבר דרום (נספח 6). המפה כוללת את סימון הבורות בשטח (1-5) וקווי גובה (רווח אנכי 0.25 מטר). הערכים הנמוכים ביותר (-0.005 - -0.004 מילי גל) מעידים על חסר במסת סלע ומסומנים בצבע סגול. במקרה של נחל חבר דרום ניתן לראות קשר בין מיקום הבורות (1-5) לבין מיקום האנומליות השליליות ביותר המסומנות בצבע הסגול. על פי נתוני המפה ניתן לשער שהבורות ממוקמים מעל לחללים המצויים בעומק רדוד בתת-הקרקע, כנראה בשכבת מלח בעומק של כ- 25 מטר מתחת לפני השטח.



ציור 10. מפה מיקרוגרבימטרית ריזואלית באתר עשהאל (נספח 6). הבורות מסומנים בעיגולים לבנים. באתר זה לא נמצא קשר בין מיקום הבורות למיקום האנומליות השליליות. כלומר, אין עדות להימצאות חללים בתת-הקרקע באזור בו מצויים הבורות.

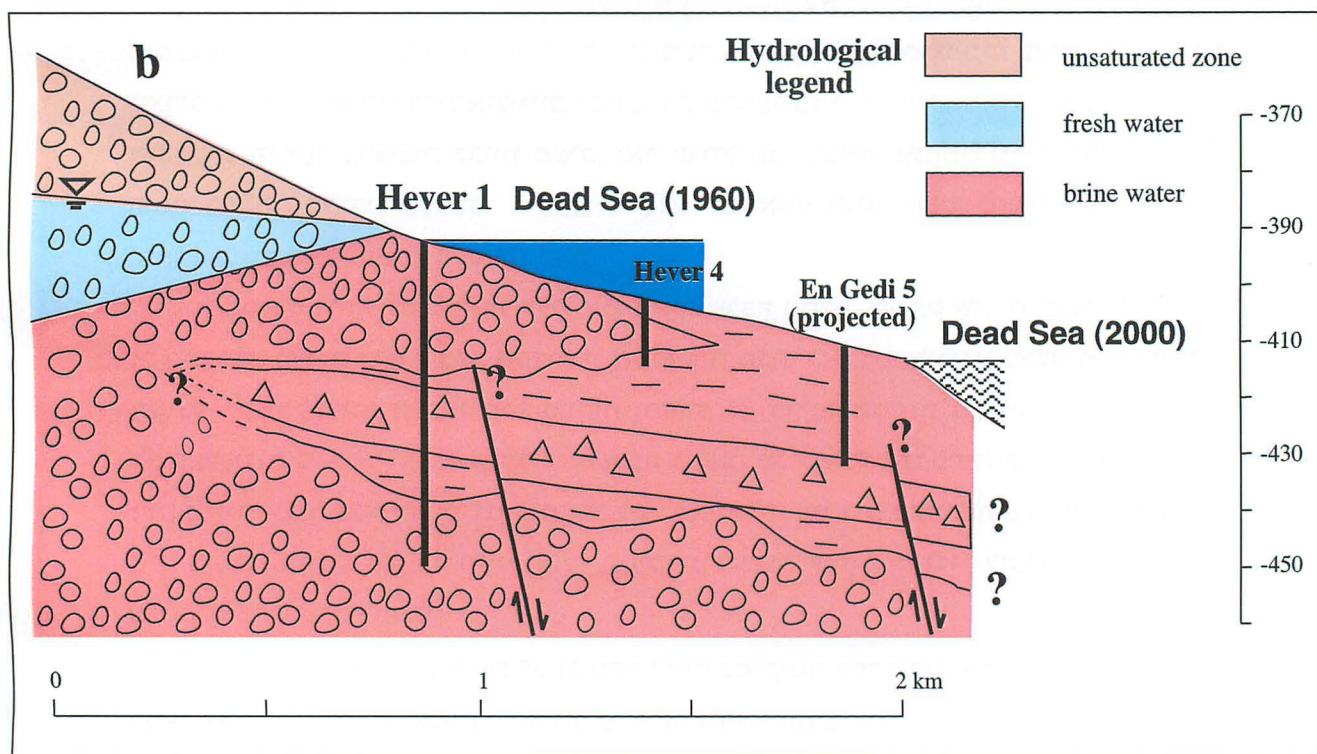
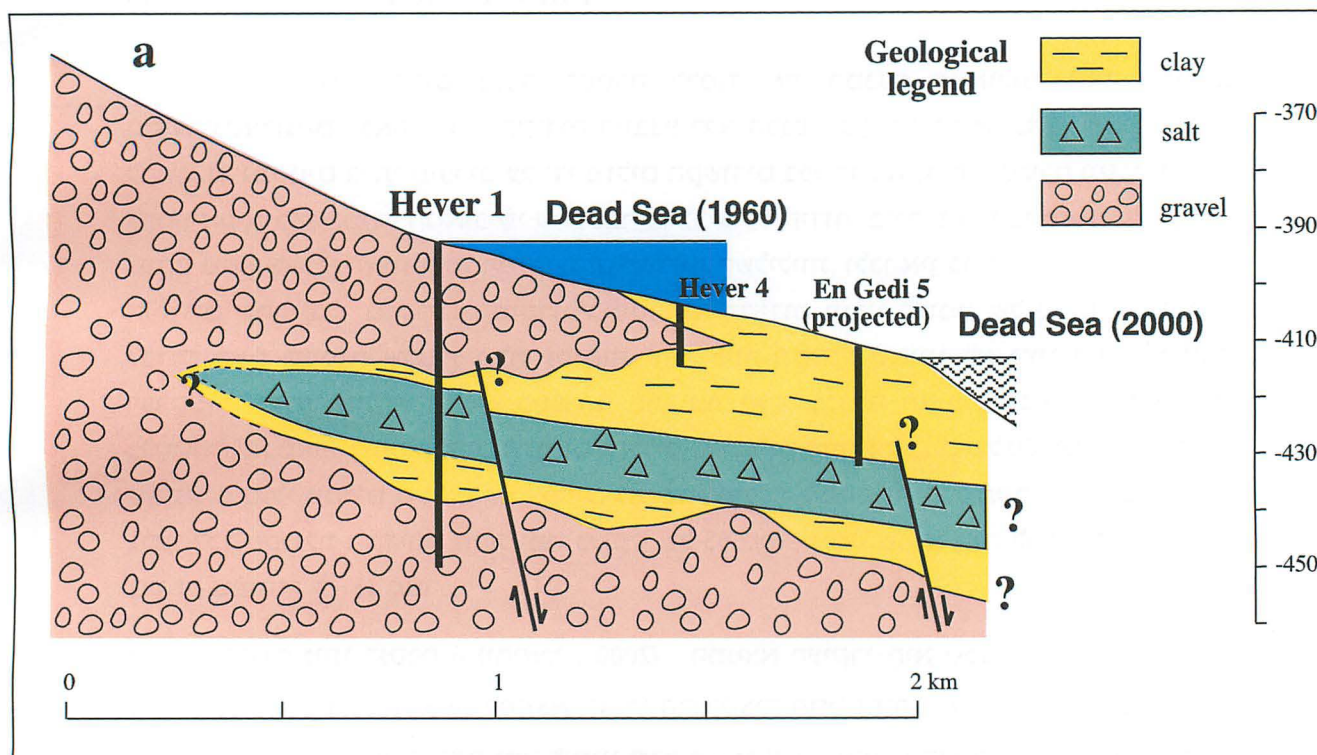
8. קידוח בדרום נחל חבר (Hever 1)

הקידוח בנחל חבר דרום נעשה במטרה ללמוד את המבנה הגיאולוגי ואת התנאים ההידרוגיאולוגיים באתר זה. הקידוח התבצע ללא הכנסת בוץ קידוח או מים, וזאת במגמה להשיג מדגמי מים בלתי מופרים על ידי נוזלים הקשורים בפעילות הקדיחה. מטרה נוספת הייתה לבחון את איכות המידע הגיאופיסי שהצטבר עד לביצוע הקידוח. בגלל סיבות בטיחותיות הקידוח מוקם מחוץ לשולי האנומליות המיקרוגרבימטריות השליליות, ולכן אין בו כדי לבחון את אמינות הנתונים שהתקבלו בסקרים המיקרוגרבימטריים. הקידוח תוכנן לעומק של 80 מטר על מנת לבדוק באם קיימות שכבות מלח עמוקות יותר בתת-הקרקע שאותן לא ניתן לזהות בעזרת רפרקציה. על פי המידע הקיים בספרות, התכונות הגיאומכניות האופייניות למלח (התנהגות פלסטית), לא מאפשרות לסדקים פתוחים וחללים להתקיים מתחת לעומק של 80 מטר. לכן חללים ממתניים בעלי ממדים גדולים לא צפויים להימצא מתחת לעומק זה בכל מקרה. קשיים טכניים גרמו לכך שפעולת הקדיחה הסתיימה בעומק של 55 מטר, מבלי שניתן היה להשיג דגימות מים בעומק שמתחת ל- 35 מטר.

תאור הקידוח ניתן בנספח 6 (יחיאלי, 2000). הממצא העיקרי הוא שכבת המלח שגגה נחדר בעומק של 24 מטר, בהתאמה לממצאי סקרי הרפרקציה הסייסמית. מפלס מי התהום בקידוח נמצא בעומק של 17 מטר, בהתאמה לנתוני סקר ה- TDEM. נתוני סקרי ה- TDEM מצביעים על הימצאות מים לא רוויים במלח בעומק של 45 מטר. כאמור לא נלקחו דגימות מים מעומק זה, אך הימצאות שכבת חלוקים בעובי של לפחות 10 מטר, מתחת לשכבה חרסיתית בעובי של 12 מטר, יוצרים את התנאים ההידרוגיאולוגיים לקיומו של אקויפר פעיל. ההגיון הגיאולוגי מכתוב ששכבת החלוקים תימשך ברציפות לכיוון מערב, ואף תגדיל את עובייה, ותהווה מוליך טוב למים לא רוויים במלח שמקורם באקויפר ההר (ציור 11). לפי אותו הגיון, סביר להניח ששכבות המלח והחרסית תדקקנה ותעלמנה באותו כיוון.

קיימות מספר עדויות להימצאות חללים בתחתית שכבת המלח, בעומק של 34 מטר: (1) בעומק זה התרחשו נפילות מקדח בעת הקדיחה, (2) שאיבות מבחן לא גרמו לירידת מפלס מי תהום דבר המלמד על מוליכויות הידראוליות גבוהות יחסית, (3) בריחת כמויות גדולות של חצץ שהוכנס לחור הקידוח בשכבת המלח מלמד כי השכבה כנראה מכילה סדקים פתוחים וחללים. הקידוח מוקם קרוב לבור צעיר ההולך וגדל, וקרוב לשולי אנומליה מיקרוגרבימטרית שלילית. נראה איפה שקיימת התאמה סבירה בין נתוני הסקר המיקרוגרבימטרי לנתוני הקידוח לגבי הימצאות חללים בתת-הקרקע בשכבת המלח.

שכבת המלח שנמצאה בעומק של 24-35 מטר דומה במיקומה בחתך לזו שנמצאה בקידוח DSIF בנחל צאלים (Yeichieli, 1993). שכבת מלח זו והסדימנטים מעליה שייכים לתצורת צאלים ההולוקנית, ואילו הסדימנטים מתחת לשכבת המלח שייכים כנראה לתצורת הלשון. מהנתונים שנאספו באזור ניתן ללמוד כי שכבת המלח משתרעת על פני שטחים נרחבים ולמרחק של למעלה מקילומטר אחד מקו החוף הנוכחי. שכבת המלח נטויה לכיוון ים המלח. סביר להניח כי נטייה זו מבטאת נטייה ראשונית של קרקעית הים בזמן השקעת שכבת המלח. המשך שכבת המלח לכיוון הים אינו ברור.

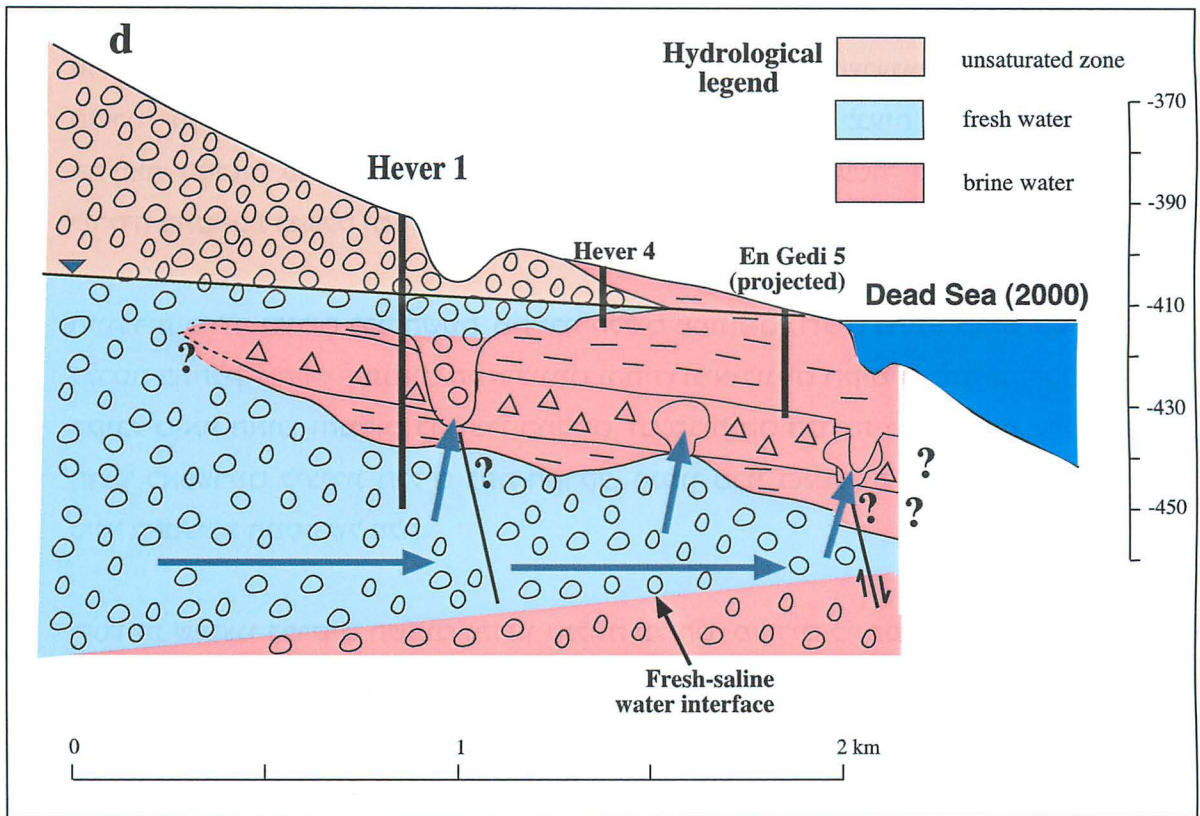
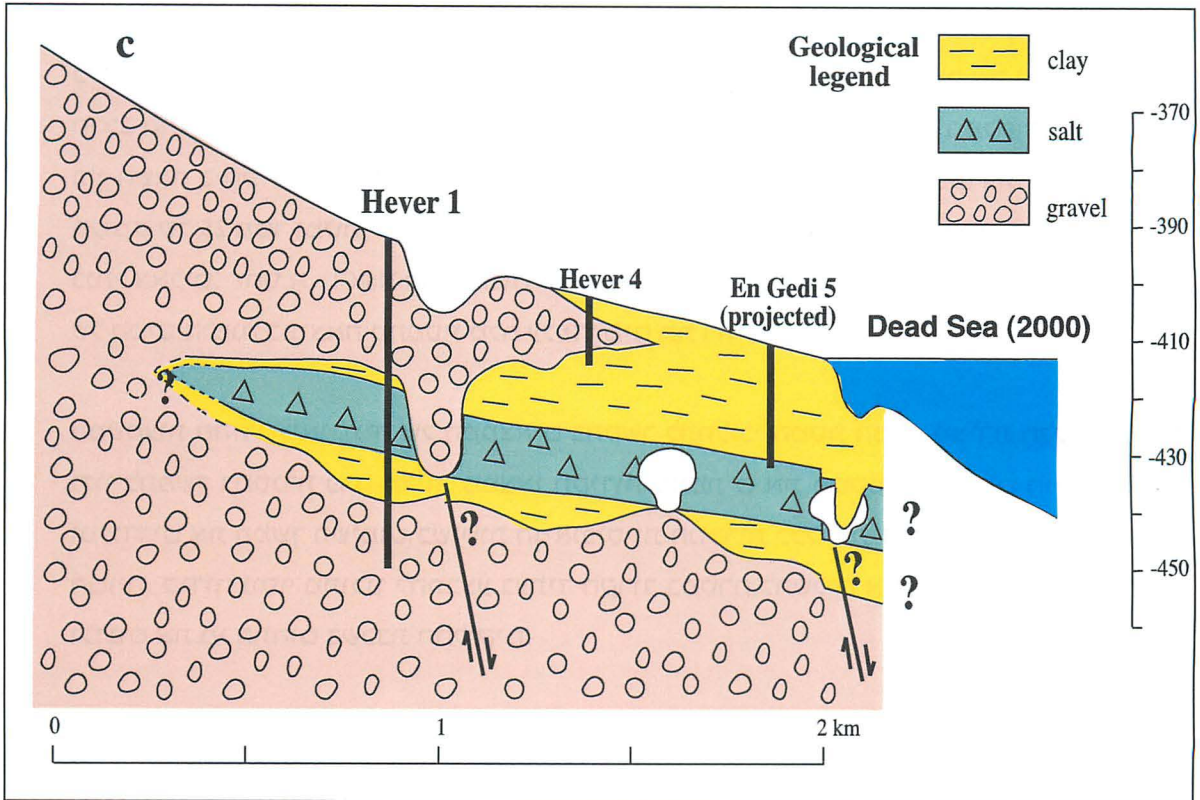


ציור 11. סדרת חתכים הידרוגיאולוגיים סכימטיים הבאה להציג את הנעשה בתת-הקרקע באתר נחל חבר דרום לפני ירידת מפלס ים המלח (1960) ועתה (2000). החתכים מתבססים על נתוני קידוחים, נתוני סקרים גיאופיזיים והנחות הידרוגיאולוגיות מקובלות.

לפני ירידת מפלס ים המלח (1960):

a. חתך המציג את שכבת המלח ושכבות החרסית המצויות במגע עמה.

b. חתך ובו מוצגים התנאים ההידרולוגיים שהיו קיימים כאשר מפלס ים המלח היה ברום של 393 מטר מתחת לפני הים. שכבת המלח ושכבות החרסית המצויות במגע עמה היו נתונים במים רוויים למלח (תמלחת ים המלח).



לאחר ירידת מפלס ים המלח (2000):

c. חתך המציג את השינויים ההידרוגיאולוגיים שנוצרו לאחר ירידת מפלס הים בשכבת המלח ובסדימנטים הלא מלוכדים שמעליה. בשכבת המלח קיימים חללי המסה, ובמקומות בהם תקרת החללים קרסה נוצרו בורות בפני השטח. במקומות אלה החללים בשכבת המלח התמלאו בסדימנטים בלתי מלוכדים שהיו מעל המלח. באתרים סמוכים לנחל חבר קיימים בורות גם בים, בקרבה מיידית לקו החוף.

d. התנאים ההידרוגיאולוגיים הנוכחיים לאחר ירידת מפלס ים המלח למצבו כיום, 415 מטר מתחת למפלס הים. הפן הביני יורד וזו מזרחה. מים לא רוויים למלח מחליפים את מי התמלחת בשכבות חלוקים מעל ומתחת לשכבת המלח. שכבות החרסית הסמוכות למלח ושכבת המלח עצמה עדיין רוויות בתמלחת עקב מוליכותן ההידראולית הנמוכה. בהנחת תנאי כליאה ולחצים ארטזים בשכבת החלוקים בקרבת החוף, עשויים מים לא רוויים למצוא את דרכם לעבר שכבת המלח (יתכן באזורי סידוק ושבירה), ולהמס חלקים ממנה (פירוט נוסף בציור 12).

בחלק העליון של החתך נמצאו מים פחות מלוחים (ריכוז כלור של 69 ג'י/לליטר) מאלה המצויים בעומק של 24-25 מטר, ואשר מליחותם קרובה לזו של ים המלח (ריכוז כלור של 210 ג'י/לליטר). הרכב היונים של המים המלוחים בקרבת שכבת המלח אינו זהה לזה של ים המלח דבר המתבטא בין השאר ביחס Na/Cl גבוה יותר. חישוב דרגות הרוויה מלמד כי המים בקרבת שכבת המלח, מעומק של 25 מטר ומטה, הנם רוויים להליט, בדומה למי ים המלח וכפי שנמצא גם בקידוח DSIF בנחל צאלים. יחס ה- Na/Cl הגבוה מזה של מי ים המלח מרמז על אפשרות כי המליחות הנוכחית של המים הושגה כתוצאה מהמסת מלח על ידי מים תת רוויים.

המשמעות ההידרוגיאולוגית של הממצאים בהקשר לתהליכי המסת המלח ויצירת חללים ובורות נדון בהמשך במסגרת פרק הדיון. ממצאי הקידוח מאמתים את מסקנות הסקרים הגיאופיסיים, ומעודדים את המשך השימוש בשיטות הגיאופיסייות הנזכרות ככלי עתידי להתמודדות מעשית עם הבעיה. קידוח נוסף מתוכנן להתבצע בעתיד הקרוב במטרה להשלים את האינפורמציה הנדרשת, ולדגום את מי התהום בשכבת החלוקים.

9. דיון

הדיון מתמקד בבחינת הנתונים שנאספו ומשמעותם לגבי הגורמים שבעטיים מתרחשת היווצרות הבורות וקריסת התשתית והשלכתם על הפתרונות האפשריים לבעיה. בבסיס הדיון מונחת התצפית המראה כי התפתחות הבורות הואצה מאוד במהלך העשור האחרון וזאת במקביל לירידה מתמשכת במפלס ים המלח.

היווצרות בורות גדולים בפני השטח מחייבת חללים ממתינים גדולים בתת-הקרקע אשר תקרתם קורסת בתהליך מהיר. התנאים הגיאולוגיים וההידרוגיאולוגיים הקיימים בתת-הקרקע הם אלה הקובעים את האופן והמקום בו יוצרו החללים, ובעקבותיהם הבורות בפני השטח. שני מנגנונים הוצגו כאפשריים ליצירת חללים בתת-הקרקע, מנגנון מכני באמצעות שטיפה (Piping), ומנגנון כימי באמצעות המסה של מלח.

העדויות שהוצגו בפרקים השונים והדיון שנלווה אליהם מעידים כי המנגנון המבוסס על המסת מלח בתת-הקרקע הוא הסביר הן מבחינת הנתונים והן מבחינת התהליך וקצבו, וכמובן הקשר לירידת מפלס ים המלח. כפי שנדון בתחילת הדוח, המנגנון האלטרנטיבי, ה- Piping אינו עומד במבחן הנתונים והתנאים בשטח, ברב אזורי הבורות, הנדרשים לקיומו. בעיקר אמור הדבר לגבי העדר עדויות לקיומן של נקודת מוצא לסדימנטים הנשטפים, ולהתרחשותן של זרימות טורבלנטיות בתת-הקרקע בעקבות שטפונות. היווצרות בורות במשך כל עונות השנה, ובלי קשר בזמן ובמרחב לזרימות שיטפוניות בפני השטח, מחלישה את הטענה בדבר קשר ברור בין הזרימה העילית לבין תופעת הבורות (ארקין ומיכאלי, 1995). גם העובדה שהבורות בחלק מהאתרים מסודרים בליניאמנטים אינה מהווה הוכחה לטיעון בדבר קיומה של זרימה טורבלנטית

בתת-הקרקע וזאת מאחר ורוב הליניאמנטים אינם ניצבים לחוף, כפי שניתן היה לצפות. לכך יש להוסיף שבמקומות בודדים בורות נוצרים לאורכם של קווים קשתיים מקבילי חוף, שמקורם כנראה בסדקי מתיחה, ולא במערכת זרימה תת-קרקעית.

9.1 עדויות להימצאות חללים בתת-הקרקע

בתצפיות בתחתית ובדפנות בורות קיימים ניתן להבחין בחללים עמוקים בסדימנטים הבלתי מלוכדים, העשויים בעיקר חלוקים. עדות ישירה לקיומו של חלל באלוביום באה מהתמוטטות תקרת אלוביום בזמן הידוק תשתית שנעשה לצורכי ביסוס מבנה באתר בתי המלון בעין בוקק. המשקולת ששימשה להידוק חדרה פנימה ונותרה בתת-הקרקע. החללים באלוביום הם זמניים וכפי שניתן לראות בציור 4 הם נוצרים בעקבות התמוטטות תקרת חללים בשכבת המלח. עדות להימצאות חללים בשכבת המלח מוסקת מנפילת מקדח בעת קדיחה ובריחת חצץ מחור הקידוח בקידוח חבר דרום 1.

התוצאות ופענוח המדידות המיקרוגרורוימטריות שהוצגו קודם מעידות על חסר במסת סלע בתת-הקרקע באזורי הבורות. הפשט קובע שמדובר בחללים, אך לא ניתן בשלב זה לקבוע באיזה עומק ובאיזו שכבת סלע הם מצויים. כמו כן לא ניתן לקבוע את הממדים ואת ההשתרעות המרחבית שלהם, יתכן ומדובר בחללים רציפים וגדולים, או במערכת של חללים קטנים ('גבינה שוויצרית').

9.2 ההשתרעות המרחבית של שכבת המלח בתת-הקרקע

פריסת הבורות בתת-הקרקע במנגנון המוצע מוכתבת בראש ובראשונה על פי ההשתרעות המרחבית של שכבת המלח. שני גורמים קובעים את השתרעות השכבה. א. גבולות הים הקדום שהיווה את סביבת ההשקעה של השכבה, לפני כ- 10,000 שנה. ב. האזורים בהם השכבה הומסה, במלואה או בחלקה, בטרם כוסתה על ידי סדימנטים צעירים יותר, או הסרתה בתהליכי ארוזיה מאוחרים יותר. ניתן לנסות לקבוע את ההשתרעות המרחבית של שכבת המלח לכיוון מערב, על ידי שחזור גובה מפלס הים הקדום שממנו היא שקעה. מאמץ בכיוון זה לא נעשה בשלב זה וגם סיכויי לתת ערכים חד משמעיים אינם רבים. צפוי כי הגבולות האמיתיים מצומצמים יותר וזאת בגין תהליכי המסה מוקדמים שאותם קשה להעריך.

נתונים לגבי המצאות שכבת המלח בתת-הקרקע בחוף ים המלח מובאים בטבלה 2. נתונים אלו נגזרים בעיקר מסקרי רפרקציה סייסמית תוך התייחסות למידע נוסף מקידוחים. גבול ההשתרעות הצפוני של שכבת המלח בתת-הקרקע בהסתמך על נתוני הרפרקציה מצוי מצפון לאתר הבורות של חוף התמרים. ואכן, אתר הבורות בחוף התמרים הוא האחרון שנוצר (1999), ומצפון לו לא התגלו עד עתה בורות.

חשוב לציין שישנן עדויות גיאופיסיות (רפרקציה) להימצאות שכבת מלח בתת-הקרקע בכל הקטע הפעיל של מניפת נחל חבר (בין אתר נחל חבר צפון לנחל חבר דרום, ממזרח לכביש מס' 90). העדר בורות באזור המניפה אינו קשור איפה להעדר שכבת מלח בתת-הקרקע, אלא לגורם אחר, שיתכן וקשור לאופי הסדימנטים הסובבים את המלח ולתנועת מי התהום בתוכם.

בכל חתכי הרפרקציה ניתן להבחין שגג שכבת המלח אינו חלק ומאוזן, אלא בעל תבליט (רלייף) של 10-20 מטר בטווח של מאות מטרים (ציור 7). ההערכה היא שגג שכבת המלח היה מאוזן בתחילה, ולאחר מכן התפתח תבליט עקב בליה כימית ו/או ארוזיה בפני השטח הקדומים של המלח. אפשרויות אחרות ליצירת התבליט יתכן וקשורות בהתמוטטות תקרת חללים קדומים.

באתר נחל חבר דרום נעשה ניסיון לתחום את הגבול המערבי של השתרעות השכבה בתת-הקרקע. הדבר נעשה באמצעות רפרקציה סייסמית. נמצא שהשכבה משתרעת עד למרחק של 500 מטר ממערב לכביש מס' 90 (בגובה טופוגרפי של כ- 370 מטר), ועומקה שם 35 מטר (גג המלח בגובה 405- מטר). מסיבות לוגיסטיות לא ניתן היה להמשיך את הבדיקה מערבה, ומכאן שאין יודעים את גבול ההשתרעות שלה למערב באזור זה.

על פי מדידות הרפרקציה ההשתרעות של השכבה לכיוון צפון מסתיימת כנראה כמה מאות מטרים מצפון לשמורת נחל קנה. יש לציין שמצפון לגבול זה לא אותרו בורות פרט לאתר תמרים, ובכך קיימת תמיכה להנחה שזה אכן גבול ההשתרעות שלה לכיוון צפון. יתכן כי באתר תמרים שכבת המלח נמצאת רק ממזרח לאזור שבו נעשתה הרפרקציה (בחודשים הקרובים יעשה ניסיון לבצע חתך רפרקציה בקרבת אזור הבורות). על פי המפה הבתימטרית (Hall and Neev, 1977), באזור זה ועד לקצה הצפוני של ים המלח, קרקעית הים הרדוד תלולה מאוד, וכנראה תחומה על ידי שבירה. יתכן שקיים קשר בין שני הדברים. ראוי לציין כי האזור הצפוני נתון להשפעת כמויות גדולות יותר של מי תהום מתוקים שאולי מנעו שקיעת מלח בקרבת החוף התלול שבו מתנקזים מי תהום או שהמלח ששקע הומס בטרם נצבר מעליו חתך אלובילי משמעותי. קיימת חשיבות ראשונה במעלה להמשיך לבדוק ולוודא באם אכן שכבת המלח בתת-הקרקע אינה קיימת בצפון אגן ים המלח.

טבלה 2. עדויות לקיום שכבת המלח בתת- הקרקע

מיקום	עומק גג שכבת המלח (מ')	רפרקציה מהירות (מ"/שני')	הערות
מפעלי ים המלח	40-45	לא נבדק	עדויות מקידוחים
נווה זוהר (כביש 90)	40-45	3500-3700	נבדק משני צדי הכביש, שטיבלמן וחוב, (1994)
נווה זוהר (350 מ' מהחוף, 1994)		2000	אין מלח עד עומק 80 מ', שטיבלמן וחוב, (1994)
נחל פרסה (בבריכה)	45	?	
נחל פרסה (בחוף, ליד הבריכה)		2300	אין מלח עד 90 מ', עדויות גם מקידוח
נחל צאלים (ליד קידוח DSIF)	20	3000	שכבת מלח בקידוח בעומק 24 מ' ובעובי 6.5 מ'
נחל חבר דרום - ממזרח לכביש	20-40	2600-3000	שכבת מלח בקידוח בעומק 24 מ' ובעובי 11 מ'
נחל חבר דרום - ממערב לכביש	35	2600-2800	שכבת המלח מגיעה לפחות עד 500 מ' ממערב לכביש
מניפת נחל חבר	30-50	2700-2900	שכבת המלח קיימת גם במרכז המניפה הפעילה
נחל חבר צפון	20-40	2800-3000	מלח נמצא בקידוח בעומק 18 מ' (קידוח עין גדי 5). בקו אחד (ES-837-2) אין עדות למלח
עין גדי (מזרח לכביש)	30-35	2600	
עין גדי (מטע תמרים, 300 מ' ממערב לכביש)	25-35	2600	
חמי שלם (300 מ' ממזרח לכביש, 1999)	15-25	2600	
נחל דרגה (ממזרח לכביש, מול מצפה שלם)	35-55	3100	
נחל קנה (מדרום למטע התמרים (250 מ' ממזרח לכביש)		2000	אין עדות למלח יש בורות כ- 500 מ' מצפון, באתר תמרים
מטע תמרים של קיבוץ מצפה שלם			אין עדות למלח, יש בורות כ- 200 מטר מצפון מזרח לאתר שבו נעשתה הרפרקציה
נחל קדרון (400 מ' ממזרח לכביש)		2100	אין עדות למלח
עין פשחה (170 מ' מקו החוף, שנת 2000)		2000	אין עדות למלח
חוף סייסטה (250 מ' מדרום לאתר הנופש, 500 מ' ממזרח לכביש)		1700	אין עדות למלח

9.3 מתי נוצרו החללים

התצפיות והנתונים המוצגים ונידונים בעבודה הנוכחית מראים כי ירידת מפלס ים המלח העכשווית יוצרת את התנאים הנדרשים להמסת שכבת המלח ויצירת החללים והתמוטטות

תקרתם. סביר להניח שתנאים דומים התקיימו גם בעבר בעקבות ארועים אקלימיים וטקטוניים כאלה ואחרים. אין להוציא מכלל אפשרות שחלק מהחללים נוצרו בפזה קודמת, אך הסבירות לכך נמוכה. קצב השינויים הטבעיים נמוך בדרך כלל פי כמה מהתהליך הנוכחי ולכן צפוי שתהליכי העבר, באם אכן התרחשו, התאזנו ומיצו את עצמם.

הופעת בורות במרחב בריכוזים (באתרים נבחרים, ולא כבודדים), ובפרקי זמן קצרים יחסית, מחזקת את ההשערה שהחללים נוצרים עתה, עקב הירידה הנוכחית של מפלס הים. במקרה של חללים עתיקים שתקרתם קורסת מכנית, הופעת הבורות בפני השטח הייתה צפויה להיות אקראית, ולא בקבוצה באתרים מוגדרים. הגידול במאמץ האפקטיבי המופעל על תקרת חללים עתיקים, היה גורם להופעה אקראית של בורות מכיוון שבכל חלל הייתה התקרה מגיעה למצב הקריטי בזמן אחר.

הסבירות להיווצרות החללים בעבר הרחוק נמוכה, מכיוון שאין עדויות היסטוריות ברורות לירידה דרסטית במפלס ים המלח ב - 10,000 השנים האחרונות (הגיל המשוער של שכבת המלח, Yechieli, 1993) לרום של מתחת ל - 405 מטר. לכן, סביר ששכבת המלח נמצאת עתה לראשונה, מאז שנוצרה, בתנאים של מגע עם מים לא רוויים במלח. כמו כן הירידה הנוכחית של מפלס הים מתבצעת בקצב מהיר מאוד, שאינו צפוי בתנאים טבעיים, ולכן קצב כניסת המים המתוקים והמסת המלח גבוה היום מאי פעם בעבר.

9.4 השפעה אפשרית של סידוק ושבירה

הפיזור העדיף של הבורות לאורכם של ליניאמנטים וקווים קשתיים, קושר את הופעתם והתפתחותם במרחב לסדקים ושבירים. ליניאמנטים נקשרים לסדקים בתת-הקרקע שמקורם בשדות המאמצים הטקטוניים הפועלים ופעלו באזור. האלמנטים הקשתיים מציינים מישורי גזירה שנוצרו עקב גלישות גרביטטיביות לעבר המדרון היבשתי של גרין ים המלח. בחתכי רפלקציה סייסמית בהפרדה גבוה (נספח 4) מנחל חבר דרום, ניתן להבחין בשברים המגיעים עד לקרבת פני השטח. על פי החתכים הסייסמיים המרחקים בין השברים הם כמה עשרות מטרים.

על פי העדויות הנזכרות ניתן להניח שמדובר בסדקים פתוחים המאפשרים תנועת מי תהום דרכם במסלול מועדף. יש להדגיש שלא מדובר בחללים המצויים בתת-הקרקע, אלא באזורי גזירה וריסוק שהמוליכות ההידראולית לאורכם גבוהה יותר. תצפיות באתרי הבורות ולימוד תצלומי אוויר, מעידים על קשר בין מיקום הבורות לקווים הנראים בשלב ההתחלתי של התפתחות הבורות. בהמשך פיזור הבורות באתר בו הם מצויים נעשה אקראי יותר, והקשר לקווים מטשטש. את ההסבר לכך ניתן למצוא בהנחה שהמים הלא רוויים במלח מוצאים את דרכם בתחילה לעבר שכבת המלח דרך הסדקים. המסת המלח עוקבת אחר תנועת המים המועדפת, ובעקבותיה גם היווצרות הבורות בפני השטח. בהמשך המסת המלח כנראה מתפשטת לצדדים והבורות מתפזרים על פני השטח. באתר נחל חבר צפון מערב אחר תצלומי אוויר מתקופות שונות מדגים היטב את

התופעה. בתצלומי האוויר מראשית שנות ה - 90, הבורות מסודרים לאורך קווים (תצלום 1), בעוד שלאחר 10 שנים הבורות גדלים, חדשים נוצרים בקרבתם והסידור לאורך קו לא קיים יותר.

9.5 התנאים הגיאולוגיים וההידרולוגיים בהם נוצרים החללים והבורות

המבנה הגיאולוגי והתנאים ההידרולוגיים השוררים בתת-הקרקע באזור החוף של ים המלח מוצגים בציור 11. לעומת הציור הסכימתי והכללי יותר, שמובא קודם (ציור 6), החתך הסכימתי בציור 11 מסתמך על נתוני הקידוח בנחל חבר דרום ועל ממצאי הסקרים הגיאופיזיים באזור ולכן הנו מורכב יותר. החתך בנוי משכבות הבנויות בעיקר מחלוקים וחואר (חרסית). בעומק של כמה עשרות מטרים מצויה שכבת מלח, בתוך רצף השכבות הנזכרות. שכבת המלח מצויה מתחת למפלס מי התהום (ציורים 11a, 2). על פי ההתנגדות החשמלית של המים המצויים מתחת לשכבת המלח, כפי שהיא נמדדת בסקרי ה - TDEM, מים אלה מתוקים יותר מאלה הסובבים את שכבת המלח. נראה שמים אלה, הלכודים מתחת לשכבת חואר החוצצת ביניהם לבין בסיס שכבת המלח, כלואים ולכן בעלי פוטנציאל ארטזי העשוי להעלותם לעבר שכבת המלח.

עם ירידת מפלס ים המלח משתנה המערכת ההידרולוגית בקרבת החוף. מפלסי מי התהום יורדים ומתאימים את עצמם לבסיס הניקוז ההולך ומעמיק. ירידת מפלס מי תהום בקרבת ים המלח גורמת להגדלת גרדיינט הזרימה ומעלה את עוצמות הזרימה. האזור בתת-הקרקע שהיה רווי בתמלחת ים המלח נשטף בהדרגה על ידי מים מתוקים יותר והפך הביני הולך ונדחק כלפי מטה ומזרחה. כתוצאה מתהליכים אלה שכבת המלח שהייתה טבולה קודם במי ים המלח הרווים למלח נחשפת, במקומות מסוימים, למגע עם מי תהום תת רווים העשויים תערובת של מים מתוקים ומי ים המלח (ציור 11 d). עם הזמן, עקב המשך ירידת מפלס מי הים והנמכת מפלסי מי התהום קטן הלחץ ההידרוסטטי ועקב כך עולה בהדרגה הלחץ האפקטיבי על השכבות בעומק. אלה מוליכים לשינויים בחתך הסדימנטרי המתבטאים בקומפקציה ושקיעות דיפרנציאליות וכן בפתיחת סדקים ושינוי במוליכות ההידראולית של השכבות השונות. זרימה חזקה יותר בתוך מופר זה של מים לא רווים מזרחה מאפשרת המסה מהירה יותר של שכבת המלח ואתה האצה בקצב היצירה של החללים בשכבת המלח.

חללים גדולים בשכבת המלח יכולים להיווצר רק כאשר המסת המלח מתרחשת מבסיס השכבה כלפי מעלה, והתקרה עשויה מלח. המסת שכבת המלח מלמעלה הייתה מתבטאת בשקיעה הדרגתית של פני השטח וביצירת אזורים נמוכים, וזאת מאחר שבשכבת החרסית שמעל למלח לא קיימים התנאים הגיאוטכניים הנדרשים ליצירת תקרות וחללים. לפיכך נראה כי מקור המים הממיסים את שכבת המלח, הוא בשכבת החלוקים המצויה מתחת לשכבת המלח.

על פי הממצאים הגיאופיזיים באתר נחל חבר דרום שכבת המלח משתרעת עד למרחק של לפחות 500 מטר ממערב לכביש 90. הבורות מצויים באתר זה במרחק של יותר מ - 500 מטר מזרחת לכביש. העדר בורות מערבה יותר אינו קשור איפה להעדרה של שכבת המלח בתת-הקרקע.

מהבחינה ההידרולוגית, ומיקומו של הפן הביני במרחב ובזמן, ניתן היה לצפות שהמסת המלח תתרחש קודם כל במערב. מכאן ניתן להסיק שמיקומו של הפן הביני הוא לא הגורם היחיד הקובע לגבי המסת שכבת המלח. מקור המים הלא רוויים במלח הוא כנראה באקוויפר הכלוא מתחת לשכבת המלח, וככל שמתרחקים מזרחה הלחצים בו גבוהים יותר, ועקב כך גם זרימת המים לעבר שכבת המלח חזקה יותר.

להשערה זו ניתן חיזוק מהעדויות להימצאות בורות בים בקרבת החוף (נספח 2). בורות אלה מצויים בקרבה מיידית לאתרי בורות יבשתיים, ומעידים באופן עקיף על המשכה של שכבת המלח מזרחה מקו החוף הקיים. בסביבה הידרולוגית זו שכבת המלח בתת-הקרקע מצויה במגע עם מי ים המלח, ולכן מקור המים הלא רוויים למלח חייב להיות באקוויפר הכלוא המצוי מתחת לשכבת המלח (ציור 12) וממנו עולים המים לעבר שכבת המלח. המים הללו גורמים להמסת שכבת המלח, ליצירת חללים בתוכה ובהמשך ליצירת הבורות מתחת לפני המים. לאחר שנפרצה שכבת המלח ונוצר המעבר לקרקעית הים, המים מהאקוויפר הכלוא מוצאים את דרכם לעבר מי הים.

סדקים ושברים המצויים בתת-הקרקע (ציור 11 a, c) יכולים להוות את האזורים המועדפים לזרימת המים הלא רוויים, כלפי מעלה, לעבר שכבת המלח. סדקים חוצים כנראה גם את שכבת החוואר שמתחת לשכבת המלח, ואולי אף את שכבת המלח עצמה, שלמרות ההתנהגות הפלסטית שלה, בעומקים רדודים, והמסה לאורך קווי חולשה, עדין יכולה לשמור על סידוק פתוח בתוכה. עם התמוטטות החללים בשכבת המלח, והיווצרות הבורות בפני השטח, עשוי להיווצר ערוץ זרימה חופשי של מי התהום הלא רוויים הכלואים, ישירות לעבר ים המלח, דבר העשוי להגביר את השטיפה וההמסה של שכבת המלח. מכאן ניתן אולי להבין מדוע בנחל חבר צפון, שהוא אזור עשיר ביותר בבורות, תהליך היווצרות הבורות מואץ עם הזמן. ראוי לזכור שגם שכבת המלח עשויה בתנאים מסוימים להוליך מים, הן בגלל הטקסטורה הגרגרית שלה (Yecheili, 1993), והן בגלל חללי המסה המצויים בתוכה. אזורים מועדפים לעליית מי תהום לכיוון שכבת המלח יכולים גם להיות מקומות שבהם שכבת החרסית דקה יותר אולי כתוצאה מהשקעתה על תבליט (ציור 11a).

בחינה ראשונית של התנאים ההידרולוגיים והתאמתם למודל ההמסה נבדקה באמצעות סימולציות עם תכנת מחשב הידרולוגית SUTRA בעזרת דר' ווס מהמכון הגיאולוגי האמריקאי. תכנה זו מותאמת לעבודה במערכות מי תהום מורכבות שבהם ישנם מספר גופי מים וחלקם בעלי צפיפות גבוהה. הבדיקה נעשתה תוך שימוש בפרמטרים הידרולוגיים המתאימים לתנאים של האקוויפר האלוביאלי של חוף ים המלח לפי הנתונים הקיימים באזור בנחל חבר דרום. תוצאות הסימולציות הראו כי כאשר מורידים את מפלס ים המלח ב- 20 מטר (ההפרש במפלס בין 1960 ל- 2000) הרי לחתך שהיה מלא במי תהום רוויים למלח נכנסים תוך פחות מ- 20 שנה מי תהום מלוחים פחות שהנם בעלי כושר המסה. מים אלו ממשיכים בזרימתם לכיוון ים המלח דרך שכבת המים הכלואה מתחת לשכבת המלח. סימולציות ראשוניות אלו לימדו כי קצב דחיקת הפן הביני

הנו מהיר (כ- 500 מטר ב- 10 שנים). האפשרות השניה שלפיה הזרימה נעשית כלפי מעלה דרך החללים בשכבת המלח, עדיין לא נבדקה.

איתמר ורייזמן (נספח 1) מצביעים על מגמת התפתחות של אתרי הבורות בזמן מדרום לצפון. האתר האחרון שנוצר הוא הצפוני ביותר, אתר תמרים. יתכן כי הדבר קשור לעובדה שבצפון יש זרימת מי תהום ומי שטפונות גדולה יותר לכיוון הים. זרימה כזו יכלה למנוע בעבר שקיעה של מלח באזורים מסוימים ו/או להמס באופן חלקי את שכבת המלח. במקרה כזה, שכבת המלח מצויה קרוב יותר לחוף במזרח, ורק כאשר מפלס ים המלח ירד לגבהים נמוכים במיוחד הגיעו מים לא רוויים לקרבת שכבת המלח.

10 . סיכום ומסקנות

התצפיות, העובדות והנתונים שנאספו במהלך העבודה הנוכחית מוליכים למסקנה חד משמעית כי יצירת הבורות וקריסת התשתית הנרחבת מתרחשים במנגנון של המסת מלח בתת-הקרקע. התנאים הנדרשים לכך, והקיימים ללא ספק באזור, כוללים שכבת מלח רגיונלית מסיבית בתת-הקרקע ומערכת הידרוגיאולוגית שהוצאה משווי משקל והגורמת לחשיפת המלח למים בלתי רוויים. לשכבת המלח, בניגוד לשכבות הלא מלוכדות שמעל יש את התכונות הגיאוטכניות הנדרשות ליצור ולשמר חללים המתפתחים עם הזמן לממדים גדולים.

מסקנות העבודה הן:

- 1) הבורות נוצרים בתהליך הדרגתי לפי השלבים הבאים:
 - א. ירידה דרסטית של מפלס ים המלח.
 - ב. מפלסי מי התהום יורדים ומתאימים עצמם לבסיס הניקוז ההולך ומעמיק ובעקבות זאת גדל גרדיינט הזרימה ועוצמת הזרימה עולה.
 - ג. הפן הביני נדחק מטה ומזרח.
 - ד. שכבת המלח נחשפת למי תהום שאינם רוויים במלח (הליט).
 - ה. שכבת המלח מומסת על ידי מי תהום שמקורם כנראה באקוויפר כלוא המצוי מתחת לשכבה, ונוצרים בה חללים.
 - ו. התמוטטות תקרת חללים בשכבת המלח ואפשרות להיווצרות חללים משניים בשכבת האלוביום מעל.
 - ז. התמוטטות תקרת חללים משניים ויצירת בורות בפני השטח.

2) מים בלתי רוויים להליט מהווים גורם חשוב בתהליכים האחראים להיווצרות הבורות. מדובר במי תהום עמוקים בלבד, ולזרימה השיטפונת העילית ולמי המעיינות אין חלק משמעותי ביצירת התופעה.

3) אין עדויות לשקיעות בפני השטח, קודם להיווצרות בורות. מכאן ניתן להסיק שלא מדובר בתהליכי קומפקציה הדרגתית של שכבות לא מלוכדות בתגובה לירידת מפלס מי התהום. קומפקציה כזו יכולה לגרום ליצירת שקעים בפני השטח. המסת גג שכבת המלח על ידי מי תהום מעל שכבה זו, יכולה אף היא לגרום ליצירת שקעים.

4) נראה כי החללים הגדולים נוצרים בשכבת המלח עצמה וזאת כתוצאה משטיפת המלח על ידי מים בלתי רוויים מלמטה. עדויות ראשוניות מקידוח שחדר את המלח מרמזות על מציאות חללים בה.

5) שכבת המלח מצויה בעומק של כמה עשרות מטרים, עובייה עשוי להגיע לכדי 15 מטר ויותר והיא בעלת תפוצה רחבה בחוף ים המלח באזורים בהם מצויים אתרי הבורות ואף מעבר להם. מעל לשכבה מצויים סדימנטים אלוביאליים ואגמיים המכילים שכבות בעלות דרגות שונות של ליכוד. אלה האחרונות עשויות ליצור תקרות זמניות לחללים ממתניים משניים, שנוצרים עקב התמוטטות תקרת החללים בשכבת המלח. תקרת החללים המשניים עשויה להגיע עד לקרבת פני השטח. בור עשוי להיווצר בפני השטח עקב התמוטטות תקרת המלח, או בשלב מאוחר יותר כאשר תקרת חלל משני קורסת. באתרים בהם התשתית מהודקת ו/או מכוסה באספלט, הבור עלול להיווצר עקב העמסה רגעית (למשל מעבר רכב כבד).

6) אתר הבורות הצפוני ביותר מצוי 500 מטר מצפון לשמורת "מעיינות קנה". צפונה משם אין עדות לבורות ולא נמצאו עדויות גיאופיסיות בתת-הקרקע להימצאות שכבת מלח.

על פי סקרים גיאופיסיים שנעשו באתר נחל חבר דרום, שכבת המלח בתת-הקרקע קיימת עד למרחק של לפחות 500 מטר ממערב לכביש מס' 90 ועומקה 35 מטר. למרות השתרעות שכבת המלח מערבה, אתרי הבורות מצויים בקרבת קו החוף בלבד. ההסבר לכך מצוי כנראה בסיבות הקשורות לתנאים ההידרוגיאולוגיים הקיימים בתת-הקרקע.

7) שיטת הרפרקציה הסייסמית מתאימה לאיתור שכבת המלח בתת-הקרקע. בתנאים מסויימים השיטה הגיאופיסית האלקטרו - מגנטית (TDEM) מאפשרת הבחנה בין גופי מים בעלי מליחות שונה בתת-הקרקע ויכולה לסייע באיתור גופי מים בלתי רוויים למלח. מדידות מיקרוגריומטריות מאפשרות להבחין באזורים אנומליים שבהם קיים חסר במסת סלע בתת-הקרקע, והמיוחסים לחללים בתת-הקרקע.

8) חקר תת-הקרקע מחייב שילוב קידוחים עם שיטות גיאופיסיות. קידוחים מאפשרים לקבל מידע נקודתי ישיר על תת-הקרקע, בעוד שמערך שיטות גיאופיסיות משולב, לאחר אימות וקליברציה עם נתוני הקידוחים, מאפשר סריקה מרחבית של תת-הקרקע. ראוי לציין שקדיחה

בקרב הבורות, ההכרחית לדיגום מי תהום ולאומות נתונים גיאופיזיים, הנה פעולה מורכבת טכנית ובטיחותית הדורשת מיומנות ותכנון ראוי.

9) ניתן ליצור מפות המציגות את פריסת שכבת המלח בתת-הקרקע. ראוי לציין כי לא בכל מקום שבו מצויה שכבת מלח בתת-הקרקע, נוצרים בורות בפני השטח אך הפוטנציאל ליצירתם קיים. מימוש הפוטנציאל מותנה בתנאים ההידרולוגיים השוררים בתת-הקרקע והם שיכתבו את תפוצת הבורות במרחב והתפתחותם עם הזמן. הכרת התנאים ההידרולוגיים שבהם קיים פוטנציאל גבוה להיווצרות בורות תאפשר לא רק לחזות את ההתפתחות והסיכונים בעתיד, אלא אולי גם לעצור ולמנוע את המשך התהליך.

10) פרט למקרה בודד במניפת הסחף הפעילה של נחל חמר, שבה התגלה לאחרונה בור (באזור נווה-זוהר), לא נמצאו בורות במניפות סחף פעילות אחרות. במניפת נחל חמר מתגלה חלל גדול בקרבת פני השטח, ושכבת האלוביום היוצרת את תקרתו מלוכדת היטב בהשוואה לזו המצויה במקומות אחרים בהם ישנם בורות. אחד ההסברים לאי הימצאותם של בורות במניפות הפעילות היה ששכבת המלח בתת-הקרקע חסרה בהן. אולם, על פי נתוני סקר רפרקציה סייסמית שבוצע במניפה הפעילה של נחל חבר, שכבת המלח מצויה בה בתת-הקרקע לכל רוחבה. למרות זאת, בורות מצויים רק מדרום ומצפון למניפה הפעילה, באתרי נחל חבר צפון ודרום, אך לא בה עצמה. יתכן שניתן לייחס את העדר הבורות לתכונות המכניות של שכבת האלוביום המצויה בקרבת פני השטח. במקום בורות בפני השטח יתכן וישנם חללים ממתנינים בקרבת פני השטח, שרק בעתיד יחפכו לבורות בעקבות קריסת תקרתם.

המסקנה העיקרית הנובעת מהעבודה הנוכחית קובעת כי מיפוי תפוצת שכבת המלח וכימות התהליכים ההידרוגיאולוגיים הם המפתח להתמודדות עם הבעיה. התמקדות בנושאים אלה תסייע בהגדרת אזורי הסיכון ובה המפתח לפיתוח אמצעים העשויים לסייע בבקרת התהליכים ההרסניים. פיתוח שיטות גיאופיסיות במקביל למעקב וניסוי הידרולוגי באמצעות קידוחים מהווה תנאי הכרחי להתמודדות כוללת עם הבעיה. יש צורך בבניית מפות מיקרוזונציה של אזור ים המלח כבסיס להמשך התכנון והערכת הסיכונים הקיימים. פעולות אלה, המשולבות בפתרונות הנדסיים נקודתיים, עשויות לאפשר פיתוח הדרגתי ומבוקר של האזור. בשלב זה אין ביכולתנו להצביע על אתרים לאורך חוף ים המלח, שלגביהם ניתן לקבוע בביטחון כי הם בטוחים וכי אין בהם פוטנציאל ליצירת בורות בפני השטח. נראה כי האזורים ממערב לכביש, בקרבת המצוק, ובצפון ים המלח הנם בטוחים יותר, וזאת מתוך הנחה כי שכבת המלח בהם חסרה או מצומצמת. סקרי רפרקציה סייסמית מאפשרים לקבוע אם שכבת המלח קיימת בתת-הקרקע, ובאמצעותם ניתן למפות את ההשתרעות המרחבית שלה בתת-הקרקע.

11 . המלצות ועיקרי תוכנית עבודה להמשך

התפתחות הבורות וקריסת תשתית באזורים נרחבים לאורך חופי ים המלח הינה תופעה רגיונלית המלווה את ירידת מפלס הים ונגזרת ממנה. ממדי התופעה הנרחבים וקצב התפתחותה המהיר הופכים אותה לבעיה אזורית המשליכה על מרקם חיי היום יום ועל תוכניות המתאר והפיתוח של חבל ארץ שלם. ממצאי העבודה הנוכחית קובעים כי בתנאים הנוכחיים של ים המלח אזורי הסיכון חופפים את תפוצת שכבת מלח המצויה בתת-הקרקע, ובעיקר את אותם האזורים בהם מתקיימת בנוסף מערכת מי תהום פעילה הגורמת להמסת המלח.

ההמלצות להמשך העבודה מתמקדות בנושאים אלה כאשר המטרה הראשית היא לשכלל את זיהוי ומיפוי אזורי הסיכון, לבחון אמצעים ושיטות שבעזרתם ניתן יהיה להאט ואף למנוע את המשך ההמסה האינטנסיבית של המלח. בנושאים אלה ראוי להתמקד באתרים נבחרים שבהם קיימים התנאים המתאימים לפיתוח ובחינת אמצעים ושיטות להתמודדות עם התופעה. באתרים אלה מומלץ להפעיל שיטות ואמצעים גיאופיזיים המשולבים בקדיחה ובאיסוף נתונים הידרוגיאולוגיים. בהמשך, בהסתמך על הממצאים יתוכנן ויבוצע ניסוי הידרולוגי מבוקר לצמצום תהליך ההמסה ובמקביל יקודם מיפוי שיטתי של אזורי הסיכון. בנוסף לכל אלה ראוי להמשיך בפעולות ניטור ומעקב אחר התופעה במרחב ובזמן באמצעות תצלומי אוויר וחישה מרחוק (לוויינים).

חריפות הבעיה, מורכבות התהליכים ואופיים הרגיונלי מחייבים גישה פרגמטית, ממוקדת וקצובה בזמן תוך הפעלת אמצעים מגוונים וכוח אדם מיומן. הצורך להגיע לתוצאות משמעותיות וברות יישום בתוך זמן סביר, מחייבים הקצאת משאבים ניכרת וביצוע בהתאם לתוכנית העבודה שעיקרה מוצג להלן.

לתוכנית שלושה מרכיבים ראשיים שאותם יש לקדם במקביל ובמשותף:

1. זיהוי ומיפוי אזורי הסיכון
2. ניטור ומעקב במרחב ובזמן
3. בחינת אמצעים ושיטות להאטת ההמסה האינטנסיבית של שכבת המלח בתת-הקרקע

11.1 - זיהוי ומיפוי אזורי הסיכון

בהנחה כי מציאת שכבת המלח היא תנאי הכרחי אם כי לא יחיד להיווצרות בורות, הרי מיפוי שכבה זו בשיטת הרפרקציה הסייסמית מהווה מיפוי של אזורי הסיכון. שילוב מדידות אלקטרומגנטיות (TDEM) חשוב כדי לברר באם מצויים מים בלתי רוויים בקרבת המלח המסוגלים להמס את המלח.

בדיקת ההשתרעות של שכבת המלח מחייבת ביצוע סקרים שיטתיים והרחבתם לכיסוי אזורים שלא נבדקו עד כה. מדובר בהרחבה בעיקר לכיוון מערב. חשוב גם להגדיר בדיוק עד לאן משתרעת

שכבת המלח לכיוון צפון. יתכן ויהיה צורך גם בקידוחי אימות באזורים שבהם ממצאי הרפרקציה הסייסמת לא יהיו חד משמעיים.

בהנחה שההשתרעות המרחבית של שכבת המלח מערבה מוכתבת על ידי ההשתרעות של האגם הקדום שגרם לשקיעתה, ניתן יהיה בהמשך, לאחר הצטברות של מספיק נתונים ממדידות גיאופיזיות לחבר באמצעות אקסטרפולציה בין הנקודות שנמדדו. הדבר יאפשר לתחום באמצעות קו גבול את ההשתרעות של השכבה מערבה ולמפות את האזורים בהם לא קיים סיכון.

על מנת להרחיב וליישם את השימוש בשיטה המיקרוגרבימטרית לזיהוי חללים בתת-הקרקע המהווים איום חמור ומידי יש לאמת תחילה את התוצאות שהתקבלו עד עתה. מדובר בביצוע מספר קידוחים בתחום האנומליה המיקרוגרבימטרית ושילוב של סקרים סייסמיים ביניהם. שילוב כזה עשוי לתת תמונה ברורה של הנעשה בתת-הקרקע, ולאפשר הבנה טובה יותר של התמונה הגיאופיזית המצטיירת באמצעות השיטה המיקרוגרבימטרית. הדבר הכרחי על מנת לאפשר בהמשך את ישום השיטה המיקרוגרבימטרית לצרכים מעשיים באתרים ספציפיים.

11.2 ניטור ומעקב במרחב ובזמן

מעקב שיטתי וממושך אחר כלל התופעות המתרחשות בשטח יש בו כדי לסייע בהבנה וכימות היחסים שבין הגורמים השונים הקשורים ביצירת הבורות. את המעקב הזה מוצע לבסס על הפעילויות הבאות:

- א. סריקות אזור ים המלח באופן תדיר לעקוב אחר התפתחות אתרים קיימים ולמצוא בורות חדשים. הסריקה תבוצע באמצעות תצלומי אוויר ובדיקות משלימות בשדה.
- ב. מעקב בחישה מרחוק באמצעות אינטרפומטריה מהדמיות לוויינים (INSAR). יישום מתמשך של אמצעי זה מאפשר כימות השינויים בפני השטח המתרחשים עם הזמן.
- ג. ניטור מפלסי מי תהום ומליחותם באמצעות קידוחי ניטור יעודים. בקידוחים אלה יקוים מעקב אחר מיקום הפן הביני וקצב ירידתו עם הזמן.

11.3 - בחינת אמצעים ושיטות להאטת ההמסה האינטנסיבית של שכבת המלח בתת-הקרקע

טיפול ושליטה בזרימת מי התהום התת רוויים למלח אמורים לסייע בהאטת תהליך ההמסה ואולי אף להפסיקו באתרים ספציפיים.

הטיפול במי התהום מתמקד במניעת כניסת מי תהום מתוקים יחסית לאזור בו מצוי המלח וזאת בעזרת שאיבת מי תהום אלו במעלה הזרימה. חשוב לציין כי ניתן יהיה להשתמש במים אלו למספר שימושים שונים. במקביל תיבדק האפשרות להחדרת מים רוויים במלח (מי ים המלח) לעבר שכבת המלח במטרה למנוע ממים לא רוויים לבוא במגע עמה. אפשרות נוספת שיש לחשוב עליה הנה המסה מלאה של שכבת המלח על ידי החדרת מים מתוקים יחסית. מוצע לגשת באופן מידי לשלב של ניסוי הידרולוגי באתר נבחר שבו תפותח השיטה ותבחן לפרטיה ובעיקר תישקל ישימותה המעשית.

הבעת תודה

לעמוס ביין ולמיכאל בייט על הדיונים הפוריים וההערות שעזרו לשפר את הדוח, למיכאל בייט על שעזר בכל התיאומים והצדדים הטכניים של הפרויקט, לדב פרימרמן על שהיה שותף לכל שלבי הפרויקט ועזר בכל מה שניתן, לזאב לוי ודב לויטה על שקראו ותיקנו את הדוח. לטכנאי המכון הגיאולוגי, ובמיוחד למשה ארנון שעזר בביצוע עבודות השדה. לבת שבע כהן ונחמה שרגאי על הכנת השרטוטים והעזרה בהוצאה לאור. לטכנאי המכון הגיאופיסי שסייעו באיסוף הנתונים החשובים מתת-הקרקע. מימון העבודה נעשה על ידי מע"צ, המשרד לתשתיות לאומיות, מנהל מקרקעי ישראל, משרד התיירות והמרכז למיפוי ישראל.

מקורות

- ארקין, י. ומיכאלי, ל. 1995. בורות במניפת הסחף של נחל ערוגות. דוח המכון הגיאולוגי TR-GSI/7/95.
- ביידא, א. וגולדשטוף, י., 1972. סקר מי תהום באזור עין עויר - עין תוריבה בחוף ים המלח. דו"ח תה"ל HR/72/086.
- וקס, ד., רז, א. ושטיבלמן ו. 1999. מחקר היווצרות הבורות לאורך חופי ים המלח - דו"ח ביניים. מוגש לוועדת ההיגוי של הפרויקט - דוח פנימי של המכון הגיאולוגי.
- כדן, ג. 1997. עדויות לשינויים במפלס ים המלח ופעילות טקטונית צעירה מהמניפה-דלתא ההולוקנית של נחל דרגה. עבודת גמר לתואר מוסמך, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
- זק, י., 1967. הגיאולוגיה של הר סדום. עבודת דוקטורט, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
- יחיאלי, י. וארד, א., 1997. סקר ספרות בנושא מים מינרליים בחוף ים המלח. דו"ח המכון הגיאולוגי GSI/29/96.
- יחיאלי, י., כפרי, א. וגולדמן, מ. 1998. מפוי גופי מים מתוקים ומלוחים באקוויפר של חוף ים המלח באמצעות TDEM. דוח המכון הגיאולוגי TR-GSI/8/98.
- שטיין, מ., ברטוב, י., כדן, ג., קן-תור, ר., אייל, י., אנזל, י., מרקו, ש. ועגנון, א. 1999. משקעים רביעוניים באגן ים המלח (תצורות ליסאן וצאלים) - התפתחות אגמית ופליאוסייסמולוגיה. מדריך סיור בכנס החברה הגיאולוגית בים המלח.

References

- Arkin, Y. and Gilat, A. 1999. Dead Sea sinkholes - an ever-developing hazard. *Environmental Geology* 39 (7): 711-722.
- Hall, J. and Neev, D. 1977. The Dead Sea geophysical survey 19 July - 1 August 1974: Final report no. 1: Methods, Navigation, Bathymetry and Magnetics ; Geological Survey Report MG/1/78, 28p.
- Gilat, A. 1999. Report on sinkholes distribution along the western coast of the Dead Sea. *Isr. Geol. Surv. Report* GSI/4/99.
- Gavrieli, I., Yechieli, Y., Halicz, L. and Efron, D. 1997. Survey of mineral waters along the Dead Sea coast. *Geol. Surv. Israel Curr. Res.* 11:71-75.
- Kafri U, Goldman M and Lang B (1997) Detection of subsurface brine, fresh water bodies and the interface configuration in between by the TDEM method in the Dead Sea Rift, Israel. *Environmental Geology* 31: 42-49

Kaufman, A., Yechieli, Y. and Gardosh, M. 1992. Reevaluation of the lake -sediment chronology in the Dead Sea Basin, Israel, based on new $^{230}\text{Th}/\text{U}$ dates. *Quarter. Res.* 38:294-304.

Salameh, E. and El-Naser, 2000. Changes in the Dead Sea level and their impacts on the surrounding groundwater bodies.

Schramm, A., Stein, M. and Goldstein, S. 2000. Calibration of the ^{14}C timescale by TIMS ^{230}Th - ^{234}U dating of Lake Lisan sediments (paleo Dead Sea). *Earth Planet. Sci. Lett.* 175:27-40.

Yechieli, Y. 1993. The effects of water level changes in closed lakes (Dead Sea) on the surrounding groundwater and country rocks. Ph.D. thesis, Weizmann Institute of Science, Rehovot.

Yechieli Y, Ronen D, Berkovitz B, Dershovitz WS and Hadad A (1995) Aquifer characteristics derived from the interaction between water levels of a terminal lake (Dead Sea) and an adjacent aquifer. *Water Resources Research* 31(4):893-902

Yechieli, Y. 2000. Fresh -saline water interface in the western Dead Sea area. *Groundwater* 38: 615-623.

necessary condition for the formation of sinkholes on the surface. The subsurface spread of the salt layer can be mapped. A salt layer was penetrated a depth of 24 m in a borehole drilled for this study at Nahal Hever. Its thickness of 11 m is comparable with that determined by the geophysical methods. North of the Nahal Kidron area, no evidence was found for the salt layer in the subsurface, and no sinkholes were observed on the surface.

It is assumed that the scale of the phenomenon can be reduced - and the development of more sinkholes prevented - by preventing fresh water from reaching the salt layer. The rate of salt dissolution will thus be reduced, new caves will not form, and dissolution in those already present will be reduced.

The principal recommendations are intended to provide the means necessary for the continuation of building and development activities in the area. Using the geophysical methods developed for this study together with the data now available and the proposed hydrogeological model, it is now possible to prepare maps that define the areas of high risk.

ABSTRACT

In the past decade, hundreds of sinkholes have developed along the shore of the Dead Sea, posing a threat to life and property and hampering local building and development. The formation of the sinkholes is a dynamic process resulting in the appearance of new sinkholes at both expected and unexpected sites.

Under the auspices of the Ministry of National Infrastructures, the Geological Survey of Israel and the Geophysical Institute carried out a comprehensive study aimed at understanding and recognizing the subsurface geological mechanisms involved in the formation of sinkholes on the surface. The purpose of the project is to develop solutions for minimizing the scale of the phenomenon and thus to help revitalize building and development in the area.

In the course of the study, detailed field work was carried out and geophysical tools were developed to enable the study of subsurface events and their relation to the formation of sinkholes. Borehole drilling verified the data obtained by geophysical methods. The combination of field and aerial photographic studies, together with data obtained from the subsurface, allowed the preparation of a hydrogeological model which presents most of the factors involved in the formation of the sinkholes.

The continuous lowering of the water level in the Dead Sea during the past thirty years has caused rapid and acute changes in hydrogeological conditions of the near-shore subsurface. Following a decline in the groundwater table and a change in the location of the fresh-saline interface, a subsurface salt layer came into contact with relatively fresh water. The source of this water is apparently in a confined aquifer below the salt. This resulted in the partial dissolution of the salt layer and the formation of caves. The ceilings of the caves eventually collapse and the overlying unconsolidated sediments collapse into the empty spaces. This process ends in the formation of sinkholes on the surface.

Geophysical methods, including seismic refraction, allow the recognition of the salt layer, the nearby bodies of fresh water, and indications of the presence of caves (at unknown depth). Thus, the presence of the subsurface salt layer in the area is a





Formation of sinkholes along the Dead Sea shore

SUMMARY OF FINDINGS FROM THE FIRST STAGE OF RESEARCH

Daniel Wachs¹, Yoseph Yechieli¹, Vladimir Shtivelman², Arieh Itamar¹,
Gideon Baer¹, Mark Goldman², Eli Raz¹, Michael Rybekov², Uri Shatner¹

¹Geological Survey of Israel
²Geophysical Institute

