

# בולענים בחוף ים המלח

יוסף יחיאלי ומאיר אבלסון

## הקדמה

לאורך חופי ים המלח נוצרו בעשור האחרון מעל לאלף בולענים (בורות). בולענים אלה מהווים סיכון לנפש ולרכוש, משבשים את מהלך החיים באזור ופוגעים בפיתוח ובבנייה. עומקם מגיע לכ־20 מטר וקוטרם לכ־25 מטר, והם מופיעים בצבירים בעשרות אתרים (איור 1). מאז שנות השמונים מתפתחים הבולענים בתהליך דינמי מואץ שבמהלכו נפערים בולענים חדשים באתרים רבים לאורך החוף.

צוות מחקר רב תחומי שכלל גאולוגים, הידרוגאולוגים וגאופיזיקאים הופקד על חקר התופעה. במהלך העבודה, שמטרתה פענוח מנגנוני יצירת הבולענים ומיפוי האזורים המועדים, נאספו נתונים רבים תוך שימוש במגוון של שיטות מחקר משולבות שבעזרתן נבחנו היבטים גאולוגיים, הידרוגאולוגיים, גאופיזיים, גאוכימיים וטקטוניים (וקס ואחרים, 2000; יחיאלי ואחרים, 2004). הממצאים הוליכו לגיבוש מודל המסביר את מנגנוני היצירה ואת משמעותם של הגורמים השונים התורמים לקיומה של תופעת הבולענים ולהאצתה בזמן ובמרחב. במקביל לצוות המחקר בראשות המכון הגאולוגי פעל צוות הנדסי, שתפקידו היה לגבש דרכי התנהלות והתמודדות הנדסיים באזורים המועדים. המסקנה העולה מן המחקר היא כי הבולענים נוצרים כתוצאה מהמסת מלח בתת־הקרקע על ידי מי תהום (פירוט נרחב של מנגנון היצירה והעדויות לו

\* יוסף יחיאלי ומאיר אבלסון הם חוקרים במכון הגאולוגי, ירושלים.

מופיע בהמשך). מנגנוני יצירה דומים, של המסת סלע בתת־הקרקע, הוצעו גם במקומות רבים אחרים בעולם, כמו לדוגמה בארצות הברית (בעיקר בפלורידה), בספרד, באיטליה ועוד (מחקרים לדוגמה: Galloway et al., 1999; Martinez et al., 1998).

### גישת העבודה ושיטות המחקר

ההנחה הבסיסית היא שהבולענים נוצרים בפני השטח כתוצאה מתהליך גאולוגי־הידרוגאולוגי המתרחש בתת־הקרקע בעומק שאינו ידוע במדויק, אך אינו עולה על עשרות מטרים מפני השטח. לכן חייבים להכיר ולהבין את המבנה הגאולוגי ואת התהליכים הגאולוגיים וההידרולוגיים המתרחשים בתת־הקרקע. ניתן לבחון את המתרחש בתווך זה באופן ראשוני מלימוד התופעות המתרחשות על פני הקרקע וניתוחן, באמצעות מחקרי שדה המשולבים בלימוד תצלומי אוויר. אולם עיקר החקירה מחייב בחינה ישירה ועקיפה של תת־הקרקע באמצעות שיטות גאופיזיות וקדיחה. השיטות הגאופיזיות מתבססות על נתונים הנמדדים בפני הקרקע ועל פענוחם וניתוחם, בדומה לשימוש בקרני רנטגן ברפואה. קידוחים מספקים מידע ישיר על השכבות בתת־הקרקע ומאפשרים בדיקה ישירה של הסלעים ודגימת מי תהום מהאקוויפרים השונים. באנלוגיה לרפואה, הקידוח דומה לניתוח ולדגימת רקמות. אולם יש לזכור שהמידע המתקבל מקידוח הוא מידע נקודתי המייצג רק את הסביבה הקרובה לו, ולכן אינו יכול לספק תמונה מרחבית מלאה, וכן שהקידוחים יקרים מאוד ולא ניתן להרבות בהם. לכן, השילוב בין שיטות גאופיזיות וקידוחים הוא המפתח לקבלת תמונה מרחבית אמינה וטובה יותר לגבי הנעשה בתת־הקרקע.

בעבודה הנוכחית ננקטו השיטות הבאות:

1. מיפוי הפריסה של אתרי הבולענים בכל מרחב חוף ים המלח.
2. לימוד ומעקב אחר התפתחות תופעת הבולענים במרחב ובזמן באמצעות תצלומי אוויר מתאריכים שונים, תוך שימוש במערכת GIS (Geographical Information System) לניתוח נתונים מרחביים ועתיים.
3. מחקר תת־הקרקע באמצעות מגוון שיטות גאופיזיות וכיולן באמצעות נתוני קידוחים.

4. ביצוע קידוחים באתרים נבחרים, בדיקת הסלעים וההרכב הכימי של מי התהום באופקים השונים, מדידת מפלסי מי תהום וביצוע מבחני שאיבה.

## הממצאים

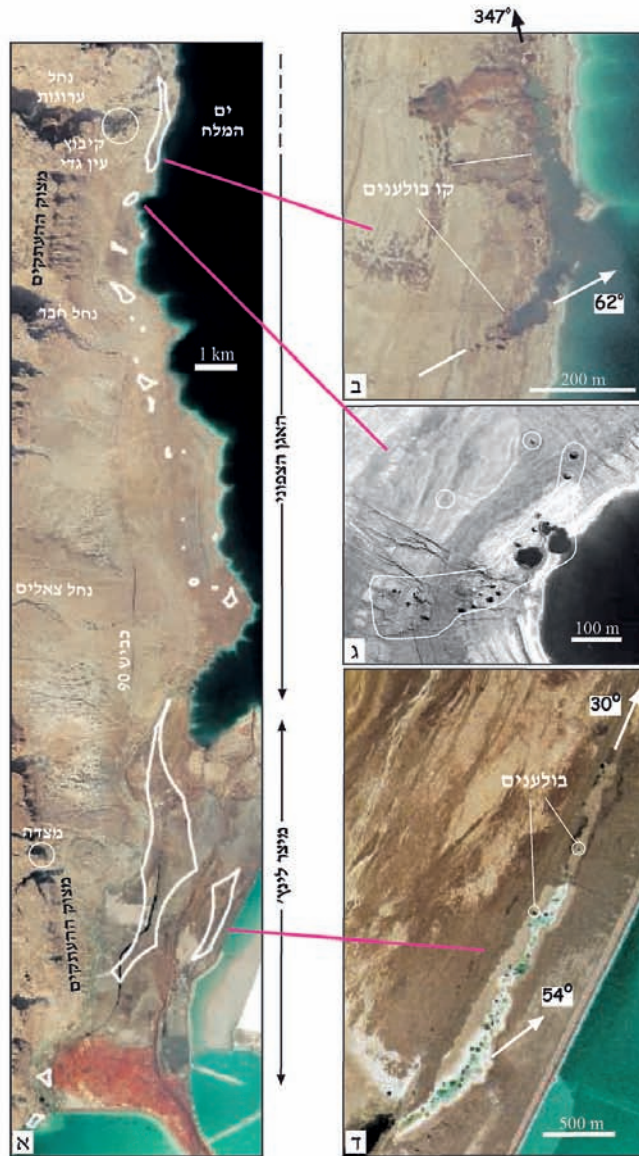
חקירת פני השטח באמצעות מחקרי שדה תופעת הבולענים נצפתה בחופי ים המלח ממזרח וממערב לאגם. בצד המזרחי, במדינת ירדן, נמצאים הבולענים רק בחלק הדרומי של ים המלח, באזור שממזרח למצרי לינץ' (איור 1). בצד המערבי נמצאו בולענים לאורך כל החוף מלבד החלק הצפוני ביותר (מצפון לעינות צוקים). מלבד שני אתרים (נווה זוהר ועין גדי), כל אתרי הבולענים מצויים ממזרח לכביש 90 (איור 2א). הרום הטופוגרפי המרבי שבו מצויים בולענים בצד המערבי הוא 382- מטר (אזור נחל חבר), כ-35 מטר מעל למפלס ים המלח הנוכחי.

אתרי הבולענים מצויים בשתי סביבות שונות: במישורי הבוץ שנחשפו עם ירידת מפלס הים ובמניפות הסחף של נחלי האזור (איור 2). מרבית אתרי הבולענים מצויים במישורי הבוץ, שהינם תוואי הנוף השולט בקרבת החוף. באופן כללי רב המשותף על הנבדל בתכונות הבולענים במישורי הבוץ ובמניפות הסחף. הממדים המרביים של הבולענים במניפות הסחף ובמישורי הבוץ דומים, אך בולענים רבים יותר מגיעים לגודלם המרבי בהשוואה לאלה שבמישורי הבוץ. במישורי הבוץ עומק הבולענים אינו עולה בדרך כלל על כחמישה מטרים. באתר סמר, שבו אותר בור חדש סמוך לזמן היווצרותו, נמדד עומק קרקעית של 10.80 מטר (רז, 2000). ייתכן שגם הבולענים האחרים היו עמוקים יותר בראשית התפתחותם והתמוטטות קירות הבוץ, בעלי היציבות הנמוכה, סתמה אותם עם הזמן. מכאן שאי־אפשר לקבוע כי באזורי הבוץ נוצרים בולענים רדודים בלבד. בולענים מעטים יחסית נצפים בחלקים הפעילים של מניפות הסחף (לדוגמה, באפיק נחל חבר). בסקרי שדה לא נמצא קשר נסיבתי בין זרימות מים על פני השטח ו/או עונות השנה לבין קצב היווצרות הבולענים או מיקומם. בכמה מקרים נוצרו סדקים ושקיעות מקומיות לפני הופעת בולענים, אך במקרים רבים אחרים לא היו סימנים מקדימים להופעתם. יתר על כן, ישנם מקומות שבהם נוצרו סדקים ושקיעות ולא נוצרו בולענים אפילו לאחר שנים



● אתרי בולענים

איור 1: מפת מיקום אתרי בולענים



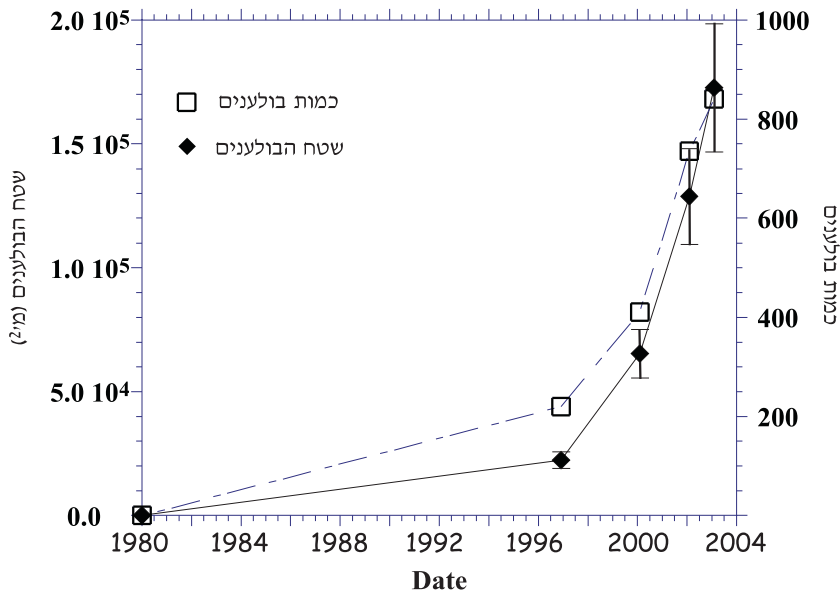
איור 2: תפוצת אתרי הבולענים לאורך חוף ים המלח על גבי תצלום אנכי מיושר משנת 2003  
 אזורי הבולענים מודגשים בקו לבן. כמו כן מופיעים צילומים מוגדלים של שלושה אתרים מיוחדים.

מספר. לאחר שנוצרים הבולענים, פני השטח בקרבתם עוברים דפורמציה מהירה שבאה לידי ביטוי ביצירת סדקים ושקיעות סביבם. בבולענים שבקרבת קו החוף מצויים מי תהום בעומק של מטר ועד כמה מטרים מפני השטח (איור 3). השונות הגדולה בהרכבים הכימיים של גופי המים בבולענים השונים מלמדת על קיום כמה גופי מים נפרדים, בעלי היסטוריה מורכבת של היווצרות. בחלק מהבולענים גרם תהליך איוד להשקעת מלח ממי התהום שבתחתיתם.



איור 3: תמונות של בולענים באתרים שונים  
 א. חוף מינרל; ב. חוף מינרל; ג. נחל חבר; ד. עין גדי; ה. עין גדי.

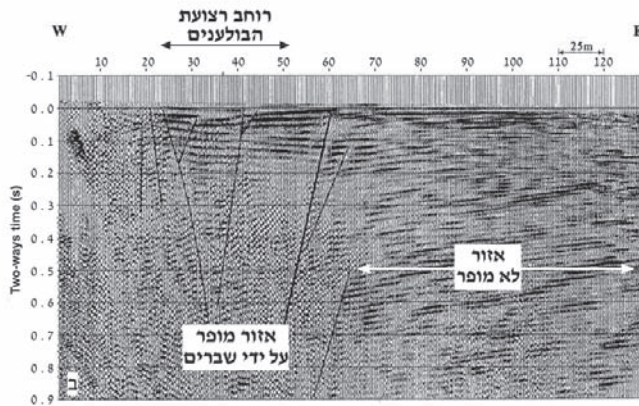
התפתחות הבולענים בזמן ובמרחב – ניתוח תוצאות בעזרת GIS המעקב אחר התפתחות הבולענים התאפשר על ידי בחינה חוזרת של תצלומי אוויר משנים שונות. במסגרת העבודה נבנה מערך מידע גאורפי (GIS) לריכוז ולניתוח של כל המידע שנאסף מפני השטח ובתת-הקרקע. הבולענים בחופי ים המלח התפתחו החל בשנות השמונים וממשיכים בכך עד היום (איור 4). מנתונים של תצלומי האוויר משנת 2003 עולה כי במהלך שנה זו התפתחו לאורך החוף המערבי של אגן ים המלח הצפוני יותר מ-200 בולענים. בשנת 2004 התפתחו כ-300 בולענים (איור 4). כלומר, בשנים האחרונות נצפית, מלבד הגידול במספר הבולענים, גם עלייה משמעותית בקצב התרבותם. בחינת הנתונים מעלה כי חלק ניכר מאתרי הבולענים מסודרים לאורך קטעים ישרים (רוז, 2000; אבלסון ואחרים, 2004; Abelson et al., 2003). כיווני הקטעים מקבילים בקירוב לכיוונים העיקריים של שברי השוליים של הבקע (איור 5). ברוב אתרי הבולענים הקויים מתפתחים בולענים חדשים



איור 4: קצב התפתחות הבולענים (מספר הבולענים המוכרים והשטח הכולל אותו הם תופסים). שטח הבולענים כולל בתוכו גם חלק מהאזורים שבין הבולענים הבודדים.



בהמשך הקטע הישר ו/או בין בולענים קיימים. רוב האתרים החדשים מופיעים ממזרח לקווים הקיימים, במקומות נמוכים יותר, כלפי הים הנסוג, ועוקבים אחר ירידת מפלס ים המלח.



איור 5: א. קו הבולענים בחוף מינרל על גבי תצלום אוויר מיולי 2001 אפשר להבחין שקו הבולענים הוא תת־מקביל להעתקים החשופים בפני השטח (רז, 2000). כמו כן מסומן מיקום חתך הרפלקציה הסייסמית שחצה את קו הבולענים (ציור תחתון).

ב. חתך רפלקציה החוצה את קו הבולענים בחוף מינרל האיור מציג את עוצמת הגלים שנקלטו כתלות בזמן מאז שודר האות. זמן זה משקף את עומק גבולות השכבות שהחזירו את הגלים. אפשר לעקוב אחר מהלך השכבות בתת־הקרקע ולהבחין בקווים תלולים שבהם נפסקת רציפות השכבות. מתחת לקו הבולענים נמצאו אי־רציפיות ברורות המיוחסות לקווי העתקה שאינם חשופים בפני השטח (כוסו במשקעים מאוחרים לזמן התנועה על ההעתק).



חקירת תת־הקרקע באמצעים גאופיזיים במהלך העבודה נעשה שימוש בכמה שיטות גאופיזיות, במטרה לקבל מידע על המבנה והתכונות של תת־הקרקע (שטיבלמן, 2004). **רפרקציה (שבירה) סייסמית** (ראו הסבר במלבן ההגדרות). בחתכי רפרקציה סייסמית נמצאו שתי שכבות עיקריות המאופיינות במהירויות סייסמיות שונות:

א. שכבה עליונה בעלת מהירות גלי לחיצה של עד 2,000–2,300 מטר/שנייה.  
 ב. שכבה תחתונה בעלת מהירות גלי לחיצה של כ־2,900 מטר/שנייה ויותר.  
 המהירות בשכבה העליונה מתאימה לזו של סדימנטים לא מלוכדים (בעיקר חלוקים וחרסית). זו של השכבה התחתונה מתאימה לחומר צפוף יותר, למשל מלח. על מנת לבסס את השימוש בסקרי רפרקציה ככלי לזיהוי ומיפוי שכבת המלח בתת־הקרקע, בוצעו קידוחים באתרים מספר, ואלה מצביעים על הימצאות שכבת מלח בתת־הקרקע.

**רפלקציה (החזרה) סייסמית** בהפרדה גבוהה. חתכים אלה אפשרו זיהוי של דפורמציות ואירציפויות בשיכוב (איור 5). כזכור, ישנן עדויות להתקבצות בולענים לאורכם של קטעים ישרים בפני השטח. לא ברור עד לאיזה עומק מגיעות ההפרעות, אך נראה כי לפחות בחלק מהמקומות שכבת המלח מושפעת מהן. קווי הפרעה יכולים לשמש מוליכים הידראוליים למים לא רוויים במלח, לעבר שכבת המלח.

מלבד זאת נבדקו כמה שיטות גאופיזיות לזיהוי חללים בתת־הקרקע, כגון **דיפרקציה, מיקרוסייסמיות, ומיקרוגרווימטריה** (ראו מלבן הגדרות). לחלק מהשיטות היו תוצאות יפות לכאורה, אך עדיין יש צורך בבדיקה מבוקרת של השיטות בעתיד.

זיהוי ישיר של חללים בתת־הקרקע העדות הישירה היחידה לקיומו של חלל בסלעים האלוביאליים באה מהתמוטטות בזמן הידוק תשתית שנעשה לצורכי ביסוס מבנה באתר בתי המלון בעין בוקק. המשקולת ששימשה להידוק חדרה פנימה ונותרה בתת־הקרקע. במהלך העבודה הנוכחית נמצאו עדויות חדי־משמעיות לקיומם של חללים בשכבת המלח. בקידוח בנחל חבר נמצא חלל בעומק 23–29 מטר במקום שכבת המלח, ובחוף מינרל נמצא חלל בעומק 28–33 מטר בחלק התחתון של

## הגדרות

### מונחים גאופיזיים

**רפרקציה (שבירה) סייסמית** – שיטה לקביעת עומק של שכבה ושל המהירות שבה עוברים בה גלים סייסמיים. בדרך כלל השכבות בעומק צפופות מאלה שמעליהן והגלים הסייסמיים נעים בהן מהר יותר. עקב כך הגלים נשברים בגבול בין השכבות. מדידת הזמן העובר מאז יציאת גל ממקור סייסמי (מכה בקרקע או פיצוץ), תנועתו בשכבה העליונה ובגבול שבין השכבות ויציאתו אל גאופונים (מעין מיקרופונים לגלים סייסמיים) בפני השטח מספקת נתונים על עומק השכבה, על מהירות הגלים בה, על צפיפותה ובעקיפין גם על הרכבה.

**רפלקציה (החזרה) סייסמית** – שיטה זו מבוססת על שידור גלים ממקור סייסמי הממוקם בפני השטח, על החזרתם משכבות בתת-הקרקע ועל קליטת ההדים של החזרות אלה על ידי גאופונים שנפרשו על פני הקרקע לאורך קו הרפלקציה. התוצאות מוצגות בדרך כלל כחתכים, כמו זה המוצג באיור 5ב', המציגים את העוצמות שנקלטו במיקרופונים כתלות בזמן (ציר Y) ובמרחק לאורך קו הרפלקציה (ציר X). כך ניתן לזהות שכבות והעתקים בתת-הקרקע.

**דיפרקציה במרחב תלת־ממדי (3D)** – שיטה סייסמית לזיהוי חללים שנוסחה בהצלחה באתר נחל חבר דרום ובאזור חוף מינרל. תוצאות הבדיקה מראות כי לשיטה יש פוטנציאל להפוך לכלי יעיל ואמין לזיהוי חללים תת-קרקעיים, אולם יש לבדוק אותה באתרים נוספים ובתנאים גאולוגיים שונים.

**מיקרוסייסמיות** – שיטה לזיהוי חללים באמצעות ניטור של פעילות סייסמית בתת-הקרקע בעוצמות חלשות. פעילות זו יכולה להיות קשורה, בין היתר, בקריסות של קרקע ושל סלע לתוך חללים תת-קרקעיים. ניתוח תוצאות ראשוניות בשני אתרים מראה כי המערכת מזהה אירועים סייסמיים הקשורים בפעילות כלשהי בקרבת הבולענים, אך בשלב זה אי-אפשר לקבוע בוודאות אם פעילות זו מתרחשת בעומק (קריסות בחללים בתוך ומעל שכבת המלח) או קרוב לפני השטח (קריסות בתוך בולענים פתוחים) או אפילו על פני השטח.

**מיקרוגרואימטריה** – מדידה מדויקת של שדה הכבידה של כדור הארץ. הרעיון המרכזי הוא שאזור שמתחת לו קיים חלל יהיה בעל כוח גרוויטציה נמוך יותר. סקרים ראשוניים מראים אנומליות שליליות באזורים מסוימים בחוף ים המלח. בשלב הנוכחי אין הוכחות לכך ששיטת המיקרוגרואימטריה הינה כלי אמין לזיהוי חללים לאורך חוף ים המלח.

### מונחים גאולוגיים

#### סלעים וסדימנטים

**סדימנט** – משקע לא מלוכד, כמו למשל חלוקים, חול, סילט וחרסית.

**סלע גיר** – סלע המורכב בעיקר מהמינרל קלציט, שהרכבו הכימי הוא  $\text{CaCO}_3$ . הסלע שוקע בדרך כלל בים.

**סלע דולומיט** – סלע המורכב בעיקר מהמינרל דולומיט, שהרכבו הכימי הוא  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ . גם הוא נוצר בדרך כלל בים.

**מלח** – סלע הבנוי ברובו מהמינרל הליט, שהרכבו הכימי הוא  $\text{NaCl}$ . המלח שוקע בדרך כלל באגנים מלוחים או בסבחות.

**סלעים אלוביאליים** – סלעים הבנויים בעיקר מחלוקים, חול או חרסיות ששקעו במערכת נחלית.

**תצורות וחבורות סלע** – יחידות סטרטיגרפיות בסיסיות בעלות הרכב אופייני של סלעים המובדלות מהיחידות שמעליהן ומתחתן על ידי גבולות ברי מופי. לדוגמה, חבורת יהודה מורכבת מסלעי גיר ודולומיט מגיל הקרטיקון העליון (70-90 מיליון שנה) ונבדלת מחבורת הר הצופים המונחת מעליה ובנויה בעיקר מקרטון וצור צעירים יותר.

**העתק טקטוני** – סדק בסלעי קרום כדור הארץ אשר לאורכו התרחשה תזווה בין שני הגושים שהוא מפריד. רעידות אדמה הן ביטוי לשחרור אנרגיה בזמן תנועה פתאומית ומהירה על משטח ההעתק.

### מונחים הידרולוגיים

**אקוויפר** – שכבה בתת-הקרקע, בעלת מוליכות הידראולית גבוהה, המסוגלת להעביר כמות משמעותית של מי תהום (לדוגמה שכבת חלוקים או חול).

**הפן הביני** – אזור מעבר בין מי ים למי תהום מתוקים. עומקו נקבע בעיקר לפי הפרש הצפיפות בין גופי המים השונים. מעל אזור המעבר זורמים מי תהום מתוקים לים, ומתחת לו חודרים מי ים לתוך האקוויפר. באזור ים המלח השיפוע של הפן הביני מתון הרבה יותר מזה שבשולי ים רגיל, כצפוי במערכת שבה הפרש הצפיפויות בין הגוף המלוח (מי ים המלח) למים המתוקים גדול פי כמה יותר מאשר באזור ים רגיל (צפיפות מי ים רגילים ומי ים המלח הן 1.025 ו-1.24, בהתאמה).

**יחסי יונים** – יחס בין ריכוזים של יונים שונים.

**איך משפיעה המסת מלח על יחסי יוני נתרן לכלור?** – מכיוון שהיחס ההתחלתי נמוך מאחד והמסת מלח מוסיפה מספר זהה של יוני נתרן וכלור, הרי היחס יעלה עם תהליך ההמסה. לדוגמה, אם לפני ההמסה הכילו המים 30 יחידות של יוני נתרן ו-100 יחידות של יוני כלור (יחס 0.3), הרי שהמסת 50 יחידות מלח תוסיף 50 יונים מכל סוג ותביא ליחס של 80:150, או 0.52.

**עומד הידראולי** – הלחץ של מי תהום מעל נקודת ייחוס מסוימת (בדרך כלל מעל מפלס הים). העומד הוא ביטוי לגובה עמודת מי התהום או לגובה הפוטנציאלי שאליו היו מי התהום עולים לו היו חופשיים לנוע.

**גרדיאנט (מפל) הידראולי** – הפרש בין העומדים ההידראוליים בשני קידוחים מחולק במרחק ביניהם. מי התהום זורמים מעומד הידראולי גבוה לעומד נמוך.

**מחתור (piping)** – תופעה של הסעת סדימנטים על ידי מים כתוצאה מגרדיאנט הידראולי גבוה. תופעה זו גורמת במקרים רבים להתמוטטות סכרים.

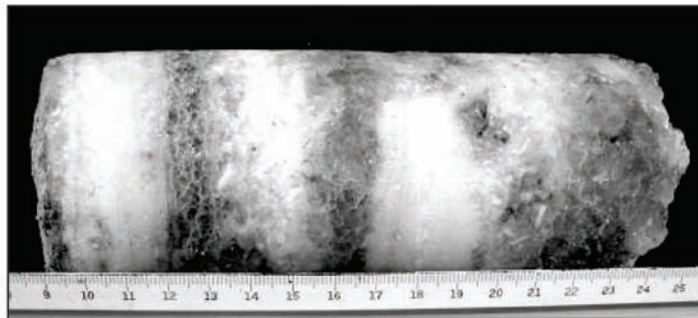
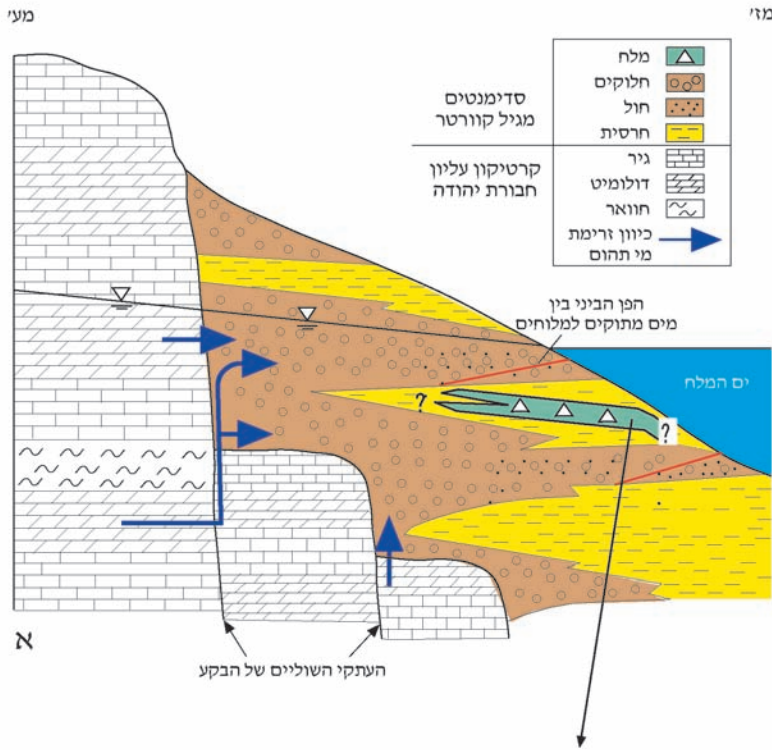
שכבת המלח. קוטר החלל בקידוח מינרל 2 משתנה בעומקו ומגיע ליותר מ-1.4 מטרים. מצילומים שנעשו על ידי החדרת מצלמת וידאו לחור הקידוח נראה שלפחות חלק מקיר החלל בנוי ממלח גס גביש.

### הידרוגאולוגיה של חוף ים המלח בהקשר לתופעת הבולענים

אזור העבודה נמצא בבקע ים המלח, שהינו חלק ממערכת שבירה הנמשכת מתורכיה וסוריה עד לים סוף (ראו מאמרו של גרפונקל בחוברת זו). צדו המערבי של אגן ים המלח מוגבל על ידי כמה שברים נורמליים. שברים אלה מעמידים סלעי גיר ודולומיט עתיקים של **חבורת יהודה** אל מול סלעים נחליים-אגמיים צעירים (איור 6). הסלעים הצעירים שייכים לכמה **תצורות**, שהעליונות שבהן הן תצורת הלשון, ששקעה בתקופה שבין 70,000 ל-15,000 שנה לפני ימינו, ומעליה תצורת צאלים מגיל ההולוקן (פחות מ-10,000 שנה). שתי תצורות אלה בנויות מחילופין של משקעים נחליים (**אלוביאליים** – חרסית, סילט וחלוקים) ומשקעים אגמיים (מלח, גבס וארגוניט).

באזור ים המלח מוכרים שני **אקוויפרים** עיקריים: אקוויפר חבורת יהודה והאקוויפר האלוביאלי. האקוויפר האלוביאלי מופרד מהאקוויפר של חבורת יהודה, שמערב לבקע, על ידי סדרת העתקים של שולי הבקע. מקורם של עיקר המים באקוויפר האלוביאלי הוא במי גשמים היורדים באזור ההר, זורמים באקוויפר חבורת יהודה ומתנקזים דרך מערכת השבירה של הבקע. מקור נוסף הוא מי שיטפונות המחלחלים באופן ישיר מקרקעית הנחלים לתת-הקרקע. החילופין באקוויפר האלוביאלי בין סדימנטים דקי גרגר (סילט וחרסית) וגסי גרגר (חלוקים) יוצרים כמה תת-אקוויפרים השונים בהרכבם הכימי, במפלסם ולעתים גם בטמפרטורת המים שלהם. באופן כללי משתנה מליחות המים באקוויפר בין מים מתוקים בקרבת מצוק ההעתקים למים מלוחים מאוד (במליחות מי ים המלח) בקרבת חוף הים. מי ים המלח נמצאים כיום במצב של רוויה **להליט** (מינרל הבנוי מנתרן כלורי, מלח בישול) ואין באפשרותם להמיס עוד מלח.

אזור חוף ים המלח היה מוצף על ידי אגמים מלוחים במשך חלק גדול מעשרות אלפי השנים האחרונות. התמלחת מהאגמים חדרה גם אל הסלעים והסדימנטים שמתחת לקרקעיתו. מאז תחילת נסיגת האגם, לפני כ-14,000 שנה,

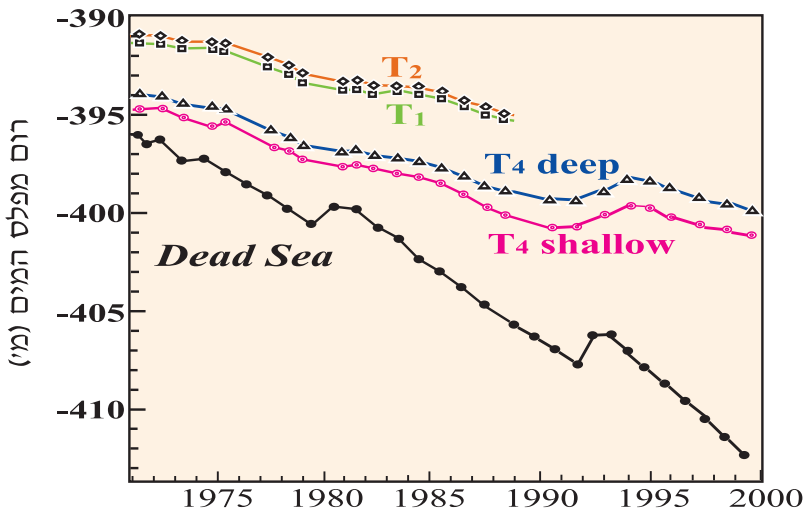


ב

איור 6: א. חתך הידרוגאולוגי סכמטי ממערב לים המלח החצים הכחולים מציינים זרימה משוערת של מי תהום מאקוויפר חברת יהודה לעבר השכבות הצעירות של מילוי הבקע.  
 ב. תמונה של גלעין מלח מקדוח בחוף מינרל הגלעין, שנקדח על ידי מקדח צינורי, שוכב על צדו ומראה חילופין של שכבות שונות.

החל תהליך של שטיפה על ידי מי תהום מתוקים שמקורם בהרים ממערב. לכן, באזור המערבי אין כיום עדות לתמלחות, ואילו באזור המזרחי נמצאות עדיין תמלחות מרוכזות (סטרינסקי, 2005).

מפלס ים המלח ירד בשלושים השנים האחרונות בשיעור של כ-20 מטר (איור 7), ובשנים האחרונות הוא יורד בקצב של כמטר בשנה. ירידה זו היא תוצאה של מאזן המים השלילי של האגם בעקבות שאיבות המים המוגברות במעלה הזרימה על ידי ישראל וירדן, לצורכי השקיה ושתייה, ועקב שימוש במי ים המלח על ידי מפעלי האשלג של שתי המדינות. בעקבות ירידת מפלס הים יורד כצפוי גם המפלס הרגיונלי של מי התהום. ירידת מפלס הים מלווה בנסיגת קו החוף כלפי מרכז האגן, כאשר השיעור האופקי של נסיגת החוף גדול יותר בחופים שבהם המדרון מתון. תהליך זה גורם להסתת **הפן הביני** מזרחה ולהורדתו לאופקים נמוכים יותר, ובכך להבאת מים לא רוויים במלח במגע עם שכבות מלח.



איור 7: ירידת מפלס ים המלח (קו שחור) ומפלסי מי התהום במספר קידוחים בקרבת הים (קווים צבעוניים)

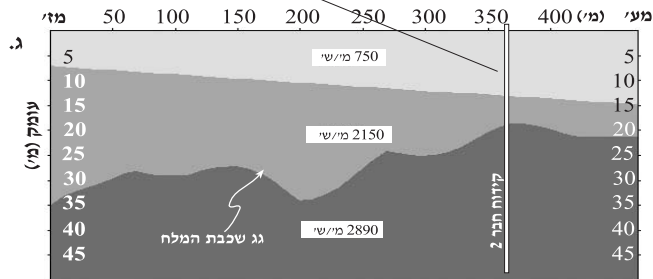
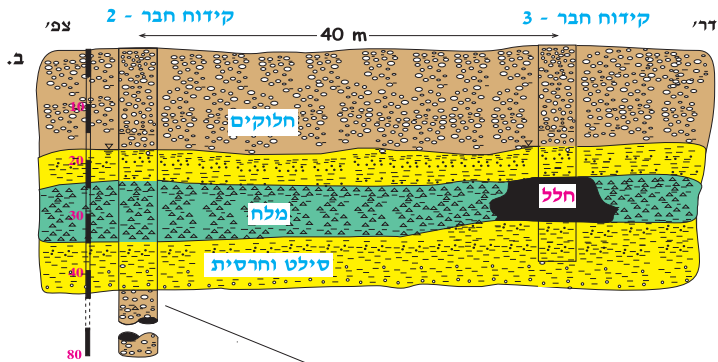
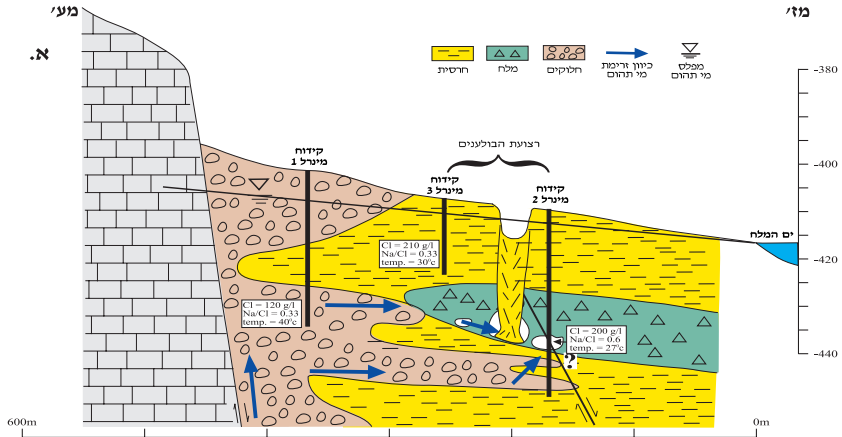
הקידוחים נמצאים באזור מעיינות סמר (טורייבה בשמם הקודם), בתוך האקוויפר האלוביאלי ובעומק של עד 50 מטר. מי התהום בקידוחים אלה הינם מתוקים יחסית ומרחק הקידוחים מהים הוא כחצי קילומטר. אפשר לראות כי מפלס מי התהום יורד בהתאמה למפלס ים המלח, אם כי בקצב אטי יותר.

עדויות הידרוגאולוגיות של אזורים נבחרים – עין גדי וחוף מינרל קידוחים שנעשו בשכבת המלח באזור עין גדי מראים שינויי עובי ניכרים במרחקים קצרים. כך לדוגמה בקידוח אחד עובי שכבת המלח הוא כ-20 מטר, ואילו בקידוח שני (הנמצא במרחק של כ-100 מטר ממנו) עובי שכבת המלח הוא שני מטרים. בחוף מינרל נמצאה שכבת המלח בעומק 19-33.5 מטר ובתוכה נמצא חלל (איור 8). ההרכב הכימי של המים בתוך החלל מלמד בבירור שהם המיסו מלח (יחס יוניים של Na/Cl של 0.58-0.50 לעומת 0.25 בים המלח או 0.35 ברוב התמלחות באזור, ראו הסבר במלבן ההגדרות).

המערכת ההידרולוגית באזור עין גדי (נחל ערוגות) ובחוף מינרל מתאפיינת בהבדל משמעותי בעומדים ההידראוליים של תת־האקוויפרים השונים, כאשר העומד בתת־האקוויפר התחתון הינו גבוה יותר. כלומר, למים בתת־האקוויפר התחתון יש פוטנציאל לעלות לשכבות עליונות יותר במידה שקיימת אפשרות הידראולית לכך. מעבר מים בין שכבתי כלפי מעלה יכול להתרחש דרך קו העתק או קווי סידוק.

הנתונים ההידרולוגיים והכימיים באזור עין גדי מצביעים בבירור על קיומם של התנאים הנדרשים להמסת שכבת מלח על ידי מי תהום בתת־הקרקע. ייתכן שמי התהום שהמסו את המלח ממשיכים לזרום לכיוון ים המלח ויוצאים שם בקרקעית הים, במידה שהלחצים ההידראוליים מאפשרים זאת. תהליך כזה יכול ליצור בולענים גם בקרקעית הרדודה של הים עצמו, כפי שאכן נצפה במקומות מספר, כגון באתר ישע (קרוב לקיבוץ עין גדי). באתר ישע נמצאו בולענים שעומקם כשישה מטרים. במקומות שבהם ישנה חסימה הידרולוגית ולא מתאפשרת זרימה אל הים, אפשרות סבירה יותר היא שמי התהום עולים דרך סדקים אל תת־האקוויפר העליון ומשם מתנקזים לכיוון ים המלח. ייתכן גם שחלק ממי התהום המתוקים מגיע למגע עם שכבת המלח בזרימה אופקית ממערב. זרימה כזו יכולה להתבצע דרך אופקי חלוקים המתאצבעים ישירות עם שכבת מלח או במקומות שבהם שכבת החרסית דקה במיוחד – כל זאת בגבול המערבי של שכבת המלח.



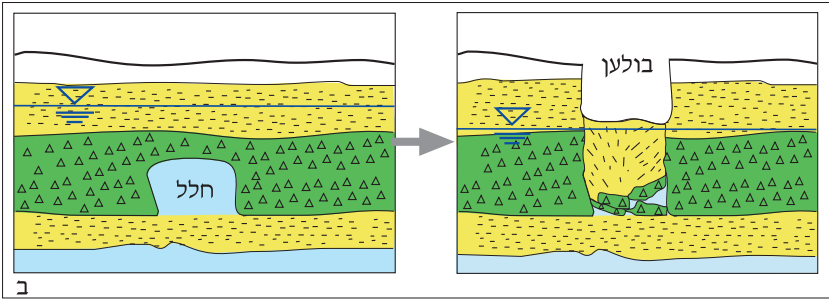
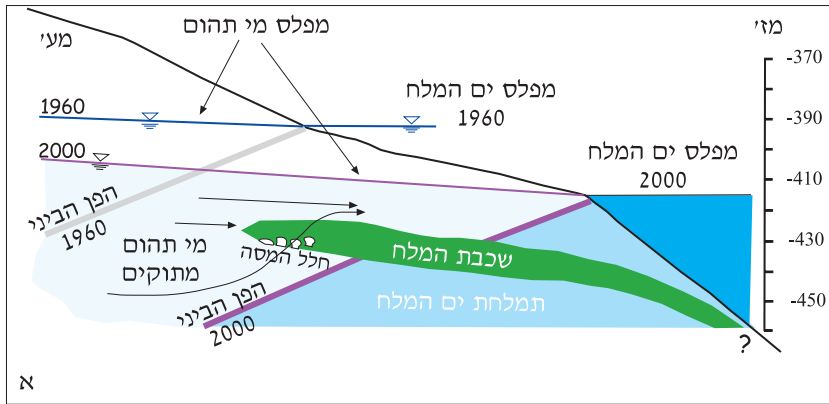


## מנגנון היווצרות הבולענים בהתייחס לממצאים

מנגנון היווצרות הבולענים קשור לירידת המפלס הדרסטית של ים המלח (ארקין ומיכאלי, 1995; וקס ואחרים, 2000). כתוצאה מירידה זו יורד גם מפלס מי התהום וחל שינוי במיקום הפנ הביני (איור 9), הגורמים למגע בין שכבת המלח למי תהום שאינם רוויים להליט. המלח מומס ונוצרים חללים בתת-הקרקע עד לשלב שבו תקרת החלל קורסת, השכבות הבלתי מלוכדות מלמעלה נופלות פנימה ונוצר בולען בפני השטח. הסבר זה מלמד כי שכבת המלח היא הגורם הראשון החייב להתקיים בשטח כדי שייווצרו בולענים. להלן סיכום העדויות העיקריות לקשר שבין שכבת המלח והיווצרות בולענים:

1. שכבת מלח נמצאה בכל קידוח שנקדח בקרבת בולענים (נווה זוהר, עין בוקק, נחל חבר, עין גדי, חוף מינרל). שכבת מלח נמצאה בעומק של כ־20 עד 60 מטר.
2. בקידוח בחוף מינרל נמצא חלל של כחמישה מטרים בתוך שכבת המלח ובתוכו מים שהרכבם הכימי מעיד כי המיסו מלח. גם בקידוח בנחל חבר נמצא חלל במקום שכבת המלח, וזאת בסמיכות לקידוח שחדר לשכבת מלח ללא חללים.
3. בקידוח באזור עין גדי נמצאו מתחת לשכבת המלח מים תת־רוויים למלח. המים הללו היו בעלי עומד הידראולי גבוה יותר מאשר השכבות שמעליהן, דבר המעיד על יכולתם להגיע אל תוך שכבת המלח ולהמיסה.

- איור 8: א. חתך הידרוגאולוגי סכמטי בכיוון כללי מזרח-מערב בחוף מינרל, המציג את עיקרי הממצאים מקידוחים באזור בקידוח מינרל 2 נמצא חלל בתחתית שכבת המלח ובו מי תהום שהרכבם הכימי מעיד על המסת מלח (ראה מסגרת). לפי הנתונים של מערך קידוחים זה אפשר לראות כי קו הבולענים נמצא בגבול השתרעות שכבת המלח.
- ב. חתך גאולוגי סכמטי בנחל חבר בקידוח חבר 2 נמצאה שכבת מלח בעובי של 11 מטר בין שתי שכבות דקות גרגר (סילט וחרסית). בקידוח חבר 3 נמצא חלל בעומק דומה, עובדה המהווה עדות ברורה לכך שתהליך המסת מלח הינו הגורם העיקרי להיווצרות בולענים.
- ג. חתך רפרקציה סייסמית באתר הבולענים של חבר דרום מיקום גג השכבה בעלת המהירות הגבוהה (2,890 מ'/'ש) מתאים לעומק גג שכבת המלח בקידוח. כדאי לציין כי אי־אפשר למצוא בשיטה זו את תחתית שכבת המלח ולכן אין להתייחס לעובי השכבה המתקבל כאן.



- איור 9: מנגנון היווצרות הבולענים
- א. ירידת מפלס ים המלח גורמת לירידה ולנסיגה מזרחה של מי התמלחת בתת-הקרקע (המפלסים משנת 1960 מוצגים לצורך השוואתם עם מפלסי שנת 2000). כאשר הפן הביני בין מי התמלחת למי התהום התת-קרויים חוצה את שכבת המלח, מתחילות המסה ויצירת חללים בשכבה זו.
  - ב. תהליך ההמסה ממשיך והחלל הולך וגדל עד לערעור יציבותו. בשלב מסוים מתפתח כשל בתקרת שכבת מלח, השכבות הבלתי מלוכדות מעל מתמוטטות לתוך החלל ונוצר בולען בפני השטח. המשולש הכחול והקו שמתחתיו מייצגים את מפלס מי התהום.
4. בקידוח בחוף קליה לא נמצאה שכבת מלח כלל. ואכן, אין באזור זה בולענים. כלומר, אין התפתחות בולענים כאשר לא קיימת שכבת מלח משמעותית בקרבת החוף.

על מנת להבין את התופעה המורכבת של הבולענים באזור ים המלח יש לדון בהיבטים נוספים. על סמך התצפיות מהקידוחים, נראה כי המים התת-קרויים

מגיעים מתת־אקוויפר שמתחת לשכבת המלח. באופן כזה מתחילה ההמסה בחלק התחתון של שכבת המלח. קצב יצירת החללים תלוי במספר גורמים, כגון קצב ההמסה ועובי שכבת המלח (Shalev et al., 2006). גודל החלל וקצב התפתחות הבולענים תלויים גם בתכונות המכניות של שכבת המלח ושל השכבות האלוביאליות שמעליה. בשלב הראשוני החלל גדל, אבל החלק העליון של שכבת המלח משמש תקרה יציבה ולכן אין התפתחות בולענים בפני השטח. רק לאחר המסת חלק ניכר של שכבת המלח יקרוס החלק הבלתי מלוכד מעל לחלל וייווצרו בולענים בפני השטח (איור 9). במקומות מסוימים ייתכן שייווצרו תקרות זמניות באלוביום (חומר הסחף שבמניפות שפכי הנחלים), בהתאם לתכונותיו (למשל דרגת הליכוד של החלוקים, אחוז המרכיבים הדקים ועוד). חשוב לציין כי תהליך ההמסה של שכבת המלח מלמטה כלפי מעלה הוא שייצור באופן פתאומי בולענים גדולים, מפני ששכבת המלח יכולה להחזיק תקרה יציבה יחסית מעל חלל גדול עד להמסת חלק ניכר ממנה ורק אז יתמוטטו השכבות הפחות יציבות מעליה. המסה הדרגתית מלמעלה של שכבת המלח יכולה לגרום לשקיעות ולבולענים קטנים בלבד מפני שאינה יוצרת חלל יממתיך גדול מספיק.

הופעת הבולענים לאורך קווים ברוב האתרים קשורה לקיום שברים וסדקים בתת־הקרקע, שמקורם בשדות המאמצים הטקטוניים הפועלים באזור. הנחה זו מתחזקת במיוחד לאור התצפיות הבאות:

1. קיים דמיון סטטיסטי בין כיווני קווי הבולענים וכיוון העתקי ים המלח.
2. מתחת לקווי הבולענים מזהות אי־רציפויות בחתכי הרפלקציה הסייסמית המפורשים כהעתקים. אי־רציפויות אלה מגיעות לעומק של מאות מטרים. על פי החתכים הסייסמיים, המרחקים בין השברים הם כמה עשרות מטרים וחלקם מגיע עד לקרבת פני השטח.
3. בדרך כלל הכיוונים של קווי הבולענים אינם מקבילים לקווי חוף קדומים או לקווי זרימה עילית אלא חוצים אותם.

הקשר בין יצירת הבולענים והעתקים טקטוניים מוסבר על ידי זרימה חופשית יותר של מי תהום תת־רוויים מהתת־אקוויפר התחתון דרך ההעתקים הסודקים את שכבת הסילט־חרסית שבתחתית שכבת המלח. שכבת הסילט־חרסית הנצפית בקידוחים אטימה יחסית לזרימת מי תהום. עם זאת, העתקים/סדקים יוצרים

אזורי חולשה שבהם המוליכות ההידראולית היא גבוהה יחסית. לפיכך ההמסה נעשית לאורך קווי שבירה המכתיבים את כיוון קווי הבולענים באתר נתון.

### השתרעות שכבת המלח בתת-הקרקע

שני גורמים עיקריים קובעים את השתרעות שכבת המלח:

1. גבולות האגם הקדום שממנו שקעה השכבה, לפני כ-10,000 שנה.
2. האזורים שבהם השכבה הומסה, במלואה או בחלקה, בטרם כוסתה על ידי סדימנטים צעירים יותר או הוסרה בתהליכי בליה.

קביעת גבולה המערבי של שכבת המלח היא משימה מורכבת הנעשית בעיקר בעזרת קידוחים וחתכי רפרקציה סייסמית. אולם אפשר לנסות לקבוע את ההשתרעות המרבית של שכבת המלח לכיוון מערב על ידי שחזור גובה מפלס הים הקדום שממנו היא שקעה. צפוי כי הגבולות האמיתיים מצומצמים יותר, בגין תהליכי המסה והסרה מוקדמים שאותם קשה להעריך.

כאמור, עובי שכבת המלח משתנה על פני מרחקים קצרים. אי-האחידות של תפוצת המלח צפויה, בהתחשב בכך שמדובר במשקע כימי השוקע ממי האגם ומצפה שוליים תלולים המופרעים על ידי ערוצים עמוקים. השתרעותה של שכבת המלח לאורך חוף ים המלח לכיוון צפון מסתיימת כנראה בשמורת עיינות צוקים. באזור זה לא נמצאה שכבת מלח בקידוחים. בהתאם לכך גם לא אותרו בולענים מצפון לשמורה. ראוי לציין כי האזור הצפוני נתון תחת השפעת כמויות גדולות יותר של מי תהום מתוקים שאולי מנעו שקיעת מלח או שהמלח ששקע שם הומס בטרם נצבר מעליו חתך אלוביאלי משמעותי. סביר להניח כי גם זרימות של מי הירדן בעבר גרמו לכך שמי ים המלח באזור זה היו פחות מלוחים.

### זמן היווצרות החללים

נתוני העבודה הנוכחית מראים כי הירידה העכשווית במפלס ים המלח יוצרת את התנאים הנדרשים להמסת שכבת המלח, ליצירת החללים ולהתמוטטות תקרתם. אין להוציא מכלל אפשרות שתהליכים דומים התרחשו בעבר וכי חלק מהחללים נוצרו בפזה עתיקה יותר של ירידת מפלס דרסטית, אך הסבירות של הסבר זה נמוכה יותר. קצב השינויים הטבעיים אטי הרבה יותר מהתהליך הנוכחי

ולכן צפוי שתהליכי העבר, אם אכן התרחשו, התאזנו ומיצו את עצמם. במצב הטבעי ירד מפלס הים בגלל שינוי אקלימי, ולכן הייתה ירידה גם בשפיעת מי התהום הזורמים לים המלח ובהמסת המלח. במצב הנוכחי, שבו ירידת מפלס הים מלאכותית, אין ירידה בכמות מי התהום הזורמת לים והמלח מומס. בכל מקרה, גם אם נוצרו חללים בעבר, סביר להניח כי תקרתם כבר התמוטטה ורוב הבולענים שנוצרו נהרסו בתהליכי בליה באלפי השנים האחרונות. לכן יצירת הבולענים כיום והאצתה בשנות השמונים אינן קשורות לחללים עתיקים. במקומות רבים אחרים בעולם תהליך ההמסה הוא אטי יותר (למשל במקרה של המסת סלעי גיר ודולומיט), ולכן יצירת החללים יכולה להימשך אלפי שנים. במקרים כאלה הבולענים נוצרים מעל חללים שהתהוו לפני שנים רבות ורק השלב הסופי של הקריסה הוא מהיר, כתוצאה משינוי בתנאים הידרולוגיים מקומיים. כאמור, באזור ים המלח שלב ההמסה צפוי גם הוא להיות מהיר. ואכן, ניסיונות מעבדה הראו כי קצב המסת מלח מהיר מאוד ולכן אינו גורם המגביל יצירת חללים כאשר יש בסביבה מי תהום במליחות נמוכה יחסית לים המלח.

#### החוף שממערב לברכות האידוי של מפעלי ים המלח

אזור ברכות האידוי של מפעלי ים המלח דורש התייחסות מיוחדת בתוך המכלול הקשור לירידת מפלס ים המלח. ברכות אלה נמצאות מדרום ללשון, במרחק של כ-10 קילומטרים מהאגן הצפוני, בשטח החופף את האגן הדרומי של ים המלח המקורי ואשר התייבש בגין ירידת המפלס. פני המים בברכות האידוי גבוהים כיום בכ-25 מטר מפני המים באגן הצפוני, ומפלסן מועלה באופן מלאכותי על ידי מפעלי ים המלח בקצב של כ-20 סנטימטר בשנה.

לגבי מנגנון ההיווצרות של הבולענים באזור שממערב לברכות חשוב לציין את העובדות הבאות:

1. פעילות יצירת בולענים באזור זה נמוכה בכמה סדרי גודל מאשר בחוף ים המלח עצמו (בולען אחד לשנה בממוצע באגן הדרומי לעומת יותר מ-300 באגן הצפוני).
2. רוב הבולענים נוצרו לפני כ-10-15 שנה.
3. לפני שנות השבעים היה האגן הדרומי חלק מגוף המים העיקרי של ים המלח ואז מפלס המים שבו ירד בהתאם לירידת המפלס הכללית של ים המלח.

4. בכל הקידוחים שנעשו בקרבת בולענים נמצאה שכבת מלח בעובי של מעל 20 מטר.
5. בקידוח בעין בוקק ישנה עדות גאוכימית להמסת מלח.
6. ישנם באזור זה כמה תת-אקוויפרים שחלקם קשור אולי לים המלח עצמו.

על פי נתונים אלה סביר להניח כי הבולענים שממערב לברכות נוצרו בעיקרם במנגנון דומה לזה המתקיים בשאר האתרים. קצב הפעילות הנמוך של היווצרות בולענים באזור זה הינו תוצאה של עליית המפלס ולכן עומד בהתאמה עם מנגנון ההיווצרות הכללי המוצג כאן. כאמור, מפלס הבריכות ירד בעבר וייתכן שיצירת הבולענים היא תגובה מאוחרת לירידה זו. ייתכן גם ששכבת המלח מומסת על ידי מי תהום בתת-אקוויפר תחתון המושפעים מירידת מפלס ים המלח. כל האמור לעיל אינו סותר באופן מוחלט את האפשרות שבאזור זה פועל מנגנון משני, נוסף על מנגנון ההמסה. בעניין זה כדאי לציין את מנגנון ה**מַחְתוּר** (piping) שהציעו החוקרים הראשונים של תופעת הבולענים (ארקין ומיכאלי, 1995), אולם לא נמצאו עדיין עדויות שיתמכו במנגנון זה. באזור זה טרם נערך מחקר מפורט וחסר מידע היכול להאיר את העניין.

### תחזיות לעתיד

בהסתמך על ממצאי העבודה אפשר לקבוע באופן חד-משמעי כי תופעת הבולענים בחוף המערבי של ים המלח לא רק שאיננה דועכת אלא נמצאת בתהליך של האצה. הבולענים החדשים נוספים באתרים קיימים וגם באתרי בולענים חדשים. לא ברור לגמרי עד מתי תימשך האצה והיכן ייווצרו אתרי בולענים בעתיד.

באופן כללי קיים קשר בין גבול השתרעות שכבת המלח לבין מיקום הבולענים. באתרים עין גדי, נווה זוהר וחוף מינרל הבולענים ממוקמים בגבול זה, וכפי שהוזכר נוצרים אתרי הבולענים במקומות רבים מעל העתקים סמויים. הנתונים הללו מורים שאתרי בולענים נוצרים מעל ההעתק הראשון המערבי ביותר החותך את שכבת המלח. לפיכך קיימת אפשרות שכבת המלח משתרעת ממערב לקו ההעתק, קרי ממערב גם לקו הבולענים. במקרה כזה המשך



כניסת המים המתוקים ודחיקת הפן הביני עלולים לגרום להיווצרות בולענים בשלב מאוחר יותר גם מעט ממערב לקו בולענים קיים (במקום שבו הסידוק פחות טוב או שהמוליכות ההידראולית נמוכה יותר מאשר במקום בו הופיעו הבולענים לראשונה). בכל אופן, עד היום לא נוצרו בולענים ממערב לקו קיים ולכן הסיכוי לכך נמוך, יחסית. לכאורה סכנת היווצרות בולענים קטנה ככל שמתקרבים לים, וזאת בהנחה שלשם מגיעים פחות מי תהום מתוקים אשר מקורם בהרים שממערב. בפועל המצב שונה וחלק לא מבוטל מהאתרים מצוי סמוך לקו החוף דווקא. כלומר, גם קרוב לחוף יש מספיק מי תהום מתוקים שיכולים להמיס את המלח. ייתכן שבעתיד הרחוק יותר המצב ישתנה וייווצרו פחות בולענים בקרבת קו החוף.

מפלס ים המלח צפוי להמשיך ולרדת בקצב של כמטר בשנה גם בשנים הבאות. סביר להניח כי ירידת המפלס תואט בגלל הירידה הצפויה בקצב האידוי עקב ירידת פני שטח האגם והעלייה במליחות מימיו. אולם, אם לא יחול שינוי בשימושי המים באזור, הים ימשיך לרדת לפחות עד לרום של מתחת ל-500 מטר (גבריאל וביין, 2005). ירידת מפלס כזו תגרום לירידת מפלס ניכרת של מי תהום. במקומות מסוימים תביא ירידת המפלס למצב שבו שכבת המלח תימצא מעל מפלס מי התהום ואז סכנת ההמסה תקטן (איור 10).

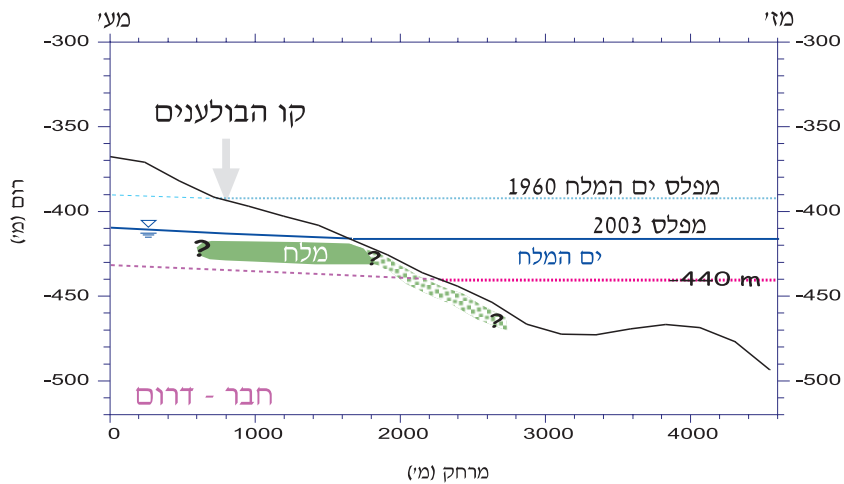
אפשר להציע דרכים מספר להתמודד עם הבעיה הקשה של חיים בצל התפתחות הבולענים בחוף ים המלח. הדרך הפשוטה ביותר היא להתרחק מהאזורים המוגדרים כבעלי סיכון רב במפות המכון הגאולוגי (פוטנציאל היווצרות בולענים גדול). אולם פתרון זה מוציא חלק ניכר מחוף הים אל מחוץ לתחום עבור תושבי המקום ומבקרים. הרעיון של תעלת הימים ('מובל השלום') עשוי להיות פתרון, לפחות חלקי, בעבור אזורים רבים: אזורי הבולענים יכוסו בגלל עליית מפלס הים וכך תיפתר הבעיה של בולענים בקרבת חוף הים. לגבי אזורים מרוחקים יותר, שלא יכוסו, צפוי שתהיה דחיקה מערבה של הפן הביני וכך יחזרו מים מלוחים למגע עם שכבת המלח במקומות שבהם הם היו לפני כמה עשרות שנים. עם זאת, ביצוע 'מובל השלום' כרוך במגוון שינויים סביבתיים אחרים, חלקם שליליים, העשויים להאפיל על בעיית הבולענים. נושא זה נבדק כעת על כל היבטיו.

ייתכן שישנם אמצעים נוספים אשר אפשר להשתמש בהם באופן מקומי באזורים בעלי חשיבות. אחת האפשרויות היא שאיבה של מי תהום מתוקים

לפני הגעתם לאזור הבולענים, על מנת לרסן את ההמסה. החדרה של תמלחת לאזור בולענים יכולה לגרום גם היא לריסון ההמסה. אמצעים אלה מורכבים ויקרים ואי-אפשר לבצעם ללא ניסיון מקדים בשטח. בכל מקרה הם עלולים לגרום בעיות אחרות, לא צפויות, ולכן יש לחשוב היטב לפני שנוקטים צעדים כאלה.

באזורים חיוניים אפשר לנקוט אמצעים הנדסיים מיוחדים כדי לקיים פעילות הכרחית. ראוי להדגיש כי לצורכי תכנון הנדסי מפורט יש צורך בבדיקות נוספות לטובת חידוד מיפוי גבולות שכבת המלח באזורים המועדים וללימוד התכונות ההנדסיות של הסלעים באתר הנתון.

חשוב להמשיך ולחקור את התהליכים הקובעים את קצב היווצרות הבולענים. התהליכים העיקריים הם קצב תנועת מי התהום, המושפע מהתנאים ההידרולוגיים המיוחדים באזור, וקצב המסת המלח על ידי תמיסות במליחות שונות. בדיקה ראשונית הראתה כי תהליך המסת המלח אפילו על ידי מים מלוחים יחסית



איור 10: התקדמות התהליכים בעתיד מוצגת על גבי חתך טופוגרפי/בתימטרי ניצב לים המלח

ירידה עתידית במפלס ים המלח לרום של -440 מטר (הקו האדום המקווקו) תביא לירידה מתאימה במפלס מי התהום שירד אל מתחת לשכבת המלח. השכבה תימצא באזור הלא רווי (שבו החללים בין הגרגרים אינם מלאים במי התהום), ואז ייפסק תהליך ההמסה.

(מחצית ממליחות מי ים המלח) הינו מהיר מאוד. קצב תנועת מי התהום והתהליכים ההידרולוגיים הקשורים אליו צריך להיחקר על ידי מדידות בשדה ובעזרת מודלים הידרוגאולוגים ממוחשבים. הדמיות שייעשו במודלים אלה יעזרו בחיזוי קצב התהליכים בהמשך ובמיקום המסת מלח עתידית. המודלים הממוחשבים יוכלו לשמש גם להערכה של יעילות תהליכי הריסון.

## תודות

תודה לדני וקס ולעמוס ביין על היותם שותפים בשלבים השונים של העבודה, לאנשי המכון הגאולוגי, ובמיוחד לחיים חמו על העזרה בקידוחים, בדיגום ובכל השאר, לאלי רז מקיבוץ עין גדי ולאבי רותם וליובל גולדמן ממועצה אזורית תמר על שיתוף הפעולה בשדה ובמשרד, לוולדימיר שטיבלמן על התרומה הגדולה בתחום הגאופיזי.

## מקורות וקריאה נוספת

אבלסון, מ' ואחרים, 2004. סיווג ומיפוי אזורי היתכנות להיווצרות בולענים (בורות) לאורך חוף ים המלח. דוח המכון הגאולוגי GSI/13/2004  
 ארקין, י' ומיכאלי, ל', 1995. בורות במניפת הסחף של נחל ערוגות. דוח המכון הגאולוגי TRGSI/7/95  
 גבריאל, א' וביין, ע', 2005. 'מאזן המים של ים המלח: תמונת מצב, תהליכים ומגמות'. מלח הארץ, 1, עמ' 53-69  
 וקס, ד' ואחרים, 2000. היווצרות בורות לאורך חוף ים המלח – סיכום ממצאי השלב הראשון של המחקר. דוח המכון הגאולוגי GSI/41/2000  
 יחיאלי, י' ואחרים. היווצרות הבולענים (בורות) לאורך חוף ים המלח; הממצאים, מנגנון היצירה וצפי לעתיד – סיכום ממצאי השלב השני של המחקר. דוח המכון הגאולוגי GSI/21/2004, 2004  
 סטרינסקי, א', 2000. 'אגם ים המלח: הנביעה הגדולה בעולם'. מלח הארץ, 1, עמ' 35-51

- רז, א', 2000. מחקר היווצרות הבולענים לאורך חופי ים המלח – סיכום סקר פני שטח. דוח המכון הגאולוגי GSI/31/2000
- שטיבלמן, ו', 2004. סקירת השיטות הגיאופיסיות ששימשו לחקר הבולענים בחוף ים המלח. דוח המכון הגאופיסי 845/053/2004
- Abelson, M. et al., 2003. 'Collapse-sinkholes and radar interferometry reveal neotectonics concealed within the Dead Sea basin'. *Geophysical Research Letters* 30 (10), 1545, 52, 1–4
- Galloway, D. et al., 1999. Land subsidence in the United States, *USGS Circular 1182*
- Martinez, J. D. et al., 1998. 'Sinkholes in evaporate rocks'. *American Scientist* 86, pp. 38–51
- Shalev, E., et al., 2006. 'Salt dissolution and sinkhole formation along the Dead Sea shore'. *Journal of Geophysical Research*, 111 (B3), Art. No. B03102
- 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