

גדעון בר

המכון הגיאולוגי לישראל

רון טוף

המכון הגיאופיסי לישראל

אלי רז

מרכז מדע ים המלח והערבה

מאמר זה עבר שיפוט עמיתים

ציטוט מומלץ

בר ג, נוף ר ורז א. 2017. חיזוי
בולענים מהחלל. אקולוגיה וסביבה
8(1): 346–353.



סדרת בולענים שהתמלאו במי תהום מלוחים בצפון מניפת נחל צאלים. צבע המים בברכות משתנה תדיר במשך השנה עקב שינויים במליחות ובערך ההגבה (pH) שלהם

חיזוי בולענים מהחלל

8 במרץ, 2017

גיליון אביב 2017 / כרך 8(1) / ים המלח

[חיזית המחקר](#)

על קצה המזלג

- ביטוי דרמטי לירידה החרפה במפלס ים המלח בעשורים האחרונים הם הבולענים הנפערים באלפיהם לחופי ים המלח.
- קריסת בולענים ללא התרעה היא סכנה מהותית לנפש ולתשתיות, ויוצרת חוסר ודאות בתכנון נתיבי תחבורה ופעילויות תיירות, תעשייה ואחרות באזור.
- הידע המדעי הקיים אפשר מיפוי אזורים שתיתכן בהם היווצרות בולענים, ואכן בעשור האחרון נוצרו בולענים רק באזורים הללו ובאזורים שכבר נפערו בהם בולענים.
- בשנים האחרונות נמצא שבמקרים רבים מקדימות שקיעות קרקע מזעריות (מ"מ בודדים) את קריסת הבולענים. שקיעות אלה ניתנות לזיהוי רק באמצעות טכנולוגיית חישה מלוויינים.
- יעילות השיטה משתנה בהתאם לסוג הסלעים שמעל שכבת המלח התת-קרקעית, ונעה בין חוסר יכולת למתן התרעה ועד התרעה של שנים אחדות.

המערכת

תקציר

מאז תחילת שנות ה-80 של המאה הקודמת התפתחו לאורך חופי ים המלח מעל 6,000 בולענים המלווים בשקיעות קרקע נרחבות. הגורם העיקרי להיווצרותם הוא המסת מלח והיווצרות חללים בתת-הקרקע על-ידי מי תהום תת-רוויים ביחס למלח בעקבות ההאצה בירידת מפלסי ים המלח ומי התהום שבשוליו. בשנים האחרונות נמצא שבמקרים רבים מקדימות שקיעות קרקע מזעריות את קריסת הבולענים. שקיעות אלה, שמתרחשות בקצב של מילימטרים בודדים בשבוע ועל פני שטחים של כמה מאות מ"ר, ניתנות לזיהוי אך ורק באמצעות טכנולוגיה מתקדמת שנקראת מדידת התאבכות (Interferometry) בעזרת מכ"ם שנמצא על לוויינים. השיטה נמצאה יעילה מאוד בכמה מקרים לאורך ים המלח: בכביש 90 מצפון לעין גדי, ליד תעלת ההטיה של מי ים המלח מהאגן הצפוני לאגן הדרומי, בכביש הגישה לחוף מינרל ועוד. זמן ההתרעה (הזמן שעובר בין הזיהוי הראשוני של שקיעת הקרקע לבין קריסת הבולען) משתנה בהתאם להרכב המשקעים שהורבדו מעל שכבת המלח. במשקעים חרסיתיים רכים אין לעתים התרעה כלל, כלומר הבולען קורס ללא שקיעה מקדימה. לעומת זאת, במשקעי סחף הבנויים מחלוקי נחל מלוכדים היטב, זמן ההתרעה עשוי להגיע למספר שנים.

מבוא

מפלס ים המלח יורד מאז תחילת שנות ה-60 של המאה הקודמת בקצב ממוצע של כמטר בשנה כתוצאה מהמאזן השלילי בין מי הנחלים שמתנקזים לים המלח והמים שנגרעים ממנו בהתאדות ובשאיבה^[6] (ראו גם [בגיליון זה](#)). ירידת מפלס הים, ובעקבותיה גם ירידת מפלס מי התהום הסמוכים לים המלח, גורמת לירידה ולנדידה מזרחה של הפן הביני (קו המגע) בין מי התהום המלוחים הקשורים לים המלח, מתחת, ומי התהום התת-רוויים ביחס למלח, שמקורם בהרי יהודה, מעל^[5]. שכבת מלח בת כ-10,000 שנה בעובי של כ-5–20 מטר נמצאת בעומק של כ-5–70 מטר מתחת לפני השטח לאורך רוב חוף ים המלח בין הים וכביש 90. עד תחילת שנות ה-80 של המאה הקודמת הייתה שכבת זו טבולה במי התהום המלוחים שמתחת לפן הביני. עם ירידת המפלס ונדידת הפן הביני מזרחה נוצר מגע בין מי התהום התת-רוויים ביחס למלח ושכבת המלח על-ידי זרימה ישירה ממערב או באמצעות עלייה לאורך העתקים (מישורי אי-רציפות), והחלה המסה של המלח. המסה זו יצרה חללים במלח שהלכו וגדלו, וכאשר תקרת החלל איבדה את יכולתה לשאת את טור המשקעים שמעליו, הם קרסו לתוכו ונוצר בולען. בולעני ים המלח נוצרים בשתי סביבות השקעה עיקריות: א. מישורי בוך, הבנויים בעיקר מחילופין של משקעים דקי גרגיר (חרסית, סילט) עם ארגוניט וגבס. הבולענים בסביבה זו רחבים (עד עשרות מטרים) ורדודים (בדרך כלל פחות מ-10 מטר); ב. מניפות סחף, הבנויות מחלוקי נחל מלוכדים, לעתים בחילופין עם אופקי חרסית וסילט. הבולענים בסביבה זו צרים (מטרים ספורים) ועשויים להגיע לעומק של יותר מ-25 מטר. מחקרים קודמים מצביעים על קשר מרחבי בין בולענים לבין אזורים שנצפו בהם שקיעות קרקע הדרגתיות, ועל כך שבמקרים רבים מקדימה שקיעת הקרקע את קריסת הבולען^[8,9].



שקיעת כביש 90 ליד עין גדי נמשכת לאחר שהתגלה הבולען מתחתיו. בצילום נראית קריסה מקומית לעומק של כמטר בשולי אזור השקיעה. נכון למועד כתיבת שורות אלה, עדיין לא נפער בולען עמוק על הכביש עצמו, ככל הנראה עקב הימצאות יריעה גאוטכנית מתחת לכביש

הבולענים הם סכנה ממשית לתשתיות ולחיי אדם לאורך ים המלח. בעבר אירעו מספר מקרים של נפילות אדם אל תוך בולענים שהסתיימו בפציעות, לעתים קשות מאוד. אתרי תיירות פעילים (חניון עין גדי וחוף מינרל) ננטשו (איור 1), וכביש 90 באזור נחל ערוגות נחסם בעקבות בולענים שהתגלו מתחתיו, ובמקומו נסלל כביש עוקף. תכניות למיקום תשתיות של מפעלי ים המלח מושפעות אף הן מנוכחות או מסכנה עתידית של בולענים באזור. בעקבות ההאצה בקצב ירידת מפלס ים המלח עם השנים [6] הואץ גם קצב יצירת הבולענים. בשנת 2015 התגלו למעלה מ-500 בולענים חדשים (ידע אישי, בסיס הנתונים של המכון הגיאולוגי לישראל), והולכת וגדלה הסכנה לפגיעה ולנזק בעקבותיהם. המכון הגיאולוגי מבצע מעקב שוטף אחר התפתחות הבולענים, ומוציא דו"חות תקופתיים המתעדים את השינויים לאורך חוף ים המלח, ומפות היתכנות לבולענים שמציינות את מיקום הבולענים הקיימים ואת האזורים שקיימת בהם היתכנות גבוהה או נמוכה להיווצרותם בעתיד [1,2,3]. קביעת רמת ההיתכנות מתבססת על תצפיות ישירות בבולענים קיימים, על זיהוי שכבת מלח בתת-הקרקע באמצעות קידוחים וסקרים גאופיזיים ועל ירידת מפלס מי ים המלח (באגן הצפוני המפלס יורד, בעוד שבאגן הדרומי הוא עולה בעקבות שאיבת המים אליו, ולכן רמת ההיתכנות בשני האגנים שונה). ואכן, בעשור האחרון נוצרו בולענים רק באזורים שסומנו במפות ההיתכנות כאזורי בולענים קיימים או כאזורים בעלי היתכנות גבוהה. מכיוון שגם באזורים אלה מתנהלת פעילות אדם יום-יומית, יש צורך לזהות סימנים מקדימים לקריסה עתידית של בולענים כדי לתכנן נכון או להתרחק מהם. במאמר נסקור שיטה חדשה לזיהוי מוקדם של בולענים, נראה תוצאות מכמה אזורים לאורך ים המלח, ונסיים במודל הקושר את הסימנים המקדימים למיקום הבולען ולקריסתו.

איור 1. קריסת תשתיות אל תוך בולענים בחוף מינרל, יולי 2015



איור 1

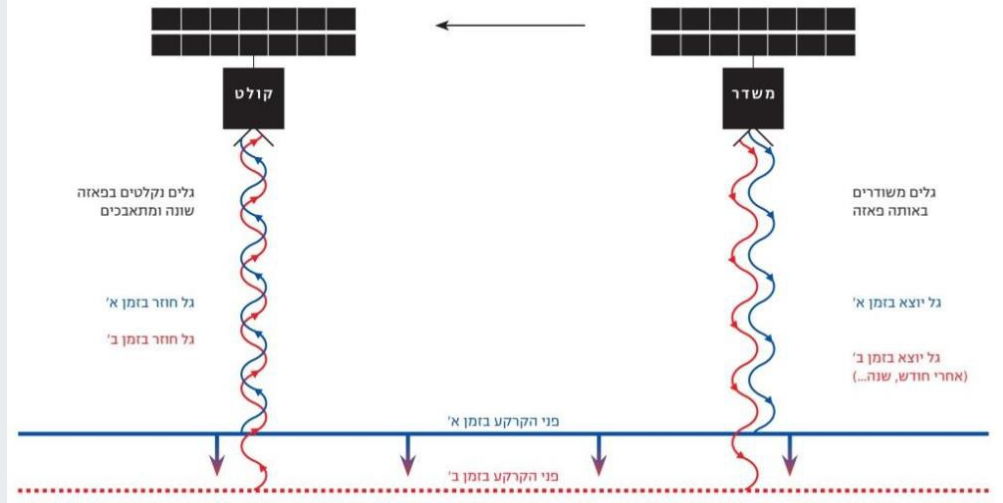
קריסת תשתיות אל תוך בולענים בחוף מינרל, יולי 2015

שיטות: מדידת התאבכות של גלי מכ"ם מלוויינים

מדידת התאבכות של גלי מכ"ם (InSAR) מלוויינים היא טכניקה שנעשתה יישומית באמצע שנות ה-90 של המאה הקודמת, ומקובלת מאז כאחת מהשיטות הגאודטיות העיקריות לזיהוי ולמיפוי של תנועות זעירות בקרום כדור הארץ. המדידות מתבצעות באמצעות לוויינים שמקיפים את כדור הארץ בגובה של 600–800 ק"מ, במסלולים קבועים, בזמני מחזור של כמה ימים (תלוי בלוויין). הלוויינים משדרים גלי מכ"ם שמוחזרים אליהם מפני הקרקע לאורך מסלולם. אותות אלה מושווים לאחר מכן לאותות המוחזרים בהקפות הבאות. כאשר מתרחשת תזוזה בפני הקרקע בפרק הזמן שבין שתי הקפות של הלוויין, נוצר הפרש בין פאזת הגל (המיקום המדויק על גבי מחזור הגל) המוחזרת בהקפה הראשונה לפאזת הגל המוחזרת מאותה נקודה בהקפה השנייה (איור 2). את הפרש הפאזה הזה ניתן לתרגם באמצעות אורך הגל לשינוי במרחק בין הקרקע ללוויין, כלומר לתזוזה של הנקודה על פני הקרקע. מפת הפרשי הפאזה (שהיא למעשה תמונת התאבכות) בין שתי תמונות מתארכים שונים נקראת מפת התאבכות (Interferogram). דיוק השיטה תלוי באורך הגל של הלוויין וביכולת לנקות רעשי רקע. החל בשנת 2012 מקבל המכון הגיאולוגי נתונים ממערך לוויינים של סוכנות החלל האיטלקית (COSMO SkyMed) שמשדרים באורך גל קצר (3 ס"מ), חוזרים על אותו מסלול בפרקי זמן של 1, 3, 4 ו-8 ימים, ומאפשרים זיהוי תזוזות קרקע של מילימטרים בודדים. שינויים במאפייני הקרקע (כמו למשל גידול צמחייה, גלים בגופי מים, או חריש של הקרקע) בין שני מעברי הלוויין גורמים לכך שהפרש הפאזה בין החזרות המכ"ם בשתי התמונות שונה משמעותית באלמנטים הבסיסיים הסמוכים של התמונה (פיקסלים). במצב כזה נראית מפת ההתאבכות כענן של נקודות בעלות צבעים שונים (למשל, מים זורמים בתעלה באיור 3 או מי ים המלח ואזורי צמחייה באיור 4), ולא ניתן למדוד תזוזות באזורים אלה.

איור 2. מדידת התאבכות של גלי מכ"ם מלווייניים (InSAR)

הגאומטריה של לוווייני המכ"ם ועקרון הפרש הפאזה במדידות התאבכות: כאשר מתרחשת תזוזה בפני הקרקע בפרק הזמן שבין שתי הקפות של הלוויין, נוצר הפרש בין פאזה הגל המוחזר בהקפה הראשונה (מסומן בצבע כחול) לפאזה הגל המוחזר מאותה נקודה בפעם השנייה (מסומן בצבע אדום). הפרש הפאזה מתורגם להפרש מרחק, כלומר לתזוזה.



איור 2

מדידת התאבכות של גלי מכ"ם מלווייניים (InSAR)

הגאומטריה של לוווייני המכ"ם ועקרון הפרש הפאזה במדידות התאבכות: כאשר מתרחשת תזוזה בפני הקרקע בפרק הזמן שבין שתי הקפות של הלוויין, נוצר הפרש בין פאזה הגל המוחזר בהקפה הראשונה (מסומן בצבע כחול) לפאזה הגל המוחזר מאותה נקודה בפעם השנייה (מסומן בצבע אדום). הפרש הפאזה מתורגם להפרש מרחק, כלומר לתזוזה.

תוצאות

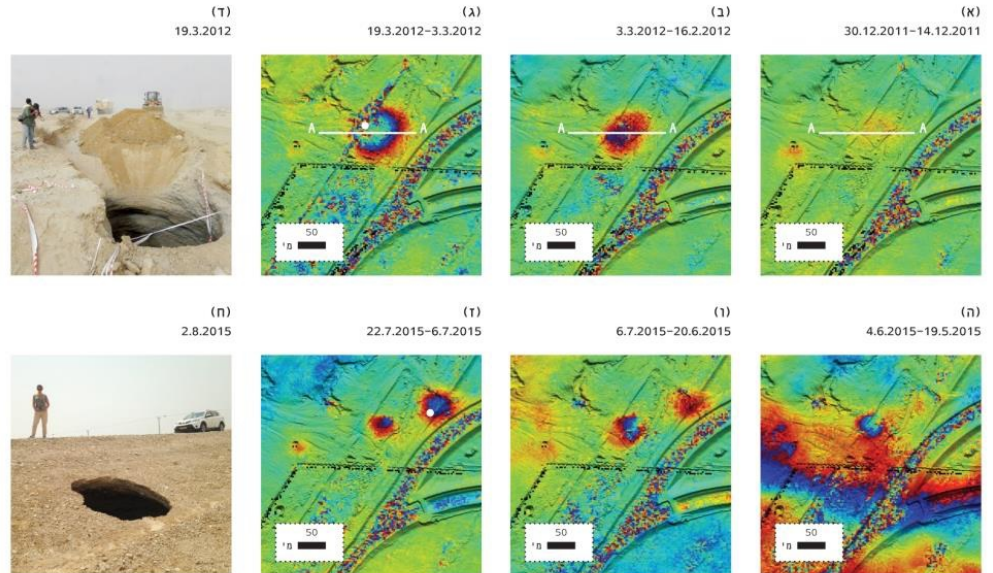
החל בתחילת שנת 2012 מתבצע עיבוד שגרתי של דימוי המכ"ם לאורך רצועה שרוחבה כ-1 ק"מ מקו החוף של ים המלח ועד מעט מערבית לכביש 90. כל 16 יום יוצרים מפות התאבכות המצביעות על אזורי השקיעה בפרקי הזמן שבין הדימויים. בו-בזמן מתבצעות בדיקות קרקעיות לאיתור בולענים חדשים באזורים שיש בהם עניין למועצות האזוריות ולגורמים נוספים הפועלים באזור (חברת נתיבי ישראל, מפעלי ים המלח ועוד), ובאזורים שדימוי המכ"ם מאתרים בהם שקיעות קרקע. עד כה נצפו שקיעות קרקע מקדימות לקריסת בולענים בעשרות מקרים, בחלק מהמקרים בדיעבד – קודם נצפתה קריסת הבולען, ובבדיקה לאחר של מפות התאבכות מוקדמות יותר נמצאו השקיעות המקדימות. נציג כאן שלושה מקרים אופייניים שנצפתה בהם שקיעה מקדימה, ולאחר מכן התגלה (או קרס) הבולען. שני המקרים הראשונים הם ליד תעלת ההטיה של מי ים המלח בדרום מניפת נחל צאלים, והשלישי לאורך כביש 90 מצפון-מזרח לעין גדי.

נעלת ההטיה בדרום מניפת צאלים

מי ים המלח נשאבים על-ידי מפעלי ים המלח בתחנת השאיבה P88 שבדרום מניפת צאלים, ומוזרמים בתעלה לבריכות האידוי שבאגן הדרומי. ב-19.3.2012, כמה חודשים בלבד לאחר שהחל מיפוי שקיעות הקרקע באמצעות מדידות ההתאבכות, נפער בולען לאורך דרך השירות הצמודה לתעלה (איור 3ד). בבדיקת מפות ההתאבכות של התקופה שקדמה לקריסת הבולען נמצא שכשלושה חודשים קודם לכן החלה במקום שקיעת קרקע מזערית (כ-2 מ"מ בשבועיים, איור 3א), שקיעה שהתגברה עם הזמן עד כדי 2 ס"מ בשבועיים שקדמו לקריסה (איור 3ב ואיור 13). תצפית זו הייתה הראשונה לאשש את הנחת העבודה שלנו, ששקיעות קרקע מקדימות קריסת בולענים. הבולען מולא מיד בחומר סחף על-ידי מפעלי ים המלח, אך השקיעה נמשכה בקצב מהיר יותר, ובשבועות שלאחר מכן נפערו לפחות עוד שלושה בולענים בשולי אזור השקיעה, מולאו בחומר סחף, ונפערו מחדש.

איור 3. מפות הפרשי פאזה (מפות התאבכות) של אזור תעלת ההטיה של מי ים המלח בדרום מניפת צאלים

כל מחזור צבעים מציין הפרש פאזה של 360 מעלות, כלומר שינוי במרחק בין הקרקע ללוויין של חצי אורך גל (תזוזה אנכית של כ-1.5 ס"מ). פרקי הזמן המדוברים מצוינים בראש או בתחתית כל מפת התאבכות. משמאל – בולענים שנוצרו במקום לאחר תקופות של שקיעת קרקע. שורה עליונה: התפתחות שקיעת קרקע (שינויי הצבע במרכזי התמונות) בין דצמבר 2011 ומרץ 2012, שורה תחתונה: התפתחות שקיעת קרקע בין מאי ויולי 2015. בפרק זמן זה נמשכה השקיעה שהחלה בשנת 2012 ונוסף אזור שקיעה כ-100 מטר מזרחית לה. עיגולים לבנים בפאנלים (ג) ו (ז) מציינים את מיקומי הבולענים.



איור 3

מפות הפרשי פאזה (מפות התאבכות) של אזור תעלת ההטיה של מי ים המלח בדרום מניפת צאלים

כל מחזור צבעים מציין הפרש פאזה של 360 מעלות, כלומר שינוי במרחק בין הקרקע ללוויין של חצי אורך גל (תזוזה אנכית של כ-1.5 ס"מ). פרקי הזמן המדוברים מצוינים בראש או בתחתית כל מפת התאבכות. משמאל – בולענים שנוצרו במקום לאחר תקופות של שקיעת קרקע. שורה עליונה: התפתחות שקיעת קרקע (שינויי הצבע במרכזי התמונות) בין דצמבר 2011 ומרץ 2012, שורה תחתונה: התפתחות שקיעת קרקע בין מאי ויולי 2015. בפרק זמן זה נמשכה השקיעה שהחלה בשנת 2012 ונוסף אזור שקיעה כ-100 מטר מזרחית לה. עיגולים לבנים בפאנלים (ג) ו (ז) מציינים את מיקומי הבולענים.

שלוש שנים וחצי מאוחר יותר, בתחילת יוני 2015, החלה שקיעת קרקע דומה מאוד בצורתה ובממדיה כ-100 מטר מזרחית לזו של שנת 2012 (איור 3ה). במשך כחודשיים התגברה השקיעה, והתרעה מידית הועברה למפעלי ים המלח. ב-2.8.2015 נפער בולטן בגבול אזור השקיעה, על גבי הסוללה של תעלת ההטיה. גם הבולטן הזה כוסה בערמה גבוהה של חומר סחף, אך כשלושה שבועות לאחר מכן נפער במקום בולטן נוסף, ובהמשך נפערו לפחות עוד שלושה בולענים בשולי אזור השקיעה. זמן ההתרעה (מתחילת השקיעה עד קריסת הבולטן הראשון) היה דומה בשני המקרים: כשלושה חודשים ב-2012, וכחודשיים ב-2015.



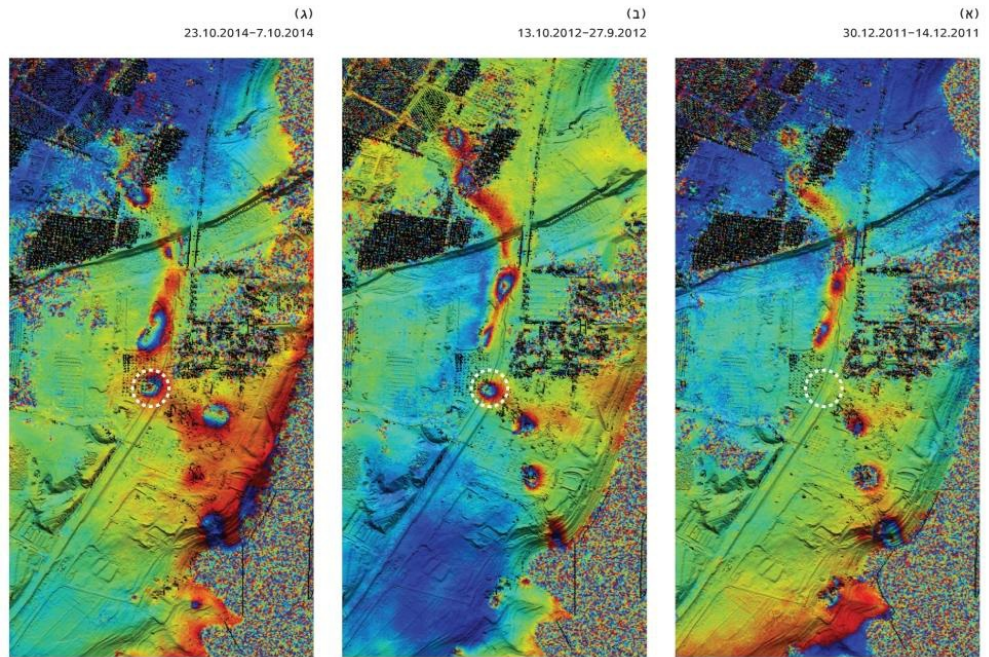
מעין שנובעים בו מי תהום שהומלחו כתוצאה מהמסת מלח בתת-הקרקע בדרום מניפת נחל צאלים. בזמן שיטפונות נבלעים מים בבולענים שבערוצי הנחלים, וכמה שעות לאחר מכן מתגברת שפיעת המעין באופן משמעותי

כביש 90, צפונית-מזרחית לעין גדי

אתר הבולענים "ערוגות" בנוי מצברי בולענים, המסודרים לאורך רצועה במרווחים של כמה עשרות מטרים זה מזה. הרצועה חוצה את נחל ערוגות ואת כביש 90 בסמוך לחוף עין גדי (איור 4). הבולענים הופיעו באתר זה לראשונה באמצע שנות ה-90 [4, 1], גרמו נזק רב בחניון עין גדי, והביאו לנטישתו. לנוכח החשש מקריסת בולענים על כביש 90, הודקה תשתית הכביש בשנת 2002 וחוזקה ביריעה גאוטכנית אלסטית. ואכן, במשך למעלה מעשר השנים שלאחר מכן המשיכו להתפתח בולענים רק ממערב וממזרח לכביש, ואילו בנקודת החצייה על הכביש לא נוצר כל בולען. מאז שנת 2002 ידוע על בולען צר ועמוק, ופעיל מעת לעת, כ-20 מטר מערבית לכביש בקצה מטע התמרים. במדידות ההתאבכות שנעשו בתחילת שנת 2012 נצפו שקיעות קרקע סביב כל צברי הבולענים שלאורך הרצועה מצפון לנחל ערוגות ועד לקו החוף בדרום, אך עד סוף ספטמבר 2012 לא נצפתה כל שקיעה על הכביש (איור 4א). בסוף ספטמבר 2012 החלו שקיעות קרקע על הכביש עצמו ובשוליו (איור 4ב), והועברה התרעה לחברת נתיבי ישראל ולמועצה האזורית. ב-8.12.2012 נפער בולען חדש כ-20 מטר מהכביש וכ-7 מטר מצפון לבולען הוותיק. במשך השנים 2012-2014 המשיכו הכביש ושוליו לשקוע בקצב של כ-2 ס"מ לחודש (איור 4ב), ובזמנית נפערו בולענים, כוסו על-ידי חברת נתיבי ישראל, ונפערו מחדש בשוליים המערביים של אזור השקיעה, במרחקים של 5-20 מטר מהכביש. בסוף שנת 2014 התגבר קצב השקיעה לכדי 3-4 ס"מ לחודש (איור 4ג), והחלו להיווצר סדקים ושקעים על הכביש. בעקבות זאת נסגר הכביש לתנועה בינואר 2015, נחפר עד לעומק היריעה הגאוטכנית, ומתחתיה התגלה חלל בקוטר של כ-5 מטר ובעומק של כ-10 מטר. לולא היריעה הייתה תקרת החלל קורסת, ובולען היה נוצר על הכביש. בזכות היריעה עבר זמן של מעל שנתיים בין הזיהוי הראשוני של שקיעת הקרקע לבין גילוי הבולען.

איור 4. מפות התאבכות של כביש 90 באזור עין גדי

הרצועה הצבעונית של האזור השוקע חופפת את קו הבולענים. עיגול לבן מקווקו מציין את אזור שקיעת הקרקע על הכביש. (א) לפני תחילת השקיעה; (ב) פרק הזמן הראשון שנצפתה שקיעת קרקע על הכביש; (ג) התגברות השקיעה על הכביש לקראת סוף שנת 2014.



איור 4

מפות התאבכות של כביש 90 באזור עין גדי

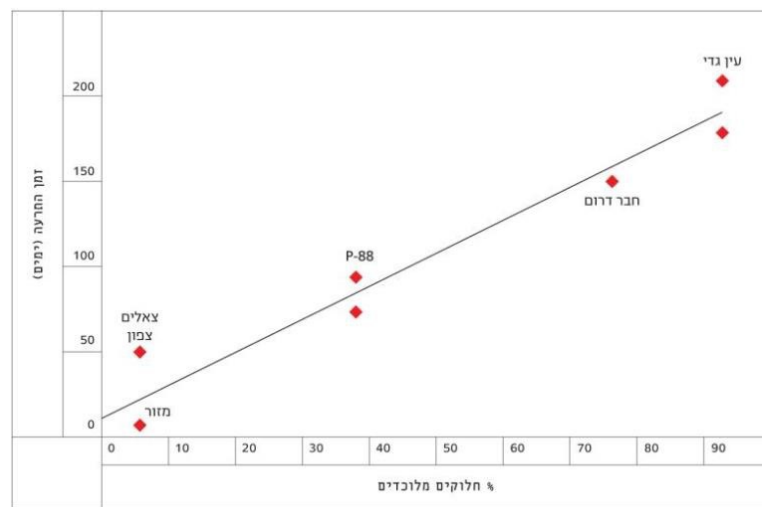
הרצועה הצבעונית של האזור השוקע חופפת את קו הבולענים. עיגול לבן מקווקו מציין את אזור שקיעת הקרקע על הכביש. (א) לפני תחילת השקיעה; (ב) פרק הזמן הראשון שנצפתה שקיעת קרקע על הכביש; (ג) התגברות השקיעה על הכביש לקראת סוף שנת 2014.

ומן ההתרעה תלוי בהרכב המשקע



שדה הבולענים הדרומי במניפת נחל צאליים, 30.9.2014. הבולענים מלווים בשקיעות קרקע הדרגתיות ובמערכות סדקים היקפיות

בולעני תעלת ההטיה וכביש 90 הם דוגמאות למספר הולך וגדל של בולענים שנצפו מראש באמצעות שקיעות קרקע מקדימות מזעריות. אנו מעוניינים לנצל ידע זה לטובת התרעה לגורמים המוסמכים ולציבור, ועל כן המחקר נמשך כדי (א) להבין טוב יותר אם קיים זמן התרעה אופייני או שזמן ההתרעה משתנה עם התנאים הגאולוגיים; (ב) לבנות מערכת התרעה ממוחשבת לבולענים. בבדיקה של כשישה מקרים נוספים נמצא שזמני ההתרעה נבדלו מאוד בהתאם למקום ההיווצרות של הבולענים: מישורי בוך או מניפות סחף. במישורי הבוך, שהמשקעים שמעל שכבת המלח בהם חרסיתיים בעיקרם, זמן ההתרעה עומד על 0–50 ימים (אתרי מזור וצאליים צפון [באיור 5](#)). לעומת זאת, באתרים המאופיינים בטור עבה של חלוקי נחל מלוכדים (חניון עין גדי, למשל), עומד זמן ההתרעה על 6–8 חודשים. במקומות שטור המשקעים מכיל חרסיות וחלוקים לסירוגין, זמן ההתרעה עומד על 3–5 חודשים, ועולה עם הגידול במרכיב היחסי של החלוקים המלוכדים בחתך ([איור 5](#)). זו תצפית ראשונית בלבד המבוססת על כעשרה מקרים, אבל היא מאפשרת כיול ראשוני של זמן ההתרעה בהינתן חתך המשקעים בנקודה (בעזרת קידוחים, למשל). ככל שיתווספו נתונים, תגדל הבנתנו את התופעה, וגרף הכיול ([איור 5](#)) ישתפר.



איור 5. זמן ההתרעה ביחס לאחוז החלוקים המלוכדים במשקעים שמעל שכבת המלח
נחוני תת-הקרקע נלקחו מקידוחים סמוכים. שימו לב לזמן ההתרעה הקצר בקרקע שיש בה בעיקר חרסיות (מזור, צאלים צפון), ולזמן ההתרעה הארוך בקרקע שיש בה בעיקר חלוקים מלוכדים (עין גדי).

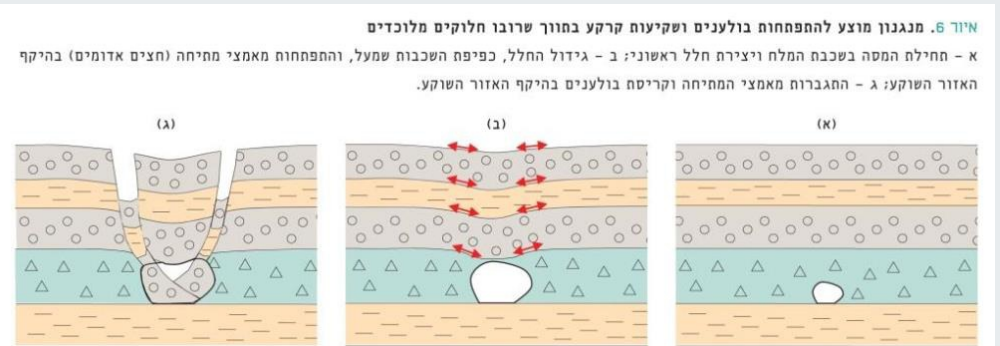
איור 5

זמן ההתרעה ביחס לאחוז החלוקים המלוכדים במשקעים שמעל שכבת המלח

נחוני תת-הקרקע נלקחו מקידוחים סמוכים. שימו לב לזמן ההתרעה הקצר בקרקע שיש בה בעיקר חרסיות (מזור, צאלים צפון), ולזמן ההתרעה הארוך בקרקע שיש בה בעיקר חלוקים מלוכדים (עין גדי).

דיון וסיכום

התצפיות שהוצגו לעיל מלמדות שפני השטח לאורך חופי ים המלח מגיבים להמסת המלח וליצירת חללים בתוכו בשקיעות מזעריות הדרגתיות, ושהדבר קורה זמן מה לפני שמתפתח במקום בולען. תצפית חשובה נוספת היא שבמקרים רבים נוצרים הבולענים בהיקף אזורי השקיעה ההדרגתית ולא דווקא במרכז, כפי שניתן היה להניח אינטואיטיבית (באיור 3, למשל). שתי התצפיות הללו משתלבות למודל המסביר את הקשר בין שקיעות הקרקע לבולענים [7] (איור 6). בשלב ראשון מתחילה המסה בשכבת המלח, ונוצר חלל ראשוני. עם המשך תהליך ההמסה גדל החלל, והשכבות שמעליו מתחילות לשקוע ולהתכוספ אל מרכזו. הכפיפה מרבית בהיקף האזור השוקע, ומאמצי המתחה בו הולכים ומתגברים. עם הגעת החלל לגודל שמכניע את הסלע שמעל שוליו, קורס טור המשקעים שלמעלה אל תוך החלל, ונוצר בולען. כאמור, הזמן שעובר בין תחילת השקיעה והקריסה תלוי בחוזק המשקע וביכולתו לשאת את מאמצי המתחה באזורי הכפיפה. זהו מנגנון שמוגבל בעיקר לאתרי בולענים באזורי חלוקים מלוכדים, שם קיימת מידה רבה יותר של אלסטיות במשקע. האלסטיות מאפשרת כפיפה רבה יותר עד הכניעה, שמשמעותה זמן התרעה ארוך יותר. במישורי הבוץ המשקע חלש יותר, ואין בו מידה מספקת של אלסטיות, ולכן קריסתו תהיה מהירה יותר ובדרך כלל ישירות למרכז החלל.



איור 6

מנגנון מוצע להתפתחות בולענים ושקיעות קרקע בתווך שרובו חלוקים מלוכדים

א- תחילת המסה בשכבת המלח ויצירת חלל ראשוני; ב- גידול החלל, כפיפת השכבות שמעל, והתפתחות מאמצי מתחה (חצים אדומים) בהיקף האזור השוקע; ג- התגברות מאמצי המתחה וקריסת בולענים בהיקף האזור השוקע.

תודות

נתוני המכ"ם התקבלו מסוכנות החלל האיטלקית (ASI). המחקר ממומן על-ידי פרויקט המכון הגיאולוגי 40391 "אי יציבות התשתית בים המלח" ועל-ידי מענק מס' 958/13 של הקרן הלאומית למדע (ISF).

מקורות

1. אבלסון מ, יחיאלי י, ביין ע, ואחרים. 2004. סיווג ומיפוי אזורי היתכנות להיווצרות בולענים (בורות) לאורך חוף ים המלח. דו"ח המכון הגיאולוגי GSI/13/2004.
2. אבלסון מ, קלבר, גבאי ר ויחיאלי י. 2009. עדכון מפות ההיתכנות להיווצרות בולענים לאורך חוף ים המלח. דו"ח המכון הגיאולוגי GSI/34/2009.
3. אבלסון מ, בורשבסקי א, ברוך א, ואחרים. 2013. חידושים בהתפתחות בולעני ים המלח ועדכון מפות ההיתכנות – 2012. דו"ח המכון הגיאולוגי GSI/11/2013.
4. איתמר א ורייזמן י. 2000. בורות בשולי ים המלח – סקר התפתחות לפי תצלומי אוויר. דו"ח המכון הגיאולוגי GSI/22/2000.
5. יחיאלי י ואבלסון מ. 2006. בולענים בחוף ים המלח. *מלח הארץ* **2**: 57–82.
6. לנסקי נ ודנטה א. 2015. הגורמים לירידה המואצת של מפלס ים המלח בעשרות השנים האחרונות. דו"ח המכון הגיאולוגי GSI/16/2015.
7. Atzori S, Baer G, Antonioli A, and Salvi S. 2015. InSAR-based modeling and analysis of sinkholes along the Dead Sea coastline. *Geophysical Research Letters* **42**(20): 8383–8390.
8. Baer G, Schattner U, Wachs D, et al. 2002. The lowest place on Earth is subsiding – An InSAR (Interferometric synthetic aperture radar) perspective. *Geological Society of America Bulletin* **114**(1): 12–23.
9. Nof RN, Baer G, Ziv A, et al. 2013. Sinkhole precursors along the Dead Sea, Israel, revealed by SAR interferometry. *Geology* **42**: 111–114.