

## מלח הארץ - חוברת מס' 3

עורך : עוזד נבו

תשס"ט 2008

### משקעים אגמיים באגן ים המלח כיסומוגרפים מאובנים

শמוֹאַל מְרָקוּן

מה מביא את הגאולוגים לקבוע בפסקנות שבעתיד יהיה רעידות אדמה חזקה באזורי? התשובה היא: הכרת העבר. כדי להבין את הצפוי בעתיד יש ללמידה היטב את העבר זה המնיע העומד בסיס ענף המחקר המכונה 'פלאוסיסמולוגיה', העוסק בתיעוד ואפיון של רעידות האדמה מהעבר (פלאו=עתיק, סיסמו=רעידה). סיסומוגרפים מודרניים שורשים את הזעוזעים בזמן רעידות אדמה קיימים מסווגים המאה התשע עשרה. תיעוד הרעידות העתיקות יותר מבוסס על תצפיות גאולוגיות, ומאמור זה נועד לתאר כמה מהתופעות הגאולוגיות שבאזורן משוחזרים את אופן הופעתן של רעידות האדמה באזורי ים המלח בעשרות אלפי שנים האחרונות. מכיוון שהתהליכים בכדור הארץ אינם משתנים באופן מהותי ממהותם למשך, אנו מניחים שהתנוגות רעידות האדמה בעבר מראה דגם סביר ביותר לעתיד.

הסיסומוגרפים המודרניים רגשים מאוד ורישומיים מלמדים שריעידות אדמה מתרחשות לעיתים קרובות, רובן המכريع חלש ואנייננו מוגש על ידי בני אדם ורק מעותות מזמן חזקות עד כדי גרימת נזק או הרס. במאה השנים האחרונות התרחשו לאורך בקע ים המלח (הידוע בכינוי העממי 'השבר הסורי-אפריקני') שתי רעידות הרסניות: האחת, במגנטודה 6.1 בסולם ריכטה, הייתה בצפון ים המלח ב-11 ביולי 1927 ובה נהרגו כ-250 בני אדם בירושלים וסבירתה; השנייה, חזקה פי יותר מ-10 (במגנטודה 7.2), התרחשה ב-22 בנובמבר 1995 במפרץ אילת ובה נהרגו פחות מעשרה בני אדם. מה שנהן הן פרק זמן קצר

\* שמוֹאַל מְרָקוּן הוא פרופסור בחוג לגאופיזיקה ומדעים פלנטריים באוניברסיטת תל אביב.

מאוד יחסית לתחליכים הגאולוגיים, המתרחשים באטיות רבה, ולכן יש לחזור פרקי זמן ארוכים בהרבה, רצוי בני אלפי או עשרות אלפי שנה, כדי לאfine את התופעה של רעידות האדמה. צורך זה הביא להפתחות המחקר ההיסטורי והארכיאוסיסמי המאפשר מבעד לחולון זמן של עד כ-3,000 שנה. המידע מתקיים על ידי חקר רעידות אדמה היסטוריות שתועדו בכתב או בציורים על ידי אנשים שהוו אותן או באמצעות תיעוד של נזקי רעידות אדמה באטרים ארכיאולוגיים. ברוב המקרים ניכר באטרים ארכיאולוגיים נזק שנגרם לבניינים על ידי הזועזעים של הקרקע, ורק במקרים נדירות מאוד נמצא אטרים שנקרו או נגורו בגלל העתקה הקשורה לרעידות אדמה (Ellenblum et al., 1998). מכיוון שגם חולון זמן זה מדי, התפתח המחקר הפלואוסיסמי, המבוסס על תיעוד רעידות אדמה על פי רישומיה בסלעים.

רעידות אדמה קורות כדור הארץ נשבר בפתאומיות. השבירה מתהgeschת לאחר תקופהמושכת שבה פועלים לחצים מצטברים עצומים, בדומה לענף של עץ שאותו ננסה לכופף. כשהחכוף מגיעה לגבול היכולת של הענף לעמוד בלחץ שנוצר, הענף נשבר כך גם קרום כדור הארץ, הנשבר כשהכווחות הפועלים עליו גורלים מהחזוק שלו. ברעידות אדמה חזקות (מגניטודה מעל 6) נוצר משטח שבירה גדול שבו נמצאת מתחת לפני השטח, אך לעיתים הוא גדול עד כדי כך שהוא מגיע אל פני השטח. למשטח שבירה שגושי הקרום משני עבריו זוז כל אחד ביחס לשכנו קוראים 'העתק': לרוב חלה קריירה של פני השטח במקרים שבהם מוקד הרעידה (הנקודה שבה התחלתה השבירה) רדוד וה坦נווה היחסית של גושי הקרום עולה על כמה עשרות סנטימטרים. במקרים מסוימים שביהם רעידות האדמה נפוצות לאורך פרקי זמן של מיליון שנים התנווה היחסית של גושי הקרום משני עבריו ההעתק מצטברת לכדי קילומטרים. לדוגמה, בקע ים המלח נוצר עקב התזוזה היחסית בין הגושים הכלולים את חצי הארץ ערבית לבין גוש סיני-ישראל. תזוזה זו הצטברה לכדי 100 ק"מ בכ-20 מיליון השנים האחרונות. על תנועה זו וbijouterie באזורי ים המלח ניתן לקרוא בספרי 'מלח הארץ' במאמריהם של צבי גורפונקל (Gorfunkel, 2006) ושל צבי בנ-אברהם ומיקל ולדר (בחוברת זו).

במאמר זה אתאר תופעות הקורות בגל רעידות האדמה באזורי שמסביב להעתק ובמיוחד במשקעי אגמים. רעידות עלולות לגרום לגלישות קרקע, מפולות סלעים, שינויים בזרימת מי תהום (שינויים במפלסי בארות או שפיעת מעינות), שבירת נטיפים במערות, ערבול של גופי מים, הנולה של שכבות

חול, גלים גדולים בים (צונמי) או באגמים, שינויים בגובה של אזורים נרחבים ופתחת סדקים בסלעים. משקעים שמצטברים בקרקעיהם של אגמים שנה אחר שנה שרוויים בדרך כלל בשלוחה. לכן הם רגילים במיוחד לוזועים ומתקעים היבט את ההפרעות הנגרמות ברעידות חזקות. באגן של אזור ים המלח ובΚατάσταση הירדן הצטברו כמו עשרות מטרים של משקעים על קרקעית אגמים שהתקיימו באזורי עשרות אלפי שנה והגיעו לשיא גודלם בתקופות גשומות, בעיקר בזמן תקופות הקראת. מאמר זה מתאר כיצד המשקעים בים המלח ובאגמים שקדמו לו באזורי תיעדו רעידות אדמה במשך עשרות אלפי שנים. במשך אלפיים הנסים האחרונות יש בידינו גם תיעוד היסטורי של רעידות האדמה, מה שמאפשר בחינה הדדית של התיעוד הגאולוגי וההיסטוריה.

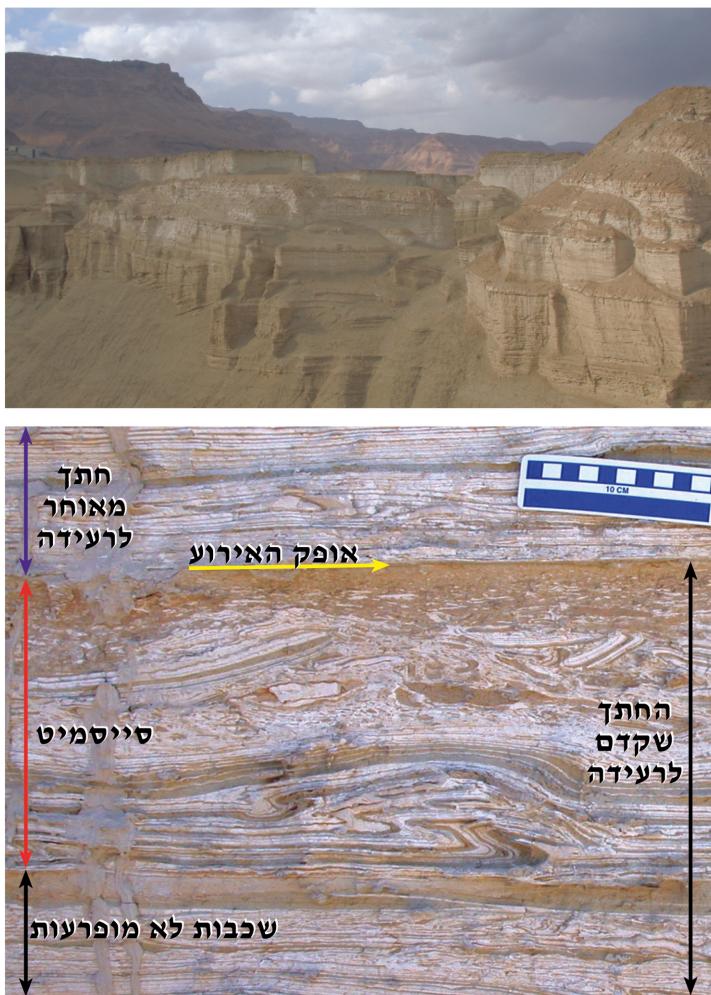
### אגן ים המלח ומשמעותם האגמיים

אגן ים המלח תחום כמעט מכל עבר על ידי אזור שבירה, ומכך מסיקים שזהו מבנה המכונה 'גרבן', גוש שירד באופן יחסית לסביבתו. הסידור המרחבי של אזור שבירה ואופי התנועה של הגושים הביאו את החוקרם למסקנה שהאנט נוצר כגרבן מעוין במקום שבו יש קפיצה שמאליה של תוואי העתקה הראשי של בקע (טרנספורם) ים המלח (איורים 7 ו-8 אצל גרכונקל, Freund, 2006; Garfunkel, 1981; 1965). מרגע שהחלה היוצרות האגן והאזור נעשו נמוך יחסית לסביבתו, החלו לזרום אליו נחלים. בחלק ניכר מהזמן הכליל העמק אגמים שגודלם השתנה בהתאם לאקלים. כך לדוגמה בתקופת הקראת الأخيرة היה בו אגם שבשיאו, לפני כ-26,000 שנה, מילא את העמק מהכינרת בצפון ועד אזור חצבה בדרום (איור 1). אנו ידועים על האגם ומקרים אחד אופיו בוכות המשקעים שהצטברו על קרקעיתו ונותרו ברחבי העמק עד לגובה של כ-165 מ' מתחת לפניהם (Hazan et al., 2005). אלה נקראים בפי הגאולוגים 'תצורת ליסאן', והאגם מכונה בפיינו אגם ליסאן. ליסאן, לשון בערבית, הוא כינוי שנינתן על שם חצי הארץ בים המלח עד שנות השבעים וצורתו דומה לשון (איור 1). על פי תפוצתה והרכבה של תצורת ליסאן אנו ידועים על גודל האגם, הרכב מימי, שינוי המפלס שחלו בו, החיים שהתקיימו בו ותכונות נוספות. חלק נכבד מהמשקעים הללו מופיעין בשכבות משנה סוגים שעוביין כמילימטר, 'למינות'

(איור 2). הלמינות הכהות, בצבע חום-ירקרק, מכילות גרגירים זעירים של גיר, דולומיט, צור ומעט קוורץ. החוקרים מפרשים אותן כתוצר של שיטפונות חורף שהביאו אל האגם סחף מהסביבה. הלמינות הבנוות מכילות גבישי ארגוניט, חומר בהרכב  $\text{CaCO}_3$  ששוקע מהמים כשהם מגיע לרווחה. למינות אלה מפורשות כמשקעי קיז' שנוצרו עקב אידוי מוגבר שהביא להשגת רוויה בעונה החמה (Begin et al., 1974). כל זוג למינות מצין שנה, וניתן לספור את השנים על פי הלמינות. ניתן גם לתארך את גבישי הארגוניט שבלמינות הקיציות על ידי מדידה של תכולת הפחמן הרדיואקטיבי או הארכנום ותוצרי התפרקותו ולקבל סרגל זמן מוחלט (שנתיים לפני הנהווה).



איור 1 : מפה מיקום המראת את הכנרת ואת ים המלח כפי שהיא בראשית שנות השבעים – יירושי' של אגם ליסאן, שבשיאו, לפני כ-26,000 שנה, השתרע לאורך כ-220 ק"מ, מאזור צפון הערבה ועד צפון הכנרת (מוסון באפור).



איור 2: למעלה: נוף למרגלות מצדה. בקדמת התמונה בולטים משקעי אגם ליסאן בצבעם הכהיר. סלעי משקע ימיים קדומים הרבה יותר נראים במרקח, במצוקי מצדה ובסביבתה. למטה: מבט מקרוב על תצורת הלשון, השיכוב העדין נוצר על קרקעית אגם הלשון בהתאם לעונות השנה (בקיץ שקוו השכבות הלבנות ובחורף הכהות). הוא השתתרם מכיוון שבמי אגם הלשון לא חיו יצורים שהיו חופרים בקרקעית ועומק המים מנע ערובה על ידי גלים. שכבות מרוסקות כדוגמת זו שבצתלים (סיסמייטים) נוצרו בغال רעידות אדמה שהפכו את השקט בקרקעית האגם. השכבות המסודרות שמעל הסיסמייט שקוו אחרי הרעידה ומאפשרות ספירה מדויקת של השנים שעברו בין שתי רעידות אדמה עוקבות.

בקרקעיהם של מקווי מים רבים חיים יצורים מגוונים שנוברים בסדיメント ומתתפרים בתוכו לצורך הגנה וכאלה שניזונים על ידי סינון חומר אורגני. פעילות זו מעורבלת את הקרקע והורסת את השיכוב העדין. ההשתמרות של הלミニות העדינות מעידה על כך שבאגם הליסאן שרוו תנאים שלא אפשרו חיים על הקרקע ועם עמוק המים היה גדול יותר עמוק ההשפעה של הגלים על הקרקע. עד כאן על השנים השלות, וכעת אל השלווה המופרת.

### שכבות רסק ומשמעותן

בתוך הרצף של השכבות המסודרות בסדר מופתי יש כ-30 שכבות שנראות כרסק של למיניות (איור 2). בשכבות הללו רואים קרען למינות גדלים שונים, לרוב עד 2-3 ס"מ. החלק העליון של שכבות הרסק מכיל את הקרים הקטנים ביותר, והגע עם הלミニות שקבעו על גבי הרסק חד וברור. המגע התחתון של שכבות הרסק חד רק בחלקו, ולרוב המעבר לשכבות שלא עברו ריסוק הנה מדורג. מחקר שככל מיפוי גאולוגי ותיעוד מפורט של משקעי תצורת ליסאן למרגולות מצד אחד הראה קשר בין שכבות רסק לאירועי שבירת של קרקעית האגם. המחקר מלמד שככל פעם שחלה שבירה והעתקה של קרקעית, אירוע שלווה ברעידת אדמה חזקה, התרחש ערבול בקרקע ושבות העילנות ביותר התרסקו (Marco & Agnon, 1995). פרט לקשר שבין שכבות הרסק לשבירת הקרקע נמצאו שתי הוכחות נוספות להיווצרותן ברעידות אדמה. ההוכחה הראשונה היא תצפית ישירה ביצירתן של שכבות מורוסקות בקרקעית אגמים בקנדה בזמן רעידות אדמה מודרניות (Doig, 1991); ההוכחה השנייה נמצאה בסלעי משקע מהאגם ש"ירשי" את אגם הליסאן, הלא הוא ים המלח. הנזיה הנוכחות של ים המלח חושפת אורות פעם בקרקעית האגם. גם במשקעים צעירים אלו נמצאו שכבות רסק דומות מאוד לאלו שבמשקעי הליסאן. השכבות הללו תוארכו באמצעות פחמן 14, ונמצאה שלכל שכבות הרסק שבמשקעי אלפיים השנים האחרונות ניתן להתאים רעידות אדמה המתועדות בכתביהם ההיסטוריים. יצאות מהכלול ונדירות מהרשומות שבמשקעים הצעירים רק רעידות אדמה שהתרחשו בזמן רידית מפלס והפסקת השקעה באזור שנחשה ביום. כך נמצא לדוגמה ביטוי לרעידת האדמה שתוארה על ידי יוספוס פלביאוס בשנת 31 לפסה"ג



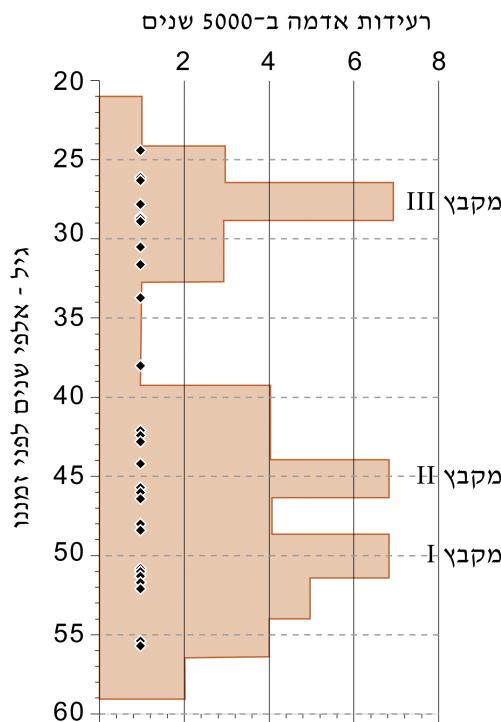
איור 3: למעלה: אפיק שהחל להיווצר בשולי ים המלח במוראת נחל צאלים החל משנת 1991. אפיקים כאלה מתהתרבים בשטח שהיה מוצף במים המלח לפני ירידת מפלסו וחושפים את השכבות ששקוו בים המלח באלפי השנים האחרונות. למטה: משקעי ים המלח מורכבים משכבות חרסית אפורה, חול דק וסילט בצבע חום וארוגוניט לבן. בטור רצף השכבות מבחינים בתצלום שמתוארך לשנת 31 לפנה"ג (Ken-Tor et al., 2001) ונוצר ברכידת אדמה חזקה שתוארה על ידי ההיסטוריה יוספוס פלביוס (Flavius, 1982).

(איור 3) ובדומה לה גם הרuidות שהתרחשו בשנים 33 לסה"ג, 363, 1212, 1293, 1834 ו-1927 (Ken-Tor et al., 2001). עדויות אלו מבססות את ההשערה שהסיבה לדפרומציה ולריסוק השכבות היא התרחשות רעידות אדמה חזקות, וכן שכבות אלו מכונות סייסמיים (seismites). אופן היוצרותן והופעתן באזורי ים המלח סוכמו על ידי עגנון ושותפיו (Agnon et al., 2006).

מלבד העיתוי של הרuidות בעבר חשוב להזכיר גם את עצמתן. אף על פי שעובי השכבה המרוסקת נראה כמדד סביר, יש קושי להבחין בין רעידת אדמה חזקה ורוחקה לבין רעידה קרובה וחלשה. נראה שששתיהן יגרמו לערבוב שכבות חזקים בעובי דומה. אחרי שתברר שחלק משכבות הרכס שקוו שכבות גבש, עלתה אפשרות להבחין ברuidות חזקות יותר – כאשר שגורמו לשקיעת גבש (הנוסחה הכימית של גבש:  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). הקשר בין רעידת אדמה לשקיעת גבש נובע מהיכולת של רuidות אדמה חזקות לגרום לערבוב המים באגם. התברר שגבש שקו באגם הליסאן כשל ערבוב של המים, כלומר המים העליונים, העשירים ביוני סולפט (תחמושת גפרית,  $\text{--SO}_4^{2-}$ ), התערबבו עם המים התחתוניים, העשירים ביוני סידן (Stein et al., 1997). ערבוב כזה עשוי לקרות ללא קשר לרuidות אדמה, בעת ירידת מפלס עקב שנייני באקלים (Machlus et al., 2000), אבל מודל ממוחשב שambil בחשבונו את גודל האגם ועומקו, את צפיפות המים ואת עצמת רuidת האדמה, מלמד שלרuidות חזקות מאוד, במוגנותודה מעל 7, יש אנרגיה מספיקה לערבוב של גוף המים. שכבות גבש נמצאו מעל אחת עשרה מטוק כשלושים שכבות רסק שנוצרו במקשי תצורת הלשון בתקופה של כ-55,000 שנה. סביר ששכבות רסק אלו נוצרו ברuidות אדמה חזקות יותר, שהמוקד שלהם היה באגן ים המלח (Begin et al., 2005). הרuidות חזקות גרמו גם לשבירה של נתיפים במערות בהרי יהודה הנמצאות כ-50 ק"מ מים המלח (Kagan et al., 2005). חוקרי הנטיפים רואים בזוהות בין זמן השבירה של הנטיפים לבין ההיווצרות של חלק משכבות הרכס בליסאן חיזוק משמעותית לפירוש ומציעים שסבירה הנטיפים במרחב גדול יהסת ממוקדי הרuidות התרחשה ברuidות חזקות יותר. התיעוד במערכות מגע עד כ-280,000 שנה לפני זמננו, יחד עם משקעי האגמים מתකבל כאן חלון הזמן הארוך ביותר בעולם שדרכו ניתן לבחון את הופעתן של רuidות האדמה. התיעוד הארוך הזה מגלה שרuidות האדמה אין מופיעות בפייזר אחד לארך הזמן. רuidות האדמה מעל מגנותודה 6 הופיעו במקבצים שאורכם כעשרה אלפי שנים וביניהם תקופות

של שקט ייחסי (איור 4). בזמן המקבץ הופיעו הרuidות במרוחה ממוצע של כ-700-800 שנה, ובין המקבצים היה המרווח הממוצע כ-3,000 שנה (Marco et al., 1996).

נוסף על המחקרים המבוססים על תצפיות שדה ישירות נמצאו שכבות רסק דקotas שניתן לראותן באמצעות מיקרוסקופ (Migowski et al., 2004). השכבות הדקotas, שנראות אך בkowski, מאפשרות לתעד את ההופעה של רuidות אדמה רחוקות באופן ייחסי מאגן ים המלח, כאשר אם היו חזקות הרי שהשפעתן על הקרקע הייתה חלשה, שכן עצמת הרuidות דועכת עם המרחק מהמקור.



איור 4: פיזור שכבות הרסק לאורך זמן ההיווצרות של תצורת ליאסן מיוצג על ידי מעוינים לבנים, כל מעוין מייצג שכבה אחת. הגרף מציג ספירה של מספר השכבות בחולן זמן של 5,000 שנה המוסט ב-2,000 שנה בין נקודות עוקבות. בהנחה שכל שכבה כזו מעידה על רuidות אדמה, רואים שלאורך תקופה הרישום על ידי משקעי אגם הלשון רuidות האדמה מופיעות בשני מקבצים שבהם המרווחים בין הרuidות קטנים, ובין המקבצים יש תקופות שבהן המרווחים גדולים באופן משמעותי.

## חול הופך לבוץ

שכבות הרטק שתוארו כאן נוצרו בקרקעית האגם. על התופעות שקרו בשולי האגם אנו למדים משכבות חול שהובל בשיטפונות והורבד במניפת הסחף של נחלים גדולים, שם מהירות הזרימה אטית והמים אינם מסוגלים עוד לשאת את הגרגרים הכבדים. בזמן ההרבדה גרגרי החול מסתדרים באופן אקריא וביניהם נשארים רוחמים וחלליים. בקרבת החוף, בעומק רדוד של עד כמה מטרים בודדים, הרוחמים הללו מלאים במים שמקורם בנחל או מים שחוזרים מהאגם ליבשה. בזמן רעידות אדמה והזעועים גורמים לאגררים להסתדר בצורה צפופה יותר כך שהrhoוחמים ביניהם קפינים והמים נדחפים החוצה ובעיקר כלפי מעלה. שכבות החול העליונות הופכות למשה לבוץ נזולי, ומכאן שמם של התהליך הנזולה. השכבות העליונות הרוויות במים מתעוזות באופן מיוחד ואופייני לתהליך זה (איור 5). תהליך זה מוכר גם מריעיות אדמה מודרניות רבות שבתן רואים התפרציות של בוץ רווי במים אל פני השטח. מאוחר יותר השכבות המעוותות נקבעות על ידי המשך ההשקעה, אבל ניתן להזות אותן אחורי שמן נחשפות, למשל במקומות שנחלים חתרו לעומק. במניפת הסחף של נחל דרגה ונחל צאלים נחקרו שכבות כאלה, המלמדות על התורחשותן של ריעיות אדמה במגנטודה גדולה מ-5.5 (Enzel et al., 2000; Ken-Tor et al., 2001).

## סדק ענק

סדקים שנפערים מפני השטח לפני העומק מוכרים בקרבת המוקדים של ריעיות אדמה מודרניות. הם מוזכרים גם בדיווחים על ריעיות אדמה היסטוריות. סדקים גדולים במיוחד חווudo בשמי היליסאן, במיישור עמיין ולמרגלות מצדה. רוחב הסדקים מגיעה עד כחצי מטר וגובהם עד 40 מטרים. הסדקים מלאים בחרסיות וחול ובמספר מקומות גם בגושים של תצורת ליסאן שנפלו מקיימות הסדקים פנימה (איור 6). אף על פי שسدקי ענק מצטיררים אצל חלק מהציבור כתופעה עיקרית המלווה ריעיות אדמה, למעשה זו תופעה נדירה באופן יחסי. היא קיימת בעיקר בקרבת המוקדים של ריעיות חזקות במיוחד, למרחק שאין עולה על מספר עשרות קילומטרים.



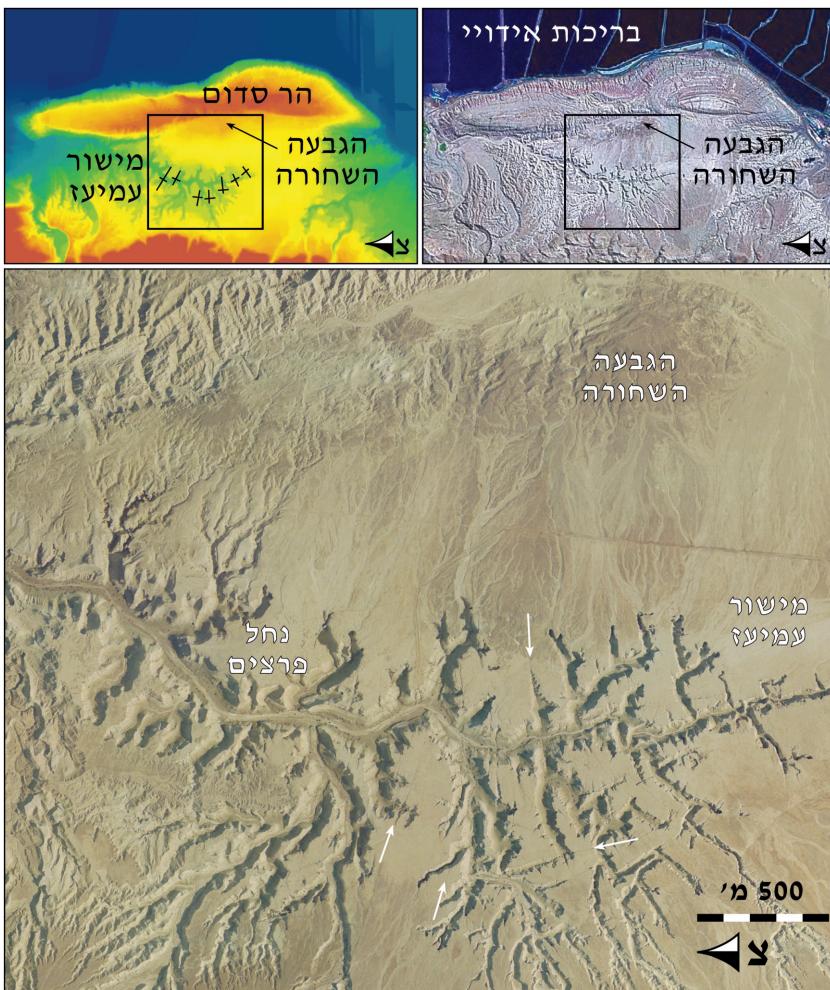
איור 5: רעידות אדמה גורמות לגוררים בשכבות חול להסתדר בצורה יותר קומפקטיבית, כך שהחללים שבין הגרגירים קטנים. אם החללים מלאים במים, הם נסחטים וועלם כלפי מעלה. השכבות העליונות הופכות לבוץ נוזלי ולא יכול שורם וממתעתות בצורה אופיינית, כפי שראויים בתצלום. תהליך זה, המכונה 'הנולה', מאפשר זיהוי של רעידת אדמה שהתרחשה אחרי השקעת השכבה המעוותת ולפניה השקעת השכבה שמעליה. השכבה העליונה ביזור אינה מעוותת כי היא שקרה אחרי הרעידה.

במערכת הסדקים שבמישור עميין יש קבוצה המאפיינת בסידור רדיאלי, כך שהמישורים של הסדקים נפגשים באזור מוצמצם המכונה 'הגבעה השחורה', סמוך להר סdom (איור 7) (Marco et al., 2002). השכבות בגבעה השחורה מקומותות בצורת כיפה, מבנה המuid על דחיפה כלפי מעלה במרכז הכיפה. ישראל וק פירש זאת כדודות לגוף מלך העולה מתחת לגבעה (Zak, 1967). המלח עולה לאטו, כסנטימטר בשנה (וינברגר ובניון, 2005), ועלילית המלח מביאה למתייחת השכבות עד למצב שבו די בזועזע קל כדי לגרום להן להיסדק. סביר שהזועזעים שחוללו רעידות אדמה חזקות באזור ים המלח אפשרו למאיצים שמנעל המלח לسدוק את הסלע המתוח. הזועזע עשוי לגרום לסידוך ולשחרור



איור 6: סדק שחוזה את תצורת ליסאן ונחשף במצוק של נחל פרצים במישור עמיין. המילוי החול-חרסיתי זרם בmahירות ומילא את הסדק מיד עם פתיחתו בזמן התרחשותה של רעידת אדמה. היצירה והמילוי של סדק זה וسدקים רבים דומים קדמה להתחתרות נחל פרצים שחשפה אותם.

המאמצים שהיו צבורים בסלע, אולם יש למצוא ראיות לקשר שבין שחזור המאמצים לבין הרעדיה בכדי להראות שאכן פועל כאן מגנון מסוילב. מכיוון שהסלעים של תצורת הליסטן חלשים ופריכים מאוד, לא סביר שהسدקים עמדו פתוחים במשך זמן ארוך עד שהתמלאו בעלי שהקירות שלהם יתמוטטו. לכן מסיקים שהמילוי החרסיתי-חולי נוצר יחד עם היוצרים הסדק (Levi et al., 2006a; 2006b). אם כך, נשאלת השאלה: מה מקורו?



איור 7: למעלה: מימין מוצג מיקום אזור המחקיר בשולי ים המלח, משמאל מוצגת הטופוגרפיה עם תיאור סכמטי של הכוונים השולטים של הסדקים במישור עמיינע. למטה: התצלום אוויר מראה את מישור עמיינע ונחל פרצחים. חצים לבנים מראים כמה סדקים, כמו זה שמצוג באיור 6, ולאורך התפתחו יובלים של הנחל. קבוצה גדולה של סדקים דומים מסודרת כרדיויסים של מעגל שמרכזו באזור המכונה 'הגבועה השחורה'. שם עולה מלח שלוחץ את השכבות שמעליו כלפי מעלה. האורור שסבב המלח העולה נמתה בכל מקום בניצב לדיס, מתייחה שהכתיבה את ציוני הסדקים. הסדקים נוצרו בזמן שריעידות אדמה ועוועו את האורור ומולאו בחרסיות וחול ש'התנול' במהלך הרעידה.

כדי לבדוק את כיוון הזרימה של חומר המילוי בסדקים נבחנה צורת הסידור של הגרגרים שבו. השיטה שבאמצעותה אоторה צורת הסידור מtabset על ההנחה שגרגרים מאורכים יסתדרו כך שהמד האורך שלהם יקבל לכיוון הזרימה, בדומה לגוזעי עצים שנחטבו ונשלחו לצוף במורד נהר עד למנסרה. את המד האורך ניתן למצוא על ידי מדידת הכוון שבו החומר רוכש שדה מגנטית בקלות. המדידות מתבססות על העובדה שקל למגנט גוף מאורך במקביל לציר האורך שלו וקשה למגנט גוף כזה במקביל למדוד הקצה. בסדרת ניסויים מפעילים שדה מגנטית על דוגמתם של בכיוונים שונים ומודדים באיזה כיוון נרכש המגנטות בייעילות רבה יותר ובאיזה כיוון הוא נרכש בkowski. בעבודת הדוקטורט של צפריר לוי שוחזרו בשיטה זו כיווני הזרימה של הגרגרים במילוי של סדקים רבים. תוצאות המדידה מלמדות שברוב המקרים החומר זרם מהעומק למעלה ולאורכם של הסדקים, ורק בחלק העליון ביותר הוא מילא את הסדקים מלמעלה. ורימה כזו אפשרית רק כאשר הסדימנט נמצא במצב בוצי, רווי במים. ההשילוב של משטר המאמצים שיוצרה עליה המלח (זהינו לחיצה לאורך קווים רדייאליים ומתייחה בכיוונים מסוימים למעגלים שمرוכזים בגוף המלח) יחד עם יעוזים בזמן רעידות אדמה מסביר את אופן ורימת החרסיות. שכבות חרסיתות בעומק תצורת ליסאן עברו הנולה, והלחיצים שנוצרו גרמו לזרמת החומר בסדקים שנפערו בכיוונים שהוכתו על ידי המאמצים הרדייאליים (Levi et al., 2006a; 2006b). הבדיקה המתואר כאן התרחש לאחר ירידת המפלס של אגם ליסאן ולפניהם השקעת סחף על חלק ממישור עמיין, מישור שהיה קרקעית האגם בטרם ירידת המפלס לפני 15,000 שנים. מערכת הסדקים מהויה אפוא ביטוי נוסף לרעידות אדמה סמוך למישור עמיין. עם ירידת המפלס החלה גם היוצאות האפיקים של נחל פרצים, ונראה שהחלק ניכר מהם עוקב אחר סדקים (איור 7).

## סיכום

התוצאות במשקעי ים המלח והאגמים שקדמו לו לימדו אותנו לשכבות שעברו ריסוק או הנולה, כמו גם בסדקיו הענק, עדויות לרעידות אדמה חזקות שהתרחשו בתקופות עתיקות. ההתאמה בין התיאורים הכתובים של הרעידות שקרו באזור בתקופה ההיסטורית לבין הרישום בשכבות הסלע מאשררת את

הפיירש שנייתן להופעת שכבות הרכס במשקעי ים המלח (Ken-Tor et al., 2001) ומאפשרת את תיעוד הרעידות החזוקות האחורה בזמן אל תקופות פרה-היסטוריה של עשרות ומאות אלפי שנה לפני זמננו. תופעות אלה ודומות להן משמשות כלי חשוב בתיעוד רעידות אדמה גם במקומות אחרים בעולם.

המחקרדים הפלואוסיסמיים שעסקו באופן פיזור רעידות האדמה בזמן מלמדים שהן אינן מופיעות בדגם מוחורי. גילינו שבגלל תופעת המקבצים, חישוב הזמן הממוצע בין רעידות חזקות על פי הצפיפות בפרק זמן הקצר מכ-20,000 שנה אינו נותן את המרווח הממוצע הנכון לפיקי זמן ארוכים יותר. ההופעה במקבצים (במוצע של פרקי זמן) מוכרת גם מקומות אחרים בעולם. כדוגמה למקבץ בפרק זמן קצר בהרבה ניתן להביא את מקבץ רעידות האדמה החזוקות שהתחילה בדצמבר 2004 סמוך לאי סומטרה שבאינדונזיה, שם התרחשו לאחרונה עשרות רעידות במagnitude 7 ומעלה. אילו ככל המידע על סומטרה רק את פרק הזמן שuber מאז 2004 ועד היום, היה מתאפשר ממוצע של זמן חזרה שונה לחולטן מזה שהוא מתאפשר אילו נלקחו בחשבון אלפי השנים האחרונות. המידע משקעי האגמי מראה שריעידות האדמה באזור ים המלח מופיעות במקבצים שאורכם כעשרות אלפיים שנה, וסביר מאד שיש מקבצים גם בפרק זמן קצרים יותר, כפי שראויים במקומות אחרים.

סדרת רעידות האדמה המתועדת במשקעי אגן ים המלח מעידה על יציבות התהיליך בפרק זמן של עשרות אלפי שנים (Begin et al., 2005), דהיינו רעידות אדמה ימשיכו לקרות באזור ועלינו להתכוון לכך בתכנון והקמה של מבנים.

### האם ידיעת העבר מאפשרת חיזוי רעידות אדמה עתידיות?

רעידות האדמה המתועדות בסלעי האזור ובתיירותים ההיסטוריים מלמדות שההופעה הייתה שכיחה בעבר, ולכן אין ספק שיקרו רעידות אדמה גם בעתיד. כשבועסקים בחיזוי העתיד ניתן לפרק את השאלה למספר שאלות משנה. כך אנו יכולים, על פי המידע שהושג בחקר הרעידות בעבר, לחזות במידה רבה של ביטחון את האזורים שבהם צפויות להתרחש רעידות. ניתן להעיר גם את המקומות שבהם צפויות להתרחש הנזלה או תופעות אחרות העולות לגרום נזקים, כגון גליישות קרקע ומפולות סלעים או גלי צונמי, ולתכנן בהתאם לכך את

הבנייה באור. אנו יודעים לבנות תרחישים של רעידה עתידית בכל מקום לאורך ההעתקים הפעילים ולהעירק את היקף הפגיעות. לעומת זאת לא ניתן לבדוק את הזמן והמקום של רעידה עתידית. ניתן כМОון לחשב את הסתברויות להתרחשויות הרעידה הבאה, אך לא ניתן על סמך סדר הופעה של הקודמות לה לחזות בדיקות זמן וזמן התרחשותה. בודאי שלא ניתן לחזות את זמן הרעידה הקרובה בדיקות הנדרש לצורך זהה וקריאה לתושבים לצאת מהבתים כדי למנוע פגיעה בנפש. יכולתו לחזות רעידות אדמה דומה ליכולת לחזות תאותות דרכים: ניתן לומר במידה גובהה של ודיות שמהר תתרחש בארץ תאונות דרכים, אבל את הזמן והזמן שלא יוכל רק להעירק על סמך התפלגות הסטטיסטית של התאותות שהיו בעבר. ידועים כבישים ששיעור התאותות בהם גבוהה יחסית לאחרים, אך עדין אין אפשרות לדווח מתי תהייה שם התאונה הבאה. באותו מידע ניתן להעירק על סמך העדויות הפלואיסטיות שבמוצע מדי 1,000 שנה מתרחשת באור יום המלח רעידת אדמה במגניטודהGD של מילוי ו מדי 300 שנה רעידה במגניטודהGD של מילוי. מכאן מסיקים שיש GD של מילוי ו מדי 300 שנה רעידה במגניטודהGD של מילוי. מכאן מסיקים שיש GD של מילוי ו מדי 300 שנה רעידה במגניטודהGD של מילוי.

### רשימת מקורות וקריאה נוספת נוספת

- בן- אברהם, צ' ולו, מ', 2008, 'המבנה וההתפתחות של אגן ים המלח', מלח הארץ 3:17-1.
- גרפונקל, צ', 2006. 'הtektonika של טרנספורם (בקע) ים המלח' מלח הארץ 2:20-1.
- וינברג, ר' ובני, ב'ז, 2005. 'מה ראתה אשת לוט? עליית מחדר המלח של הר סdom בשני מיליון השנה האחרונות', מלח הארץ 1:18-1.
- Agnon, A., Migowski, C. & Marco, S. 2006. 'Intraclast Breccia Layers in Laminated Sequences: Recorders of Paleo-Earthquakes', Enzel, Y., Agnon, A. & Stein, M. (Eds.), *New Frontiers in Dead Sea Paleoenvironmental Research*, Geological Society of America Special

- Publication:* 195–214.
- Begin, B. Z., Steinberg, D. M., Ichinose, G. A. & Marco, S. 2005. ‘A 40,000 Years Unchanging of the Seismic Regime in the Dead Sea Rift’, *Geology* 33: 257–260.
- Begin, Z. B., Ehrlich, A. & Nathan, Y. 1974. ‘Lake Lisan, the Pleistocene Precursor of the Dead Sea’, *Geological Survey of Israel Bulletin* 63: 30.
- Doig, R. 1991. ‘Effects of Strong Seismic Shaking in Lake Sediments, and Earthquake Recurrence Interval’, Témiscaming, Quebec: *Canadian Journal of Earth Sciences* 28: 1349–1352.
- Ellenblum, R., Marco, S., Agnon, A., Rockwell, T. & Boas, A. 1998. ‘Crusader Castle Torn Apart by Earthquake at Dawn, 20 May 1202’, *Geology* 26: 303–306.
- Enzel, Y., Kadan, G. & Eyal, Y. 2000. ‘Holocene Earthquakes Inferred from a Fan-delta Sequence in the Dead Sea Graben’, *Quaternary Research* 53: 34–48.
- Flavius, J. 1982. *The Jewish war*. Grand Rapids, Michigan: Zondervan.
- Freund, R. 1965. ‘Structural Consequences of Dead Sea Strike-Slip Fault’, *Israel Journal of Earth Sciences* 13:163.
- Garfunkel, Z. 1981, ‘Internal Structure of the Dead Sea Leaky Transform (Rift) in Relation to Plate Kinematics’, *Tectonophysics* 80: 81–108.
- Hazan, N., Stein, M., Agnon, A., Marco, S., Nadel, D., Negendank, J. F. W., Schwab, M. J. & Neev, D. 2005. ‘The Late Quaternary Limnological History of Lake Kinneret (Sea of Galilee), Israel’, *Quaternary Research* 63: 60–77.
- Kagan, E. J., Agnon, A., Bar-Matthews, M. & Ayalon, A. 2005. ‘Dating Large Infrequent Earthquakes by Damaged Cave Deposits’, *Geology* 33: 261–264.
- Ken-Tor, R., Agnon, A., Enzel, Y., Marco, S., Negendank, J. F. W. & Stein, M. 2001. ‘High-Resolution Geological Record of Historic Earthquakes in the Dead Sea Basin’, *Journal fo Geophysical Research* 106: 2221–2234.

- Levi, T., Weinberger, R., Aifa, T., Eyal, Y. & Marco, S. 2006a. 'Earthquake-Induced Clastic Dikes Detected by Anisotropy of Magnetic Susceptibility', *Geology* 34: 69-72.
- Levi, T., Weinberger, R., Aifa, T., Eyal, Y. & Marco, S. 2006b. 'Injection Mechanism of Clay-Rich Sediments into Dikes During Earthquakes', *Geochemistry Geophysics and Geosystems* 7: Q12009 (doi:10.1029/2006GC001410).
- Machlus, M., Enzel, Y., Goldstein, S. L., Marco, S. & Stein, M. 2000. 'Reconstruction of Low-Stands of Lake Lisan Between 55 and 35 kyr', *Quaternary International* 73/74: 137-144.
- Marco, S. & Agnon, A. 1995. 'Prehistoric Earthquake Deformations near Masada, Dead Sea Graben', *Geology* 23: 695-698.
- Marco, S., Stein, M., Agnon, A. & Ron, H. 1996. 'Long Term Earthquake Clustering: a 50,000 Year Paleoseismic Record in the Dead Sea Graben', *Journal of Geophysical Research* 101: 6179-6192.
- Marco, S., Weinberger, R. & Agnon, A. 2002. 'Radial Clastic Dykes Formed by A Salt Diapir in the Dead Sea Rift, Israel', *Terra Nova* 14: 288-294.
- Migowski, C., Agnon, A., Bookman, R., Negendank, J. F. W. & Stein, M. 2004. 'Recurrence Pattern of Holocene Earthquakes along the Dead Sea Transform Revealed by Varve-Counting and Radiocarbon Dating of Lacustrine Sediments', *Earth and Planetary Science Letters* 222: 301-314.
- Stein, M., Starinsky, A., Katz, A., Goldstein, S., Machlus, M. & Schramm, A. 1997. 'Strontium Isotopic, Chemical and Sedimentological Evidence for the Evolution of Lake Lisan and the Dead Sea: *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61: 3975-3992.
- Zak, I. 1967. 'The Geology of Mount Sodom', Ph.D. Dissertation, The Hebrew University, Jerusalem.