

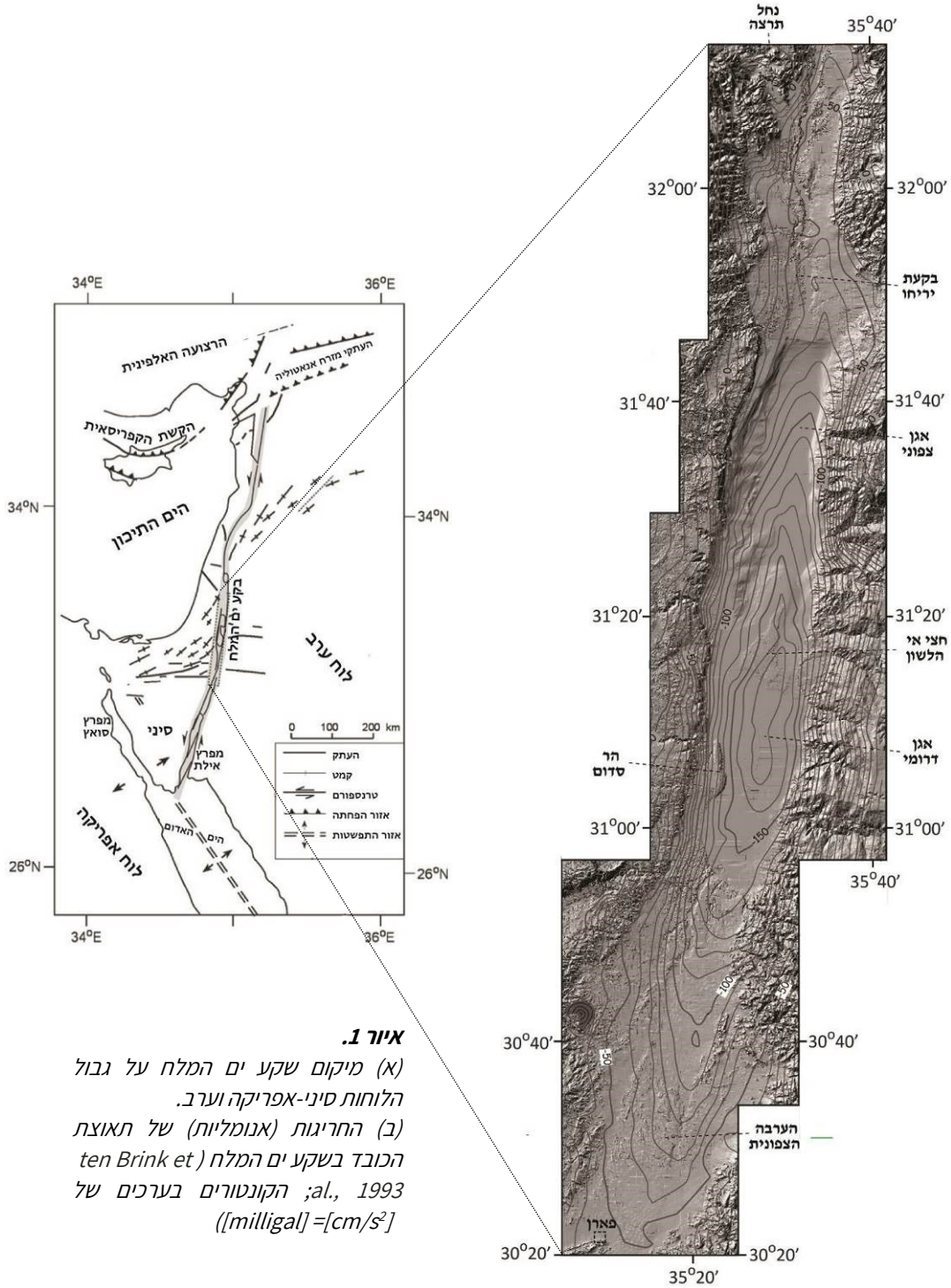
האגן הדרומי של ים המלח

גדי שמיר

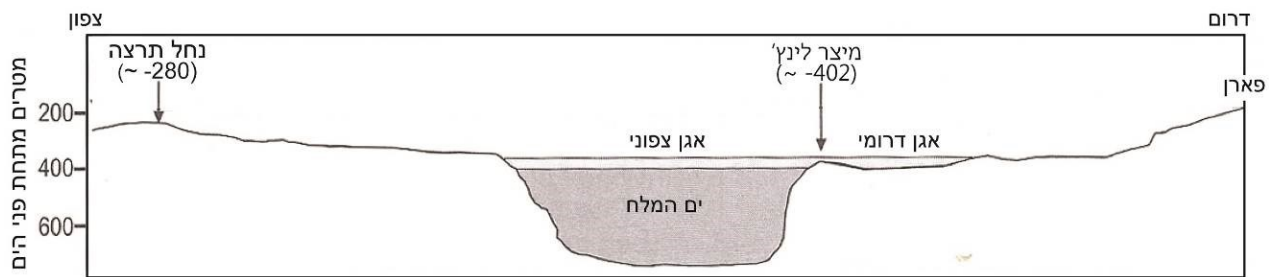
היסטוריה סדימנטרית

השקע הסדימנטרי של ים המלח (איור 1) משתרע לאורך כ-230 ק"מ, מעמק הירדן המרכזי (אזור ואדי מליח) עד למרכז הערבה (אזור פארן). במרכז השקע נמצא אגן ים המלח (איור 2), המתחלק לשניים: אגן צפוני, הכולל את גוף המים הטבעי, ואגן דרומי, הכולל את בריכות האיוד של מפעלי האשלג הישראליים והירדניים. הערכת גודלו, צורתו ועומקו של שקע ים המלח מתקבלת ממיפוי הסטיות (אנומליות) בשדה הכבידה של כדור הארץ (מסגרת 1), הנגרמות, בין השאר, בגלל המשקל הסגולי הנמוך יותר של סלעי המילוי של השקע הסדימנטרי יחסית לסלעים שסביבו. בעוד שטור הסלעים סביב השקע כולל מרכיב עיקרי של סלעים קרבונטיים קשים (בעיקר גיר ודולומיט) בעלי צפיפויות אופייניות של 2.5 - 2.8 גר' לסמ"ק, סלעי המילוי (איור 3) כוללים בעיקר סחף נחלים (סילט, חול, חרסית, קונגלומרט) ומשקעים אגמיים (חואר, קרבונטים, מלח, גבס) בעלי צפיפויות אופייניות של 1.7 - 2.5 גר' לסמ"ק. על פי מפת האנומליות הגרביטריות (איור 1), החלק העמוק ביותר (לפחות 6 ק"מ) של השקע הסדימנטרי מצוי מתחת לאגן הדרומי של ים המלח, שכיום אין בו אגן טופוגרפי. לעומת זאת, בסיס השקע הטופוגרפי של ים המלח מצוי באגן הצפוני של ים המלח (מיקום האגם הנוכחי), כפי שמראה חתך טופוגרפי-בתימטרי בכוון צפון-דרום (איור 2). האגן הטופוגרפי הצפוני שעומקו כ-300 מטר, כלומר כ-700 מטר מתחת פני הים, מהווה את בסיס הסחיפה של מערכת הנחלים המתנקזת לים המלח. מכאן שמוקד השקיעה הטקטונית הקדומה, החל מהמיוקן האמצעי-מאוחר (לפני כ-16 מיליוני שנים), היה מתחת לאגן הדרומי הנוכחי. שקיעה זו של האגן הפכה אותו ל"מלכודת" לסדימנטים נחליים-קלסטיים (בעיקר חול וקונגלומרט) של תצורת חצבה, שהובלו לתוכו במערכת נחלים, בעיקר ממזרח ומדרום-מזרח מערבה לכוון הים התיכון. כתוצאה מכך הצטבר באגן הדרומי חתך עבה (למעלה מ-3 ק"מ) של תצורת חצבה, כפי שהתגלה בקידוחי נפט באזור הר סדום. הופעת תצורת חצבה גם בנגב מלמדת שבתקופות בהן קצב הובלת הסדימנטים עלה על קצב השתפלות האגן התאפשרה זרימה רצופה מאזור חצי האי ערב מערבה אל הנחלים והשקעים הטקטוניים בנגב (לדוגמא, גרבן כרכום ומישור רותם).

שינוי דרמטי בהיסטוריה הסדימנטרית של האגן התרחש, כנראה בסוף המיוקן (זק, Matmon et al., 1967; al., 2014), עם חדירת מי הים התיכון לבקע ים המלח כנראה דרך עמק יזרעאל. החדירה התרחשה



בתנאים של אידיוי אינטנסיבי ותחלופת מים מוגבלת ויצרה את "לגונת סדום" (זק, 1967), שהיא המקור הראשוני לכל גופי המים שהתקיימו מאז בבקע ים המלח. האינטראקציה של מי הלגונה עם סלעי הסביבה הקרבונוטיים סביב אגן ים המלח אחראית להרכב הסיידן-כלורידי (Ca-Cl) של תמלחת ים המלח, ולהחלפת גיר בדולומיט בסלעי הסביבה (סטרינסקי, 1974). ההמלחה הנמשכת של מי הלגונה



איור 2. פרופיל טופוגרפי-בתימטרי סכמתי בכון צפון-דרום לאורך שקע ים המלח (Bookman et al., 2006).

מסגרת 1: אנומליות בשדה הכובד

כוח המשיכה (גרביטציה) הפועל בין כל שתי מסות מתבטא על פני כדור הארץ בתאוצת הכובד. חוסר האחידות של צורת כדור הארץ ושל הרכבו גורמת לחריגות (אנומליות) קטנות מן הערך הממוצע של תאוצה זו (9.81 מ'שנ^2), לכן מדידתן מאפשרת ללמוד על החריגות המקומיות מצורה והרכב אחידים. לשם כך נהוג להשוות את התאוצה הנמדדת לערכה הצפוי, אשר תלוי בקו הרוחב בו מתבצעת המדידה, וזאת בגלל צורתו הפחוסה של כדור הארץ. ערך צפוי זה יש עוד לתקן על מנת להתחשב בתופעות הבאות:

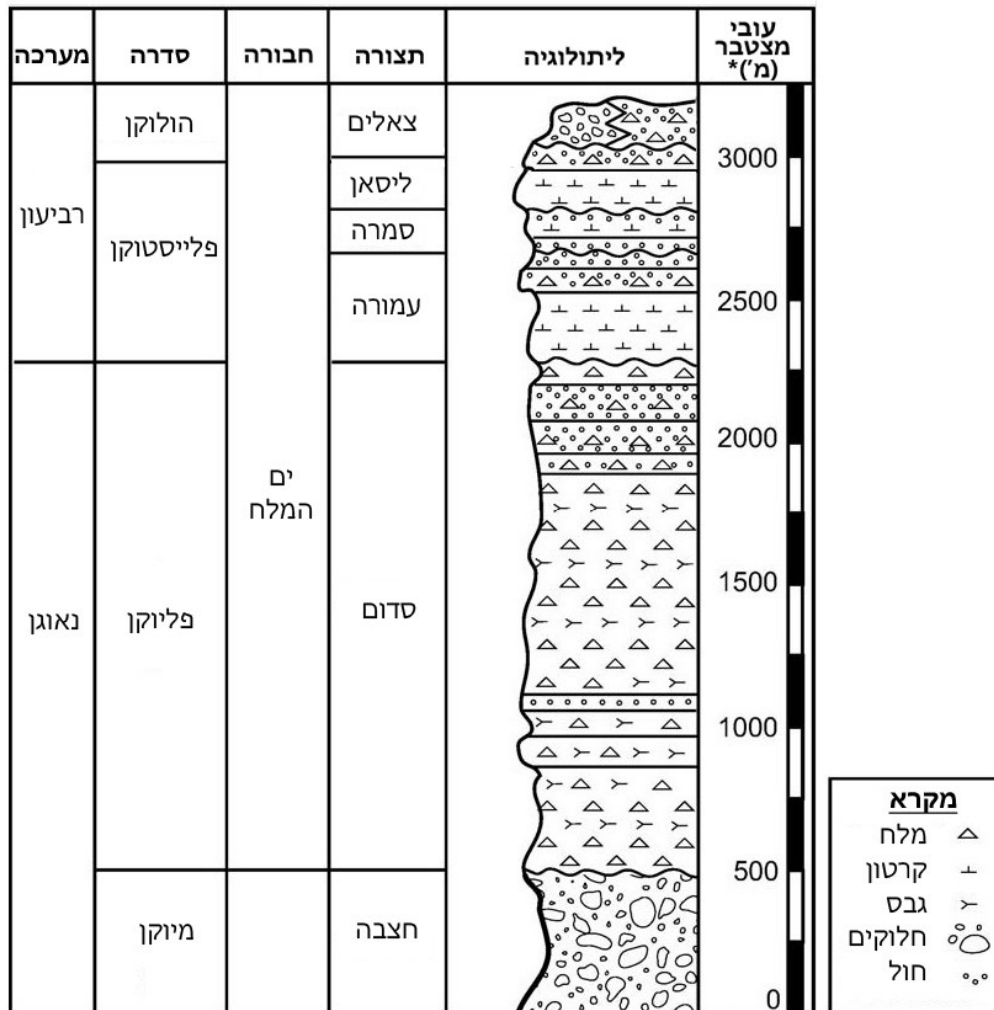
(א) גובה נקודת המדידה מעל מפלס פני הים, שהוא מפלס הייחוס לשדה הכובד (תיקון "אוויר חופשי", free air correction).

(ב) משיכת הגרביטציה של הסלעים הנמצאים בין נקודת המדידה לבין מפלס פני הים (תיקון בוגה, Bouguer correction), בהנחה שהם בעלי צפיפות ממוצעת. באזורים בעלי טופוגרפיה חריפה יש להוסיף תיקון טופוגרפי.

יישום תיקונים אלה נותן את הערך המתוקן של תאוצת הכובד בגובה פני הים בקו רוחב מסוים. ההפרש בין ערך זה לבין הערך שנמדד בפועל מכונה אנומליית בוגה (Bouguer anomaly) והוא מבטא את עודף או חוסר משיכת הגרביטציה בנקודת המדידה הספציפית בגלל פיזור מסה בלתי אחיד בתת הקרקע. אנומליית בוגה שלילית מעידה שמסת הסלעים בעומק היא בעלת צפיפות נמוכה יחסית לסלעי הסביבה, כמו בשקע ים המלח (איור 1).

הובילה להשקעת חתך עבה (1,500 – 2,000 מטר) של סלעים אבפוריטיים (סלעי אידוי), בעיקר מלח, וכן סדימנטים קלסטים, גבס, פצלים ודולומיט (תצורת סדום). לפני כ-2.2 מיליון שנה החלו שכבות המלח של תצורת סדום לזרום ולעלות אל פני השטח לאורך מישורי העתקים (Weinberger et al.,)

(2006). הכוח המניע לעליה דיאפירית זו (מסגרת 2) היה עומס סלעי הכיסוי העליונים מגיל פליוקן-פליסטוקן שהצטברו במרכז האגן הדרומי ובאזור מישור עמיעז, וכוח הציפה של המלח הנובע מהפרשי הציפיות בין המלח לבין סלעי הכיסוי. עלית המלח לוותה בהטיית השכבות למצב אנכי, ויצרה את דיאפיר הר סדום, שהוא הדיאפיר היחיד החשוף באגן ים המלח (ומהבודדים בעולם). שכבות תצורת סדום האנכיות בחלקו התחתון של ההר מכוסות בסלעי חיפוי, הבנויים מהשאריות הבלתי מסיסות שנותרו אחרי שטיפת מרכיב המלח. סלע החיפוי נוצר בעת מעבר הדיאפיר דרך מפלס המסה של מי התהום המתוקים לפני כ-300,000 עד 100,000 שנה. עלית המלח החלה בקצב איטי של כ-3 מ"מ לשנה שהתגבר ל-5.5-7 מ"מ לשנה ב-14,000 השנים האחרונות, בעיקר עקב התעבות הכיסוי הסדימנטרי המספק את הכוח (משקל) המניע לזרימת וציפת המלח.

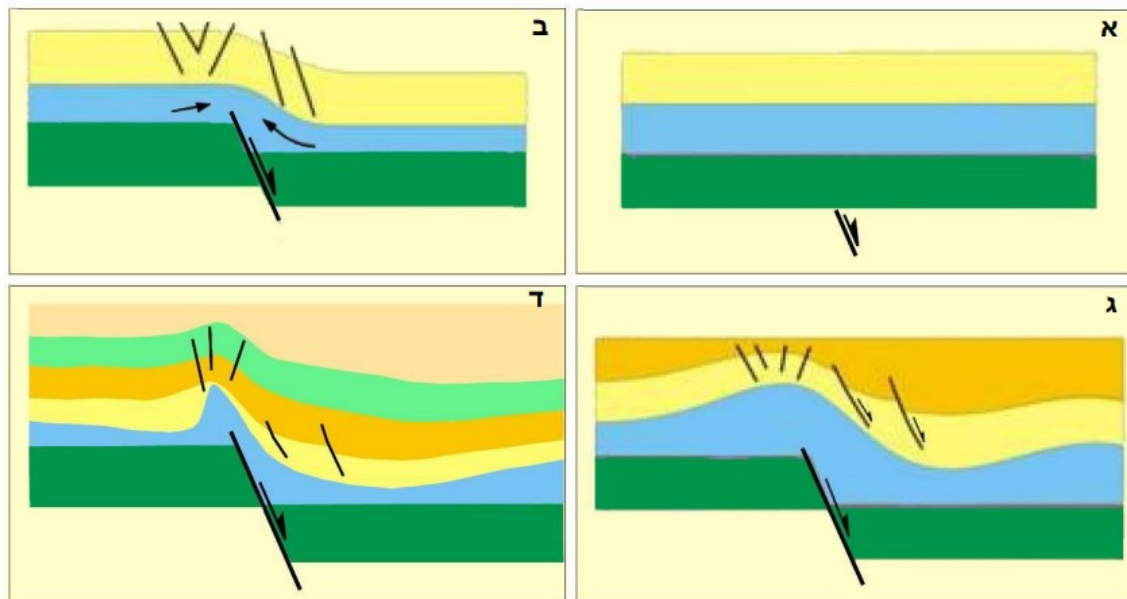


איור 3. חתך עמודי כללי של מילוי בקע ים המלח (על בסיס Waldman et al., 2009). העובי המצטבר מתייחס לתצפיות בשוליים המערביים של האגן.

נסיגת אגם סדום הותירה באגן ים המלח גוף מים אשר עובר מאז תנודות מפלס בשיעורים של עשרות ואף מאות מטרים. תנודות אלה נובעות בעיקר מהשפעת שינויי אקלים עולמיים (תקופות קרחוניות לחות לעומת תקופות בין-קרחוניות יבשות) על המשטר ההידרולוגי באגן הניקוז של ים המלח (Neev and Emery, 1967; Stein, 2001; Bartov et al., 2006; Bookman et al., 2006). לתנודות מפלס אלה חתימה סדימנטרית מובהקת: תקופות אקלימיות לחות אופיינו על ידי השקעת סדימנטים קלסטים וקרבונטים (בעיקר חואר, ארגוניט, סילט), ואילו תקופות אקלימיות יבשות אופיינו על ידי

מסגרת 2: דיאפיר מלח

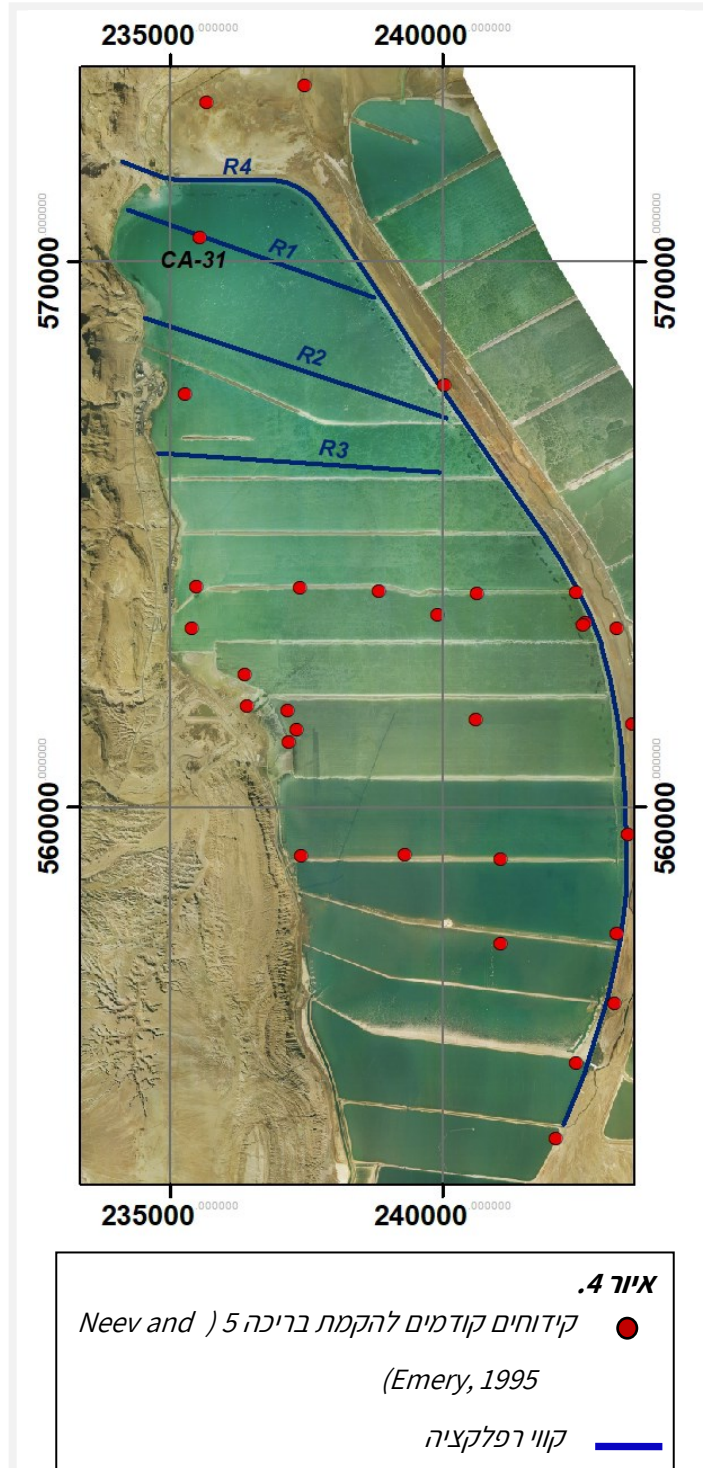
חדירה (אינטרוזיה) של מלח שהיה קבור בעומק החתך הסטרטיגרפי לתוך סלעים קשיחים וכבדים יותר שמעליו יוצרת דיאפיר (מחדר). הכוחות המניעים את מחדר המלח הם, מצד אחד, לחץ סלעי הכיסוי, ומצד שני כוח הציפה של המלח, הנובע מצפיפותו הנמוכה יחסית לסלעי הסביבה. חדירת הדיאפיר מתרחשת באזורים בהם סלעי הכיסוי סדוקים או שכבת המלח מעובה, וה"זרימה" (בטמפרטורות נמוכות יחסית לטמפרטורת ההתכה) מתאפשרת הודות לתכונות הפלסטיות שלו. באזורי העתקה נורמלית (איור A1), המלח זורם לתוך ובמעלה אזורי ההעתקה תחת לחץ סלעי הכיסוי משני צידי ונוצר אזור נרחב של דפורמציה משיכה (ductile shear zone) בכיסוי הסדימנטרי שמעליו. ככל שתהליך זה הוא בו-זמני לסדימנטציה בפני השטח, המילוי הסדימנטרי בצד הירוד המשתפל מתעבה ועלית מחדר המלח בכוח הציפה יוצרת קימור של השכבות מעל אזור ההעתק (איורים 5, 7, 10, 12).



איור A1

השקעת סדימנטים לגונריים (בעיקר מלח וגבס) עקב אידיוי מוגבר והרדדה, לעיתים עד כדי התייבשות מוחלטת, אי השקעה והסרה ארוזיבית של סדימנטים קודמים.

אגם עמורה, שהתקיים בפליסטוקן האמצעי-מאוחר, השקיע באגן הדרומי סדימנטים אגמיים, לגונריים

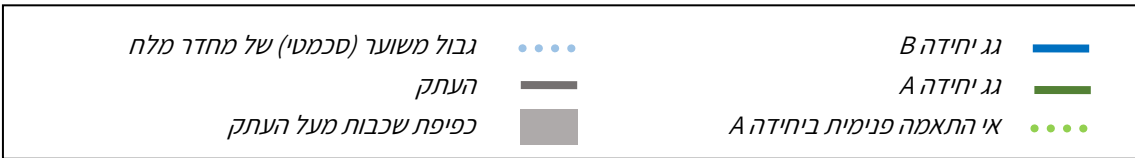
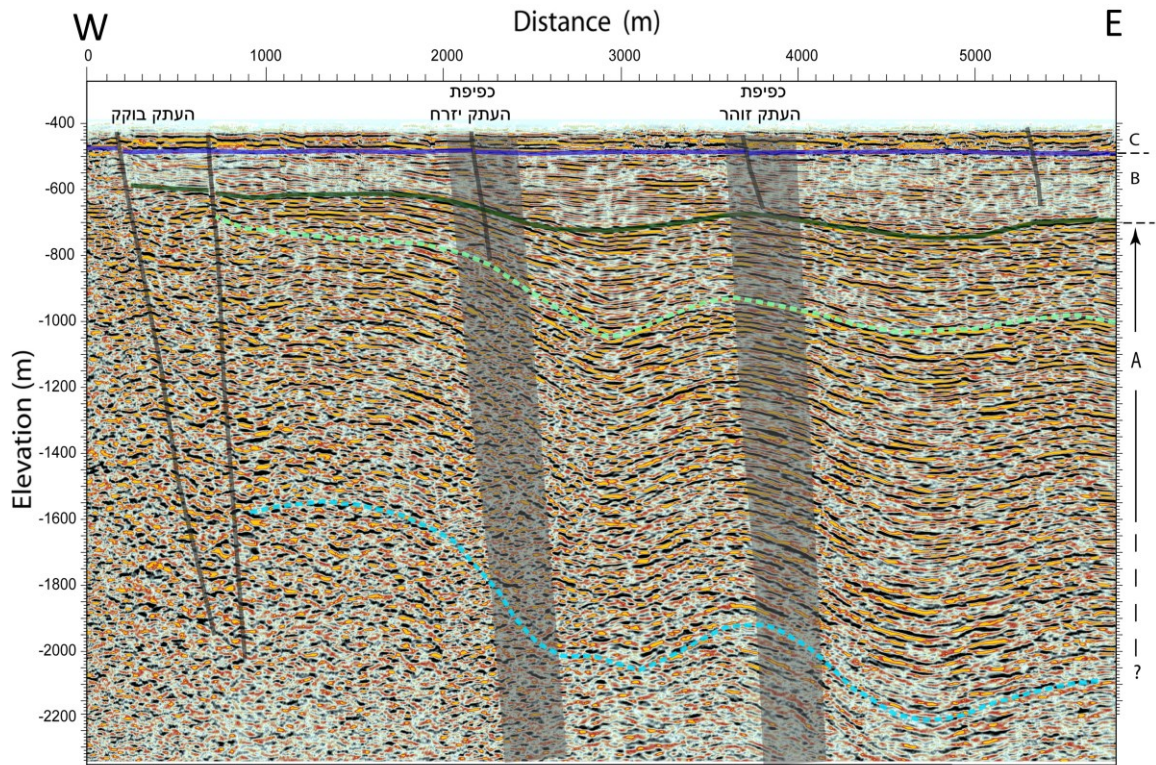


וקלסטיים בעובי של עד כמה אלפי מטרים (Torfstein et al., 2009). אחרי תקופת מעבר, שבה שקעה תצורת סמרה, הוצף האגן במי אגם הלשון, שהתקיים במהלך כל תקופת הקרח האחרונה (לפני כ-70 עד 14 אלפי שנה). לקראת סוף תקופה זו ירד מפלס האגם לסביבות גובה המעבר בין האגן הצפוני לדרומי (מיצר לינץ', בערך בגובה 402 מטר מתחת פני הים; איור 2) (Neev & Emery, 1967). מאחר וזרימת המים לאגן ים המלח מגיעה ברובה המכריע מצפון, אספקת המים לאגן הדרומי פוחתת באופן משמעותי בכל עת שמפלס האגם יורד מתחת לגובה מיצר לינץ'. משעה שפוחתת אספקת המים לאגן הדרומי מעלה תהליך האידיוי את ריכוז המלח במים ומושקע מלח. תנודות של מפלס האגם סביב גובה מיצר לינץ' הפכו שכיחות בתקופת ההולוקן (כ-11,000 שנה האחרונות), מה שמתבטא בשכיחות של שכבות מלח בחתך של תצורת צאלים שהושקעה בתקופה זו (Neev and Emery, 1967).

עדויות חשובות לגבי ההיסטוריה של האגן הדרומי מתקבלות מהדמיות רפלקציה סיסמית (מסגרת 3; איור 4) בחלקו הצפוני (איורים 5, 7, 10; ראה מיקום העתקים באיור 13).

בקרוב ראשון, הדמיות אלה מראות חתך הכלול שלוש יחידות סטרטיגרפיות עיקריות (מעתיק לצעיר): יחידה A: סידרה עבה של מחזירים סיסמיים בעלי אמפליטודה גבוהה ותדירות (צפיפות במימד האנכי) נמוכה יחסית. למרות האופי האחיד של היחידה היא כוללת אי-התאמות פנימיות שמתאימות להשקעה בסביבה אנרגטית, כנראה עם מרכיב נחלי-שטפוני. היחידה מקומטת באופן אחיד ולכן גג היחידה (מפלס ירוק באיור 5) יוצר תבליט משמעותי.

יחידה B: הופעה לא אחידה מחזירים סיסמיים מקוטעים בתוך אזורים בעלי החזרות סיסמיות חלשות ולא קוהרנטיות. יחידה זו שקעה על גבי ולתוך תבליט הקימוט שבגג יחידה A וכתוצאה קיימים בה הבדלי עובי משמעותיים, מכ-80-70מ' סמוך לשוליים המערביים של האגן עד למעלה מ-200מ' בשקעים שבמרכזו.

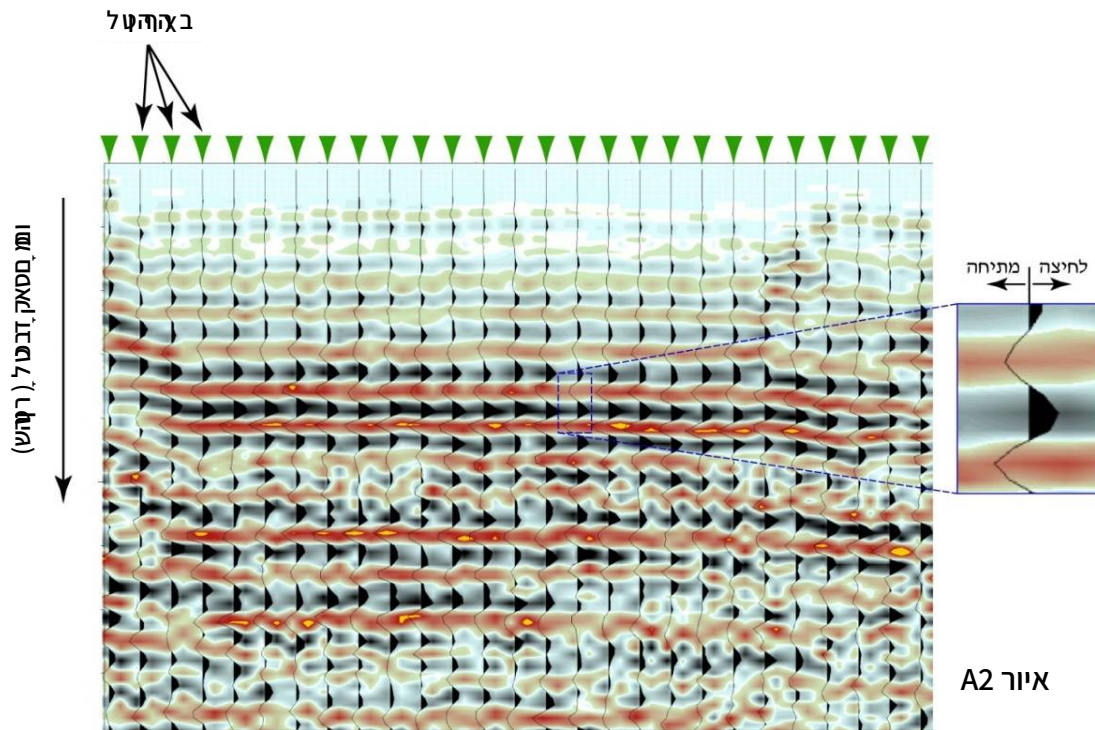


איור 5. חתך מיגרציה מפוענח של קו רפלקציה סייסמית R2 (ראה מיקום באיור 4).

מסגרת 3: רפלקציה סייסמית

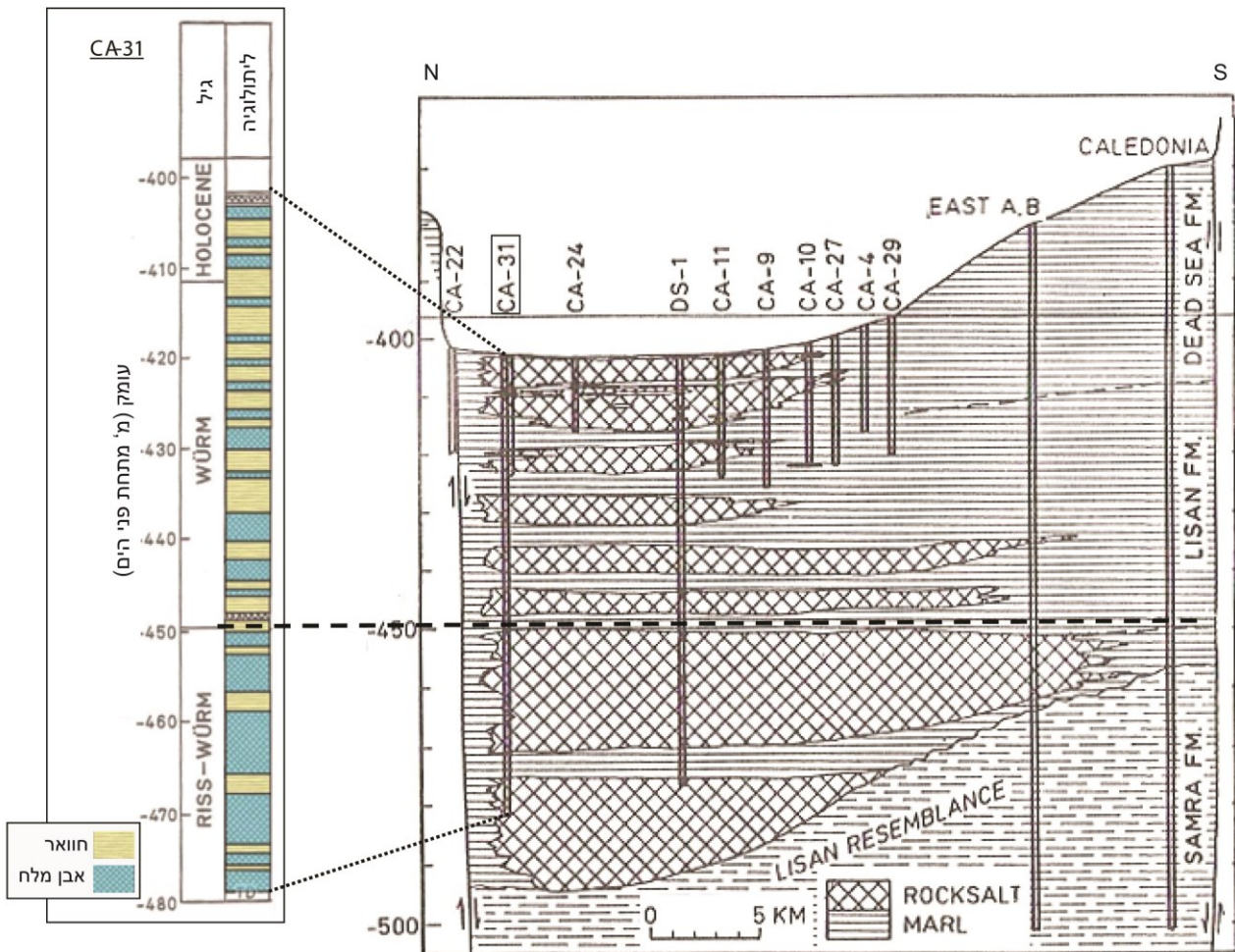
שיטה גיאופיזית להדמיית תת-הקרקע באמצעות מיפוי החזרות של גלי לחיצה סייסמיים (גלים העוברים בתווך מוצק) ממשטחי מגע בין גופים גיאולוגיים בעלי תכונות מכניות-אלסטיות שונות. משטחי מגע כאלה הם, למשל, מישורי שכוב, העתקים, מגעים בין גופים מגמתיים לבין סלעי משקע ועוד. שיטת הרפלקציה מנצלת את העובדות (א) שהרפלקטיביות (עוצמת החזרה) של המשטח גדלה ככל שההבדל בתכונות המכניות (בפרט צפיפות ומהירות מעבר הגלים) של שני הגופים גדול יותר, (ב) שצורת התקדמות הגלים מוכתבת על ידי חוקי האופטיקה המוכרים.

באופן מעשי, ההדמיה מתקבלת על ידי החדרת אנרגיה מכנית לתת-הקרקע (למשל על ידי ויברטור סייסי או חומר נפץ) ורישום הגלים החוזרים כפי שנקלטו בשורה של חיישנים (גאופונים) הפרוסים לאורך "קו סייסימי" (איור A2). גלי הלחץ הנקלטים בכל גאופן במשך מספר שניות מוצגים כפונקציה של הזמן (מרגע החדרת האנרגיה לקרקע ואילך), וככל שמשטח ה"מחזיר הסייסמי" עמוק יותר כך מתארך הזמן עד הגעת הגל החוזר אל החישן שבפני השטח. כתוצאה, המימד האנכי בהדמיות רפלקציה מייצג את זמן מעבר הגלים, וניתן לשחזר את צורת המגעים הגיאולוגיים על ידי אינטרפולציה בין נקודות בעלות מגמה (לחיצה או מתיחה) ועוצמת החזרה דומה (איור A2). ככל שהגאופונים צפופים יותר (במרווחים של מטרים בודדים) משתפרת ההפרדה (רזולוציה) ומצטמצמת אי הודאות של ההדמיה, אבל עומק ההדמיה מצטמצם. הדמיות עמוקות, מהסוג המשמש לחיפושי נפט, משתמשות בפריסה מרווחת יותר של גאופונים, לאורך קוים סייסימיים ארוכים, וכתוצאה עם רזולוציה נמוכה יותר (למשל איור 12).



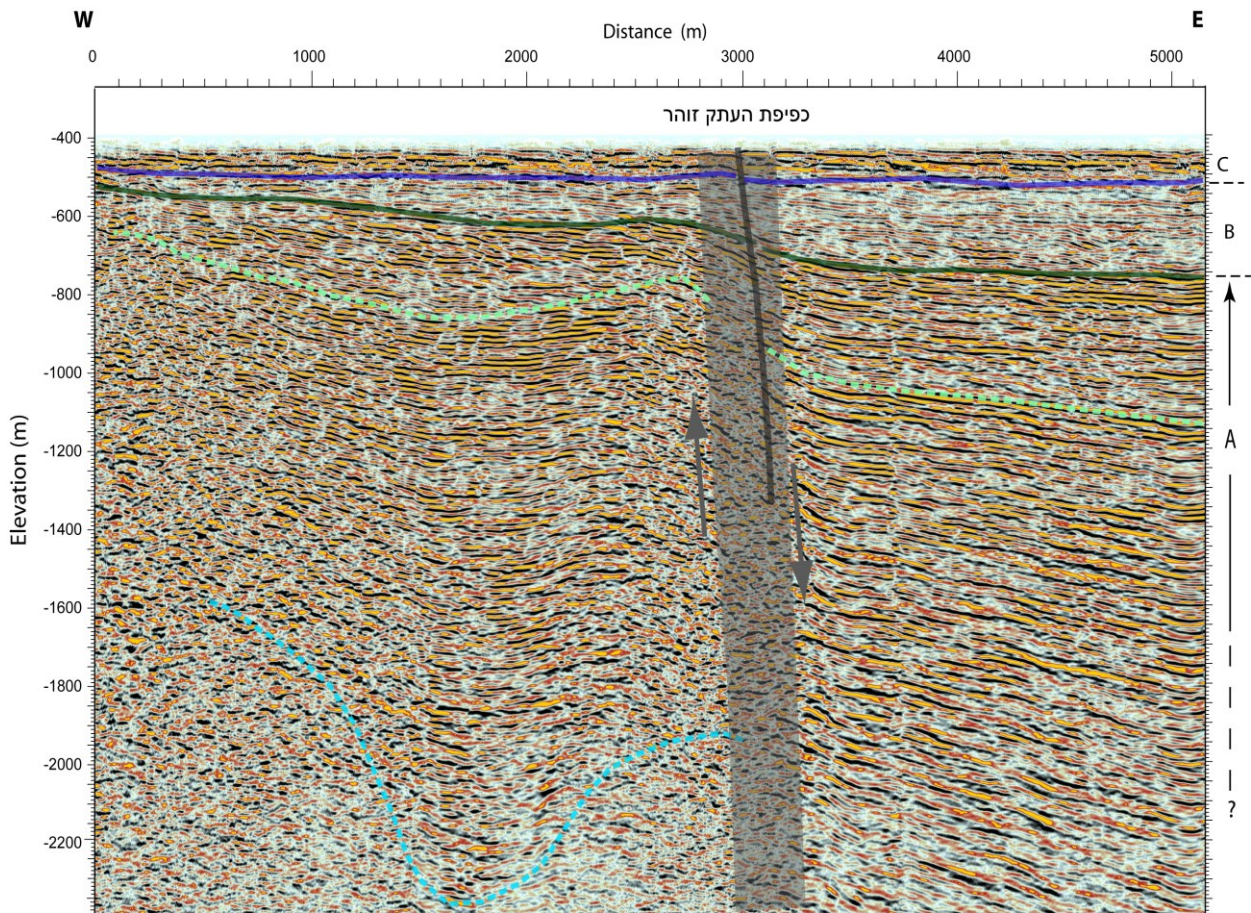
יחידה C: חבילת מחזירים סיסמיים תת-אופקיים בולטים (אמפליטודה גבוהה יחסית), בדרך כלל רציפים שבסיסה (מפלס כחול באיור 5) בגובה שבין כ-450 מטר בשוליים המערביים של האגן לבין כ-500 מטר במרכזו (איורים 5, 7, 10). יחידה זו מתעבה באופן מתון מאד, לעיתים עם נטיות סדימנטריות קלות, בכוון פנים האגן.

גילן המוחלט של יחידות אלה טרם נמדד, לכן לא ניתן בשלב זה לקשור אותן בוודאות לחתך הסטרטיגרפי המוכר מן האגן הצפוני של ים המלח ומפני השטח (איור 3). קידוחי גלעין שבוצעו בסוף שנות ה-50 של המאה הקודמת לקראת הקמת בריכות האיזוי של מפעלי ים המלח (דווחו בעבודתו החלוצית של דוד ניב; Neev, 1964; Neev and Emery, 1995; איורים 4, 6) הראו כי בסביבות מפלס 450 מטר מתחת לפני הים חל מעבר מחתך רדוד של חילופי חואר ומלח לחתך עמוק שבו עולה באופן



איור 6. ימין: חתך גיאולוגי סכמטי בכוון צפון-דרום באגן הדרומי של ים המלח על בסיס קורלציה בין קידוחים שקדמו לבנית בריכות האיזוי (ראה מיקום באיור 4). שמאל: לוג קידוח CA-31 בצפון-מערב בריכה 5 (Neev and Emery, 1995).

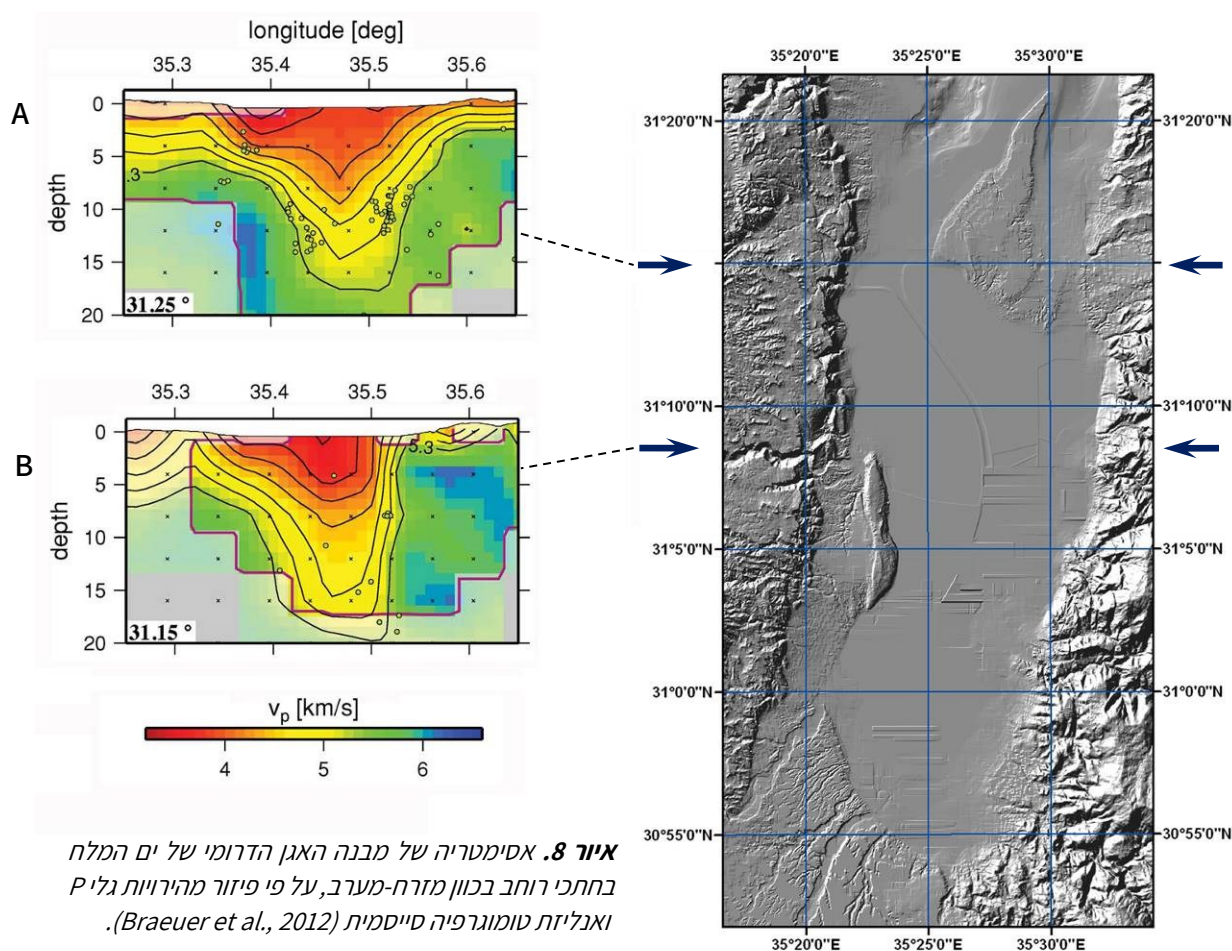
משמעויותי כמות המלח המסיבי בחתך (איור 6). בעזרת גילים שנמדדו בשיטת פחמן-14 העריכו Neev and Emery (1995) שהמעבר בין שתי היחידות מייצג את בסיס תצורת ליסאן מגיל פליסטוקן מאוחר (תקופת הקרח האחרונה; איור 3) ואילו בסיס תקופת ההולקן (תצורת צאלים) באגן הדרומי מצוי בגובה -410 עד -415 מ'. לפי פרשנות זו, יחידה C בקווי הרפלקציה המוצגים מייצגת את תצורת צאלים (הולקן) וליסאן (פליסטוקן עליון, תקופת הקרח האחרונה) ויחידה B מייצגת את חלקה העליון של תצורת עמורה, ואולי קורלטיבית לתצורת סמרה (Waldman et al., 2009). החלוקה הסטרטיגרפית והכרונולוגית של יחידות אלה יצטרכו להתברר בעתיד, בין השאר באמצעות נתוני קידוחים ותיארוך רדיומטרי.



איור 7. חתך רפלקציה סיסמית (מיגרציה) R3 (ראה מיקום באיור 4 ומקרא באיור 5)

מבנה

התבליט בגי יחידה A תואם את קימוט הרפלקטורים של היחידה ולכן הוא ביטוי לקימוט אחיד שלה, וניצפה בעבר בסקר הגיאופיזי של Neev and Hall (1979). חלק מהקמטים הם בעלי חתך רחב א-סימטרי, עם אגף מזרחי תלול יותר ועובי סדימנטרי גדול יותר מאשר האגף המערבי (איור 7), ובמקרים אלה הם נוצרו מעל מדרגות העתקים בעומק החתך, שעליהם הייתה תזוזה נורמלית, במורד מישור ההעתק מזרחה. במקביל התרחשה כנראה זרימה פלסטית של מלח (מגיל נאוגן, בדומה למלח סדום) במעלה מישורי ההעתקים ונוצרו מחדרים מקומיים הגורמים לקימוט השכבות העליונות (מסגרת 2). על גבי תבליט זה מונחת אופקית, באי התאמה, יחידה B, ומכאן שבזמן המעבר בין שתי התצורות חלה האטה משמעותית, או הפסקה, של עליות מחדרי המלח ושל ההעתקה שאפיינו את סוף תקופת יחידה A, לפחות בחלק המרכזי-מערבי האגן. אם יחידה B קורלטיבית לתצורת סמרה, שינוי זה חל בסביבות 130 אלפי שנה לפני ההווה (Torfstein et al., 2009).



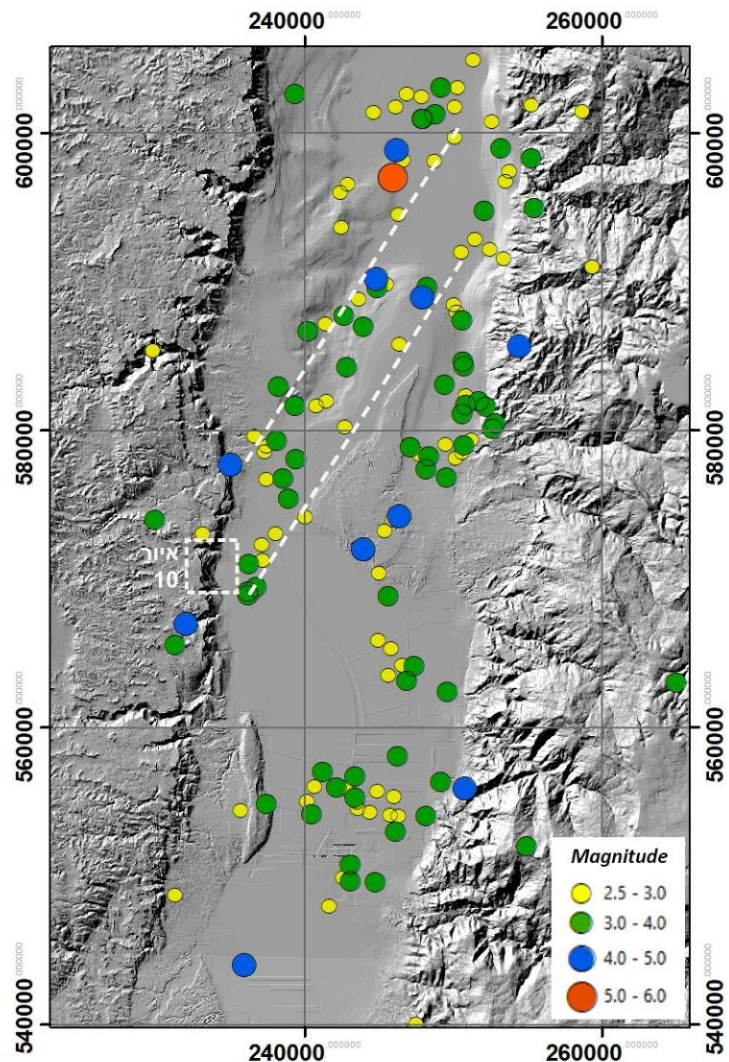
איור 8. אסימטריה של מבנה האגן הדרומי של ים המלח בחתכי רוחב בכוון מזרח-מערב, על פי פיזור מהירויות גלי P ואנליזת טומוגרפיה סייסמית (Braeuer et al., 2012).

ההעתקים המתוארים מאפיינים את החלק המערבי של האגן הדרומי, ויוצרים השתפלות הדרגתית לתוכו. תצפיות בתימטריות, גיאופיזיות וסיסמיות מראות כי לבסיס האגן (כלומר גג הסלעים הקדומים להיווצרותו) ולתצורות המיליוני מבנה אסימטרי בחתך מזרח-מערב, עם צד מזרחי תלול וצד מערבי מדורג ונטוי במתינות (Neev and Hall, 1979; Braeuer et al., 2012; איור 8). מבנה זה הוא ביטוי לכך שהענף הראשי של בקע (טרנספורם) ים המלח עובר בגבולו המזרחי של האגן (Neev and Hall, 1979), ואילו ממערב לו הדפורמציה מפוזרת על פני מערכות העתקים משניות.

מספר תצפיות מראות שאזור הדפורמציה של מרכז-מערב האגן כולל סידרת העתקים עיקרית שכוונה צפון-מזרח/דרום-מערב, כלומר אינה מקבילה לכוון העתק הבקע הראשי במזרח האגן.

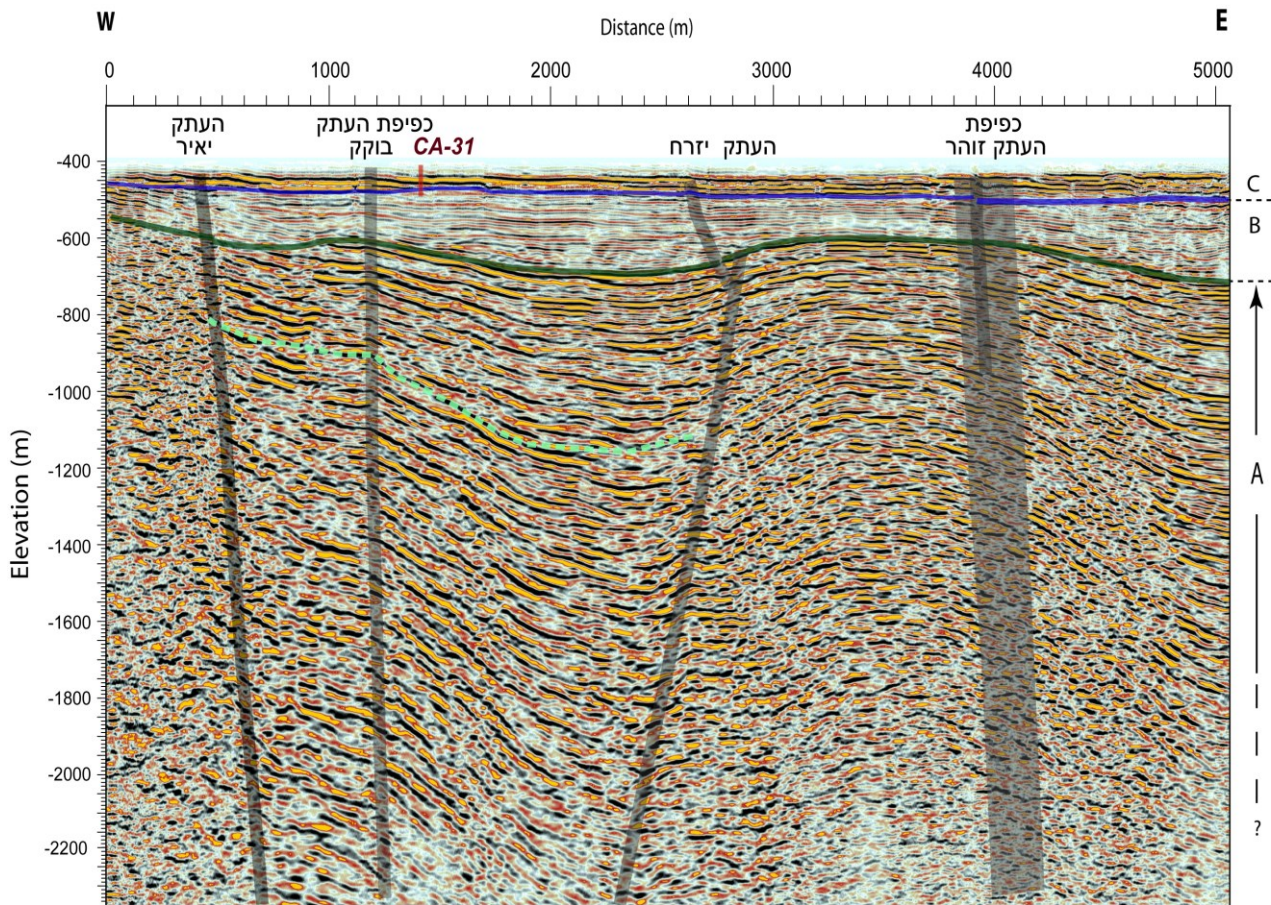
פיזור האפיסנטרים (הנקודות, על פני השטח, מעל מוקדי רעידות אדמה) של רעידות אדמה בדרגה $M=3.0$ ומעלה כפי שנרשמו על ידי הרשת הסיסמית של ישראל (המכון הגיאולוגי, 2023; איור 9) מראה פעילות סיסמית קוהרנטית לאורך מערכת העתקי לינץ' (Neev and Hall, 1979) אשר חוצה את מרכז אגן ים המלח בכוון צפון-מזרח/דרום-מערב דרך מיצרי לינץ'.

הפעילות לאורך העתקי לינץ' מבטאת שחרור אנרגיה סיסמית מתונה בתקופה הבין-סיסמית (התקופה שבין רעידות אדמה גדולות) באזור הגזירה הנשען על טרנספורם ים המלח ממערב; עיקר האנרגיה הסיסמית משתחרר ברעידות גדולות, הנובעות מתזוזות של מספר מטרים בפני השטח

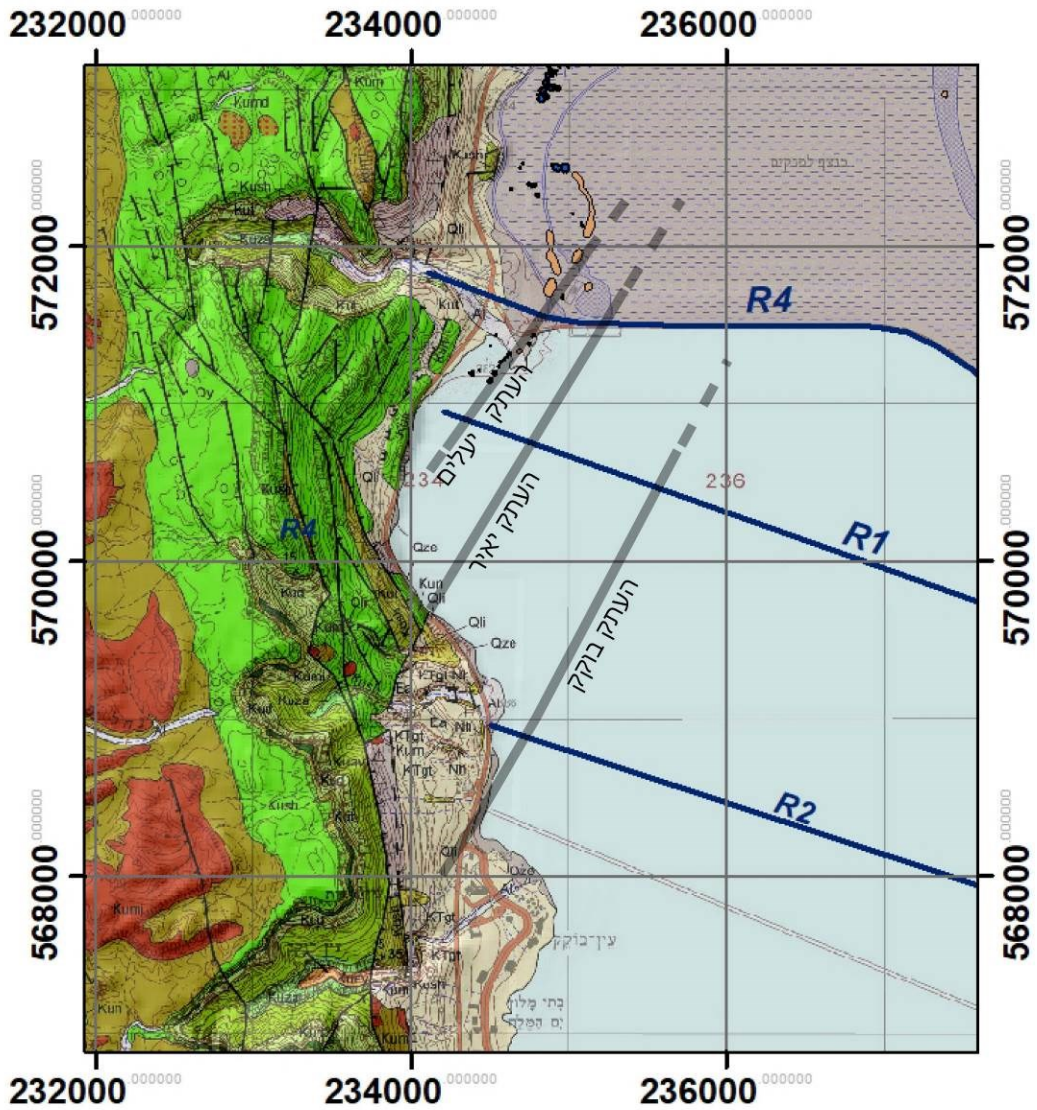


איור 9. פיזור אפיסנטרים (הנקודות, בפני השטח, שמעל מוקדי רעידות אדמה) באגן ים המלח על פי קטלוג הרעידות בישראל וסביבתה (המכון הגיאולוגי, 2023)

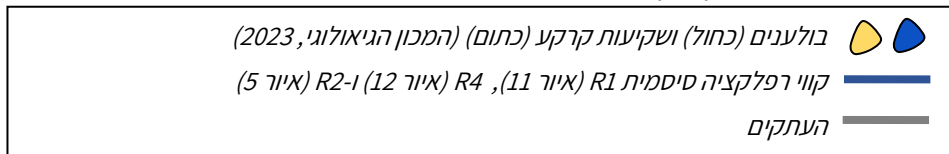
השטח, לאורך העתק הבקע הראשי במזרח האגן. בקצה הדרום מערבי של מערכת העתקי לינץ' (איור 11), העתק יעלים מזהה בקו רפלקציה R1 (איור 10) ולאורכו מפותח קו בולענים, תופעה מוכרת לאורך חופי ים המלח (Abelson et al., 2003); העתק יאיר מופה בשולי האגן (עגנון ושגיא, 2011) ומזהה בקו רפלקציה R1 (איור 10). העתק בוקק מזהה בקו רפלקציה R2 (איור 5) ובכפיפות הרפלקטורים בקו רפלקציה R1 (איור 10) ומופה סיסמית בתת הקרקע באזור מניפת עין בוקק (שמיר, 2011). אזור ההעתקה לינץ' מזהה, ברזולוציה נמוכה יותר, גם בקו רפלקציה R4 (איור 12), שבוצע לאורך סוללה 5-8 של מפעלי ים המלח. בקו זה אזורי ההעתקה בולטים בו בעיקר במקומות בהם עולים לאורכם מחדרי מלח. מדרום ובמקביל להעתקי לינץ' (איור 13), העתק יזרח (ממופה באזור הר יזרח - נחל רום; עגנון ושגיא, 2011) והעתק זוהר מזהים על ידי כפיפות אסימטריות או העתקה של רפלקטורים סיסמיים בקווי רפלקציה סיסמית R4-R1 (איורים 5, 7, 10, 12) וכן בסקרי רפלקציה רדודים לאורך חוף בריכה 5 (שמיר, 2011).

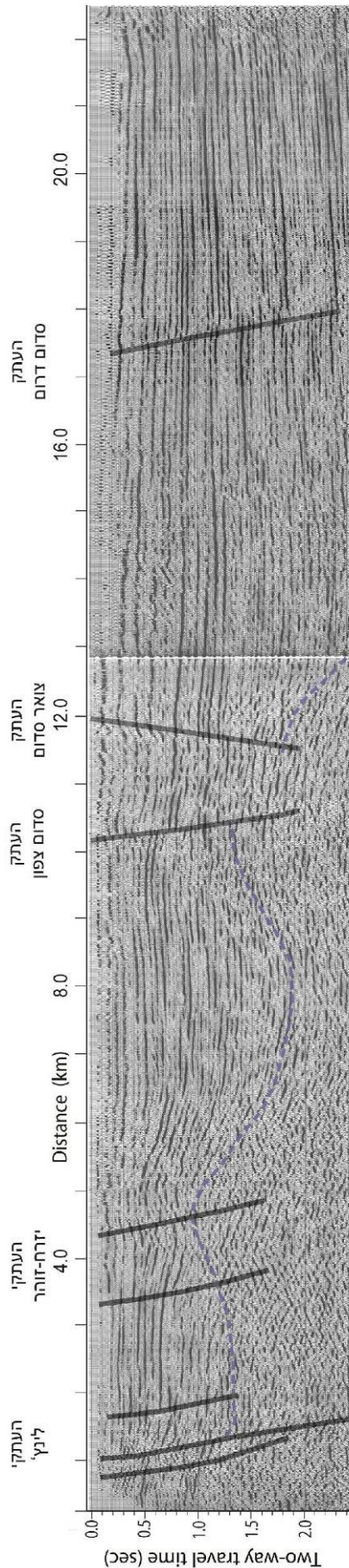


איור 10. חתך רפלקציה סיסמית (מיגרציה) R1 (ראה מיקום באיור 4 ומקרא באיור 5)



איור 11. מפה גיאולוגית (1:50000) של אזור עין בוקק (עגנון ושגיא, 2011) וענפים מפוענחים של מערכת העתקי לינץ'.





איור 12. קו רפלקציה סיסמית R4 (ראה מיקום באיור 4). קו כחול שבור - גבול משוער של גופי מלח.

במרכז הר סדום, העתק צוואר סדום מופה באוכף שבין ההר הצפוני לדרומי ובתוך תצורת סדום מזרחית לו (זק, 1967), וכן בנחלי אדמון וחמרית מדרום מערב להר סדום (Neev, 1964). המשכו לצפון מזרח מפוענח בקו רפלקציה R4 (איור 12) ומוצע שהוא קשור גם להעתקה בחצי האי ליסאן (Bartov et al., 2006). מדידות גיאודזיה לוויינית (Baer et al., 2002) מראות כי התרוממות ההר הצפוני מהירה

מזו של ההר הדרומי, כלומר ההר הדרומי ירוד (בכל נקודת זמן) יחסית לצפוני, לכאורה בהתאמה למגמת ההסטה על ההעתק הנצפית בקו R4 (צד דרום מזרחי ירוד). יחד עם זאת הקשר האפשרי בין תזוזות עכשוויות על ההעתק, ככל שקיימות, לבין התרוממות הר סדום, עדין לא נחקר.

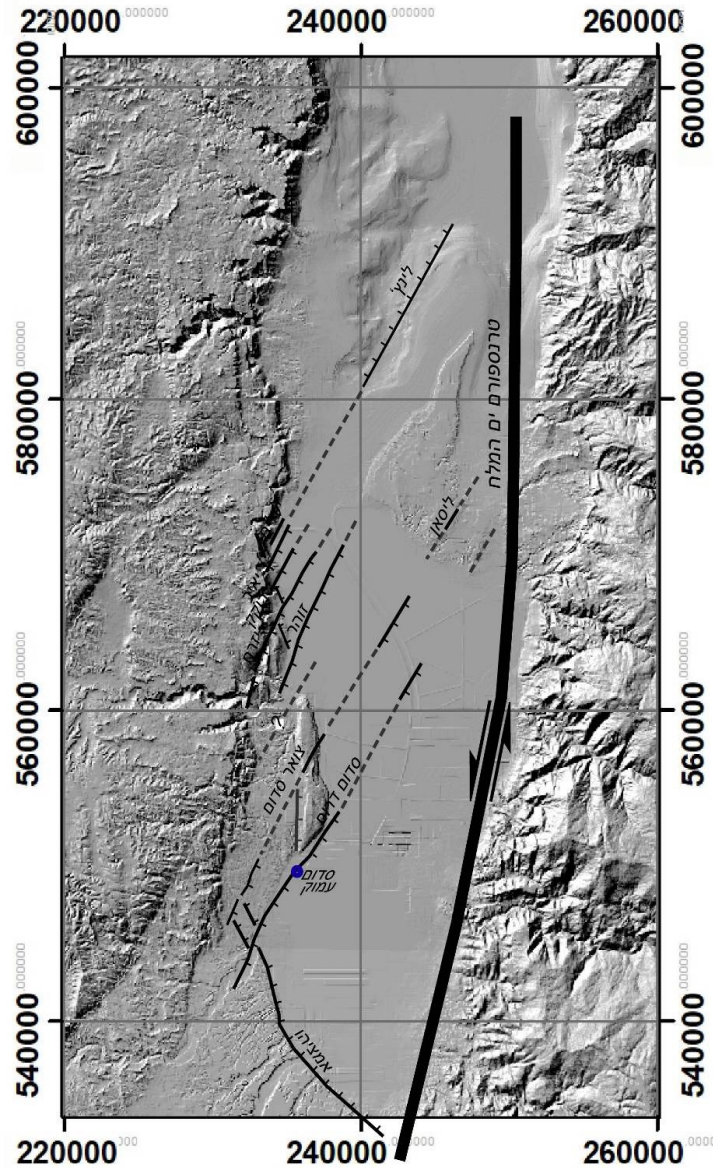
בגבול הדרומי מוגבל דיאפיר סדום על ידי העתק סדום דרום (Kashai and Cocker, 1987) אשר פוענח בהדמיות רפלקציה סיסמית מדרום מערב להר סדום ובתוך האגן. אפשר שהעתק זה הוא שנחדר על ידי קידוח סדום עמוק.

מערך ההעתקים החוצים את האגן הדרומי בכוון צפון-מזרח/דרום-מערב (איור 13) יוצר מבנה של בלוקים מאורכים, מועתקים מטה בדירוג כלפי דרום מזרח. בהינתן שהתזוזה האופקית לאורך טרנספורם ים המלח היא במגמה שמאלית, לאזור הדפורמציה המתואר צפויים להיות מספר מאפיינים:

(א) רכיב תזוזה אופקית במגמה ימנית על ההעתקים בכוון צפון-מזרח/דרום-מערב;

(ב) סיבוב הבלוקים סביב ציר אנכי במגמה הפוכה לכוון השעון. מדידות של כווני המגנטיות העתיקה בחלקו הדרום מזרחי של הר סדום מתקופת היווצרות שכבות המלח הראו רוטציה בשיעור של כ-30° סביב ציר אנכי נגד כוון השעון (Weinberger et al., 2006);

(ג) התארכות של הבלוקים לאורכם. ביטוי להתארכות זו הוא מערכת העתקים נורמלים בכוון צפון-מערב/דרום-מזרח שמופתה בשוליים המערביים של האגן (עגנון ושגיא, 2011) ובתת הקרקע לאורך חוף בריכה 5 (שמיר, 2011) ומאופיינת בהתפתחות קווי בולענים (Abelson, 2003). בתוך האגן, העתקים אלה מוגבלים בדרך כלל למרווחים שבין ההעתקים שבגבולות הבלוקים (איור 13), אך למרות זאת ההסטה האנכית



איור 13. מבנה ההעתקה באגן הדרומי של ים המלח.

על פניהם עשויה להיות משמעותית והיא אחראית להשתפלות המדורגת של השוליים המערביים של האגן (איור 8).

(ד) התארכות כללית של אזור הדפורמציה, ומכאן של אגן ים המלח, בכוון צפון-דרום. המבנה המוצע של האגן הדרומי אינו סותר את היווצרותו מלכתחילה כאגן מתיחה בין שני ענפים ראשיים של טרנספורם ים המלח (Freund et al., 1970). קטעי העתקים בכוון צפון-דרום לאורך השוליים המערביים של האגן (למשל ממערב להר סדום; איור 13) עשויים להיות ביטוי לשלב קדום זה. נראה כי המבנה המתואר כאן מאפיין את התפתחות האגן הדרומי לפחות מאז חדירת דיאפיר סדום דרך סלעי מילוי הבקע בפליסטוקן.

מקורות

אבלסון ושות', 2013. המכון הגיאולוגי לישראל, דוח מס' GSI/11/2013
המכון הגיאולוגי, 2023. קטלוג רעידות אדמה בישראל וסביבתה.
זק, י., 1967. עבודת דוקטור, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
סטרינסקי, א., 1974. עבודת דוקטור, האוניברסיטה העברית, ירושלים, 176 עמ'
עגנון, א., א. שגיא, 2011. המכון הגיאולוגי לישראל.
שמיר, ג., 2011. החברה להגנות ים המלח.

- Abelson, M. et al., 2003. *Geophys. Res. Lett.*, v. 30, 1545.
Baer, G. et al., 2002. *GSA Bulletin*, January 2002; v. 114, p. 12-23; 11
Bartov, Y. et al., 2006. *Isr. J. Earth Sci.*, 55, 17-31.
Bookman, R. et al., 2006. *Geol. Soc. Am.*, Spec. Pap. 401, 155-170.
Braeuer B. et al, 2012. *Geophys. J. Int.* (2012) 191, 881-897
Enzel, Y. et al., 2003. *Quaternary Research*, 60, 263-273.
Freund et al., 1970. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lon*, Ser. A, v. 267, p. 105-127.
Matmon et al., 2014. *Quaternary Research*, 82, 281-295.
Kashai E. L. and P. F. Croker, 1987. *Tectonophysics*, 141, 33-60.
Neev, D., 1964. PhD thesis, *The Hebrew University of Jerusalem*, 407p.
Neev, D. and K. O. Emery, 1995. *Geol. Surv. Isr. Bull.* No. 41, 147 p.
Neev, D., and Hall, J.K., 1979. *Sedimentary Geology*, v. 23, p. 209-238.
Stein, M. et al., 2010. *Quaternary Science Rev.*, 29, 567.
ten Brink, U. et al., 1993.: *J. Geophys. Res.*, 98, 21,877-21,894.
Torfstein, A. et al., 2009. *Geoch. Cosmo. Acta* 73, 2603-2630.
Waldman, N. et al., 2009. *Quaternary Research*, 72, 1.
Weinberger, R. et al., 2006. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7, 1.
Yechieli, Y. et al., 2002. *GSI Cur. Res.*, 13, 1.