

עמוס פרומקין

המחלקה לגיאוגרפיה,
האוניברסיטה העברית בירושלים
msamos@mscc.huji.ac.il

תקציר

מפלס ים המלח מייצג את התנאים האקלימיים ואת התערבות האדם באגן הניקוז שלו, ובעיקר בחלקו הצפוני של האגן, באזור מקורות הירדן והירמוך. תנודות המפלס באמצע ההולוקן היו חריפות ביחס לחלקו האחרון. בתקופת הברונזה הקדומה היה המפלס גבוה יותר מבשאר 7,000 השנים האחרונות. בסוף תקופה זו חלה התייבשות משמעותית שהביאה את מפלס האגם למצב דומה למצבו הנוכחי, בקירוב. יחד עם זאת, השינויים שהתרחשו במפלס ים המלח בהולוקן אינם גדולים, ואינם מגיעים לסדר גודל של שינויי המפלס בפליסטוקן המאוחר. האגן הדרומי של ים המלח ויסת את התנודות במפלס, מאחר שהצפתו מעלה את שיעור ההתאדות ומקטינה בכך את קצב עליית המפלס. ירידה דרמטית של עשרות מטרים במפלס מתרחשת בעשרות השנים האחרונות, ועיקרה נובע מהתערבות האדם. המפלס עומד כיום (1.1.2013) על 426.89- מטרים (מטרים מתחת פני הים התיכון). קצב ירידת המפלס שהיה מאז שנות התשעים כמטר בשנה, התגבר לאחרונה. האגן הדרומי של הים התייבש כולו בתחילת שנות השמונים. מפעלי האשלג משמרים אותו בכריכות אידוי על ידי שאיבת מים מן החלק הצפוני והזרמתם בתעלה דרומה. הסיבה העיקרית להתייבשות המהירה היא ניצול המים באגן הניקוז, ובייחוד מי הירדן והירמוך, להשקיה ולשתיה, וכן שאיבת מי ים המלח ואידויים בכריכות האשלג בידי מפעלי ים המלח. לאגן הצפוני של ים המלח לא צפויה סכנת התייבשות, אבל גם בו נודד קו החוף בקביעות לכיוון מרכז הים. לירידה זו השלכות סביבתיות חמורות בהווה ובעתיד, השלכות שמחייבות בחינה שקולה של האלטרנטיבות לבלימת הירידה, מול המצב הקיים של המשך ירידת המפלס. בין החלופות השונות אין פתרון פשוט מבחינה כלכלית וסביבתית, ויש לבחור באלטרנטיבה הגרועה פחות.

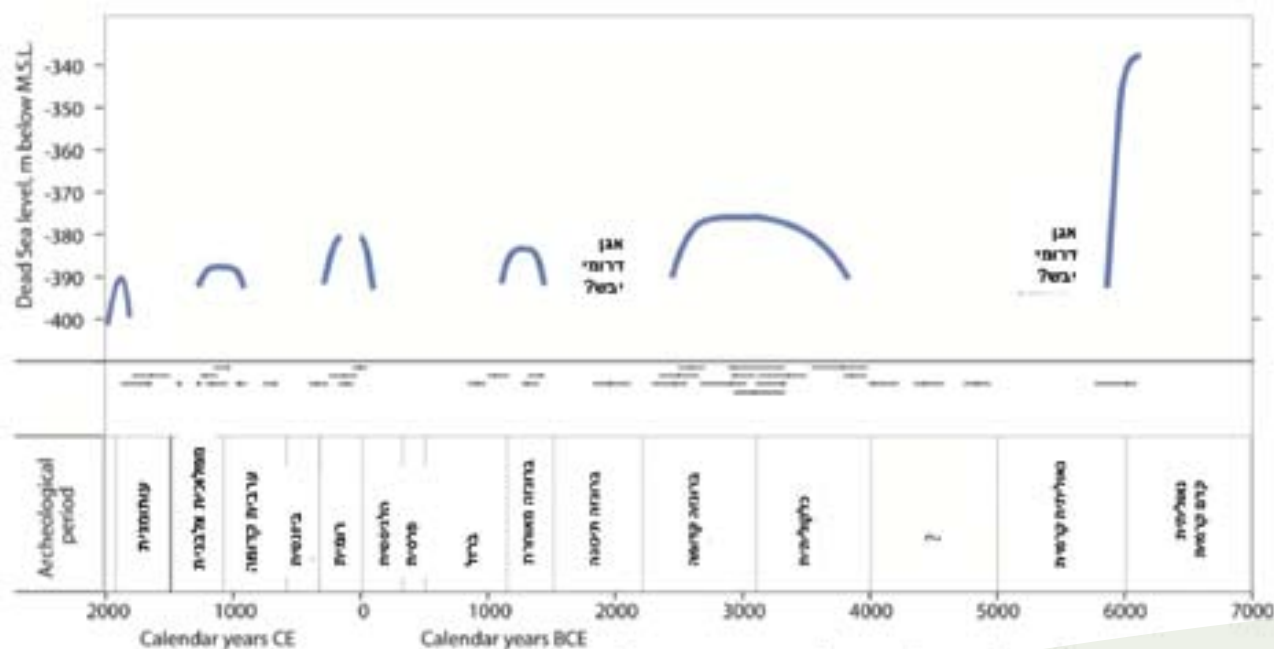


איור 1. דרום ים המלח בשנת 2009 (באדיבות גוגל <http://www.google.com/earth/index.html>). ים המלח מתרכז באגן הצפוני, שממנו שואבים מפעלי ים המלח מים לבריכות שבאגן הדרומי היבש.

מפלס ים המלח בעבר הרחוק

ים המלח הוא שריד לימת הלשון שהתקיימה באזור לפני כ- 15,000-70,000 שנה, והתייבשה לאחר מכן במהירות. ים המלח מוגדר כאגם שקיים בחלק הזה של הבקע בתקופת ההולוקן שנמשכת מלפני כ-10,000 שנה ועד היום. העדויות המגוונות מראות כי מפלס ים המלח ההולוקני נע בטווח של עשרות מטרים סביב 400- מטרים. שחזור מפלסי אגמים קדומים מאפשר לשחזר שינויי אקלים בעבר (2). המפלסים מסייעים בכך בעיקר באגמים סגורים (דוגמת ים המלח) המתפקדים כמדי-גשם ענקיים, ופחות באגמים בעלי מוצא (דוגמת הכנרת). שחזור מפלס ים המלח שלפני תקופת

המדידות הישירות מסתמך על מחוונים שמשלימים זה את זה ולעתים סותרים זה את זה, מאחר שלכל מחוון יש יתרונות וחסרונות. שתי גישות עיקריות התפתחו במחקר אגמים קדומים. האחת סדימנטולוגית, המשתמשת בתכונות משקעי האגם. בדיקה כזאת, שמתבצעת למשל בגלעיני קידוח מקרקעית האגם, מספקת תיעוד רצוף ובעל רזולוציה גבוהה בזמן של משתנים דוגמת הרכב מימי האגם. המשתנים האלה מעידים באופן עקיף על שינויי מפלס יחסיים (ולא מוחלטים). היתרון העיקרי בשיטה זו, כפי שיושמה בגלעיני קידוחים בים המלח (3), היא רציפות המחוון על פני תקופת קיום האגם באתר הקידוח. הגישה השנייה היא גיאומורפית – עושה שימוש בעדויות גיאומורפיות של חוף האגם הקדום, דוגמת טרסות חוף, מערות שהתפתחו בחוף האגם, או עקבות לארוזיה על ידי גלים. שיטה זו מאפשרת לרוב קביעה מדויקת יותר של מפלס האגם, אך המידע אינו רציף. עדויות גיאומורפיות אינן נשמרות לזמן ארוך בדרך כלל, והשימוש בהן מוגבל בייחוד במקרה (השכיח) של הצפות חוזרות ונשנות. גם בשיטה זו נעשה שימוש לשחזור מפלס ים המלח (4, 5). תוצאות מדויקות ורזולוציה טובה יותר במרחב ובזמן גם יחד אפשר לקבל משילוב של שתי גישות המחקר, הסדימנטולוגית והגיאומורפית.



איור 2. שיאי המפלס של ים המלח בהולוקן ותקופותיהם לפי מערות הר סדום, בהנחה של התרוממות הר סדום בקצב של שישה מ"מ בשנה. בעקבות Frumkin (4). גילי פחמן 14 וטווח השגיאה נתונים מתחת לעקומה.

הגורמים הטבעיים הקובעים את מפלסו של אגם סגור הם המשקעים וההתאדות באגם ובאגן הניקוז המספק לו מים. מפלס ים המלח מושפע בעיקר מתנאי האקלים בחלק הצפוני של אגן הניקוז, משם מגיעים רוב מימיו. בדרום-מערב ים המלח נמצא הר סדום, גוש ענקי של מלח, שהוא רגיש במיוחד לשינויים סביבתיים. מי שיטפונות שזורמים בערוצים תת-קרקעיים, ממסים את המלח וזורמים דרכו אל בסיס הניקוז שבאגן הדרומי של ים המלח. מפלס מחילות שהתנקזו אל ים המלח מעיד על שינויי מפלס ים המלח בתקופות שבהן הגיע הים עד להר סדום, ובהתחשב בהתרוממות מחדר המלח הבונה את הר סדום.

שחזור מפלס האגם (איור 2) מתבסס על ההנחות הבאות, הנתמכות על ידי המחקר (6, 7, 8):
א. מחילות מלח מתחתרות במהירות, עד שהפרופיל שלהן מגיע לאיזון, שבו למחילה שיפוע תת-אופקי.

ב. מפלס האיזון של מערות עם מוצא פתוח מוכתב על ידי מפלס בסיס הניקוז.

ג. גיל המחילה מיוצג בקירוב טוב על ידי גיל ענפי העצים ששקעו בתוכה.

ד. קצב התרוממות הר סדום ידוע ממדידות בלתי תלויות.

כבסיס הכרונולוגי לשחזור הפלאו-אקלימי שימשו גילים של ענפי עצים שנמצאו במחילות גבוהות ונטושות. תארוך העצים נקבע באמצעות מדידת פחמן רדיואקטיבי (C^{14}) שזמן מחצית החיים שלו ידוע (כ-5,700 שנה). גילם של 33 ענפי עצים שנדגמו ב-12 ערוצים תת-קרקעיים משתרע עד לפני 8,000 שנה, טווח גילים שמכסה את רוב תקופת קיומו של ים המלח (9).

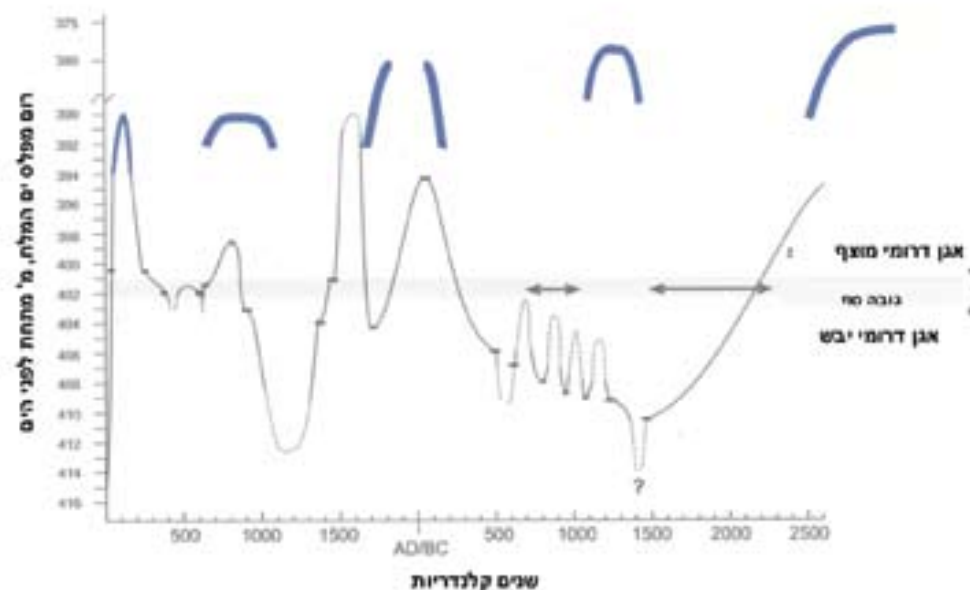
שינויי המפלס לפי מערות הר סדום מתייחסים לאגן הדרומי של ים המלח. בשלבים שבהם ירד המפלס מתחת ל-400 והאגן הדרומי התייבש, היה המפלס עשוי לרדת עוד יותר באגן הצפוני, ולכך אין אינדיקציה במערות הר סדום.

הסדימנטים באגן הדרומי של ים המלח (10) מלמדים כי בתקופות שבהן ירד מפלס ים המלח באגן הדרומי, שקע מלח. בתקופות שבהן עלה מפלס הים, שקעו באגן הדרומי חול, סילט וחרסית, וגודל הגרגר שלהם קטן והולך כלפי צפון. במרכז האגן הדרומי ובצפונו הושקעה בתקופות לחות בעיקר חרסית למינרית. האגן הצפוני של ים המלח תפקד באופן דומה, אך נדרש אקלים צחיח יותר וירידת מפלס דרמטית כדי להשקיע גם בו מלח.

פעילות האדם מאפשרת לעתים לשחזר את מפלס האגם באופן בלתי רציף. שרידים ארכיאולוגיים לאורך חוף ים המלח מאפשרים לשחזר את המפלס בנקודות זמן מסוימות (11). בתקופות ההיסטוריות מתרבות והולכות גם העדויות הכתובות שאפשר לקשרן למפלס האגם. בתחילת המאה ה-20 החל האדם במדידות ישירות של מפלס ים המלח. זו העדות הרציפה והמהימנה ביותר שיש בידינו, המאפשרת גם ניתוחים לאחור לפי השוואתה לנתונים אקלימיים דוגמת כמויות הגשמים המתאימות לשינוי מסוים במפלס (1).

להלן אנתח בקצרה את מפלס ים המלח בעבר, לפי המידע העיקרי הקיים מן המחוונים השונים. סביב 10,000-11,000 שנה לפני זמננו הסתיימה התייבשות אגם הלשון (12) בהשקעה מסיבית של מלח. בהעדר מחוונים מדויקים, עדיין חסר מידע אמין על מפלס ים המלח בראשית ההולוקן. משקעי

האגם מלמדים כי בתחילת ההולוקן עלה המפלס מעל ל-400, כך שמשקעי חרסית של האגם מופיעים גם באגן הדרומי (10). לפני כ-8,000 שנה נחשף המלח בדרום הר סדום מעל פני ים המלח, והחלה היווצרות מערות (13). סביב 5,000 שנה לפני הספירה מתרבות העדויות במערות הר סדום, המצביעות על מפלס נמוך יחסית. מלח ששקע בדרום ים המלח מעיד שהמפלס הים ירד אל מתחת לסף 400- מטרים. רק לקראת אמצע ההולוקן החל המפלס לעלות שוב (14). באמצע ההולוקן, תקופת הברונזה הקדומה, מפלס ים המלח עלה בכמה עשרות מטרים, והגיע לשיא של 375- מטרים, לפחות סביב שנת 3000 לפני הספירה (איור 2). זאת אפשר ללמוד מכמה עדויות (15), בהן המפלס הגבוה של המחילות הקדומות בהר סדום ורוחבן, וכן סימני המסה על ידי ים המלח, שרישומיהם נותרו במפלסים גבוהים של המערות הקדומות. משקע ארגוניטי דק-גרגר שמילא את המחילות עד לתקרתן, מלמד כי המחילות הוצפו במי ים המלח סמוך למוצאיהן. עליית המפלס של אמצע ההולוקן היתה הדרמטית ביותר ב-7,000 השנים האחרונות. בתקופה זו פרחו ערים בחופו המזרחי של ים המלח (באב א-דרע, נומירה, צאפי) (16), והעיר ערד פרחה ממערב לאגם (17). מידע ארכיאולוגי מספק עדויות נוספות למפלס האגם. האתר הארכיאולוגי הנמוך ביותר ממזרח לאגן הדרומי של ים המלח מתקופת הברונזה הקדומה הוא BDS-18 ברום 351-, במניפת הסחף של ואדי כרך (18). ממצא זה מעיד על מפלס נמוך מ-351- מטרים בתקופת הברונזה הקדומה, אך אינו מוציא מכלל אפשרות פרק זמן קצר של מפלס גבוה יותר. לוואדי כרך ולואדי נומירה היה חתך רוחב רחב ושטוח (דמוי U) בתקופת הברונזה הקדומה (19). ממפלס זה התחתרו שני הנחלים בקניון צר לעומק 50- 28 מטרים נוספים. ההתחתרות יוחסה לירידת מפלס בסיס הניקוז לאחר תקופת הברונזה הקדומה. קורלציה מורפולוגית בין הנחלים האלה לערוצים התת-קרקעיים באותה התקופה מרמזת שכולם מושפעים משינויי מפלס ים המלח: חתכי הרוחב הרחבים של הנחלים בברונזה הקדומה מתייחסים למפלס גבוה של ים המלח, וההתחתרות מייצגת את התגובה לירידת המפלס שחלה אחר כך (15). באמצע ההולוקן שקעה חרסית למינרית באגן הדרומי של ים המלח (10). זאת עדות נוספת למפלס הגבוה של האגם באותה התקופה. מכלול הנתונים מלמד כי בתקופת הברונזה הקדומה שבאמצע ההולוקן, היה מפלס ים המלח גבוה מן התקופות הבאות. עדויות ממקומות אחרים מלמדות שהאקלים בארץ ישראל בתקופת הברונזה הקדומה היה הלח ביותר ב-6,000 השנים האחרונות (15). לאחר שיא המפלס של הברונזה הקדומה, מערות הר סדום מעידות על התחתרות וירידה דרמטית במפלס אל תוך תקופת הברונזה הביניימית (15). מ-2000 עד 1500 לפנה"ס בערך, היה המפלס נמוך מ-390- מטרים. עצים שחיו זמן רב בהר סדום מתו בתקופה זו, וההרכב האזוטופי של העץ מעיד גם הוא על ההתייבשות הגוברת והולכת (20). סביב שנת 1400 החל המפלס שוב לעלות, אך בתקופה זו לא הגיע המפלס לשיאי המפלס של אמצע ההולוקן (איור 3). בקרקעית האגם שקעו סדימנטים שמעידים על תנאים משתנים ושינויי מפלס לסירוגין. מערות הר סדום מצביעות על שינויי מפלס קטנים יחסית. תארוך קווי חוף באגן הצפוני של ים המלח מצביע על עליית המפלס במטרים אחדים במהלך התקופה (21).



איור 3. מפלס ים המלח בהולוקן המאוחר לפי עדויות גיאומורפולוגיות של סימני חוף בעקבות Bookman (קו דק) ומערת הר סדום בעקבות Frumkin (4) (קו עבה). חצים כפולי ראש מייצגים תקופות התייבשות האגן הדרומי של ים המלח על פי נתונים היסטוריים, בעקבות Elitzur and Frumkin (22).

שני אתרים ארכיאולוגיים בצפון ים המלח היו כנראה נמלים לסירות, ולכן מיקומם קשור למפלס האגם: ח'רבת מזין או קֶצֶר אל-יהוד בפתחת נחל קדרון (נ"צ 1211 1920), ומעגנית המלח, או רג'ם אל-בַּחַר בצפון-מערבו של ים המלח (נ"צ 1311 1986) (22). שני האתרים היו מכוסים לגמרי במים במחצית הראשונה של המאה ה-20, ונחשפו עם ירידת המפלס. לפי ממצא החרסים שנמצא בהם, שניהם שימשו כמעגנים במאה השמינית ובמאה השביעית לפנה"ס (= תקופת מלכי יהודה), ושוב במחצית השנייה של תקופת בית שני (23). מפלס המים המתאים לעגינת סירות באתרים האלה הוא 395- מטרים בח'רבת מזין ו-400- מטרים במעגנית המלח (11), ומכאן שגובה פני ים המלח נע באותן השנים בין 395 ל-400 מטרים מתחת פני הים התיכון. מעניין שמסתמנת התאמה בין עדויות השדה ובין ההתייחסות למפלסי ים המלח בתנ"ך (24). דוגמה להתייחסות זו היא בראשית יד, ג: "כל אלה חברו אל עמק השדים, הוא ים המלח" (שמקובל ליחסו לעמק אשר הוצף אחר כך על ידי ים המלח).

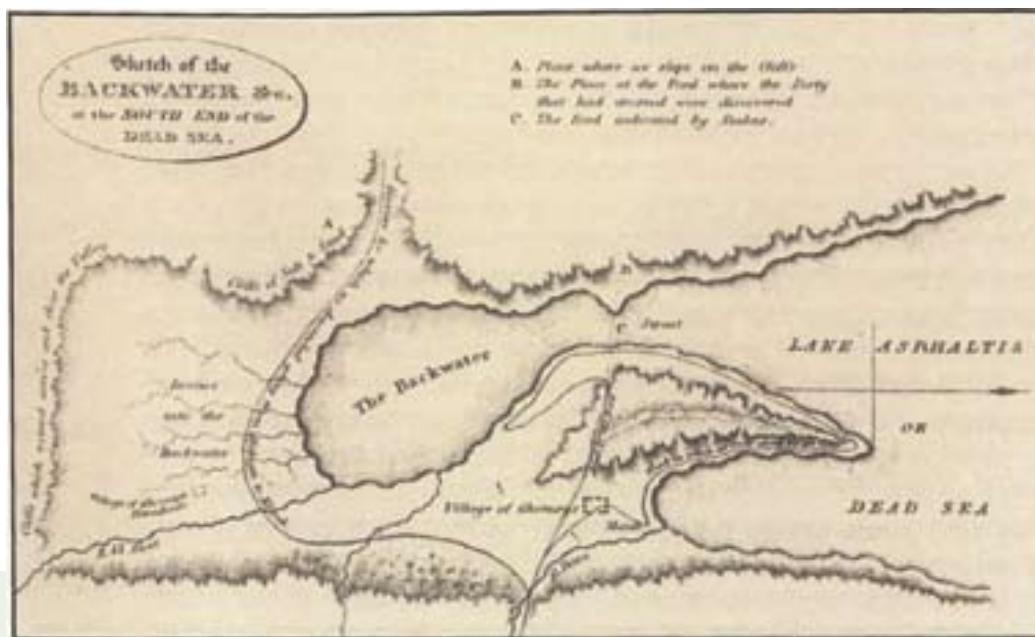
ככלל, בין 500 לפני הספירה ל-600 לספירה חלה עלייה במפלס הים, למרות שינויים במגמות שונות במהלכה. בשיאו הגיע המפלס לכדי 380- עד 390- מטרים בתקופה הרומית-ביזנטית, במאות

הראשונות לספירה (4). בעין גדי נמצאו עוגני אבן מן המאה השלישית לפנה"ס ברום 405- מטרים. העוגנים הושלכו מספינה, ומעידים לכן על מפלס ים גבוה יותר (24). סביב 600 לספירה ירד מפלס ים המלח עד כ-412- מטרים. עליית מפלס מחודשת לפני כ-1,000 שנה הגיעה במאה ה-11 לשיא תקופתי, בין 390- עד 398- מטרים (4). לאחר מכן ירד המפלס מעט, והתייצב עם שינויים קלים סביב 402- עד 400- מטרים, עד המאה ה-18 (איור 3).

מפלס ים המלח במאתיים השנים האחרונות

השינויים שעברו על מפלס ים המלח במאתיים השנים האחרונות מתועדים בעדויות מתרבות והולכות עם הזמן. ברבע הראשון של המאה ה-19 תיארו כמה נוסעים מעבר רדוד שבו חצו שיירות ברכיבה את ים המלח במצר לינץ' שמדרום למצדה (איור 1). מכאן משתמע שמפלס ים המלח היה בערך 399- מטרים. עדויות מפורשות על המעבר מסר זיטצן בשנת 1807 (26), ואחריו בורקהארדט בשנת 1812 (27), וכן אירבי ומנגלס בשנת 1818 (28). אורך המעבר לפי אירבי ומנגלס כמייל אחד (איור 4). הנוסעים האלה לא עברו בעצמם במעברה, אבל זיטצן מסר מפי הערבים שהמעבר לשיירה נמשך חמש שעות, ואילו בורקהארדט דיווח על שלוש שעות וחצי. במפה ששרטט אירבי מסומנת המעברה, והאגן הדרומי של הים מסומן כקטן מאוד וכנראה גם רדוד ביותר (לכך רומז הכינוי The Backwater שבמפה).

איור 4. מפת אירבי 1818: תיאור גרפי של המעברה במצר לינץ' (strait) ושל המים הרדודים באגן הדרומי (The Backwater) מאפשר שחזור המפלס ל-399- מטרים בקירוב, מאחר שהיו מים רדודים במצר, שרומז כ-400- מטרים (28). (השוו איור 1).

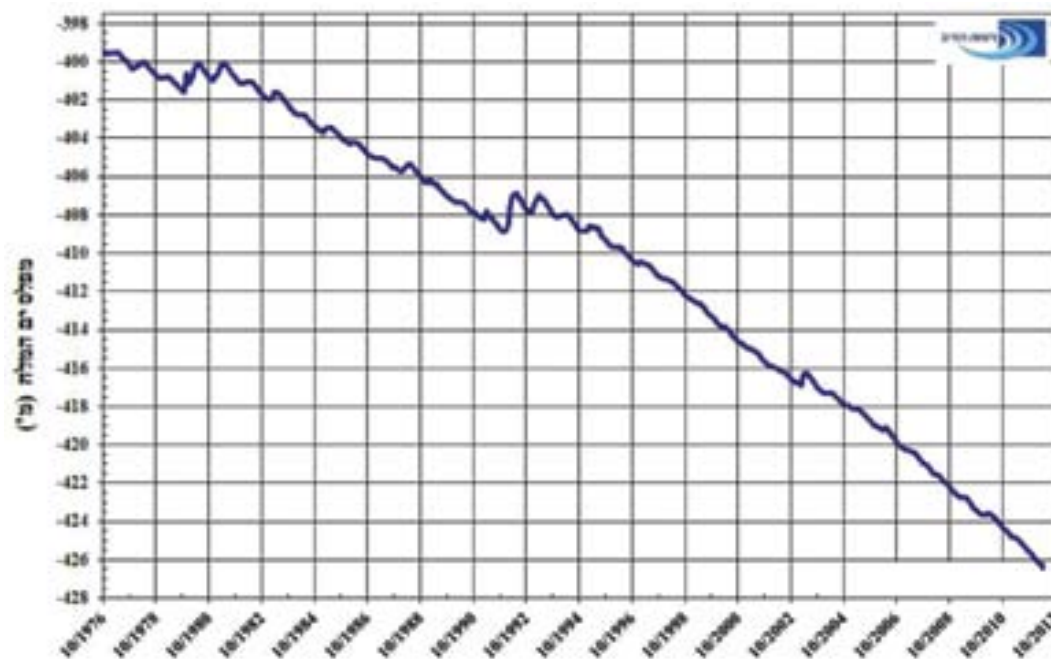


רובינסון וסמית ציינו את המעברה במפה שהכינו בעקבות מסעם בארץ בשנת 1838, אבל בתיאור מסעם (29) הם מציינים מפי הבדווים בסביבה שאיש אינו יודע על מעברה, ושיח' שמכיר היטב את האזור, מסר להם שהמים באזור שבו סומנה המעברה עמוקים מאוד ואינם עבירים בשום אופן. מסקנתם הצודקת היתה "שמי ים המלח ב-1818 היו נמוכים בהרבה מאשר ב-1838". ויליאם לינץ' כתב בשנת 1848: "וידאנו שאין שום מעבר... אחד הערבים אמר שפעם היה כאן מעבר אבל כל האחרים הכחישו זאת" (30).

בהמשך המאה ה-19 עלה המפלס בהדרגה, ובתחילת המאה ה-20 הגיע לשיא גובהו בעת החדשה. במאה ה-20 החלה תקופת המדידות הישירות של מפלס ים המלח. בראשית המאה ה-20 סימן הרופא הירושלמי מסטרמן קו ייחוס למדידת מפלס פני הים על סלע למרגלות ראס פשח' בגובה 388- מטרים. מפלס ים המלח היה בתחתית הסלע, 390- מטרים, ועומק האגן הדרומי של ים המלח היה כ-10 מטרים. הים הגיע לפתחי מערות הר סדום ונמשך דרומה עד קרוב לנאות הכיכר, כפי שהוא מצויר במפות ששורטטו בראשית המאה ה-20. מאז שנות העשרים החל המפלס לרדת עד השיא השלילי של היום. הירידה נובעת בעיקרה מפעילות האדם, אך מודל שמסתמך על הקשר בין גשם למפלס מראה כי גם ללא האדם היתה מתרחשת ירידת מפלס ב-100 השנים האחרונות (31).

בראשית שנות השלושים של המאה ה-20 נבנה סכר דגניה, שהחל את עידן ההתערבות האנושית במאזן המים של ים המלח. תחילה נועד הסכר לווסת את זרימת מי הכנרת לפי כמות המים שנדרשה להפעלת תחנת הכוח בנהריים. לאחר השבתת תחנת הכוח ובניית המוביל הארצי, הוגדרה מטרתו של הסכר כצמצום זרימת המים האובדים מהכנרת לנהר הירדן ולים המלח, כדי שהכנרת תהיה מאגר מים מרכזי של מדינת ישראל ומקור שאיבה למוביל הארצי. רק בשנה גשומה במיוחד, כאשר מפלס הכנרת עולה ומתקרב לקו האדום העליון, נפתח הסכר על מנת להוריד את מפלס המים ולמנוע הצפת תשתיות ויישובים לחופי הכנרת. כך נפתח הסכר ב-9 בפברואר 1992 וכרבע מיליארד מ"ק מים זרמו לירדן; גם בשנים 1993 ו-1995 נפתח הסכר. הפעולות האלה טבעו את חותמן על מפלס ים המלח. ירדן וסוריה הקימו עוד סכרים באגן הירמוק, והפכו גם את זרימתו לזניחה במאזן המים של ים המלח. הירדן מזרים כיום לים המלח כעשירית מן הזרימה לפני כ-100 שנה. כמו כן הלך וגבר ניצול המים באגני ניקוז נוספים שמתנקזים לים המלח. בנוסף, מאזן המים והרכבם הכימי מושפעים מפעילות מפעלי ים המלח בישראל ובירדן, השואבים מים מן האגן הצפוני של ים המלח ומאדים אותם בבריכות מזרום לו. אלה הסיבות שבגללן ים המלח סובל ממאזן מים שלילי ומפלסו ירד ב-37 מטרים מאז השיא של ראשית המאה ה-20.

קצב ירידת המפלס הולך ומתגבר משנות השבעים של המאה ה-20 (איור 5), ועומד בשנים האחרונות על כ-1.2 מטרים בשנה בממוצע. במקומות שבהם שיפוע החוף קטן, נסיגתו של ים המלח ב-100 השנים האחרונות מגיעה למאות מטרים. המפלס עומד כיום (1.1.2013) על 426.89- מטרים.



מפלס ים המלח משנת 1976 ועד סיום עונת הגשמים 2011/2012.

איור 5. מפלס ים המלח בשנים 1976-2012, באדיבות השירות ההידרולוגי. קצב ירידת המפלס הולך ומתגבר. רק בשנים עתירות גשמים דוגמת 1992, עלה המפלס.

ב-200 השנים האחרונות נחקרה ארץ ישראל ביסודיות, ומראשית המאה ה-20 זכה גם מפלס ים המלח לתשומת לב מחקרית. עם ההתקדמות בזמן לתוך המאה ה-21, השכלול בשיטות המחקר והתגברות המאמץ המושקע, גם עקומת המפלסים ההולוקנית הולכת ומשתפרת (32).

השפעת שינויי המפלס על הסובב והאדם

המפלס המשתנה השפיע על העבירות ועל הדרכים סביב ים המלח. כך למשל בתקופות של מפלס גבוה, הגיעו המים עד למצוקים של הר סדום וראש צוקים, וחייבו מציאת דרכים עוקפות או שיט בים (33). ירידת המפלס אל מתחת לבסיס המצוקים פינתה דרך למעבר לאורך רצועת החוף (איור 6). החוף המזרחי של צפון האגם תלול יותר, ולכן השפעת שינויי המפלס קטנה יחסית, מאחר שהעבירות קשה בכל מפלס.



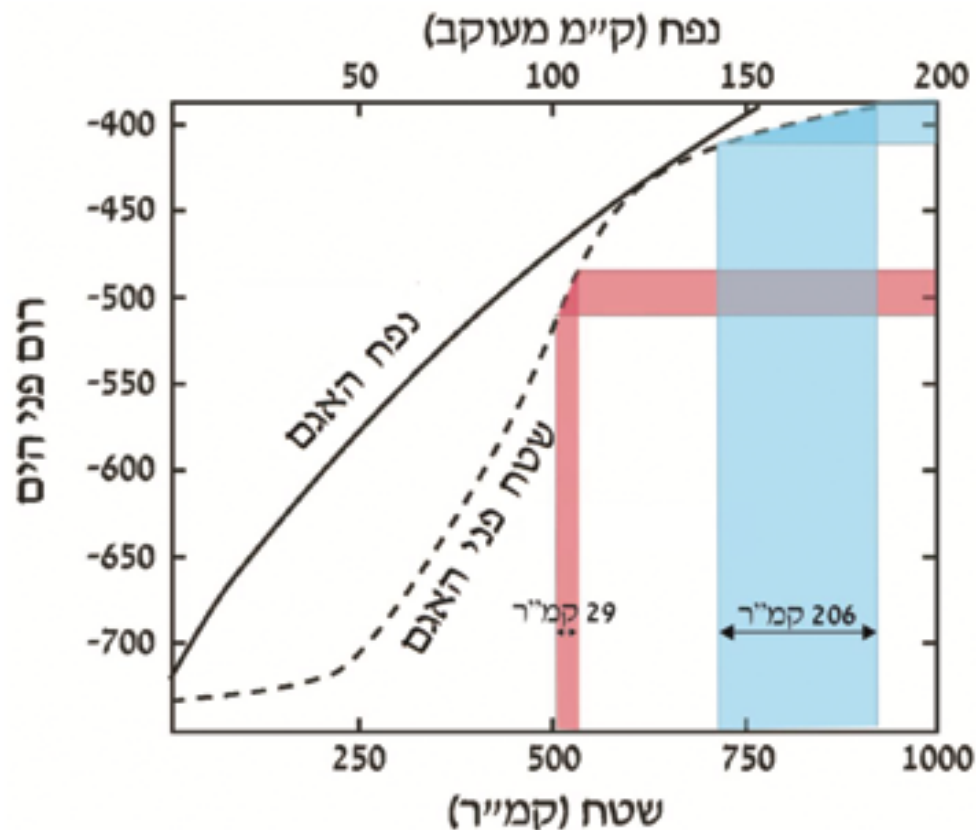
איור 6. השפעת מפלס הים על העבירות לרגלי מצוק ההעתקים. א. המצוק בשנת 1967 (11) ב. המצוק עם סוללת הכביש בימינו. בשנת 1967 הגיע הים עד למרגלות ראש צוקים וחסם את המעבר. כיום סלול שם כביש 90, וים המלח התרחק מהמקום. בעקבות קליין (11) ופורת (33).

האגן הדרומי של ים המלח נותק והתייבש סביב שנת 1980, ובכך קטן שטח ים המלח בפתאומיות. כיום האגן הדרומי מכוסה בבריכות אידוי, שלתוכן נשאבים מים מן האגן הצפוני (איור 1). האירוע הסביבתי הבולט הקשור לירידת המפלס שהתרחש מאז, הוא התפתחות מאות בולענים לאורך חופו המערבי של האגם, ובמידה מסוימת גם בחופו המזרחי. מחקר גיאופיזי מראה כי הבולענים מתפתחים בעיקר לאורך גבול שכבת מלח קדומה ששקעה בתקופת המעבר בין אגם הלשון הפליסטוקני לים המלח ההולוקני (34). בגלל ירידת המפלס מגיעים לאותה שכבה מים אגרסיביים (שאינם רוויים במלח) שממיסים את המלח, במקום מים רוויים במלח שהיו שם בעבר. השטח שבו היה ים המלח ונסוג, מכוסה לעתים קרובות בבוץ טובעני שמקשה את הגישה לים, ופוגע לכן בפעילות הנופש והפנאי. תשתיות התיירות החופיות מתקשות לרדוף אחרי הים הנסוג במהירות באזורים של חוף בעל שיפוע מתון. באזורים של חוף תלול ירידת המפלס מאיצה את התחתרות הנחלים, ואלו פוגעים בתשתיות. לירידת המפלס גם השלכות אקולוגיות חמורות, דוגמת שינויים במיקום מעיינות והתייבשות המערכת האקולוגית שלהם. עם המשך ירידת המפלס בעתיד, הבעיות המרכזיות הקשורות בנסיגת המפלס צפויות להימשך ואף להחמיר: האצת תהליכי עירוף וסחיפה, נסיגת קו החוף והיווצרות בולענים. תימשך ותוחמר הפגיעה במערכות אקולוגיות והאנושיות הסמוכות לאגם (יישובים, תיירות, תעשייה ותשתיות). נסיגת המפלס גורמת לקושי גובר לשאוב מים לבריכות מפעלי ים המלח, ועלייה בצריכת האנרגיה לשם כך. מצד שני, העלייה בריכוז המלחים באגן הצפוני הופכת את כולו לבריכת שיקוע ענקית למלח בישול, חומר מיותר מבחינת מפעלי ים המלח, שצריך להיפטר ממנו לפני השקעת הקרנליט בבריכות המפעלים. ההשקעה הנוכחית של מלח הבישול בבריכה 5 בשיעור של כ-20 ס"מ בשנה מאיימת על תשתיות בתי המלון שלחופה, ומחייבת שאיבה קבועה של מי תהום מאזור המלונות. לפי החלטת ממשלה חייבים מפעלי ים המלח לקצור את המלח השוקע בבריכה 5, פעולה יקרה שתמומן בעיקר על ידי המפעלים.

מפלס ים המלח בעתיד

לאן מובילה ירידת המפלס המהירה הנוכחית של ים המלח? מעניין לבדוק אם קיים חשש להתייבשות מוחלטת של ים המלח בטווח זמן של מאות שנים, בהתחשב בעובדה שעומק המים כיום הוא כ-300 מטרים. מיפוי קרקעית ים המלח (35) הראה כי השפעת ירידת המפלס על ירידת שטח האגם משתנה כיום באופן דרמטי (איור 7). ירידת מפלס של 25 מטרים שהתרחשה בסוף המאה ה-20, גרמה לירידת שטח האגם ב-209 קמ"ר. ירידת מפלס זה של 25 מטרים שתתרחש כאשר המפלס יהיה בסביבות 500- מטרים, תביא לירידת שטח האגם ב-29 קמ"ר בלבד, בגלל השטחים הרדודים הנרחבים של האגם בעבר הקרוב, לעומת האגן העמוק והתלול הצפוי במפלס של 500- מטרים. המשמעות היא, שבעבר מיתנו האזורים הרדודים (בעיקר האגן הדרומי) את קצב שינויי המפלס, בתהליך של משוב

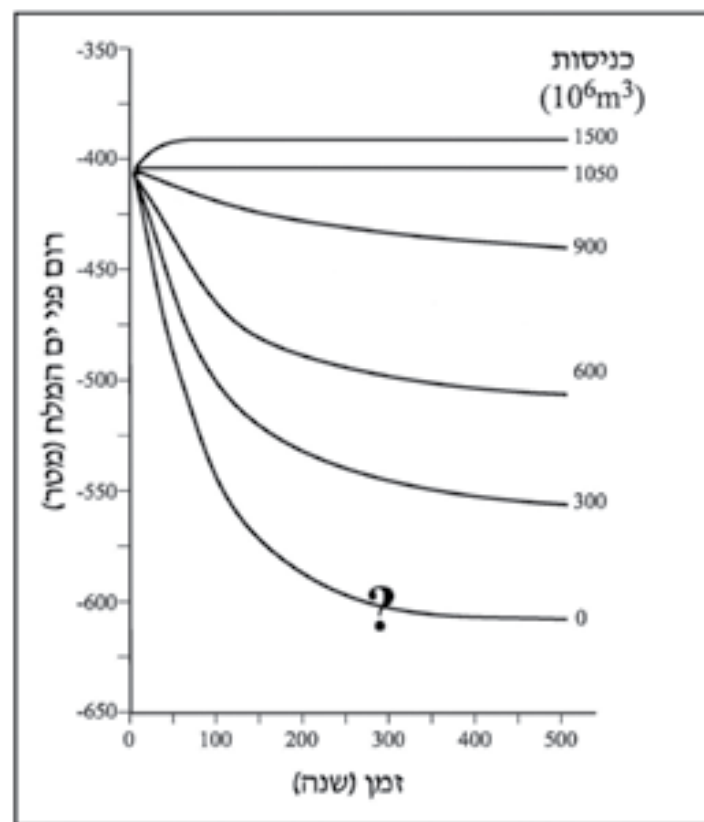
שלילי: ירידת מפלס הביאה להקטנה דרמטית של שטח פני המים המתאדים, ולהפך. בעתיד הקרוב ייעלם המשוב הזה, וים המלח ידמה יותר לגיגית שדופנותיה תלולות. ירידת המפלס מקטינה רק במעט את שטח פני המים המתאדים, והמשוב נפסק, כך שהדרך סלולה להמשך ירידת המפלס.



איור 7. השפעת הטופוגרפיה על המפלס: עם ירידת מפלס ים המלח, שיפוע הקרקעית הנחשפת הולך וגדל. לפיכך קצב הירידה בשטח פני המים בעתיד (אדום) יקטן ביחס לקצב הירידה בשטח בסוף המאה ה-20 (כחול. ראו הסבר נוסף בטקסט). מעובד בעקבות Hall and Neev (35), גבריאלי וביין (41).

בנוסף לאפקט הטופוגרפי, משפיעה המליחות על קצב ההתאדות מיחדת שטח של פני המים (36). אפשר להעריך את שיעור ירידת המפלס העתידי בעזרת מודלים נומריים (37). המודלים מתבססים על מאזן מים באגם טרמינלי, ומנסים לחזות את מאזן המים בים המלח במצבים אפשריים של כמות מים הנכנסת לאגם (איור 8), תוך התייחסות לעלייה הצפויה בשיעור המליחות בתמיסה,

וירידה בקצב ההתאדות בהתאמה. הירידה בקצב ההתאדות צפויה בזכות ההרכב הכימי של מלחים מסיסים במיוחד, שמאפשר לתמיסת ים המלח להגיע לרמת מליחות גבוהה מאוד. רמת מליחות גבוהה מפחיתה את רמת האקטיביות של המים בתמיסה, כך שנוצר לחץ אדים נמוך, וקצב ההתאדות פוחת. לטענת החוקרים הללו (37), אם יימשך המצב הקיים מבחינת זרימות המים לים המלח, ימשיך המפלס לרדת, אך קצב הירידה יואט ויגיע למצב יציב בעוד כמה מאות שנים, כשגובה המפלס יעמוד על 500 - 550 מטרים. המחקרים האלה מתקשים להתחשב בשינויים סביבתיים שעשויים בתורם להשפיע על המפלס: ירידת המפלס תשפיע למשל על ספיקת מי תהום לתוך אגן ים המלח בשל עליית הגרדיאנט ההידראולי לתוך הבור המתעמק.



איור 8. תוצאות מודל נומרי לשינוי עתידי במפלס ים המלח. כל קו מייצג כמות אחרת של מים שנכנסת לאגם (המספרים שמיימין לקווים), בהנחה שהאקלים ופעילות מפעלי ים המלח לא ישתנו. הקטנת כניסת המים תביא להתייבשות המפלס ברום נמוך יותר. בעקבות al et Yechieli (37), גבריאלי וביין (41).

שינויי אקלים ומיקרו-אקלים באגם המתכווץ עלולים להאיץ את תהליך ירידת המפלס (38). הפחתה ליניארית של 25 אחוזים מכניסות המים הטבעיות שהתקיימו בתקופת המחקר בעבור 500 השנים הבאות, ועלייה טמפרטורה של 0.5° צלזיוס בעבור אותו פרק זמן, תגרום לעיכוב בהתייצבות המפלס, שתושג רק בעוד 1,500 שנה בקירוב.

גורם משפיע נוסף שטרם נלקח בחשבון כראוי הוא מילוי האגם המצטמק בסחף שמגיע מאגן הניקוז. סחף זה משפיע על הטופוגרפיה ושינוי שטח הפנים של האגם. התייצבות מפלס הים תביא ליצירת מניפות סחף בנחלים המגיעים לקו החוף, שמעבר להן יהיה מדרון תלול בתוך האגם. לאורך זמן יגדלו מניפות הסחף וימלאו את האגן תוך הרדדתו. כשעוסקים במשך זמן של 1,000 שנים ויותר, יש להתחשב גם בקצב התפתחות הבור הטקטוני של ים המלח, שמשפיע גם הוא על המפלס, וגם נתון זה אינו ידוע בוודאות.

בלימת ירידת המפלס בידי אדם

ההערכות שהובאו לעיל מתבססות על תרחיש של "עסקים כרגיל", כלומר המפלס ממשיך לרדת בלי הפרעה. ירידת מפלס ים המלח תיבלם בעתיד הקרוב רק אם האדם יתערב בשינויים באופן אקטיבי, ויפעל לטובת התייצבות או עלייה מחודשת של המפלס. התרחיש הנבחן כיום הוא בעיקר הזרמת מי ים אל ים המלח, תוך ניצול גרדיאנט הגובה ליצירת אנרגיה והתפלת חלק מהמים. הרעיון הזה הועלה פעמים מספר בעבר בווריאציות שונות, החל בראשית הציונות. באמצע שנות השמונים נדחתה האפשרות של תעלת הימים – תעלה להובלת מים מהים התיכון לים המלח – מסיבות של כדאיות כלכלית.

בימים אלה נדון "מובל השלום", המכונה גם "תעלת הים האדום-ים המלח" להולכת מים ממפרץ אילת לים המלח (39, 40, 41). מובל השלום הועלה לדיון בעיקר כיוזמה ירדנית, במגמה לספק מים לממלכה הענייה במים, ולכן בלימת ירידת מפלס ים המלח אינה מטרה ראשית של הפרויקט. ההצעה היא להזרים מי ים בתעלה מים סוף לים המלח, ולהתפילם בשטח ממלכת ירדן, תוך ניצול רווח אנרגטי של הפרשי הגובה בעבור המים והתמלחת שיפלטו מן המערכת לים המלח. יש כמה בעיות סביבתיות בתוכנית זו במפרץ אילת, במערכת ההולכה בערבה, באזור מתקני ההתפלה והשאיבה, ובים המלח עצמו.

חלופה אחרת לבלימת ירידת מפלס ים המלח עוסקת בהזרמת מים מאגן ההיקוות של ים המלח דרך נהר הירדן (42, 43). חלופה זו שואפת לחזור במעט למצב ההיסטורי, תוך שיקום הירדן הדרומי. אחד הנימוקים לטובת הצעה זו הוא כי הסיכונים הסביבתיים קטנים, מאחר שהפתרון מחזיר את המערכת למצבה הטבעי במשך אלפי שנים. הזרמת מים מתוקים לים המלח תגרום לשיכוב שבו יצטברו המים המתוקים בשכבה העליונה של גוף המים, תגבר ההתאדות ותגבר צריכת המים. בעקבות ההתפלה המוגברת במישור החוף, יש אפשרות לבטל את שאיבת המים מהכנרת למוביל הארצי, מה שבפועל

ממומש כיום במידה רבה. אם יועברו מי הכנרת לים המלח במקום למוביל הארצי, הכמות לא תספיק לעצור את הירידה במפלס ים המלח, שלא לדבר על החזרת המים למפלסם ההיסטורי. פועל יוצא של חלופה זו הוא שיקומו של הירדן הדרומי. מבחינה פוליטית ומעשית קשה לתאר מצב שבו המדינות האחרות באזור יוותרו על חלק מהמים שבתחומן לצורך שיקום ים המלח והירדן הדרומי. יש אפשרות לבסס את אספקת המים לשיקום ים המלח והעברת מים שפירים לממלכת ירדן על ידי התפלת מים במישור החוף. לשיקום ים המלח יידרשו מים מותפלים בשיעור אדיר של כמיליארד וחצי מ"ק לשנה, שמחציתם יועברו לממלכת ירדן והיתרה תועבר לים המלח. מדובר בהתפלת מים בקנה מידה גדול מכל הידוע בעולם. הפרויקט יקר מבחינת ההשקעה הראשונית, ההוצאה השוטפת, ופליטת גזי חממה. מאידך גיסא, התועלת מחלופה זו קשורה לשיקום ים המלח והירדן הדרומי. לכך תהיה השפעה חיובית על התיירות, על התנאים הסביבתיים ועל המערכות אקולוגיות בכל האזור. אין אם כן חלופה פשוטה ונטולת בעיות לשיקום ים המלח. יש לשקול היטב את כל החלופות, את העלויות הכרוכות, ובעיקר את ההשלכות הסביבתיות.

1. Enzel, Y., Bookman (Ken Tor), R., Sharon, D., Gvirtzman, H., Dayan, U., Ziv, B., Stein, M., 2003 Late Holocene climates of the Near East deduced from Dead Sea level variations and modern regional winter rainfall. *Quaternary Research*, 60: 263-273
2. Street-Perrott, F. A., Harrison, S. P. 1985 Lake levels and climate reconstruction. In *Paleoclimate Analysis and Modeling*. Hecht, A. D. (ed.), Wiley, p. 291-340
3. Migowski, C., Stein, M., Prasad, S., Negendank, J., Agnon, A., 2006 Holocene climate variability and cultural evolution in the Near East from the Dead Sea sedimentary record. *Quaternary Research*, 66: 421-431
4. Frumkin, A. 1997 The Holocene History of the Dead Sea Levels, in Ben-Avraham, Z., Gat, Y. and Niemi, T. M., (eds). *The Dead Sea – the Lake and its Setting: Oxford Monographs on Geology and Geophysics 36*, Oxford University Press, p237-248
5. Bookman, R., Enzel, Y., Agnon, A., Stein, M. 2004. Late Holocene lake levels of the Dead Sea. *Geological Society of America Bulletin*, 116: 555-571
6. Frumkin, A. and Ford, D. C. 1995 Rapid entrenchment of stream profiles in the salt caves of Mount Sedom, Israel: *Earth Surface Processes and Landforms* 20:139-152.
7. Frumkin, A., 1996, Uplift rate relative to base level of a salt diapir (Dead Sea, Israel), as indicated by cave levels, in Alsop, I., Blundell, D. and Davison, I., eds., *Salt Tectonics*, Geological Society of London Special Publication 100:41-47
8. Pe'eri, S., Zebker, H. A., Ben-Avraham, Z., Frumkin, A., and Hall, J. K. 2004 Spatially-resolved uplift rate of the Mount Sedom (Dead Sea) salt diapir from InSAR observations: *Israel Journal of Earth Sciences* 53:99-106
9. Frumkin, A., Magaritz, M., Carmi, I. and Zak, I. 1991 The Holocene climatic record of the salt caves of Mount Sedom, Israel: *Holocene* 1:191-200
10. Neev, D. 1964 The Dead Sea. Geological Survey of Israel, report Q/2/64, Jerusalem 407 PP
11. קליין, צ. 1986 מפלס ים המלח ותנודות אקלים בארץ ישראל בתקופה ההיסטורית. עבודת דוקטור: האוניברסיטה העברית בירושלים, 208 ע'
12. Stein, M., Torfstein, A., Gavrieli, I., Yechieli, Y. 2010. Abrupt aridities and salt deposition in the post-glacial Dead Sea and their North Atlantic connection. *Quaternary Science Reviews* 29: 567-575
13. Frumkin, A. 1996 Determining the exposure age of a karst landscape: *Quaternary Research* 46:99-106
14. Frumkin, A., Kadan, G., Enzel, Y., and Eyal, Y. 2001 Radiocarbon chronology of the Holocene Dead Sea: Attempting a regional correlation: *Radiocarbon* 43,2C:1179-1190
15. Frumkin, A., Carmi, I., Zak, I. and Magaritz, M. 1994 Middle Holocene environmental change determined from the salt caves of Mount Sedom, Israel, in *Late Quaternary Chronology and Paleoclimates of the Eastern Mediterranean*. Bar-Yosef, O. and Kra, R., (eds.). Tucson, The University of Arizona, p315-322
16. Rast, W. E., Schaub, R. T. 1980 Preliminary report of the 1979 expedition to the Dead Sea plain, Jordan: *Bulletin of the American Schools of Oriental Research* 240: 21-61
17. Amiran, R. 1986 The fall of the Early Bronze age II city of Arad. *Israel Exploration Journal* 36:74-76
18. McConaughy, M. A. 1981 A Preliminary Report on the Bab edh-Dhra Site Survey. *Annual of the American Schools of Oriental Research* 46:187-190
19. Donahue, J. 1985 Hydrologic and Topographic Change During and After Early Bronze Occupation at Bab edh-Dhra and Numeira. In *Studies in the History and Archaeology of Jordan*. Hadidi, A. (ed). Department of Antiquities and Routledge & Kegan Paul, Amman. p131-140
20. Frumkin, A. 2009 Stable isotopes of a subfossil Tamarix tree from the Dead Sea region, Israel, and their implications for the Intermediate Bronze Age environmental crisis. *Quaternary Research* 71:319-328
21. Bookman, R., Enzel, Y., Agnon, A., Stein, M. 2004 Late Holocene lake levels of the Dead Sea. *Geological Society of America*

- Bulletin 116:555-571
22. Frumkin, A. and Elitzur, Y. 2002 Historic Dead Sea level fluctuations calibrated with geological and archaeological evidence: *Quaternary Research* 57:334-342
 23. בר אדון, פ. 1989 חפירות במדבר יהודה. עתיקות ט', 91 ע' רשות העתיקות
 24. אליצור ופרומקין 2003 מפלס ים המלח בתנ"ך. על אתר יב: 83-98, תבונות
 25. Hadas, G., Lifschitz, N., Bonani, G. 2005 Two Ancient Wooden Anchors from Ein Gedi, on the Dead Sea, Israel. *The International Journal of Nautical Archaeology* 34,2:307-315
 26. Fr. Kruse (ed.) 1854 U. J. Seetzen's Reisen durch Syrien Palästina, Phönicien, die Transjordan-Länder, Arabia Petraea und Unter-Aegypten, II, Berlin, 358 p
 27. Burckhardt, J. L. 1822 *Travels in Syria and the Holy Land*, London
 28. 'אירבי צ' ל., ומאנגלס, ג. 1995 אל הסלע האדום, תרגם ש' גונן, ההדיר ר' זאבי, מערכות, תל-אביב, 259 ע
 29. Robinson E., Smith, E. 1841 *Biblical Researches in Palestine, Mount Sinai and Arabia Petraea*, II, London, 679p
 30. לינטש, ו.פ. 1997 מסע מחקר אל הירדן וים המלח, תרגם ש' גונן, ההדיר ר' זאבי, תל-אביב, 211 ע'
 31. ריב, ת., גבריאלי, א., אנזל, י., מורין, א. 2011 התנודות הטבעיות במפלסי ים המלח כתגובה לשינוי בסדרת הגשם השנתי באגן ההיקוות. בתוך: כנס מצפה רמון, תקצירים. טויטש, נ., וקירו, י., (עורכות). החברה הגאולוגית הישראלית
 32. Bookman, R., Bartov, Y., Enzel Y., Stein, M. 2006 Quaternary lake levels in the Dead Sea basin: Two centuries of research. In: *New frontiers in Dead Sea paleoenvironmental research*. Enzel, Y., Agnon, A., and Stein, M., (eds), GSA Special Paper 401:155-170
 33. 1215-22: קתדרה . מורת, ר. 2006 הדרך לאורך חוף ים המלח בין קומראן לעין-גדי בימי הבית השני. קתדרה
 34. Frumkin, A., Ezersky, M., Al-Zoubi, A., Abueladas, A.-R. 2011 The deadly hazard of the Dead Sea: geophysical assessment of salt sinkholes. *Geomorphology* 134:102-117
 35. Neev, D., Hall, J. K. 1979 Geophysical investigations in the Dead Sea. *Sedimentary Geology* 23:209-238
 36. Krumgalz BS, Hecht A, Starinsky A, Katz A. 2000 Thermodynamic constraints on Dead Sea evaporation: can the Dead Sea dry up? *Chemical Geology* 165:1-11
 37. Yechieli Y., Gavrieli I., Berkowitz B., Ronen D. 1998 Will the Dead Sea die? *Geology* 26:755-758
 38. Asmari B.N, Ergenzinger P. 2002 Long-term prediction of the water level and salinity in the Dead Sea. *Hydrological Processes* 16:2819-2831
 39. Abu Qdais, H. 2008 Environmental impacts of the mega desalination project: the Red-Dead Sea conveyor, *Desalination* 220:16-23
 40. Michael B 2007 The Red Sea and the Mediterranean-Dead Sea canal project, *Desalination* 214371-3:365-1:
 41. גבריאלי, א., ביין, ע. 2005 מאזן המים של ים המלח: תמונת מצב, תהליכים ומגמות. מלח הארץ 1: 53-69
 42. Raz, E. 2009 The Future of the Dead Sea: is the Red Sea-Dead Sea Conduit the Right Solution? NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, The Jordan River and Dead Sea Basin, IV, part 1, p 189-212
 43. אבנימלך, י., ברון, י., רוזנטל, ג., יהושע, נ., שחם, ג. 2007 בעיית ירידת המפלס בים המלח - חלופות לפעולה. מוסד שמואל נאמן, 64 ע'.

