

פרופילי אורך קמורים אל עבר בסיס סחיפה יורד: מקרה ים המלח

דן באומן, יונית שכנוביץ-פירטל, שלמה דבורה
המחלקה לגאוגרפיה ופיתוח סביבתי, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב, באר שבע

מבנה המאמר

תקציר

English Abstract

מבוא

תנודות מפלס ים המלח

אזור המחקר

שיטת המחקר

ממצאים

פרופיל האורך

הפיתוליות

נקודות נקע

דיון

סיכום ומסקנות

איורים

- איור 1: ירידת מפלס ים-המלח
- איור 2: התנודה השנתית של מפלס ים המלח בתקופה 1897-2002
- איור 3: רצף התפתחות מניפות סחף בשולי ים המלח (סכימות)
- איור 4: אתרי המחקר
- איור 5: נחל דרגה - פרופילי אורך
- איור 6: נחל חצצון - פרופילי אורך
- איור 7: נחל דוד - פרופילי אורך
- איור 8: נחל קדם - פרופילי אורך
- איור 9: התאמת פרופיל האורך של נחל קדם, נחל חבר ונחל דרגה לגרף לוגריתמי וגרף ליניארי
- איור 10: נחל חבר - פרופילי אורך
- איור 11: נחל ערוגות - פרופילי אורך
- איור 12: נחל צאלים - פרופילי אורך
- איור 13: נחל דרגה 1999 - תצלום אוויר
- איור 14: מבט אל קו החוף במוצא נחל דרגה
- איור 15: הפיתוליות (thalweg sinuosity) קרוב למוצא הנחלים קדם, חבר ודרגה
- איור 16: ערוץ בחזית נחל צאלים - נקודת נקע בקרקעית החרסיתית הרכה
- איור 17: קצב התחזרות במורפולוגיה ראשונית בעלת מדרון קצוב, קמור וקעור
- איור 18: מוצא הערוצים בחזית נחל צאלים - תצלום אוויר
- איור 19: הכביש החוצה את נחל דרגה
- איור 20: נחלים דוד וערוגות - תצלום אוויר
- איור 21: מודל של פרופילי האורך כרצף התפתחותי

פרופילי אורך קמורים אל עבר בסיס סחיפה יורד: מקרה ים המלח

דן באומן, יונית שכנוביץ-פירטל, שלמה דבורה
המחלקה לגאוגרפיה ופיתוח סביבתי, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב, באר שבע

תקציר

מאז 1896 ירד מפלס ים המלח מ-388.4 מטר ל-417.2 מטר ב-2004. ירידה דרמטית זו הופכת את איזור ים המלח למעבדת שדה ייחודית ללימוד תגובת המערכת הנחלית בזמן אמיתי לירידת בסיס סחיפה. מטרת העבודה היא ללמוד את השפעת ירידת בסיס הסחיפה של ים המלח על פרופיל האורך של הנחלים, על מידת התפתחות נקודות נקע ועל הפיתוליות.

התחתרות ערוצים המופעלת ע"י ים המלח הנסוג דועכת במעלה ומוגבלת למרחק של 1000 מטר מהחוף או פחות. בדיקת התאמתם של פרופילי האורך לגרפים ליניארים ולוגריתמיים מבהירה שלפרופילים אין צורה קעורה. הם בעלי צורה קצובה עד קמורה קלות. קימור הפרופיל התפתח מנקודות נקע בטופוגרפיה הראשונית כמו מראשי מצוקי החוף או מהחזיתות של המניפות הדלתאיות. הקמירות משתמרת בגלל הנפילה המהירה של מפלס האגם, למרות הסדימנט הרך. הפרופילים האורכיים "לכודים" במצב של "קמירות מתמדת", תוצאת הנפילה המתמשכת והמואצת של בסיס הסחיפה ללא יכולת להתאזן ולהתיצב.

הפיתוליות בערוצים היא מסוג meandering thalweg הגורמת אמנם לתקיפת הגדות ולהרחבת החתך, אך אין זו עדיין פיתוליות משמעותית התורמת למיתון השיפוע. לא מתאפשרת השתמרות של נקודות נקע, אלא רק בערוצים משניים, בתנאים מקומיים של אפקטיביות ארוזיבית מוגבלת.

Convex longitudinal profiles towards a lowering base-level: The case of the receding Dead Sea, Israel

D. Bowman, Y. Shachnovich-Firtel, Sh. Davora
Department of Geography & Environmental development,
Ben-Gurion University of the Negev, Beer Sheva

Abstract

Since 1896 the level of the Dead Sea dropped from -388.4 m below sea level to -417.2 m in 2004. Such level fall makes the Dead Sea area a unique field laboratory for studying in real time the effect of a lowering base level on the river system. The aim of this study is to examine the effect of the lowering lake level on the longitudinal profile of channels, on formation of knick points and on the sinuosity.

The entrenchment of the channels dies out within a short distance of 1000 m or less from the waterline. The profiles are slightly convex to planar. The convexity originates from the initial topography of the coastal scarps and the fan deltas which were breached. The longitudinal profiles are trapped, ungraded, convex form because of the continuing fast lake level drop.

The meandering thalwegs are still of low sinuosity. The soft sediments and steep channel slope gradients, which increase stream power, preclude any preservation of nickpoints along the main channels.

דן באומן הוא פרופ' לגאומורפולוגיה במחלקה לגאוגרפיה ופיתוח סביבתי באוניברסיטת בן-גוריון בנגב
(dbowman@bgu.ac.il);
יונית שכנוביץ-פירטל ושלמה דבורה הם תלמידים לתארים מתקדמים במחלקה לגאוגרפיה ופיתוח סביבתי
באוניברסיטת בן-גוריון בנגב.

גרגר, זמן הפיגור בין ירידת בסיס הסחיפה להופ-
 עת השינויים לאורך הפרופיל הוא ארוך (Bonneau
 & Snow, 1992; Reed, 1981), אך בסדימנטים עדינים
 השפעת השינוי בבסיס הסחיפה תורגש מהר יותר
 ולמרחק גדול יותר במעלה (Gardner, 1983).

ספיקת המים בנחל מהווה גורם בסיסי המשפיע על
 קצב התאמת הפרופיל וניתן להשתמש בשטח אגן
 הניקוז כתחליף לספיקה. בהנחת קשר חיובי בין גודל
 אגן הניקוז לספיקה, השינויים עקב ירידת בסיס
 הסחיפה יהיו איטיים יותר ככל שהספיקה נמוכה
 ופרופיל הנחל יזדקק לפרק זמן ארוך יותר על מנת
 להגיע לאיזון (Bonneau & Snow, 1992). לכן נצפה
 באגנים גדולים לקצב מהיר יותר של התאמת הפרו-
 פיל לבסיס סחיפה יורד (Sinha & Parker, 1996).

המורפולוגיה של שולי ים המלח נלמדה בשנים
 האחרונות בעבודות מספר (דוידוביץ-בנט, 1999;
 שכנוביץ-פירטל, 1999; דבורה, 2005). על האפשרות
 להתייחס לאיזור ים המלח כלמעבדה טבעית לחקר
 השפעת בסיס סחיפה יורד הצביע כבר קליין (1985).
 מטרת עבודה זו היא להציג את השפעת ירידת בסיס
 הסחיפה של ים המלח על פרופיל האורך של הנח-
 לים, על התפתחות נקודות נקע ועל הפיתוליות.

תנודות מפלס ים המלח

ים המלח הוא בסיס סחיפה סופי. מדידות ישירות
 של מפלסי האגם החלו בראשית המאה על ידי הקרן
 הבריטית לחקירת ארץ ישראל (Masterman, 1913)
 ומאז 1929 נמדדו מפלסי ים המלח כמעט ברציפות
 על ידי מפעלי ים המלח, פרט להפסקה קלה בימי
 קרבות 1948/1949 (קליין, 1986). בשנת 1896 הגיע
 מפלס ים המלח לשיאו בתקופה העכשווית 388.4- מ'
 ובתחילת המאה הגיע האגם לגובה 392- מ' (איור 1).
 מפלסים אלה מסמנים את עלית המפלס השישית
 והאחרונה בהולוקן (Frumkin et al., 1991, 1994). ב-
 2004 ירד המפלס ל-417.2 מ'. תנודות מפלס האגם
 מתבטאות, פרט לעדויות סדימנטריות, גם בעדויות
 מורפולוגיות של "חופים מורמים" כגון מדרגות חו-
 פיות, שרטונות חלוקים, פסי זפת ורצועות של עצי
 טריד (drift wood).

הסיבה העיקרית לתנודות מפלס ים המלח במאה
 ה-19 היתה ההשתנות בכמויות המשקעים. ירידתו
 התלולה של מפלס ים המלח במאה ה-20 היתה
 בעיקר תוצאת פעולות האדם באגן ניקוזו. הן כו-

מבוא

מאז עבודת Gilbert (1877) מוסכם שפרופיל האורך
 של נחלים רבים הוא בדרך כלל קעור (Graf, 1988;
 Tanner, 1971). כמו כן מוסכם שפרופילי אורך של
 נחלים הקרובים לאיזון (quasi equilibrium), כלומר
 שאינם מראים מגמה מודגשת של התחתרות או
 השקעה, הם בד"כ קעורים (Sinha and Parker, 1996;
 Snow and Slingerland, 1987; Yatsu, 1955). מודלים מת-
 מטיים רבים תארו את פרופילי האורך של נחלים בעזרת
 משוואות אקספוננציאליות (Shulits, 1941), לוגרית-
 מיות (Jones, 1942; Yang, 1971) ומעריכיות (Langbein
 & Leopold, 1964). סטייה מצורה קעורה מהווה בדרך
 כלל אינדיקטור יעיל לזיהוי גורמים חיצוניים השולטים
 בצורת הפרופיל כמו טקטוניקה וליתולוגיה. קיימים
 גם מקרים רבים של פרופילים המופרעים על ידי
 נקודות נקע. התהליכים יוצרי נקודות נקע הם: ליתור-
 לוגיה קשה, אספקת טעונת גסה על ידי יובל, טק-
 טוניקה והתחתרות המופעלת מהמורד על ידי בסיס
 סחיפה יורד (Seidl et al., 1994).

כאשר הטופוגרפיה של האיזור הנחשף לארוזיה היא
 תלולה, תגרום ירידה בבסיס הסחיפה של הנחלים
 לביתור, המהווה את תהליך התאמת מערכת הני-
 קוז למפלס בסיס הסחיפה (Wheeler, 1964; Crickmay,
 1974; Bull, 1990; Mizutani, 1996). ההתאמה תתבטא
 קודם כל בהתחתרות אנכית (Harvey, 2002; et al.,
 1999; Harvey, 2002; Brush & Wolman, 1960; Schumm et al., 1987; Begin et
 al., 1981). התגובה אינה מתבטאת רק בהעמקת הע-
 רץ, אלא גם בהתאמה גיאומטרית רוחבית הקשורה
 בהרס גדות הנחל (Pickup, 1977; Kraus & Middleton,
 1987). לעמידות הגדות השפעה רבה על האפשרות
 לתגובה רוחבית (Fisk, 1994). ניסויים במיזרם הראו
 קשר ישיר בין שיעור ירידת בסיס הסחיפה לבין
 שיעור ההתחתרות האנכית, ההתחתרות האופקית
 וההתחתרות לאחור (Yoxall, 1969). הפיתוליות הינה
 דרך נוספת של הנחל למתן את שיפועו (Schumm, 1993).
 כתגובה לירידת בסיס הסחיפה ולנדידת ההתחת-
 רות למעלה (Schumm and Hadley, 1957; Daniels, 1960;
 Bishop & Goldrick, 1992; Hunt & Tucker, 1992)
 להתפתח בהמשך גם השקעה במורד (Schumm,
 1993) ולכן התגובה לירידת בסיס הסחיפה לאורך
 זמן היא מורכבת (complex response).

היחס בין קצב ירידת בסיס הסחיפה וקצב תגובת
 פרופיל הנחל קובע את צורת האפיק. בסדימנט גס

מפלס האגם עולה בסדרי גודל על קצב ההשתפלות הטקטונית של ים המלח שהוא מ"מ ספורים בשנה (בגין וזילברמן, 1997).

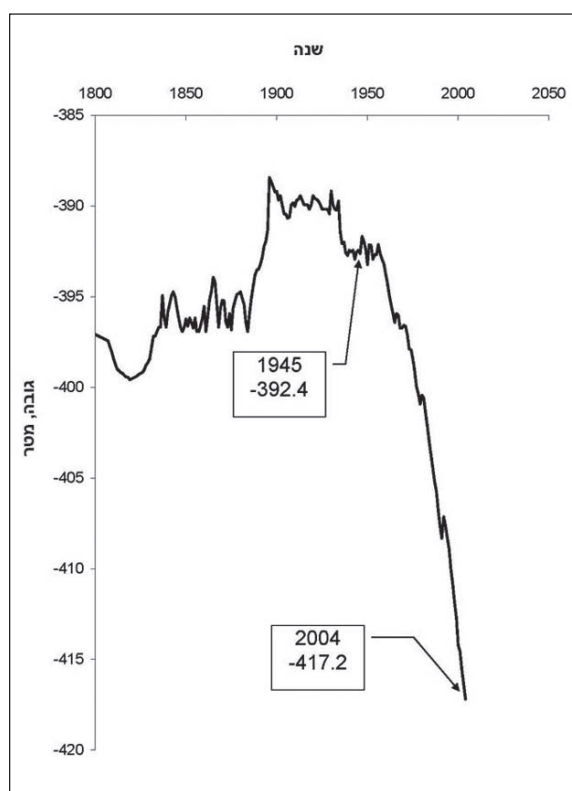
כל מחקרי הנחלים באזור ים המלח מתבצעים, אי-פוא, תוך ירידה נמשכת של בסיס הסחיפה. זה מצב שונה לחלוטין ממחקרי שדה ומעבדה רבים שבהם ירד בסיס הסחיפה והתיצב והמחקר התמקד בתה-ליכי ההתאמה לבסיס סחיפה היציב, לאחר שהונמד. העיסוק בפרופילי אורך באזור ים המלח נעשה בתנאי חוסר איזון שמתעצמים והולכים (איור 2).

אזור המחקר

רצועת החוף המערבית של ים המלח עד מצוק הה-עתקים מגיעה לרוחב מירבי של 3 ק"מ במישור מצדה-צאלים. הוואדיות מתחתרים כאן במשקעי אגם הלשון וברצפים של מניפות סחף הולוקניות, מאובנות ופעילות הקורנות מפתחי הקניונים (Sneh, 1979; Bowman, 1988). מניפות הסחף מצויות מתחת למפלס המירבי של אגם הלשון, בגובה 160-150 מ' מתחת לפני הים, מפלס שנקבע על בסיס המורפולוגיה החופית שנמצאה בערבה הצפונית, מורפולוגיה רכה שאינה יכולה להשתמר זמן רב ומציינת בהכרח את האגם האחרון באזור (Bowman and Gross, 1992). שיקול זה אומת על ידי שני מחקרים מקבילים שקבעו, על בסיס תארוכים בשיטות (Optically Stimulated Luminescence Klinger et al.,) שמפלסי החוף בערבה הצפונית הם אכן מגיל אגם הלשון (Bartov et al., 2002), על סמך עבודתם במישור מצדה-צאלים, מאשרים גובה מפלס מירבי של 160- מ'.

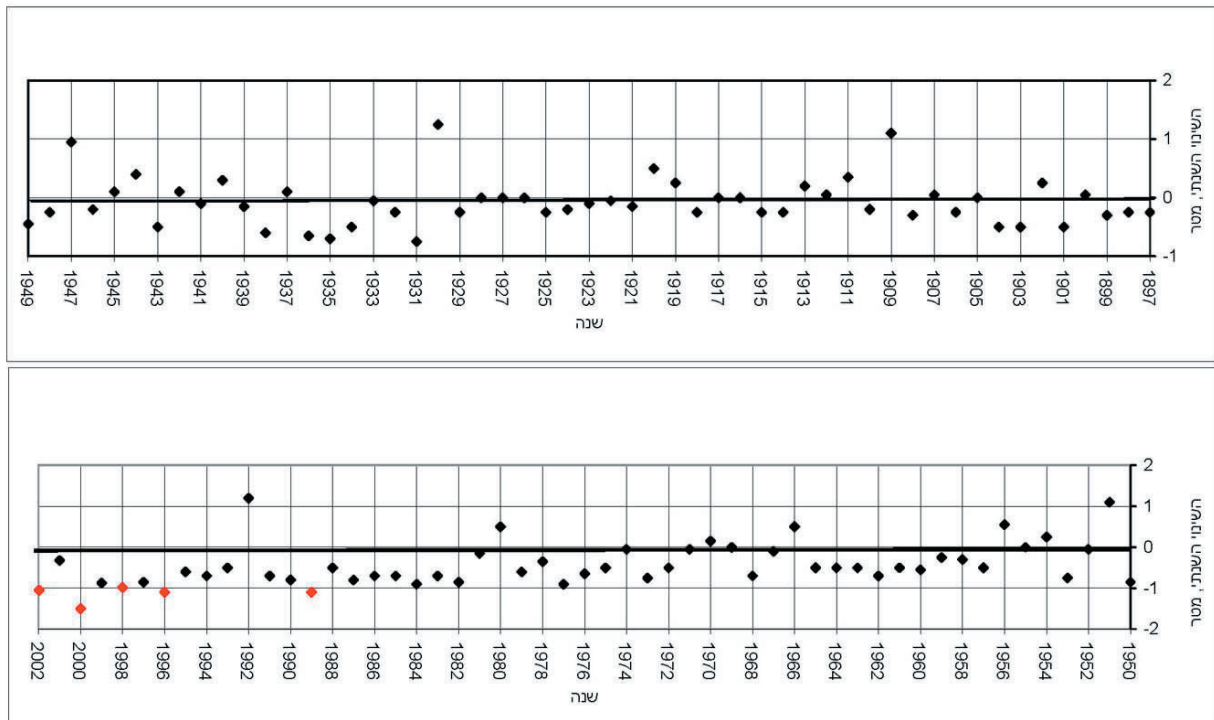
הדור הראשון של מניפות דלתאיות הושקע אל תוך אגם הלשון במפלסו הגבוה (איור 3, שלב 1). במור-רדן התפתחה מערכת של מניפות טלסקופיות, בלתי דלתאיות, שנבנו והתקדמו במרחב שפונה בעקבות נפילתו המהירה של מפלס אגם הלשון. המניפות הדלתאיות הפוסיליות שנחשפות לאורך חופי ים המלח הן הדור השלישי (איור 3, שלב 3), שהושקע בזמנו אל תוך ים המלח במפלסו הגבוהים וכיום הן חשופות ומבותרות על ידי ערוצי נחלים. בהווה ניבנות ופעילות מניפות הדור הרביעי (שרטוט 3, שלב 4), מניפות שקודקודן באזור קו החוף והמשכן אל מתחת למפלס האגם. מצב זה דומה למורפולוגיה הקיימת בשולי ים גלציאלי נמוך עם ביתור

ללות את צריכת המים הגדלה והולכת של יישובי עמק הירדן מאז שנות ה-30, בניית סכר נהריים על הירמוך בשנת 1927, בניית סכר דגניה בשנת 1932, יבוש אגם החולה ב-1957, הפעלת המוביל האר-צי מאז 1964, הפעלת תעלת הע'ור הירדנית ובניית סכרים בסוריה על יובלי הירמוק. לאלה יש להוסיף את הגדלת שטח בריכות האידוי על ידי סכירת מערב האגן הדרומי של ים המלח ב-1964 ואת הפעלת בריכת האידוי הירדנית במזרח האגן הדרומי ב-1982/3, כלומר את ניתוק אגן ים המלח הדרומי ושאיבה מהאגן הצפוני בלבד.

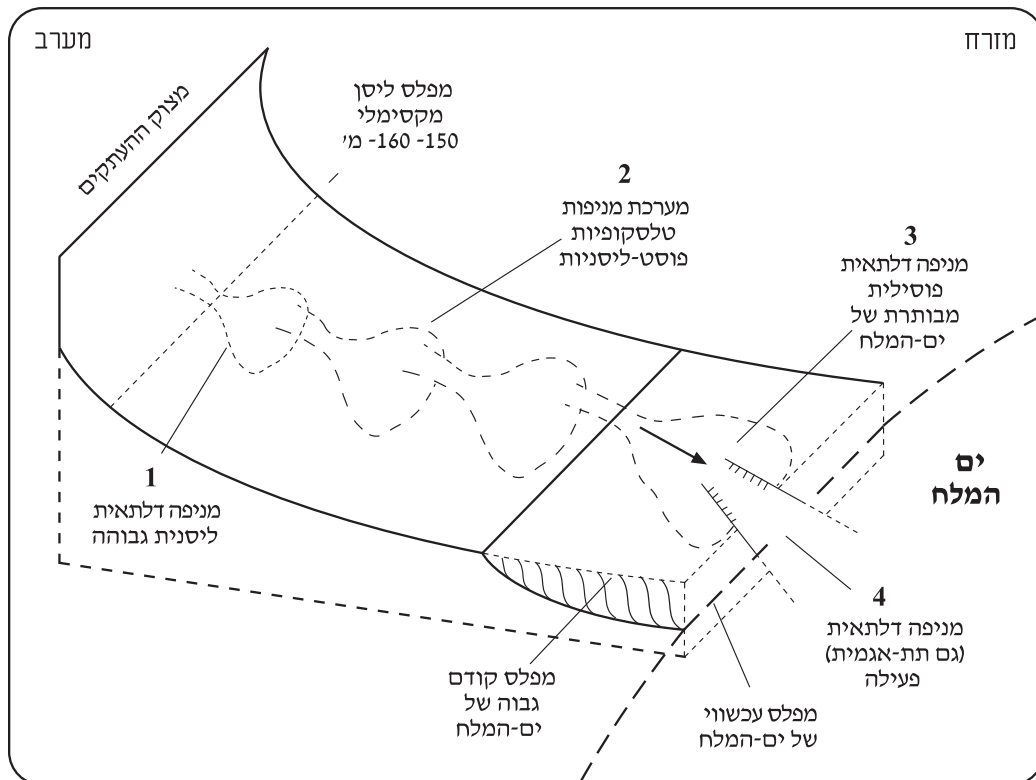


איור 1: ירידת מפלס ים המלח. הגובה מתיחס לאפס האיזון הארצי (הנתונים לפי: קליין, 1986; Masterman, 1913; אשבל, 1965; מפעלי ים המלח והשירות ההיד-רולוגי).

הקצב השנתי הממוצע של ירידת מפלס ים המלח בתקופה 1988-1981 הגיע ל-0.8 מ/שנה (Shasha & Anati, 1989) לעומת 0.4 מ/שנה בלבד בתקופה 1969-1977 (Anati et al., 1987). קצב הירידה הלך והחריף מתחילת שנות התשעים והגיע בשנים בודדות אף לקצב העולה על 1 מ/שנה (איור 2). נפילות המפלס של ים המלח בעבר מעולם לא עלו על קצב הירי-דה בהווה (Bookman et al., 2004) קצב זה של נפילת

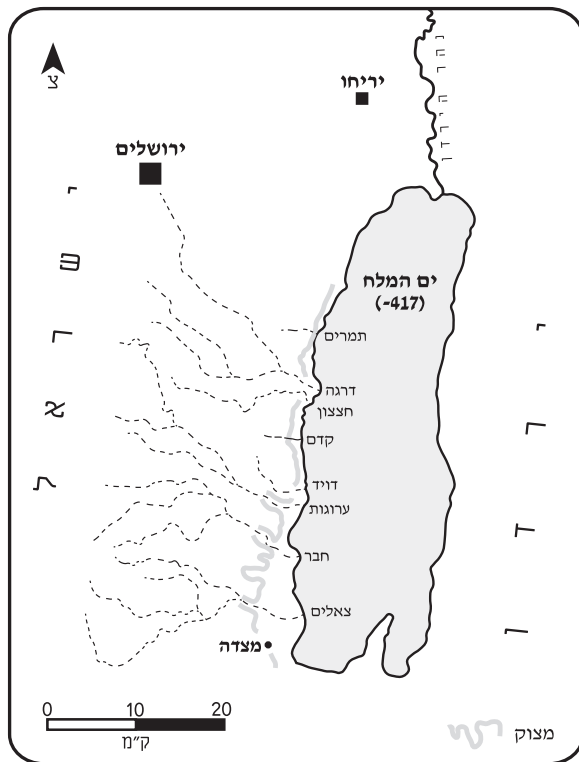


איור 2: התנודה השנתית של מפלס ים המלח בתקופה 1897-2002



איור 3: רצף התפתחות מניפות סחף בשולי ים המלח (סכימתי)

ערוגות, דוד, קדם, חצוץ, דרגה ותמרים (איור 4). נחל קדם הוא בעל אגן היקוות קטן של 12 קמ"ר ומניפה דלתאית קטנה מאוד ותלולה. גם הנחלים דוד (17 קמ"ר) ותמרים (21 קמ"ר) הם בעלי אגני נקוז קטנים. נחל חצוץ מאופיין במניפה ואגן ניקוז מגודל בינוני (85 קמ"ר). הנחלים בעלי אגני הניקוז הגדולים הם נחל חבר (180 קמ"ר), נחל דרגה (230 קמ"ר), נחל ערוגות (232 קמ"ר) ונחל צאלים (260 קמ"ר). הנחלים חבר וצאלים מדגימים תגובה בלתי מופרעת על ידי האדם לירידת בסיס הסחיפה. הנחלים דוד וקדם מדגימים התחרות מחוץ ים המלח עד לכביש, המתפקד כבסיס סחיפה זמני הבולם את השפעת ירידת מפלס ים המלח (איור 5). הנחלים ערוגות ודרגה מדגימים התערבות קיצונית של האדם בניתוב הזרימה המניפתית דרך תעלה בודדת אל האגם.



איור 4: אתרי המחקר

פרופילי אורך מהחוף עד קרוב למצוק ההעתקים נמדדו על גבי הטופוגרפיה הראשונית הבלתי מבוטרת, במקביל לערוצי הנחלים ובתוך הערוצים לאור-כס. המדידה בוצעה באמצעות תאודוליט אלקטרוני. בעזרת תוכנת SURFER שורטטו מפות המגדירות את ה-Thalweg לאורך האפיקים. הפיתוליות נמדדה

האדן תוך בניית מניפות מסוג Lowstand Shoreface Progradation אל מורד שולי היבשת (Posamentier and Vail, 1988). חוף ים המלח מאופיין איפוא בירידת בסיס הסחיפה והתקדמות מניפות אל תוך גוף המים הנסוג. המניפות נבנות לחזית והביתור מופעל לכיוון ממפלס האגם המתנמד.

היחידות הסדימנטריות הנחשפות בערוצים ברצועת המחקר לאורך החוף המערבי של האגם (דוידוביץ-בנט, 1999) והמתגלות גם בקידוחים (Yeichieli et al., 1995) הן:

- חרסית אגמית שחורה, ירוקה ואפורה בשיכוב למינרי עם ארגוניט, גבס ועדשות מלח. אלה מרכיבים את השטח הנחשף כתוצאה מירידת האגם.
 - עדשות חול למינרי, ממוינות היטב, המצינות את חזית החוף. בחול מצויים מבנים של שכוב צולב גלוני וגלונים סימטריים המציינים חוף רדוד.
 - אופקי חלוקים חופיים בגודל גרנולות ממוינות היטב.
 - אופקי חלוקים שטוחים, בלתי מלוכדים, עם חול, ממוינים ומעוגלים, עם עצי טריד המצינים את קו המים.
 - שרטונות שטיפה חלוקיים (washover ridges).
 - אופקי חלוקים וחולות של החוף האחורי הצונחים בתלילות מערבה (backsets).
 - יחידות של חלוקים עד גודל בולדרים בנטייה קלה מזרחה המציינים השקעה נחלית מניפתית.
 - אופקים של חלוקים וחולות בצניחה חריפה 20° לכוון האגם (foresets).
- הסטרטיגרפיה של הסדימנטים האגמיים, החופיים והנחליים מאופינת על ידי אצבוע והיא סוכמה כמור-אל של סדימנטרי (דוידוביץ-בנט, 1999; Bowman et al., 2000). המצע הסדימנטרי כולו רך ובלתי מלוכד והופך את הגורם הליתולוגי לבלתי משמעותי בהתפתחות פרופילי האורך.

שיטת המחקר

בעבודה זו משמש אזור ים המלח מעבדת שדה בה נחקרת תגובת המערכת הנחלית לירידת בסיס הסחיפה. לא נבדקו שינויים אקלימיים-הידרולוגיים, כולל שינויים בספיקת מים וסדימנט לאורך הזמן, וההנחה היא שהביתור הוא תגובה לירידת בסיס הסחיפה בלבד. המחקר בוצע בנחלים: צאלים, חבר,