

התחטרות נחלים לחוף ים המלח כתגובה לירידת המפלס

לירן בן־משה*

הנוסעים כיום בכביש ים המלח מבחינים ללא קושי בערוצים החתורים לעומק במניפות הסחף שממזרחו, ומי שמבקר בחוף האגם אחרי היעדרות של שלושים שנה אינו מבין מן הסתם מהיכן צצו קניונים קטנים אלו. לעומת זאת, אלה העוקבים ברציפות אחר התחטרותם של אפיקי הנחלים לעומק בעקבות מפלס האגם הנסוג, עדים לתהליך גאומורפולוגי שנראה כאילו הורץ בהילוך מהיר. התחטרות הערוצים, שבמניפות מסוימות מתרחשת בין גדות תלולות שגובהן עשרה מטרים ויותר, פוגעת בתשתיות, מסכנת את כביש ים המלח והורסת את דגם הפזרות,¹ המאפיין מניפות סחף, ולכן גם את בתי הגידול התלויים בו. מהנדסים, אנשי מע"צ, אקולוגים וכל מי שסביבתו הטבעית של חוף ים המלח יקרה לו, צופים בתופעה בדאגה (איור 1). עם זאת הירידה המלאכותית במפלס ים המלח שהתרחשה במאה העשרים מספקת לגאולוגים מעבדת שדה ייחודית, המאפשרת להם לבחון את תגובת הערוצים לירידת בסיסה של סחיפה מהירה, ללא שינוי הידרולוגי או אקלימי באגני הניקוז. תגובת נחלים הזורמים באפיק אלוביאלי² לשינוי גובהו של בסיס הסחיפה נחקרה בעבר על ידי חוקרים רבים ובגישות שונות (אמפיריות, כמותיות, פיזיקליות וכו'). יתרונו וייחודו של אזור ים המלח הם בתגובתם המהירה של הנחלים הנשפכים אליו, זמינות המידע ועקומות מפלסים מפורטות.

* לירן בן־משה הוא גאולוג עצמאי בעל תואר מוסמך, האוניברסיטה העברית, ירושלים. המחבר מודה מעומק הלב לפרופ' יהודה אנזל ולד"ר עזרא זילברמן שהנחיהו בעבודת המוסמך שתוצאותיה מוצגות במאמר זה. תודה למו"פ ים המלח על עזרה נדיבה במימון המחקר.

** הסברים למושגים מופיעים בסוף המאמר.



איור 1: נזק לתשתיות עקב התחרות הנחלים
 א. כביש 90 בחציית נחל דרגה לאחר שיטפון ב־2003; ב. קריסת גשר על נחל
 ערוגות ב־2001 (תצלום: י" ברטוב); ג. מעביר מים קרוס בנחל ישי.

מושגים ותהליכים כלליים

בסיס סחיפה

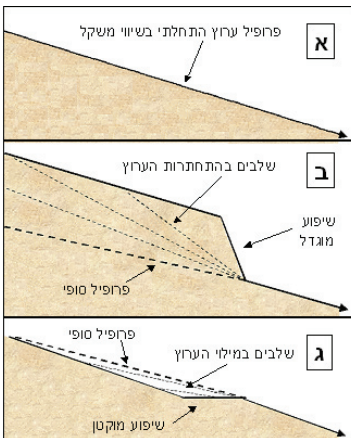
את המונח 'בסיס סחיפה' טבע ב־1875 ג'ון וֶסְלִי פּאוֹל (Powell), כאשר חקר את התחרותו של נהר הקולורדו בגרנד קניון. הגדרתו הפשוטה משמשת עד היום: בסיס סחיפה הוא הגובה שמתחתיו ערוץ אינו יכול עוד להתחתר. מאז פורסמו עוד עשרות גרסאות שונות להגדרה זו, אך המכנה המשותף לרובן הוא: כאשר אפיק מגיע לבסיס הסחיפה, השיפוע ההידראולי קטן כמעט לאפס והאנרגיה הפוטנציאלית הקינטית דועכת מאוד – תופעה המתבטאת בירידה דרסטית בכוח הזרם. במילים פשוטות: בסיס הסחיפה הוא המקום שבו המים מאטים עד כדי עצירה. במצב כזה נעלמת למעשה יכולתו של הנחל להוביל סדימנטים³ או להתחתר. מיקומו של בסיס הסחיפה קובע את הגבול התחתון לאורך האפיק, שבו נפסקים התהליכים הפלוביאליים.⁴ 'כל הנחלים זורמים אל הים' אמר קהלת, ואכן בסיס הסחיפה העיקרי על פני כדור הארץ הם האוקיאנוסים, אך קיימים גם אגני השקעה פנים־יבשתיים המשמשים כבסיסי סחיפה. אגן ים המלח הוא אחד מהם.

שיווי משקל של פרופיל נחל

גובהו ומיקומו של בסיס הסחיפה קבועים לאורך זמן ניכר. כאשר באגן ניקוז של אפיק אלוביאלי מתקיימת יציבות טקטונית ואקלימית, הערוץ מגיע למצב של שיווי משקל עמיד.⁵ עם המשתנים ההידראוליים העיקריים המשפיעים על אופי האפיק נמנים ספיקת המים, ספיקת הסדימנט, מהירות הזרם, שיפוע הערוץ, רוחב הערוץ ועומקו, מידת הפיתוליות, גודל הגרגירים וחספוס דפנות הערוץ. בין המשתנים הללו קיים מנגנון משוב: כל שינוי באחד המשתנים יכול לגרום לשינוי במשתנה אחד או בכמה משתנים אחרים, ביניהם שיפוע הערוץ, וזאת כדי להחזיר את המערכת לשיווי משקל ו'לבלוע' את השינוי. במהלך השנים נוצרת התאמה בין שיפוע הערוץ לבין ספיקת המים ותכונות התעלה, וזו מספקת את כוח הזרם הדרוש להובלת הסדימנט במעלה אגן הניקוז. ההתאמה מביאה לשוויון בין שטף⁶ הסדימנט המגיע לכל נקודה לאורך הערוץ ממעלה האגן, לבין שטף הסדימנט היוצא מאותה נקודה אל מורד האגן. דהיינו, אין התחתרות או השקעה,

ושיפוע הערוץ נשאר קבוע. שיפוע זה הוא שיפוע שיווי המשקל של הערוץ.

נוסף על המשתנים ההידראוליים שהוזכרו, שהם חלק מתכונותיו של האפיק עצמו, משפיעים על שיפוע הערוץ גם גורמים חיצוניים ובלתי תלויים, כגון טקטוניקה ושינוי בגובהו של בסיס הסחיפה. עלייה בשיפוע (כאשר הספיקה קבועה) תגרום לעלייה בכוח הזרם ולכן תגדיל את יכולת ההובלה של הסדימנט. אם קצב כניסת הסדימנט לאגן נותר קבוע, עלייה זו ביכולת ההובלה תגרום לניתוק סדימנט מהקרקעית האלוביאלית, להסעתו ולהתחתרות הערוץ עד שיגיע לפרופיל אורך ששיפועו מקביל לפרופיל שיווי המשקל ההתחלתי. באותו אופן, הקטנת השיפוע תגרום לירידה ביכולת ההובלה של הסדימנט ולהשקעתו עד להגעה לפרופיל מקביל לזה ההתחלתי (איור 2). חשוב להדגיש כי באפיק אלוביאלי לעולם אין מחסור בסדימנט זמין לסחיפה.

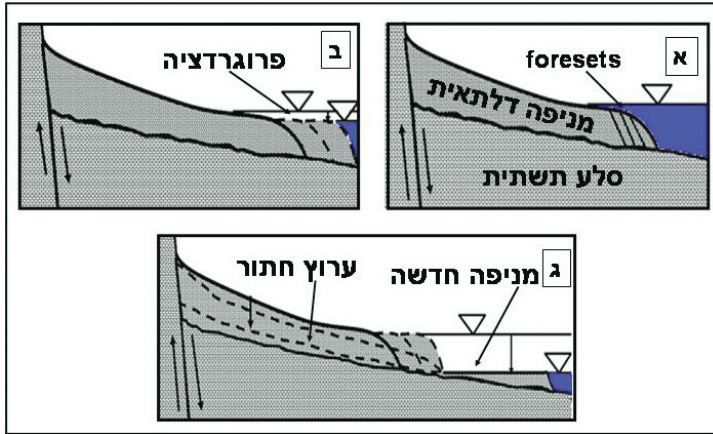


איור 2: תגובת ערוץ לשינוי בפרופיל האורך א. פרופיל ערוץ בשיווי משקל. כל הסדימנט המגיע מהמעלה מובל למורד; ב. מקטע בעל שיפוע מוגדל. כוח הזרם המוגדל גורם להתחתרות עד להגעה לפרופיל שיווי משקל חדש; ג. מקטע בעל שיפוע מוקטן. השקעה ומילוי על מקטע זה עד להגעה לפרופיל שיווי משקל חדש.

הקשר בין ירידת מפלס האגם לבין ההתחזרות במניפות מניפות סחף הן גוף סדימנטרי המתפתח במוצאו של נחל צר מחזית ההרים שבהם הוא חתור אל אזור מתון, שבו הטופוגרפיה הראשונית אינה מגבילה את רוחב האפיק. מניפות אלו מתאפיינות בדרך כלל בפרופיל אורך קעור, מספר ערוצים פעילים וגאומטריה התלויה במשתנים מורפולוגיים והידראוליים שונים. כאשר מניפת הסחף מתפתחת בעמק שבתוכו אגם בעל מפלס יציב, היא הופכת במורדה למניפה הנקראת 'מניפת דלתא'. חלק מהסדימנט המובל למניפה מושקע עליה, וחלקו האחר מושקע כפורסט (foreset)⁷ תלול בחזיתה, המתקדמת לתוך גוף המים בתהליך הנקרא פרוגרדציה⁸ (איורים 3א, 4א). כאשר מפלס האגם מתחיל לרדת בקצב אטי ונסיגתו חושפת משטח בעל שיפוע מתון, הסדימנט המגיע אליו בשיטפונות מושקע בחזית המניפה, זאת תוך הגדלת שטחה והתקדמותה בעקבות החוף הנסוג. כל עוד קצב בנייתה של המניפה לכיוון האגם (קצב הפרוגרדציה) עולה על קצב נסיגתו של קו החוף או שווה לו, שיפוע הזרימה אינו משתנה וחזית המניפה התלולה אינה נחשפת. הערוצים הפעילים על גבי המניפה יתארכו גם הם, ודגם הפזרות שלהם יישמר בדרך כלל (איורים 3ב, 4ב). כאשר קצב נסיגת האגם יעלה על קצב בניית המניפה, תיחשף חזית המניפה התלולה. עקב העלייה בשיפוע תגדל יכולת ההובלה של הסדימנט באזור זה. תחילה ישתנו פיתוליות הערוץ, רוחבו וחספוסו, ואם שינויים אלה לא יספגו את כל השינוי ביכולת ההובלה, תתרחש התחזרות במוצא הערוץ (איור 4ג). ההתחזרות תגרום לירידת השיפוע באזור המוצא, אך גם לנדידתו של קטע השיפוע המוגדל (נקודת הנקע)⁹ לאחור. בעקבות ההתחזרות ייעלם דגם הפזרות, המניפה תפסיק להיות פעילה ותחל השקעתה של מניפה חדשה במוצא הערוץ המתחתר (מניפה מסוג זה מכונה 'טלסקופית') (איורים 3ג, 4ד).

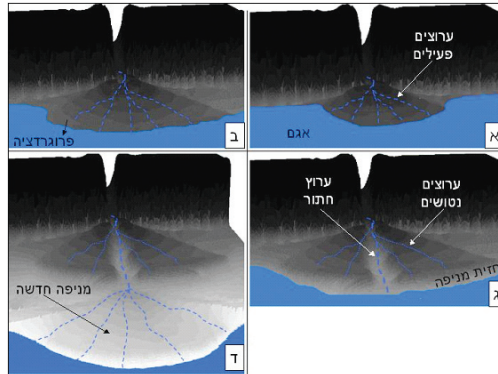
אין דפוס תגובה אחיד לשינוי שחל בפרופילי אורך של ערוצים בעקבות ירידתו של בסיס סחיפה. במקרים מסוימים יתחתר הערוץ כולו לעומק השינוי בבסיס, ובמקרים אחרים יתחתר רק חלק ממנו, ולא לכל העומק. במחקרים שנערכו במתקנים המדמים נחלים במעבדה (Begin, 1982) ובתצפיות שנעשו על התפתחות בתרונות¹⁰ (Leopold, 1992) נמצא שערוצים מוגבלי אורך התחזרו בסדימנט בלתי מלוכד לכל אורכם בשיעור הירידה בבסיס הסחיפה, והגיעו בסופו של התהליך לשיפוע זהה לשיפוע המקורי. במחקרים שנעשו על נחלים טבעיים

הגדולים מבתרונות, ההתחתרות פחתה עם גדילת המרחק מבסיס הסחיפה, ופרופיל שיווי המשקל הסופי לא היה מקביל לזה ההתחלתי (Schumm, 1993).



איור 3: שלבים בהתפתחות מניפת סחף בתגובה לירידת מפלס אגם – מבט צד א. מניפת סחף במצב שיווי משקל עמיד עם גוף מים בעל מפלס יציב; ב. מניפת הסחף מתקדמת לעבר גוף המים שמפלסו יורד בקצב אטי; ג. התחתרות במניפת הסחף לאחר היחשפות חזיתה והשקעת מניפה חדשה לפניה, עקב ירידת מפלס מהירה של גוף המים.

איור 4: שלבים בהתפתחות מניפת סחף בתגובה לירידת מפלס אגם – מבט קדמי א. מניפת סחף במצב שיווי משקל עמיד עם גוף מים בעל מפלס יציב; ב. מניפת הסחף מתקדמת לעבר גוף המים שמפלסו יורד בקצב אטי; ג. חשיפת חזית המניפה, התחתרות ונטישת דגם הפורות; ד. השקעת מניפה חדשה היוצאת מהמניפה הנוטשה בצורה טלסקופית.

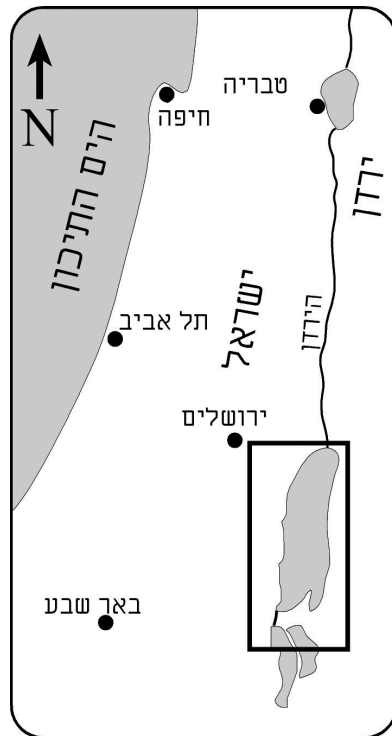


על בסיס האמור לעיל אבחן במאמר זה את השאלות הבאות: כיצד נקבעת תגובתו של כל ערוץ לירידת בסיס סחיפה? מדוע ערוצים מסוימים מגיבים בהתחברות מהירה ועמוקה בעוד אחרים 'מתעוררים' רק כעבור שנים ומתחברים לאטם? האם ניתן ליצור מודלים על התחברות זו ולחזות אותה? מה קובע את מועד תחילתה?

כדי לענות על שאלות אלו אחזור אל מעבדת השדה הענקית – חוף ים המלח.

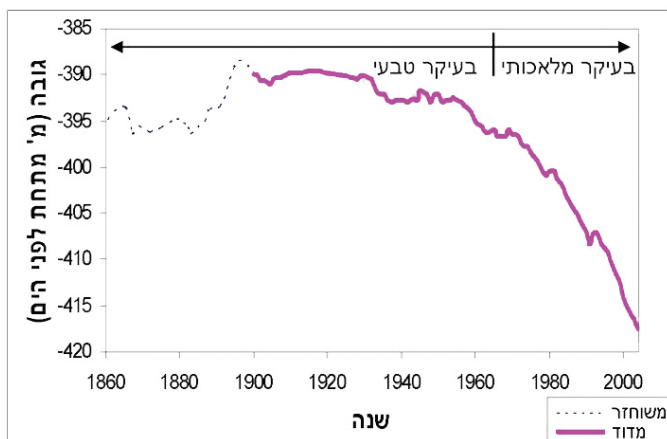
מאזן המים ומפלס ים המלח

רוב המים הזורמים באגן הניקוז של ים המלח (ששטחו כ־42 אלף קמ"ר) נתרמים מהאזורים הגשומים יחסית שמצפונו וזורמים אליו דרך הירדן. זרימות נוספות מגיעות מן היובלים המנקזים אזורים נרחבים ממזרח וממערב למצוקים שבשולי האגם וכן את האזורים שמעליהם. נחל הערבה מנקז את אזור האקלים הארידי הקיצוני שמדרומו (איור 5). ים המלח הוא שריד של ימה קדומה שהשתרעה על פני כל בקעת הירדן, מהכינרת בצפון עד חצבה בדרום. ימה זו, המכונה 'אגם הלשון', התקיימה בתקופת הקרח האחרונה עד לפני כ־14 אלף שנים. מפלסה הגבוה ביותר היה כ־160 מטרים מתחת לפני הים (Bookman et al., 2004). הירידה במפלס האגם החלה לפני 23–25 אלף שנים, עד הגיעה לגובה המפלס של ימינו. ירידה חדה זו במפלס האגם ובבסיס הסחיפה של נחלי האזור לוותה בתקופה



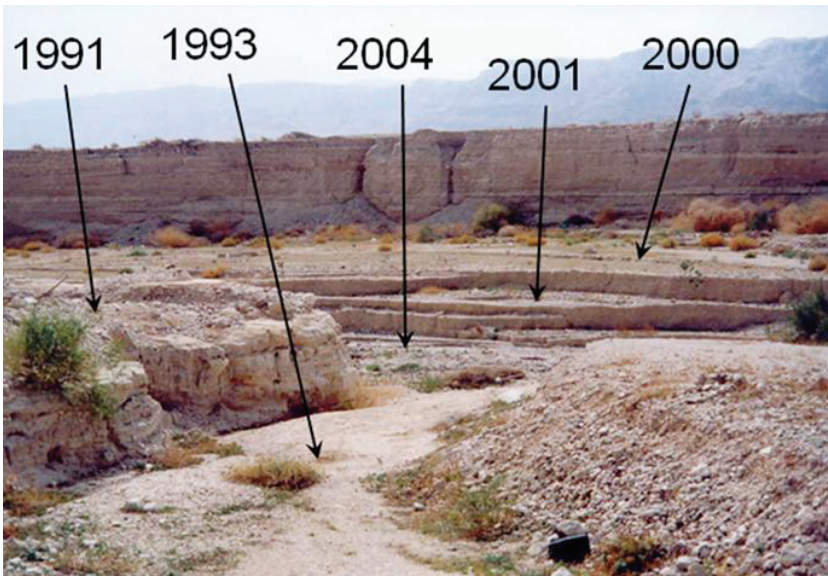
איור 5: מפת מיקום ים המלח ומקורות המים המגיעים אליו (בריבוע השחור – האזור התחום באיור 9)

של יובש יחסי ובהתחתרות עמוקה במניפות הסחף שננטשו. לדוגמה, היישובים מצפה שלם ועין גדי יושבים על המניפות הקדומות הנטושות של הנחלים דרגה וערוגות (בהתאמה), מעל המצוק התוחם את האפיק החתור בהם. גובהו של מפלס ים המלח, בדומה לזה של ימת הלשון שקדמה לו, רגיש מאוד למאזן המים באגנו (שם). בסוף המאה התשע עשרה, לאחר עשור גשום במיוחד, הגיע מפלס האגם לאחד משיאיו באלפי השנים האחרונות (389- מ'). בעשורים הראשונים של המאה העשרים חלה ירידה טבעית ואטית בגובה המפלס. משנת 1927 החלה התערבות אנושית מעטה במאזן המים באגן ים המלח, עם סכירתו של נהר הירמוך בנהריים וסכירת מוצא הירדן בדגניה שנייים לאחר מכן. בתקופה זו התקדמו מניפות הסחף הרחבות והדלתאות מזרחה, בעקבות קו החוף הנסוג. ההתערבות האנושית הגיעה לשיא חדש החל משנת 1964, עם השלמתו של מפעל המוביל הארצי, המטה את רוב המים מאגנו העליון (הגשום) של ים המלח לצרכים שימושיים, וכן עם הקמתן של ברכות אידוי באגנו הדרומי. ההתערבות גדלה עם הטיית נהר הירמוך על ידי הירדנים בתחילת שנות השבעים ועם הוספתן של ברכות אידוי במהלך השנים. מפלס ים המלח מגיב לשינוי חריף זה במאזן המים בירידת מפלס, ששיעורה הנוכחי הממוצע הוא כ-1.2 מ'/שנה (איור 6). עם האצת קצב הירידה נחשפה חזיתן של חלק מהדלתאות, והערוצים החלו להתחתר בתוכן ואף השקיעו מניפות חדשות ממזרח לחזיתן החשופה (שכנוביץ־פירטל, 1999).



איור 6: עקומת מפלס ים המלח ב-150 השנים האחרונות (על פי קליין, 1986)

מידול ההתחתרות בערוצים לחופו של ים המלח ניתן לשחזר את פרופילי האורך הקדומים של נחלים על ידי מיפוי משארים של טרסות נחליות¹¹ ומדידתם (איור 7). גיל הטרסות ביובלי ים המלח נקבע בשתי דרכים: (א) ניתוח של תצלומי אוויר היסטוריים שנעשו לאורך שנים רבות, שניתן להסיק מהם את מקום הזרימה ואת מועדי היווצרות הטרסה; (ב) במקומות התלכדותה של הטרסה עם קו חוף קדום שעדיין ניתן לזהותו לאחר עשרות שנים, מדידת גובהו של קו החוף והתאמתו לעקום המפלס הידוע של ים המלח קובעות את גיל הטרסה ולפיכך את גילו של פרופיל הנחל המשוחזר. על ידי מתאם (קורלציה) בין טרסות שאריות ב־זמניות ושרבוב (אינטרפולציה) ביניהן ניתן לשחזר את צורתם ומיקומם של הערוצים הפעילים שזרמו עליהן.



איור 7: טרסות שאריות בנחל דרגה המספרים מציינים את השנה האחרונה שבה הייתה הטרסה אפיק פעיל, לפני התחתרות הנחל ונטישת הטרסה. התמונה צולמה בשנת 2004, והאפיק משנה זו הוא האפיק הפעיל.

שילוב גישות אמפיריות וכמותיות אפשר בניית מודל לחיזוי תגובתם של פרופילי האורך של הנחלים השונים לשינויים בבסיס הסחיפה. המודל מבוסס על משוואת הדיפוזיה של סדימנט.¹² את המשוואה פיתח ד"ר בנימין זאב בגין בסוף שנות השבעים (משוואה 1), על ידי פיתוח ושילוב של משוואות הידראוליות שונות ותוך שימוש במשתנים שונים המאפיינים אפיקים אלוביאליים. שימוש במשוואת הדיפוזיה כייצוג מתמטי לתהליכים המוליכים סדימנט, שבהם הוא מועבר ממקטעים תלולים למקטעים מתונים במורד הנחל, מאפשר לפשט את מורכבותה הרבה של המערכת ההידרולוגית ואת תלותם של המשתנים ההידראוליים זה בזה ובגורמים חיצוניים.

$$\frac{\partial y}{\partial t} = k \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + B$$

משוואה 1: משוואת דיפוזיה של סדימנט

Y = גובה קרקעית הערוץ (מ'); t = זמן; x = מרחק לאורך הערוץ (מ'); k = קבוע דיפוזיה (מ²/יחידת זמן); B = שינוי גובה בנקודה עקב תרומת סדימנט מהגדות (מ'/יחידת זמן) (Begin, 1982).

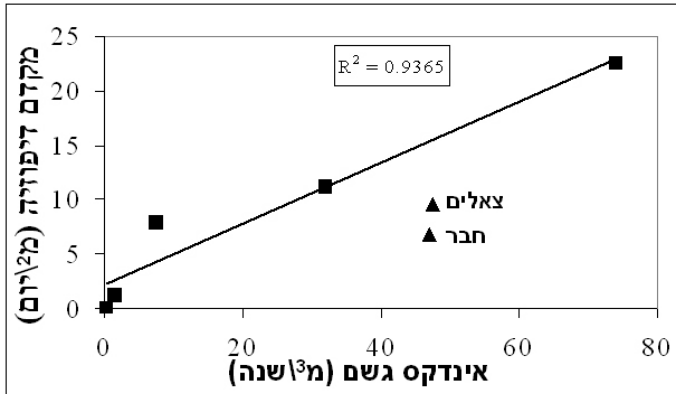
המודל נבדק על שמונה נחלים הנשפכים לאגנו הצפוני של ים המלח, במקטע שבין חוף האגם לכביש ים המלח (איור 9) (בן־משה, 2005). כביש זה הנו נקודת נקע ובסיס סחיפה מקומי, המונעים את המעבר של השפעת השינוי בבסיס הסחיפה בחוף למעלה האגן. נבחרו נחלים שההתערבות האנושית בהם הייתה מינימלית והמייצגים טווח רחב של תכונות פיזיוגרפיות ומורפולוגיות שונות (גודל אגן הניקוז, שטח המניפות, אורך הנחל ממזרח למצוק העתקים, הבתימטריה¹³ מול המניפה, גודל הגריה, הליתולוגיה¹⁴ של אגן הניקוז). פרופילי האורך הקדומים של נחלים אלו שוחזרו בעזרת מיפוי הטרסות הנטושות. על ידי הרצת המודל בין פרופיל התחלתי משנה אחת לפרופיל סופי משנה אחרת כוילו שני משתנים – מקדם הדיפוזיה של כל ערוץ ושטף הסדימנט המגיע ממעלה הנחל. המשתנים אלו אומתו על ידי הרצת המודל בין שני פרופילים משנים אחרות. ההתאמה הגבוהה בין הפרופילים שאותם חזה המודל לבין אלו שנמדדו במציאות מוכיחה שהתחתרות הנחלים בחוף ים המלח מתנהגת בקירוב טוב כהליך דיפוזיבי. המשתנים שנמצאו מאפשרים חיזוי של המשך התפתחות הפרופילים, בהינתן קצב ירידת מפלס עתידי של 1.2 מ'/שנה ובהסתמך על הבתימטריה שתיחשף

בשנים הבאות. ליכולת חיזוי זו חשיבות רבה בתכנון תשתיות לאורך חוף האגם וכביש ים המלח (לוח 1).

לוח 1: ההתחזרות החזויה באזור כביש ים המלח (מתחת למפלס הכביש) בשמונת הנחלים שנחקרו

התחזרות חזויה באזור כביש ים המלח (מ')		נחל
שנת 2050	שנת 2025	
12	4	אוג
0	0	קומראן
17	11	קדרון
40	25	דרגה
18	13	קדם
3.5	3	ישי
5.5	3.5	חבר
4.5	2	צאלים

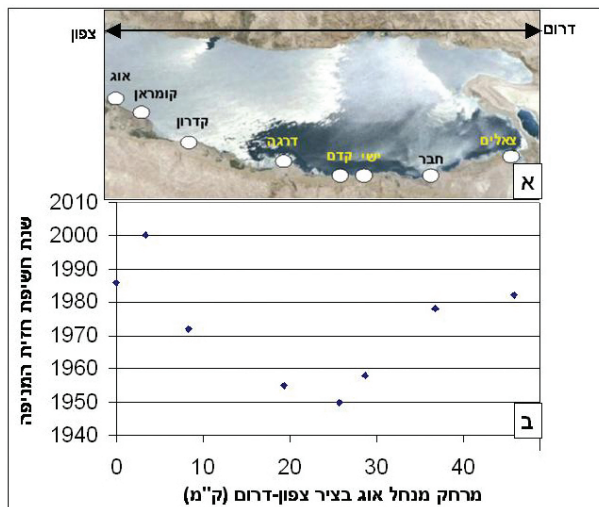
הפרמטרים הקובעים את תגובת הנחלים מקדם הדיפוזיה מגלם בתוכו את כל הפרמטרים המשפיעים על תגובתם של נחלי ים המלח לשינוי בסיס הסחיפה לכדי ערך מספרי אחד ובר השוואה. מאחר שהמחקר נערך על מספר נחלים השונים זה מזה באופיים והתנהגותם, ניתן לבדוק את רגישותם של מקדמי הדיפוזיה (כמייצגי תגובת המערכת) לפרמטרים ההידרולוגיים השונים המאפיינים את הנחלים. הפרמטרים שנבדקו היו גודל האגן, גודל הגריר, הליתולוגיה באגן הניקוז וכן אינדקס הגשם. אינדקס הגשם הוא נפח המים השנתי הממוצע שיורד כגשם על אגן הניקוז כולו, ובהיעדר נתוני ספיקה מדודים נמצא כי הוא הקירוב הטוב ביותר האפשרי לנפח הזרימה השנתי בנחלים (Haviv, 2007).



איור 8: קשר לינארי בין מקדם אינדקס גשם למקדם דיפוזיה הנחלים חבר וצאלים הוצאו מחישוב קו המגמה עקב הסיבות המפורטות במאמר.

הקשר המובהק ביותר שנמצא למקדם הדיפוזיה הוא לאינדקס הגשם (איור 8). בנחלים חבר וצאלים הזרימה השיטפונית מתפזרת ומתבדרת למספר תעלות במניפה. מקדם הדיפוזיה כוּל רק על תעלה אחת ואינו מייצג את תגובת המערכת לכל המים הזורמים במניפות נחלים אלו, ולכן הוצאו שני הנחלים הללו מחישוב המגמה הכללית. לאחוזו הכיסוי של הליתולוגיה הרכה החשופה באגן הניקוז יש השפעה מסוימת על מקדם הדיפוזיה. המחשופים הרכים של תצורות מנוחה ועירב (המורכבות מקרטון וחואר) תורמים לרחופת¹⁵ סדימנט רב, המעלה את משקלם הסגולי של המים ובהתאמה גם את כוח הזרם לסחיפת גרופת.¹⁶ תצורות אלו חשופות ב-67% משטח אגן הניקוז של נחל קומראן, לעומת ממוצע של 40% בשאר הנחלים שנבדקו. זוהי ככל הנראה הסיבה לכך שמקדם הדיפוזיה של נחל קומראן גבוה במקצת מקו המגמה הכללי. לא נמצא כל קשר בין גודל הגרגיר שנמדד בערוצי הנחלים לבין מקדם הדיפוזיה. משמעות הממצאים, במילים פשוטות, היא: עלייה בספיקת המים ממעלה אגן הניקוז תגרום לתגובה מהירה וחזקה יותר ולירידת בסיס הסחיפה בקטעי הנחלים הקרובים לקו החוף. אמנם מסקנה זו נראית לכאורה טריוויאלית, אך מחקרים שנערכו במעבדות הציגו מגוון מסקנות אחרות. ים המלח הוא המקום היחיד שבו נבחנה סוגיה זו במחקר בקנה מידה גדול ובתנאים טבעיים.

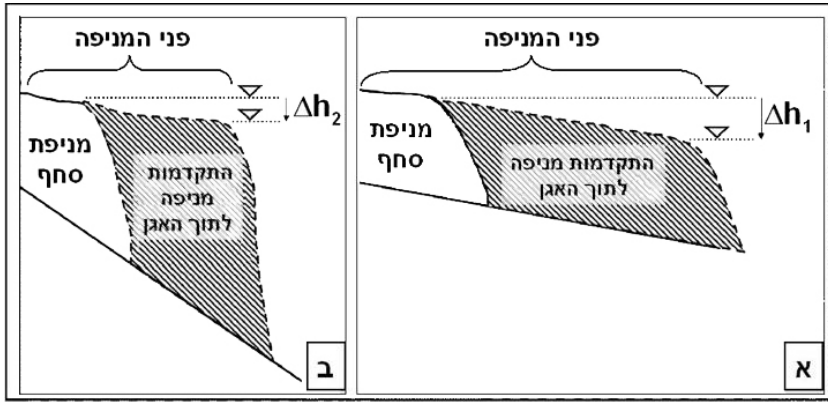
ומה באשר לגורם קובע את מועד תחילת ההתחזרות? נחלי ים המלח שונים זה מזה במועד של חשיפת חזית המניפה התלולה ותחילת ההתחזרות. מחקרים רבים טוענים שמועד זה תלוי ביחס שבין ספיקת המים לספיקת הסדימנט בנחל, כלומר ביחס בין הכוח הסוחף את המניפה לאגם לבין החומר הזמין לבנייתה. ככל שכמות החומר גדולה יותר, כך מהיר יותר הקצב שבו המניפה נבנית לכיוון האגם הנסוג, מבלי שחזיתה נחשפת. בים המלח לא נמצא קשר כזה. לעומת זאת נמצא קשר ברור בין מועד חשיפתה של החזית לבין הבתימטריה הראשונית שעליה הושקעה המניפה. באיור 9 ניתן לראות שבמניפות הממוקמות בשוליים הצפוניים והדרומיים של אגן ים המלח הצפוני, אזורים שבהם הבתימטריה הראשונית מתונה באופן יחסי, נחשפה החזית במועד מאוחר יחסית לאלו הממוקמות במרכז, אזור שבו הבתימטריה תלולה יותר.



איור 9: מפת הנחלים שנחקרו והקשר בין מיקום המניפה לשנה שבה נחשפה חזיתה. הנקודות באיור 9 ב מייצגות את המניפות שמעליהן באיור 9א.

הבתימטריה שעליה מושקעת המניפה בתהליך הפרוגרדציה קובעת במידה רבה את גאומטריית החתך של המניפה החדשה. שטף הסדימנט קובע את שטח החתך החדש, ואילו שיפוע המדף קובע את צורתו וכן את שיעור ירידת המפלס שתגרום לחשיפת חזית המניפה (Δh באיור 10). בפרוגרדציה של מניפה על פני

בתימטריה מתונה שיעורה של ירידת מפלס זו גבוה (איור 10א) ביחס לשיעורה בפרוגרדציה על פני בתימטריה תלולה ($\Delta h_1 > \Delta h_2$ באיור 10ב). שיעור ירידת המפלס הנחוץ לחשיפת החזית יקבע (עבור קצב ירידת מפלס נתון) את משך הזמן עד לחשיפה זו.



איור 10: פרוגרדציה של מניפת סחף על פני בתימטריות שונות
א. בתימטריה מתונה; ב. בתימטריה תלולה

לסיכום, מידת הסיכון להתחתרות מתחת לכביש ים המלח תלויה במשתנים הבאים:

- א. מרחק הכביש מחוף האגם – עקב האופי הדיפוזיבי של ההתחתרות.
- ב. נפח המים הממוצע הזורם בנחל בכל שנה. נפח זה מושפע מגורמים כגון: מקום תחילתו של אגן הניקוז – הרי ירושלים וחברון או מדבר יהודה – ומיקומו של הנחל – בצפון מדבר יהודה או בדרומו.
- ג. הבתימטריה הראשונית שעליה מושקעת מניפת הסחף.

רשימת מקורות וקריאה נוספת

- בן-משה ל. 2005. 'תגובת פרופילי אורך של אפיקים אלוביאליים לשינויים במפלס ים המלח במאה העשרים', עבודת מוסמך, האוניברסיטה העברית בירושלים. קליין, צ. 1986. 'שינויי מפלס ים המלח ותנודות אקלים בארץ ישראל בתקופה ההיסטורית', עבודת דוקטור, האוניברסיטה העברית בירושלים.
- שכנוביץ-פירטל, י. 1999. 'ביטויים מורפולוגיים לירידת מפלס ים המלח כבסיס סחיפה', עבודת מוסמך, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב.
- Begin, Z.B. 1982. 'Application of "Diffusion" Degradation to Some Aspects of Drainage Net Development, B. Borke, & A. Yair (Eds.), *Badland Geomorphology and Piping*. Norwich: Geo Books: 169–179.
- Bookman (Ken-Tur), R., Enzel, Y., Agnon, A. & Stein, M.. 2004. 'Late Holocene Lake Levels of the Dead Sea', *Geological Society of America Bulletin* 116: 555–571.
- Haviv, I. 2007. 'Mechanics, Morphology and Evolution of Vertical Knickpoints (Waterfalls) along the Bedrock Channels of the Dead Sea Western Tectonic Escarpment', Ph.D Dissertation. The Hebrew University of Jerusalem.
- Leopold, L.B. 1992. 'Base Level Rise: Gradient of Deposition', *Israel Journal of Earth Sciences* 41: 57–64.
- Powell, J.W. 1875. 'Exploration of the Colorado River of the West and its Tributaries, 1869–1872', Washington DC: US Government Printing Office, Smithsonian Institute Publications.
- Schumm, S.A. 1993. 'River Response to Base Level Change: Implication for Sequence Stratigraphy', *Journal of Geology* 101: 279–294.

הסברים למושגים המופיעים במאמר

1. **דגם פזרות:** נחל המתפצל לאפיקים רבים המתחברים ומתפצלים שוב במורד, וביניהם שרטונות. דגם זה מאפיין נחלים בעלי כמויות סחף גדולות, הזורמים באזור בעל שיפוע מתון.
2. **אפיק אלוביאלי:** אפיק הזורם על תשתית בלתי מלוכדת, כגון חול וחלקים.
3. **סדימנט:** חומר טבעי מבליה של סלע, הנסחף במורד זרם מים ושוקע באזור מסוים. תהליכים סדימנטריים הם תהליכים שבהם שוקעים ומצטברים סדימנטים.
4. **תהליכים פלוביאליים:** תהליכי התחזרות והשקעת סדימנט, הקשורים לזרימות נחליות.
5. **שיווי משקל עמיד:** מצב שבו מערכת נשארת סביב ערך קבוע, ושינוי במשתנים שונים המרכיבים אותה גורם לשוב הפוך במשתנים אחרים, כך שהשינויים מבטלים זה את זה. לדוגמה: באפיק במצב של שיווי משקל עמיד, עלייה בספיקת המים תגרום לעלייה ברוחב הערוץ, ולכן מהירות המים ועומקם לא ישתנו, ובהתאמה גם לא ישתנה כוח הזרם המופעל על הקרקעית.
6. **שטף:** ספיקה ליחידת רוחב.
7. **Foreset:** יחידה סדימנטרית המושקעת בחזית מניפת סחף הנבנית לתוך גוף מים (אגם או ים), על מדרונה הקדמי התלול. שכבה זו אינה מושקעת בצורה אופקית, כרוב המשקעים הסדימנטריים, אלא צונחת לכיוון המים העמוקים.
8. **פרוגרדיציה:** מונח בגאומורפולוגיה ובגאולוגיה סדימנטרית המתאר גדילה של מניפת סחף לתוך גוף מים.
9. **נקודת נקע:** נקודה לאורך ערוץ נחל שבה יש שינוי בשיפוע האפיק.
10. **בתרונות:** התחזרות של תעלות שאורכן עד כמה עשרות מטרים, בדרך כלל על מדרון של עמק.

11. **משארים של טרסות:** כאשר ערוץ מתחתר לעומק ובמקביל נודד מיקומו הצדה, נותרת טרסה שאריתית גבוהה מהערוץ הפעיל, המייצגת את מיקומו וגובהו של הערוץ הקדום.

12. **דיפוזיה:** מונח מתחום הכימיה, המתאר תהליך שבו חומר עובר מאזור אחד לאחר עקב הבדלי ריכוזים בין האזורים. בדיפוזיה של סדימנט מועבר חומר מאזורים במעלה הנחל, שבהם כוח המים לסחיפת סדימנט גבוה (ובהם מתרחשת התחתרות) לאזורים שבהם כוח המים נמוך (ובהם מתרחשת השקעה). ההתחתרות במעלה הנחל גורמת עם הזמן לירידה מקומית בשיפוע הערוץ ולכן לירידת כוח הזרם, ובמקביל ההשקעה במורד הערוץ גורמת לעלייה מקומית בשיפוע ובכוח הזרם. קצב מעבר החומר מהמעלה למורד נמצא ביחס ישר להבדל שבין כוח הזרם במעלה ובמורד. ככל שהבדל זה קטן והמערכת מתקרבת למצב של שיווי משקל עמיד, יורד קצב מעבר הסדימנט. היחס בין הפרש כוח הזרם שבין המקטעים לבין קצב מעבר החומר מתואר על ידי קיבוע הדיפוזיה, שהוא ייחודי לכל נחל.

13. **בתימטריה:** טופוגרפיית הקרקעית של גוף מים (אגם או ים).

14. **ליתולוגיה:** סוג המסלע.

15. **רחופת:** סדימנט הנסחף בגוף המים ללא מגע בקרקעית.

16. **גרופת:** סדימנט הנגרף על קרקעית הערוץ.