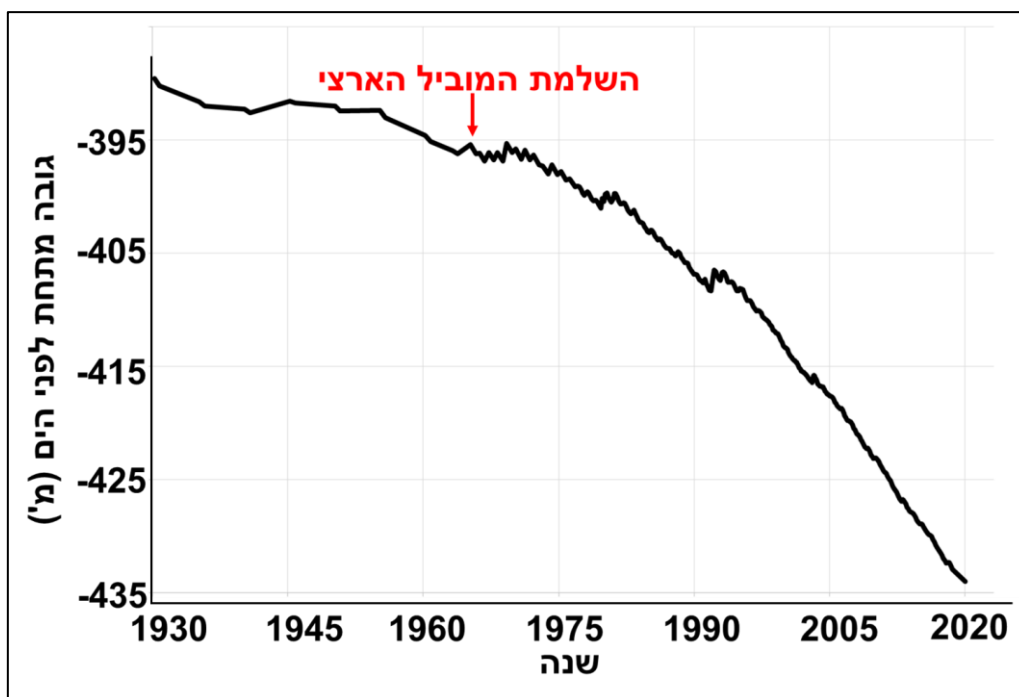


קניונים חדשים על חוף ים המלח - האם ניתן לנבא את העתיד?

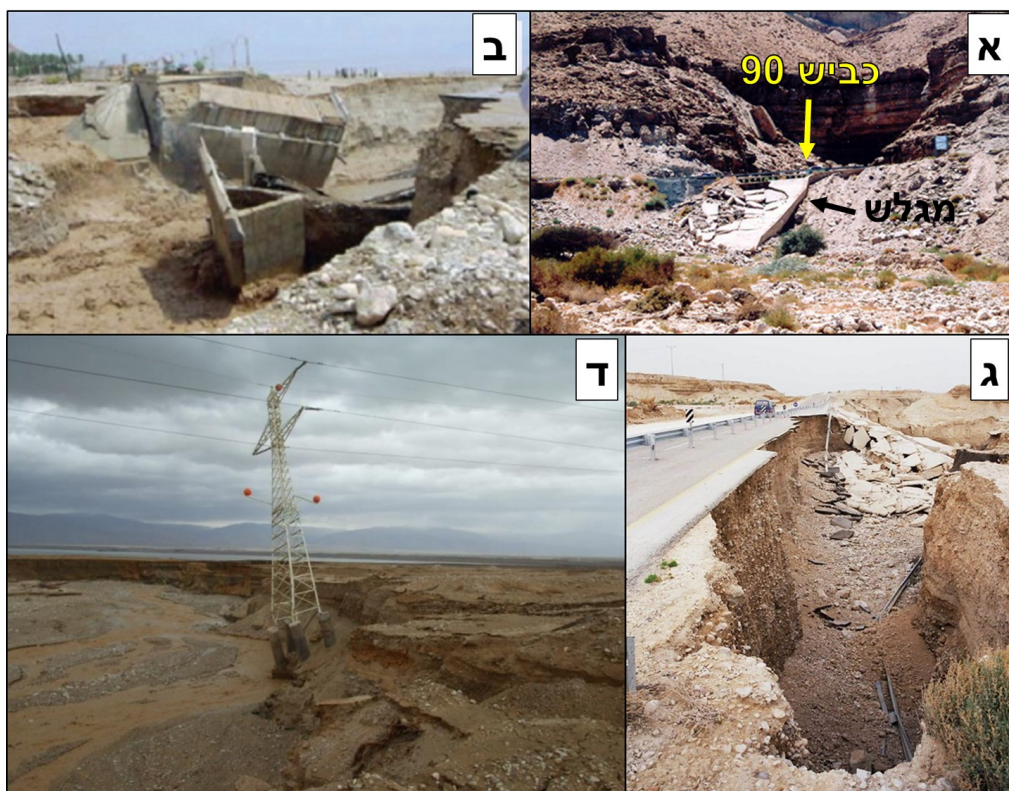
לירן בן משה ונדב לנסקי

מקובל לחשוב שתהליכים גיאולוגיים שמעצבים את הנוף מתרחשים בסדרי זמן של אלפי ומיליוני שנים. לפי תפיסה זו, הגיאולוג הוא מעין בלש שמגיע לזירת הפשע זמן רב אחרי שהתרחש, ומנסה לאסוף רמזים לאירוע שאין עד שיכול לספר עליו ממקור ראשון. לחוקרים שעוסקים בגיאומורפולוגיה, שהינו תחום שמתמקד בתהליכי עיצוב פני השטח, חופי ים המלח מספקים הזדמנות מיוחדת במינה - לחזות בשידור חי בגיאולוגיה בהילוך מהיר. 'בזכות' ירידת המפלס המהירה של ים המלח מאז שנות ה-60 של המאה שעברה (איור 1), ניתן לעקוב במספר שנים בודדות אחר תהליכים גיאומורפולוגיים שבדרך כלל נמשכים מאות ואלפי שנים. למעשה, חופי ים המלח הינם מעבדת השדה הגדולה בעולם לבחינת ההשפעה של ירידת בסיס סחיפה 1 על הסביבה החופית.



איור 1: עקומת מפלס ים המלח מאז שנות ה-30 של המאה שעברה. בעקבות הקמת המוביל הארצי מאזן המים באגם הפך להיות שלילי, והמפלס החל לרדת במהירות שהלכה וגדלה עם השנים (לנסקי ודנטה, 2017).

ההשפעה של ירידת מפלס ים המלח על סביבתו חורגת מגבולות העיסוק המחקרי והאקדמי גרידא; באזור ים המלח מתקיים ממשק צמוד בין נחלים שיטפוניים עתירי סדימנט גס, תשתיות מקומיות ואסטרטגיות (כביש 90, קווי מים וחשמל), וטופוגרפיה המגבילה את מיקום התשתיות לרצועה צרה לאורך החוף. כתוצאה מירידת המפלס ונסיגת קו החוף, חלק ניכר מנחלי ים המלח מתחתרים אל תוך החומר האלוביאלי2 עליו הם זורמים באזור החוף, ו'שומטים את הקרקע' תחת רגליהן של התשתיות החוצות את הערוצים. התחתרות זו, והתרחבות תעלות האפיק הנלווית לה, גרמו במהלך העשורים האחרונים לאירועי קריסה של תשתיות אלו (איור 2). במאמר זה אנו מציגים את תופעות ההתחתרות וההתרחבות של אפיקי הנחלים כביטוי ליציאה ולהתרחקות של חלק מהמערכות הנחליות באזור ים המלח ממצב של שיווי משקל גיאומורפולוגי. בחלק הראשון של המאמר אנו מסבירים מהו שיווי משקל גיאומורפולוגי של נחל, באילו תנאים נשמר שיווי משקל זה ובאילו תנאים הוא מופר. בחלק השני של המאמר אנו מתארים את תגובתם של נחלי ים המלח לירידת מפלס האגם, ומדגימים כיצד היציאה וההתרחקות של נחלים אלו משיווי משקל באה לידי ביטוי בשינויי העומק והרוחב של אפיקיהם. בחלק השלישי של המאמר אנו דנים ביכולת לתת תחזיות מדויקות לשינויים אלו. בחלק האחרון של המאמר אנו מציגים מדיניות תכנונית המותאמת לקצבים המהירים של תהליכי סחיפת הקרקע באזור, ולאי הוודאות הכרוכה בהערכת קצבים אלו לעתיד.



איור 2: נזקים לתשתיות באזור ים המלח בעקבות התחתרות והתרחבות הנחלים כתגובה לירידת המפלס. (א) קריסת מגלש שהגן על כביש 90 בחציית נחל ישי. (ב) קריסת גשר על נחל ערוגות בשיטפון בחורף 2001-2002. ניתן לצפות בתהליך הקריסה בסרטון שבקישור <https://www.youtube.com/watch?v=s9GySqNj0cU>. (ג) קריסה חלקית של כביש 90 בחציית נחל דרגה, חורף 2002-2003. (ד) קריסת קו מתח גבוה עקב התרחבות אחד מערוצי נחל צאלים.

רקע ועקרונות יסוד

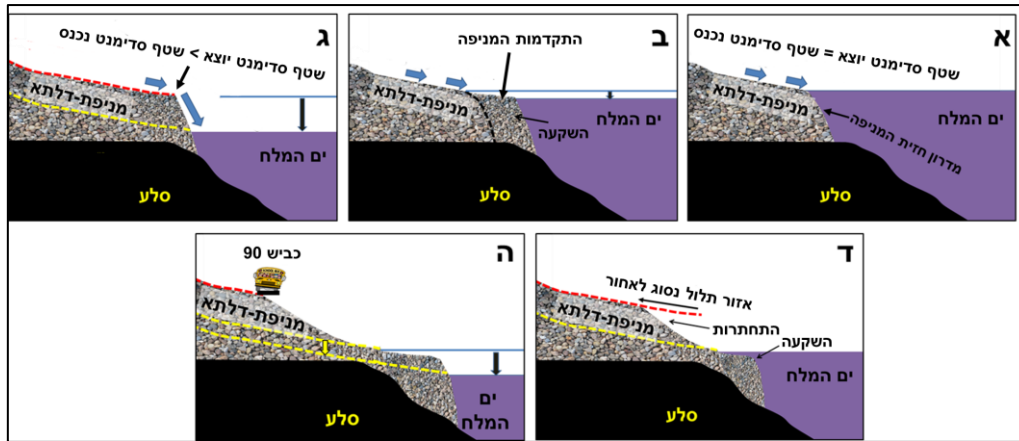
שיווי משקל של נחל אלוביאלי

שיפוע קרקעית של תעלת נחל אלוביאלי נגזר מיכולת המים הזורמים לנתק חלוקים מקרקעית הנחל ולהוביל אותם במורד הזרימה. יכולת זו נתונה במשוואה 1, בהנחה שכמות הסדימנט הזמין לסחיפה אינה מהווה גורם מגביל: (1) $q_s = kS$ (Begin, 1981)

כאשר q_s = שטף סדימנט (ספיקה ליחידת רוחב הזרימה); k = קבוע התלוי בשטף המים, התנגדות הקרקעית לגזירה, ובגודל וצפיפות סגולית של החלוקים; S = שיפוע הקרקעית בכיוון מורד הזרימה. על מנת שנחל אלוביאלי יהיה בשיווי משקל, ספיקת הסדימנט המגיע לכל נקודה בנחל ממעלה האגן (אגף שמאל במשוואה 1) צריכה להיות שווה לזו שיוצאת ממנה במורד- דהיינו למכפלה של שיפוע שיווי המשקל בקבוע k (אגף ימין במשוואה 1). קבוע k מגלם בתוכו את ספיקת המים ותכונות החומר האלוביאלי בכל נחל, משתנים שהינם שונים בין הנחלים השונים. מסיבה זו לכל נחל קבוע k שונה האופייני לו, ובהתאם שיפוע שיווי משקל המותאם לו. כל עוד ספיקת הסדימנט מהמעלה וקבוע k אינם משתנים לאורך ערוצו של נחל מסויים, שיפוע שיווי המשקל של הנחל אינו משתנה. מסיבה זו, פרופיל האורך של נחל כזה הינו בדרך כלל לינארי.

התגובה המורפולוגית של מניפות-דלתאיות לירידת בסיס הסחיפה

כאשר מניפת סחף נבנית אל תוך גוף מים (ים או אגם), היא נקראת מניפת דלתא. במניפה מסוג זה ישנם בדרך כלל מספר ערוצים בדגם פזרות, אשר מובילים את כל הסדימנט המגיע ממעלה האגן אל גוף המים (איור 3א). חזית המניפה התת ימית הינה בדרך כלל תלולה מפני המניפה שבחלקה היבשתי, ושיפועה גבוה משיפוע שיווי המשקל של הנחל. במהלך ירידת מפלס איטית של גוף המים, הסדימנט מושקע בחזית המניפה תוך הגדלת שטחה לכיוון החוף הנסוג (איור 3ב). כל עוד קצב בניית המניפה לכיוון גוף המים היורד שווה לקצב נסיגת קו החוף, חזית המניפה התלולה תישאר מתחת לפני המים (איור 3ב). במצב זה ישמר שיפוע הנחל האחיד, הערוצים הפעילים על גבי המניפה יתארכו גם הם לכיוון גוף המים הנסוג, ומבנה הפזרות במניפת הדלתא ישמר.



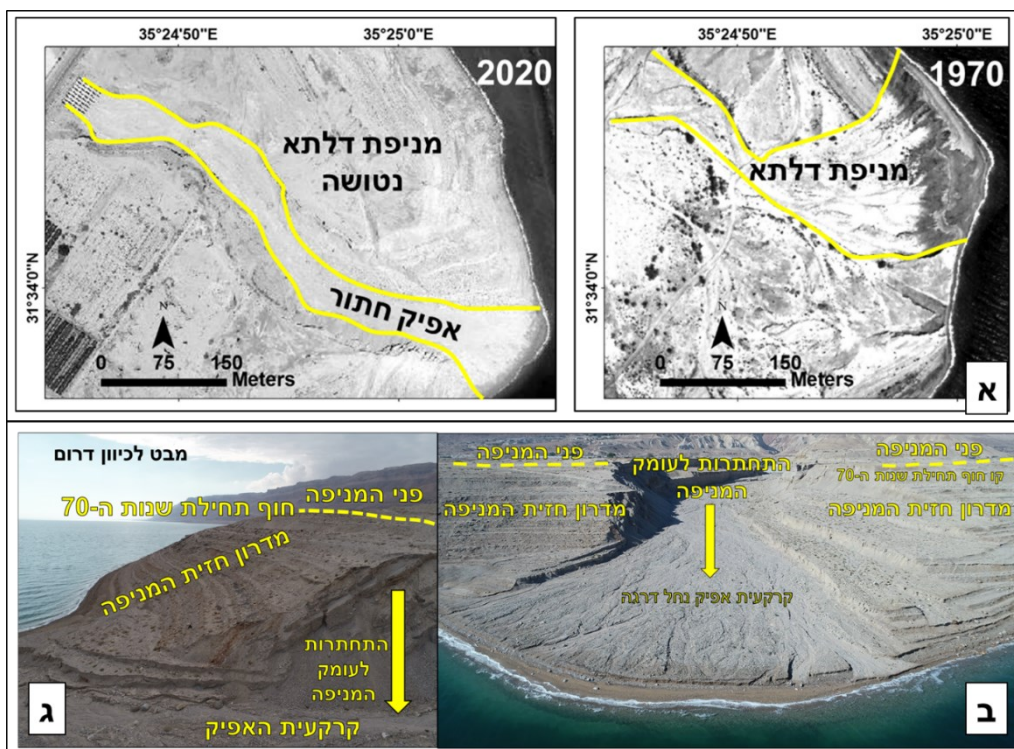
איור 3: תרשים סכמטי של תגובת נחל אלוביאלי לירידת מפלס ים המלח. (א) נחל בשיווי משקל זורם על גבי מניפת סחף, עם שיפוע אחיד של הקרקעית (שיפוע שיווי המשקל). כל הסדימנט המובא ממעלה האגן מובל אל האגם. (ב) ירידת מפלס איטית. המניפה נבנית על ידי הסדימנט ומתקדמת בעקבות חוף האגם הנסוג, תוך כדי שימור שיפוע שיווי המשקל של הנחל הזורם עליה. (ג) ירידת מפלס מהירה מלווה בחשיפה של מדרון חזית המניפה ששיפועו גבוה משיפוע שיווי המשקל. מראש המדרון יוצא יותר סדימנט למורד מאשר מגיע אליו. כתוצאה, פרופיל האורך הראשוני של הנחל (קו מקוטע אדום) מפסיק להיות פרופיל שיווי המשקל. פרופיל שיווי המשקל החדש (קו מקוטע צהוב) מקביל אליו אך נמוך ממנו. (ד) פרופיל האורך של הנחל 'שואף' להגיע לפרופיל שיווי המשקל תוך התחזרות לעומק ונסיגת האזור התלול לאחור. החומר האלוביאלי המוסר מהמניפה מושקע באגם. (ה) התחזרות לעומק תוך פגיעה בתשתית התומכת בכביש 90. במקביל, נמשכת ירידת מפלס האגם ונוצר פרופיל שיווי משקל חדש, נמוך עוד יותר מהפרופיל שהנחל 'שואף' להגיע אליו- זהו הביטוי להתרחקות הנחל משיווי משקל.

כאשר קצב נסיגת החוף עולה על קצב התקדמות המניפה לכיוון גוף המים, תיחשף חזית המניפה התלולה (איור ג). במצב זה פרופיל האורך של פני המניפה יחדל להיות שווה לפרופיל האורך של שיווי המשקל, ופרופיל שיווי המשקל החדש יהיה מקביל לו ונמוך יותר- בהתאם לגובה ומיקום קו החוף החדש. אם ירידת המפלס לא מלווה בשינוי במעלה אגן הניקוז, אזי שטפי המים והסדימנט המגיעים לנחל ממעלה הזרימה יישארו ללא שינוי. לכן, בעוד העלייה המקומית בשיפוע בראש חזית המניפה תגרום לעלייה בשטף הסדימנט היוצא מאזור זה (משוואה 1), שטף הסדימנט המגיע לראש החזית לא ישתנה. למעשה, מראש חזית המניפה יצא יותר סדימנט ממה שנכנס אליה (איור ג). המשמעות היא שבראש חזית המניפה תהיה התחזרות, גובה הנקודה שבראש החזית ירד, השיפוע במקטע שבמורדה ירד אף הוא, והאזור התלול יחסית ייסוג לאחור תוך כדי הגדלת השיפוע במעלה (איור ד). ההתחזרות תנדוד אף היא לכיוון מעלה האגן, וניתן לומר בהשאלה שהנחל 'שואף' להגיע לפרופיל שיווי המשקל החדש. מהירות נסיגת נקודת הנקע לאחור וקצב ההתחזרות בכל נקודה תלויים במספר משתנים, שהעיקריים הם ספיקת המים, ליכודיות התשתית וגודל הגרגר (Ben Moshe et al., 2008; Dente et al., 2017). במהלך ההתחזרות יעלם דגם הפזרות של מניפת הדלתא, והזרימה תתועל לתעלת אפיק חתורה בתוך המניפה שתינטש מבחינה הידרולוגית. אם יתייצב מפלס גוף המים, ההתחזרות תסתיים פרופיל האורך יגיע לפרופיל שיווי המשקל החדש, ששיפועו זהה לשיפוע שיווי המשקל. במקרה של ים המלח המצב שונה- ירידת המפלס אינה חד פעמית

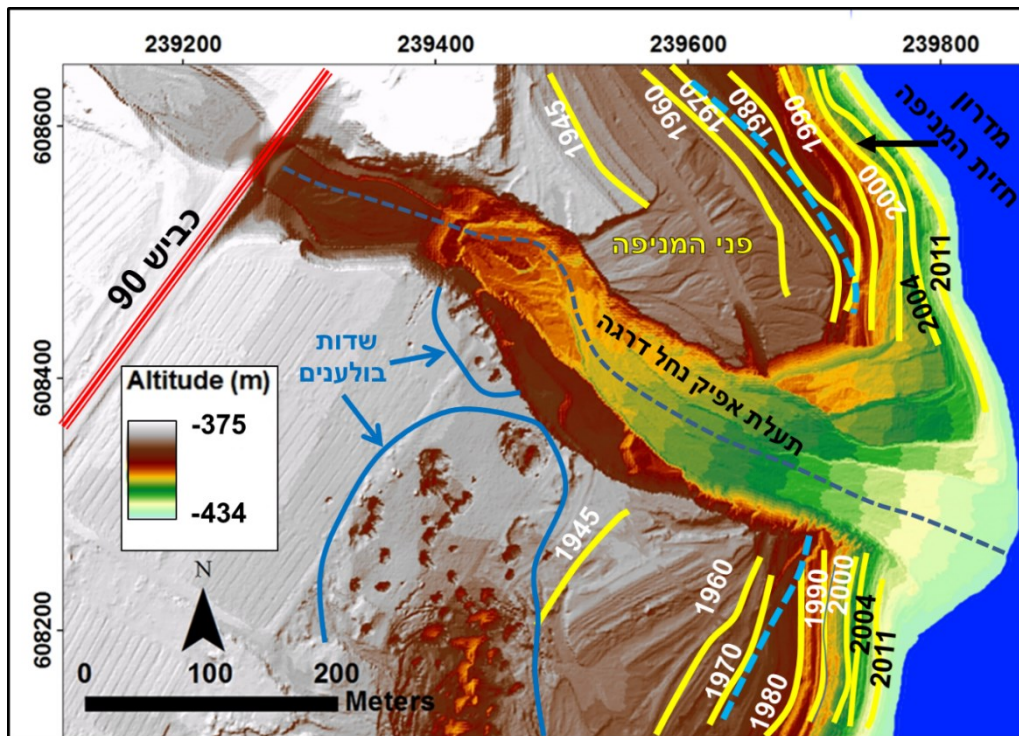
אלא מתמשכת ואף מתגברת (לנסקי ודנטה, 2017). אם במקביל לירידת המפלס תמשיך להיחשף טופוגרפיה תלולה (כפי שקורה ברוב המקרים) - פרופיל שיווי המשקל לא יהיה סטטי אלא ימשיך לרדת כל הזמן (איור 3). במצב כזה שיפוע הנחל יגדל, ומכיוון שלוקח זמן להתחתרות לנדוד לאחור, פרופיל האורך שלו יהפוך להיות קמור. למעשה, לא רק שהנחל לא יצליח להגיע לשיווי משקל, הוא אף יתרחק ממנו.

התחתרות נחל לעומק- המקרה של נחל דרגה

התפתחות פרופילי האורך של נחל דרגה ב-50 השנים האחרונות מובאת כאן כדוגמה המייצגת את הנחלים המתחתרים לעומק כתגובה לירידת המפלס. עד תחילת שנות ה-70 של המאה שעברה, הנחל זרם במניפת דלתא עם דגם פזרות (איור 4א), והיה בשיווי משקל עם שיפוע ממוצע של 2%. במצב זה הסדימנט שהגיע ממעלה אגן הניקוז של הנחל (שגודלו כ-240 קמ"ר) בנה את המניפה לכיוון מזרח, בעקבות חוף האגם שנסוג בקצב איטי (איור 1). באמצע שנות ה-70, עם חשיפת חזית המניפה התלולה ששיפועה 20%, החל אפיק הנחל להתחתר לעומק המניפה; מאז ההתחתרות נמשכת וזרימת הנחל מוגבלת לתעלה החתורה בתוך המניפה (איורים 4,5). המיקום של הזרימה השיטפונית משתנה רק בתוך התעלה החתורה ואילו משטח המניפה ננטש מבחינה הידרולוגית וגיאומורפולוגית.



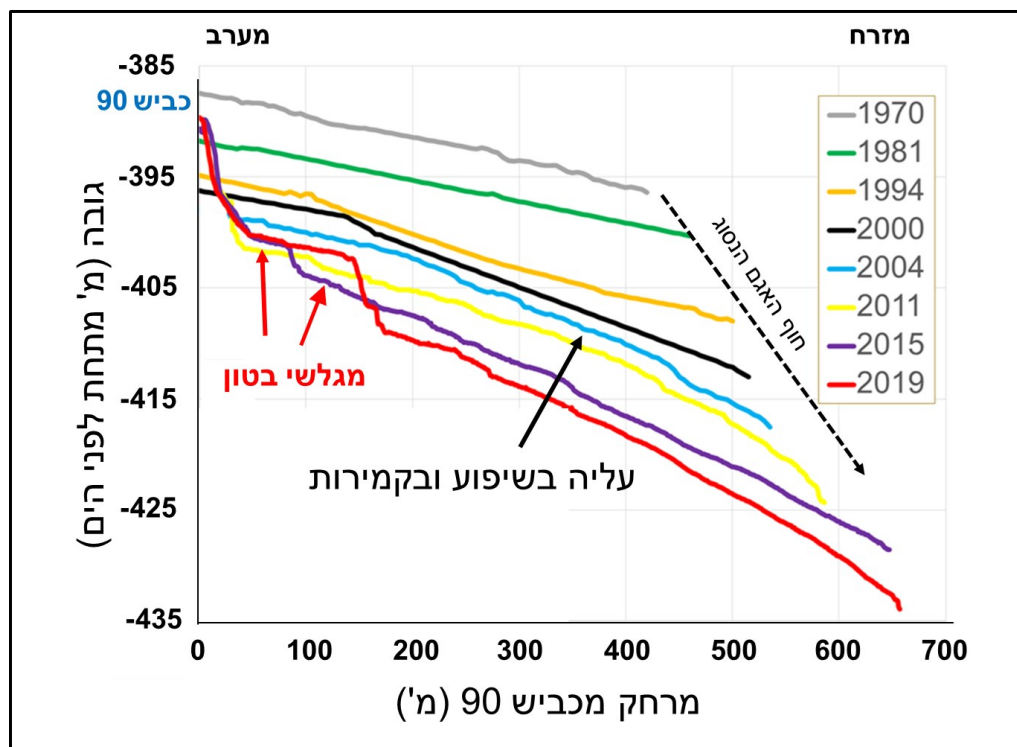
איור 4: (א) צילומי אוויר אנכיים של אפיק נחל דרגה בין כביש 90 לים המלח בשנים 1970 (מימין) ו-2020 (משמאל). ניתן לראות שדפוס הזרימה הפך מדגם פזרות לרוחב מניפה פעילה לזרימה מוגבלת בתוך תעלה. **(ב+ג)** צילומי אוויר אלכסוניים של אפיק נחל דרגה ממול השפך **(ב)** ובניצב לגדה הדרומית **(ג)**. ניתן לראות את פני המניפה עליה זרם הנחל כל עוד היה בשיווי משקל, ואת מדרון חזית המניפה שהיחשפותו גרמה לתחילת ההתחתרות.



איור 5: מפת גבהים של טופוגרפית אזור נחל דרגה בין כביש 90 (משמאל) לים המלח (מימין), מיקום קו החוף בשנים שונות (קווים צהובים), ומיקום ראש מדרון חזית המניפה (קו כחול מקוטע).

איור 6 מציג את פרופילי האורך של קרקעית נחל דרגה, והתפתחותם בין השנים 1970-2019. בשנת 1970 (כאשר הנחל היה עדיין בשיווי משקל) אורך הנחל מאזור חצית הכביש ועד השפך היה 420 מ', הפרש הגבהים בין קרקעית הנחל באזור הכביש לאגם היה 9 מ', שיפוע הפרופיל היה אחיד לאורך הנחל ושיעורו כ-2%. בחלוף הזמן והמשך ירידת המפלס, האפיק התארך, גובה שפך הנחל לאגם ירד, שיפוע הקרקעית גדל ופרופיל האורך נעשה קמור יותר. בשנת 2019 אורך הנחל מאזור חצית הכביש ועד השפך היה 650 מ', הפרש הגבהים בין קרקעית הנחל באזור הכביש לאגם היה 39 מ', ושיפוע קרקעית הנחל הממוצע היה 6%. בכל נחלי ים המלח שבמורדם נחשף בעשרות השנים האחרונות משטח תלול מ-5% ארעה התחתרות לעומק והתפתח בהם פרופיל אורך קמור. תיאורטית, ההתחתרות אמורה להימשך עד להגעה לפרופיל לינארי ומקביל לפרופיל שיווי המשקל הטבעי (לדוגמה בנחל דרגה – פרופיל עם שיפוע ממוצע של 2%). מעשית, כל עוד ירידת המפלס נמשכת והשיפוע של קרקעית האגם הנחשפת בשפכי הנחלים ממשיך להיות גדול משיפוע שיווי המשקל – המערכות הנחליות ימשיכו להתרחק משיווי משקל, תימשך ההתחתרות של קרקעית הערוצים לעומק, וקמירות פרופילי האורך תגדל. הקמירות הגדלה עם הזמן מהווה ביטוי למאגר של אנרגיה פוטנציאלית, מכיוון שקצב ההתחתרות קטן מקצב ירידת המפלס, ואינו מספיק ליצור פרופיל מקביל לפרופיל שיווי המשקל של טרום-חשיפת חזית המניפה התלולה. בתרחיש של התייצבות מפלס האגם, ניתן לחשב את משך הזמן הדרוש למערכות הנחליות באזור ים המלח לחזור למצב של שיווי משקל (לדוגמה Ben, 1981; Moshe et al., 2008). מחישובים אלו עולה כי אם יתייצב מפלס ים המלח כיום, המערכת הנחלית בנחל

דרגה תתקרב באזור כביש 90 לשיווי משקל רק בעוד עשרות שנים. בנחלים אחרים, כגון קדם וקדרון, מצב זה יתרחש רק בעוד יותר ממאה שנים. עד אז תימשך ההתחברות בקרבת הכביש.



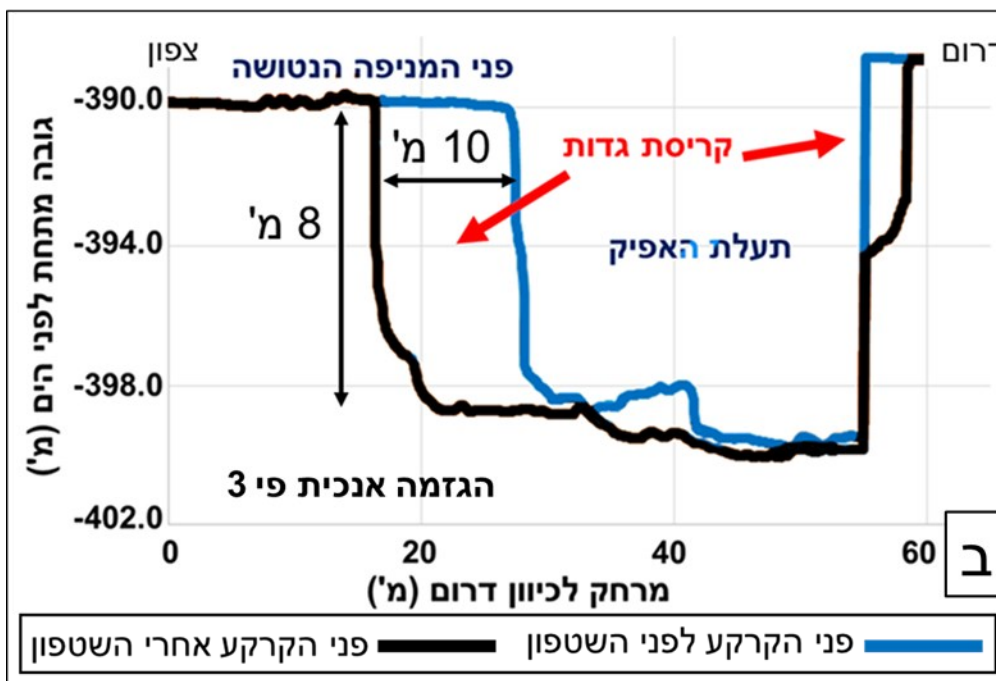
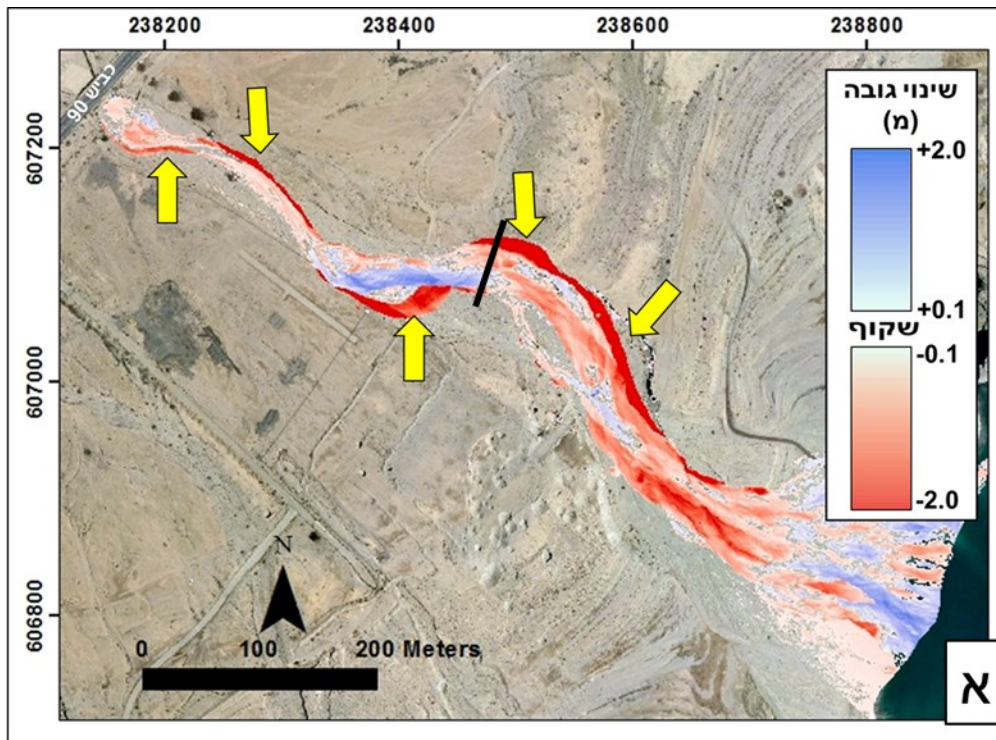
איור 6: פרופילי אורך של קרקעית נחל דרגה בשנים שונות, בין כביש 90 (מימין) לחוף האגם (משמאל). בין השנים 2010-2019 נבנו דיפונים ומגלשי בטון במקטע הנחל שנמצא כ-180 מ' במורד מכביש 90, על מנת להגן עליו מפני ההתחברות, ולכן פרופיל הנחל במקטע זה אינו טבעי.

שינויים במימד הרוחב של אפיקי הנחלים

ההתחברות לעומק של הנחלים יצרה קירות תלולים בגדות האפיקים החתורים. קירות אלו חשופים למאמצי גזירה ע"י מי שיטפונות והסדימנט המוסע בהם, ולתהליכי קריסה גרביטציוניים. אירועי קריסה יכולים להתרחש תוך כדי שיטפונות ולהשפיע מיידית על משטר הזרימה, או להתרחש בין שיטפונות ולגרום להצטברות חומר אלוביאלי על קרקעית האפיק. בעוד הקצב הממוצע של ירידת גובה קרקעית הנחל הינו בסדרי גודל של עשרות ס"מ עד מטר לשנה (איור 6), באירוע אחד ומהיר של קריסת גדות ירידת גובה פני הקרקע באזור שקרס והתרחבות האפיק נמדדות במטרים רבים. איור 7 מציג את שינוי גובה פני השטח באזור נחל חצון, במקטע הנחל שממזרח לכביש 90, בעקבות אירוע שיטפוני בתאריך 6/3/2020. שיטפון זה היה הגדול ביותר בחורף 2019-2020, אך לא היה חריג בעוצמתו מבחינה היסטורית. ניתן לראות חמישה אזורים בהם כתוצאה מקריסת גדות בשיטפון (או מיד אחריו) אפיק הנחל התרחב בשיעור של 4-12 מ' (עליה של עד כ-25% ברוחב). חשוב לציין שישנה שונות רבה להסתברות של קריסת גדות בין הנחלים השונים לחוף ים המלח, ובין מקטעים שונים לאורכו של כל אפיק נחל.

כאשר קצב השינויים המתרחשים עקב אירועי קריסה בגדות נחל גבוה מקצב ה'תיקון' של שינויים אלו (לדוגמא פינוי סדימנט שקרס מהגדות והצטבר על הקרקעית), הנחל מתרחק ממצב של שיווי משקל. התרחקות זו באה לידי ביטוי במשתנים הגיאומורפולוגיים וההידרולוגיים הבאים:

- התרחבות אפיק שגורמת להגדלת רוחב הזרימה, גורמת לירידה בעומק המים, ולכן לירידה בכוח הזרם להוביל סדימנט.
- חומר שקרס או גלש מהגדות והצטבר על קרקעית האפיק גורם לשינוי מקומי בשיפוע הקרקעית ומשפיע על יכולת המים להוביל סדימנט (משוואה 1). בנוסף, הערמות זו יוצרת מכשול מקומי אשר גורם להערמות מים מאחוריו (נקרא backwater effect) ולשינוי מקומי בכיוון הזרימה ומהירותה.
- קריסה אשר יוצרת שינוי בפיתוליות הנחל, גורמת לירידה או עליה בשיפוע הזרימה (בהגדלת או הקטנת פיתוליות, בהתאמה).
- שינוי בכיוון מפנה גדת האפיק, אשר משפיע על הזווית בה השיטפון פוגע בגדה. המערכת הנחלית 'שואפת' להקטין זוויות אלו, ומסיבה זו קריסה שתלווה בהגדלת הזווית תוביל לקריסות נוספות אשר 'יגלחו' את גדת הנחל עד שתהיה מקבילה לכיוון הזרימה.

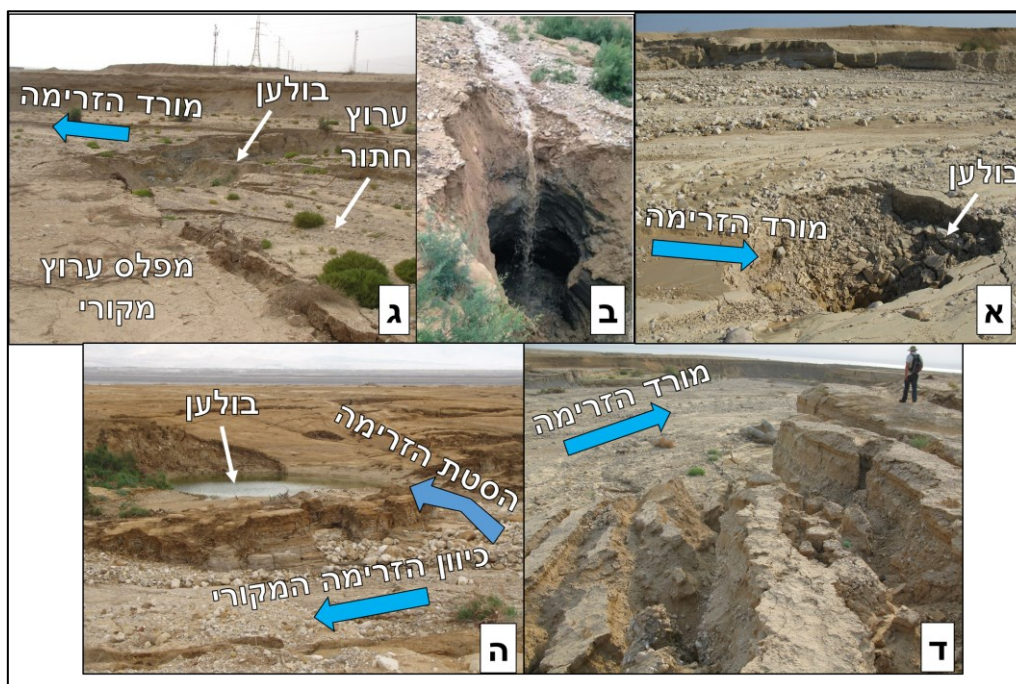


איור 7: התרחבות בתעלת נחל חצון בעקבות שטפון ב-6/3/2020. (א) מפת שינוי גובה פני הקרקע בעקבות השיטפון. צבעים אדומים מציינים ירידה בגובה (התחזרות או קריסת גדה), צבעים כחולים מציינים עלייה בגובה (הצטברות סדימנט). חיצים צהובים מצביעים על אזורים של קריסות גדה. הקו השחור מצוין את מיקום חתך הרוחב שבאיור ב. (ב) חתך רוחב דרך אחת מקריסות הגדה. הקווים הכחול והשחור מציגים את קרקעית הנחל לפני ואחרי האירוע השיטפוני, בהתאמה.

היפערות בולענים בתוך אפיקי הנחלים

בולענים החלו להיפער לאורך חוף ים המלח בתחילת שנות ה-80 של המאה שעברה, בתהליך שקצבו התגבר עם השנים (Abelson et al., 2006; Yechieli et al., 2006). כאשר בולענים נפערים בתוך אפיק נחל (איור 8א), מי שיטפונות יכולים להיבלע על ידם (איור 8ב). תהליך זה מוביל למשוב חיובי, אשר גורם להאצה ניכרת בקצב המסת המלח בתת הקרקע ולעליה בקצב גדילת הבולענים ופתיחתם של בולענים חדשים (Avni et al., 2016). בולענים אלו מהווים בסיס סחיפה מקומי הגורם להתחתרות במעלה הזרימה (איור 8ג). לדוגמא, בנחל חבר יצרו בולענים בסיס סחיפה נמוך ב-8 מ' מגובה קרקעית האפיק, במרחק של 200 מ' במורד הנחל מכביש 90; בעקבות היווצרות בולענים אלו החלה ההתחתרות לעומק, אשר הגיעה עד לכביש 90 ויצרה מדרגה בגובה כ-2 מ' בצמוד אליו. היפערות בולענים בקרבת גדות האפיקים מערערת את יציבותן ועלולה לגרום לקריסתן ולשינוי בחתך הרחב של הנחלים (איור 8ד). בנוסף, שקיעת הקרקע באזורי הבולענים עלולים לגרום להסטה של נתיבי הזרימה (איור 8ה). במהלך השיטפונות הבולענים בתוך הערוצים מתמלאים בסחף, אך בדרך כלל זמן קצר אחרי השיטפון מתרחשות קריסות חדשות והבולענים נפתחים שוב ו'ממתינים' לבואו של השיטפון הבא שיזרום אל קרביהם. ניתן לראות את תהליך מילוי של בולען בסחף בקישור הבא:

<https://www.youtube.com/watch?v=Lelvul4YlTA>



איור 8: השפעת פתיחת בולענים על אפיקי הנחלים. (א) בולען בתוך אפיק נחל צאליים. (ב) זרימת מי שטפון לתוך בולען (מתוך Avni et al., 2016). (ג) התחתרות באפיק נחל צאליים בעקבות פתיחת בולען שהפך להיות בסיס סחיפה מקומי שהיה נמוך בכ-6 מ' מקרקעית הנחל. (ד) קריסת גדת נחל צאליים עקב פתיחת בולען תחתיה. (ה) הסטת זרימה בנחל צאליים עקב שקיעת קרקע באזור בולענים.

כיום קיימים שדות בולענים פעילים (אזורים בהם נפתחים בולענים חדשים, ובולענים קיימים ממשיכים לגדול) בתוך אפיקי הנחלים קדרון, דרגה, חצצון, דוד, חבר וצאלים. על פי בר וחובריו (2019), בעשורים הבאים השטח הנתפס ע"י בולענים לחוף ים המלח צפוי לגדול, והמערכת הנחלית באזורים אלו תמשיך להיות מושפעת מפתחתם. קיים סיכוי סביר שבעתיד יתפתחו בולענים גם באפיקי נחלים בהם אינם קיימים כיום, ובכך יורחב שטח ההשפעה של מי השיטפונות על פתיחת בולענים לאפיקים נוספים בחוף ים המלח. לפיכך, הצפי לעשרות השנים הבאות הוא שגם בהקשר של הבולענים (כמו בהקשרים של ההתחזרות לעומק וקריסת הגדות), המערכות הנחליות צפויות להמשיך להתרחק ממצב שיווי המשקל שלפני ירידת המפלס המהירה בים המלח.

אי הוודאות בתחזיות לשינויים הנחלים

כאשר מתכננים תשתיות הנמצאות בממשק עם נחלים, המשתנה החשוב ביותר הינו ספיקת תכן. בארץ, נהוג לתכנן מעבירי מים לספיקות תכן של 50 או 100 שנים. בים המלח המצב שונה בתכלית. מה הטעם לתכנן גשר לספיקה שמתרחשת פעם ב-50 שנה, אם בעוד 10 שנים ערוץ הנחל יתחת מתחת לעמודי התמך שמחזיקים אותו ויגרום לקריסתו? לכן, בסביבת חוף ים המלח תכנון התשתיות החוצות נחלים מצריך תחזיות והתייחסות לקצב ההתחזרות והתרחבות האפיקים בנוסף לספיקת התכן. בהסתמך על משתנים אלו ניתן לתכנן את אופי מעבירי המים מתחת לכביש, סוג ההגנות על המעבירים ומתקני התשתית, והעומק מתחת לקרקעית הנחל הנוכחית הנחוץ לביסוס ארוך טווח של התשתיות. הערכת חסר של קצבי ההתחזרות והתרחבות תוביל לקריסת התשתיות תוך פרק זמן קצר מזה שתוכננו אליו, ואילו הערכת יתר תוביל להקמת מתקנים מסיביים ויקרים ללא כל צורך. מבין התהליכים שתוארו למעלה (התחזרות לעומק, התרחבות, ופתיחת בולענים), קצבי ההתחזרות הם משתנה שניתן לחזות, עם טווח טעות קטן יחסית. לדוגמא, בן משה (2011) העריך באמצעות מודל המתבסס על תיאור תהליך הסעת סדימנט באופן דומה להסעה בדיפוזיה, את שיעור התחזרותם החזוי באזור כביש 90 של שמונה מנחלי ים המלח (אוג, קומראן, קדרון, דרגה, קדם, ישי, חבר וצאלים) למרחק זמן של 50 שנה. מאידך, התהליכים הגורמים לקריסת גדות הינם מורכבים, בעייתיים לחיזוי ואף בעלי אופי אקראי. חוץ מחיזוי תזמון ושיעור התהליכים עצמן, ישנם משתנים התחלתיים (לדוגמא, מערכות הסידוק והרכב תת הקרקע בקרבת גדות תעלת האפיק) שמבחינה פרקטית המיפוי או המדידה שלהם ברזולוציה הפרטנית הנחוצה לתכנון אינם רלבנטיים. מסיבות אלו לא מוכר לנו מודל שיכול לחזות את שינויי חתך הרחב של תעלות הנחלים בסביבה דומה לחוף ים המלח. משתנה נוסף שהאפשרות לחזותו הינה בעייתית הוא פתיחתם של בולענים באפיקי הנחלים. בשנים האחרונות השפעתו של משתנה זה הולכת וגדלה, וכפי שהוצג למעלה, ניתן להניח שמגמה זו תימשך בעשרות השנים הבאות. אזור חצית הכביש את רוב הנחלים נמצא באזור בעל הסתברות נמוכה ליצירת

בולענים (לדוגמא אבלסון וחובריו, 2017; ברנשטיין וחובריו, 2019), אך ברוב המקרים האפיקים במורד הנחל מכביש 90 נמצאים באזור בעל הסתברות גבוהה. מפות התכנות פתיחת הבולענים שמפרסם המכון הגיאולוגי מספקות תמונת מצב כללית, ואינן יכולות לספק מידע פרטני על מיקומם המדויק של בולענים עתידיים, מועד פתיחתם, עומקם, ושטחם.

כמובן, אי אפשר להתעלם משינוי האקלים הגלובלי, אשר השלכותיו המקומיות עדיין אינן ברורות. כאשר מנסים לייצר תחזיות בסדרי גודל של עשרות שנים, יש לקחת בחשבון שייטכן שבמהלך תקופה זו יתרחשו שינויים בתדירות ועוצמת השיטפונות. מכיוון שהשיטפונות מהווים למעשה את ה'דלק' המניע את תהליך ההתחברות, אזי שינוי בהם ישפיע ישירות על קצבי השינויים בנחלים. ירידה בכמות המשקעים אשר תוביל לירידה בתדירות השיטפונות תגרום לירידה בקצבים אלו (ולכן לתכנון מתקנים מסיביים מהנחוץ), אך מצד שני עלייה בתדירות סופות גשם חזקות תגרום לעלייה בקצבים (ולתכנון מתקנים שמשך חייהם יהיה קצר מהמתוכנן). בנוסף, שינוי בקצב ירידת המפלים עקב שינוי אקלימי או במדיניות ניהול מאזן המים באגן הניקוז של האגם, ישפיע ישירות על קצב היחשפות הטופוגרפיה התלולה במורד הערוצים, שהיא הגורם שמניע את ההתחברות מלכתחילה.

לאור מגבלות החיזוי שהוצגו לעיל, איך ניתן לתכנן תשתיות באזור ים המלח בתנאי אי וודאות כאלו?

תכנון תשתיות בתנאים המשתנים של חוף ים המלח

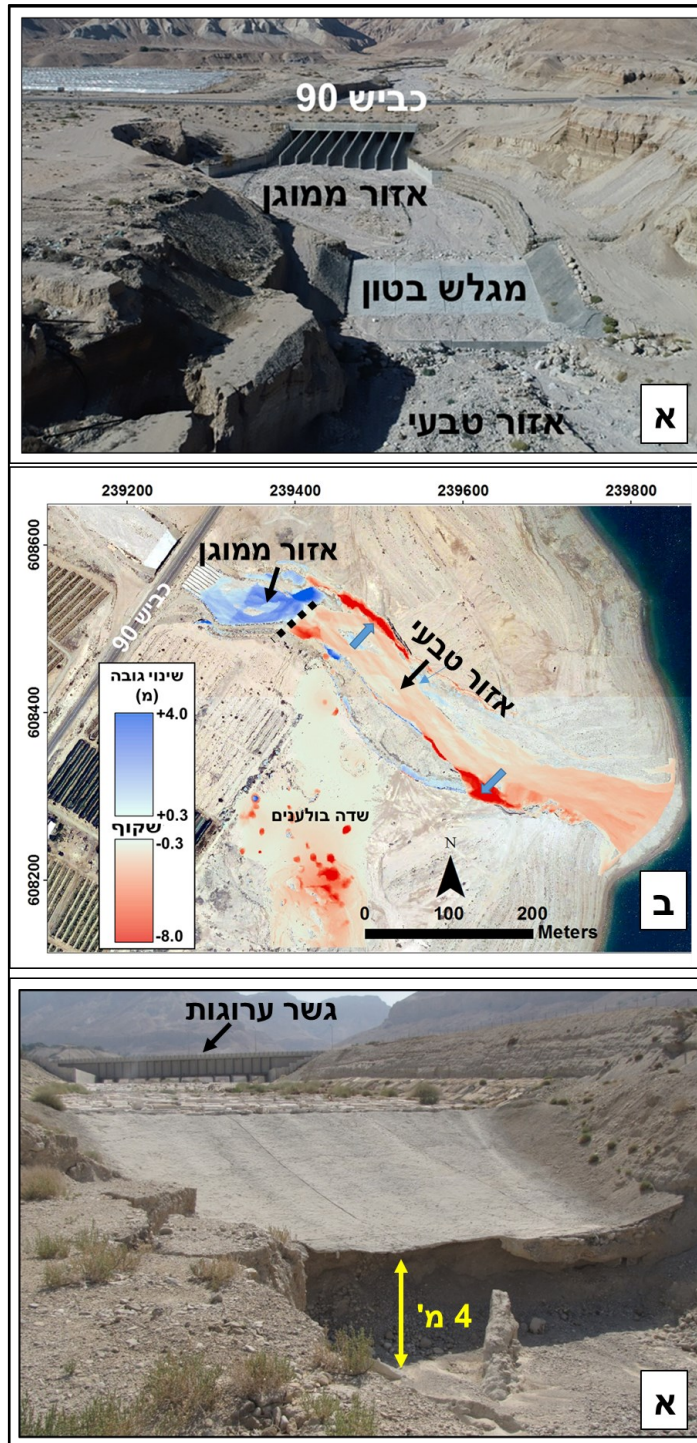
ניתן ללמוד מההיסטוריה של אזור חוף ים המלח בעשרות השנים האחרונות שהדבר החשוב ביותר בתכנון תשתיות באזור זה הוא ענווה. החלטות תכנוניות שהתקבלו בעבר על ידי אנשי מקצוע טובים, אחרי מחשבה מעמיקה, ועל בסיס כל הידע הזמין, נכשלו במבחן הזמן. הסיבה לכך לא טמונה בתהליך קבלת ההחלטות, בתכנון או בביצוע, אלא בכך שבאזור זה עדיין רב הנסתר על הנגלה ואין ניסיון בעולם עם תכנון בסביבה דינמית כל כך. סביר להניח שאפילו אנשי המקצוע הטובים ביותר לא היו מסוגלים לפני 50 שנה לספק תחזית לעומקו ורוחבו של נחל דרגה באזור הכביש כיום, כך שניתן היה לתכנן אז גשר שיחזיק מעמד עד ימינו. מבחינת תהליכי ההתחברות באזור חוף ים המלח, בחמישים שנה יכולים להתרחש תהליכים גיאומורפולוגיים שבסביבות יציבות יותר לוקחים אלפי שנים. לכן, תכנון פרטני באזור ים המלח צריך לקחת בחשבון את יכולות ומגבלות התחזיות להתפתחות עתידית בכל נחל, ואת ההשלכות ההנדסיות והכלכליות של תכנון לטווחי זמן קצרים יחסית (10 שנים) או ארוכים יחסית (עשרות שנים).

עקב השונות הרבה בין הנחלים בשיפוע שיווי המשקל שלהם, בשיפוע הטופוגרפיה בשפך לאגם, ובספיקות המים והסדימנט בשיטפונות, צריך להגדיר לכל נחל מהו טווח הזמן הריאלי אליו ניתן לתת תחזיות. ככל שגדל פרק הזמן אליו מיועדת התחזית, גדלים אי הוודאות בהתפתחות הגיאומורפולוגית של כל נחל וקיימת סבירות גבוהה יותר להערכת יתר או חסר של ההתחברות וההתרחבות. בנוסף, קיים

סיכוי גבוה שעם חלוף הזמן, יתפתחו בסביבה הדינמית של חוף ים המלח תהליכים נוספים שכיום איננו מכירים. לדוגמא, בשנות ה-80 של המאה שעברה קודמה תכנית להקמת אזור מלונות בקרבת חמי עין גדי. כאשר החלו לפתע להיפתח בולענים בחוף אזור ים המלח נעצרה התוכנית, וכיום השטח שיועד לפרויקט מנוקד במאות בולענים, חלקם ברוחב ועומק של עשרות מטרים. ניתן לשער מה היה קורה אילו הבולענים היו מתחילים להיפתח לאחר הקמת אזור המלונות החדש. מסיבות זו אנו סבורים שתכנון תשתיות החוצות נחלים בסביבת ים המלח צריך להיות לתקופה מקסימלית של 30 שנה.

האם ניתן למנוע מההתחזרות להגיע עד לכביש 90? בהחלט. ניתן להקים בתוך אפיקי הנחלים מתקנים למניעת התקדמות ההתחזרות במעלה הזרימה, על מנת לייצב את תעלת האפיק במקטע הנחל שמעליהם. באמצעות מתקנים אלו, הנחל באזור הכביש לא 'ירגיש' את ירידת מפלס ים המלח וההגנה על הכביש עצמו לא תתבסס על חיזוק הגשרים או מעבירי המים בלבד. כל שקל שיושקע כיום במתקני הגנה מסוג זה יחסוך בעתיד כמה שקלים בהקמת ותחזוקת מעבירי מים שיפגעו או יקרסו.

מתקני הגנה מסוג זה כבר הוקמו במספר נחלים באזור ים המלח. לדוגמא, בנחל דרגה נבנה בתוך אפיק הנחל מגלש בטון במרחק של כ-180 מ' מכביש 90 (איור 9א). בניגוד לחומר האלוביאלי הבלתי מלוכד שבונה את קרקעית הנחל הטבעית, מגלש הבטון הינו עמיד בפני בליה ומונע את סחיפת הקרקעית שמתחתיו. בנוסף, קצהו העליון של המגלש נבנה גבוה ממפלס קרקעית הנחל במעלהו, והיווה סכר שאגר חלוקים מאחוריו ואפשר את השקעתם על קרקעית הנחל. כך נוצר מצב שבעוד במורד הנחל מהמגלש גובה קרקעית הנחל המשיך לרדת, גובהה עלה במקטע הנחל שבקרבת הכביש (איור 9ב). ככל שתימשך ירידת מפלס ים המלח, והנחלים ימשיכו להתארך בעקבות חוף האגם הנסוג, יהיה צורך להקים מתקני הגנה נוספים במורד הנחלים. כמובן שמתקנים אלו ידרשו תחזוקה קבועה (איור 9ג), אך זו ללא ספק תהיה פשוטה יותר מההשקעה שתידרש לשיקום גשר או מעביר מים שיקרסו.



איור 9: מתקני הגנה על כביש 90 והשפעתם. (א) מגלש בטון בתוך אפיק נחל דרגה כ-180 מ' במורד הנחל מכביש 90. המגלש מגן על האזור שבמעלהו מההתחזרות באזור הטבעי שבמורדו. (ב) מפת שינוי גובה פני הקרקע בנחל דרגה בין השנים 2011-2019. צבעים אדומים מציינים ירידה בגובה, צבעים כחולים מציינים עלייה בגובה. חיצים כחולים מצביעים על אזורים של קריסות גדה. ניתן לראות שבאזור הטבעי שבמורד המגלש ארעו ההתחזרות לעומק וקריסות גדה, בעוד במעלה מהמגלש (אזור כביש 90) חלה עלייה בגובה הקרקעית ולא ארעו קריסות גדה. (ג) מגלש בטון בנחל ערוגות לאחר מספר שנים ללא תחזוקה.

סיכום

התחברותם והתרחבותם המואצת של אפיקי הנחלים באזור ים המלח אינה תופעה שתחלוף בקרוב. כאשר ניסע על כביש 90 עוד שלושים שנה ונביט מזרחה, נראה קניונים עמוקים ורחבים באופן ניכר מאלו שאנו חולפים לידם כיום. ישנם אנשים שיתלהבו מהנוף המבותר שיתפתח מול עינינו ויתייחסו לאזור זה כחבל ארץ פראי ומרתק. אחרים, יראו אסון סביבתי בהתהוותו. אולם באופן אובייקטיבי, ההשלכות המעשיות והכלכליות של פגיעה אפשרית בתשתיות באזור, בדגש על עורק התחבורה היחידי באזור- כביש 90, הן ברורות: מדובר בפגיעה משמעותית במרקם החיים של תושבי חבל ארץ זה, ובנזקים כלכליים ניכרים. ניתן לצמצם ואף למנוע את הנזקים הללו על ידי היערכות נכונה ותכנון מותאם לתנאים המשתנים, שללא ספק יהפכו לעוד יותר קיצוניים עם חלוף הזמן.

מושגים המופיעים במאמר

- **בסיס סחיפה:** הגובה שמתחתיו ערוץ אינו יכול להתחתר ממקטע שמעליו. במקרה של נחלים שזורמים לאגם או ים, אלו מהווים את בסיס הסחיפה שלהם.
- **חומר אלוביאלי:** חלוקים וחומר בלתי מלוכד שמושקעים או נסחפים על ידי הנחלים.
- **שיווי משקל של נחל אלוביאלי:** נחל אלוביאלי (שדפנותיו מורכבות מחומר אלוביאלי ולא מסלע) נמצא במצב של שיווי משקל כאשר בכל נקודה לאורך הערוץ מתקיים שוויון בין שטף הסדימנט המגיע ממעלה האגן לבין שטף הסדימנט היוצא ממנה אל מורד האגן; למעשה, בנחל כזה אין התחברות או השקעה לאורך הנחל, למעט תזוזה של שרטונות. באופן טבעי, נחלים נוטים להגיע למצב שיווי משקל כאשר במשך פרק זמן ניכר מתקיימת יציבות טקטונית ואקלימית באגן הניקוז.
- **פרופיל אורך של נחל:** חתך המתאר את גובה קרקעיתו של נחל מהמעלה למורד.
- **מניפת סחף:** גוף סדימנטרי המתפתח במוצאו של נחל צר מחזית הרים בהם הוא חתור, אל אזור מתון בו הטופוגרפיה הראשונית לא מגבילה ומכתיבה את רוחב האפיק.
- **דגם פזרות:** נחל המתפצל למספר ערוצים המתחברים ומתפצלים שוב במורד, וביניהם שרטונות. דגם זה מאפיין נחלים בעלי כמויות סחף גדולות, הזורמים באזור בעל שיפוע מתון.
- **פיתוליות:** מדד המתאר עד כמה נחל זורם בתוואי ישר או מפותל. ערך זה נמדד בחלוקת המרחק המדוד של מקטע נחל לאורך קרקעיתו במרחק האווירי בין קצוות המקטע. בנחל ישר לגמרי הפיתוליות הינה 1.
- **ספיקת תכן:** ספיקת מים הגבוהה ביותר בנחל בזמן חזרה מסוים. לדוגמא- ספיקת תכן של 1:50 היא הספיקה הגבוהה ביותר שמתרחשת בהסתברות של פעם בחמישים שנה.

רשימת מקורות וקריאה נוספת

אבלסון, מ., יחיאלי, י., בר, ג., 2017, חידושים בהתפתחות בולעני ים המלח ועדכון מפות ההתכנות לשנת 2017, דוח המכון הגיאולוגי GSI/24/2017.

בן משה, ל., 2011, התחתרות נחלים לחוף ים המלח כתגובה לירידת המפלס, מלח הארץ 5, 23-5.

בר, ג., ברנשטיין, מ., אבלסון, מ., יחיאלי, י., גבריאלי, א., 2019, היתכנות לבולענים במפלסי ים ומי תהום עתידיים, דוח מכון גיאולוגי GSI/17/2019.

ברנשטיין, מ., נוף, ר., אבלסון, מ., בר, ג., 2019, עדכון מפת הבולענים של ים המלח, מתוך 'תגובת התשתית באגן ים המלח לשינויים הטבעיים ומעשה ידי אדם', דוח המכון הגיאולוגי GSI/17/2019.

לנסקי, נ., דנטה, א., הגורמים לירידה המואצת של מפלס ים המלח בעשרות השנים האחרונות, אקולוגיה וסביבה 8(1).

Abelson, M., Yechieli, Y., Crouvi, O., Baer, G., Wachs, D., Bein, A., Shtivelman, V., 2006, Evolution of the Dead Sea sinkholes, Geological Society of America Special Papers, 401, p.241

Avni, Y., Lensky, N., Dente, E., Shviro, M., Arav, R., Gavrieli, I., Yechieli, Y., Abelson, M., Lutzky, H., Filin, S., Haviv, I., 2016, Self-accelerated development of salt karst during flash floods along the Dead Sea Coast, Israel, Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 121(1), 17-38.

Begin, Z.B., Meyer, D.F. and Schumm, S.A., 1981, Development of longitudinal profiles of alluvial channels in response to base-level lowering, Earth Surface Processes and Landforms, 6, 49-68.

Ben Moshe, L., Haviv, I., Enzel, Y., Zilberman, E. and Matmon, A., 2008, Incision of alluvial channels in response to a continuous base level fall: field characterization, modeling, and validation along the Dead Sea, Geomorphology, 93(3-4), 524-536.

Dente, E., Lensky, N.G., Morin, E., Grodek, T., Sheffer, N.A. and Enzel, Y., 2017. Geomorphic response of a low-gradient channel to modern, progressive base-level lowering: Nahal HaArava, the Dead Sea. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 122(12), 2468-2487.

Yechieli, Y., Abelson, M., Bein, A., Crouvi, O., Shtivelman, V., 2006, Sinkhole "swarms" along the Dead Sea coast: reflection of disturbance of lake and adjacent groundwater systems. Geological Society of America Bulletin, 118(9-10), 1075-1087.