



מחקר במימון מדען ראשי קק"ל – דוח מסכם

כותרת המחקר: שילוב פתרונות מבוססי טבע בניהול נגר וסחיפת קרקע באגן היקוות מרובה שימושים – בקעת יבנאל כמקרה בוחן

מספר מחקר: 1932

סוג הדו"ח: דו"ח מדעי מסכם

שם המוסד המוביל את המחקר: אוניברסיטת חיפה

רפרנט קק"ל: ד"ר אורית סקוטלסקי

תקופת המחקר: 2021-2024

שמות החוקרים:

שם החוקר/ת	המוסד	דוא"ל
חוקר ראשי	אוניברסיטת חיפה	alonlotan19@gmail.com
חוקרים נוספים	אוניברסיטת חיפה	leaw@geo.haifa.ac.il
	אוניברסיטת חיפה	izhaki@research.haifa.ac.il
	אוניברסיטת חיפה	dmalk@geo.haifa.ac.il
	משרד החקלאות	leska.d@gmail.com
	אוניברסיטת חיפה	doronby6@gmail.com

מילות מפתח: פתרונות מבוססי טבע, שירותי מערכת אקולוגית, מגוון צומח, ניהול אגני אינטגרטיבי, HEC-HMS

תוכן עניינים

3	תקציר מנהלים.....
5	Executive Summary
7	דו"ח שנתי – ההתקדמות בשנת המחקר השלישית.....
8	תכנית העבודה הכוללת + פירוט משימות וביצוע.....
9	דו"ח מסכם – תהליך העבודה, שיטות ותוצאות.....
9	1. מודלים מרחביים לנגר וסחיפת קרקע.....
9	מודלים מרחביים – שיטות ומהלך העבודה.....
12	מודלים מרחביים – תוצאות.....
20	2. סקירת ספרות בנושא פתרונות מבוססי טבע למיתון נגר וסחיפת קרקע בשטחים פתוחים.....
20	(א) ניהול אגן היקוות תוך שמירת המערכת האקולוגית – פתרונות מבוססי טבע.....
21	(ב) המערכת הנחלית.....
22	(ג) שימושי קרקע באגן ההיקוות והשפעתם על המערכת הנחלית.....
23	(ד) פתרונות מבוססי טבע לבעיות בניהול המערכת הנחלית.....
26	3. תרומתן של בריכות השיקוע למגוון הביולוגי המקומי – סקר צומח.....
26	סקר צומח – שיטות עבודה.....
28	סקר צומח – תוצאות.....
35	מסקנות והמלצות.....
37	רשימות מקורות.....
37	מודלים של נגר וסחף.....
38	מסקירת הספרות.....
40	נספחים.....
40	נספח א – תצלומי אוויר של בריכות ההשהיה בנחל יבנאל ובנחל זורעים.....
42	נספח ב – הקבוצות ההידרולוגיות של קרקעות באזור המחקר.....
43	נספח ג – פלטים גרפיים של מודל HEC-HMS עבור אירועי הגשם שנבחנו.....
45	נספח ד – תמונות של בריכות ההשהיה וסקר הצומח.....
46	נספח ה – רשימת כלל מיני הצומח שזוהו* בסקר צומח אביב וקיץ 2021-2023.....
47	נספח ו – תמונות מאירוע גשם של 23.12.23, שבעקבותיו התפרקו הבריכות בנחל זורעים.....

תקציר מנהלים

עם הגידול בשטחים המבונים ובשטחי החקלאות, בישראל כמו בעולם כולו, ובמקביל לעליה הצפויה באירועי גשם קיצוניים בגלל שינוי האקלים, כמויות הנגר העילי בעקבות המשקעים הולכות וגדלות ואיתן גדלים גם תהליכי סחיפה של קרקעות והסיכון להצפות. הטיפול בנזקים ומניעתם דורש בדרך כלל פעולות הנדסיות ותחזוקה שוטפת שעלותן גבוהה ויעילותן מותנת בשיתוף פעולה בין גופים רבים. כל אלה מגבירים את הצורך בניהול אגני אינטגרטיבי שלוקח בחשבון את שימושי הקרקע התורמים נגר וסחף לצד שימושי הקרקע ופתרונות בני קיימא שביכולתם למתן את זרימות המים ואת סחיפת הקרקע בעלות נמוכה יחסית.

פתרונות מבוססי טבע (Nature-based Solutions, NbS) הם פעולות של הגנה, ניהול בר-קיימא ושיקום של מערכות אקולוגיות טבעיות או מעשה ידי אדם, שמטרתן להתמודד באופן יעיל עם בעיות ואתגרים אנושיים-חברתיים תוך שמירה על המגוון הביולוגי. בשנים האחרונות מתרחבים הידע התיאורטי והניסיון המעשי ביישום פתרונות כאלה לטיפול בבעיות של נגר וסחף, כולל בישראל, אך התאמת הפתרון לתנאי שטח מסוימים, כמו-גם היכולת להעריך את סיכויי הצלחתו, עדיין מוגבלים.

אגן ההיקוות של נחל יבנאל מאופיין בפסיפס של שימושי קרקע הכולל יישובים, שטחי חקלאות מסוגים שונים וכן שטחים פתוחים טבעיים וערוצי נחלים שבחלקם יש נטיעות, והם מנוהלים בידי קק"ל. בגלל מיקומם באגן ההיקוות ובגלל אופיים האקולוגי, שטחים טבעיים ונטועים אלה טומנים בחובם את הפוטנציאל לתפקד כחיץ הידרולוגי ולמתן זרימות מים וסחף לאורך המדרונות ובערוצי הנחלים המנקזים את הבקעה. שטחים אלה הם גם כר מתאים ליישום של פתרונות מבוססי טבע להתמודדות עם אתגרים אלה.

מטרת העל של המחקר היתה ליצר מידע וכלים שיאפשרו לתכנן ולנהל אגני היקוות מורכבים ומרובי שימושים, ולנקוט בממשקים המתאימים על-מנת להתמודד באופן יעיל ובר-קיימא עם בעיות של נגר וסחיפת קרקע, ובתוך כך גם לשקם מערכות טבעיות ולתמוך בקיומו של המגוון הביולוגי המקומי.

לעבודה שלושה חלקים מרכזיים: 1. יצירת מפות ומודלים מרחביים ייעודיים לבקעת יבנאל המתייחסים לנגר ולסחיפת קרקע; 2. סקירת ספרות בנושא פתרונות מבוססי טבע להתמודדות עם נגר וסחיפת קרקע בשטחים פתוחים; 3. הערכת התרומה של בריכות השהיה/וויסות למגוון הביולוגי המקומי בעזרת סקר צומח בבריכות, שיושמו בנחל יבנאל ובנחל זורעים על-פי גישת 'פתרונות מבוססי טבע' במטרה למתן נגר וסחיפת קרקע, ובערוצים הטבעיים הסמוכים להן. חלק זה כלל ניטור עיקרי באביב וניטור משלים בקיץ לאורך שלוש שנות המחקר, על-מנת לזהות את השינויים והמגמות במגוון הצומח בחלקים שונים של הבריכות והערוצים.

תוצאות: על בסיס מפת שימושי קרקע עדכנית לכל בקעת יבנאל ובעזרת מדידות של נגר וסחיפת קרקע בתת אגן קטן בחלקו העליון של נחל יבנאל, נוצרו מפת סיכונים לסחיפת קרקע (הסיכוי להיווצרות סחף בכל פיקסל), מודל מרחבי של קישוריות הידרו-מורפולוגית (הסיכוי של קרקע שנסחפה מפיקסל מסוים להגיע לנקודה כלשהי במורד) ומודל הידרולוגי בהסתכלות אגנית (ממדי הספיקות לאורך זמן בערוצים מרכזיים בעקבות אירועי גשם באגן). על-פי מפת פוטנציאל הסחף ומודל הקישוריות נמצא שאזורים רבים בבקעה, המתאפיינים בשיפועים תלולים ובשטחים חקלאיים רבים, נתונים בסיכון גבוה לסחיפת קרקע. בולטים בהיבט זה החלקים הדרום-מערביים של הבקעה שבהם השיפועים תלולים יותר והחקלאות היא ברובה גידולי שדה ולכן הם סובלים מסיכון גבוה יותר לסחיפת קרקע.

בהיבט ההידרולוגי, בעזרת מערכת HEC-HMS ולאחר כיול, התקבל מודל שחוזר בקירוב סביר את התגובה ההידרולוגית של האגן. נמצא שזמן הפיגור (Lag time) האופטימלי של הערוצים הוא 60 דק', ושימוש בערכי Curve Number במצב לחות קרקע נמוכה (AMC I) הניב ניבוי מקורב יותר לספיקות המדודות. נראה שהמודל חוזר טוב יותר את ההידרוגרף המאפיין אירועי גשם קטנים, באירועים גדולים המודל חזה ספיקות גדולות ממה שנמדד בפועל, כנראה בגלל רזולוציית המיפוי שטשטשה אזורי חיץ קטנים אך משמעותיים להפחתת נגר.

בסקר הספרות נסקרו מספר דוגמאות למחקרים שבחנו תכנון ויישום של פתרונות מבוססי טבע לניהול נגר וסחיפת קרקע, ונמצא שהם מתבססים על מספר עקרונות: התערבויות מורפולוגיות הכוללות שחזור תוואי זרימה טבעי ונפתולי, הרחבת ערוצים והשבת פשטי הצפה; התבססות על חומרים טבעיים, כגון סכרי עץ ומסלע מקומי לייצוב הגדות והאטת הזרימה; וניהול צמחייה הכולל נטיעת מינים מקומיים, יצירת רצועות חיץ והסרת מינים פולשים.

סקר הצומח הראה כי עושר המינים בבריכות ההשהיה ובערוצים הטבעיים הסמוכים הוא גבוה ביחס לגודל השטח הנדגם, עם למעלה מ-230 מינים שזוהו בשלוש שנות המחקר, רובם הגדול חד-שנתיים. במרבית אתרי הניטור המינים הדומיננטיים היו מינים המאפיינים בעיקר בתי גידול מופרים, שנזכרתם היתה בולטת יותר באזורים המופרים של הבריכות מאשר בערוצים הטבעיים. קבוצה זו כללה גם מינים גרים/פולשים שבלטו בעיקר בקיץ בנצלם את בית הגידול החדש והלח יחסית לסביבה היבשה של הבקעה. נמצאו גם מינים רבים המאפיינים בעיקר בתי גידול טבעיים ונראתה מגמת עליה מסוימת במספרם ובחלקם היחסי לאורך שלוש שנות המחקר מה שיכול להעיד על מגמת התבססות שעשויה להימשך ככל ובית גידול זה לא יופר בעתיד. מעט מינים חובבי לחות נמצאו גם בערוצים וגם בבריכות, כאשר יותר מינים כאלה צמחו בנחל יבנאל בהשוואה לנחל זורעים, אך לא ניתן להצביע על מגמה במספרים שלהם לאורך שלוש שנות המחקר.

בסיכומו של דבר, אף שהמחקר התמקד בבקעת יבנאל תוצריו מספקים מסגרת רחבה להתמודדות עם נגר וסחיפת קרקע בעזרת פתרונות מבוססי טבע במגוון סביבות. הפתרונות המוצעים כוללים מספר אסטרטגיות מרכזיות: שיקום אקו-הידרולוגי של ערוצים באמצעות חיקוי מבנים נחליים טבעיים, הקמת בריכות וויסות וסכרונים, ושילוב צומח ואלמנטים טבעיים לייצוב המערכת; הפחתה של הקישוריות ההידרולוגית בעזרת תכנון מרחבי של שימושי קרקע; יצירת אזורי חיץ בעזרת מערכות טבעיות ונטועות בסמוך לשטחים שתורמים נגר וסחף (בעיקר חקלאיים ובנויים), לאורך המדרונות ולצידי ערוצי הזרימה; שימור ושיקום בתי גידול לחים אשר תורמים ללכידת סחף, לויסות זרימת מים ולהעשרת המגוון הביולוגי; ועידוד חקלאות מקיימת ושימור שטחים חדירים למים בסביבה חקלאית ובנויה. כל אלה יכולים לסייע בהפחתת נפח הזרימה והסחף ובהאטת הנגר תוך שיפור בספיגת המים לקרקע ולמי התהום, הבחירה ביניהם תלויה בהתאמתם למאפיינים המקומיים והאגניים.

כדי להבטיח את הצלחת היישום של פתרונות אלה יש צורך בתכנון מבוסס נתונים הכולל מיפוי מקדים של השטח, וכן הקטנה למינימום של פעולות תחזוקה הנדסיות על-מנת לאפשר למערכת האקולוגית להתבסס. מעקב לאורך שנים אחר מצב הצומח ומינים אינדיקטיביים מקבוצות שונות ואחר איכות הקרקע והמים חשובים להבנת מגמות והשפעות ארוכות טווח של פעולות אלה. בנוסף, הצלחת היישום לאורך זמן תלויה במידה רבה גם בשיתוף פעולה בין גורמים שונים, בהם חקלאים, רשויות מקומיות, רשות הניקוז, משרדי ממשלה וגורמים נוספים המנהלים שטחים פתוחים, תוך אימוץ גישה אינטגרטיבית לניהול אגני היקוות.

Executive Summary

With the expansion of built-up areas and agricultural lands in Israel, as in the rest of the world, and the expected increase in extreme rainfall events due to climate change, surface runoff volumes are rising, along with the risk of flooding and consequent soil erosion. Addressing and preventing these damages usually requires engineering interventions and continuous maintenance, which are often costly and dependent on the collaboration of multiple stakeholders. These challenges highlight the growing need for integrated watershed management that considers land uses contributing to runoff and erosion alongside sustainable land-use solutions that can mitigate water flows and soil erosion at relatively low costs.

Nature-based Solutions (NbS) address societal challenges through actions to protect, sustainably manage, and restore natural and modified ecosystems, benefiting both people and nature. In recent years, theoretical knowledge and practical experience in implementing NbS for runoff and erosion management have expanded, including in Israel. However, adapting these solutions to specific field conditions and assessing their likelihood of success remain limited.

The Yavne'el watershed presents a mosaic of land uses, encompassing settlements, various agricultural lands, and natural open spaces, some of which include afforestation managed by KKL-JNF. Due to their location within the watershed and their ecological characteristics, these natural and afforested areas have the potential to function as hydrological buffers, mitigating water flow and soil erosion along slopes and stream channels. These areas also provide suitable sites for implementing NbS to address the challenges related to water runoff and soil erosion.

The overarching goal of this study was to generate knowledge and tools that would enable the planning and management of complex, multi-use watersheds and facilitate appropriate interventions for effectively and sustainably addressing runoff and soil erosion issues, while also restoring natural systems and supporting local biodiversity.

The research was divided into three main components: (1) Developing spatial maps and models of water runoff and soil erosion for the Yavne'el Valley; (2) Conducting a literature review on NbS for managing surface runoff and soil erosion in open landscapes; and (3) Evaluating the roll of retention ponds in supporting local biodiversity through vegetation surveys in two set of ponds implemented in the Yavne'el and the Zor'im streams that were designed using an NbS approach to mitigate runoff and erosion. This part included primary survey in the spring and supplementary monitoring in the summer, throughout the three years of the study, to identify trends in plant diversity within different parts of the ponds and the nearby natural channels.

Results: Based on an updated Land Use Land Cover (LULC) map for the Yavne'el Valley and runoff and erosion measurements in a small sub-basin located in the upper part of the Yavne'el stream, a soil erosion risk map (indicating the likelihood of erosion at each pixel), a hydro-morphological connectivity model (assessing the probability of eroded soil reaching downstream locations), and a hydrological model at the watershed scale (estimating flow discharge following rainfall events) were developed. The erosion potential map and connectivity model indicated that many areas of the valley, particularly those with steep slopes and extensive agricultural activity, are at high risk of erosion. The southwestern parts of the valley, characterized by steeper slopes and predominantly field crops, exhibited a particularly high erosion risk.

From a hydrological perspective, the calibrated model that was developed using the HEC-HMS platform presented reasonable predictions of the watershed's hydrological response. The optimal lag time of the channels was found to be 60 minutes, and applying Curve Number values under dry soil conditions (AMC I) provided the best approximation of measured flow rates. The model seems to better predict the hydrographs that follow small rainfall events, whereas for larger events, it overestimated the overall flows, likely due to mapping resolution limitations that obscured small but significant buffer areas for runoff reduction.

The literature review identified several key principles in applying NbS for water runoff and soil erosion management, including morphological interventions such as restoring natural meandering flow patterns, widening channels, and reintroducing floodplains; using natural materials such as wooden barriers and local rock formations to stabilize river banks and to slow down water flow; and vegetation management involving native species planting, buffer strip creation, and invasive species removal.

The vegetation survey revealed high species richness in the retention ponds and the adjacent natural channels relative to the sampled area, with over 230 species identified across three years, most of them annuals. In most monitoring sites, the dominant species were those that mainly characterize disturbed habitats, which were more prevalent in the semi-artificial ponds than in the natural streams. This group included alien/invasive species that thrived particularly in the summer, taking advantage of the relatively moist new habitat compared to the surrounding dry valley. Many species that mainly characterize natural habitats were also identified, showing a slight increase in their presence over the three-year study period, suggesting a trend toward establishment, provided further disturbances are minimized. Some wetland-oriented species were found in both the ponds and the streams, with a higher diversity observed in the Yavne'el stream than in the Zor'im stream, although no clear trend was detected in their numbers over the study period.

In conclusion, while this study focused on the Yavne'el Valley, its findings provide a broad framework for mitigating surface runoff and soil erosion using NbS in various environments. The proposed solutions include several key strategies: eco-hydrological restoration of channels by mimicking natural stream structures, constructing retention ponds and small dams, and integrating vegetation and natural elements for stabilization; reducing hydrological connectivity through spatial planning of land uses; creating buffer zones using natural and afforested ecosystems near runoff and erosion-contributing areas (primarily agricultural and built-up lands), along slopes, and alongside river channels; conserving and restoring wetland habitats that contribute to sediment capture, water flow regulation, and biodiversity enhancement; and promoting sustainable agriculture and the preservation of permeable surfaces in agricultural and built environments. These strategies can help reduce runoff volumes and soil erosion, slow water flow, and enhance groundwater recharge.

To ensure the successful implementation of Nature-based Solutions, data-driven planning, including prior mapping and minimal engineering maintenance to allow ecosystems to recover, is essential. Long-term monitoring of vegetation, bioindicator species from various groups, and soil and water quality is crucial for understanding trends and long-term impacts. Additionally, sustained implementation success relies on cooperation among various stakeholders, including farmers, municipalities, drainage authorities, government agencies, and other open-space managers, adopting an integrated watershed management approach.

דו"ח שנתי – ההתקדמות בשנת המחקר השלישית

להלן הנושאים ותיאור תמציתי של הפעילות המחקרית שהתבצעה בשנת המחקר השלישית (לפירוט השיטות, התוצאות והניתוח, ראה סיכום המחקר כולו בהמשך הדוח):

(1) מודלים מרחביים לנגר וסחיפת קרקע באגן נחל יבנאל

- השלמת מיפוי הפוטנציאל ליצירת סחף קרקע בכלל האגן של בקעת יבנאל.
- השלכת מודל הקישוריות ההידרו-מורפולוגית על כלל האגן של בקעת יבנאל.
- יצירה וכיול של מודל הידרולוגי לכלל שטח בקעת יבנאל באמצעות HEC-HMS.

(2) פתרונות מבוססי טבע לוויסות נגר וסחיפת קרקע בשטחים פתוחים – סקירת ספרות

- השלמת סקירת הספרות.

(3) הערכת השפעת בריכות ההשהיה על המגוון הביולוגי המקומי

- ביצוע סקר צומח שלישי – באותה מתכונת בה בוצעו הסקרים באביב וקיץ 2021-2022.
- ניתוח כמותי סטטיסטי של שלושת סקרי הצומח (2021, 2022, 2023).

תכנית העבודה הכוללת + פירוט משימות וביצוע

משימה	שנת מחקר לביצוע*	סטטוס	הסבר לשינויים במשימה או לעיכוב בביצוע
מיפוי שימושי קרקע ותצורות צומח	2021	בוצע ב 2021 עם השלמות ב 2022	בגלל מחסור במידע מרחבי וסתירה בין מקורות מידע, תהליך העבודה כלל בחינה מפורטת של המידע המרחבי, ביצוע אינטגרציה והשלמות בדיגיטציה
יצירת מודלים מרחביים של נגר וסחיפת קרקע בתת אגן בחלקו העליון של נחל יבנאל	2021-2023	בוצע	
יצירת מודלים מרחביים של נגר וסחיפת קרקע בכלל האגן	2022-2023	בוצע ב 2023 ובאופן חלקי גם ב 2024	בגלל מחסור בנתונים ושירות רציף במילואים מאז ה 7.10.23 של סטודנט שריכז את העבודה בנושא זה, לא הגענו למודל מיטבי (ראה פירוט בסעיף 'מודלים מרחביים – תוצאות') והעבודה התעכבה באופן משמעותי
שילוב תרחישים של שימושי קרקע וממשק בכלל האגן	2023	לא בוצע	העבודה על המודל היתה מורכבת מהמצופה (ראה לעיל), כך שלא היה זמן ומודל הידרולוגי מבוסס מספיק כדי לנתח תרחישים באופן מספק.
סקר צומח בערוצים מטופלים ולא מטופלים	2021, 2022, 2023	בוצע בכל שלוש השנים	

* בגלל מלחמת 'חרבות ברזל' והמלחמה בצפון העבודה על חלק ניכר מהמשימות של שנת המחקר השלישית (2023) התבצעו בפועל בשנת 2024 והסיכום גלש גם לתחילת 2025.

דו"ח מסכם – תהליך העבודה, שיטות ותוצאות

להלן פירוט של שלושת חלקי המחקר, לגבי כל חלק מתוארות שיטות העבודה ולאחר-מכן סיכום התוצאות של שלוש שנות המחקר.

1. מודלים מרחביים לנגר וסחיפת קרקע

מודלים מרחביים – שיטות ומהלך העבודה

מטרתו של חלק זה היתה לבנות מודלים מרחביים שיתארו המצב בבקעת יבנאל מבחינת נגר וסחיפת קרקע, כלומר, מודל של קישוריות הידרו-מורפולוגית (מודל לפוטנציאל ההסעה של סחף קרקע) ומודל מרחבי של נגר. חלק זה של הפרויקט חולק לשלושה שלבים, כאשר בשלב הראשון נערך מיפוי עדכני של שימושי/כיסוי קרקע (Land Use Land Cover, LULC) באגן, על בסיסו ובעזרת תוצרי מדידות שהתקבלו מתחנות הידרומטריות נבנו המודלים המרחביים.

א) מיפוי כיסוי/שימושי הקרקע

שכבת כיסוי/שימושי הקרקע נבנתה משילוב של 3 שכבות עיקריות:

1. סקר "מורדות כנרת – יבנאל", מכון דש"א (2012).
2. סקר "מזרח הגליל התחתון", מכון דש"א (2019).
3. שטחי חקלאות מנתוני משרד החקלאות (2016).

שכבה 1 מכסה את האזור הצפון מזרחי של האגן ושכבה 2 מכסה את האזור הדרום מערבי. בכדי לייצר שכבה מאוחדת המכסה את כלל שטח האגן, בוצע סיווג מחדש (reclassify) לקטגוריות בשני הסקרים תוך צמצום קטגוריות בעלות מאפייני כיסוי קרקע דומים. לאחר האיחוד שכבה 3 הולבשה על שכבת הסקרים המאוחדת, לקבלת השלמה ופירוט של שימושי קרקע חקלאיים. קטגוריית "חממות" נבחרה לעמוד בפני עצמה ולא בתוך "גידולי שדה", כיוון שבהיבט של נגר וסחף השפעת חממות דומה להשפעה של שטח בנוי יותר מאשר להשפעה של שטח חקלאי. בניגוד לשטח בנוי חממות יכולות לעבור שינוי לגידולי שדה או למטעים ולכן יש חשיבות לשמור אותן כקטגוריה נפרדת לעדכון עתידי. תצ"א עדכנית (2021) ברזולוציה גבוהה שימשה לדיוק של מיקום החממות הפעילות ולתיקוני דיגיטציה נוספים. כיוון שהעדכון האחרון של חלק משטחי החקלאות בשכבה של משרד החקלאות נעשה לפני יותר מעשור וחלקם נדגמו כחמישית משטחים אלה (חצי מהם שטחי גד"ש וחצי מטעים) ונעשתה השוואה לתצ"א.

ב) מודל של קישוריות הידרו-מורפולוגית וסחיפת קרקע

מודל הקישוריות על פי Borseli 2008, מבוסס על מכפלת ההסתברויות שחלקיק יגיע מנקודה במעלה האגן (p_u) לנקודת מבלע מקומי (p_d). הסתברויות אלו מוסברות באמצעות רכיב המעלה (D_{up}), המייצג את פוטנציאל ניתוב הסחף אל המבלע (D_{dn}). את המבלעים הגדרנו על ידי סף מינימום של 700 תאים (פיקסלים) המנוקזים אליו, ממנו הסעת הנגר/סחף יכולה להמשיך או לעצר כתלות בתנאי השטח.

רכיב המעלה מושפע מגודלו של השטח התורם נגר/סחף אל המורד ($A, (m^2)$) וממוצע גורמי "המשקל" על אותו תא שטח. גורם משקל אחד הוא השיפוע ($S, (m/m)$), ככל שהשיפוע גדל כך עולה פוטנציאל ההסעה. גורם שני הוא השפעת שימושי הקרקע על ההסעה (W), הנגזר ממאפייני השטח: צומח, קרקע וניהול שימוש הקרקע. ערכי ה W נלקחו מטבלה

במאמר של Borseli 2008, הם חסרי יח' ונעים בין 0-1, ככל שהערך קרוב ל1 השפעת שימוש הקרקע על הפוטנציאל ההסעה תקטן. רכיב המבלע מיוחס לכל פיקסל, עליו משפיעים "המשקולות" (S, W) והמרחק ((d, (m)) של כל פיקסל אל המבלע הקרוב, לאורך מסלול הזרימה (משוואה 1).

בהנחה שהמרחק מהמעלה אל המבלע משפיע ביחס הפוך על ההסתברות של חומר להיסחף למבלע, ניתן לחשב את מדד הקישוריות ((IC, (-∞, +∞)) כתוצאה של רכיב המעלה חלקי רכיב המבלע. לכל פיקסל מתקבל מדד משלו (IC_k), המוצג באופן מערכי מטעמי נוחות (משוואה 2).

$$p = p_u p_d \propto \frac{D_{up}}{D_{dn}} = \frac{\bar{W} \bar{S} \sqrt{A}}{\sum_i \frac{d_i}{W_i S_i}} \quad \text{משוואה 1}$$

$$IC_k = \log_{10} \left(\frac{D_{up,k}}{D_{dn,k}} \right) = \log_{10} \left(\frac{\bar{W}_k \bar{S}_k \sqrt{A_k}}{\sum_{i=k, n_k} \frac{d_i}{W_i S_i}} \right) \quad \text{משוואה 2}$$

מהלך העבודה:

המודל נבנה בתוכנת ArcGIS Pro 2.9.5, באמצעות הכלי Model Builder.

הוא מתבסס על שתי שכבות קלט:

1. מודל גבהים דיגיטלי (DEM), מהלווין TANDEM ברזולוציית תא 11X11.
2. שימושי קרקע, מדוח מצב הטבע 2020 בנדיבות "המארג" ברזולוציית תא 25X25.

על ידי שכבת הגבהים, באמצעות כלים ייעודיים המובנים בתוכנה חושבו: השיפועים (S), הנחלים (מבלעים), המרחק מהמבלע (d) ושטח האגן המנקז (A). משכבת שימושי הקרקע (W) ייצרנו שכבה שריגית בה כל פיקסל קיבל את ערך שימוש הקרקע המאפיין אותו. שטחים מבוזרים קבלו ערך 0 ומשמים כמבלעים בדומה לנחלים, מהסיבה שהם אינם תורמים סחף למערכת אך כן מסיעים נגר. התוצרים הנ"ל משמשים לבניית רכיב המעלה (Dup), רכיב המורד (Ddown) ומדד הקישוריות (IC). סדר הרצת הכלים במודל נבנה ברצף המאפשר את חישוב משוואה 2. כלומר, תחילה רכיב המעלה ורכיב המורד מחושבים ועל פי הם מחושבת הקישוריות.

ג) מודל של נגר

הערכה ומיפוי של ממדי הנגר בוצעו בעזרת מערכת HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center –) (USACE, 2012) (Hydrologic Modeling System). מערכת זו משמשת למידול הידרולוגי והידראולי של מים על ידי סימולציות המשלבות משקעים ותהליכי נגר באגני היקוות (Hamdan et al., 2021), והיא מאפשרת מידול של מגוון תהליכים הידרולוגיים, כגון חידור למי-תהום וזרימה בתת-הקרקע. למטרות הפרויקט, המודל התמקד בנגר עילי תוך שימוש בשני מרכיבים: שיטת ה-Curve Number (Soil Conservation Service [SCS] Curve Number) ושיטת ה-Unit Hydrograph (Loss Model) (SCS Unit Hydrograph Model). השיטה הראשונה משמשת לחישוב כמות המים הזמינה לחידור ולזרימה עלית לאחר נפילת המשקעים והשנייה לחישוב ההידרוגרף בכל תת-אגן. חלק זה נעשה בשלושה שלבים:

1) חישוב Curve Number והתאמתו לטיפוסי הקרקע באזור המחקר

Curve Number (CN) הינו מקדם אמפירי המאפשר לחשב את הפוטנציאל של המשקעים היורדים במקום נתון להפוך לנגר עילי (טווח ערכים 30 - 100). שיטה זו פותחה על-ידי השירות לשמירת משאבי הטבע שתחת משרד החקלאות של ארה"ב (NRCS), והיא מייחסת את פוטנציאל הנגר לכושר חלחול הקרקע, כיסוי/שימוש הקרקע (LULC) ותנאי הקרקע מבחינת לחות. על סמך נתונים אמפיריים נבנו טבלאות המייחסות לכל סוג של תכסית קרקע את ערכי CN-המאפיינים אותה (Hong & Adler, 2008; USDA, 2009). עבור כל סוג כיסוי/שימוש קרקע יכולים להתקיים ארבעה ערכי CN, בהתאם לסוג הקרקע. נהוג לסווג קרקעות ל-4 קבוצות הידרולוגיות (Hydrologic Soil Group, HSG) על פי כושר חלחול המים דרכן, כאשר "קבוצה הידרולוגית" היא קבוצה של קרקעות בעלות פוטנציאל נגר דומה בתנאי אקלים וכיסוי דומים. תכונות הקרקע המכתיבות את פוטנציאל הנגר הן אלה המשפיעות למעשה על קצב החידור המינימלי בקרקע חשופה לאחר הרטבה ממושכת. תכונות אלה כוללות את עומק מפלס מי התהום, מוליכות הידראולית ברוויה, והעומק עד לשכבת קרקע בעלת קצב העברת מים איטי מאוד, כאשר טקסטורת הקרקע מהווה מדד מרכזי לתכונותיה ההידרולוגיות (USDA, 2009). על בסיס מפת חבורות הקרקע של ישראל (משרד החקלאות ופיתוח הכפר 1970) ועל-פי המוליכות ההידראולית, סווגו קרקעות אזור המחקר לקבוצות ההידרולוגיות המתאימות (לפירוט הסיווג של קרקעות אזור המחקר, ראה נספח ב).

המשתנה הנוסף המשפיע על ערך ה-CN הוא לחות הקרקע. מקובל לסווג את לחות הקרקע לשלוש קטגוריות: AMC I (Antecedent Moisture Condition) – קרקע יבשה, AMC II – קרקע עם לחות ממוצעת ו-AMC III – קרקע לחה. על פי רוב, הקטגוריה נקבעת לפי לחות הקרקע בעקבות משקעים על פני חמישה ימים. במהלך כיוול וואלידציה של המודל נבחנו ערכי CN על פי מצבי לחות קרקע I ו-II (מצב III, לחות גבוהה, נמצא במחקר קודם כלא מתאים לאזורנו). המרה מערכי AMC II (ברירת המחדל של המודל) לערכי AMC I נעשתה בעזרת הנוסחה (Hawkins et al., 1985; Mishra & Singh, 2003):

$$CN_{AMC I} = \frac{CN_{AMC II}}{(2.281 - 0.01281 * CN_{AMC II})} \quad \text{משוואה 3}$$

2) יצירת אגנים ותתי-אגנים

בשלב הראשון הוגדרו למודל הגבהים הקורדינטות עליהן הוא ממוקם ובוצע קישור ביניהם. לאחר מכן נוצרו אזורי המבלע (Sink) ונקבעה נקודת הניקוז (Break Point), המיקום שלגביו המודל מחשב את ערכי הספיקה (Computed), וסביבה נבנים תתי האגנים המתנקזים אליה. מיקום הנקודה נקבע על סמך מיקום התחנה ההידרומטרית המצויה בשטח ומספקת את התוצאות הצפויות (Observe), תחנת אלומות של רשות המים עבור כלל הבקעה, תחנה מדידה במעלה נחל יבנאל שהותקנה במסגרת פרויקט אחר עבור כיוול המודל.

בשיטת העבודה עם Curve Number כל תת אגן מקבל ערך אחד של CN שהוא ממוצע משוקלל של הערכים של כלל שימושי/כיסוי הקרקע השונים בתת האגן לפי שטחם היחסי. השאיפה היא שכל תת אגן ייצג תא שטח בעל מאפיינים דומים ככל האפשר. החלוקה לתתי האגנים בוצעה במערכת HEC על ידי הגדרת ערך סף לשטחי נחלים (קמ"ר). ככל שערך הסף נמוך יותר מתקבלים יותר נחלים וככל שהאגן הנבחן מחולק ליותר תתי אגנים, כך כביכול רמת הדיוק של המודל גבוהה יותר. אם זאת, ככל שמתקבלים יותר תתי אגנים נוצרים פערים משמעותיים בין המודל למצב המצוי בפועל בשטח. לאחר מספר הרצות עם ערכי סף משתנים, נקבע כי שטח תת אגן במחקר זה לא יהיה

קטן מ 1 קמ"ר, תתי אגנים חריגים וקטנים חוברו לתתי אגנים סמוכים עד ליצירת תמונה המתאימה למבנה של הבקעה (איור 5).

בנוסף לערכי CN, הוזנו לכל תת אגן גם ערכי Loss ו Transform, פרמטרים שחושבו על סמך הטופוגרפיה, ערכי CN, זמן פיגור (Lag time) ו- Initial Abstraction. זמן פיגור מוגדר כמשך הזמן החולף בין מרכז הסופה וספיקת השיא במוצא האגן. קיים הבדל בין Lag time שחושב לכל תת אגן בשיטה הנ"ל, לבין Lag time של הערוצים (Reach) שנקבע במהלך כיול המודל לבקעת יבנאל ל-60 דק'.

3) כיול המודל

כיול המודל בוצע על תתי האגנים הצפוניים באגן יבנאל (חופף פחות או יותר לתת אגן מ1.0 באיור 5, חולק לשני תתי-אגנים בעבודה מקדימה). הכיול בוצע בשיטת אופטימיזציה, בה בכל הרצה בוצע שינוי של פרמטר אחד בלבד, ונערכה השוואה בין התוצאות המחושבות (Computed) לתוצאות הנצפות (Observed) מהתחנות ההידרומטריות. בין היתר נבחנו גם זמני פיגור (Lag time) שונים וכן ערכי CN במצבי לחות קרקע שונים.

מודלים מרחביים – תוצאות

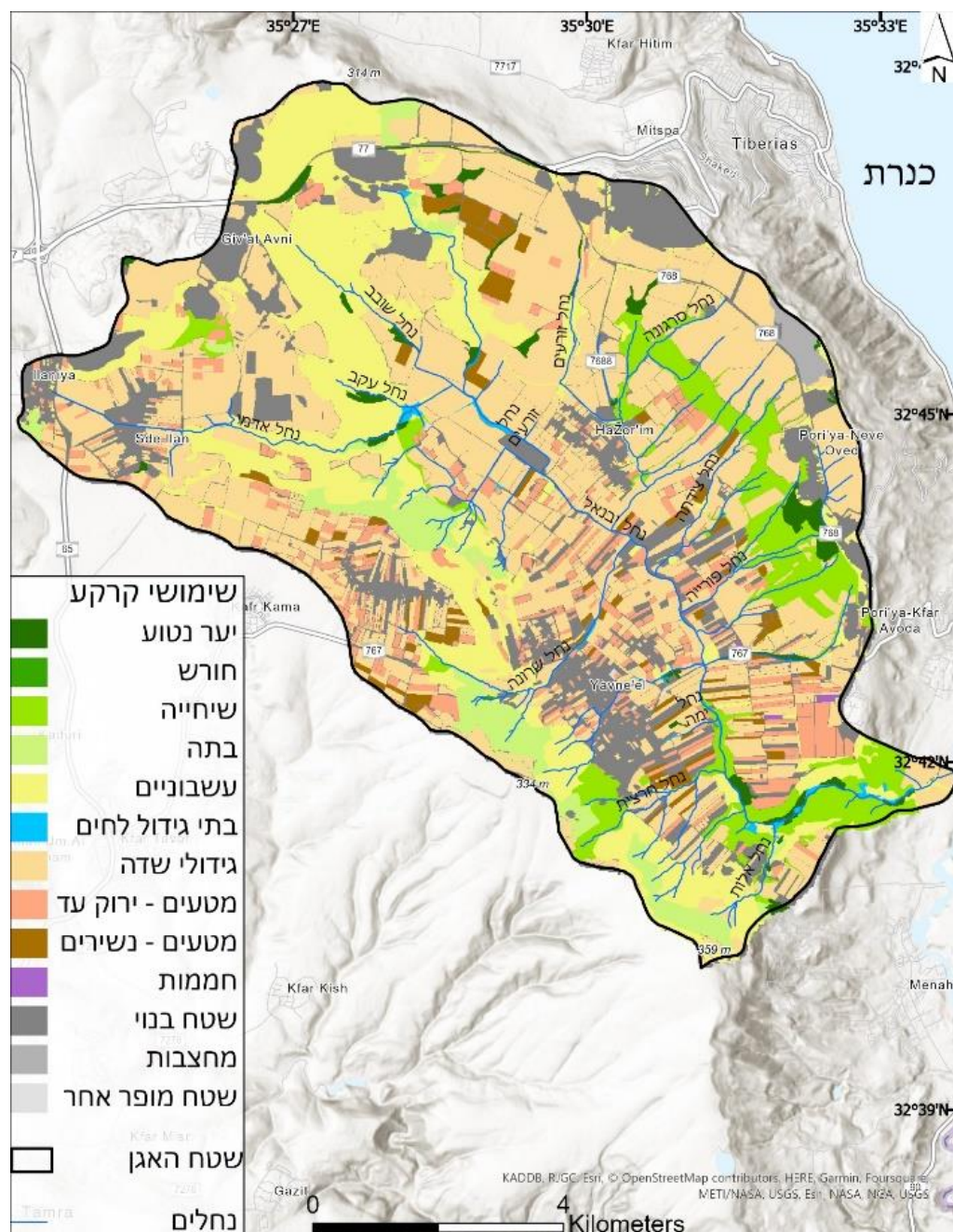
א) מיפוי כיסוי/שימושי הקרקע

בסוף תהליך המיפוי התקבלה שכבה של שימושי/כיסוי קרקע לכלל האגן כאשר השטחים הדומיננטיים הם של גידולי שדה, צמחי בר עשבוניים ושטחים בנויים (טבלה 1, איור 1). בהשוואה בין שכבת השטחים החקלאיים והתצ"א נמצאה התאמה של 80% ו- 90% בשטחי המטעים והגד"ש, בהתאמה.

טבלה 1: סיווג מחדש של הקטגוריות משני הסקרים ואיחוד קטגוריות.

הקטגוריות המקוריות	סיווג מאוחד	שטח בבקעת יבנאל (קמ"ר)
יער\יער גבוה\יער פתוח\בצפיפות בינונית	יער נטוע *	2
חורש	חורש	0.04
שיחייה	שיחייה	8
בתה	בתה	4
עשבוניים (חלוף/קיימא)/לא מעובד	עשבוניים	21
לח	בתי גידול לחים	0.7
גד"ש/ירקות/פרחים/שונות	גידולי שדה	44
מטעים/הדרים-ירוקי עד	מטעים – ירוק עד	7
מטעים/הדרים-נשירים	מטעים – נשירים	3
גידולים שונים בחממות	חממות	0.07
בנוי	שטח בנוי	19
מחצבות	מחצבות	0.6
מופר אחר	שטח מופר אחר	0.06

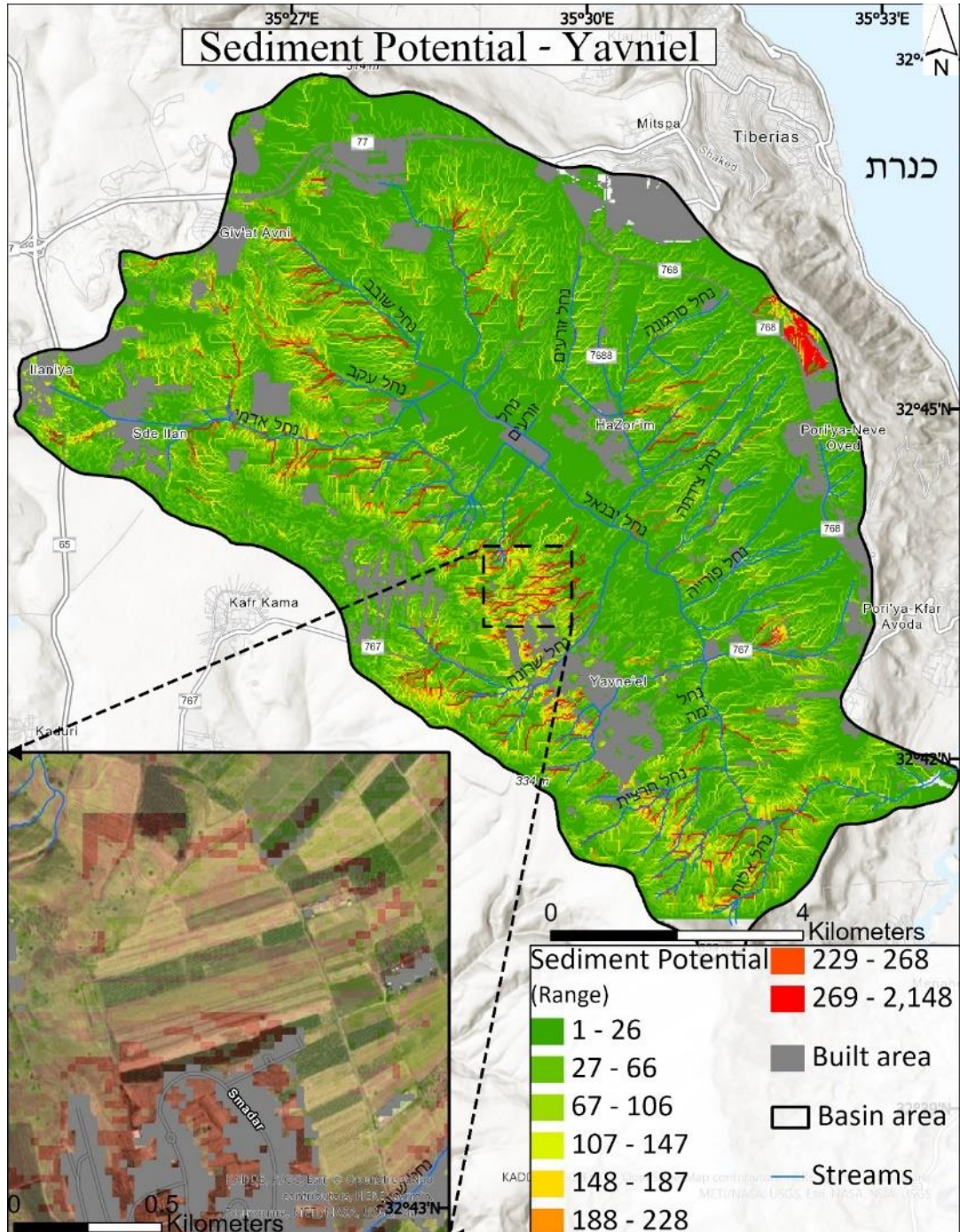
* בקטגוריית יער נטוע ישנם מינים שונים של עצים נטועים בצפיפות נמוכה עד בינונית



איור 1: מפת כיסוי/שימושי קרקע בבקעת יבנאל.

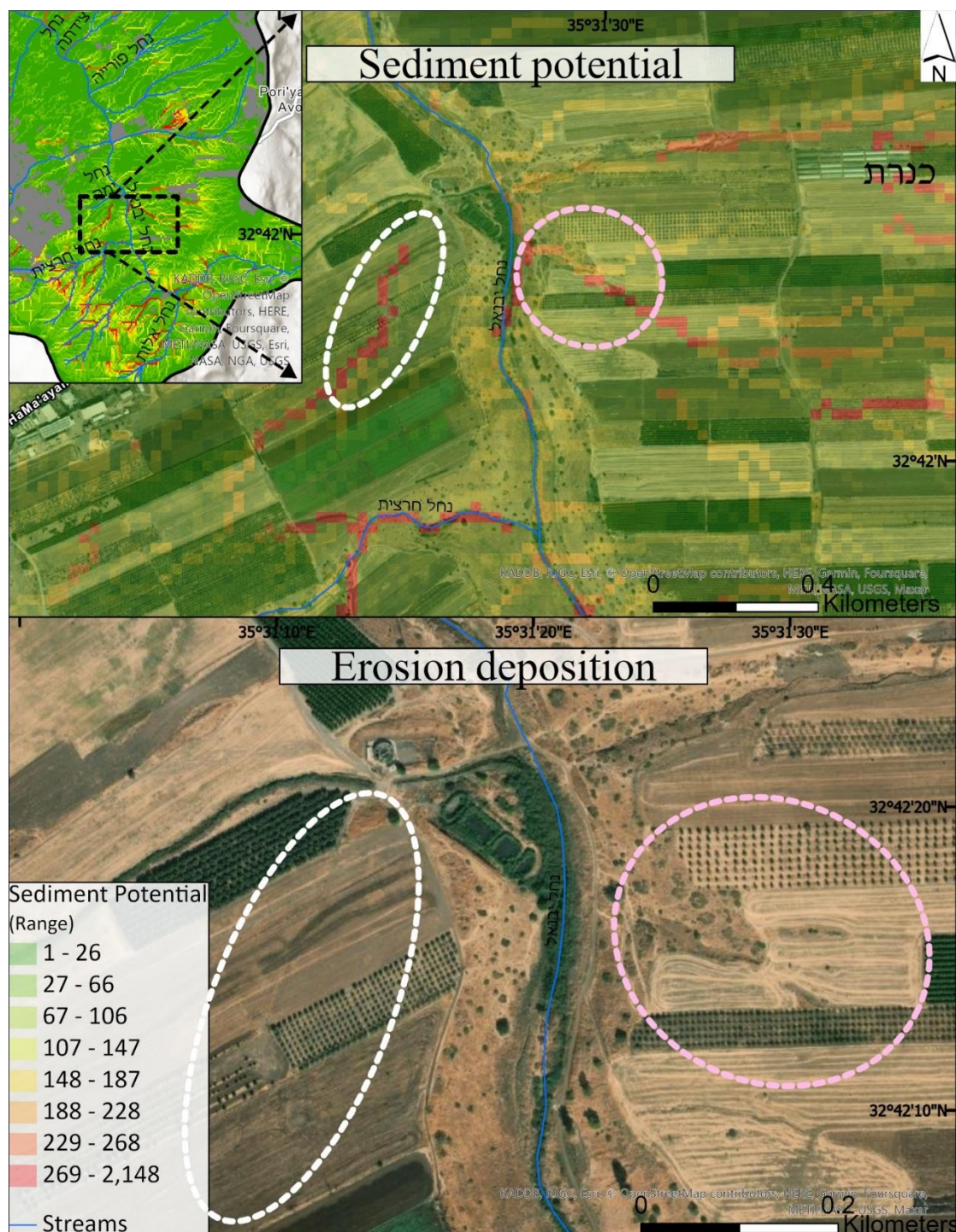
ב) מודלים של קישוריות הידרו-מורפולוגית וסחיפת קרקע

בהרצה של המודל התקבלו 168,122 פיקסלים (25X25), ערך המינימלי 0, ערך מקסימלי 2,148, ממוצע 45.77 וסטיית תקן 80.88 (איורים 2 - 4). ישנם הבדלים גדולים בין חלקים שונים של הבקעה בפוטנציאל של הקרקע שבהם להיסחף, כאשר באזורים הדרום מערביים פוטנציאל זה גבוה יחסית, בעיקר בגלל שיפועים תלולים יחסית, סוג הקרקע והעיבוד החקלאי (איור 2).



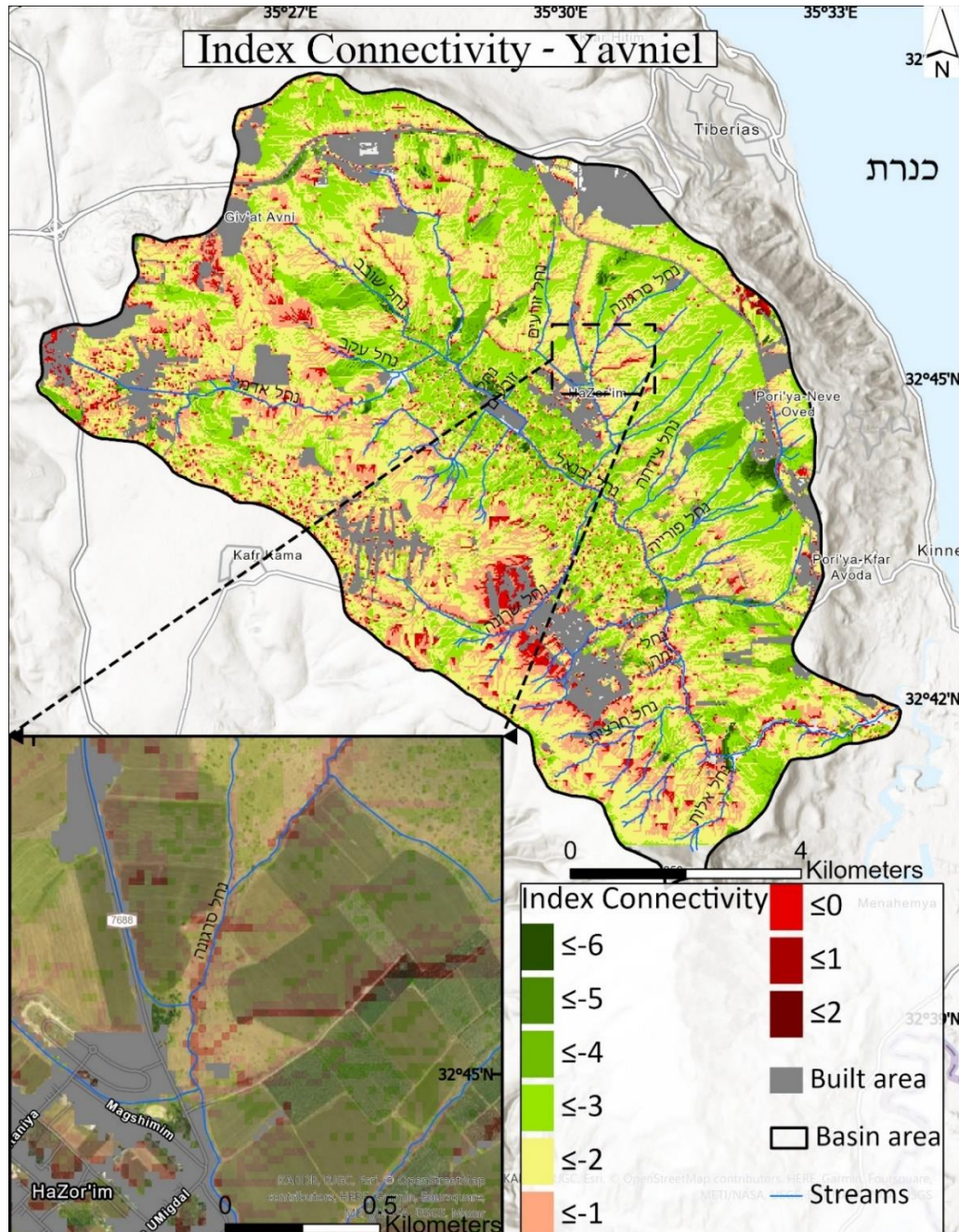
איור 2: פוטנציאל הסחף באגן יבנאל, לפי רכיב המעלה (Dup). בכחול ערוצי הנחלים המשמשים כמבלעים, בשחור שטח האגן, באפור השטחים הבנויים. שאר הצבעים מתארים טווחים של ערכי הפוטנציאל המושפע מהזרימה המצטברת וממוצעי המשקולות של השטח התורם נגר/סחף אל המבלע הקרוב. הטווחים לפי מרווח סטיית תקן (40.44 ±) ומבליטים ערכים שונים מהממוצע (45.77). האזורים הירוקים בעלי פוטנציאל נמוך והאדומים פוטנציאל גבוה. בתמונת התקריב ניתן לראות אזור חקלאי מעל מושבת יבנאל, המאופיין בפוטנציאל סחף גבוה (בטווח 150 ומעלה).

כשמחפשים עדויות בשטח לסחיפת קרקע שמתקיימת בפועל, מוצאים לכך עדויות גם בתצלום אוויר, שבו נראים סימני התחתרות/ערצונים במקומות שהמודל נתן להם ערכים גבוהים של פוטנציאל לתרומה של סחף קרקע (איור 3).



איור 3: איתור עדויות, בתמונה הקטנה למעלה – אזור דרום האגן במפגש בין נחל יבנאל לנחל חרצית. בתמונה העליונה – תקריב של אותו האזור עם סימון שטחים חקלאיים באזור המורד (בעיגולים), בעלי פוטנציאל סחף גבוה (בטווח 200 ומעלה). בתמונה התחתונה – תקריב של האזור, המראה באמצעות תמונת לוויין את אותם שטחים פוטנציאליים, עם סימנים של שינוי בתכסית הקרקע המעידים על סחף.

גם על-פי מודל הקישוריות (Connectivity) האזורים הדרום-מערביים של הבקעה נתונים בסיכון גבוה יותר לסחיפת קרקע (צבע אדום באיור 4), כיוון שהם מתאפיינים בין היתר בשיפועים תלולים ובשטחים חקלאיים רבים שעיקרם גידולי שדה (תמונת הלווין באיור 4), שני אלמנטים שמעלים את הסיכון לסחף. חשוב לציין שלצד השטחים עם הקישוריות הגבוהה שמגדילה את הסיכון לסחיפת קרקע ישנם שטחים פתוחים רבים שחלקם מתפקדים כשטחי חיץ (Buffer) לסחף. מגבלה אחת של המודל הזה היא שכבישים מהווים מחסום הקוטע באופן משמעותי את הקישוריות כאשר למעשה ישנם מעברי מים מתחתיהם (איור 4).



איור 4: מדד הקישוריות (Connectivity Index, CI) באגן יבנאל, המושפע מהיחס שבין רכיב המעלה (D_{up}) במונה לרכיב המבלע (D_{dn}) במכנה. כל צבע מייצג יחס, כאשר האזורים הירוקים מעידים על קישוריות נמוכה והאדומים על קישוריות גבוהה. תמונת התקריב מתמקדת על שטח עם אזורים בעלי קישוריות גבוהה מעל מושב הזורעים.

ג) מודל של נגר

1) ערכי Curve Number (CN)

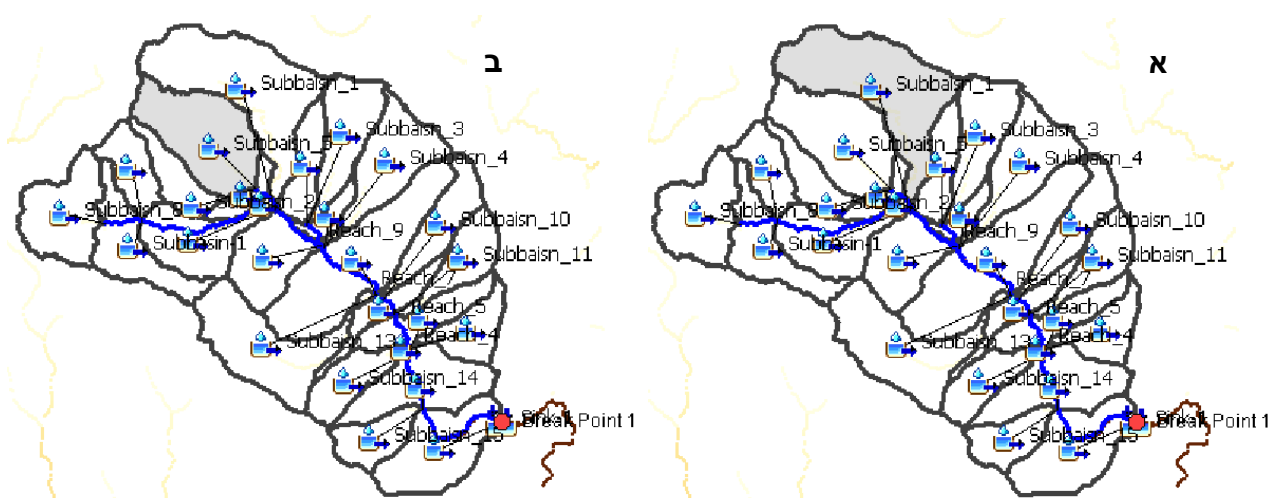
לכל שימושי הקרקע וכיסויי הקרקע המאפיינים את בקעת יבנאל התקבלו ערכי CN תוך התאמה לשני טיפוסים הקרקע (קבוצות הקרקע, HSG) הקיימים בבקעה (C ו-D) ולשני מצבי לחות קרקע, AMC I (לחות בינונית) ו-AMC II (לחות נמוכה) (טבלה 2).

טבלה 2: ערכי CN לשימושי/כיסויי קרקע של בקעת יבנאל בשני טיפוסים קרקעות (C, D), בשני מצבי לחות קרקע (AMC I – לחות בינונית; AMC II – לחות נמוכה).

טיפוס קרקע D		טיפוס קרקע C		שימוש קרקע/כיסוי צומח
AMC I	AMC II	AMC I	AMC II	
70.2	84.3	62.8	79.4	עשבונים
70.2	84.3	62.8	79.4	בתה
64.7	80.7	57.9	75.8	שיחייה
65.6	81.3	58.3	76.1	חורש
65.6	81.3	58.3	76.1	יער נטוע
63.7	80	56.8	75	בתי גידול לחים
81.6	91	76.3	88	גידולי שדה
72.9	86	66.6	82	מטעים - נשירים
72.9	86	66.6	82	מטעים – ירוק עד
83.4	92	79.8	90	חממות
83.4	92	79.8	90	שטח בנוי
75.4	87.5	69.2	83.7	מחצבות
75.4	87.5	69.2	83.7	שטח מופר אחר

2) תתי אגנים

בהתאם לפרמטרים שנקבעו ולאחר חיבור של אגנים קטנים וחריגים עם גדולים יותר וסמוכים, התקבלו וסומנו בבקעת יבנאל 26 תתי-אגנים (איור 5). כיול המודל נעשה על תת-אגן מספר 1 (איור 5א).



איור 5: תתי האגנים שנוצרו בעזרת ה-HEC. צבועים באפור תת-אגן מספר 1 (א) ותת-אגן מספר 2 (ב). תוצאות מפורטות המוצגות להלן מתייחסות לתתי-אגנים אלה.

3) המודל ההידרולוגי

בעזרת מודל HEC-HMS, לאחר כיוול, התקבל מודל שחזרה בקירוב סביר את התגובה ההידרולוגית של האגן. נמצא שזמן הפיגור (Lag time) האופטימלי של הערוצים הוא 60 דק', ושימוש בערכי CN במצב לחות קרקע I AMC נתן ניבוי טוב יותר של הספיקות המדודות.

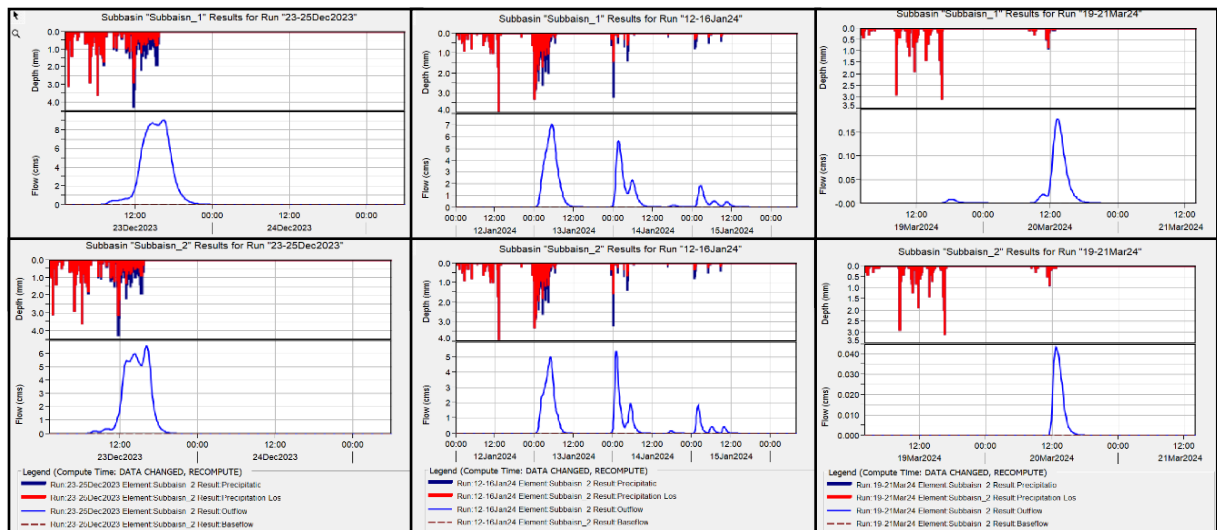
טבלה 3 מציגה השוואה בין תוצאות המודל והתגובה ההידרולוגית בפועל בכלל האגן בשלושה אירועי גשם בחורף 2023-2024 – בראשית העונה (דצמבר), באמצע עונת הגשמים (ינואר) ובסוף העונה הגשומה (מרץ) – ואירוע אחד מ 2016 (להידרוגרפים המלאים ראה נספח ג). הערכים המספריים מתייחסים לזרימה בתחנה ההידרומטרית הממוקמת במורד האגן (תחנת אלומות). המודל מדייק על פי רוב בחיזוי תחילת הזרימה וסיימה, ומציג סטיות משמעותיות בחיזוי נפח הזרימה וספיקות השיא. בכל האירועים, למעט אירוע (3) נפח הזרימה המחושב גבוה בסדר גודל מהנפח המדוד. משמעות הדבר כי תפרוסת שימושי הקרקע במרחב האגן תורמת למיתון הקישוריות ההידרולוגית, הפחתה בנפח הזרימה ושימור המים בקרקע.

ניתוח ספיקת השיא מלמד כי באירועים קטנים דוגמת אירוע (3) ספיקת השיא המחושבת זהה בדיוק למדודה. באירוע זה גם הסטיה בהערכת הנפח הכללי איננה גבוהה יחסית למתקבל בנפחי זרימה גבוהים. הסבר אפשרי לתופעה נעוץ במנגנון התפתחות הזרימה בערוצים. מחקרים שנערכו בנחלי אכזב בסביבה הים תיכונית מלמדים כי במהלך אירועי גשמים קטנים, כמות המשקעים איננה מספיקה להתפתחות נגר אגני, והזרימה בערוצים מונעת בעיקר על ידי התפתחות איזורי תרומה בקרבת הערוץ ומגשם ישיר על פניו (Serrano-Notivoli et al., 2022). עובדה זו מחדדת את חשיבות יצירת אזורי חיץ בין השטחים החקלאיים (או דרכים) לאפיק הנחל והקפדה על צמחיה אשר תגביר את החידור לקרקע ותעכב את התפתחות אזורי התרומה הסמוכים לאפיק. ייתכן ובגלל הרזולוציה היחסית גסה של מיפוי שימושי הקרקע, רצועות חיץ צרות ושטחי חיץ קטנים שסופגים חלק מהנגר שמגיע משטחים תורמים סמוכים לא מופו באופן מספק ולכן לא נכללו במודל.

טבלה 3: השוואה בין התוצאות המחושבות של המודל (Computed) והתגובה ההידרולוגית בפועל (Observed) בכלל האגן (בקעת יבנאל).

אירועי גשם (תאריכים)				
8-9.1.16 (4)	19-21.3.24 (3)	12-16.1.24 (2)	23-25.12.23 (1)	
2831.1	50.4	2263.5	1974.6	כמות מים כוללת מחושבת (Computed) על-פי המודל (מ ³)
416.9	75.2	397.3	827.6	כמות מים כוללת נצפית (Observed) על-פי מדידה (מ ³)
578.66%	-33%	467%	138.60%	פער בין ערך מחושב לערך נמדד (%)
75.4	1.2	7.3	27.2	שיא מחושב (M ³ /S)
13.2	1.2	37.4	57.2	שיא נמדד (M ³ /S)
8.7	1.7	6.4	2	Root Mean Squared Error (RMSE)

בחינת תוצרי המודל ברזולוציה גבוהה חושפת תבנית עונתית בהתנהגות ההידרולוגית של האגן. בשולי עונת הגשמים, בחודשים דצמבר ומרץ, נדרש סף משקעים גבוה יחסית כדי לייצר זרימה משמעותית באפיקים. לעומת זאת, באמצע עונת החורף (ינואר), כאשר הקרקע כבר רוויה ממשקעים קודמים, האגן מגיב במהירות גם לאירועי גשם מתונים יותר, כפי שניתן לראות באיור 6 תגובת האגן במהלך חודש ינואר מדגימה את הדינמיקה העונתית, התפתחות הזרימה מהירה וההידרוגרף עוקב אחר מהלך סופות הגשם. תופעה זו מצביעה על הקשר ההדוק בין תנאי הרטיבות בקרקע לבין התפתחות הנגר העילי באגן.



איור 6: תוצאות מודל מחושבות עבור תת-אגן 1 (עליון) ותת-אגן 2 (תחתון) בשלושה אירועי גשם: 23-25.12.23 (שמאל); 12-16.1.2024 (מרכז); ו- 19-21.3.2024 (ימין). למיקום תתי-האגנים בבקעת יבנאל ראה איורים 5א (1) ו-5ב (2).

ד) נגר וסחיפת קרקע – סיכום

התקבלו מודלים מרחביים המציגים את פוטנציאל הסחף ואת הקישוריות הידרו-מורפולוגית, שיחד מתארים את אזורי הסיכון לסחיפת קרקע. התקבל גם מודל הידרולוגי המסביר בקירוב סביר את ממדי הנגר כפי שנמדדו בתחנה ההידרומטרית ביציאה של נחל יבנאל מבקעת יבנאל לכיוון הירדן. בעזרת המודלים שנוצרו כאן ניתן לתאר באופן יותר מציאותי את התפרוסת המרחבית של היבטים שונים של נגר וסחיפת קרקע – את אזורי התרומה של נגר ו/או סחף, את אזורי המבלע של מי נגר וסחף, ואת אזורי הסיכון. מיפוי זה מאפשר לבחור את המיקום המיטבי של הפעולות הנדרשות להקטנת נגר וסחיפת קרקע וגם לבחון את השפעתם של פתרונות הנדסיים בכלל ופתרונות מבוססי טבע בפרט באזורים שונים בבקעה.

2. סקירת ספרות בנושא פתרונות מבוססי טבע למיתון נגר וסחיפת קרקע בשטחים פתוחים

המטרה של חלק זה בפרויקט היתה לסקור אפשרויות שונות של התמודדות עם בעיות של נגר וסחיפת קרקע באגני היקוות מרובי שימושים, בדומה למה שקיים בבקעת יבנאל, אך באופן כזה שיכללו גם פעולות הנדסיות וגם פעולות שיקום של מערכות אקולוגיות שהשילוב ביניהם יתרום לפתרון כולל ובר קיימא, היינו פתרון מבוסס טבע (Nature based solution). כפי שמוצג בפרק הראשון של עבודה זו שימושי/כיסויי קרקע עירוניים וחקלאיים תורמים נגר וסחיפת קרקע ששימושי/כיסויי קרקע טבעיים ונטועים יכולים להקטין ולווסת, אך יש חשיבות למיקום ולאופן שבו נעזרים באלה האחרונים. בחלק זה נעשה סיכום חומר ספרותי ממאמרים בעיתונות מדעית נשפוט בדגש על דוגמאות של תכנון ובעיקר יישום של פתרונות מבוססי טבע במערכות נחליות ובאגני היקוות.

להלן הסקירה:

א) ניהול אגן היקוות תוך שמירת המערכת האקולוגית – פתרונות מבוססי טבע

שטפונות הם אחד מאסונות הטבע השכיחים בעולם, אשר תדירותם צפויה לעלות כתוצאה מהשינוי החזוי במשטר המשקעים עקב שינוי אקלים. הצפי הוא לעליה באירועי גשם קצרים ועוצמתיים, אשר בשילוב עם השינויים בשימושי קרקע ובמיוחד תהליכי העיור המובילים להתמרת שטחים חדירים לכיסויי קרקע אטימים, מגבירים את הסיכון להצפות ולסחיפת קרקע (Masson-Delmotte et al., 2021). במהלך השנים התפתחו גישות שונות להתמודדות עם השטפונות (גרינצוויג & ארגמן, 2018). בעבר, ההתייחסות למניעת הצפות ולניקוז נחלים בארץ ובעולם הייתה נקודתית, והתבססה על פתרונות מקומיים באמצעות פעולות הנדסיות שבמרבית המקרים העבירו את הבעיה למורד. גישה זו כללה פתרונות הנדסיים כגון דיפון גדות, הגבהת סוללות, בניית סכרים וחפירת תעלות לניקוז המים (אגוזי, 2021). בשנות ה-90 חל מפנה בתפיסת ניהול השטפונות, והחלה להתפתח גישה המתייחסת לכלל אגן ההיקוות כמערכת. גישה זו מדגישה את חשיבות הראיה האגנית הכוללת על פני פתרונות נקודתיים במניעת הצפות (Rhoads, 2020; משה וחוב, 2021).

במקביל, מחקרים הראו כי המערכות האקולוגיות מספקות מגוון רחב של שירותים החיוניים לרווחת האדם ולקיומו. המערכת האקולוגית הנחלית בפרט מספקת שירותי מערכת מגוונים ובהם שירותי וויסות חשובים כמו שימור קרקע ומיתון השפעתם של תנאי האקלים המקומיים (גרינצוויג & ארגמן, 2018; Frank, et al., 2014; Thorp et al., 2010). מתוך גישת שירותי המערכת האקולוגית התפתח ענף יישומי השואף לרתום את התהליכים האקולוגיים הטבעיים להרחבה ושיפור של סל השירותים שמספקות המערכת האקולוגיות לרווחת האדם – פתרונות מבוססי טבע (Nature-based Solutions, NbS) (Cohen-Shacham et al., 2016; Eggermont et al., 2015). בני האדם הם לא רק "נהנים" פאסיביים משירותי המערכת האקולוגית, אלא הם יכולים לשנות באופן יזום את צורתן ותפקודן של מערכות אקולוגיות, כולל הגנה, ניהול ושיקום של מערכות טבעיות או מעשה ידי אדם, במטרה להתמודד עם אתגרים שונים.

פתרונות מבוססי טבע (NbS) הוגדרו על ידי ה-IUCN כפעולות הגנה, שימור, שיקום, שימוש וממשק בר-קיימא של מערכות אקולוגיות במטרה להתמודד עם אתגרים חברתיים, בריאותיים, כלכליים וסביבתיים תוך שימור/שיפור תפקודן של המערכות האקולוגיות ותמיכה ארוכת טווח במגוון הביולוגי (Cohen-Shacham et al., 2016). בגישה זו מגולמים רעיונות ופעולות מתחומי ידע שונים כמו הנדסה, כלכלה, אקולוגיה, חקלאות ועוד (אגוזי, 2021; Cohen-Shacham et al., 2016) והיא מהווה, למעשה, ענף יישומי של גישת שירותי המערכת האקולוגית.

פתרונות מבוססי טבע הינו מושג 'מטריה' המכיל בחובו סל של כלים ופתרונות להתמודדות עם בעיות חברתיות וסביבתיות, כולל כאלה שהאנושות עלולה להיתקל בהן בעתיד. על-פי גישה זו הפעולות בשטח מבוססות ביסודן על תכנון מחושב של מערכות טבעיות וחצי-טבעיות במטרה לשמר ולספק מגוון של שירותי מערכת אקולוגית בממדים

גדולים ככל האפשר (אגוזי, 2021). בהקשר של ניהול מערכת נחלית, הכוונה היא להסתכלות אגנית, המעדיפה הסתמכות על שימור של הסביבה הטבעית של הנחל על פני שימוש במבנים הנדסיים מעשה ידי אדם. כך לדוגמה, שימור ושיקום של אזורים מיוערים, אקוויפרים, אגמים, ביצות ופשטי הצפה אשר ישמרו מים ויגרמו לירידה בספיקות הזרימה הנחלית וימנעו הצפות באזורים מאוכלסים לאורך הנחל עדיפים על פני סכרים הנדסיים ותעלות בטון (Cohen-Shacham et al., 2016). ההבדל המרכזי בין גישה זו לגישות קודמות לניהול המערכת הנחלית הינו השקלול של השירותים והתועלות שמערכת אקולוגית בריאה יכולה לספק לטווח הארוך, לעומת פתרונות הנדסיים מקומיים וקצרי מועד אשר עלולים אפילו לפגוע במערכת האקולוגית (אגוזי, 2021). דגש חשוב נוסף בגישת פתרונות מבוססי טבע הוא יצירת פתרון מותאם לכל אזור בהתאם לסביבה הטבעית והסביבה האנושית המאפיינים אותו. הפתרון צריך לכלול גם פתרונות מבוססי מדע, מנוטרים ודינאמיים אך במקביל להיות מחובר לתרבות האנושית המקומית (Cohen-Shacham et al., 2016).

ב) המערכת הנחלית

יישום של פתרונות מבוססי טבע דורש היכרות והבנה של התהליכים הגיאומורפולוגיים, ההידרולוגיים והאקולוגיים המתקיימים באזור שבו מעוניינים ליישם. לפיכך, בפרק זה יוצגו התהליכים הבסיסיים במערכת הנחלית הטבעית, וכן תגובות המערכת הנחלית לשימושי הקרקע השונים באגן ההיקוות.

מערכות נחליות הן הדרך המרכזית במחזור ההידרולוגי בה מושבים מים מהיבשה אל האוקיינוס ובכך הן מהוות גורם משמעותי בתהליכי עיצוב הנוף. המערכת הנחלית מורכבת מערוצי זרימה מסדרי גודל שונים ומאגן ההיקוות המהווה את השטח התורם נגר וסחף למערכת זו. אגן ההיקוות מכיל את המדרונות המסיעים נגר וסחף אל ערוצי הזרימה, לכיוון מורדות הנחל ולבסוף אל השפך המהווה את מוצא המים והסחף (Rhoads, 2020). שינויים בעוצמות הזרימה (ספיקה) יוצרים שינויים בכמויות הסחף, בהתאם לסדימנט הזמין באגן ההיקוות ובכך מייצרים מורפלוגיות נחליות שונות (Allen, 1982; Schumm, 1977). התפתחות המורפולוגיה הנחלית מושפעת משלושה גורמים עיקריים: א. גיאולוגיה – סוג המסלע והקרקע, מבנים גיאולוגיים ופעילות טקטונית; ב. אקלים – שינויים אקלימיים המתרחשים בסביבה בעלת גורמים גיאולוגיים מסויימים קובעים את התפתחות הקרקע והצמחיה; ו- ג. הידרולוגיה – מאפייני הזרימה והסחף אשר נוצרים כתוצאה מתנאים גיאולוגיים ואקלימיים (Rhoads, 2020).

פני השטח והקרקע הם המסנן הקובע את הקצב ואת כמות המים החודרים לקרקע. משתני פני השטח כגון חספוס, שיפוע, מיקרוטופוגרפיה, אבניות, קרומים וכן משתני הקרקע – מרקם ומבנה, הרכב מינרולוגי, נקבוביות, צפיפות, דחיסות ולחות קודמת – הם אלו הקובעים את אופי תהליך החידור (גרינבאום וחובי, 2003; Kidron & Yair, 2001; Lange et al., 2003). כאשר עוצמת הגשם עולה על קצב החידור של הקרקע/סלע נגר עלי מדרוני עשוי להתפתח. היחסים בין מאפייני פני השטח, הקרקע והחידור יקבעו את כמות הגשם העודף הנותר על פני השטח והופך לנגר עלי ולזרימה שטפונית (גרינבאום וחובי, 2003; Rhoads, 2020).

סחף מתרחש כאשר מאמץ הגזירה של הזרימה עולה על כח ההתנגדות של תשתית הזרימה לתנועה. כח ההתנגדות נקבע על פי סוג הסלע/קרקע, תכונות הקרקע (קוהזיביות וגודל גרגר) וצמחיה, ומאמץ הגזירה של הזרימה נקבע על-פי הספיקה וכמות הנגר העילי (Allen, 1982). לאחר הסחיפה, משטרי הסעת הסחף נקבעים גם-כן על ידי אקלים וצמחיה, אך במקביל מושפעים ממאפייני אגן ההיקוות: גודל, מורפולוגיה ושיפוע, פיזור סוגי הסלע/קרקע באגן וקישוריות ערוצי הזרימה (Ben-David, 2003; Schwartz & Greenbaum, 2009; Yair et al., 2017). המושג "מאזן סדימנטרי" (Sedimentary budget) משקלל את מקורות הסחף, אזורי ההשקעה וטיב הקישוריות של ערוצי הזרימה

בין מקורות הסחף ואזורי ההשקעה בכדי לקבוע את כמות הסחף הנפלטת מהמערכת הנחלית (Reid & Dunne, 2016).

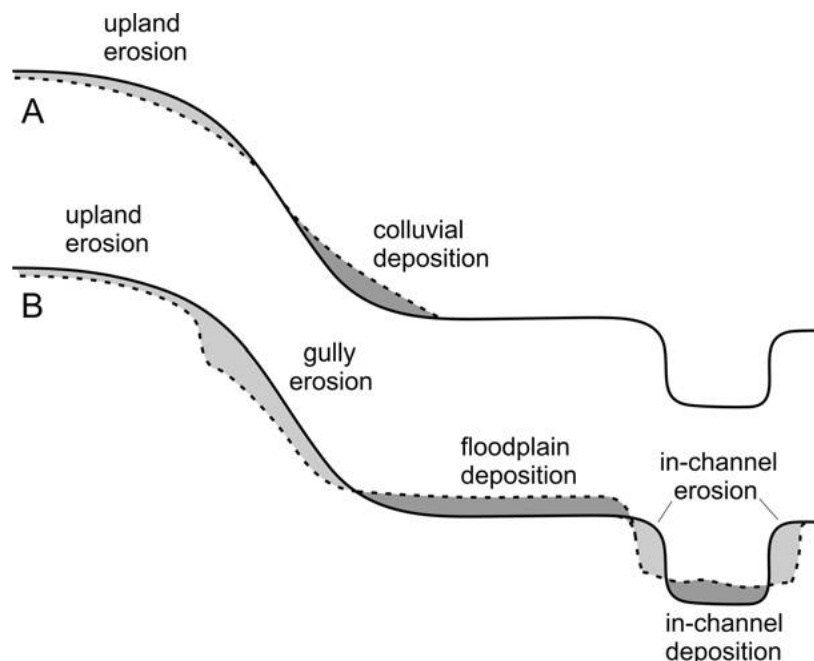
אזורי השקעה במערכת נחלית, משמרים סחף בתחומי אגן ההיקוות של המערכת הנחלית. אזורי השקעה נוצרים כאשר אספקת הסדימנט עולה על יכולת ההסעה של הזרימה ונפוצים באזורי המעבר בין המדרונות התלולים למורדות המתונים (Reid & Frostick, 2011; Schumm, 1977). מסיבה זו במורדות לעיתים רבות יתפתחו פשטי הצפה המהווים אזור נרחב של השקעה מחדש של הסחף המוסע ולכן מהווים חלק אינטגרלי מהמערכת הנחלית (Rhoads, 2020).

המערכות הנחליות הן בעלות חשיבות אקולוגית גבוהה. מעבר לאיכלוס מינים יחודיים לסביבה הנחלית, המערכות הנחליות משמשות כמסדרונות אקולוגיים טבעיים המאפשרים תנועה של בעלי-חיים ומיני צמחים במעלה ובמורד אגן ההיקוות (קפלן, 2019). מגוון מורפולוגי עשיר במערכת הנחלית גורם לריבוי סוגים שונים שלבתי גידול וכתוצאה מכך מוביל למגוון ביולוגי גבוה. בית גידול עשיר ומגוון שכזה יכול מארג מזון מגוון המתבסס על רמות הזנה רחבות ויציבות (de Mendonça et al., 2021).

ג) שימושי קרקע באגן ההיקוות והשפעתם על המערכת הנחלית

שימושי קרקע אנושיים בתחום אגן ההיקוות גורמים לשינויים ישירים ועקיפים במערכות הנחליות. תגובת המערכת הנחלית לשינויים בשימושי הקרקע קשורה בהיקף המרחבי ובאופי השינוי של שימושי הקרקע ביחס למרכיבי המערכת הטבעיים, כמו גם במידת הקישוריות ההידרולוגית באגן ההיקוות. כך לדוגמה, מערכת נחלית עם מדרונות תלולים המקבלת כמות משקעים רבה לרוב מאופיינת בקישוריות גבוהה, ולכן ההשפעה האנושית תורגש לאורך המערכת הנחלית כולה ותגרור שינוי משמעותי במאזן הסדימנטרי (Rhoads, 2020). באופן כללי ניתן לחלק את שימושי הקרקע לשטחים עירוניים ולשטחים פתוחים: חקלאים, נטועים וטבעיים.

סחף מוגבר כתוצאה מפעילות חקלאית תועד כבר החל מראשית המהפכה החקלאית, במקומות מסוימים בעולם, אך הפך למטרד ובעיה עולמית לאחר המהפכה התעשייתית ותהליך הגלובליזציה (James, 2013). ההשפעות העיקריות של החקלאות המודרנית על המערכות הנחליות הינן הפחתת קצב החידור של המים והגדלת הסיכוי להתפתחות זרימה במדרונות, אשר יחד מעצימים את הנגר העילי וגורמים לשטפונות. בנוסף, קרקעות חקלאיות חשופות לסחף מוגבר, עקב האופי העונתי של החקלאות המודרנית. קרקעות אלה, נטולות צמחיה, חשופות להתפתחות של ערוצונים והתחתרות לאחר בסמיכות לאפיקי זרימה, במדרונות וגם בפשטי הצפה במורדות האגן (Rhoads, 2020). תהליך זה, מעבר לסחיפה מואצת הגוררת איבוד קרקע במדרונות, גורם להשקעה של כמות גדולה של סחף בקרקעית האפיק, ובכך גורם לעליית גובה האפיק ביחס לגדותיו ומגדיל את ההסתברות להיווצרות שטפונות באזור זה (איור 7). ניסיונות לניהול מערכות נחליות באזורים חקלאיים בעלי שיפועים מתונים כללו בעיקר שינוי באפיקי הזרימה הטבעיים למעין תעלות על ידי יישור, העמקה והרחבת האפיק בצורה הנדסית. תיעול זה, גרם להגברת עוצמת הזרימה ובכך העלו את כמות הסחף באזורים אלו, לרוב על ידי התחתרות באפיק ובגדותיו (אגוזי, 2021; שגיא, 2019). בנוסף לכל אלה, שימוש עודף בדשנים גרר זיהום של מקווי המים שהוביל לפגיעה במערכת האקולוגית של הנחל (גפני וחוב, 2019).



איור 7: תהליך הסעת נגר וסחף מהמדרונות אל אפיקי הזרימה במורדות: A. חקלאות אקסטנסיבית; B. חקלאות אינטנסיבית. (מתוך: Rhoads, 2020).

שטחים נטועים ומיוערים במדרונות מייצבים את הקרקע ומונעים גלישות קרקע. בנוסף, שטחים אלו מגבירים את קצב חידור המים ומייצרים נגר מופחת. ריבוי הצמחיה מהווה מלכודות לסחף ומצמצם את כמויות הסחף המגיעים לאפיקי הזרימה (Imaizumi & Sidle, 2012). יחד עם זאת, שבילים לא סלולים עבור פעילות אנושית מייצרים אזורים מועדים להתפתחות זרימה וסחף המגיעים פעמים רבות לערוצים (Reid & Dunne, 1984). נטיעה וייעור באזורים מסוימים בסמיכות למערכת הנחלית, הפכו כלי לשיקום מערכות נחליות הודות לוויסות ההידרולוגי, התרומה למערכת האקולוגית והפיתוח התיירותי שמייצרת סביבה זו (גרינצוויג & ארגמן, 2019).

תהליכי עיור מואץ במאתיים השנים האחרונות, כתוצאה מגידול האוכלוסייה, גרמו להתמרה של שטחים פתוחים נרחבים לשטחים מבוזנים המשמשים למגורים, לתעשייה ולתחבורה. את השפעת העיור ניתן לחלק לשנים: שלב הבניה ושלב העיור. בשלב הבניה, המצב של קרקע חשופה בתאי שטח מבודדים יוצר אזורי נגר וסחף מוגברים. אזורי בניה בסמוך לאפיקים יכולים לתרום נגר וסחף רב לאפיק הזרימה ולשנות את אופי הזרימה שלו (מלקינסון וחוב' 2019). בשלב העיור שטחים מבוזנים פוגעים בחדירות המים לקרקע, ובכך מקטינים את כמות מי התהום וגורמים לעליה ניכרת בנגר העילי. במקביל, תשתיות ניקוז עירוני מכוונות כמויות גדולות של הנגר המצטבר ישירות לתוך אפיקי זרימה (Rhoads, 2020).

ד) פתרונות מבוססי טבע לבעיות בניהול המערכת הנחלית

הפעילות האנושית האינטנסיבית בעת המודרנית, באגני היקוות ובסמיכות לאפיקי זרימה, מובילה לשינויים במשטר הזרימה והסחף במערכות הנחליות (Rhoads, 2020). שינויים בתכונות המורפולוגיות ובמבנה הערוץ עשויים להוביל לשינויים במערכות האקולוגיות המבוססות על אותן תכונות (de Mendonça et al., 2021). פעמים רבות שינויים אלו, למרות שנעשו על ידי האדם, פוגעים בשירותים אשר המערכות הנחליות מספקות לרווחת האדם (Viles & Coombes, 2022).

מחקרים שנעשו בספרד וגרמניה הראו כי העדר רגולציה ברמה הלאומית והמקומית מהווים את הגורם העיקרי לשינויים מורפולוגיים במערכת הנחלית ופגיעה במערכות האקולוגיות (Frank et al., 2014; Vidal-Abarca et al., 2014). אסדרה אגנית החוצה גבולות מדיניים ותרבותיים, כרוכה במאמצים ברמה הלאומית והבינלאומית, בשלטון המקומי ובשיתוף הפעולה של חקלאים מקומיים עם רשויות הנחל (Zandersen et al., 2021). לאורך השנים ניהול המערכות הנחליות התבסס על פתרונות מקומיים שסיפקו מענה נקודתי לצרכי התושבים. על אף שהיו פשוטים ליישום, התעלמו מההשפעות המורפולוגיות הרחבות יותר ומהנזק האקולוגי שנגרם בעקבותיהן (אגוזי, 2021). כיום מתגבשת הגישה של פתרונות מבוססי טבע המציעה ראייה אגנית אינטגרטיבית ונרחבת, המשלבת ידע מדעי עם פרקטיקות מקומיות. גישה זו מלווה בפעילות חברתית-חינוכית המדגישה את תרומתה של המערכת הנחלית לרווחת האדם ובכך מספקת מענה מקיף לאתגרי הניהול האגני (Cohen-Shacham et al., 2016). ברחבי העולם ניתן למצא יישומים מגוונים של גישה זו, בהתאם לצרכים האנושיים ולאופי האגן והמערכת הנחלית המקומיים.

מקרה בוחן מייצג ליישום גישת NbS ניתן למצוא באגן ההיקוות של נהר Cache la Poudre, אשר מקורו בהרי הרוקי (ארה"ב). בתקופה המודרנית האגן היה נתון לשינויים משמעותיים בשימושי הקרקע שהתאפיינו בעיקר בתהליכי עיור ופעילות חציבה בסמוך לאפיק הזרימה המרכזי. בנוסף, בוצעו פעולות הנדסיות הכוללות בניית סכרים ודיפון גדות, במטרה להבטיח אספקת המים. בעקבות שינויים נפגעה יכולתו הטבעית של הנהר להסיע ולהשקיע סחף בפשטי ההצפה. יישום פתרונות מבוססי טבע בשנת 2011 התמקד בהסרת סכרים ומבנים מלאכותיים במעלה האגן לצורך שחזור פשטי הצפה תוך שימוש במחצבות קדומות כאגני איגום. תוצאות הפרויקט כללו שיקום לאורך כ-2 ק"מ המאופיינים כיום בשטחים מיוערים כפשטי הצפה, ביצות ואגמים שהפכו ליעד תיירותי עבור תושבי העיר הסמוכה (Cohen-Shacham et al., 2016).

דוגמא נוספת ליישום של NbS ניתן לראות בפרויקט ניהול המערכת הנחלית של אדלסטון (Eddleston water project) בסקוטלנד. הפרויקט, המתפרס לאורך כ-18 ק"מ סביב אחד מיובליו של הנחל, באגן היקוות בשטח של כ-70 קמ"ר, נועד לבחון את יעילותם של פתרונות מבוססי טבע במניעת שיטפונות במורד הנחל. במהלך 500 השנים האחרונות עבר אגן ההיקוות שינויים משמעותיים בשימושי הקרקע שכללו כריתת יערות, ניקוז ותיעול אפיקי זרימה. החל משנת 2012 יושמו במקום מגוון פתרונות מבוססי טבע הכוללים נטיעה של מיני עצים מקומיים בשטחים נרחבים, הקמת סכרים מחומרים טבעיים (עץ, סלע ובוצ) באפיקי הזרימה, פיתוח מערכות איגום במדרונות ובפשטי ההצפה, שחזור תוואי הזרימה הנפתולי של הערוץ והורדת הגדות המלאכותיים. ממצאי הפרויקט מצביעים על מיתון הספיקה של הזרימות באגן ועיכוב גל השיטפון המגיע למורד הנחל. בנוסף, שיקום המערכת הטבעית הוביל לשיפור בתהליכי החידור של מים לקרקע, התפתחות טבעית של המורפולוגיה הנחלית ועליה במגוון הביולוגי. הפרויקט הדגיש את חשיבות שיתוף הפעולה עם החקלאים המקומיים כתנאי הכרחי להצלחה של יישום פתרונות מבוססי טבע (Andrikopoulou et al., 2021).

פרויקט של מיפוי ושיפור תנאי הניווט והשייט בנהר מדירה (The Madeira River), ברזיל, מהווה מקרה בוחן להטמעת פתרונות מבוססי טבע בתהליך תכנון במערכת נחלית גדולה שנשמרה במצבה הטבעי. בניגוד למקרי בוחן אחרים הנהר לא עבר התערבות משמעותית של ניקוז ושינויי תוואי ולכן שימר את מרבית המורפולוגיות הנחליות הטבעיות. הפרויקט נועד לפתח תוכנית ליצירת אפיק זרימה המקשר בצורה נוחה ובת-קיימא את כלל האוכלוסיות השוכנות לאורכו. תהליך התכנון התבסס על מחקר מקדים המקיף את המאפיינים המורפולוגיים, ההידרולוגיים והאקולוגיים של הנהר במטרה להבין את מאפייני הזרימה ואת התהליכים והגורמים המשפיעים עליהם (Suedel et al., 2022).

יישום מערכות NbS למניעת הצפות נבחן גם בנחל שטפוני במרכז יוון המהווה סכנה לתושבי האזור. הפרויקט שנותח באמצעות מודלים הידרולוגיים שילב פתרונות הנדסיים עם אמצעים ומבנים טבעיים במטרה להגדיל את כושר האגירה של המערכת הנחלית ולייצב את גדות הנחל (Spyrou et al., 2021). הפתרון המשולב כלל הרחבה והעמקה של הערוץ, טיפול בתשתית הנחל, ושיקום הגדות על-ידי שילוב של קרקע, צמחיה ובולי עץ במבנה דמוי עריסה (Cribwall). מעבר להיבטים ההידרולוגיים הקטעים המשוקמים מספקים תועלות לציבור כאזורי בילוי ופנאי לאוכלוסייה המקומית ולמבקרים באזור. ממצאי המחקר מראים כי למרות היקפו המצומצם של הפרויקט ביחס לממדי הנחל ואגן ההיקוות שלו הושגו תוצאות משמעותיות: הפחתה בגובה ההצפה המרבי, צמצום השטחים המוצפים, האטת מהירות הזרימה והעלאת מפלס מי התהום על חשבון הנגר העלי. ניתוח המודלים ותרחישי האקלים מצביע על כך שתועלות אלו צפויות להישמר גם תחת תנאי האקלים החזויים לשנים הבאות (Spyrou et al., 2021).

פרויקט נוסף המדגים שימוש ב NbS באזור ים תיכוני באיטליה נעשה בפארק הטבע Portofino, כחלק מהפרויקט האירופאי RECONNECT. האזור מאופיין בנוף ים תיכוני בעל ערך אקולוגי, חברתי וכלכלי (תיירותי) גבוה, ומאיים על ידי מגוון סיכונים גיאואידרולוגיים ובהם שטפונות, מפולות סלעים וגלישות קרקע (Turconi et al., 2020). התכנית שפותחה במטרה להקטין נגר עלי וסחיפת קרקע כוללת ייצוב של גושי סלע ושיקום של טראסות חקלאיות תוך עידוד של פעילות חקלאית מסורתית; בהיבט האקולוגי התכנית מתמקדת בהסרת מינים זרים שאינם מותאמים לתנאים הים-תיכוניים לצד עידוד התחדשות טבעית של מינים עמידים לשינויי אקלים (למשל אלונים על חשבון אורנים); וכן שימוש בצמחייה לייצוב גדות נחלים.

בישראל, פרויקט נחל נהלל מהווה דוגמא ליישום פתרונות מבוססי טבע באגן היקוות מרובה שימושים המנקז שטחים בעלי שימושי קרקע מעורבים בדגש על שימושים חקלאיים. הפרויקט מתמקד בהשבת זרימת הבסיס לאפיק הזרימה, הסדרת חלוקת מי השיטפונות בין הנחל לחקלאים המקומיים, שיקום מורפולוגי של האפיק והגדות באמצעים טבעיים, הקמת רצועת חיץ בין אפיק הנחל לבין השדות החקלאיים, טיפול בערוצונים המתחתרים בשדות החקלאיים, יצירה של מסדרונות אקולוגיים לטובת חיבור מרחב הנחל לסביבתו, פיתוח מושכל של מוקדי תיירות ויצירת תשתית לפעילות חינוכית סביב המערכת הנחלית. במהלך הפרויקט נערכו סקרים אקולוגיים למיפוי המגוון האקולוגי באגן. הפרויקט מציע פתרונות מבוססי טבע, כגון נטיעת מטעי שקדים בסמוך לאפיק המרכזי, כאשר הגזם המתקבל מהם משמש לייצוב ערוצוני ההתחתרות ולבניית סכרי עץ באפיק. בנוסף, תוכנן מחדש מערך הניקוז של השדות כך שאינו מתנקז ישירות לאפיק המרכזי (טרבלסי, 2021).

לסיכום, סקירת מקרי הבוחן של יישום פתרונות מבוססי טבע במערכות נחליות מלמדת על מגוון שיטות לניהול נגר וסחיפת קרקע באגני היקוות. הפתרונות מבוססים על מספר עקרונות: א. התערבויות מורפולוגיות, הכוללות שחזור תוואי זרימה טבעי ונפתולי, הרחבת ערוצים והשבת פשטי הצפה; ב. פתרונות המבוססים על שימוש בחומרים טבעיים, כגון סכרי עץ ומסלע מקומי לייצוב הגדות והאטת הזרימה; ג. ניהול צמחייה הכולל נטיעת מינים מקומיים, יצירת רצועות חיץ והסרת מינים פולשים. קטגוריה נוספת מתמקדת בממשק עם חקלאות, וכוללת שיקום טראסות, תכנון מערכות ניקוז אקולוגיות והסדרת חלוקת מים בין צורכי הנחל והחקלאות. המחקר מראה כי היעילות של פתרונות מבוססי טבע כרוכה באימוץ גישה אגנית אינטגרטיבית המשלבת שיקולים הנדסיים ואקולוגיים, התאמה ספציפית לתנאים המקומיים, ויצירת תועלות נלוות בתחומי הפנאי, התיירות והחינוך. ממצאי המחקרים מדגישים כי פתרונות מבוססי טבע מציגים גמישות והסתגלות לשינויי אקלים, מעודדים שיתוף פעולה עם הקהילה המקומית, ומוכיחים יעילות גם בקנה מידה מצומצם.

3. תרומתן של בריכות השיקוע למגוון הביולוגי המקומי – סקר צומח

סקר צומח – שיטות עבודה

שתי קבוצות של בריכות השהיה/וויסות נחפרו בשנים האחרונות בשני ערוצים מרכזיים באזור כסוג של פתרון מבוסס טבע (NbS) במטרה למתן את הזרימות ובכך לקלוט את הסחף (בתוך הבריכות) ולהקטין את הסיכון להצפות במורד. בחלקו העליון של נחל יבנאל נחפרו בשנת 2019 תשע בריכות (ראה איור 1 בנספח א), ובמורד נחל זורעים נחפרו בשנת 2020 אחת-עשרה בריכות (ראה איור 2 בנספח א). הבריכות הוקמו בתוך הערוצים הטבעיים של הנחלים הללו על-ידי בניה של סוללות אדמה וסלעים ממקור מקומי. הבריכות נבנו וחוברו בעזרת צינורות (בקוטר 120 ס"מ) כך שכל בריכה צריכה להתמלא במידה מסוימת עד שהמים המצטברים בה זורמים דרך הצינור לבריכה הבאה שבמורד כאשר המיקום הסירוגי של הצינורות מחייב זרימה מתפתלת של המים מבריכה לבריכה. מבנה זה גורר מצב בו הבריכות מחזיקות מים למשך מספר ימים/שבועות ויוצרות תנאי לחות שונים בהשוואה לערוצים הטבעיים, מאין בית גידול לח 'חדש'.

כיוון שהצומח מהווה חלק בסיסי במערכת האקולוגית, מגוון מיני הצומח והשפע שלהם מכתוב במידה רבה את אופייה של המערכת האקולוגית. לכן, מטרת הסקר היא לאפיין את מגוון מיני הצומח ואת הדינמיקה המתפתחת לאורך זמן בעקבות הקמת בריכות השהיה/וויסות. לצורך כך נערכה השוואה בין חלקים שונים של הבריכות, בין הבריכות וערוצי הנחלים הטבעיים, ובין שנים (2021-2023). כדי לאפיין את מגוון הצומח באופן רחב ככל האפשר, כולל זיהוי של המינים הפורחים בקיץ שמושפעים משמעותית מלחות הקרקע, הסקר נערך בשני מועדים בכל שנה, חלק עיקרי שהתקיים באביב (אפריל-מאי) וחלק משלים שנערך בקיץ (יולי). להלן תיאור עיקרי של אופן העבודה בשטח (להמחשה, ראה תמונות בנספח ד).

לצורך הסקר חולקו הבריכות והערוצים לכמה אזורים תפקודיים/בתי גידול, לפי הפירוט הבא:

בריכות

מבנה הבריכות בשני האתרים דומה וכולל את החלקים העיקריים הבאים:

- **מורד הבריכה** ('בריכה-מורד', להלן) – החלק התחתון של הבריכה הנמצא לאורך הגדה/סוללה שהצינור שעובר בתוכה מוביל לבריכה הבאה במורד. בחלק זה מצטברים מים למשך זמן ארוך יחסית (תלוי בכמות המים שהבריכה מקבלת) ולכן מכונה גם 'אזור רטוב'.
- **מעלה הבריכה** (בריכה-מעלה', להלן) – החלק העליון של הבריכה הנמצא בשני שליש הדרך בין הסוללה/גדה שתוחמת את הבריכה במורד לבין הסוללה/גדה שתוחמת את הבריכה במעלה. בחלק זה ברוב הבריכות לא מצטברים מים (תלוי במבנה הבריכה ובכמות המים שמקבלת), ולכן מכונה גם 'אזור יבש'.
- **גדות** – אלה סוללות העפר המלאכותיות ו/או המדרונות הטבעיים התוחמים כל בריכה משלושה עברים (לכיוון המורד ומשני צידי הבריכה). במרבית הבריכות בנחל זורעים שלוש הגדות הן סוללות עפר שהורמו על-מנת ליצור את הבריכה, במרבית הבריכות בנחל יבנאל רק הגדה שבמורד היא סוללת עפר, והגדות משני צידי הבריכה הן המדרונות הטבעיים של הגיא שיוצר נחל יבנאל (עם השפעות אדם מוגבלות).

ערוצים

על-מנת להשוות את המצב בבריכות למצב טבעי באזור, נבחרו החלקים העליונים העיקריים של הערוצים שבתוכם נחפרו הבריכות, קרי ערוץ נחל זורעים שמעל הבריכות והערוץ המערבי של נחל יבנאל שמעל הבריכות (זהו הערוץ הראשי, מתוך שניים, שנשפכים אל הבריכות).

- **מרכז הערוץ** – החלק הנמוך בערוץ הנחל, אזור שבו מתקיימת הזרימה לאחר ירידת משקעים.
- **שפת הערוץ** ('גדה קרובה') – מדרגת הקרקע שמעל מרכז הערוץ. אזור זה נרטב רק בזרימה שיאית כאשר הנחל עולה על גדותיו.
- **גדה יבשה** ('גדה רחוקה') – אזור טבעי המרוחק במקצת מערוץ הזרימה. אזור זה נהנה ממשקעים היורדים עליו ישירות ולא נהנה מתוספת מים הזורמים במרכז הערוץ לאחר הגשם.

הסקר עצמו כלל שתי צורות דיגום, ריבועי דגימה ורשימת מינים לאורך חתך, ובוצע באופן הבא:

(א) ריבועי דגימה

מטרתה של צורת דיגום זו היא לאפשר השוואה כמותית בין החלקים השונים של הבריכות ושל הערוצים וכן ניתוח סטטיסטי מיטבי. העבודה כללה זיהוי של כלל המינים המופיעים בריבועי דגימה של 20X20 ס"מ, כולל הבחנה בין כאלה הצומחים בתוך הריבוע וכאלה שרק הנוף שלהם 'נופל' בתוך ריבוע הדגימה, וכולל הערכה של הכיסוי היחסי של כל מין בתוך הריבוע. מיקום ריבועי הדגימה נקבע בהתאם לאופי ומבנה האזורים שנדגמו כפי שמפורט להלן:

בריכות

ב 9-11 בריכות (מתוך 11) בנחל זורעים וב 6-7 בריכות (מתוך 9) בנחל יבנאל נדגמו 3 אזורים בכל בריכה כאשר בכל אזור נדגמו 6 ריבועי דגימה של 20X20 ס"מ לפי החלוקה הבאה:

מורד הבריכה – לאורך חתך של 20-60 מ' (כתלות בממדי הבריכה) שנמדד לאורכה של הגדה/סוללה שבמורד הבריכה ('האזור הרטוב') נדגמו 6 ריבועי דגימה במרווחים קבועים.

מעלה הבריכה – לאורך חתך של 20-60 מ' (כתלות בממדי הבריכה) שנמדד בשני שליש העליונים של הבריכה ('האזור היבש') נדגמו 6 ריבועי דגימה במרווחים קבועים.

גדות – על כל אחת משלוש הגדות של הבריכה נדגמו 2 ריבועי דגימה (בסה"כ 6 ריבועים), שמיקומם נבחר בצורה סדורה (בסוללות עפר המובחנות): 2 מ' ימינה ו-2 מ' שמאלה ממרכז הסוללה, לאורך שיא גובהה; או בצורה אקראית (בגדות הטבעיות, שאינן סוללות עפר): זריקת ריבוע הדגימה פעם אחת ימינה ופעם אחת שמאלה מנקודה משוערת של מרכז הגדה.

ערוצים

במעלה של כל אחד מהערוצים הנבחרים (זורעים ויבנאל) סומנו שלוש נקודות דגימה: 1) כ-20 מטר מעל הקצה העליון של הבריכה העליונה (בריכה מס. 1); 2) כ-40 מ' מעל נקודה 1; ו-3) כ-40 מ' מעל נקודה 2. בכל אחת מהנקודות הללו נדגמו בעזרת ריבועי דגימה של 20X20 ס"מ שלושה אזורים בסביבת הערוץ כמתואר להלן:

מרכז הערוץ – לאורך חתך שעובר במרכז/תחתית הערוץ נדגמו 3 ריבועי דגימה במרחקים של 2 מ' זה מזה.
 שפת הערוץ (גדה קרובה) – מכל צד של הערוץ, לאורך חתך שסומן כ-1 מ' ממרכז הערוץ, נדגמו 3 ריבועי דגימה במרחקים של 2 מ' זה מזה, סה"כ 6 ריבועים.
 גדה יבשה (גדה רחוקה) – מכל צד של הערוץ, לאורך חתך שסומן כ-4 מ' ממרכז הערוץ, נדגמו 3 ריבועי דגימה במרחקים של 2 מ' זה מזה, סה"כ 6 ריבועים.

ב) רשימת מינים לאורך חתך

מטרתה של צורת דיגום זו היא לזהות הבדלים ושינויים במגוון המינים, שעשויים להיות קטנים בגלל שהבריכות נחפרו ממש לאחרונה ובגלל זמן המחקר הקצר. לצורך כך נרשמו כל מיני הצמחים שנראו לאורך חתך באזור 'הרטוב' ביותר בברכות ובערוצים.

בבריכות – נרשמו כל המינים לאורך החתך שבמורד הבריכות. על-מנת להבטיח הכללה של כלל המינים שעשויים להיות מושפעים מהשינוי בבית הגידול (שטח מוצף/רטוב לזמן ארוך יותר בהשוואה לערוצים הטבעיים) גבולות חתך זה היו גמישים, ונרשמו מינים שנצפו גם באזורים סמוכים מחוץ לגבולות החתך שהיו כנראה רטובים/מוצפים במהלך החורף.

בערוצים הטבעיים – לשם השוואה למצב בבריכות נרשמו כל המינים שנצפו בקטע אחד בכל ערוץ (זורעים ויבנאל), קטע של ~40 מ' בין נקודות 2 ו-3 של ריבועי הדיגום (ראה לעיל). הרישום כלל את כל המינים שגדלים באזור 'הרטוב' של הנחל (היכן שהמים מגיעים בעת זרימות החורף), כלומר, בערוץ עצמו ועד שפת הגדות.

סקר צומח – תוצאות

בשלוש שנות המחקר, בבריכות ובערוצים בנחל זורעים ובנחל יבנאל, בדיגום האביב ובדיגום המשלים בקיץ, זוהו בסך הכל 237 מינים (ראה רשימה בנספח ה). מדובר במספר גבוה בהתייחס לשטחים הקטנים שנדגמו, כנראה בגלל השונות הגבוהה בתנאים (מיקרו בתי גידול) בין החלקים השונים של הבריכות והערוצים הטבעיים לצד הבדלים אקולוגיים מסוימים בין שני אזורי הדיגום. בשנת המחקר הראשונה זוהו 145 מינים, בשנת המחקר השנייה 180 ובזו השלישית זוהו 128 מיני צומח (טבלה 4). בזמן דיגום האביב בשנת הסקר האחרונה (2023) 5 מתוך 7 הבריכות שנדגמו בנחל יבנאל היו מוצפות עקב זרימה של מי קולחין שדלפו ממט"ש קדמת גליל מה שפגע בצומח שב'אזור הרטוב' והגביל את אפשרות הדיגום. זה כנראה חלק מההסבר למספר המינים הנמוך יחסית בשנה זו.

טבלה 4: סיכום מבנה סקר הצומח (אתרי הדיגום) בשנים 2021-2023 באביב (ריבועי דגימה ורשימות מינים) ובקיץ (רשימות מינים בלבד), וסה"כ מיני צומח שזוהו בכל שנה.

2023		2022		2021		
קיץ	אביב	קיץ	אביב	קיץ	אביב	
9	9	8	9	7	11	נחל זורעים – מספר בריכות שנדגמו (יש סה"כ 11)
7	*7	7	7	6	6	נחל יבנאל – מספר בריכות שנדגמו (יש סה"כ 9)
1	3	1	3	1	3	מספר אתרי דיגום בכל ערוץ (נחל זורעים, נחל יבנאל)
128		180		145		מספר מינים כולל

* בשנת 2023 בזמן דיגום האביב 5 מתוך 7 הבריכות שנדגמו בנחל יבנאל היו מוצפות עקב זרימה של מי קולחין שדלפו ממט"ש קדמת גליל מה שפגע בצומח שב'אזור הרטוב' והגביל את אפשרות הדיגום.

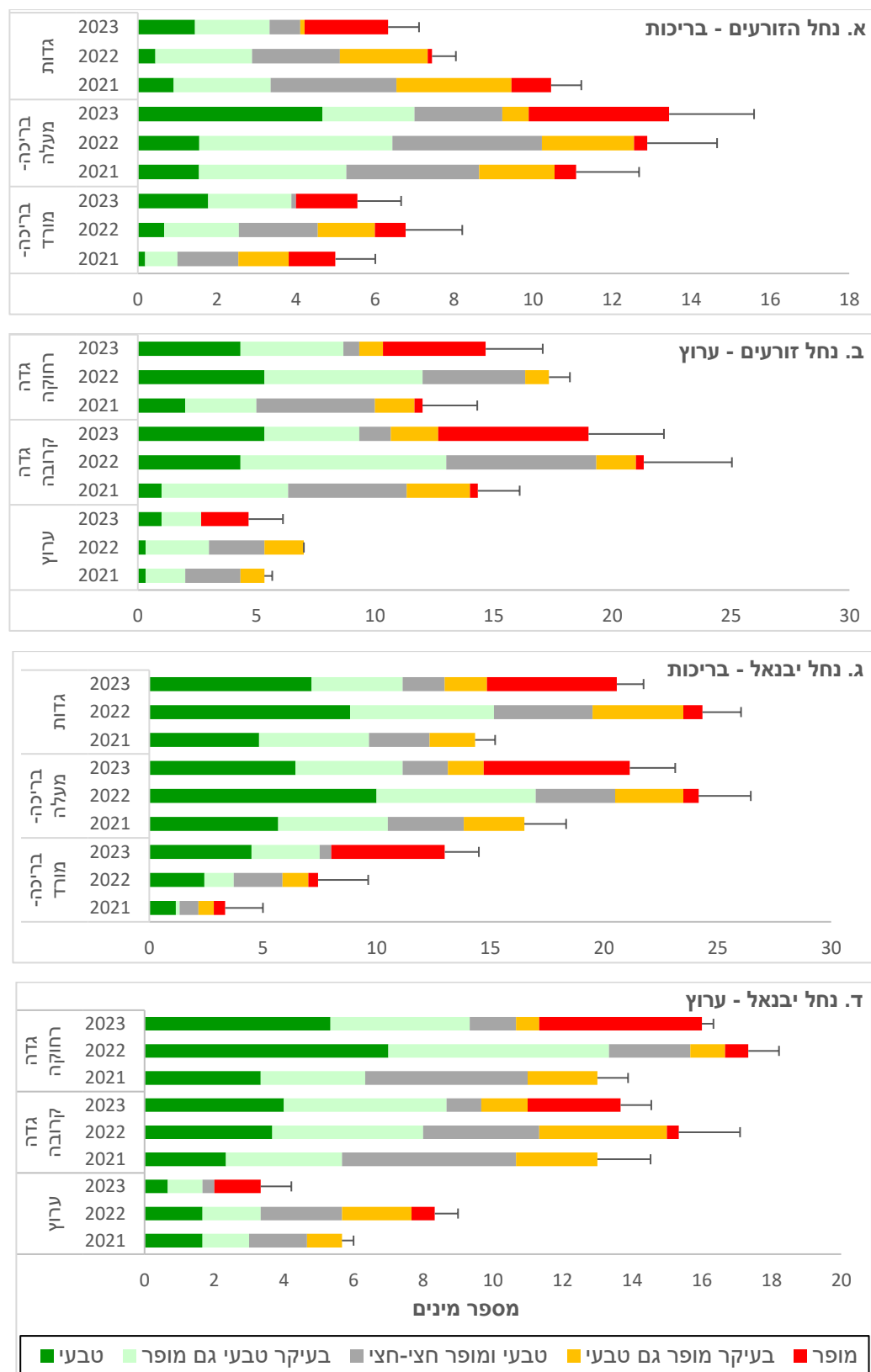
א) ריבועי דגימה

על-פי הנתונים שנאספו בשיטת ריבועי הדגימות (מסוכמים באיור 8), ניתן לראות כי עושר המינים (ממוצע לחתך) הגבוה ביותר היה בגדות ובמעלה הבריכות בנחל יבנאל (14.3- 24.2 מינים לחתך) ובגדות (קרובות ורחוקות) של ערוצי נחל זורעים (12- 21.3) ונחל יבנאל (13- 17.3). עושר המינים הנמוך יחסית במורד הבריכות הוא תוצאה מכך שבמרבית הבריכות בשני הנחלים אזור זה היה מוצף במים במשך ימים עד שבועות בחודשים שקדמו לדיגום האביב. ערכים נמוכים בתוך הערוצים של הנחלים נובעים מסיבה דומה (זרימה בערוץ המקשה על נביטה והתבססות) וגם משיטת הדיגום (3 ריבועים לחתך בערוץ לעומת 6 ריבועים לחתך בכל החלקים האחרים שנדגמו).

מגמה מסוימת של עליה במספר המינים המאפיינים בתי גידול מופרים בלבד לאורך שלוש השנים בשני הנחלים, בכל החלקים שנדגמו בערוצים (ערוץ, גדה קרובה, גדה רחוקה) ובבריכות (מורד הבריכה, מעלה הבריכה, גדות). בכל 12 הצלבות הדיגום (בריכות/ערוץ 2 X נחלים 3 X אזורי דיגום) מספר (וגם אחוז) המינים הגדלים רק בבתי גידול מופרים היה גדול יותר ב 2023 מאשר ב 2022 וב 2021.

מגמת עליה פחות בולטת ופחות גורפת, נמצאה גם לגבי המינים המאכלסים בתי גידול טבעיים בלבד. אולם בעוד שבנחל זורעים מספר המינים הגדלים בבתי גידול טבעיים בלבד היה הגבוה ביותר בשנה השלישית של הסקר (2023) כמעט בכל החלקים שנדגמו (זה לא היה כך בגדה הרחוקה של הערוץ), בנחל יבנאל מספרם היה הגבוה ביותר בשנה השנייה של הסקר (2022) במרבית החלקים שנדגמו (איור 8).

ייתכן, ובגלל שמדובר בבריכות 'חדשות' (בריכות נחל יבנאל נחפרו ב 2019 ובריכות נחל זורעים בוצעו בסתיו 2020), יש כאן מגמה שבה מצד אחד בגלל שיפור משק המים (בזכות המים המצטברים בבריכות בשני הנחלים) והגדלת בית הגידול (לפחות בנחל זורעים הערוץ הורחב על חשבון שטחים חקלאיים), מיני בר הגדלים בסביבה הקרובה מגיעים יחסית מהר ומתבססים בשטח, ומצד שני בגלל שמדובר בהפרה משמעותית בשני הערוצים (פעילות הנדסית ענפה הכוללת הקמת סוללות אדמה, הנחת בולדרים וצינורות לניקוז הבריכות) מינים חובבי בתי גידול מופרים, שרבים מהם כבר גדלים בסביבה החקלאית והיישובית הקרובה, מתבססים אף הם יחסית מהר ובקלות. מעניינת היא המגמה הדומה שהתגלתה בערוצים שמעל הבריכות בעיקר לגבי ריבוי מינים הגדלים בבתי גידול מופרים בלבד שמספריהם היו במגמת עליה במהלך שנות הסקר, מה שאולי מעיד על התפשטות של מינים אלה מהאזורים המופרים של הבריכות לעבר הערוצים הטבעיים שמעליהן.



איור 8: מספר מינים לחתר (ממוצע + שגיאת תקן) בחלקים השונים של הבריכות החפורות והערוצים הטבעיים בנחל זורעים ובנחל יבנאל, בעונת האביב, בשנים 2021-2023: (א) בריכות נחל זורעים, (ב) ערוץ נחל זורעים, (ג) בריכות נחל יבנאל, (ד) ערוץ נחל יבנאל. הצבעים השונים מייצגים את המידה בה נוסים המינים שנצפו לאכלס בתי גידול טבעיים או מופרים/מעשה ידי אדם, מכאלה המאכלסים בתי גידול טבעיים בלבד עד לכאלה המאכלסים בתי גידול מופרים בלבד (ראה מקרא). (לתיאור ומיקום של חלקי הבריכות והערוצים ראה בפרק השיטות).

ב) רשימת מינים לאורך חתך

על-פי הנתונים שנאספו בשיטת רשימות המינים במורד הבריכות ('אזור רטוב') ולאורך הערוצים הטבעיים, במרכזם (טבלאות 5-6), ובדומה למה שנמצא בריבועי הדגימות, בעונת האביב נמצאו יחסית הרבה מינים המעדיפים בתי גידול טבעיים (קטגוריות בית גידול: טבעי + בעיקר טבעי גם מופר), בין 20%-50% מהמינים שזוהו בחתכים השונים, גם בבריכות וגם בערוצים בשני הנחלים. בנוסף, נמצאה באותם מקומות מגמה של עליה במספר (ובאחוז) המינים הללו לאורך שנות המחקר. כשמסתכלים רק על הנעשה בבריכות (בעונת האביב) נמצאה מגמה הפוכה במספר ו/או אחוז המינים שמעדיפים בתי גידול מופרים (קטגוריות: מופר + בעיקר מופר גם טבעי), כלומר, ירידה לאורך שלוש שנות המחקר, המתיישבת עם העלייה בחלקם של המינים הטבעיים שצוינה לעיל (טבלה 5).

כאשר בוחנים את הקיץ מתקבלת תמונה שונה. ראשית, מספר המינים היה נמוך הרבה יותר בהשוואה לאביב, מה שמתאים לסביבה היבשה של בקעת יבנאל בכלל וגם של הערוצים והבריכות בפרט. שנית, רוב המינים שזוהו הם כאלה החובבים בתי גידול מופרים גם בבריכות (60%-80%) וגם בערוצים (40%-60%). (גם באביב חלקם של המינים משתי הקטגוריות של חובבי בתי גידול מופרים היה גבוה, אך כמעט בכל אזור דיגום/שנה הוא לא עבר את ה-50%). בהסתכלות פרטנית יותר על הקיץ ניתן לראות שאחוז המינים הללו מכלל המינים שנמצאו לאורך חתך היה גבוה יותר בנחל זורעים לעומת נחל יבנאל, גם בבריכות (71%-77%, 58%-62%, בהתאמה) וגם בערוצים (58%-75%, 40%-60%, בהתאמה). שני הערוצים ומערכות הבריכות נמצאים בסביבה מופרת של חקלאות ויישובי אדם, אך נחל זורעים זורם בצמוד לשטחים חקלאיים וקרוב יותר ליישוב (מושב הזורעים) ואילו לנחל יבנאל יש מרווח חיץ של שטחים טבעיים בין גדות הערוץ והשטחים החקלאיים הסמוכים, ואזורי יישוב/פעילות אדם נמצאים במרחק גדול יותר מהערוץ. בנוסף, כל הגדות (לכל בריכה 3 גדות, אחת מכל צד ואחת במורד לעבר הבריכה הבאה) של מרבית הבריכות בנחל זורעים הן סוללות עפר שנוצרו בפעולה הנדסית משמעותית ואילו בנחל הבריכות תחומות מצדיהן (גדות הצד) על-ידי המדרונות הטבעיים של הגיא של נחל יבנאל, ורק הגדה שלעבר מורד הנחל היא סוללת עפר. כך שבסביבת נחל זורעים יש רצף של שטחים מופרים ולכן גם הבריכות וגם הערוץ שמעליהן חשופים יותר לחדירה של מינים החובבים בתי גידול מופרים.

בין המינים של בתי גידול מופרים נמצאו גם כמה מינים גרים/פולשים (כמו סולנום המקור וכמה מיני ירבוזים) שחלקם היחסי היה גדול יותר בקיץ גם בבריכות וגם בערוצים. כשבוחנים את המינים הללו בעונת הקיץ ובערוצים בלבד נראה שגם מספרם וגם חלקם היחסי בין התצפיות עולה בין השנים, מה שיכול להעיד על מגמה של פלישה לערוצים הטבעיים גם מהשטחים המופרים 'הותיקים' המקיפים אותם וגם מהשטחים המופרים 'החדשים', הבריכות.

כאשר מסתכלים על מיני הצומח שמאפיינים בדרך כלל בתי גידול לחים, נראה שבאופן כללי מספר המינים הללו היה קטן גם בערוצים וגם בבריכות וללא מגמה ברורה בשלוש שנות המחקר. נמצא הבדל מסוים בין הנחלים, כאשר נוכחות חובבי הלחות, גם במספרים אבסולוטיים וגם באחוזים היתה גבוהה יותר בבריכות נחל יבנאל (4.1-7.5 מינים בממוצע לחתך שהם 16%-35% מהמינים שנצפו) בהשוואה לבריכות נחל זורעים (1.7-2 מינים בממוצע לחתך שהם 7%-14%). הסבר אפשרי להבדל הוא שערוץ נחל יבנאל הוא ערוץ מרכזי יותר המנקז אגן גדול יותר, ולכן יש בו כנראה זרימה רבה יותר ומשק מים רב-שנתי טוב יותר. במהלך המחקר נמצאו בערוץ עצמו יותר מינים חובבי לחות (לא בפער כפי שנמצא בבריכות) שחלקם לפחות גדלו לאורכו גם לפני חפירת הבריכות (למשל, שיח אברהם), 2-4 מינים לחתך באביב/קיץ לעומת 0-2 מינים לחתך בערוץ נחל זורעים (טבלה 6). בגלל הקרבה הפיזית של הערוץ הטבעי לבריכות, מינים כאלה יכולים לאכלס יחסית במהירות את בית הגידול הלח החדש שנוצר אם בשגשוג במקום גידולם

טבלה 5: מספר מינים שנצפו בחתכים מלאים במורד הבריכות (=רשימות מינים באזור 'רטוב') בנחל זורעים ובנחל יבנאל, באביב ובקיץ, בשנים 2021-2023. [בסוגריים מרובעים – אחוז* מתוך סך כל המינים בבריכה (ערך מעוגל)].

		נחל זורעים						נחל יבנאל					
		אביב			קיץ			אביב			קיץ		
		2023	2022	2021	2023	2022	2021	2023	2022	2021	2023	2022	2021
מספר בריכות שנדגמו		9	9	7	9	9	7	9	9	7	7	7	6
מספר מינים	ממוצע לחתך	21.4	24.1	17.4	15.7	13.6	12.8	25.3	34.9	26.4	12.7	12.7	13.3
	טווח	12-34	10-43	7-25	12-19	4-21	8-20	10-41	28-50	19-43	9-17	10-17	8-17
בית גידול אופייני	טבעי	2.4	4	2.2	0.7	0.7	0.7	4.3	11	8.9	1.9	1.2	2
	בעיקר טבעי גם מופר	3.9	5.9	5.6	1.4	0.6	0.6	2.8	6.1	6.1	1.7	1.2	1.6
	טבעי ומופר חצי-חצי	5.7	5.7	4.2	2.6	1.9	2.3	5.3	6.4	4.3	1.4	2.5	2
	בעיקר מופר גם טבעי	6	5.6	4	4.6	5.3	4.3	6.7	7.1	5.7	3.6	4	4.1
מופר		3.4	2.7	1.4	6.4	5	4.9	6.2	3.6	1.4	4.1	3.8	3.6
חובבי בתי גידול לחים		1.7	1.8	1.7	2	1.7	1.8	7.5	6.4	4.1	4.3	3.2	4.7
מינים גרים/פולשים		2.9	1.9	1.2	5.4	3	2.9	4.8	2.1	0.6	3.4	2.8	3

* בחלק מהשנים/אתרים סיכום המינים לא מגיע ל 100% בגלל פרטים שלא זוהו לרמת המין כך שניתן לסווג אותם לקטגוריות שבטבלה.

טבלה 6: מספר מינים שנצפו בחתך מלא לאורך מרכז הערוץ הטבעי (=רשימות מינים בערוץ) בנחל זורעים ובנחל יבנאל, באביב ובקיץ, בשנים 2021-2023. [בסוגריים מרובעים – אחוז* מתוך סך כל המינים בבריכה (ערך מעוגל)].

		נחל זורעים						נחל יבנאל					
		אביב			קיץ			אביב			קיץ		
		2023	2022	2021	2023	2022	2021	2023	2022	2021	2023	2022	2021
מספר מינים לחתך		35	34	31	12	7	16	27	27	28	10	12	10
בית גידול אופייני	טבעי	4	11	3	2	0	0	8	15	5	1	4	1
	בעיקר טבעי גם מופר	4	11	13	0	0	1	4	15	9	1	0	1
	טבעי ומופר חצי-חצי	10	9	8	2	3	3	4	15	7	2	2	2
	בעיקר מופר גם טבעי	11	5	7	5	2	3	7	26	4	4	4	2
מופר		6	1	2	3	2	9	3	11	3	0	2	4
חובבי בתי גידול לחים		1	0	2	0	1	2	2	7	4	2	2	2
מינים גרים/פולשים		5	0	2	1	1	6	1	4	2	0	2	3

* בחלק מהשנים/אתרים סיכום המינים לא מגיע ל 100% בגלל פרטים שלא זוהו לרמת המין כך שניתן לסווג אותם לקטגוריות שבטבלה.

עקב שיפור במשק המים הודות לבריכה שנחפרה סביבם, ואם בהתפשטות מבית גידול לח אחר לאורך הערוץ אל האזורים הלחים שבבריכות.

בעקרון, מיני הצומח חובבי בתי הגידול הלחים הם קבוצה תפקודית שאנחנו מצפים למצוא בה את השינוי המשמעותי ביותר לאורך שנים בגלל התוספת המשמעותית של מים לאורך זמן. אולם, על-פי תוצאות המחקר נראה ששינוי זה, בהנחה ולאורך זמן הוא בכל זאת מתקיים, הינו שינוי איטי. ייתכן ואיטיות זו נובעת מרגישותם הגבוהה של מינים אלה מה שמקשה עליהם להתבסס בבית גידול מופר למדי. בנוסף, ייתכן ובגלל שאין בבקעת יבנאל הרבה בתי גידול לחים משמעותיים המחזיקים מים לאורך זמן (בניגוד לנחלים שטפוניים שמתייבשים במהירות לאחר סיום אירועי גשם) שהם ממש קרובים לאתרי המחקר, באזור יחסית יבש מצד אחד ומופר מצד שני, יש קושי למינים אלה להתפשט ולהתבסס בבתי הגידול החדשים.

ג) סיכום ומסקנות

- הבריכות מאכלסות מינים רבים שמאפיינים בתי גידול מופרים. בשני הנחלים, בשתי עונות הדיגום ובכל שנות המחקר נמצאו בדרך כלל יותר מינים כאלה בבריכות מאשר בערוצים הטבעיים. לעתים קרובות גם חלקם היחסי של מינים אלה מתוך כלל המינים שזוהו בכל אזור דיגום היה גבוה יותר בבריכות בהשוואה לערוצים.
- בין המינים המאפיינים בתי גידול מופרים נמצאו גם מינים גרים/פולשים שחלקם היחסי היה גדול יותר בקיץ עם מגמה מסוימת של עליה, לפחות בעונת קיץ.
- צמחים אלה של בתי גידול מופרים בכלל ומינים גרים/פולשים בפרט מגיעים כנראה מהשטחים המופרים, חקלאיים ומיושבים, שסביב הערוצים. אך למעשה גם הבריכות עלולות להיות מקור למינים של בתי גידול מופרים כמו גם של מינים פולשים שחודרים משם, כאבני קפיצה, לאזורים הטבעיים של הנחלים.
- הבריכות מאכלסות גם מינים רבים המאפיינים בעיקר בתי גידול טבעיים, בעיקר באביב, כאשר נמצאה מגמת עליה במספרם ובחלקם היחסי לאורך שלוש שנות המחקר.
- בחלקים שונים של הבריכות והערוצים שנדגמו נמצאה מגמה כללית של עליה במספר המינים חובבי בתי גידול טבעיים לאורך שנות המחקר. מגמה דומה נמצאה גם לגבי מיני הצומח המאפיינים בתי גידול מופרים, אך לגבי מגמה זו התקבלו תוצאות סותרות באופן חלקי בשתי שיטות הדיגום לגבי מורד הבריכות (אזור 'רטוב') ומרכזי הערוצים הטבעיים.
- בסקר הצומח נמצאו מעט מינים חובבי לחות, גם בערוצים וגם בבריכות, כאשר יותר מינים כאלה נמצאו בנחל יבנאל בהשוואה לנחל זורעים, ולא ניתן להצביע על מגמה במספרים שלהם לאורך שלוש שנות המחקר.
- עבודה בשתי שיטות דיגום – ריבועי דגימה באזורים שונים של הבריכות והערוץ הטבעי ורשימת מינים לאורך חתך – נתנה תמונה טובה במאמץ דיגום סביר של מצב בית הגידול על חלקיו השונים הנבדלים במידה רבה אלה מאלה. בעוד שיטת ריבועי הדיגום אפשרה אבחנה כמותית טובה בין חלקי הברכות (מספר מיקרו בתי גידול) ובינם לבין חלקי הערוצים, אך הייתה מוגבלת לעונת האביב בלבד (בגלל מאמץ דיגום יחסית גדול), שיטת רשימות מינים לאורך חתך באזור 'הרטוב' (מאמץ דיגום קטן) אפשרה לקבל תמונה מלאה יותר של השינוי בהרכב מיני הצומח בדגש על השפעת השיפור במשק המים בעקבות יצירת בית הגידול החדש. זאת בזכות הרזולוציה הגבוהה (נרשמו כל המינים שנראו לאורך החתך) והכיסוי העונתי הרחב (אביב וקיץ) שאפשר לזהות את רובם הגדול של המינים הגדלים באתרי המחקר.

- המחקר קצר מאוד מבחינה עתית, וגם אם סביר להניח שהשינוי המשמעותי בחברת הצומח (בייחוד זו של המינים החד-שנתיים) יתרחש סמוך לביצוע הפעולה ההנדסית, יש לעקוב גם בשנים הבאות כדי לזהות מגמות ארוכות טווח. בייחוד יש קושי לזהות בשנים ספורות מגמות ביחס לצמחים נדירים ו/או לכאלה המאפיינים בתי גידול לחים שההתבססות שלהם תלויה בקרבה למקור לזרעים (בית גידול לח טבעי אחר) ורבים מהם רגישים להפרעות. בתי גידול לחים טבעיים/מבוססים נמצאים לפחות כמה ק"מ מאתרי הדיגום שלנו. מצד שני, בסמוך לאתרי הדיגום ישנם שטחים חקלאיים (בריכות נחל יבנאל) או גם חקלאיים וגם מיושבים (בריכות נחל זורעים) שהם מקור לזרעים של מינים של שטחים מופרים, מיני תרבות ומינים פולשים ומתפרצים.
- כמו מפעלי ניקוז אחרים גם הבריכות בנחל יבנאל ובנחל זורעים נמצאות תחת טיפולי תחזוקה שונים, החל מנטיעות, עבור בתיקון מקומי של סוללות האדמה או בניקוי סחף שהצטבר לאורך השנים, וכלה בשיפוץ רחב היקף של המתקן בעקבות אירועי גשם משמעותיים שגורמים לנזקים גדולים למערכת (כפי שקרה לבריכות שבנחל זורעים בדצמבר 2023, כמה מהן התפרקו לגמרי בגלל הזרימה, ראה תמונות בנספח ו). כתוצאה מכך חלקים מהבריכות ומהסוללות המקיפות אותן עברו הפרעה משמעותית פעם אחת או יותר מאז שנוצרו, מה שמקשה על מינים רבים של צמחים להתבסס בבית הגידול החדש.

מסקנות והמלצות

תוצאות ומסקנות המחקר מספקות תשתית מקיפה לפיתוח סל כלים ופתרונות מבוססי טבע להתמודדות עם בעיות של נגר וסחיפת קרקע. להלן כמה תובנות מרכזיות, המלצות ושיקולים שיש לשקול בהתמודדות עם נגר וסחיפת קרקע בעזרת פתרונות מבוססי טבע. המסקנות מתבססות על העבודה שנעשתה בבקעת יבנאל ועל סקירת הספרות אך ניתן להיעזר בהן גם באגני היקוות מרובי שימושים אחרים באקלים ים-תיכוני.

א. סוגי פתרונות מבוססי טבע ועקרונות ליישום

- (1) פעולות הנדסיות משולבות בשיקום אקו-הידרולוגי:** חיקוי של מבנים נחליים טבעיים, כמו הגדלת הפיתוליות, הקמת סכרונים ובריכות וויסות, יש בהם כדי למתן נגר, להקטין סחיפת קרקע וליצור בתי גידול לחים שהם רגישים ונדירים בישראל. צומח טבעי או נטוע יכול לתרום לייצוב מערכות אלה, אותם ניתן לבסס בשטח בעזרת פיזור זרעים (של צמחייה חד-שנתית) או נטיעה (של שיחים או עצים) של מיני בר מתאימים בחלקים השונים של בית הגידול החדש.
- (2) הפחתת הקישוריות ההידרולוגית באמצעות תכנון מרחבי של שימושי הקרקע:** לסוג הקרקע ולשימושי/כיסוי הקרקע במרחב האגן תרומה דיפרנציאלית של נגר עלי בהתאם לתכונות ההידרולוגיות של הקרקעות ולמאפייני השימוש והכיסוי. לתפרוסת המרחבית של שימושים אלה השפעה על מימדי הקישוריות ההידרולוגית, וכתוצאה מכך גם על הנגר והסחף באגן. באמצעות תכנון מרחבי של שימושי קרקע ושל הממשק/כיסוי בכל שימוש שכזה ניתן לצמצם את הקישוריות ולמתן את נפחי הזרימה המגיעים למערכת האפיק.
- (3) שיקום ושמירה על בתי גידול לחים:** בתי גידול לחים לאורך ערוצי הזרימה הטבעיים, בדגש על הצומח המאכלס אותם, מתפקדים כמערכות טבעיות של וויסות זרימה והשהיית נגר, של לכידת סחף ושל סינון מזהמים, תוך תרומה למגוון הביולוגי המקומי. צמחית גדות עבותה בקרבת ערוצי הנחלים עשויה למתן באופן משמעותי את זרימת הנגר העלי, להגביר חידור של מים לקרקע ולהעלות את קצב ההתאדות.
- (4) הרחבת אזורי חיץ ושיקום אקולוגי:** שמירה על אזורי חיץ רחבים ככל האפשר סביב לערוצים ולמתקני ה-NbS, וכן בין שטחים חקלאיים ובינם לבין ערוצי הנחלים. שטחי חיץ כאלה הנמצאים בין שטחים חקלאיים בניצב לכיוון השיפוע יכולים לספוג זרימה מדרונית היוצאת מהשטח החקלאי שנמצא במעלה ולהקטין את הסיכוי שהיא תגיע לשטח החקלאי שבמורד ותתרום לנגר עלי וסחיפת קרקע מוגברים בתחתית המדרון. ככלל, שילוב של צמחייה טבעית או נטועה באזורים רגישים (תורמי נגר, אזורי חיץ, קרקעות אטימות וכד') עשוי לסייע במיתון הקישוריות ההידרולוגית, לצמצם ולהאט את הנגר העלי, להגביר את החידור לקרקע ולאפשר תנאים שיקטינו את ספיקות השיא. לפעולות אלה יכולה להיות תרומה משמעותית גם אם הן לכאורה קטנות ומקומיות.
- (5) קידום שיטות של חקלאות מקיימת:** יישום פרקטיקות חקלאיות, כמו חקלאות משמרת, שמבוססות על כיסוי הקרקע בחומר צמחי, שמירת לחות בקרקע, צמצום באינטנסיביות של עיבוד הקרקע והגדלת החידור, יועילו להפחתת נפח הזרימה ולהקטנת ספיקות השיא בערוצים שמנקזים את האזור המעובד. בנוסף, כיוון ששינויים עונתיים בכיסוי הצומח משפיעים על התגובה ההידרולוגית, ניהול נכון של הצמחייה

בשטחים החקלאיים (למשל, שימוש בצמחי כיסוי בראשית העונה) עשויים למתן במידה רבה את התגובה האגנית, בייחוד במהלך הגשמים הראשונים של החורף.

6) הרחבת שטחים חדירים למים: צמצום דרכים או פעילות חקלאית אינטנסיבית בסמוך לערוצים, לצד שימור ושיקום של שטחים חדירים בקרבה לכבישים ולאזורים בנויים, מסייעים למיתון הנגר במורד האגן.

ב. תכנון, מעקב וניטור

1) מיפוי מקדים ותכנון: כדי לתכנן נכון את הפתרון המתאים במקום המתאים יש חשיבות לביצוע מיפוי מפורט של השטח, בעיקר בהיבט ההידרולוגי אך גם בהיבט האקולוגי. זיהוי מדויק של שטחים התורמים וקולטים נגר ו/או סחף מהווה כלי חיוני לתכנון והטמעת פתרונות ממוקדים. בנוסף, התוכנית צריכה להתאים לתנאים הקיצוניים הצפויים בעתיד על-פי תחזית שינוי האקלים ועל-פי השינוי הצפוי בשימוש הקרקע, כדי שהפתרון יוכל להיות יעיל ובר-קיימא במינימום תחזוקה.

2) ממשק ותחזוקה לאורך זמן: לאחר ביצוע הפרויקט, יש להקטין למינימום את העבודות ההנדסיות, לפחות בשנים הראשונות, על-מנת להפריע כמה שפחות לשיקום/התאוששות של המערכת האקולוגית, שהיא כאמור חלק משמעותי בכל פתרון כזה ותורמת להיותו בר-קיימא.

3) ניטור אקו-הידרולוגי: עבודת המחקר ותוצאותיה מדגישות את החשיבות של מערכי ניטור קבועים למדידה רציפה של משתנים אקולוגיים, הידרולוגיים ומטאורולוגיים, באמצעות כלי חישה מרחוק, תחנות מנטרות וסקרי שטח. מערכים אלה מאפשרים התאמה מדויקת של פעולות הממשק והשיקום בהתאם לתנאי האקלים, השטח והצומח המשתנים לאורך זמן. חשוב מאוד לבצע ניטור לאורך זמן של מצב הצומח ובמידת האפשר (בהינתן משאבים מתאימים) גם מדדים אביוטיים (כמו לחות קרקע, הרכב קרקע ומים) וכן את מצבן של קבוצות טקסונומיות אינדיקטיביות של בעלי חיים, כמו דו-חיים, פרוקי רגליים וחסרי חוליות. על-מנת להבין את המשמעויות והמגמות ארוכות הטווח של השינוי בבית הגידול עדיף שהניטור יימשך לאורך שנים (בשאיפה עד 10-15 שנה) על חשבון רציפות במועדי הניטור.

ג. שיתוף פעולה עם בעלי עניין: כיוון שהשטחים המשפיעים על בעיות של נגר וסחיפת קרקע או מושפעים מהם נמצאים מעבר (לעתים הרבה מעבר) למקומו המסוים של פתרון מבוסס טבע, ההצלחה של יישום פתרון שכזה תלויה במידה רבה בשיתוף פעולה בין כל בעלי העניין בשטח. הסתכלות רחבה זו תואמת את הגישה של ניהול אינטגרטיבי של אגני היקוות, אשר בהיותה גישה הוליסטית גם בהיבט הפיזי-מרחבי וגם בהיבט האנושי-חברתי, היא מדגישה את הצורך בשיתוף פעולה בין בעלי עניין. בבקעת יבנאל, מלבד קק"ל, אלה בעיקר החקלאים, משרד החקלאות, רשות הניקוז והמועצות המקומיות והתושבים. במקומות אחרים יש חשיבות לערב גם בעלי קרקעות וגופים נוספים המנהלים שטחים פתוחים בתהליך התכנון והיישום של פתרון מבוסס טבע.

- Cronshey, R. G., Roberts, R. T., & Miller, N. (1985). Urban hydrology for small watersheds (TR-55 Rev.). In *Hydraulics and hydrology in the small computer age* (pp. 1268-1273). ASCE.
- Duarte, A. C. (2017). Vulnerability of Soil and Water in Mediterranean Agro-Forestry Systems. *Mediterranean Identities: Environment, Society, Culture*, 241.
- Ferreira, C. S. S., Keizer, J. J., Santos, L. M. B., Serpa, D., Silva, V., Cerqueira, M., ... & Abrantes, N. (2018). Runoff, sediment and nutrient exports from a Mediterranean vineyard under integrated production: An experiment at plot scale. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 256, 184-193.
- Grillone, G., Baiamonte, G., & D'Asaro, F. (2014). Empirical determination of the average annual runoff coefficient in the Mediterranean area. *American journal of Applied sciences*, 11(1), 89.
- Hamdan, A. N. A., Almuktar, S., & Scholz, M. (2021). Rainfall-Runoff Modeling Using the HEC-HMS Model for the Al-Adhaim River Catchment, Northern Iraq. *Hydrology*, 8(2), 58.
- Hawkins, R. H., Hjelmfelt Jr, A. T., & Zevenbergen, A. W. (1985). Runoff probability, storm depth, and curve numbers. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 111(4), 330-340.
- Hong, Y., & Adler, R. F. (2008). Estimation of global SCS curve numbers using satellite remote sensing and geospatial data. *International Journal of Remote Sensing*, 29(2), 471-477.
- Ibrahim-Bathis, K., & Ahmed, S. A. (2016). Rainfall-runoff modelling of Doddahalla watershed—an application of HEC-HMS and SCN-CN in ungauged agricultural watershed. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(3), 170.
- Mishra, S. K., & Singh, V. (2003). *Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology* (Vol. 42). Springer Science & Business Media.
- Rahi, A., Rahmati, M., Dari, J., & Morbidelli, R. (2023, May). Assessment of factors controlling the runoff coefficient in the Mediterranean context: a case study in central Italy. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (pp. EGU-6661).
- Rodríguez, B. C., Zuazo, V. H. D., Rodríguez, M. S., Sacristán, P. C., Ruiz, B. G., Carbonell-Bojollo, R., ... & García-Tejero, I. F. (2020). Soil and water conservation measures for mediterranean fruit crops in rainfed hillslopes. *Resources Use Efficiency in Agriculture*, 427-480.
- Serrano-Notivol, R., Martínez-Salvador, A., García-Lorenzo, R., Espín-Sánchez, D., & Conesa-García, C. (2022). Rainfall-runoff relationships at event scale in western Mediterranean ephemeral streams. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(5), 1243-1260.
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE). 2012. *HEC-HMS Hydrologic Modeling System, User's Manual, Version 4.0*, CPD-74A. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.

מסקירת הספרות

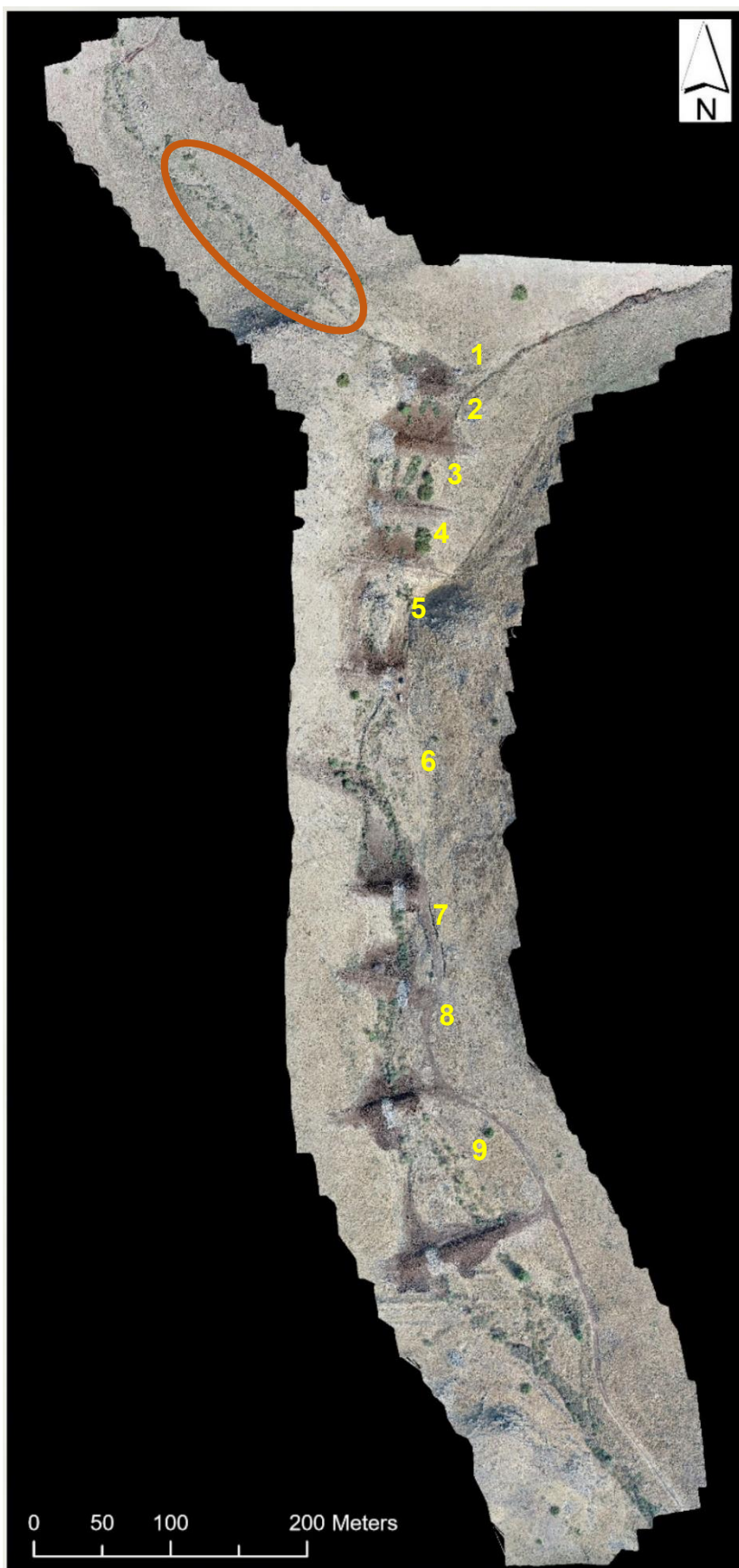
- אגוזי, ר. (2021). פתרונות מבוססי טבע - סל כלים לטובת ניהול סיכוני הצפה. *אקולוגיה וסביבה*, 12(3), 49–58.
- גפני, ש., פרמנט, ד., & גרוסברד, ש. (2018). המערכות האקולוגיות של מקווי מים פנים ארציים - הפרק המלא. מערכות אקולוגיות ורווחת האדם-הערכה לאומית. המארג.
- גרינבאום, נ., שלמון, ע., שיק, א. (2003). השלכות גאומורפולוגיות ויישומים הידרולוגיים של ניסויי חידור מדרוניים בסובב צחיח קיצון. אופקים בגאוגרפיה 57/58, 44–69.
- גרינצוויג, ז., & ארגמן, א. (2018). שירותי ויסות - הפרק המלא. מערכות אקולוגיות ורווחת האדם-הערכה לאומית. המארג.
- טרבלסי, ע. (לא ידוע). פרויקט שיקום נחל נהלל. נלקח מ- <https://nahalal.agma.org.il>
- מלקינסון, ד., צ'מנסקי, ד., & גרוסברד, ש. (2018). המערכות האקולוגיות של ערים ויישובים - הפרק המלא. מערכות אקולוגיות ורווחת האדם-הערכה לאומית. המארג.
- משה, א., ישראלי, ל., & דיין, ת. (2021). אסטרטגיות לשיפור ניהול נחלים ברמה אגנית. *אקולוגיה וסביבה*, 12(3), 59–66.
- סקוטלסקי, א., אוסטרובסקי, ג., & מרקל, ד. (2021). שיקום אקו-הידרולוגי של נחלים ומעיינות במקרקעי הייעור של קק"ל. *אקולוגיה וסביבה*, 12(3), 47–48.
- קפלן, מ. (2019). מסדרונות אקולוגיים בישראל - היבטים תכנוניים. *אקולוגיה וסביבה*, 10(1), 16–23.
- רומם, א., שיצר, ד., פורת, י., בנימיני, ד., ר. א. (2012). מורדות כנרת- יבנאל: סקר ניתוח והערכה של משאבי טבע, נוף ומורשת האדם. תל אביב.
- שגיא, י. (2019). נחלי ישראל: מערצי ניקוז זנחים ומזהמים לשיקום אקולוגי. *אקולוגיה וסביבה*, 10(3).
- Allen, J. R. . (1982). *Development In Sedimentology - 1*. New-York, Oxford: Elsevier.
- Andrikopoulou, T., Schielen, R. M. J., Spray, C. J., Schipper, C. A., & Blom, A. (2021). A framework to evaluate the SDG contribution of fluvial nature-based solutions. *Sustainability*, 13, 11320.
- Ben-David, R. (2003). *Changes in desert margin environments during the climate changes of the upper quaternary*. The Hebrew University of Jerusalem.
- de Mendonça, B. C. C., Mao, L., & Belletti, B. (2021). Spatial scale determines how the morphological diversity relates with river biological diversity. Evidence from a mountain river in the central Chilean Andes. *Geomorphology*, 372, 107447.
- Cohen-Shacham, E., Walters, G., Jamzen, C., & Maginnis, S. (Eds.). (2016). *Nature-based solutions to address global societal challenges*. Gland, Switzerland: IUCN.
- Eggermont, H., Balian, E., Azevedo, J. M. N., Beumer, V., Brodin, T., Claudet, J., Fady, B., Grube, M., Keune, H., Lamarque, P., Reuter, K., Smith, M., Van Ham, C., Weisser, W. W., & Le Roux, X. (2015). Nature-based solutions: New influence for environmental management and research in Europe. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*, 24(4), 243–248.
- Frank, S., Fürst, C., Witt, A., Koschke, L., & Makeschin, F. (2014). Making use of the ecosystem services concept in regional planning—trade-offs from reducing water erosion. *Landscape Ecology*, 29(8), 1377–1391.
- Imaizumi, F., & Sidle, R. C. (2012). Effect of forest harvesting on hydrogeomorphic processes in steep terrain of central Japan. *Geomorphology*, 170, 109–122.
- James, L. A. (2013). Impact of early agriculture and deforestation on geomorphic systems. In: J. C. Shroder (Ed.), *Treatise on Geomorphology, Vol. 13, Geomorphology of Human Disturbances, Climate Change, and Natural Hazards*, (pp. 48–67). San Diego: Academic Press.
- Kidron, G. J., & Yair, A. (2001). Runoff-induced sediment yield over dune slopes in the Negev desert. 1: Quantity and variability. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(5), 461–474.
- Lange, J., Greenbaum, N., Husary, S., Ghanem, M., Leibundgut, C., & Schick, A. P. (2003). Runoff generation from successive simulated rainfalls on a rocky, semi-arid, Mediterranean hillslope. *Hydrological Processes*, 17(2), 279–296.

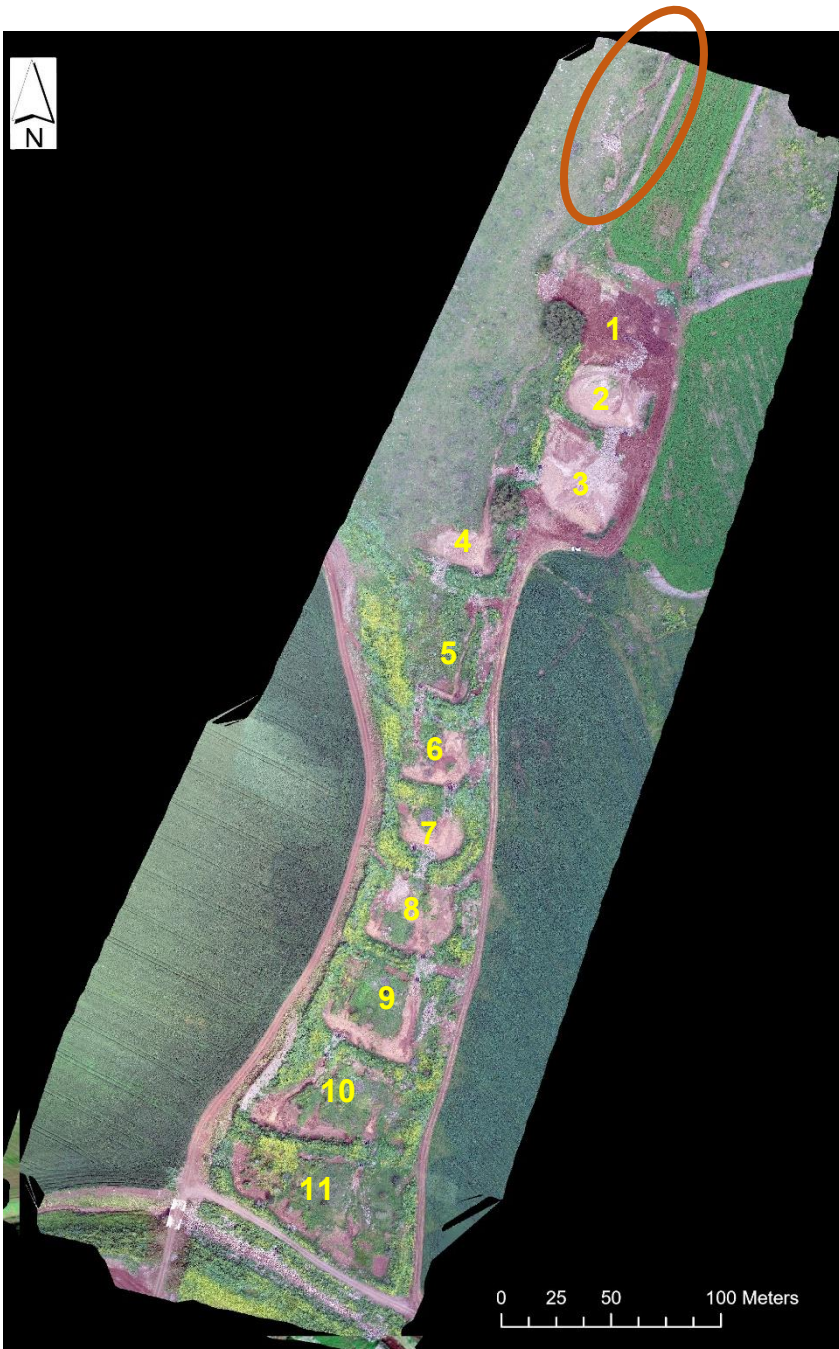
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S., L., Péan, C., Berger, S., & Zhou, B. (Eds.). (2021). IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Reid, I., & Frostick, L. . (2011). The Work of Water - Channel form, flows and sediments of endogenous ephemeral rivers in deserts. In D. S. G. Thomas (Ed.), *Arid Zone Geomorphology - Process, Form and Change in Drylands* (Third, pp. 301–333). New-Delhi: Wiley-Blackwell.
- Reid, L. M., & Dunne, T. (1984). Sediment production from forest road surfaces. *Water Resources Research*, 20(11), 1753–1761.
- Reid, L. M., & Dunne, T. (2016). Sediment budgets as an organizing framework in fluvial geomorphology. In G. M. Kondolf & H. Piegay (Eds.), *Tools in Fluvial Geomorphology* (pp. 357–380). Chichester: Wiley and Sons.
- Rhoads, B. L. (2020). *River Dynamics and Management*. (B. L. Rhoads, Ed.), *Cambridge University Press*. Cambridge University Press.
- Schumm, S. (1977). *The fluvial system*. New-York, London, Sydney, Toronto: John Wiley & Sons.
- Singer, A. (1970). WEATHERING PRODUCTS OF BASALT IN THE GALILEE. I. ROCK-SOIL INTERFACE WEATHERING. *Israel Journal of Chemistry*, 8, 459–468.
- Spyrou, C., Loupis, M., Charizopoulos, N., Apostolidou, I., Mentzafou, A., Varlas, G., ... & Kumar, P. (2021). Evaluating nature-based solution for flood reduction in spercheios river basin under current and future climate conditions. *Sustainability*, 13(7), 3885.
- Suedel, B. C., Amorim, R. S., Lauth, T. J., & Creech, C. T. (2022). Nature-based solutions for improving navigation reliability on the Madeira River, Brazil. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 18(1), 115–122.
- Turconi, L., Faccini, F., Marchese, A., Paliaga, G., Casazza, M., Vojinovic, Z., & Luino, F. (2020). Implementation of nature-based solutions for hydro-meteorological risk reduction in small mediterranean catchments: The case of Portofino Natural Regional Park, Italy. *Sustainability*, 12(3), 1240.
- Vidal-Abarca, M. R., Suárez-Alonso, M. L., Santos-Martín, F., Martín-López, B., Benayas, J., & Montes, C. (2014). Understanding complex links between fluvial ecosystems and social indicators in Spain: An ecosystem services approach. *Ecological Complexity*, 20, 1–10.
- Viles, H., & Coombes, M. (2022). Biogeomorphology in the Anthropocene: A hierarchical, traits-based approach. *Geomorphology*, 417(April), 108446.
- Yair, A., Goldshleger, N., & Shachar, Y. (2017). Hydropedology of a mildly-arid loess covered area, southern Israel. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(5), 781–788.
- Zandersen, M., Oddershede, J. S., Pedersen, A. B., Nielsen, H. Ø., & Tormansen, M. (2021). Nature Based Solutions for Climate Adaptation - Paying Farmers for Flood Control. *Ecological Economics*, 179, 106705.

נספחים

נספח א – תצלומי אוויר של בריכות ההשהיה בנחל יבנאל ובנחל זורעים

איור 1: צילום רחפן של בריכות ההשהיה/וויסות בנחל יבנאל. מספרי הבריכות מצוינים בצהוב (מימין לבריכה). הבריכות מנקזות תת-אגן קטן (מזרחי) ותת-אגן גדול (מערבי). אזור הדיגום של הערוץ הטבעי (בסניף המערבי) מסומן באליפסה חומה.



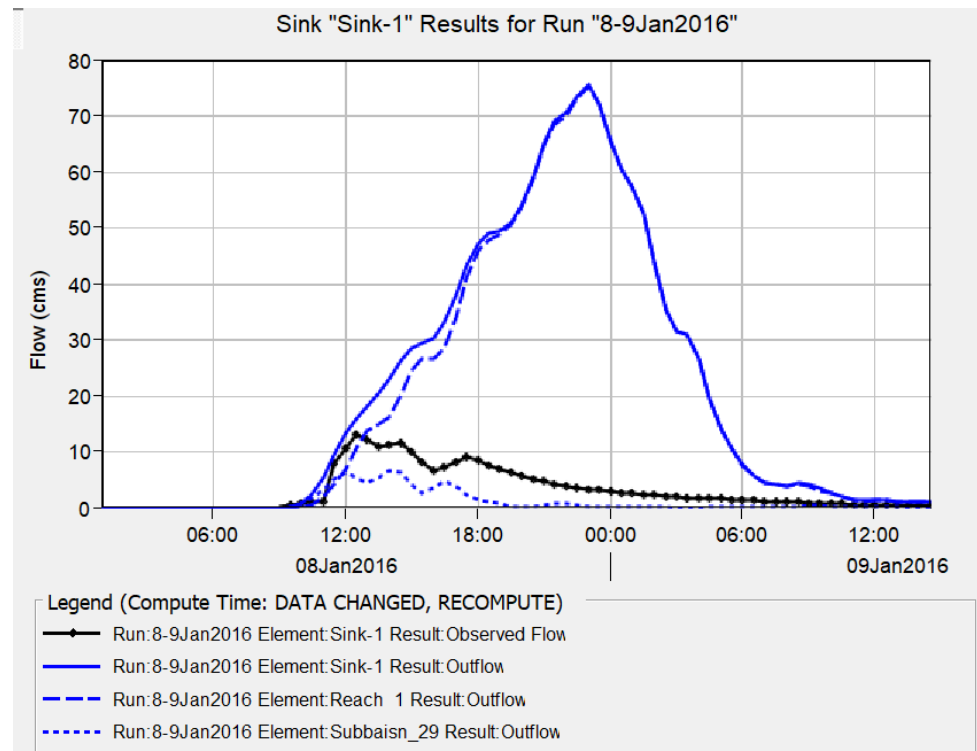


איור 2: צילום רחפן של בריכות ההשהיה/וויסות
 בנחל זורעים. מספרי הבריכות מצוינים בצהוב
 (בתוך הבריכה). אזור הדיגום של הערוץ הטבעי
 מסומן באליפסה חומה. ניתן לראות שהערוץ
 הטבעי ובריכות 1-3 גובלים בצידם המזרחי
 בשטחים חקלאיים (גד"ש). בריכות 4-11 גובלות
 בשטחים חקלאיים גם ממזרח וגם ממערב.
 הצילום מפברואר 2021 – נראים בבירור האזורים
 שמים עומדים/זורמים בהם במהלך החורף והם
 מעוטי צמחיה.

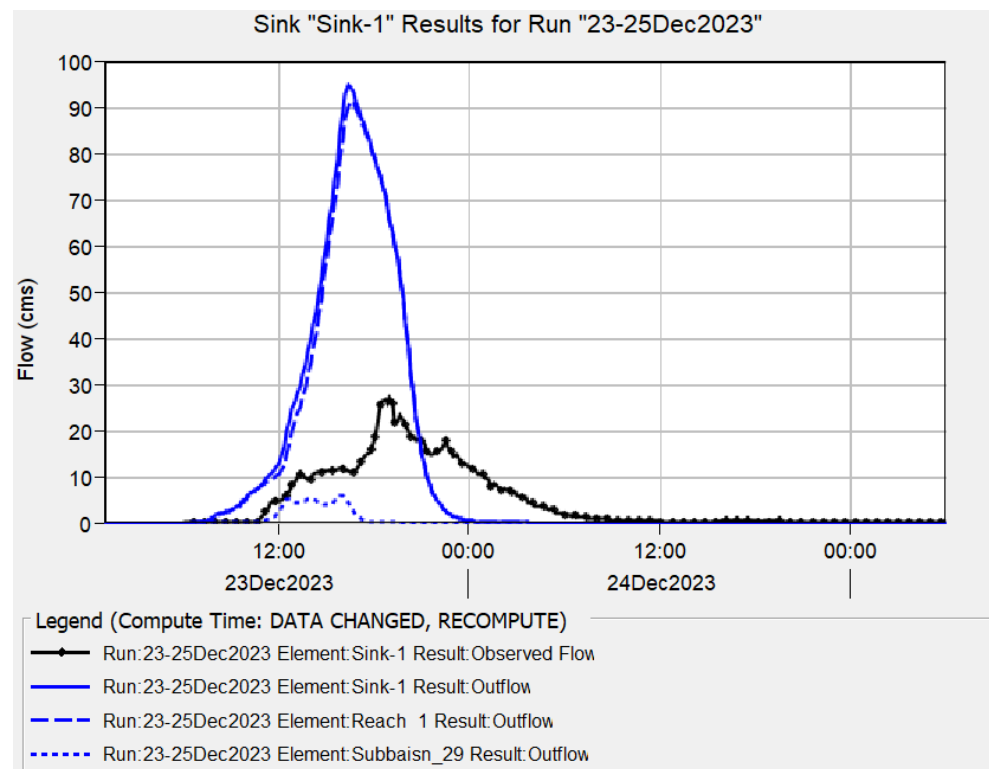
נספח ב – הקבוצות ההידרולוגיות של קרקעות באזור המחקר

קבוצה	מרקם אופייני	סוג קרקע
D	חרסית/ חרסית סילטית	טרה רוסה
C-D	חרסית/סיין חרסיתי/סיין	טרה רוסה ורנדזינה
D	חרסית	טרה רוסה אדומה
D	חרסית	גרומוסול חום; קרקעות קולוביות-אלוביות אדומות וטרה רוסה
C-D	חרסית	קרקעות קולוביות- אלוביות ורנדזינה
C-D	חרסית	גרומוסול חום ורנדזינה חומה
C	סיין חרסיתי/סיין סילטי	רנדזינה בהירה
D	חרסית	פרוטוגרומוסול בזלתי
D	חרסית	גרומוסול חום שחרחר בזלתי ופרוטוגרומוסול בזלתי
D	חרסית	גרומוסול חום אדום בזלתי ופרוטוגרומוסול בזלתי
D	חרסית	גרומוסול חום אלובי
D	חרסית	גרומוסול חום שחרחר בזלתי
A	חול סיני	נזז צרורי חרסיתי וחמרה חומה צרורית חרסיתית
D	חרסית	גרומוסול חום וחום -אדום אקומולטיבי (על גבעות) מכיל גיר
D	חרסית	גרומוסול הידרומורפי וגלי גרומוסולי
D	חרסית	קרקעות קולוביות-אלוביות וגרומוסול
C	תלוי מרקם	קרקעות אורגניות
D	חרסית	גרומוסול חום שחרחר בזלתי וגרומוסול חום
D	חרסית	סירוזיום גירניים

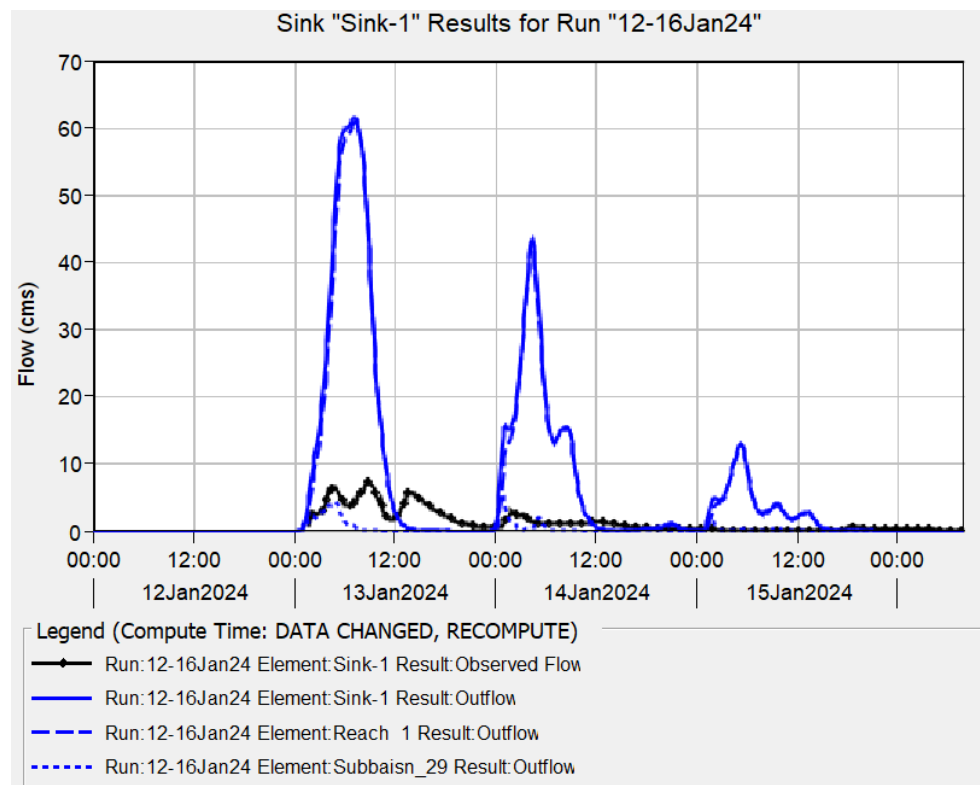
נספח ג – פלטים גרפיים של מודל HEC-HMS עבור אירועי הגשם שנבחנו



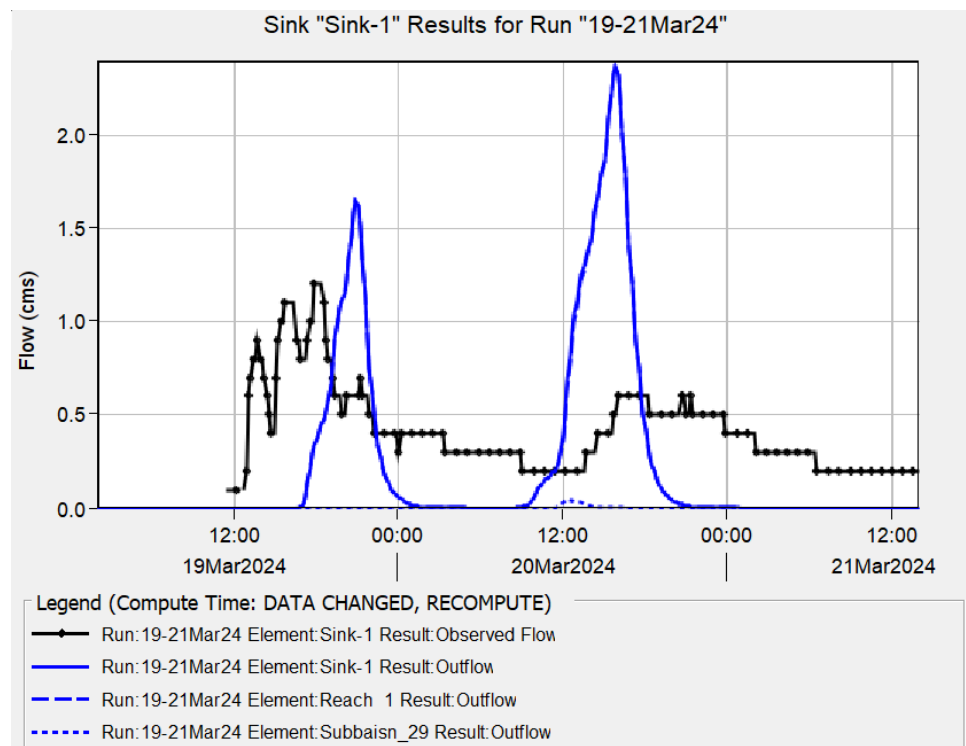
פלט 1: המודל המחושב (computed) ונצפה (observed) עבור אירוע גשם 8-9.1.2016



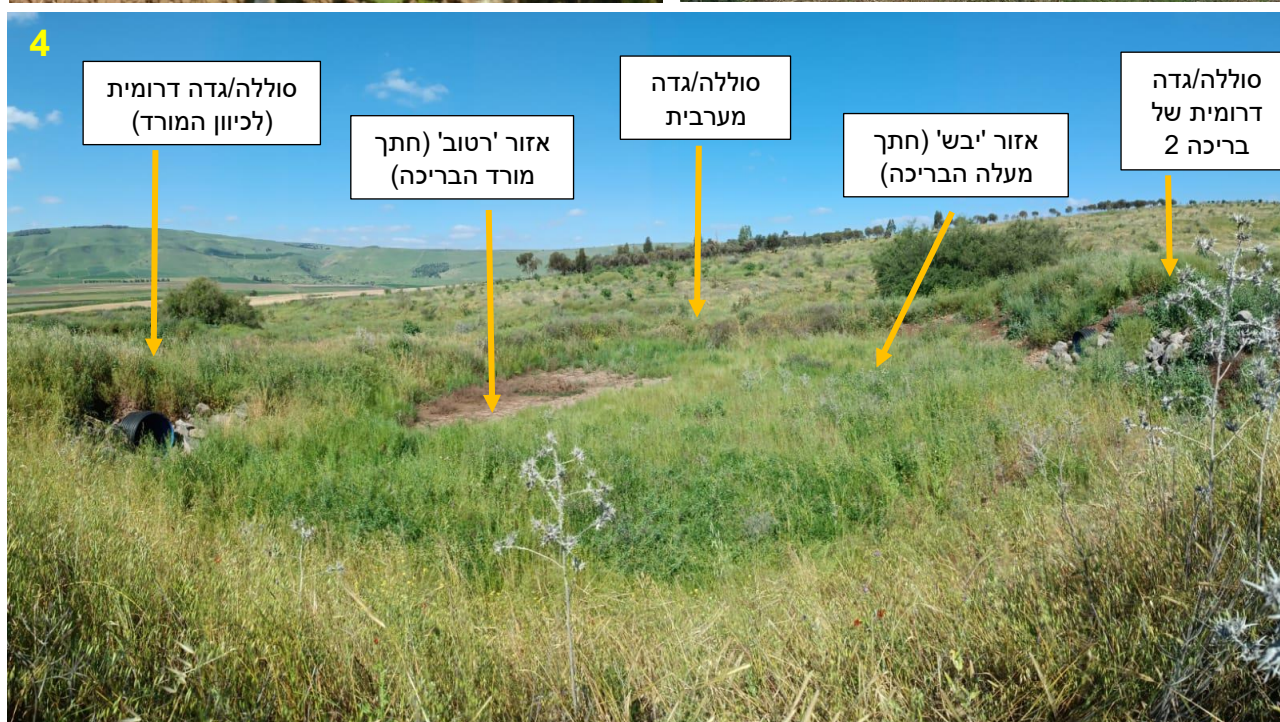
פלט 2: המודל המחושב (computed) ונצפה (observed) עבור אירוע גשם 23-25.12.2023



פלט 3: המודל המחושב (computed) ונצפה (observed) עבור אירוע גשם 12-16.1.2024



פלט 4: המודל המחושב (computed) ונצפה (observed) עבור אירוע גשם 19-21.3.2024



תמונות: 1: חתך + ריבוע דגימה במורד בריכה. 2: בריכה 1 (העליונה) בנחל זורעים, עדיין מוצפת בסוף אפריל (לכיוון המורד) סוללה/גדה דרומית (2021). 3: בריכה 8 בנחל יבנאל, משמאל גדה/סוללה דרומית, במרכז האזור 'הרטוב' (מורד הבריכה), מימין תחילתו של האזור 'היבש' (מעלה הבריכה). 4: בריכה 3 בנחל זורעים.

נספח ה – רשימת כלל מיני הצומח שזוהו* בסקר צומח אביב וקיץ 2021-2023

אגמון ימי	בת-חלמית שרועה	חטוטרת מצוי	כף-זאב אירופית	עולש מצוי	רב-פרי מצוי
אזנב מצוי	גדילן מצוי	חיטה תרבותית	כרובלת מצויה	עוקץ-עקרב אירופי	רגלת הגינה
איטן מרצעני	גודינה שבירה	חיטת הבר	כרובלת קטנה	עוקץ-עקרב אפור	שברק דביק
איסטיס מצוי	גומא ב.מ.**	חלבולב זוחל	כרוב שחור	עוקץ-עקרב שעיר	שברק משובל
אלה אטלנטית (נטועה)	גומא הפקעות	חלבולב מצוי	כשות ב.מ.	עוקץ-עקרב שרוע	שומר פשוט
אליסון מצוי	גזיר דקיק	חלבולב נטוי	לוטוס מצוי	עוקצר מצוי	שחליל שרוע
אמיתת גדולה	גזר קיפח	חלבולב פושט	לוליינית מעובה	עטיינית קצרה	שיבולת שועל נפוצה
אספסת הגליל	גלונית מצויה	חלמית ב.מ.	לחך בלוטי	עכובית הגלגל	שיזף מצוי
אספסת החבית	גלימה גלילית (או דק-זנב קשתני)	חלמית מצויה	לכיד הנחלים	עכנאי נאה	שיח אברהם מצוי
אספסת הכתרים	גרגיר נחלים	חלמית קטנת-פרחים	לפתית מצויה	עפעפית הקנקנות	שלמון יפואי
אספסת מצויה	גרניון רך	חנק מחודד	לשישית הצבעים	עפעפית שרועה/הקנקנות	שעורה תרבותית
אספסת משוזרת	דבקה זיפנית	חסה רותמית	מוצית קוצנית	פספולן ב.מ.	שעורת הבולבוסין
אספסת עדשתית	דבקת האפונים	חסת המצפן	מלוח דיוויס	פרג סורי	שעורת החוף (כולל שעורה נימית)
אספסת קעורה	דבקת יהודה	חפורית הפקעים	מלעניאל מצוי	פרע מסולסל	שעורת העכבר
אפרורית מצויה	דבשה ב.מ.	חפורית מוזרה	מסוריים מצויים	פרעושי ערבית	שעורת התבור
ארבע-כנפות מצויות	דבשה חרוצה	חפורית מצויה	מסרק מזרחי	פשתנית ב.מ.	שעלב מצוי
ארכובית הציפורים	דגנין בירותי	חפורית קטנה	מעוג כרתי	פשתת המכבד	שפרירה קשקשנית
ארכובית חד-שנתית	דגנין גמוד	חרדל השדה	מעוג מנוקד/אפיל	צורית בלוטית	שרעול שעיר
ארכובית שבטבטית	דוחנית השלחין	חרדל לבן	מקור-חסידיה חלמית	ציפורני-חנות מצויות	תגית מצויה
אשבל מעורק	דוחנית השלחין/התרנגולים	חרחבינה מכחילה	מרגנית השדה	צלבית ארוכת-שיבולת	תועלנית דוקרנית
בוען מצולע	דורה רותמית	טופח גדול	מרור הגינות	צללית ב.מ.	תורמוס הרים
בוצין מזרחי	דורת ארם-צובה	טופח ירושלים	מרקולית מצויה	צלע-שור חרוזה	תלתן אלכסנדרוני
ביקיה ארץ-ישראלית	דטורה אכזרית	טיין דביק	מררית הגליל	צלע-שור קטנה	תלתן ארגמן
ביקיה שעירה	דל-קרניים כרמלי	טיין חריף	מררית מצויה	צלף קוצני	תלתן האל-מוות
ביקיה תרבותית	דלעת הנחש המצויה	טרשנית שרועה	נורית המלל	צלף קוצני/סיצילי	תלתן הארגמן
בן-דוחן מדברי	דרדר מצוי	יבילית מצויה	ניסנית זיפנית	צנון משתלשל	תלתן הכדורים
בן-חיטה ביצני	הגה מצוי	יבנטו השדה	נרית הקמה	צנון פגיוני	תלתן המגן
בן-חיטה רב-אנפין	זון אשון	ירבז גדות/פלמר	נענע משובלת	קוטב מצוי	תלתן הקצף
בקבוקון מקומט	זמזומית מצויה	ירבז ירוק-שיבולת	סבנית השדות	קורטם מכחיל	תלתן ווילוב
בר-גביע חלק/קוצני	זנב-שועל ב.מ.	ירבז ירוק שיבולת/מופשל	סולנום המקור	קחון ב.מ.	תלתן חקלאי
ברומית איזמלנית	זנב-שועל מצוי	ירבז לבן	סולנום שחור/שעיר	קייצת מלבינה	תלתן כוכבני
ברומית גדולה	זקן-סב מצוי	ירבז עדין	סולנום שעיר	קייצת מסולסלת	תלתן לביד
ברומית דו-אבקנית	זקן שעיר	ירבז שרוע	סיסן אשון	קייצת קנדית	תלתן נאה
ברומית הגגות	חבלבל המשי	כותלית פורטוגלית	סיסנית הגינות	קיפודן מצוי	תלתן צמיר
ברומית המטאטא	חבלבל השדה	כילנית מצויה	סלסילה מצויה	קיצנית כרתית	תלתן קלז
ברומית זנב-שועל	חבלבל השיח	כף-אוזן האשפות	סלסילה מצויה/הכרמל	קיצנית צפופת-עלים	תלתן רפה
ברומית ספרדית	חבלבל סורי	כף-אוזן הגינות	סלק מצוי	קיקיון מצוי	תלתן תריסני
ברומית עקרה	חבלבל שעיר	כף-אוזן לבנה	סרפד הכדורים	קנה מצוי	רב-פרי מצוי
ברומית קצרת שיבולת	חוח עקוד	כף-אוזן מבאישה	עבדקן מצוי	קנה מצוי/עבקנה שכיח	רגלת הגינה
ברקן סורי	חומעה יפה	כף-אוזן פולש	עבדקן מצוי/החוף	קרה מכסיפה	שברק דביק

* ברשימה מופיעים רק צמחים שזוהו ברמת הסוג ומעלה, צמחים נוספים (ללא פריחה או זרעים, בעיקר נבטים) שזוהו ברמת המשפחה ומטה נמצאים ברשימות שלנו ולא הוכנסו לרשימה המסכמת ולניתוח.

** ב.מ. = בלתי מזוהה

נספח ו – תמונות מאירוע גשם של 23.12.23, שבעקבותיו התפרקו הבריכות בנחל זורעים

(צילומים: דני לסקה)



מבט לכיוון צפון, ממורד הבריכות לעבר המעלה.



מבט לכיוון דרום-מערב, ממעלה הבריכות לעבר המורד.