

שיקום מורכבות מבנית של ערוצי נחלים

האצת תהליך השיקום הטבעי בנחלים חקלאיים
באמצעות התקנת מתקני עץ נקבוביים



מחבר:

ד"ר רועי אגוזי, התחנה לחקר הסחף, החטיבה לניהול משאבי סביבה, משרד החקלאות ופיתוח הכפר
regozi@moag.gov.il

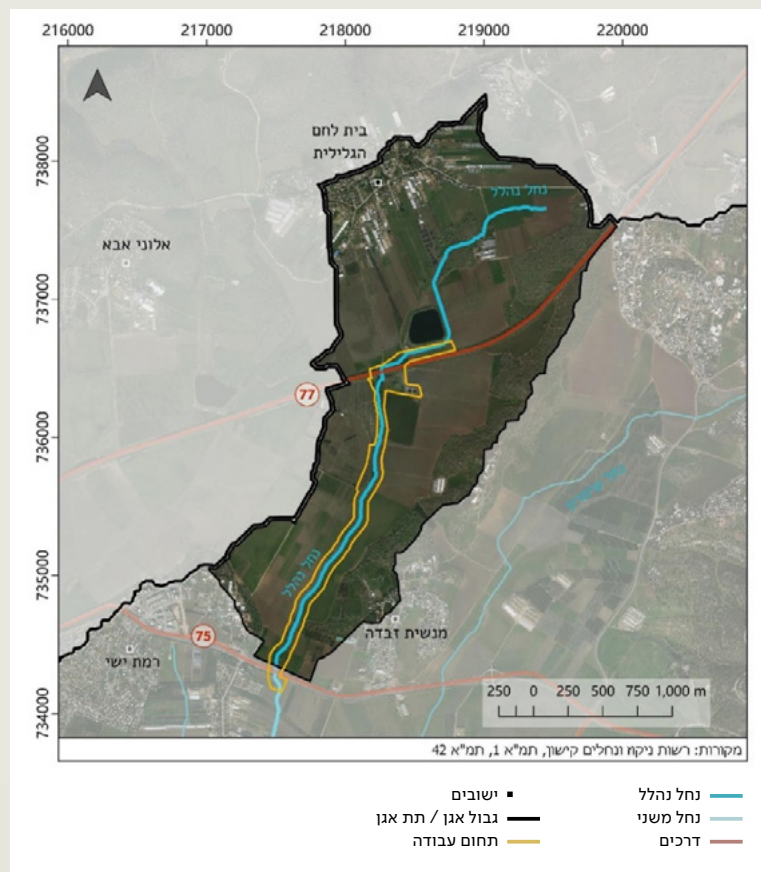
הפרויקט לשיקום מעלה נחל נהלל הוא פרויקט הדגמה המתמקד ביחסי הגומלין בין סביבת הנחל (מסדרון הנחל: אפיק, גדות, רצועות חיץ, פשטי הצפה) לסביבה החקלאית (שטחים פתוחים בעיבוד חקלאי ו/או ברעייה), ובמילים אחרות - הקשרים שבין שתי המערכות האקולוגיות השוכנות זו לצד זו. באופן כללי, כאשר המערכת החקלאית (מערכת אגרו-אקולוגית) מנוהלת על פי ממשקי עיבוד של חקלאות בת-קיימא, כלומר משמרת ומחדשת את משאבי הטבע, המערכת הנחלית (המערכת האקו-הידרומורפולוגית) מצליחה לממלא את תפקידה כספקית של שירותי מערכת טוב יותר. באותו אופן, כאשר ממשק הניהול של המערכת הנחלית משמר את התפקודים הטבעיים שלה, מצב המערכת החקלאית הסמוכה טוב יותר בהיבטים של הצפות, משטר המים בקרקע, דחיקה וריסון של צמחייה פולשת ומתפרצת, חרקים מזיקים ומועילים.

אלא שבישראל מרבית המערכות הנחליות בסביבה חקלאית מדורדרות ותפקודן ירוד. כדי לקדם את שיקומם של הנחלים יש לתת מענה בשני היבטים - שטח ומים. בראשון, הכוונה להרחבת מסדרון הנחל ובשני הכוונה לשחרור מקורות מים טבעיים לטובת שיקום משטר הזרימה. כדי להאיץ את תהליך השיקום ננקטות שתי גישות עיקריות: האחת, עיצוב ופיתוח נופי-אדריכלי של מורפולוגיית האפיק והגדות. בגישה זו מבוצעות עבודות עפר נרחבות באמצעות כלים כבדים, אשר לעיתים קרובות פוגעות בערכי הטבע ובבתי הגידול הטבעיים הקיימים, ובכך מופר העיקרון של "to do no harm" בשיקום מערכות אקולוגיות (Palmer et al., 2005). הגישה השנייה היא חידוש ועידוד תהליכי השיקום טבעיים של עיצוב גאומורפולוגי של האפיק והגדות. בגישה זו אנו מכוונים להאצת תהליכי השיקום באמצעות רתימת האנרגיה של זרימת המים (flow stream power) ויצירת תנאי זרימה משתנים, למשל האצה וריכוז של הזרימה ומנגד האטה, פיזור והשהיה של זרימת המים באפיק (Wheaton et al., 2019; Williams et al., 2020). גישה זו אומצה בפרויקט שיקום מעלה נחל נהלל (לראשונה בישראל). במסגרת הפרויקט הותקנו סכרונים עץ נקבוביים (leaky woody dam, LWD; large woody structures, LWS), הממלאים את התפקיד של גזעים וענפים שנופלים ומתמוטטים בתהליכים טבעיים לתוך אפיק הנחל (large woody debris).

מדריך זה נכתב על בסיס הניסיון שנצבר בפרויקט שיקום מעלה נחל נהלל, אשר נמצא בתחומי משק המודל לחקלאות בת-קיימא במרכז מחקר נווה יער. משק המודל מקיים סביבה ייחודית שבה חקלאות אינטנסיבית ומערכות אקולוגיות חולקות אגן היקוות משותף, והוא משמש פלטפורמת

מחקר ייחודית לבחינת ממשקים שונים. כל הפעולות המוצגות במדריך נוסו במסגרת פרויקט זה. בשנת 2021 הוקמו במסגרת פרויקט השיקום מתקני עץ וסכרים מחלחים מעצי שקד שנכרתו מכרם שקדים סמוך. בשנת 2023 עובו מתקני העץ הקיימים ונבנו מתקנים נוספים מגזעי אלונים שהתייבשו לאחר שהועתקו ממקומם ולא נקלטו בהצלחה, ומענפי אקליפטוס שנגזמו במסגרת של גיזום בטיחותי.

בשנים 2021–2022 כמעט שלא היו זרימות בסיס וגאיות בנחל (כשתי גאיות בממוצע, עד 1.2 מקש"נ). בסוף שנת 2023 שוחררו מקורות המים הטבעיים לנחל. בעקבות כך מספר הגאיות עלה ב-200% וספיקת השיא גדלה פי 3, לערך של 3.6 מקש"נ. יתר על כן, בין הגאיות נמשכה זרימת בסיס ברציפות ברום ממוצע של 0.1 מטר, זאת בשונה משנים עברו שבהן לא הייתה זרימה רציפה.



איור 1. מיקום גיאוגרפי של פרויקט שיקום אגן ההיקוות של נחל נהלל

שימוש באמצעים רכים ליצירת מורכבות מבנית בנחלים (שיקום גאומורפולוגי)

הגישה המקובלת בפרויקטים רבים של שיקום נחלים היא עיצוב מקטע נחל מבוסס נוף, מבנה או צורה: פזרות, פיתוליות ("מיאנדר"), בריכות וטללות וכדומה. עיצוב מקטע הנחל נעשה על סמך שלושה פרמטרים עיקריים: (א) תנאי ייחוס, למשל שיפוע אורכי, פילוג גודל הגרגר, כמות סחף זמינה, קיומה של צמחייה או חורש גדות; (ב) חקירה היסטורית של הנוף ואגן ההיקוות, למשל פענוח תצלומי אוויר ישנים ותיאורי מסעות היסטוריים; (ג) השוואה לנחלים טבעיים שמורים עם מאפיינים פיזיוגרפיים (אקלים וליתולוגיה) דומים (Kondolf et al., 2001; Rosgen, 2006; Woelfle-Erskine et al., 2012).

בבסיס הגישה עומדת ההנחה שהמערכת הנחלית מצויה בתנאי שיווי משקל דינמיים, כלומר ששטף הסדימנטים הנכנס למקטע הנחל זהה לשטף הסדימנטים היוצא ממנו לאורך זמן וכי פשטי ההצפה מוצפים באופן תדיר, למשל כל שנתיים או חמש שנים. בתנאים אלה השינויים המורפולוגיים יציבים לאורך זמן. אולם תנאים אלה לא מתקיימים באף מערכת נחלית ים-תיכונית בארץ ולכן פרויקטי שיקום נחל בגישה זו נדונים מראש לכישלון. חוסר ההבנה בגאומורפולוגיה דינמית עשוי להביא את המתכנן לייצב את הנחל בנראות מורפולוגית סטטית באמצעות שימוש בחומרים קשיחים כמו בולדרים ומסלעות. אף שחומרים אלו טבעיים במהותם, הם לא תמיד טבעיים לסביבת הנחל המשוקם. התערבות באמצעות שימוש בחומרים טבעיים דוגמת מסלעות אבן או דיפוני אבן קשיחים בפרופורציות מוגזמות ובחומרים שאינם טבעיים לסביבת הנחל פוגעת בתהליכי השיקום האקולוגיים (איור 2).

בסופו של תהליך ייצוב מורפולוגיית הנחל כנ"ל מקטע הנחל מתאפיין בחתך רחב המכונה בטעות על ידי היועץ (כגון מהנדס ניקוז, מתכנן סביבתי, הידרולוג, אקולוג או אדריכל נוף²) "חתך מורכב" או "חתך הטרוגני". למעשה, החתך המתקבל הוא חתך נחל "לא טרפזי"³, וכדי לשמרו נדרשות פעולות תחזוקה חוזרות ונשנות בדומה לחתך אפיק טרפזי (מוסדר). בפרויקטים מסוג זה הקבלן מטעמה של רשות הניקוז והנחלים מפעיל כלי עבודות עפר כבדים על מנת להגיע לאותה מורפולוגיית מטרה ולשמרה באמצעות פגיעה חוזרת, באפיק הנחל ובבית הגידול שבו.

1. הסיבה לכך, הנחיות התכנון לנחלים כפי שהופיעו בתמ"א 34/ב/3 וכיום בתמ"א 1/פרק הנחלים.
2. יועצים אלה אינם מומחים בגאומורפולוגיה דינמית של נחלים. מומלץ ליווי של גאומורפולוג מומחה בכל פרויקט של שיקום נחל (ראו פרטים ב-TOR בנושא צוות תכנון לפרויקטי שיקום נחלים באתר אגמא).
3. צורת החתך המקובלת בארץ בהסדרה הנדסית של אפיקי נחלים, ובמיוחד אפיקי נחלים חקלאיים – מטעמים של יעילות תחזוקת החתך לצורך שמירה על כושרי ההולכה לספיקות התכן (לרוב ספיקת שיא בהסתברות השגה של 10% להגנה על שטחים חקלאיים צמודי אפיק).



איור 2. מיקום : דוגמאות לשימוש לא פרופוציונלי בחומרים טבעיים לייצוב האפיק והגדות: שימוש בסלעים גדולים להגנה על בסיס הגדה ומורפולוגיה סטטית של חתך מורכב בנחל חרוד (שתי תמונות עליונות); ייצוב קשיח של הגדות באמצעות דיפוני אבן בגדות אפיק נחל אלכסנדר (תמונה מרכזית); שימוש במסלעות להגנת גדות נחל תנינים בשיפוע חד והנזק במרכז האפיק כאשר חלקים מהמסלעה מתמוטטים למרכז האפיק ויוצרים סביבם אזורי התחתרות (שתי תמונות תחתונות).

בשונה מהגישה הנ"ל, במעלה נחל נהלל נקטנו גישה של שיקום מבוסס תהליך של תפקודי הנחל (low-tech process based stream restoration; Wheaton et al., 2019). ההנחה בבסיס הגישה הזאת היא שהמערכת הנחלית היא מערכת מורכבת ודינאמית, המשתנה במרחב ובזמן. נתיב הזרימה והמורפולוגיה של האפיק זמניים, ועל כן הדגש בפעולות השיקום אינו על שחזור מדויק של נראות הנחל, אלא על שיקום של תפקודי הנחל, כגון הסעת משקעים (סדימנטים), סחיפה של הגדה, הולכת המים במהירויות משתנות והצפת שטחים וניקוזם. במילים אחרות, חידוש ושיקום של תהליכים פיסקליים, כימיים וביולוגיים (Beechie et al., 2010; Ciotti et al., 2021; Verdonschot et al., 2013), ובסופו של דבר להגביר את החוסן של המערכת האקולוגית ואת יכולתה לתחזק את עצמה לאורך זמן.

פעמים רבות די בביצוע פעולות להסרה או הפחתה משמעותית של ההשפעות האנתרופוגניות באגן ההיקוות ובאפיק הנחל לטובת האצת תהליך השיקום העצמי. זאת תוך הסתייעות במקורות האנרגיה של המערכת: אנרגיית זרימת המים להסעת המשקעים; אנרגיית השמש לתהליכי צימוח ויצירה של חומר אורגני (פוטוסינתיזה); ואנרגיה ביולוגית שמקורה בפעילות של פירוק חומר אורגני ברמות הטרופיות השונות. התוצאה היא תהליך שיקום אקולוגי דינמי רב-מערכתי ללא כל התערבות (Beechie et al., 2010; Palmer et al. 2005). עם זאת, התהליך עשוי לארוך זמן רב, ולכן כדי לייעל ולהאיץ את תהליכי השיקום הטבעיים אפשר להשתמש בפעולות התערבות בעצמות נמוכה כגון נטיעות של עצים והתקנה של סכרי עץ מחלחלים.

מתקני או סכרוני עץ מחלחלים (הגדרה ויתרונות)

סכרוני עץ מחלחלים בנויים מחומר אורגני מעוצה: גזעים או ענפים בקוטר של 10 ס"מ ובאורך של מטר אחד לפחות. חומר אורגני מעוצה הוא חומר טבעי למערכות נחל באזורים מיוערים וחלק מהמורפולוגיה ומהאקולוגיה שלהן (Comiti et al., 2006; Gurnell et al., 2005; Whol et al., 2010). במערכות נחל פגועות ומדורדרות עושים שימוש יזום במתקני עץ, שהם סכרים נקבוביים (דולפים) באפיק ובגדות. השימוש במבני העץ נועד לצורך שיקום התפקודים הטבעיים של הנחל כגון: (א) השהיית והאטת זרימת המים במסדרון הנחל, שמעודדת איבודי תמסורת והעשרת מפלסי מים תהום גבוהים ומשפרת את מפל הלחות בגדות האפיק; (ב) זרימה מערבילית של המים סביב מבני העץ מסייעת בחימצון המים ושיפור איכותם; (ג) וויסות זרימות שיטפוניות בגלל חיספוס ומורכבות מבנית באפיק הנחל; (ד) האטה של זרימת המים מייצרת תנאים להשקעה של סדימנטים, ומנגד הגברה של מהירות הזרימה מעודדת הסעה של משקע, ובאופן כללי הגברת זמן השהייה של משקעים בשרטונות אפיק הנחל; (ה) יצירת מורפולוגיה מורכבת ומגוונת באפיק הנחל (בריכות, אשדות, פיתולים, ריבוי נתיבי זרימה); (ו) התפתחות של מגוון בתי גידול בהתאמה לתנאים הפיסיים השונים; (ז) אספקה של מצע מזון (חומר אורגני מעוצה) למפרקים (בסיס פירמידת המזון האקולוגית); (ח) יצירת אתרי מחסה והגנה לבעל חיים (חסרי חוליות וחולייתנים) מזרימות חזקות וטריפה, זמינות של מים לשתייה של חיות בר וציפורים וקיימות של מחזורי חיים בעבור דו-חיים וחרקים (Mott 2006; Treadwell et al., 2007).

נוסף על התרומה הישירה בתפקודי או מדדי המערכת האקולוגית בנחל, לסכרי עץ מחלחלים יש כמה יתרונות בשיפור הסביבה הפיסית באפיק הנחל על פני שימוש באמצעים קשיחים יותר: (א) יתרון הידרו-אקולוגי – הם שומרים על רציפות הזרימה של המים (עיקרון ה-free flow), כלומר הם לא יוצרים חסם ביולוגי לתנועה של בעלי חיים או למעבר של חומר גנטי; (ב) יתרון הידרו-גאומורפולוגי – הם מווסתים את משטר הזרימה, הסעת הסחף והצפת שטחים צמודי נחל (עיקרון ה-slow the flow); (ג) יתרון נופי – הם נטמעים בסביבה במהירות, חלקם לא ניתנים לזיהוי כבר לאחר שנה מיום התקנתם; (ד) יתרון מורפולוגי – משתנים במיקומם ובצורתם בהתאם לתנאים הסביבתיים ולמידת העיגון של המתקנים (מפורט בהמשך).

האתגר: שימוש בסכרוני עץ בשיקום נחלים בסביבה חקלאית

ההמלצה במדריך זה היא להשתמש באמצעים רכים – חומר מעוצה, גם אם אינו טבעי למערכת האקולוגית המדורדרת של נחל בסביבה חקלאית.

- השימוש בחומר מעוצה לשיקום אפיקי נחלים נשען על ההנחה שזהו חומר גלם הזמין באגני היקוות חקלאיים. מקור העצים הוא לרוב מטעים או פרדסים שמוחלפים (נעקרים) במסגרת תוכנית של החקלאי להחלפת זנים, הצערת המטע/פרדס או שינוי גידול בשטח המעובד (למשל, עקירת מטע מסיבה של חיסכון במים או מעבר לגידול רווחי יותר). כל אלה הן החלטות שהחקלאי מקבל באופן עצמאי וללא קשר לתהליך השיקום של הנחל. לפיכך יש להיות ערים להזדמנויות שכאלה, למפות במסגרת סקר מצב קיים את שימושי הקרקע החקלאיים ולפנות לחקלאים ישירות.

- לשימוש בעץ ממקור חקלאי יש יתרון נוסף והוא הפחתת כמות העץ שעוברת לתעשיית ההסקה והמפחמות, שלה השלכות בריאותיות וסביבתיות חמורות. עם זאת, יש להביא בחשבון את עלויות הכריתה ושינוע העצים לאפיק הנחל, מכיוון שלרוב כריתת העצים מבוצעת כעסקת חליפין שבה קבלן הכריתה מקבל את חומר הגלם המעוצה כתשלום לעבודתו. בנווה יער נכרת מטע עצי שקד בשטח של 70 דונם עם 25 עצים לדונם והעצים שבו שימשו חומר גלם לבניית המתקנים הראשוניים.

- לרוב מספר העצים הנדרש לתהליך השיקום נמוך ממספר העצים הזמין. לדוגמה, בנחל נהלל השתמשנו ב-150 עצי שקד מתוך כ-1,750 עצים. בדיעבד התברר כי יכולנו להשתמש בכמות כפולה, משום שהחשיבות של מתקני העץ הוא במספרם ובפריסה לאורך אפיק הנחל. יתרת חומר הגלם המעוצה יכולה לשמש לצרכים אחרים (במסגרת עידוד משקים חקלאיים לעבור לדפוסי התנהלות של כלכלה מעגלית): ריסוק העץ לחיפוי קרקע ושימוש בו בתהליך נטיעות עצי בר ברצועות חיץ (ראו מדריך לביסוס ושיקום רצועות חיץ). רסק העץ מסייע בדחיקת עשבים מקומיים מתפרצים או פולשים ובהתבססות של עצים צעירים לאחר נטיעתם. שימוש נוסף לרסק עץ הוא בתהליכי קומפוסטציה וטיהור מים (ביוריאקטור) במתקנים בקנה מידה של משק חקלאי (ראו פרטים באתר משק מודל לחקלאות בת קיימא: מיחזור פסולות חקלאיות).

שלבי העבודה

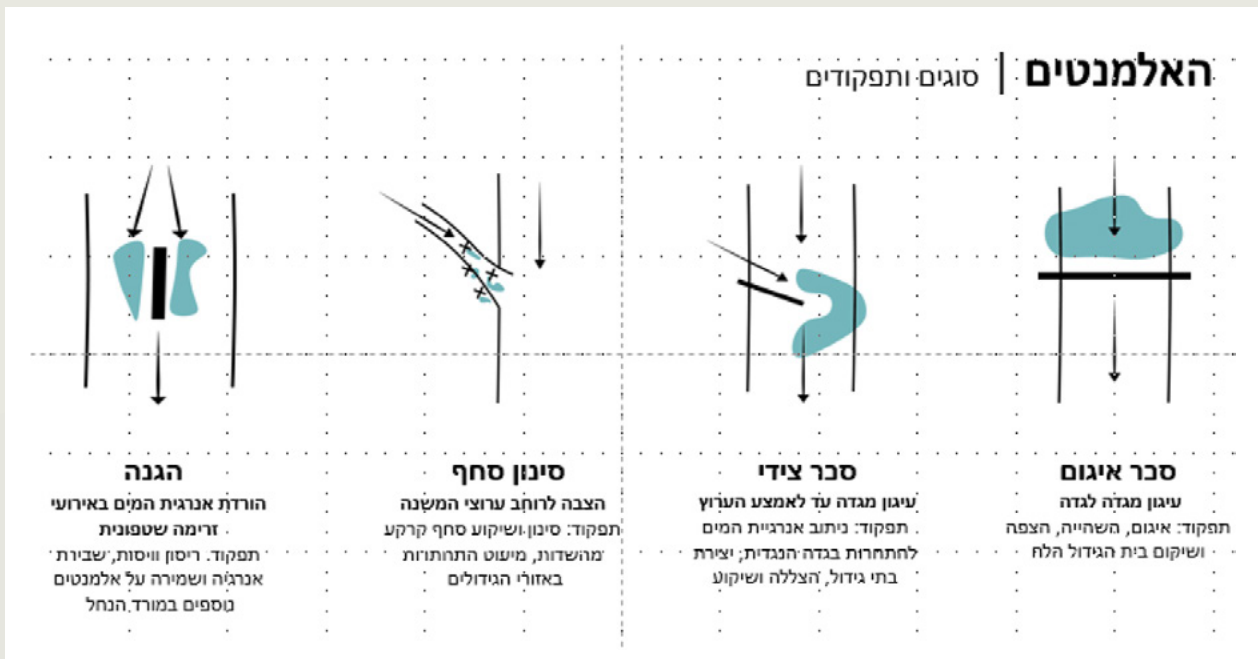
א. תכנון המתקנים - עצי השקד נמצאו מתאימים לאלמנטים המבוקשים. הבחנו בין ארבעה סוגי אלמנטים לתכנון (איור 3; טבלה 1):

- **סכר איגום:** סכרים מחלחלים (דולפים) הממוקמים לרוחב האפיק מגדה לגדה – סכרים עם נקבוביות משתנה, בהתאם לחומר האורגני הזמין. סכרים אלו נועדו לצורך השהיית המים וריסון הזרימה השיטפונית, הערמת המים לאחור והשקעה של סדימנטים. האלמנט מקובע בין גדות האפיק, והוא מאפשר זרימה רדודה של מי הבסיס ומעבר של בעלי חיים בתחתית. בזרימות גבוהות הסכר מטובע ואינו נראה לעין. הסכר יכול להיות מתוכנן גבוה – אם רוצים ליצור נפילה של מים, או נמוך – אם רוצים ליצור זרימה מדורגת ללא נפילה. הסכר מגדה אחת לשניה בניצב לכיוון לציר הזרימה באפיק יכול להיות ישר, קמור או קעור כדי ליצור תנאי זרימה שונים.

- **סכר צידי:** סכר חלקי שממוקם מגדת האפיק למרכז הזרימה – לרוב בנוי סביב בול עץ מרכזי המעוגן בגדה אחת ונטוי לכיוון מרכז האפיק, וזאת על מנת לעודד השקעה בצד החסוי של הזרם ולהאיץ התחתרות ופיתוליות בגדה הנגדית. האלמנט מקובע לקרקעית על מנת שלא יצוף וייסחף. בזרימות הבסיס הוא חשוף מעל פני המים. עשוי לשמש לצורך האצה של זרימת המים והכוונתה בכניסה של ערוצי צד (אז יותקן ברצועת החיץ).

- **סינון סחף:** סכר ערמה מוארך – מותקן בערוץ צד במקביל לאפיק המרכזי במטרה לעודד תהליכים של השקעת סחף מהשדות ברצועת החיץ (בניית גדה) במקום "סתומת" האפיק הראשי. הרעיון הוא של מעבר מוכוון של המים לאפיק המרכזי ללא הסחף, כדי ולעודד פעולות חתירה והסרה של סחף. סחף זה מושקע במורד ותורם ליצירת מורכבות מורפולוגית. התקנה של מספר מתקנים כאלה לאורך הערוץ מסייעת גם במיתון השיפוע האורכי ובמיתון אנרגיית ההסעה של המים.

- **הגנה:** התקנה של מכשול עץ שלם (שורש, גזע, ענפים) באמצע האפיק. המכשול משמש אלמנט חספוס אורכי המגביר את ההתנגדות במרכז הזרימה וגורם לפיצולה לשני נתיבים בצמוד לגדות האפיק. כתוצאה מפיצול הזרימה תיתכן הרחבה של האפיק והתחתרות בגדה אחת או בשניהן, בהתאם למידת החלוקה של הזרימה בין שני נתיבי הזרימה. תיתכן הגברה של אנרגיית הזרימה במורד נקודת המפגש של שני הנתיבים ויצירה של בריכה כתוצאה מהתחתרות מוגברת.



איור 3. סוגי האלמנטים שתוכננו להתקנה באפיק נחל נהלל (בהתקנה ניתן לשלב בין מספר אלמנטים ליצירת מבנה מורכב יותר)

טבלה 1. פירוט המתקנים, ייעודם ואופן העיגון שלהם (ניתן לשלב מספר מתקנים בהתאם למיקום על מנת להשיג כמה מטרות). ההתקנה עצמה מתבססת על תכנון שדה.

מיקום	מנח בנחל	דגם מתקן (תמונה #)	ייעוד/ מטרה
במקטעים שיש צורך לזוּסַת בהם את הזרימה	בניצב לכיוון הזרימה - ישר, קעור או קמור. עיגון באפיק ובגדות. עיגון פנימי באמצעות משקל האלמנט	סכר איגום	איגום, השחיה, הצפה ושיקום של בית הגידול הלח
במקטעים שנדרשת בהם הגברת הפיתוליות	עיגון מגדה לאמצע הערוץ. עיגון פנימי באמצעות "ריעוף" העצים זה על זה והצבת בולדרים בגדה'	סכר צידי	ניתוב אנרגיית המים להתחרות בגדה הנגדית
בכניסה של יובלי משנה	הצבה לרוחב ערוצי המשנה. עיגון באפיק ובגדה. עיגון פנימי באמצעות בולי עץ ניצבים מסורגים במתקן	סינון סחף	סינון והשקעה סחף מהשדות, צמצום התחרות באזורי הגידולים
במקומות שנדרשת בהם שבירת אנרגיה לצורך ריסון והגנה על מתקנים במורד	הצבה במרכז הערוץ עם כיוון הזרימה. עיגון באמצעות ענפים ניצבים למתקן לתוך תשתית האפיק	הגנה	ריסון, ויסות, שבירת אנרגיה ושמירה על אלמנטים נוספים במורד הנחל

4. במידה והתשתית גסת גרר ניתן לשלב חלוקי נחל ובולדרים במידות מתאימות לפילוג גודל הגרר בתשתית במתקן עצמו. במידה ומדובר בתשתית דקת גרר הכוונה לקבור את הבולדרים כמשקולות בתעלה שפוחתים כאשר מציבים את העצים כחלק מעיגון המתקן.

ב. סיור לאיתור מקור העץ – רצוי למצוא מקור בסמיכות לאפיק הנחל, וזאת כדי להוזיל את עלויות השינוע ולעשות שימוש בעץ מקומי המאפיין את השטח החקלאי. במקרה הנדון זוהתה הזדמנות במרכז המחקר נווה יער, שם תוכננה עקירה של מטע המשתרע על שטח של כ-70 דונם עם ממוצע של כ-25 עצים לדונם (איור 4). המטע בן 17 שנים ורובו (70%) עצי שקד מצוי מזן אום-אל-פחם.



איור 3. מפת כרם שקדים בנווה יער לפני כריתה. סימון העצים שהושארו על ידי הקבלן לכריתה וגיזום סלקטיבי לפי המאפיינים שהוגדרו בטבלה 2.

ג. אפיון וסימון עצים נדרשים – המטרה לאמוד את מספר התצורות של עצים הדרושים לנו לבניית כל אחד מהאלמנטים שיתוכננו ולבצע כריתה סלקטיבית מונחית של העצים הנדרשים לפרויקט + 20% (שימוש בלתי צפוי). מבנה העצים דומה: גוף השורש רדוד, מעוגל וללא שורש שיפודי, משום שהעץ מקבל את המים וחומרי ההזנה הדרושים לו דרך צנרת השקיה; גזע מרכזי קצר (50–120 ס"מ); קוטר ממוצע 28 ס"מ; התפצלות לענפים ראשיים מעל ההרכבה. יש עצים שבהם הפיצול שווה ויש להם 4–5 ענפים ראשיים, ויש עצים עם גזע וענף ראשי ישר (כ-3 מטרים גובה). נוסף להם יש ענפים בקטרים משתנים. הצוות התחלק לשלושה צוותי משנה והתפרס בשטח של כ-70 דונם במטרה לסמן 150 עצים מתאימים מתוך כ-1,750 עצים. לאחר הסבר קצר ע"י כאמל חטיב המטע מנווה יער, קיבלנו הנחיות כיצד להבחין בין שלושת זני השקד הגדלים בכרם השקדים (53, 54 ואום אלפאחם), ואיזה מהזנים עשוי להתאים לצרכים שלנו. שמנו דגש על עצים ללא מחלות ועל מאפיינים כמו מידת הפיצול של הענפים, נקודת הפיצול, אורך הקורה ועוד. כל צוות התמקד במבנה מסוים. העצים סומנו בספריי צבע בשליש התחתון של גזע העץ ובסרטי סימון מתאימים בענפים (איור 5, וטבלה 2).

טבלה 2. פירוט מספר העצים וחומר הגלם שיופק מהם למתקנים השונים על פי התכנון וסיור מקדים במטע. הבחנו בין עץ שלם, גזע+ענפים, בולי עץ וענפים. מיקום העצים מתואר באיור 4.

תמונה	הערות	סוג	צבע	מספור
	עץ שלם עם כריתה צידית של הצמרת	סוג א	אדום	1-20 (20 עצים)
	עצים בעלי פיצול למינימום 5 ענפים. כריתה בתחתית הגזע + ניקוי הענפים וגיזום בגובה 1.20 מהפיצול	סוג ב	צהוב	30-80 (50 עצים)
	סנדה ארוכה גזע כולל הענף המרכזי + גיזום הענפים המשניים באופן אלכסוני בזווית 10-20 מעלות וניקוי הענף + ערמת ענפונים קטנים	סוג ד	כחול	90-160 (70 עצים)



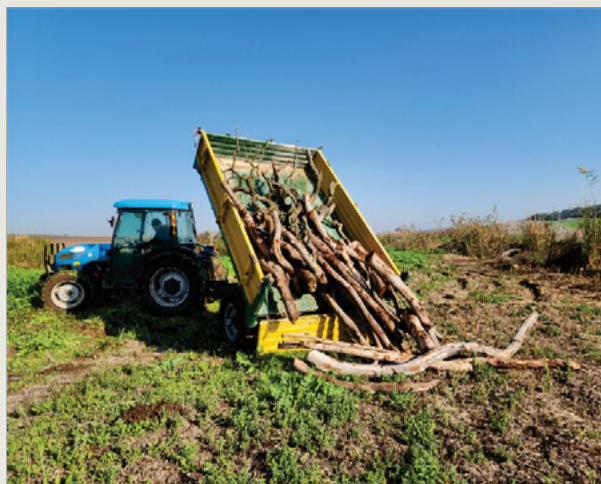
איור 5. סימון העצים טרם הכריתה לפי הסימונים המפורטים בטבלה 2. נמנענו מלסמן עצים חולים, שעשויים להיות מקור למזיק חיפושית קליפת השקד ולסכן את המטעים שבצמידות לנחל.

ד. כריתה סלקטיבית של העצים - פיקוח על הקבלן המבצע ווידוא שכל העצים המסומנים נכרתים, מוערמים ומובלים לאתר האחסון. כמו כן נגזמו ענפים וחלקי עץ בהתאם לתכנון המתקנים והכמויות הנדרשות (איור 6). השתמשנו בכול חלקי העץ.



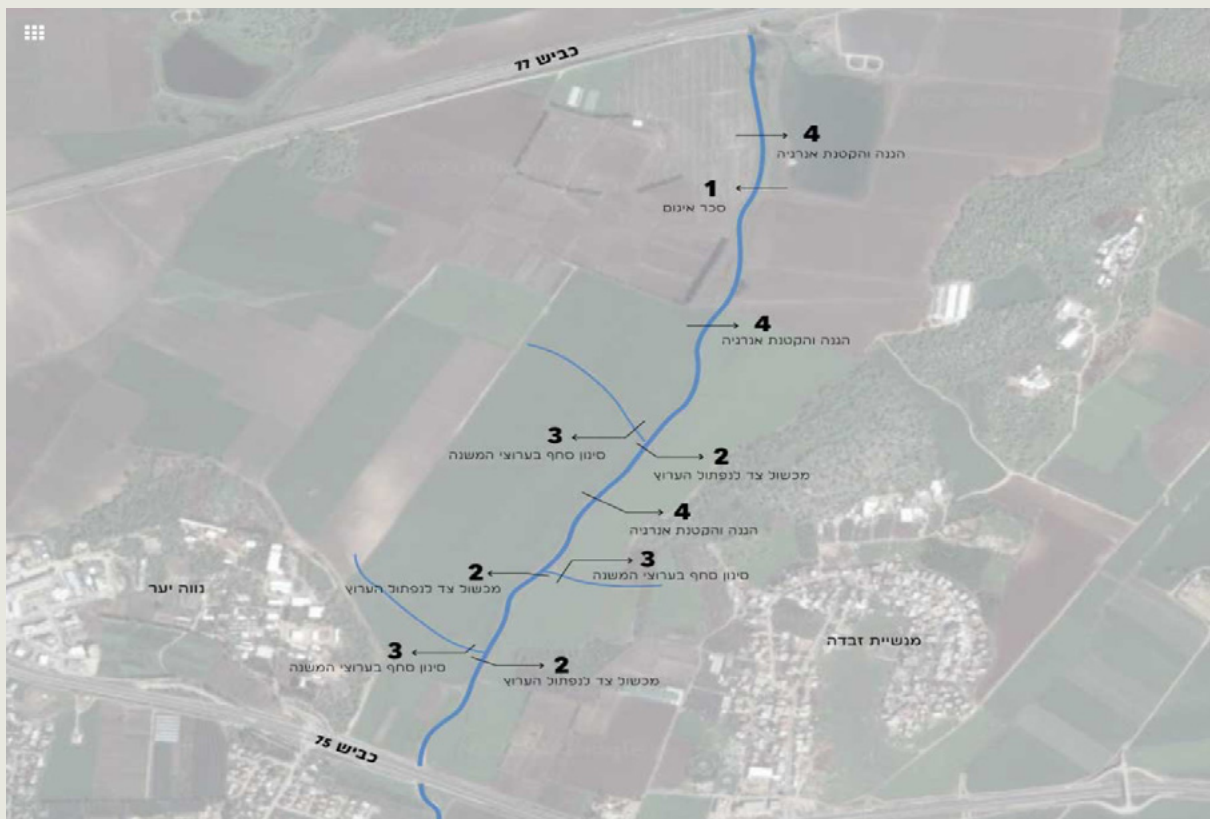
איור 6. מקור העצים הוא כרם שקדים שנכרת, גיזום בטיחותי של אקליפטוסים הנטועים לאורך האפיק ואלוני תבור שהעתקתם בשל פיתוח עתידי, כשלה, והם התייבשו.

ה. מיון ועירום העצים בסמיכות לנקודות ההתקנה - כדאי למיין את העצים על פי מאפייניהם ולערום אותם ברצועת החיץ בסמוך לאתרי ההתקנה שמופו מראש: כניסה של יובלי משנה, מקטעים להגברת הפיתוליות, מקטעים לאיגום מים לאחור וכדומה (איור 7,8).



איור 7. הובלת חומר הגלם בהתאם לאופיו: עץ שלם, גזעים וענפים. שימוש במנוף עם זרועה ארוכה לצורך הנחה במיקום מדויק.

ו. תכנון שדה והתקנה - ההתקנה בוצעה בעזרת מחפרון עם מחפר אחורי בשני גדלים. מכיוון שההתקנה לא סטדנרטית ודורשת דיוק והבנה של מטרת המתקן, יש לוודא שמפעיל המחפרון מיומן. כמו כן הסתייענו בפועל עם ידע בהפעלת מסור לצורך חיתוך העץ בשטח. הובלת העצים נעשתה על ידי משאית מנוף (יש להיזהר שלא לשבור את העצים במהלך הובלתם). הגזעים הכבדים הונחו בעזרת מנוף עם מפעיל מיומן (איור 7). העסקנו מחפרון או מיני מחפרון לטובת עבודת עפר מקומית ומדויקת בעיגון באפיק ובגדות (איור 9). מומלץ לבצע את ההתקנה בקיץ ולהימנע מכניסה לשטח שבו הקרקע רטובה על מנת להימנע מהשארת פסי דריכה ומהידוק של הקרקע.



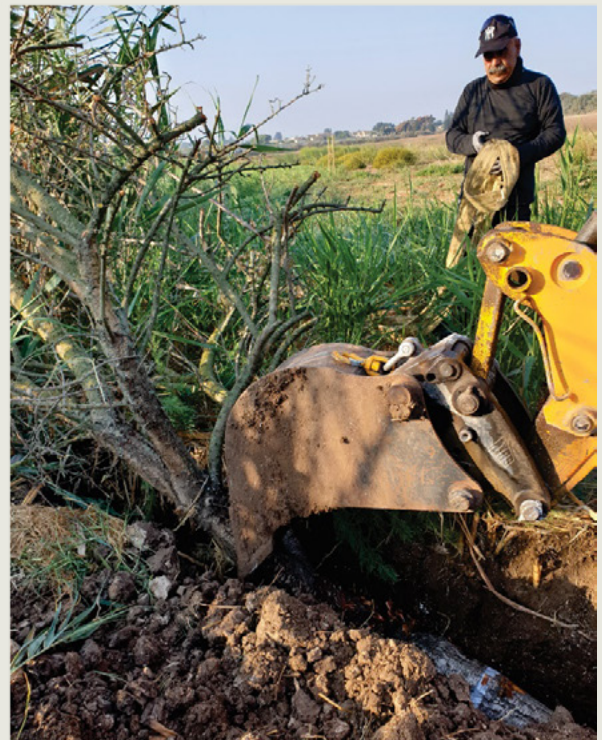
איור 8. תכנון מתקני עץ נקבוביים לאורך מעלה אפיק נחל נהל. המספרים מתייחסים למידע בטבלה 1.

ז. עיגון מתקנים בנחל - עיגון המתקן וחוזקו תלוי בכמה גורמים: (א) משקל הגזעים; (ב) ציפוף העצים - ציפוף העצים בצורה של רעפים עם כיוון הזרימה וסירוג הענפים מעניקים למבנה חוזק נוסף; (ג) עומק החפירה, הטמנה וכיסוי של חלק מהעץ בגדה אחת או בשניהם ובנוסף בשילוב בולדרים ו/או יתדות. הביצוע בפועל דורש חפירה של תעלה או בורות לעיגון העצים (1/3 מגובה / אורך העץ ישמש לעיגון). לעיתים קרובות לאחר שיטפון מתקן העץ הנקבובי יכול לזז וליצור מבנה מלוכד וחזק יותר. לאחר ההתקנה מומלץ שלא לגעת במתקן, עדיף להקים מתקן נוסף

במעלה או במורד המתקן הקיים אם רוצים להגביר את עמידות המתקן הקיים (איורים 9, 10).
 אפהמתקן כולו או חלקים ממנו מתפרקים ונסחפים, ייווצר מתקן ארעי נוסף במקום שבו נעצרו.
 במקרה כזה תיגרם הפרעה מקומית בלבד והמערכת הנחלית תתגבר עליה בקלות.



איור 9. תכנון שדה וביצוע המתקנים. שימת הלב לשימוש בגודלי הכפות השונים של המחפרון או המיני מחפרון; השימוש בכף ללחיצה אנכית או אלכסונית לתוך החריץ שנפתח מקומית עם עבודות עפר מזעריות ולחיצות של העץ אל תוך הקרקע.



איור 10. עיגון וחיזוק המתקנים בהתאם למשקל של חומר הגלם המונח באפיק; תוספת של בולדרים בייצוב ראש ערוץ באמצעות חפירה וקבירה של גזע העץ, סירוג המבנה ומנח צפוף ומרועף.

דגשים והמלצות

- יש להימנע ממיקום של המתקנים בסמיכות למעבירי מים, כדי שלא יסבו נזק לתשתיות במקרה שהם נסחפים או מתפרקים.
- עדיף להתקין את המתקנים במקטעי נחל שיש להם כבר רצועות חיץ, כך שקיים שטח הצפה באיגום המים לאחור. הצפה תדירה של רצועת החיץ תסייע בביסוס צומח של בית גידול לח.
- יש להתייעץ עם מומחי הגנת הצומח ועם בעל המטע כדי לוודא שהעצים לא נושאים עימם מזיקים (בעיקר חרקים הנוברים בקליפות העץ). במקרה של חשש ממזיקים יש לעבוד בתיאום עם החקלאי ולהתקין מלכודות ואמצעי מנע במטע.
- הפעילות חייבת להיעשות בתיאום עם בעל הקרקע הסמוכה בנוגע לתועלות שיש במתקן לצד נזקים שעלולים להיגרם, כגון חתירה בגדות והצפות זמניות לזוּיסות שיטפונות.
- ניהול מסתגל (אדפטיבי) – יש לבצע מקצה שיפורים ככל שנדרש ומתאפשר על ידי התקנת מתקנים נוספים במעלה או במורד של מתקנים קיימים. מומלץ לצופף מתקנים משום שכוח המים תמיד יפגיע בעוצמתו.
- ההתקנה בפועל נשענת על מרכיב של תכנון שדה. היא יכולה להיעשות כחלק מפעולות שיקום עתירות בעבודות עפר, אבל הפוטנציאל כאן הוא במזעור עבודות עפר ורתימת אנרגיית הזרימה של המים לחולל שינוי מורפולוגי.
- בשל כל אלה הגישה של שימוש במבני עץ נקבוביים כחלק מפרויקטי שיקום נחל או הטמעה של פתרונות מבוססי טבע תופסת אחיזה במקומות רבים בעולם (אגוזי, 2021). יש לעודד שימוש בהם בעיקר במעלה אגני היקוות חקלאיים, מיוערים או בשטחי שמורות טבע ובאופן כללי באגנים קטנים. ריבוי המתקנים הללו יאפשר גם התנסות בעתיד באפיקי נחלים ראשיים, בעיקר בעבור הגנה על גדות האפיק בדומה למקרים באירופה.

הוראות בטיחות כלליות

- עבודה בהתאם לכללי הבטיחות המקובלים בעבודת שדה עם כלי ציוד מכני כבד.
- להקפיד על תקשורת וקשר עין עם מפעילי הכלים.
- להקפיד על שימוש באמצעי מגן נדרשים (כגון משקפי מגן, כפפות, אטמי אוזניים בעבודה עם מסור ידני).

רשימת מקורות ופרטי קריאה מומלצים

1. **אגוזי ה. 2021.** פתרונות מבוססי טבע – סל כלים לטובת ניהול סיכוני הצפה. אקולוגיה וסביבה 12(3): 49–58.
2. **Beechie, T.J., Sear, D.A., Olden, J.D., Pess, G.R., Buffington, J.M., Moir, H., Roni, P. and Pollock, M.M., 2010.** Process-based principles for restoring river ecosystems. *BioScience*, 60(3), pp.209–222.
3. **Ciotti, D.C., Mckee, J., Pope, K.L., Kondolf, G.M. and Pollock, M.M., 2021.** Design criteria for process-based restoration of fluvial systems. *Bioscience*, 71(8), pp.831–845.
4. **Comiti, F., Andreoli, A., Lenzi, M.A. and Mao, L., 2006.** Spatial density and characteristics of woody debris in five mountain rivers of the Dolomites (Italian Alps). *Geomorphology*, 78(1-2), pp.44–63.
5. **Gurnell, A., Tockner, K., Edwards, P. and Petts, G., 2005.** Effects of deposited wood on biocomplexity of river corridors. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 3(7), pp.377–382.
Kondolf, G.M., Smeltzer, M.W. and Railsback, S.F., 2001. Design and performance of a channel reconstruction project in a coastal California gravel-bed stream. *Environmental management*, 28, pp.761–776.
6. **Mott, N., 2006.** *Managing woody debris in rivers, streams and floodplains.* Wildlife Trust.
7. **Palmer, M.A., Bernhardt, E.S., Allan, J.D., Lake, P.S., Alexander, G., Brooks, S., Carr, J., Clayton, S., Dahm, C.N., Follstad Shah, J. and Galat, D.L., 2005.** Standards for ecologically successful river restoration. *Journal of applied ecology*, 42(2), pp.208–217.
8. **Rosgen, D.L., 2006,** April. River restoration using a geomorphic approach for natural channel design. In *Proceedings of the Eighth Federal Interagency Sedimentation Conference* (Vol. 1, pp. 394–401). Reno, NV: Subcommittee on Sedimentation.
9. **Treadwell, S., Koehn, J., Bunn, S. and Brooks, A., 2007.** Wood and other aquatic habitat. *Principles for Riparian Lands Management*, pp.117–40.
10. **Verdonschot, P.F.M., Spears, B.M., Feld, C.K., Brucet, S., Keizer-Vlek, H., Borja, A., Elliott, M., Kernan, M. and Johnson, R.K., 2013.** A comparative review of recovery processes in rivers, lakes, estuarine and coastal waters. *Hydrobiologia*, 704, pp.453–474.
11. **Wheaton, J.M., Bennett, S.N., Bouwes, N.W., Maestas, J.D. and Shahverdian, S.M. eds., 2019.** *Low-tech process-based restoration of Riverscapes: Design manual.* Utah State University Restoration Consortium.
12. **Williams, R.D., Bangen, S., Gillies, E., Kramer, N., Moir, H. and Wheaton, J., 2020.** Let the river erode! Enabling lateral migration increases geomorphic unit diversity. *Science of the Total Environment*, 715, p.136817.
13. **Woelfle Erskine, C., Wilcox, A.C. and Moore, J.N., 2012.** Combining historical and process perspectives to infer ranges of geomorphic variability and inform river restoration in a wandering gravel bed river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(12), pp.1302–1312.
14. **Wohl, E., Cenderelli, D.A., Dwire, K.A., Ryan Burkett, S.E., Young, M.K. and Fausch, K.D., 2010.** Large in stream wood studies: A call for common metrics. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 35(5), pp.618–625.

תודות

עריכת תוכן - יעל סלמה רובין וד"ר רועי חייכל

עריכה לשונית - ענת פלדמן

עריכה גרפית - רוני בן ציוני

סייעו בחשיבה, תכנון וביצוע ראשוני של המתקנים:

אדריכל נוף רם איזנברג, אדריכלית נוף אנה ארגואטי - רם איזנברג עיצוב סביבה

כאמל חטיב, זהר בן שמחון, כפיר רונן - מרכז מחקר חקלאי נווה יער

גל זאב, אדוה מנור, אבישי סלמון - סטודנטים לאדריכלות נוף, טכניון (בעת הביצוע של השלב הראשון)

אנשי מקצוע שהעירו וסייעו לטיוב המדריך:

ד"ר אורית סקוטלסקי, אקולוגית, יחידת המדען הראשי בקק"ל

ד"ר דידי קפלן, אקולוגי, רשות ניקוז ונחלים קישון

מרים בן שלום, ניהול וייזום פרויקטים סביבתיים

צוות מנהל - פרויקט שיקום מעלה נחל נהלל:

ד"ר רועי אגוזי, התחנה לחקר הסחף, החטיבה לניהול משאבי סביבה, משרד החקלאות ובטחון המזון

ד"ר יעל לאור, מנהלת מדעית, משק מודל לחקלאות בת קיימא, מרכז המחקר נווה יער

טל רטנר, מנהלת אגף חברה וקהילה, רשות ניקוז ונחלים קישון

הילה ביניש, מנכ"לית, אגמא

מרים בן שלום, מנהלת פרויקט ההדגמה לשיקום נחל נהלל