

מעבירי מים בסביבה הנחלית: השפעות הידרולוגיות, מורפולוגיות, ואקולוגיות

סקר ספרות

כתיבה ועריכה: דר' נועה הלל

מרץ, 2025



הקדמה

מעבירי מים וגשרים מהווים רכיב חיוני בתשתיות התחבורה, אך תכנונם והקמתם ללא ראייה מערכתית עלולים לפגוע בתפקוד האקולוגי וההידרולוגי של הנחל. בישראל, הדיון על השפעתם של מתקנים אלו על הסביבה הנחלית עדיין מוגבל, והיעדר מתודולוגיה סדורה או קווים מנחים ברורים מוביל לתכנון וביצוע שאינם מביאים בחשבון את מלוא המורכבויות ההידרולוגיות, המורפולוגיות והאקולוגיות של המערכת. כתוצאה מכך, מעבירים רבים מתוכננים באופן הגורם לשיבוש דינמיקת הזרימה, לשינוי תהליכי הסעת סחף, לערעור יציבות הערוץ, וליצירת חסמים אקולוגיים עבור בעלי חיים. לאורך זמן, גורמים אלו מגבירים את שחיקת המבנה, מפחיתים את עמידותו בפני איתני הטבע, ולעיתים מובילים לכשל מבני חמור. כשל כזה עלול לגרום מנזק נקודתי כגון חסימה זמנית של מעבר ועד למצבים מסכני חיים, ולכן חיוניותו של תכנון מושכל אינה ניתנת להפרזה.

בעוד שמדינות רבות בעולם אימצו מתודולוגיות מתקדמות לתכנון מעבירים המשלבות את צרכי הסביבה לצד הדרישות התחבורתיות וההנדסיות, בישראל אין עדיין תקינה המכתיבה סטנדרטים ברורים. היעדר הנחיות מוסכמות מוביל לתכנון לא אחיד ולפערים משמעותיים באיכות התשתיות וביכולתן להשתלב בסביבה הטבעית. מסמך זה נועד להציף את הסוגיה ולשמש כבסיס ראשוני לגיבוש מתודולוגיה ארצית אחידה לתכנון, הקמה ותחזוקה של מעבירי מים בנחלים. המטרה היא לגבש עקרונות מנחים שיאפשרו איזון מיטבי בין צרכי האדם לבין השמירה על תפקודו התקין של הנחל. גישה זו צפויה למזער את ההשפעה הסביבתית השלילית, להפחית עלויות תחזוקה לאורך זמן, ולשפר את עמידות המבנים תוך צמצום הסיכון למשתמשים בהם ולמערכת האקולוגית כולה.

1 מבוא

מעבירי דרך החוצים נחלים הם חלק בלתי נפרד מתשתיות התחבורה (Keller & Sherar, 2003). תכנון וביצוע של מבנים בנחל כרוכים באיזון מורכב בין צרכי פיתוח תחבורתי לבין שמירה על מערכת

אקולוגיות דינמיות ורגישות, במיוחד באזורים שבהם נחלים מהווים חלק מרכזי במערכת הטבעית (Bylak & Kukuła, 2018). מטבעם, מבנים בנחל משפיעים על מגוון רחב של היבטים במערכת האקולוגית הנחלית, לרבות דפוסי הזרימה (הידרולוגיה), תהליכים גאומורפולוגיים ועל המגוון הביולוגי המקומי (אקולוגיה) (McKee et al., 2012). מחקרים מצביעים על כך שהיעדר תכנון הולם, המאזן בין צרכי הפיתוח לשמירה על תפקוד המערכת הנחלית עלול לגרום להשפעות אקולוגיות ארוכות טווח, לצד הפגיעה בתפקוד התשתית עצמה שעלולה לסכן את משתמשי הדרך (Neal, 2012). הבנת האתגרים וההשלכות של מעבירים על נחלים חיונית לשם פיתוח פתרונות המתחשבים בסביבה תוך מתן מענה לצרכים תחבורתיים (Gautam & Bhattarai, 2018).

ההשפעות ההידרולוגיות של מעבירים נחקרות בעיקר בהקשר לשינויים בתנועת המים ובדפוסי ההצפות. מעבירים מסוימים נוטים לצמצם את שטח החתך של הנחל (כמו במעבירים סמי איריים עם מפתח צר מרוחב הערוץ), דבר המוביל להאצת הזרימה במעביר, לעלייה בשיעורי ההצפות במורד הזרם ולהגברת הארוזיה בקרקעית ובגדות באזור המבנה. מעבירים איריים לעומת זאת, מובילים לעיתים לשינויי עומק והרחבת הערוץ (איור 1א) ומפרים את דינמיקת הזרימה במעלה ובמורד המעביר (Welsh & Anderson, 2009). לעיתים קרובות המבנה המעוגן באפיק יוצר שינויים במנגנוני הסעת סחף, כגון השקעה במעלה למבנה וסחיפה במורדו. בתהליך זה נוצרת מדרגה (איור 1ב) היוצרת נתק ומפרה את הקישוריות ההידראולית בין המעלה למורד (Morris et al., 2016). תופעה זו של "נחל רעב" נגרמת ממחסור בהסעת סדימנטים מהמעלה למורד ומהווה זרז להתחתרות הערוץ במורד המבנה על ידי סחיפה של התשתית והגדות (Roy & Sahu, 2018). תהליכים אלה משפיעים באופן ישיר על יציבות הערוץ ותפקודו האקולוגי (Forman & Alexander, 1998). לדוגמה, מצב זה עלול לפגוע בבתי גידול קריטיים של צמחייה ובעלי חיים המותאמים לסביבות מסוימות, כגון אזורי גדות עם צמחייה ייחודית או אזורי מחייה של חסרי חוליות (Booth & McBride, 2005).

ההשפעות האקולוגיות של מעבירים בנחלים כוללות חסימה של תנועת מינים ושינוי בתנאי הסביבה החיוניים לקיום המערכת האקולוגית (Diebel et al., 2015). המעבירים עצמם מהווים מחסום פיזי שעלול למנוע ממינים אקוויטיים, כגון דגים וחסרי חוליות, לנוע לאורך הנחל, ובכך לפגוע בתהליכים כגון רבייה והתפשטות (Jackson, 2003). בנוסף, בקרבת מעבירים ישנה עליה של ריכוזי חומרים מזהמים, כגון שמנים ומתכות כבדות אשר נשטפים מהדרך או זולגים מכלי הרכב לנחל, וגורמים לזיהום

המים ולפגיעה באיכות הכימית של מי הנחל (Coffin, 2007). הפגיעה באיכות המים משליכה גם על מינים אחרים המשתמשים בנחל כמשאב מרכזי, כגון יונקים, עופות וצמחייה מקומית (Avolio, 2003).



איור 1: א. שינוי רוחב ועומק הערוץ במעביר אירי. ב. הצטברות סדימנטים במעלה למעביר והיווצרות מדרגה במורדו. תמונות מנחל ציפורי.

1.1 השפעות הידרולוגיות

- **שינוי דפוסי זרימה:** מעבירים, במיוחד צינורות עגולים, מרכזים את הזרימה דרך מעבר צר, מה שמוביל להאצת הזרימה במורד הזרם. שינויים אלו מגבירים את האנרגיה ההידראולית, ומעלים את פוטנציאל הארוזיה של קרקעית הנחל במורד הערוץ (Welsh & Anderson, 2009; McKee et al., 2012).
- **הפרת הקישוריות ההידראולית:** מעבירים מתוכננים בצורה לקויה יכולים ליצור חסמים הידרולוגיים, במיוחד כאשר הם אינם מחקים את קרקעית הנחל הטבעית (לדוגמה איור 1ב). חסמים אלו מפריעים לזרימת המים והסעת הסדימנטים, במיוחד בתקופות של זרימה נמוכה (Jackson, 2003; Gautam & Bhattarai, 2018).
- **הפרעות בהסעת סדימנטים:** מעבירים חוסמים לעיתים את התנועה הטבעית של סדימנטים, מה שמוביל להצטברותם במעלה הזרם ולמחסור בסדימנטים ("נחל רעב") במורד הזרם. שינוי זה משבש את מאזן הסדימנטים, ומשפיע על יציבות הערוץ ובתי הגידול האקוטיים (Roy & Sahu, 2016; Morris et al., 2018).
- **שינוי תדירות ועוצמת הצפות:** מעבירים שאינם כוללים מערכת ניקוז מספקת יכולים להגביר את תדירות ועוצמת ההצפות. מבנים עם קיבולת מוגבלת גורמים להצפות במעלה הזרם ולשינויים בדפוסים ההידרולוגיים המקומיים (Forman & Alexander, 1998; Keller & Sherar, 2003).

1.2 השפעות מורפולוגיות

- **ארוזיית קרקעית הנחל:** זרימה ממוקדת ובמהירות גבוהה מגבירה את הארוזיה של קרקעית הנחל ויוצרת מדרגה או בור סחיפה (Scour hole), במיוחד באזורים שבהם התשתית אינה מחוזקת (Marcus & Blanton, 2009; McKee et al., 2012).

- **שינוי במבנה הערוץ:** חסימה חלקית של ערוץ הנחל על ידי מעביר עשויה לשנות את צורת הערוץ במעלה ובמורד הזרם. הצטברות סדימנטים במעלה הזרם יכולה להרחיב את הערוץ, בעוד שבמורד הזרם מתרחשת התחתרות עקב מחסור בסדימנטים (Welsh & Anderson, 2009; Morris et al., 2016).
- **פגיעה ברציפות התשתית:** מעבירים שאינם כוללים קרקעית מדומה או תשתית טבעית מפריעים להמשכיות התשתית של קרקעית הנחל, דבר אשר פוגע בבתי גידול של מינים תלויי קרקעית (Diebel et al., 2015; Bylak & Kukuła, 2018).
- **היווצרות בריכות מלאכותיות:** מעבירים המצרים את הזרימה במעלה הזרם עלולים לגרום להיווצרות בריכות עומדות, מה שמוביל להצטברות סדימנטים ולשינויים באיכות המים (Roy & Sahu, 2018; Neal, 2012).

1.3 השפעות אקולוגיות

- **חסימת תנועת מינים אקוטיים ויבשתיים:** מעבירים יכולים לשמש מחסום פיזי המונע ממינים אקוטיים ויבשתיים לנוע לאורך הנחל, ולפגוע ביכולת הדגים וחסרי החוליות להגר למטרות רבייה, חיפוש מזון או מקומות מחסה (Jackson, 2003; Bylak & Kukuła, 2018).
- **שינוי בית הגידול:** מעבירים גורמים לעיתים לשינויים במורפולוגיה של הנחל, כמו הרחבת הערוץ או הצטברות סדימנטים, אשר משפיעים על תנאי בית הגידול של צמחים ובעלי חיים. שינויים אלו מסוכנים במיוחד באזורים רגישים כמו אזורי הצפה עונתיים וגדות נחלים, ועלולים להביא לירידה או להיעלמות של מינים תלויים בסביבה זו (Booth & McBride, 2005; Keller & Sherar, 2003).
- **זיהום מים:** דרכים תורמות למקורות זיהום נקודתיים ומתמשכים, ומכניסות לנחלים שמנים, דלקים, מתכות כבדות, וחומרים כימיים נוספים במהלך אירועי גשם. מזהמים אלו פוגעים באיכות המים ומשפיעים ישירות על המגוון הביולוגי (Coffin, 2007; Morris et al., 2016). ריכוז מזהמים גבוה עשוי לשנות את ההרכב הכימי של המים, להפחית את רמות החמצן, ולפגוע במינים רגישים במיוחד (Avolio, 2003).
- **שינוי בדפוסי הזרימה:** שינויים במהירות ובחלוקת הזרימה הנגרמים ממעבירים יוצרים תנאים בלתי יציבים עבור צמחים ובעלי חיים. מינים המתבססים על דפוסי זרימה יציבים למטרות רבייה או טריפה עשויים להיפגע (Diebel et al., 2015; McKee et al., 2012).
- **שיבוש שרשראות המזון:** שינויים בבית הגידול ובאיכות המים משפיעים על הרכב המינים, ועלולים להפך את האיזון במערכת האקולוגית. לדוגמה, ירידה באוכלוסיית דגים עשויה להשפיע על טורפים גדולים יותר, כמו עופות מים, ובכך לשבש את יחסי הגומלין במערכת (Forman & Alexander, 1998; Neal, 2012).

2 סוגי מעבירים

מעבירים שונים משפיעים על הנחל בדרכים מגוונות, ולכן בחירת סוג המעביר היא גורם קריטי בתכנון לקבלת התוצאה הרצויה. מעבירי צינור לדוגמה, נחשבים לפתרון זול ונפוץ אך עלולים לגרום להגברת מהירות הזרימה במורד המעביר שמובילה לארוזיית קרקעית הערוץ ולחסימת מעבר מינים אקוויטיים כתוצאה מקיטוע רציפות הזרימה. מעבירים איריים, שבהם הדרך עוברת בתוך הנחל עצמו, אמנם שומרים לעיתים על זרימה טבעית יותר, אך יוצרים ארוזיה מקומית ופגיעה בתשתית הטבעית של הנחל כתוצאה ממעבר כלי הרכב או שיריון התשתית עם בטון. לעומת זאת, גשרים פתוחים מספקים פתרון המאפשר שמירה מיטבית על המבנה ההידרולוגי והאקולוגי, שכן הם מאפשרים זרימה חופשית, תנועת מינים והסעת סדימנטים באופן טבעי יותר. להלן סקירה של סוגי מעבירים נפוצים.

2.1 מעבירי צינור

צינורות עגולים, בעלי חתך זרימה עגול, בארץ עשויים לרוב מבטון אך קיימים גם ממתכת ומפלסטיק קשיח (מקובל בארה"ב, אך לא בישראל). סוג מעביר נפוץ מאוד.



איור 2: מעבירי צינור. א. מעביר צינור צר מרוחב הערוץ, ב. מעביר צינור סתום חלקית, ג. מעביר צינור גבוה מתשתית הנחל.

2.2 מעבירים איריים

מעבירים איריים מבטון כוללים משטח קשיח שחוצה את הנחל ומאפשר זרימת מים ישירה על גבי הכביש. במעבירים איריים שאינם מבוטנים כלי הרכב באים במגע ישיר עם תשתית הנחל והמים



הזורמים בו.

איור 3: מעבירים איריים. א. מעביר אירי לא מבוטן, ב. מעביר אירי מבוטן עם מדרגה.

2.3 מעבירים סמי-איריים

מעביר סמי אירי הוא מעביר המשלב מפתח למעבר הזרימה בספיקות נמוכות ומעביר אירי בגג המבנה המאפשר מעבר כלי רכב בספיקות גבוהות יותר (איור ג4).

2.4 מעבירי בוקס

צורתו המלבנית מדמה קופסה ומכאן שמו, בנוי מבטון וקיים במגוון גדלים. מאפשר לדמות קרקעית



טבעית.

איור 4: מעבירי בוקס. א. בוקס שלוש תאים חסום חלקית בפסולת וצומח, ב. התרחבות הערוץ ושקיעת סדימנטים במעלה לבוקס, ג. מעביר סמי-אירי.

2.5 מעבירי קשת

החלק העליון מעוגל, מאפשר חיקוי טוב יותר של מורפולוגית הנחל ותנועה טבעית יותר של סדימנטים ובעלי חיים.



איור 5: מעבירי קשת. א. מעביר שאינו בא במגע עם תשתית הנחל אך עשוי להיסתם בזרימות גבוהות, ב. מעביר קשת שאינו בא במגע עם התשתית אך במגע עם הגדות.

2.6 גשרים

אלמנט יחיד שחוצה את הנחל עם מינימום תמיכות מבניות בתוך הערוץ. גשרים אלו רחבים ולרוב אין מגע בינם לבין התשתית, ואינם מהווים מכשול לזרימה. אלו המעבירים המומלצים ביותר.



איור 6: גשר עם פתח יחיד. א. גשר ישר שאינו בא במגע עם הנחל, ב. גשר מקושת שאינו בא במגע עם הנחל.

התאמת המעביר לתנאי הסביבה המקומיים, כגון גובה הזרימה, נפח הסדימנטים, ואופי המערכת האקולוגית, חיונית למזעור נזקים סביבתיים. התאמה זו מסייעת למנוע פגיעה בבית הגידול הטבעי, להבטיח שימור משטר זרימה יציב ולצמצם את זיהום המים והפסולת הנגרמים מפעילות אנושית. היעדר תכנון מתאים, לעומת זאת, עלול לגרום לנזקים מצטברים, לרבות הצפות, שינויים במורפולוגיית הערוץ ופגיעה במגוון הביולוגי. השפעות אלו מדגישות את הצורך בבחירה נכונה של סוג המעביר ושילוב בין יעילות הנדסית לשימור סביבתי.

טבלה 1: סוגי מעבירים והשפעתם על הסביבה הנחלית

מעביר	השפעה הידרולוגית	השפעה מורפולוגית	השפעה אקולוגית	סה"כ השפעה
מעביר אירי	<ul style="list-style-type: none"> • עלול לגרום להאטה בזרימה באזורים מסוימים והאצה באחרים. • באירועים גשומים או שיטפונות, המעביר יכול לגרום לעלייה מקומית בעוצמת הזרימה או להסטת מים לאזורי גדות. • משטחים קשיחים מפחיתים את יכולת חלחול המים לקרקע. 	<ul style="list-style-type: none"> • תנועת מים מעל המעביר יכולה לגרום לשחיקת הקרקע והמצעים בסביבת המעביר, במיוחד בזרימה עוצמתית. • עשוי להוות חסם חלקי לתנועה הטבעית של סדימנטים במורד הזרם, ועלול לגרום לשקיעה במעלה לו ולארוזיה במורדו. 	<ul style="list-style-type: none"> • זרימה חזקה מעל המעביר או שינוי במפלס המים עלולים להוות מחסום לדגים ולחסרי חוליות. פגיעה במצע הטבעי של הנחל בסביבת המעביר גורמת לאובדן מקומות מחסה ורבייה למינים מקומיים. • הכביש עלול להוות מקור לזיהום המים כתוצאה משטיפה של מזהמים במהלך גשמים. הרחפת סדימנטים במעביר לא סלול גורמת לזיהום. 	משמעותית
מעביר בוקס	<ul style="list-style-type: none"> • במקרה של צמצום במפתח הזרימה הבוקס צפוי לגרום להאצת הזרימה במעביר ולהאטה במעלה הבוקס. הדבר מוביל להצפות במעלה ולפגיעה ביציבות הערוץ במורד. • מפתח בוקס קטן מגביל את מעבר הזרימה ועלול לגרום להרחבת שטחי הצפה בסביבה ולפגיעה בתשתיות סמוכות. • במקרים של תכנון לקוי, המעביר עלול להיחסם על ידי סדימנטים, צמחייה או פסולת. 	<ul style="list-style-type: none"> • ההאצה בזרימה במעביר מגבירה את הסחיפה במורד וגורמת לארוזיה מוגברת של קרקעית הערוץ ולפגיעה במצע הטבעי של הנחל. • גורם לעיתים להפרה בהסעת הסחף הטבעית של הנחל, מה שמוביל להצטברות סדימנטים במעלה ולשינויים במבנה הערוץ. • הזרימה המוגברת יכולה לגרום לארוזיית גדות במורד ופגיעה ביציבות המורפולוגית של הערוץ. 	<ul style="list-style-type: none"> • מהירות המים הגבוהה במעביר, יחד עם קרקעית בטון חלקה, מהוות מחסום פיזי עבור דגים וחסרי חוליות שאינם מסוגלים לשחות נגד הזרם. • קרקעית הבטון אינה תומכת במיני צומח וחי המותאמים למצע הטבעי של הנחל, מה שמוביל לצמצום המגוון הביולוגי המקומי. • חומרים מזהמים מכבישים סמוכים, כמו שמנים, כימיקלים ומתכות כבדות, יכולים להישטף אל הנחל דרך המעביר ולפגוע באיכות המים. 	משמעותית

מס"כ השפעה	השפעה אקולוגית	השפעה מורפולוגית	השפעה הידרולוגית	מעביר
משמעותית	<ul style="list-style-type: none"> • מחסום לתנועת דגים ומינים אחרים שאינם מסוגלים להתגבר על המהירות הגבוהה או על שינויים פתאומיים בגובה המים. • זיהום מכבישים סמוכים נשטף ביתר קלות אל תוך הנחל. 	<ul style="list-style-type: none"> • שחיקת גדות וקרקעית הערוץ באזור היציאה מהצינור והגבלת הסעת סחף במורד הנחל. • מוביל לחוסר איזון במורפולוגיה הטבעית של הערוץ. 	<ul style="list-style-type: none"> • הגברת מהירות הזרימה בשל צמצום חתך הזרימה. • ארוזיה מואצת במורד הנחל ושינוי דפוסי ההצפות באזור. 	מעביר צינורי
בינונית	<ul style="list-style-type: none"> • מפתח קטן עשוי ליצור חסימה למעבר מינים בערוץ. 	<ul style="list-style-type: none"> • יתכן שינוי מקומי במורפולוגיה עקב קריסת גדות. • הפרות לדפוס הסעת הסדימנטים. 	<ul style="list-style-type: none"> • בהינתן תכנון שאינו מותאם תיתכן האצת הזרימה. • מפתח קטן עשוי לגרום לחסימה חלקית או מלאה בעת שיטפונות. 	מעביר קשת
מינימלית	<ul style="list-style-type: none"> • היעדר מחסומים פיזיים שומר על מעבר חופשי של בעלי חיים ומינים אקוויטטיים. • מפחיתים את הסיכון לזיהום ישיר בנחל. 	<ul style="list-style-type: none"> • אינם משפיעים על מבנה הערוץ ועל הסעת סדימנטים. • הזרימה נמשכת באופן טבעי, וכך נשמרת יציבות המערכת המורפולוגית. 	<ul style="list-style-type: none"> • מאפשר זרימה טבעית ללא הפרעות. • אינם מגבילים את דפוסי הזרימה בעת שיטפונות. 	גשרים

3 מעבירים איריים

הפרק הבא עוסק במעבירים איריים, שהם הנפוצים ביותר בסביבה הנחלית בישראל. למרות שמעבירים איריים אינם הפתרון הטוב ביותר לנחל מבחינה סביבתית, הם זולים משמעותית ממרבית המעבירים ולכן מועדפים מתוך שיקולים כלכליים, ללא התייחסות להיבט הסביבתי (Morris et al., 2016). מעבר להתאמה ההנדסית לצרכי תחבורה וגישה, יש להבין את השפעתם של מעבירים אלו על תפקוד הנחל וסביבתו (Diebel et al., 2015).

באקלים ים-תיכוני, בו הזרימות בנחלים הן לרוב שיטפוניות ועונתיות, מעבירים איריים משמשים פתרון נפוץ למעבר בדרכים חקלאיות וכפריות (Gautam & Bhattarai, 2018). עם זאת, מאחר שמרבית הנחלים באזור זה הם קטנים וחולפים דרך שטחים חקלאיים, קיימים מעבירים איריים רבים הקוטעים את רציפות הזרימה הטבעית בנחל (McKee et al., 2012). קיטוע זה גורם לנזקים סביבתיים משמעותיים, כמו פגיעה בבתי גידול מימיים, הפרעה למעבר בעלי חיים, והגברת סחיפת קרקע (Bylak & Kukuła, 2018). להלן פירוט סוגים שונים של מעבירים איריים, מאפייניהם, והשפעתם על הנחל (Neal, 2012).

3.1 מעבירים לא סלולים

- **מאפיינים:** הדרך חוצה את הנחל ישירות על קרקעיתו הטבעית ללא שכבת כיסוי שמייצבת את המעביר, הקרקע עשויה להיות מורכבת מבוץ, חצץ, חלוקי נחל או אדמת סחף. מבנה מהסוג הזה מתאים לנחל בו מספר החציות נמוך מאוד ועם זרימת מים חלשה או עונתית. לאחר גשמים כבדים מעביר לא סלול עלול להפוך לבלתי עביר בגלל בוץ או זרימה חזקה.
- **יתרונות:** ללא עלות תכנון או ביצוע, במספר חציות נמוך מאוד לא מייצר הפרעה משמעותית לזרימת המים, משתלב בסביבה טבעית, לא מייצר שינוי משמעותי בתוואי השטח, במקרה של ארוזיה ניתן בקלות לייצב את המעביר מחדש.
- **חסרונות:** באין בסיס יציב מייצר פגיעה כרונית בקרקעית הנחל, כתוצאה מכך מייצר סחיפה וארוזיה, לא יציב בתנאי רטיבות, מייצר קיטוע משמעותי של הנחל, דורש תחזוקה שוטפת, מייצר סכנת החלקה אם הקרקע בוצית או הזרימה חזקה מאוד.



איור 7: מעבירים איריים לא סלולים.

3.2 מעבירים סלולים

- **מאפיינים:** מורכבים מלוח בטון שטוח המותקן ישירות על קרקעית הערוץ עם עיגונים בקרקע, משמשים למעבר פשוט של כלי רכב ומכונות חקלאיות במים רדודים.
- **יתרונות:** זולים וקלים להתקנה, מתאימים לזרימות עונתיות חלשות.
- **חסרונות:** המים זורמים מעל המעביר ולכן יכולים להיחסם בהצפות, תיתכן החלקה בהינתן הצטברות אצות או בוץ, קיטוע רציפות הזרימה בספיקות נמוכות (בריכות מעל ומתחת למבנה), שכתוצאה ממנה נוצר חסם משמעותי למעבר בעלי חיים קטנים. מייצר פגיעה בקרקעית הנחל וארוזיה מוגברת של הגדות מעל ומתחת למבנה.



איור 8: מעבירים אריים סלולים.

3.3 מעבירים מחלחלים

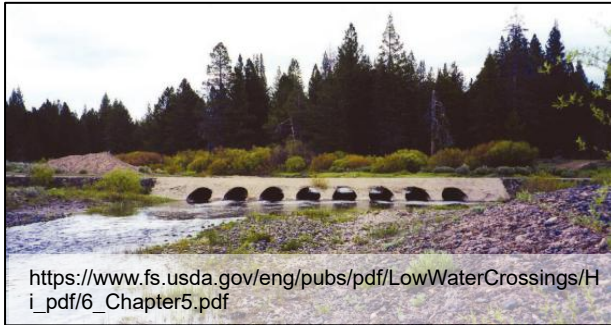
- **מאפיינים:** משטחי המעביר העשויים חומרים מחוררים, המאפשרים חלחול מים דרך המעביר.
 - **יתרונות:** מאפשרים זרימה טבעית דרך המעביר גם כאשר הזרימה חלשה, מפחיתים את הפגיעה במבנה קרקעית הנחל ובגדותיו, מאפשרים מעבר חלק יותר של בעלי חיים קטנים ומים.
 - **חסרונות:** יקרים יחסית להתקנה, עלולים להיחסם עם הזמן בסחף, פוטנציאל תזוזה של החלקים המרכיבים את המעביר.
- איור 9: מעבירים מחלחלים.



3.4 מעבירים משולבים עם צינורות

- **מאפיינים:** כוללים צינורות או פתחים המותקנים מתחת למפלס המעביר כדי לאפשר זרימת מים מתמדת.

- **יתרונות:** מפחיתים את הסיכון להצפה של המעביר, מאפשרים זרימה חלקית של מים גם כשמעביר הרכב יבש.
- **חסרונות:** הזרימה אינה מספקת בעת שיטפונות, תעלות הניקוז נוטות להיסתם, דבר המחייב תחזוקה אינטנסיבית, בנייה מורכבת ויקרה יותר.



איור 10: מעבירים משולבים עם צינורות.

3.5 מעבירים סמי-איריים

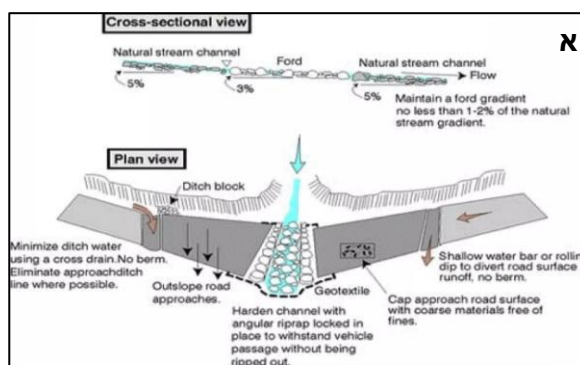
- **מאפיינים:** מבנה מעט מוגבה מעל מפלס זרימת בסיס, כך שרק זרימה חזקה במיוחד תעבור מעליו, מפחיתים את ההשפעה על הקרקעית.
- **יתרונות:** משפרים את עמידות המעביר להצפות קלות, מקטינים את ההפרעה לזרימה בעונות יובש.
- **חסרונות:** דורשים תכנון מורכב יותר, רגישים לשינויים חדים במפלס המים, יוצרים חסם מסוים לזרימה חופשית.



איור 11: מעבירים סמי איריים.

3.6 מעבירים איריים מתקדמים

- **מאפיינים:** מעבירים סלולים ושאינם סלולים המתחשבים בהידרולוגיה, במורפולוגיה ובאקולוגיה שבנחל. המעביר יכול לכלול סלעים בתשתית הבטון בכדי לדמות את קרקעית הערוץ, תעלה במרכז המעביר כדי לרכז את זרימת הבסיס ולאפשר רציפות לבעלי חיים, ותשתית אבנית שתחתיה שכבות סלעים בגדלים שונים כדי להגדיל את היציבות של המעביר.
- **יתרונות:** התחשבות בסביבה הנחלית והקטנת נזק פוטנציאלי לנחל וסביבתו, חיסכון עתידי בתחזוקה וצמצום פוטנציאל לכשל המבנה.
- **חסרונות:** עלויות גבוהות יותר בתכנון, נדרשת שימת לב והקפדה בתכנון המעביר כדי שיתפקד כפי המצופה. בעיצובים מסוימים נדרשת תחזוקה תכופה יותר, כגון הידוק מעביר לא סלול או פינוי סחף ממעבירים עם תעלה במרכז.



איור 12: א. מעביר אירי סלול משופר עם ערוץ לזרימות בסיס (Key, 2014), ב. מעביר אירי לא סלול מחוזק (Coleman, 2018).

מעבירים איריים רבים יוצרים קטיעה פיזית בנתיב הזרימה, מגבירים סחיפת קרקע, חוסמים מעבר בעלי חיים ולעיתים אף משנים את הדינמיקה ההידרולוגית של הנחל (Diebel et al., 2015; Jackson, 2003). תכנון שאינו לוקח בחשבון את ההיבטים הללו עלול לגרום לנזקים, כמו אובדן בתי גידול, הידרדרות איכות המים, וארוזיית גדות הנחל (Diebel et al., 2015; Jackson, 2003). לכן, הדרך הנכונה להוספת מעביר בנחל מתחילה בבחינת מאפייני הנחל והתנאים הסביבתיים – הידרולוגיה, מורפולוגיה ואקולוגיה, יחד עם הצורך עליו עונה המעביר (Gautam & Bhattarai, 2018). רק לאחר איסוף הנתונים ניתן לומר מהו המיקום הנכון ביותר למעביר, וסוג המעביר המתאים לו (Keller & Sherar, 2003).

מהטעמים האלו יש צורך ביצירת מתודולוגיה לבניית מעבירים איריים, המשלבת הבנה הנדסית עם עקרונות סביבתיים (Forman & Alexander, 1998). כללים אלו צריכים לכלול הנחיות המבטיחות זרימה טבעית ורציפה של מים גם בעונות יבשות, תכנון המאפשר מעבר בטוח של בעלי חיים, ושימוש בחומרים ובשיטות בנייה המצמצמים את הפגיעה בקרקעית הנחל ובגדותיו (McKee et al., 2012; Welsh & Anderson, 2009). שילוב בין גישה הנדסית לצרכים אקולוגיים יאפשר מענה משולב – שמירה על תפקוד הנחל, שיפור איכות הסביבה המקומית והבטחת פתרונות חכמים וברי קיימא למשתמשים במעבירים (Neal, 2012).

4 מידע ונתונים הדרושים לקביעת מיקום וסוג מעביר

בחירת המיקום האופטימלי למעביר בנחל דורשת התייחסות קפדנית לגורמים הידרולוגיים, גיאולוגיים, אקולוגיים והנדסיים. הפרמטרים המרכזיים הבאים חיוניים לקביעת האתר המתאים ביותר:

4.1 פרמטרים הידרולוגיים

- **משטר זרימה:** הבנת השינויים העונתיים בזרימת הנחל (זרימה נמוכה, מלא גדות, הצפות) היא קריטית. אתר עם דפוסי זרימה יציבים וצפויים הוא אידיאלי (Gautam & Bhattarai, 2018).
- **תדירות ועוצמת הצפות:** זמני חזרה שונים של אירועי זרימה גבוהה (למשל, הצפות של 10 שנים או 50 שנים) מסייעת בתכנון מבנה המפחית נזקי הצפות (Morris et al., 2016).
- **מהירות הזרימה וכוחות גזירה:** אזורים עם מהירות מים נמוכה וכוחות ארוזיביים נמוכים מועדפים, שכן הם מפחיתים את הסיכון לבלית המעביר (McKee et al., 2012).
- **עומק המים:** עומק המים מעל המעביר בתנאים רגילים ובעת הצפה משפיע על בטיחות הרכבים ויציבות המבנה (Keller & Sherar, 2003).
- **נתונים הידרולוגיים:** פרמטרים אלו מתארים את תנועת המים בנחל ועוזרים להעריך סיכוני הצפות ותנאי זרימה לצורך תכנון המעביר:
 - **זרימת בסיס** – הזרימה המינימלית הרציפה בנחל במהלך תקופות יבשות.
 - **גובה מלא גדות** – הגובה שבו הנחל מציף את גדותיו קריטי להערכת עמידות המבנה בפני הצפות.
 - **ספיקת שיא** – קצב הזרימה המרבי (למשל, הצפה של 10 שנים, 50 שנים) המשמש לתכנון קיבולת המעבר.
 - **ספיקה ממוצעת שנתית** – קצב הזרימה השנתי הממוצע, המשמש להערכת ביצועים ארוכי טווח.
 - **מהירות זרימה (מ'שניה)** – קצב הזרימה בנקודות שונות כדי להעריך סיכוני סחיפה והסעת סדימנטים.
 - **כוחות גזירה** – הכוח שמפעילה הזרימה על קרקעית הנחל, המשפיע על סיכוני ארוזיה ובליה.
 - **עומק הידראולי (מ')** – עומק המים הממוצע מעל המעבר, המשפיע על בטיחות רכבים ויציבות המבנה.
 - **שיפוע פני המים** – השיפוע של פני המים, המשפיע על האצת הזרימה וסיכוני ארוזיה.
 - **תדירות ועוצמת הצפות** – תדירות אירועי זרימה גבוהים. למשל, הצפות בחתך של 10 או 50 שנים.

4.2 פרמטרים גיאומורפולוגיים

- **יציבות קרקעית הנחל:** אתרים עם קרקעית יציבה ולא ארוזיבית (כגון חצץ או סלע) דורשים פחות תחזוקה מאשר קרקעית חולית או בוצית (Neal, 2012).
- **יציבות הגדות:** הגדות צריכות להיות עמידות בפני ארוזיה והתמוטטות, כאשר צמחייה טבעית מסייעת לייצובן (Bylak & Kukuła, 2018).
- **שיפוע הערוץ:** שיפוע עדין של 1-3% הוא אידיאלי, שכן שיפועים תלולים מגבירים את מהירות הזרימה ואת תנועת הסדימנטים, דבר המוביל להתדרדרות מהירה של המעבר (Welsh & Anderson, 2009).
- **תנועת סדימנטים והצטברותם:** אתרים עם תנועת סדימנטים מינימלית מונעים הצטברות עודפת במעבר, העלולה לחסום את הזרימה ולדרוש תחזוקה תכופה (Roy & Sahu, 2018).
- **נתונים גיאומורפולוגיים:** מגדירים את המבנה הפיזי של הנחל והסביבה, ומשפיעים על ארוזיה, הסעת סדימנטים ויציבות המבנה:
 - **שיפוע קרקעית הנחל (%)** – השיפוע האורכי של קרקעית הנחל, המשפיע על מהירות הזרימה וסיכוני סחיפה.
 - **שיפוע גדות (%)** – תלילות הגדות, המשפיעה על יציבותן וסיכוני ארוזיה.
 - **שטח חתך זרימה (מ"ר)** – השטח הכולל של תעלת הזרימה, קריטי לחישובים הידראוליים.
 - **סוג חומרי קרקעית** – הרכב קרקעית הנחל (חול, חצץ, סלע) משפיע על יציבות ועמידות בפני ארוזיה.
 - **קצב הסעת סדימנטים** – כמות החומר הסחוף במערכת, המשפיעה על דפוסי השקעה וסחיפה.
 - **יציבות גדות** – עמידות הגדות בפני ארוזיה וקריסה.
 - **רוחב ערוץ (מ')** – הרוחב של הערוץ הפעיל, המשפיע על אורך המעבר הנדרש.
 - **יחס הצרת הערוץ – (Channel Constriction Ratio)** היחס בין רוחב הנחל הטבעי לבין רוחב המעבר, משפיע על התנהגות הזרימה.
 - **נוכחות סלע יסוד** – מסייע לקביעת יציבות קרקעית הנחל ומשפיע על עמידות המעבר בפני סחיפה.

4.3 שיקולים אקולוגיים וסביבתיים

- **השפעה על בתי גידול מימיים:** יש להימנע מאתרים המכילים מערכות אקולוגיות רגישות (למשל, אזורי רבייה של דגים, ביצות) כדי למזער הפרעה סביבתית (Diebel et al., 2015).
- **מעבר דגים:** יש לוודא שהמבנה אינו חוסם את תנועת הדגים ואינו משנה את האקולוגיה של הזרם (Jackson, 2003).
- **צמחיית גדות:** יש להימנע מכריתת יתר של צמחייה, שכן היא תורמת לייצוב הגדות ולשימור איכות המים (Coffin, 2007).

- **איכות מים:** בחירת אתרים שבהם לא צפוי זיהום משמעותי או שינוי בהרכב הכימי של המים תסייע בהגנה על המערכת האקולוגית (Forman & Alexander, 1998).

4.4 גורמים הנדסיים

- **יישור ותכנון הדרך:** המעביר צריך להיות בהתאמה לתשתיות כבישים קיימות או מתוכננות, כדי למזער עלויות בנייה (Keller & Sherar, 2003).
- **סוגי רכבים ומשקל תנועה:** יש לשקול את שימושי הדרך (למשל, רכבים קלים, משאיות כבדות, ציוד חקלאי) כדי לקבוע את סוג המעביר המתאים (Gautam & Bhattarai, 2018).
- **היתכנות בנייה:** זמינות חומרים מקומיים (כגון חצץ, בטון, סלעים) יכולה להפחית עלויות והשפעות סביבתיות (Neal, 2012).
- **בטיחות וראות:** אתרים עם שדה ראייה רחב לכלי רכב מתקרבים מבטיחים חצייה בטוחה יותר, במיוחד באזורים המועדים לשיטפונות בזק (McKee et al., 2012).

4.5 תחזוקה לאורך זמן

- **נגישות לתחזוקה:** יש לוודא שהאתר מאפשר פיקוח תקופתי וניקוי סחף.
- **בקרת ארוזיה:** אתרים שדורשים מינימום חיזוקים, כגון אבני מגן או גיאוטקסטילים, הם ברי קיימא יותר (Morris et al., 2016).
- **סיכוני הצטברות סדימנטים:** יש להימנע מאזורים עם עומס סדימנטים גבוה, כדי למנוע צורך בתחזוקה תכופה (Welsh & Anderson, 2009).
- **ניקוז ונתיבי זרימה חלופיים:** יש לוודא שהאתר מאפשר ניקוז תקין וכולל מסלולי זרימה חלופיים למקרי הצפות קיצוניות (Roy & Sahu, 2018).

לסיכום (Take home message):

מאפיינים אידיאליים למיקום מעביר אירי:

- קרקעית יציבה ולא ארוזיבית (סלע, חצץ).
- עומק מים רדוד ויציב.
- תנועת סדימנטים מינימלית.
- גדה מתונה.
- הפרה סביבתית מינימלית.
- ערוץ נחל ישר
- המשך ישיר עם הדרך הקיימת.

מומלץ להימנע:

- קרקעית תלולה עם זרימה מהירה.
- גדה מתפוררת או עשויה חול.
- בתי גידול רגישים או אזורי רבייה.
- עיקולים חדים או ערוצים צרים במיוחד.

5 שימוש במודל HEC-RAS לשיפור בחירת מיקום למעבירים

מודל HEC-RAS הוא כלי סימולציה הידראולי נפוץ המסייע בשיפור בחירת המיקום ותכנון מעבירי מים רדודים על ידי הדמיית דינמיקת זרימה, התנהגות שיטפונות, ותהליכי הסעת סדימנטים

(Brunner, 2016). באמצעות שילוב נתוני טופוגרפיה, תנאי זרימה ומורפולוגיית ערוץ, מודל ה-HEC RAS מסייע להעריך עומק מים, מהירות, וכוחות גזירה באתרים פוטנציאליים, ובכך לסייע באופטימיזציה של מיקום המבנה באזור יציב שאינו רגיש לסחיפה (Hernandez & Charbeneau, 2011). המודל מאפשר ניתוח של תדירות הצפות (למשל, שיטפונות 10 שנים, 50 שנים), ומוודא שהאתר הנבחר יכול לעמוד באירועים הידרולוגיים קיצוניים ללא כשל מבני משמעותי (Gautam & Bhattarai, 2018). בנוסף, סימולציות דו-ממדיות (2D) מאפשרות הערכה מדויקת יותר של פיזור זרימה והשפעות מים חוזרים, (Backwater Effects) דבר החיוני למניעת הצפות במעלה הזרם ולמניעת ארוזיה במעביר (Morris et al., 2016). השימוש ב-RAS-HEC תורם גם להערכות השפעה סביבתית, מסייע בצמצום פגיעה בבתי גידול מימיים, ומאפשר תכנון מעברים השומרים על קישוריות הידראולית למעבר דגים והסעת סדימנטים (Diebel et al., 2015). השימוש במודל HEC-RAS משפר משמעותית את תהליך קבלת ההחלטות בבחירת מיקום למעברי מים רדודים, ומאפשר פתרונות בטוחים, עמידים וברי קיימא.

5.1 ניתוח מעביר בעזרת HEC-RAS: מקרה לדוגמה

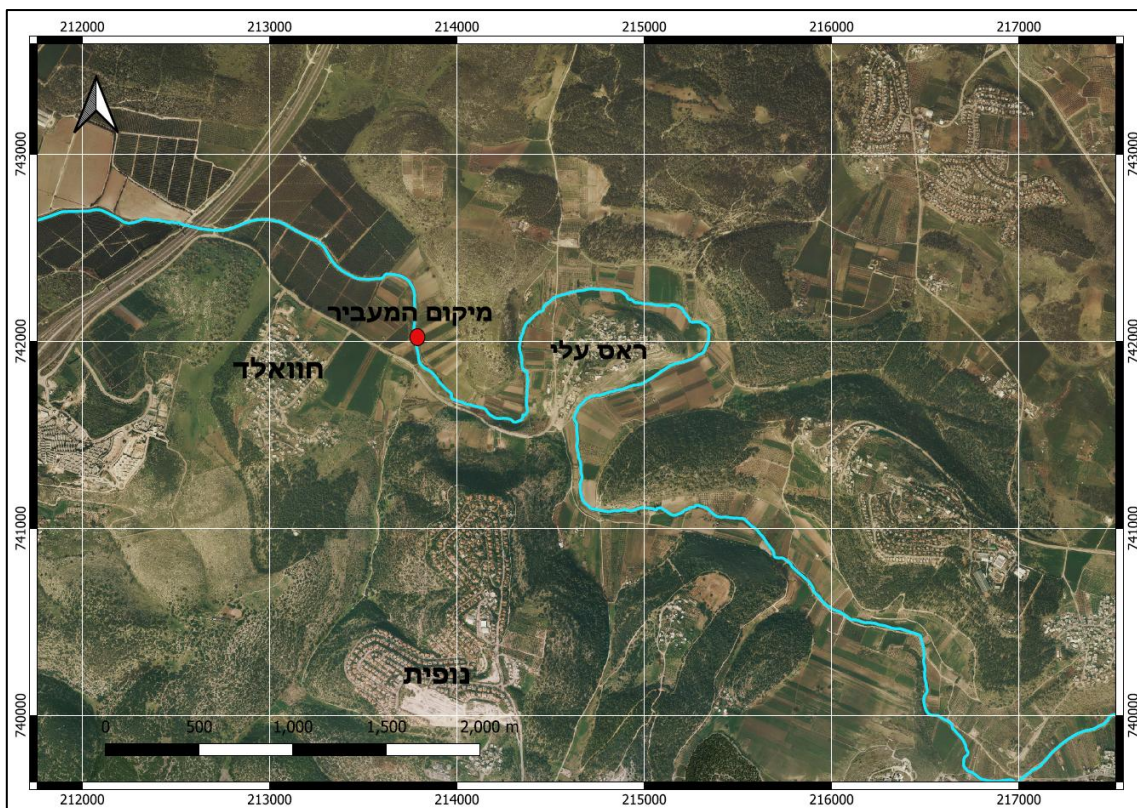
5.1.1 אזור המעביר

מעביר ראס עלי – חוואלד נמצא מערבית לראס עלי, מזרחית לחוואלד, וצפונית לנופית (איור 1). מדובר במעביר אירי שאינו סלול שנמצא על דרך חקלאית. בחלקו המעלי שורת בולדרים החוסמת כניסת כלי רכב לנחל. הגיאולוגיה באזור כוללת תצורות מתקופת האיאוקן התחתון – תיכון; תצורת תמרת הבנויה מסלעי קירטון וקירטון גירי, תצורת מרוז המורכבת מגיר מצורר בחילופין עם קירטון וצור המופיע בעדשות, ותצורת וזרעאל עם גיר ליתוגרפי עם שכבות דקות של צור. הקרקע האופיינית באזור מאופיינת בגרומוסול חום ורנדזינה חומה.

כמות המשקעים בממוצע שנתי באזור היא 560 מ"מ. מעט במעלה המעביר ישנה תחנה הידרומטרית של השירות ההידרולוגי. שטח אגן הניקוז עד לתחנה ההידרומטרית ציפורי-תל-עליל הוא 246 קמ"ר, ועד המעביר 250 קמ"ר. הספיקה ההיסטורית המקסימלית שנמדדה בתחנה היא 133 מ"ק\שניה.

טבלה 1: ספיקות (מ"ק\שניה) לסתברויות שונות (השירות ההידרולוגי - <https://www.floods.online>).

50%	10%	5%	2%	1%
18	30	70	140	160



איור 13: מיקום מעביר ראס עלי – חוואלד.

5.2 נתונים מורפולוגיים

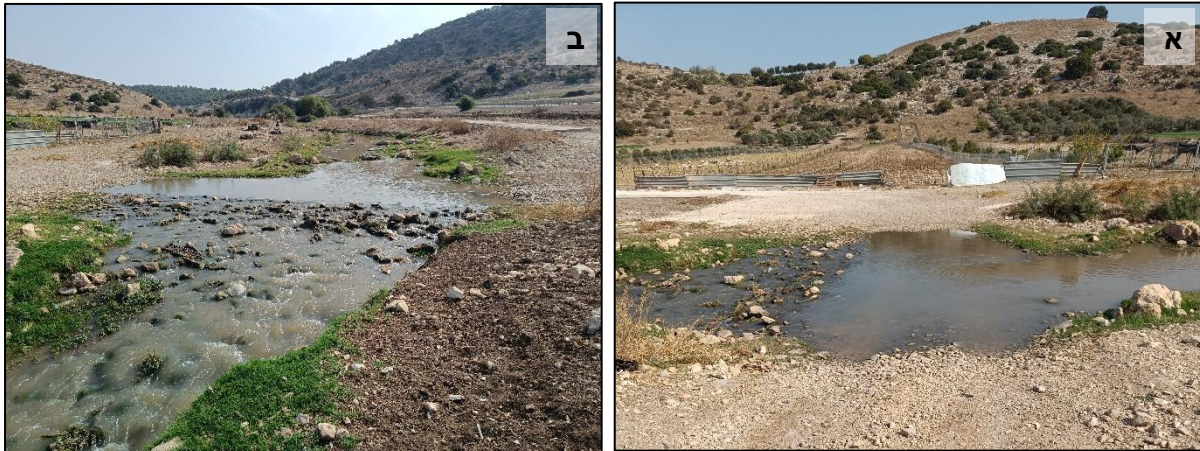
5.2.1 שיטת עבודה

בכדי לבחון את השפעת המעביר הקיים והגשרון המתוכנן נעשה שימוש בתוכנת HEC RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System), תוכנת מידול הידראולית שפותחה על ידי חיל ההנדסה של צבא ארצות הברית. התוכנה ממדלת את מאפייני הזרימה, חוזה מפלטי מים, מהירויות זרימה והצפות בתנאים שונים, וכך מאפשרת לקבוע את הגובה והגודל האופטימליים של המעביר כדי למנוע הצפות מסוכנות, ארוזיית קרקע או כשל מבני. הנתונים ששימשו לביצוע המודל כוללים מדידות טופוגרפיות, ספיקות בהסתברויות של 1:2 ו-1:10 מנתוני השירות ההידרולוגי, ומידות הגשרון המתוכנן.

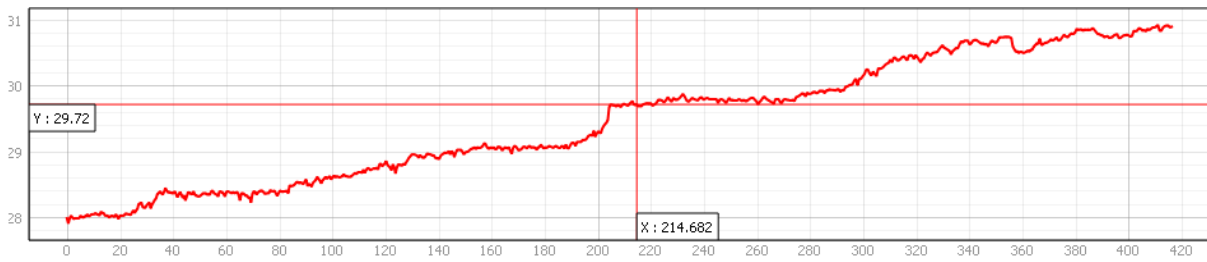
5.2.2 מצב קיים

המעביר כפי שהוא כיום מהווה הפרה מורפולוגית בנחל. כתוצאה מהמעביר שאינו סלול ומוסדר נוצרה הפרה בשיפוע האורכי של הערוץ (איור 2ב, איור 3) כאשר השיפוע במעלה למדרגה 7.1 פרומיל, במורדה 6.5 פרומיל והשיפוע הכללי 7.6 פרומיל, כלומר כתוצאה מהמעביר נוצר שינוי מקומי בשיפוע הערוץ ואי-רציפות ביחס לשיפוע הכללי. בנוסף יש הפרה בחתך הרחב שהתרחב ביחס לרוחב הערוץ הקיים כ-50 מטר במעלה ובמורד למעביר (איורים 2א, 4, 5, 6). גם הזרימה בנחל מופרת, בעיקר

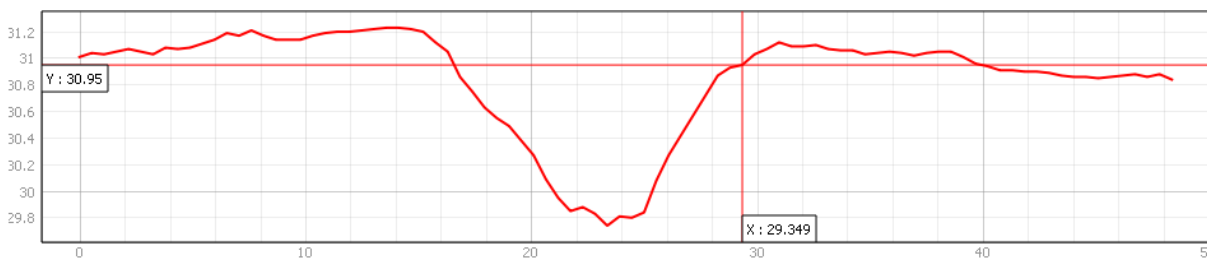
באירועים שיטפוניים, אז המים גולשים לשדות (איור 7). איור 8 מדגים איך משפיע המעביר על זרימת המים בעת אירוע אמיתי.



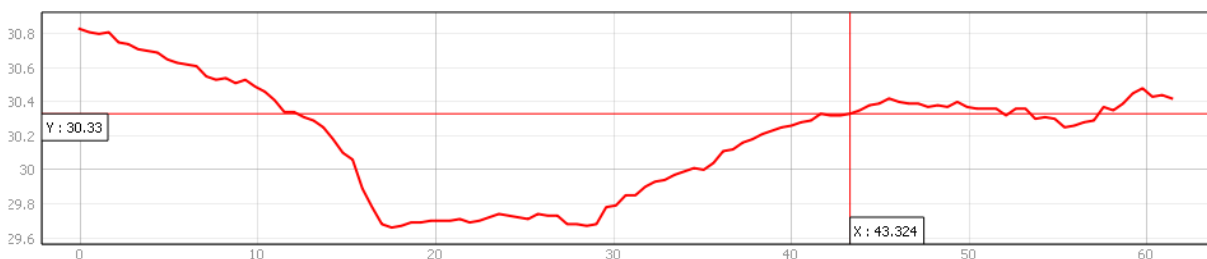
איור 14: א. מבט על המעביר מגדה שמאלית, ב. מבט על המעביר מהמורד.



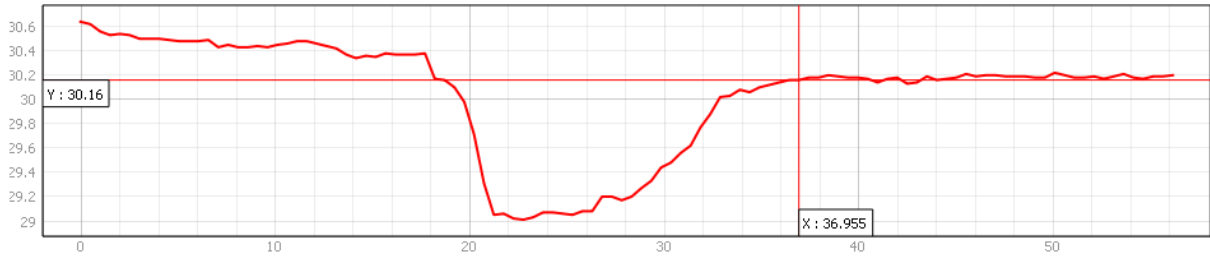
איור 15: פרופיל אורכי של הערוץ לאורך 400 מ' כאשר המעביר באמצע. ניתן לראות את המדרגה שנוצרה.



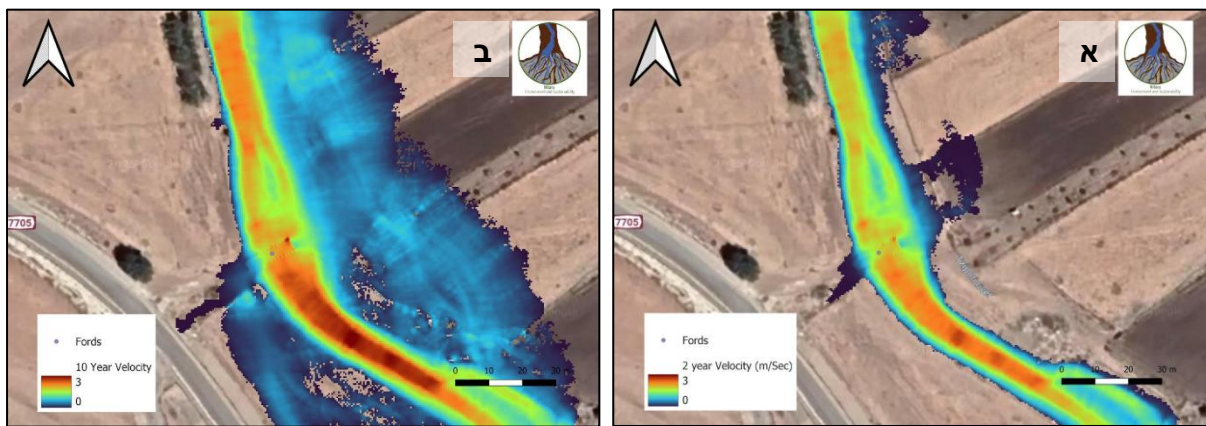
איור 16: חתך הערוץ כ-50 מטר במעלה למעביר.



איור 17: חתך הערוץ במעביר עצמו.



איור 18: חתך הערוץ כ-50 מטר במורד המעביר.



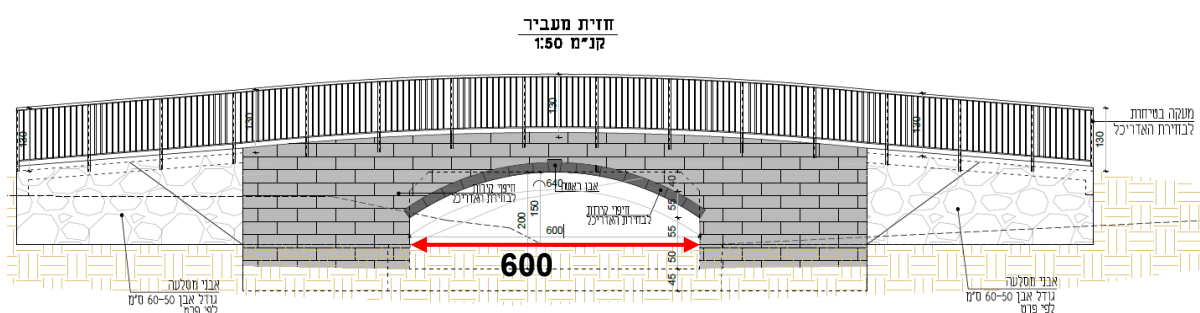
איור 19: (א) מהירות זרימה באזור המעביר בספיקה של 1:2, (ב) מהירות זרימה באזור המעביר בספיקה של 1:10.



איור 20: הצפה באזור המעביר. התמונה תואמת את תוצאת המודל. (צילום חנן אהרון, ינואר 2020, Google Maps).

5.2.3 גשרון מתוכנן

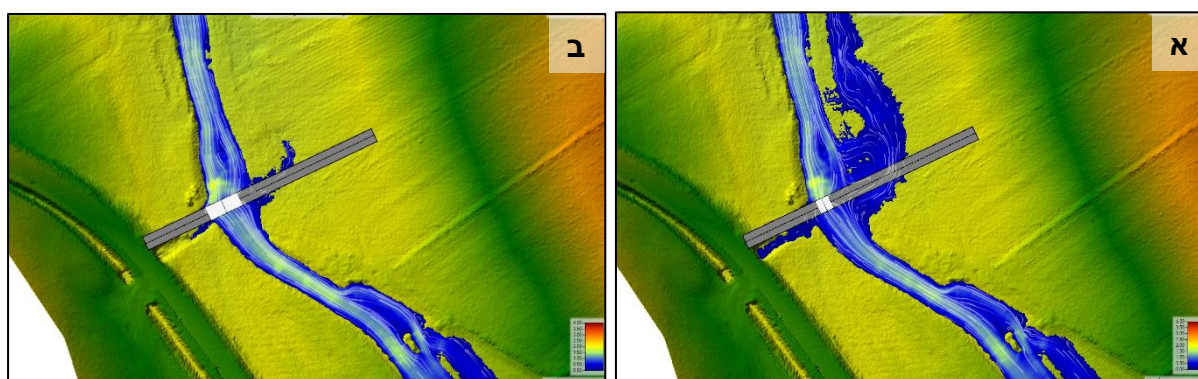
כיום ישנה תוכנית להחליף את המעביר האירי בגשרון. בתכנון המוצע הגשרון הינו בעל מפתח של 6 מטרים (איור 21). באיור 22 ניתן לראות את אופי הזרימה במצבים שונים ואת השפעת הגשרון מתוצאות המודל עולה שמפתח הגשר המתוכנן אינו מספיק להעברת ספיקות בהסתברות 1:2 (מלא גדות). במקרה כזה המתקן המתוכנן יוצר חסם לזרימה והצפת השדה. במצב המוצע, מהירות הזרימה המחושבת במודל תהיה 1.5 מ'שניה. עומס המים בקדמת המתקן והתחתרות במורדו יצרו הפרה בהסעה תקינה של סדימנטים וסיכון ליציבות הגשרון לאורך זמן. באיור 23 המודל הורץ עבור מפתח של 15 מטרים, רוחב המאפשר מעבר של מרבית הזרימה והפחתת נזק למעביר.



איור 21: תכנון גשרון מוצע, מפתח ברוחב 6 מטר.



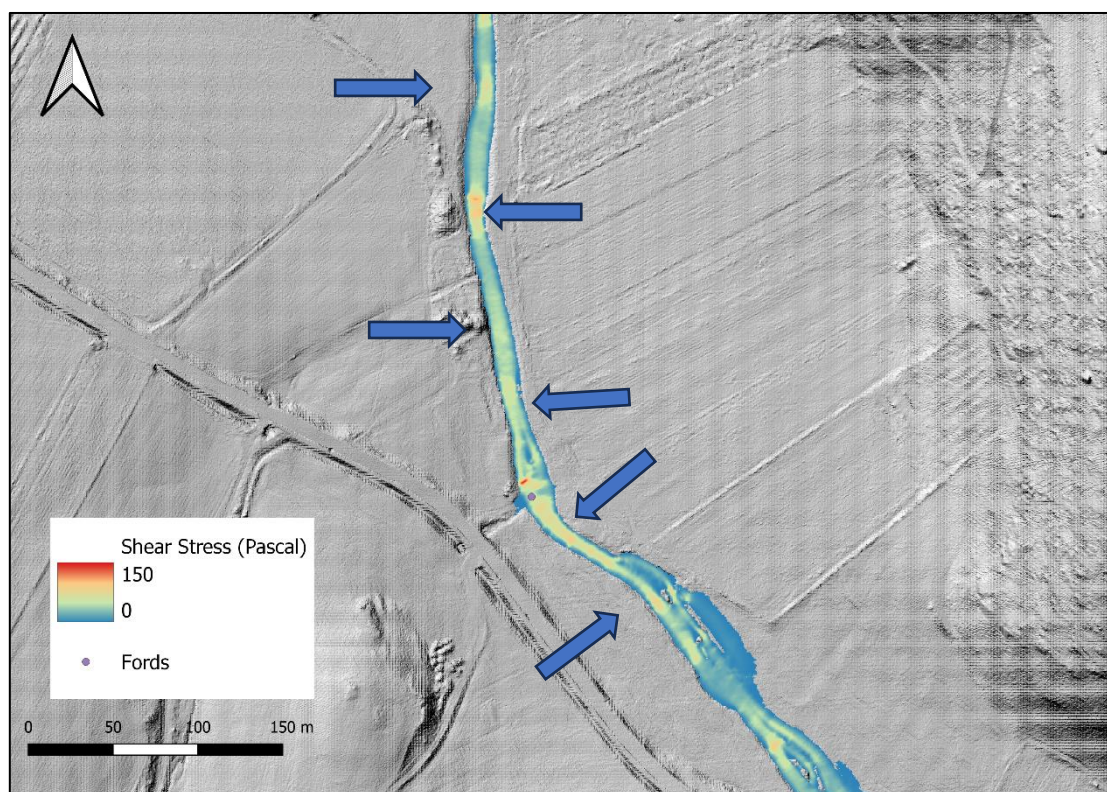
איור 22: אופי הזרימה לפי מודל HEC-RAS א. זרימת בסיס, ב. מלא גדות, ג. 1:10.



איור 23: א. מפתח גשרון מוצע (6 מטר) בשיטפון מלא גדות, זמן חזרה 1:2. ב. מפתח גשרון 15 מטר בשיטפון מלא גדות, זמן חזרה 1:2.

מעבר לדיון ברוחב המפתח, המיקום בו מצוי המעביר מלכתחילה מגביר פוטנציאל סחיפה ונזק כיוון שהוא ממוקם בעיקול נחל. לא מומלץ לבנות מעביר מים בעיקול נחל מכיוון שמדובר באזורים בעלי דינמיקת זרימה מורכבת, שעלולה לסכן את יציבות המבנה ולפגוע בתפקודו לאורך זמן. בעיקול הנחל, הזרימה הופכת לא אחידה: המים מואצים בצד החיצוני של העיקול, יוצרים כוחות חזקים יותר על הגדה ושוחקים את הקרקע סביב יסודות המעביר. במקביל, בצד הפנימי של הנפתול, הזרימה איטית יותר ונוטה לשקיעת סדימנטים, מה שעלול לגרום לסתימות ולהקטין את כושר ההולכה של המעביר.

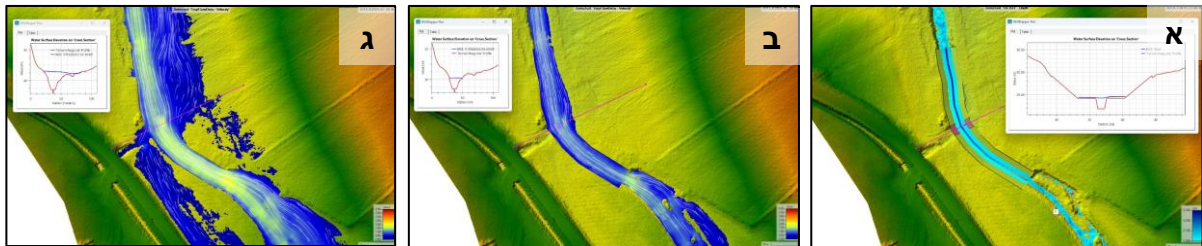
בנוסף, נחלים הם מערכות דינמיות — הנפתול עשוי להשתנות עם הזמן עקב תהליכי סחיפה והצטברות סדימנטים, מה שעלול לגרום למבנה להימצא מחוץ למיקום הזרימה המרכזי או להיחשף ללחצים לא מתוכננים. לכן, עדיף למקם מעביר מים באזור ישר או בקטע יציב יחסית של הנחל, כדי לצמצם את הסיכון לשחיקת יסודות, לשפר את עמידות המבנה, ולהפחית את הצורך בתחזוקה תכופה. בנוסף להפרה המורפולוגית שנגרמה כתוצאה מהמעביר, נראה שבקטע הערוץ המדובר מאמצי הגזירה הגבוהים, יחד עם ההטרוגניות של משטרי הזרימה וסימנים לנסיגת גדות מעידים על אפיק דינמי ולא יציב. במקומות עם מאמצי גזירה גבוהים במיוחד נראים סימנים להתפתחות נפתול (איור 24, חצים כחולים). נראה כי הנחל נמצא בנדידה (migration) ומנסה לייצר מחדש נפתולים היסטוריים שיושרו. לפיכך תוואי הנחל בקטע זה צפוי להשתנות. לאור עובדה זו גשרון בעל מפתח צר עשוי להינזק ולהוות גורם מפר בנחל בהמשך. מעביר בעל מפתח רחב ואמצעים לשמירה על היסודות או מעביר אירי מתוכנן היטב עשויים להוות פתרון יציב יותר לאורך זמן במקטע זה.



איור 24: מפת מאמצי גזירה בספיקת מלא גדות במצב קיים.

למרות שגשרון בעל מפתח רחב הוא פתרון עדיף במקרים רבים על פני מעביר אירי, במקרה המוצג הוא כנראה אינו מתאים לאור התובנות שהתקבלו ממודל ה-HEC-RAS. באופן כללי, מומלץ שלא לבנות במעבירים באזורים לא יציבים בערוץ, עם צפי לתזוזה ותהליכים טבעיים של ארוזייה כגון עיקולים. עם זאת, ובהינתן שזה המיקום היחיד האפשרי, מומלץ להתקין מבנה זול יותר ו"קל" יחסית להזזה עם הזמן. במקרה זה מעביר אירי מתוכנן היטב עשוי להוות פתרון נכון יותר למקום הספציפי הזה.

באזור 25 ישנה דוגמה למעביר אירי משודרג באותה נקודה, שבוצע לאחר תיקון השיפוע האורכי במעלה ובמורד הערוץ, יחד עם תיקון שיפוע הגדות באזור המעביר הקיים. המעביר המשודרג מתוכנן לפי עומק זרימה צפוי בזרימת בסיס ועומק נדרש לשמירת הקישוריות הנדרשת למעבר בעלי חיים. תשתית המעביר מחכה ככל הניתן את תשתית הנחל הטבעית על ידי יציקת חומר מקומי בבטון. אמנם המעביר המוצע הוא היפותטי, אך המטרה היא להראות את יתרונות השימוש במודל בכדי לבצע מתקנים מתאימים ומדויקים יותר בנחל, המתחשבים במגוון התנאים והצרכים הסביבתיים.



איור 25: הרצת מודל HEC-RAS למעביר אירי משופר לאחר תיקון שיפוע אורכי במעלה ובמורד למעביר ותיקון שיפועי הגדות. א. זרימת בסיס, ב. מלא גדות, ג. 1:10.

5.2.4 סיכום ניתוח מעביר

כחלק מתוכנית לשיפור מעבירים בנחל ציפורי הוצע להחליף מעביר אירי לא סלול, במורד ראס-עלי, בגשרון בעל מפתח 6 מטרים. המעביר הנוכחי יוצר הפרה מורפולוגית בנחל, המתבטאת בשינוי השיפוע האורכי ובהתרחבות חתך הרוחב ביחס לערוץ הטבעי. בנוסף, הזרימה מופרת, במיוחד בשיטפונות, כשמים גולשים לשדות. כדי לראות את השפעת הגשרון המוצע על דינמיקת הזרימה בערוץ בוצע שימוש במודל HEC RAS המאפשרת ניתוח הידרולוגי של תרחישים שונים בנחל. המודל מראה שמפתח הגשרון המוצע אינו מספק להעברת ספיקות באירוע מלא גדות (1:2), מה שיוביל לחסימת זרימה, הצפות, והפרעה להסעת סדימנטים. הרצת המודל עם מפתח של 15 מטרים הראתה שפתרון זה מאפשר זרימה טובה יותר, מפחית נזקים, ומשפר את יציבות הגשרון לאורך זמן.

המיקום הנוכחי של המעביר בעיקול הנחל מגביר את פוטנציאל הסחיפה והנזק, שכן דינמיקת הזרימה באזור זה אינה אחידה, מה שמוביל לשחיקת יסודות בצד החיצוני ולהצטברות סדימנטים בצד הפנימי. בנוסף, הנחל במקטע זה דינמי ונתון לנסיגת גדות ונדידה טבעית, מה שעלול לשנות את מסלול הזרימה ולחשוף את המבנה ללחצים בלתי צפויים. לכן, כדי להבטיח יציבות לאורך זמן, יש לשקול

מעביר בעל מפתח רחב עם הגנות מתאימות ליסודות או מעביר אירי מתוכנן היטב שיתאים לשינויים העתידיים בתוואי הנחל. מידול של מעביר אירי משודרג לאחר תיקוני שיפוע בערוץ הראה צמצום בממדי ההצפה והפחתת הנזק למעביר וסביבתו.

6 סיכום

תכנון מעבירי מים בנחלים מהווה מרכיב מרכזי בניהול בר-קיימא של מערכות הידרולוגיות ואקולוגיות. מעבר לדרישות ההנדסיות הבסיסיות, ישנה חשיבות מכרעת לשמירה על הזרימה הטבעית של הנחל, אשר חיונית לשימור המערכת האקולוגית ולמניעת פגיעה ביציבות המבנה לאורך זמן. תכנון נכון של מעבירי מים, תוך התחשבות במורפולוגיית הערוץ, בדפוסי הזרימה ובגורמים סביבתיים נוספים, מסייע בהפחתת סיכונים כגון שחיקת יסודות, הצפות, ופגיעה במערכת האקולוגית, וכן תורם להארכת חיי המבנה ולהפחתת הצורך בתחזוקה אינטנסיבית.

השימוש במודל RAS-HEC (River Analysis System – Hydraulic Engineering Center) לתכנון מעבירים מדגיש את חשיבותו של תכנון מבוסס נתונים, הנשען על הבנה מעמיקה של תהליכים הידרולוגיים ומורפולוגיים. המודל מאפשר לבצע סימולציות מדויקות של תנאי זרימה שונים, ובכך לסייע באופטימיזציה של תכנון המעביר, על מנת להבטיח את תפקודו היעיל לאורך זמן ולהתאים אותו לתנאים הספציפיים של האתר. ניתוח הנתונים מצביע על כך שאין פתרון אוניברסלי לתכנון מעבירי מים, וכי על הבחירה בסוג המעביר להתבצע בהתאם למאפיינים הייחודיים של כל אתר. לצד ההיבטים התכנוניים המקומיים, קיימת חשיבות רבה לגיבוש מתודולוגיה ארצית וקווים מנחים מוסכמים לתכנון, שיפור ובניית מעבירי מים בנחלים. מתודולוגיה אחידה תסייע ליצור סטנדרטים מחייבים שיבטיחו כי המעבירים יתוכננו ויבנו בהתאם לעקרונות הידרולוגיים, מורפולוגיים ואקולוגיים מיטביים. גישה זו תאפשר יצירת תשתיות אחידות ועמידות יותר, תצמצם את השפעותיהם השליליות של מעבירים על המערכת האקולוגית ותסייע במניעת כשלים הנדסיים הנובעים מתכנון לא מתאים. באמצעות קביעת קווים מנחים מחייבים, ניתן יהיה להבטיח כי תכנון המעבירים יותאם לסוג הנחל ולמאפייניו הייחודיים, תוך שימוש בכלים מתקדמים כדוגמת מודלים הידרודינמיים והדמיות תלת-ממדיות. מתודולוגיה זו תסייע גם בהפחתת עלויות התחזוקה והבנייה על ידי צמצום הצורך בתיקונים עתידיים ושיקום נזקים הנובעים מכשלים תכנוניים. יתר על כן, מתודולוגיה ארצית תספק מסגרת לקבלת החלטות אחידות עבור מתכננים, מהנדסים וקובעי מדיניות, ובכך תיעל את תהליכי התכנון ותאפשר פתרונות בני-קיימא לאורך זמן.

7 מקורות

רשות המים: <https://www.floods.online>

- Avolio, C.M. (2003). *The local impacts of road crossings on Puget Lowland creeks*. University of Washington.
- Booth, D.B. & McBride, M. (2005). *Urban impacts on physical stream condition: effects of spatial scale, connectivity, and longitudinal trends*. JAWRA Journal of the American Water Resources Association.
- Brunner, G.W. (2016). *HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual*. U.S. Army Corps of Engineers.
- Bylak, A., & Kukuła, K. (2018). *Concrete slab ford crossing—an anthropogenic factor modifying aquatic invertebrate communities*. Aquatic Ecosystem Health & Management.
- Coffin, A.W. (2007). *From roadkill to road ecology: A review of the ecological effects of roads*. Journal of Transport Geography.
- Coleman, R. 2018. <https://www.dcr.virginia.gov/soil-and-water/document/des-stream-crossings.pdf>
- Diebel, M.W., Fedora, M., Cogswell, S., & others. (2015). *Effects of road crossings on habitat connectivity for stream-resident fish*. River Research and Applications.
- Forman, R.T.T., & Alexander, L.E. (1998). *Roads and their major ecological effects*. Annual Review of Ecology and Systematics.
- Gautam, S., & Bhattarai, R. (2018). *Low-water crossings: An overview of designs implemented along rural, low-volume roads*. Environments, 5(2), 22.
- Google maps:
https://www.google.com/maps/@32.7707253,35.1451721,3a,19.4y,188.67h,63.82t/data=!3m1!1e1!3m9!1sAF1QipN7Ccu28CU7Ohy69cHnS8ARB1aEyztv30qbxpyo!2e10!3e11!6shttps:%2F%2Fih3.googleusercontent.com%2Fp%2FAF1QipN7Ccu28CU7Ohy69cHnS8ARB1aEyztv30qbxpyo%3Dw900-h600-k-no-pi26.18393445185516-ya188.6679930628939-ro0fo100!7i8192!8i4096!9m2!1b1!2i18?authuser=0&entry=ttu&q_ep=EgoyMDI1MDIxOC4wIKXMDSOJLDEwMjExNDU1SAFQAw%3D%3D
- Hernandez, M., & Charbeneau, R.J. (2011). *Hydraulic modelling of stream crossings using HEC-RAS: Application to low-water crossings*. Journal of Hydrologic Engineering, 16(9), 755-762.
- Jackson, S.D. (2003). Design and construction of aquatic organism passage at road-stream crossings: ecological considerations in the design of river and stream

- crossings. Pages 20–29 in *Proceedings of the International Conference of Ecology and Transportation*. Center for Transportation and the Environment, North Carolina State University, Raleigh.
- Keller, G., & Sherar, J. (2003). *Low-volume roads engineering: Best management practices*. Transportation Research Record.
- Key, E. 2014. <https://www.slideshare.net/slideshow/armoured-ford-low-water-road/41422004>
- Marcus, W.A. & Blanton, P. (2009). *Railroads, roads, and lateral disconnection in the river landscapes of the United States*. Geomorphology.
- McKee, S.E., Shenk, L.A., & Bolding, M.C. (2012). *Stream crossing methods, costs, and closure best management practices for Virginia loggers*. Southern Journal of Applied Forestry.
- Morris, B.C., Bolding, M.C., Aust, W.M., & McGuire, K.J. (2016). *Differing levels of forestry best management practices at stream crossing structures affect sediment delivery and installation costs*. Water, 8(3), 92.
- Neal, I. (2012). *The potential of sand dam road crossings*. Dams and Reservoirs.
- Roy, S., & Sahu, A.S. (2018). *Road-stream crossing as an in-stream intervention to alter channel morphology of headwater streams: case study*. International Journal of River Basin Management.
- Welsh, S.A., & Anderson, J.T. (2009). *Influences of high-flow events on a stream channel altered by construction of a highway bridge: A case study*. Northeastern Naturalist.