

## דו"ח גיאומורפולוגי- תוואי ותשתית בתוואי

### החדש של נחל נעמן

ד"ר יעל סטורץ-פרץ, ד"ר נתי ברגמן

#### א. קביעת דגם ערוץ הנחל

נחל נעמן זורם כיום בתעלה ישרה שנבנתה בימי המנדט הבריטי. לפני בניית התעלה אזור הנחל היה למעשה ביצה, לכן חסרה נקודת התייחסות היסטורית שממנה ניתן ללמוד על צורתו המקורית. צורת נחל, הדגם המרחבי שלו והמורפומטריה, נקבעים על ידי מספר פרמטרים, כגון הספיקות, שיפוע העמק, פילוג גודל גרגר וכן תהליכים ודינאמיקה בתוך הערוץ עצמו (Schumm, 1985). על מנת לקבוע את דגם הערוץ המיטבי, המשמר צורתו ואת התהליכים הגיאומורפיים המתאימים, יש לקחת בחשבון פרמטרים אלו בבחירת הדגם המועדף לבניית ערוץ נחל הנעמן החדש.

קטע הערוץ המתוכנן מתחיל ביציאת נחל הנעמן משמורת עין אפק ומסתיים בכניסת תעלה 42 לערוץ הראשי. אורך קטע זה בקו אווירי הוא כ-1250 מ' לאורך התשתית ובעל שיפוע של 0.0042. הנחל והגדות מורכבים מחומר סילטי-חרסיתי ואין לערוץ אספקה של סדימנט גס מגודל חול ומעלה. לכן, הסחף בנחל הנעמן מוסע כרחופת. סוג ההסעה וגודל פילוג גודל הגרגר חשובים כי הם אלו שקובעים לא רק את דגם הערוץ אלא גם את צורות התשתית על הקרקעית (Church, 2006).

בתנאי שיפוע נמוכים, סחף עדין גרגר ונחל חד-תעלתי, נמצא על פי מחקרים סטטיסטיים ופיסיקליים כי דגם מפותל של הנחל הוא המתאים ביותר (Schumm, 1985; Rosgen, 1994; Church, 2006). דרגת הפיתוליות מחושבת על ידי המרחק האווירי של קטע הערוץ חלקי אורך הערוץ בפועל. אורך הערוץ נמדד ע"י העברת קו לאורכו במרכז הערוץ. בתנאים אלו הקיימים בנחל הנעמן, דרגת הפיתוליות היא לרוב 1.4 ומעלה. ערך פיתוליות 1.5 מוסכם (איור 1).

במקרים של ערוצים מפותלים ודקי-גרגר, רמת הקוהזיביות הגבוהה של הגדות מאפשרת יחס עומק רוחב קטן (>10-15) בו הגדות יחסית יציבות ומכאן שרוחב הערוץ לרוב אינו משתנה לאורכו של הערוץ (Langbein and Leopold, 1966). הצמחייה על הגדות אף מגבירה את היציבות ורוב הסחף המוסע מקורו בתשתית. כתוצאה מכך התשתית משתנה לעיתים קרובות (Church, 2006). בנוסף, ככל שרמת הפיתוליות עולה, הסיכוי לחיתוך הפיתולים בזרימות גבוהות יותר עולה באמצעות מנגנוני חיתוך שונים ותוואי הערוץ משתנה בהתאם (Schumm, 1985).

כדי לתכנן תוואי בו נשמר הדגם המפותל לאורך זמן והגדות יחסית יציבות כדאי לקחת בחשבון את רדיוס הפיתול. רדיוס הפיתול הוא למעשה רדיוס המעגל המשיק לפיתול (למרכז הפיתול). רדיוס הפיתול לרוב מחושב על ידי מהנדסים ומתכננים להיות פי שלושה ומעלה מרוחב הערוץ בזרימה הגבוהה ביותר. גיאומורפולוגים זיהו ממחקריהם כי היחס בין רוחב הערוץ לרדיוס הפיתול לרוב עומד על ערך

בין 2-3 (Nanson & Hickin, 1983). יחס הקטן מ-2 מעיד על פיתולים צרים וחתירה מוגברת בגדות הפיתול החיצוניות (Lagasse et al, 2004).

כאשר רוחב ערוץ נחל הנעמן המקסימלי מתוכנן לספיקת תכן 10% ומגיע לכ-16.5 מ', רדיוס הפיתול אמור לעמוד על כ-50 מטרים. אך לרוב מקובל לחשב את רדיוס הערוץ ביחס לרוחב הערוץ בזרימה מלאת-גדות (Williams, 1986) המוגדרת כספיקת שיא עם תקופת חזרה של 1.5-2 שנים. בנוסף, הערוץ בעל גדות קוהזיביות ותכנון לצמחייה עבותה ולכן הגדות יהיו פחות זמינות לסחיפה, גם בפיתולים.

רדיוס הפיתול ואורכו משתנים מפיתול לפיתול כדי לדמות ערוץ נחל טבעי שאינו סימטרי. בנוסף, קיימת מגבלה לשטח התחום בקו הכחול של התכנית. עקב כך ממדי הפיתולים הוכתבו לבסוף על ידי גבולות הקו הכחול. כדי לשמור על ערך הפיתוליות, תוכננו פיתולים משני סדרי גודל – מסדר ראשון אלו הם הפיתולים הגדולים ובהם קיימים פיתולים מסדר גודל שני קטנים יותר. אורך הקטע המתוכנן בפועל (מדידה במרכז הערוץ) המתחשב בגבולות הקו הכחול הוא 1881 מ' ולכן מצליח לעמוד בערך הפיתוליות שנקבע ל-1.5. תוואי הערוץ בזרימות השנתיות הנתונות מתפתל אף יותר סביב שרטונות הצד וכתוצאה מכך בזרימות הבסיס השנתיות, הנמוכות והגבוהות, ערך הפיתוליות גבוה יותר מזה המתוכנן לספיקת תכן של 10%.

השיפוע הכללי המחושב לתוואי המפותל הוא 0.0028. על מנת להגביר את שיפוע הערוץ, הוחלט ע"י המתכננים להגביה את היציאה מעין אפק בכ-0.5 מ' ולכן השיפוע החדש יעמוד על 0.0031.



איור 1. תוואי נחל הנעמן בתחומי הקו הכחול.

## ב. קביעת צורות התשתית בערוץ המתוכנן

פילוג גודל הגרגר בנחל, הסידור המרחבי שלו בתשתית והתהליכים המתרחשים בנחל קובעים את צורות התשתית המתפתחות על קרקעית הערוץ. ערוץ הנעמן מכיל ומסיע סחף סילטי-חרסיתי. לכן, כל הסחף בנחל הנעמן הוא חומר שמוסע כרחופת, ולא כגרופת, המסיעה את סדימנט בצמוד לקרקעית. בערוץ נחל חד-תעלתי המאופיין בפילוג גרגר כה עדין, לא אמורות להתפתח כמעט צורות תשתית בגלל המחסור בסחף המוסע כגרופת (Church, 2006). לכן, באופן טבעי ערוץ נחל הנעמן אמור להיות לרוב הומוגני מבחינת הארגון המרחבי של פילוג גודל הגרגר וכן גופי השקעה בתשתית הערוץ ולא אמורות להתפתח צורות תשתית למעט גופי השקעה כגון שרטונות צד (point bars) בחלקם הפנימי של הנפתולים. לרוב, שרטונות צד נוצרים בנחלים חלוקיים אך הם יכולים להיות מורכבים גם מחומר דק-גרגר (Nanson, 1980).

בערוץ מפותל, זרימת המים מהירה בחלק החיצוני של הפיתול בגלל שמירת המומנטום ולכן מתרחשת באזור זה התחתרות. לעומת זאת, בצדו הפנימי של הפיתול הזרימה איטית יותר בגלל התנתקותה מהגדה הנגרמת מהפיתול. הירידה במהירויות הזרימה באזור זה מאפשרת השקעה של סחף ויצירת שרטונות צד (Nelson & Smith, 1989). לכן, בערוץ נחל הנעמן המפותל, נצפה למצוא שרטונות אלו הבנויים בעיקר מסחף דק-גרגר כיוון שבאופן טבעי זהו הסדימנט שמוסע בערוץ.

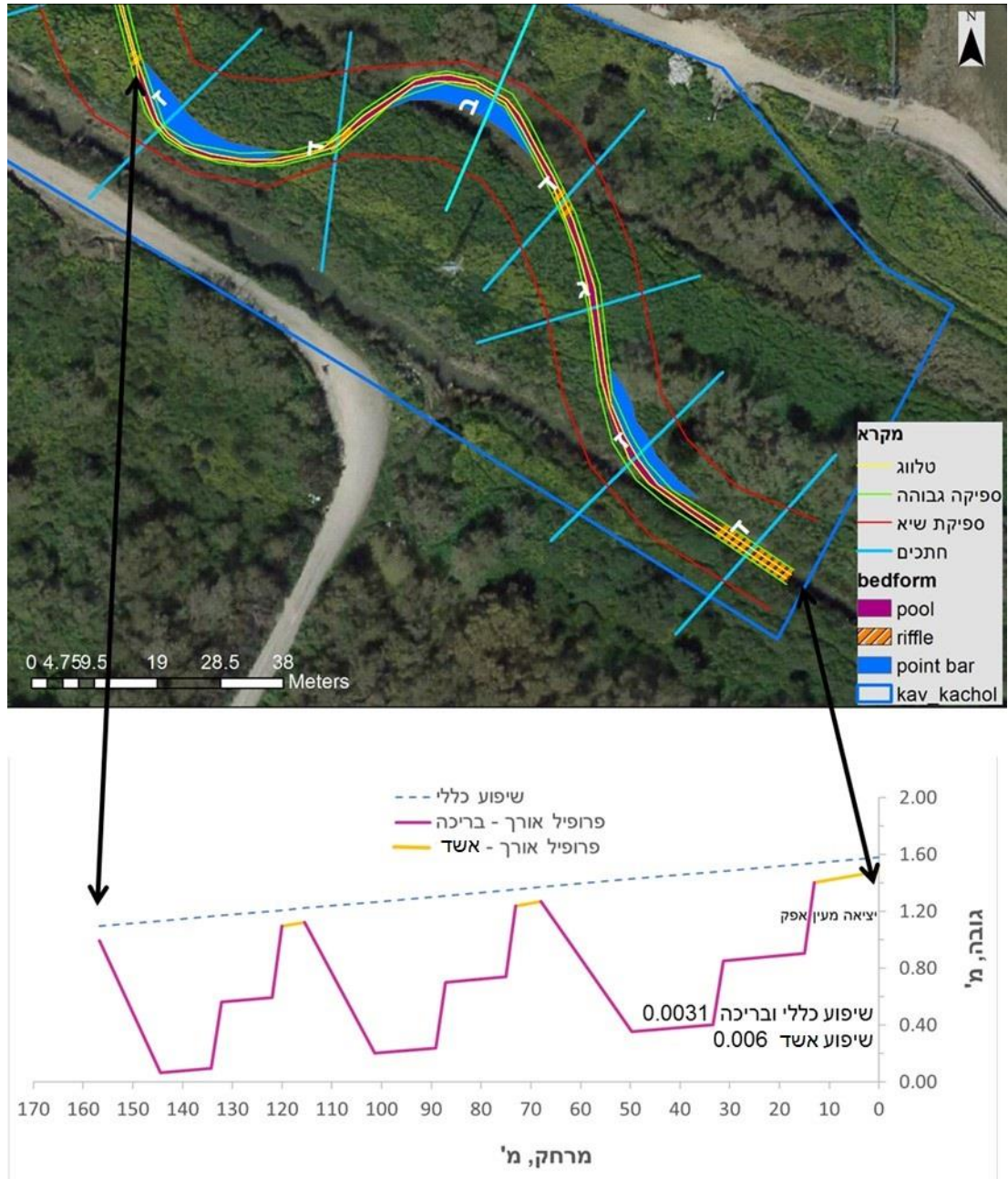
למרות מאפיינים אלו, אחת המטרות של מתכנני הערוץ היא להעשיר את המגוון הביולוגי על ידי יצירת בתי גידול שאינם קיימים כיום בערוץ נחל הנעמן באופן טבעי. בתי גידול אלו לרוב מאופיינים באחוז גבוה של חלוקים גסים מתוך פילוג גודל הגרגר וכן במהירויות זרימה גבוהות יותר המאפשרות יותר חמצן במים. כדי ליצור הטרוגניות בפרופיל האורך של הערוץ בפילוג גודל הגרגר וכן בשיפועים, הוחלט לפתח צורות תשתית החוזרות לסירוגין לכל אורך הערוץ המתוכנן (איור 2). צורות אלו מוגדרות כבריכות ואשדות (pools and riffles) וניתן למצוא אותן בנחלים חלוקיים עם שיפועים נמוכים. אשדות הם מקטעים בערוץ אשר בהן השיפועים גבוהים יותר מהממוצע בערוץ המובילים להגברה במהירויות הזרימה וכן יצירת מערבולות בזרימות נמוכות. לכן, במקטעים אלו מתאפשר ניפוי של סחף דק וריכוז של החלוקים הגסים יותר. ככל שהספיקה תעלה וומאמצי הגזירה שיופעלו על התשתית יגדלו, החלוקים שינופו יכללו יותר חלוקים גסים. במורד האשד נוצרת בריכה עמוקה יותר מתשתית הערוץ הממוצעת. בבריכות, השיפועים נמוכים יותר והזרימה שקטה יותר ביחס לאשדות. בספיקות נמוכות, החלק המורדי של הבריכות מהווה מחסום לסחף וכתוצאה מכך שוקע בתוכם אותו סדימנט דק-גרגר המנופה מהאשדות במעלה. בזרימות גבוהות יותר, מתקיימים תהליכי ניפוי וסחיפה של החומר הדק גם מתוך הבריכות עצמן והשקעתו על אזורי האשדות במורד. בתנאים אלו יחשפו החלוקים הגסים יותר בתחתית הערוץ ויגיעו נוספים מאזורי האשדות (Lisle, 1979).

מאחר והאשדות אמורים להיות גסי-גרגר יותר מהבריכות, ובהם קיימת הסעה של סחף עקב השיפועים הגבוהים יותר, יש להציב ולוודא כי פילוג גודל הגרגר מספיק גדול כדי שגוף ההתפלגות המרכזי והזנב העדין והגס והעליון שלו לא ישטפו בזמן אירועי זרימה גבוהים. שלא כמו בנחל חלוקי

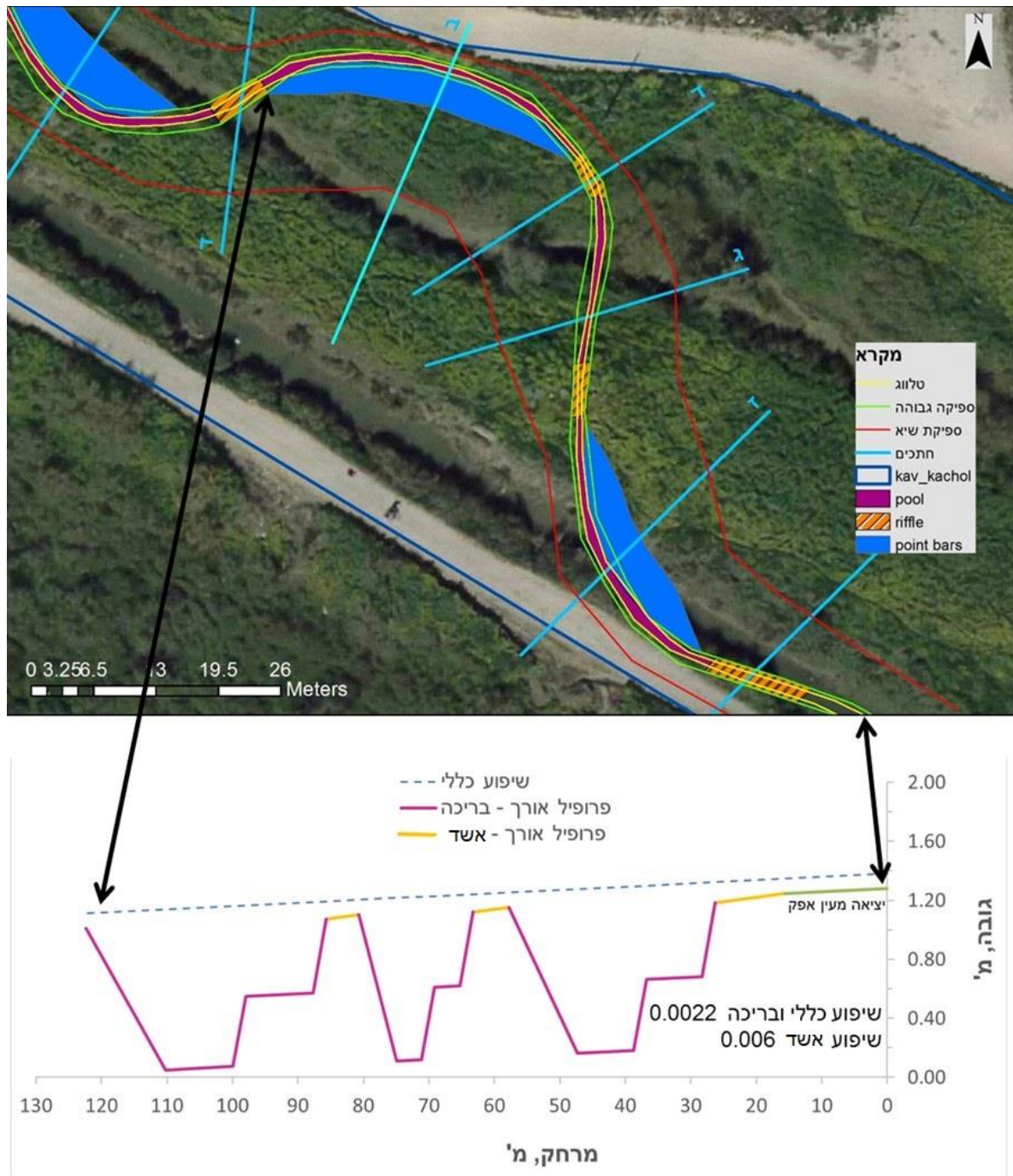
טבעי, לא קיימת אספקה של חלוקים בערוץ שתחליף את אלו שנסחפו. בבריכות מומלץ גם להחדיר חלוקים אם כי באחוז נמוך בהרבה מזה שבאשדות.

בנחלים המאופיינים בזרימה שנתית, הסחף המוסע, והוא זה השוקע בתור שירטון, לרוב דק-גרגר יותר מהחומר הבונה את התשתית. לכן, שרטונות הצד בנחלים מפותלים בעלי זרימה איתנה אמורים להיות בממוצע עדיני-גרגר ביחס לערוץ הסמוך (Lisle & Madej, 1992). יתרה מזו, ככל שהערוץ מפותל יותר וא-סימטרי, כך הבריכות עמוקות יותר ופילוג גודל הגרגר בהן דק יותר ודומה לזה של השרטון הסמוך (Milne, 1982). עקב כך מומלץ לבנות את השרטונות מהחומר הדק המאפיין את נחל הנעמן שממילא יושקע בהם במשך הזמן. ניתן לערבב בשרטונות גם חלוקים גסים יותר אך אין צורך בשרטונות גסים וממוגנים בדומה לאשדות. דו"ח פילוג גודל גרגר מומלץ וחישוב נפחים של סחף גס לתשתית הערוץ מוגש בנפרד.

המרחק הממוצע בין אשד לאשד עומד על כ-7 פעמים רוחב הערוץ. לכן בממוצע המרחק בין תחילת אשד לזה במורדו בממוצע 40 מ' ואורך האשד נע בטווח בין 5-10 מ'. נקבע בהתאם למגוון הביולוגי המבוקש, שעומק הבריכות יכלול בספיקת בסיס שני עומקים, חצי מטר ומטר המתאים למינים אקולוגיים ספציפיים (איורים 2-3).



איור 2. דוגמה לתוואי הערוץ עם האלמנטים המורפולוגיים שרטונות, אשדות ובריכות ופרופיל האורך של הטלוג במקטע זה.



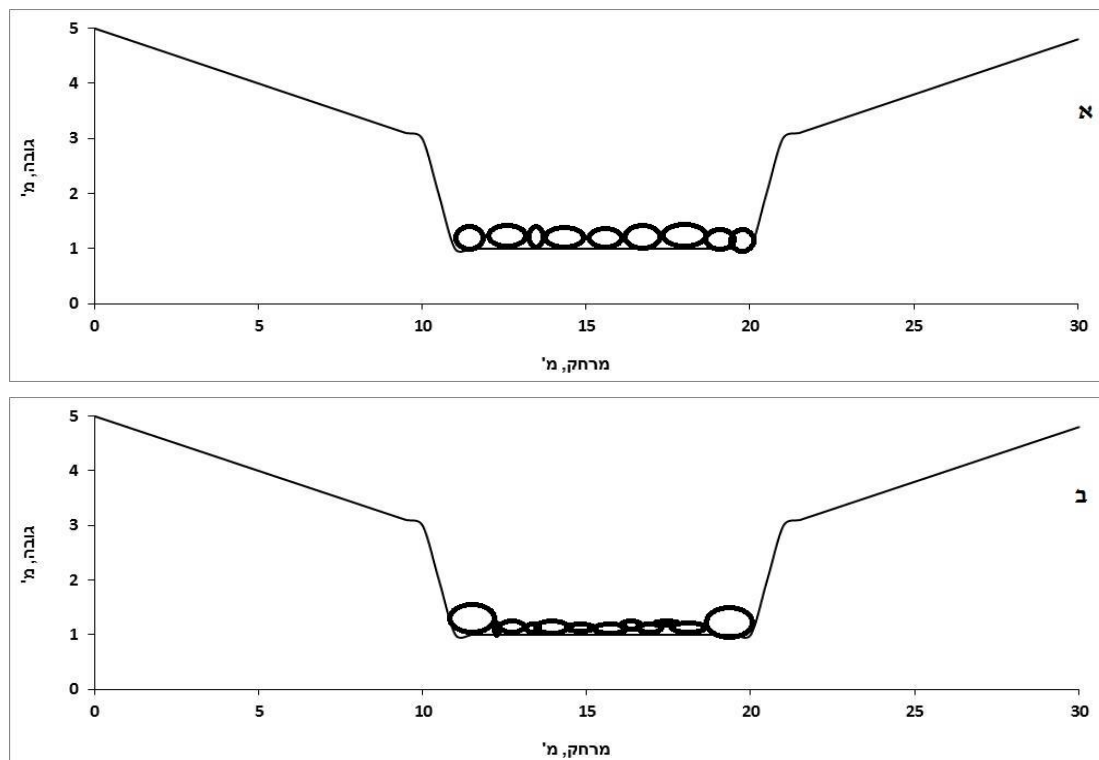
איור 3. דוגמה לתוואי הערוץ עם האלמנטים המורפולוגיים שרטונות, אשדות ובריכות ופרופיל האורך של הטלוג במקטע זה.

#### ג. חספוס הקטעים החלוקיים

הקטעים החלוקיים יצרו מעברים חדים מאד בחספוס מתשתית חרסיתית לתשתית חלוקית. תשתית חרסיתית חלקה, בהנחה שאינה עם צמחיה טבולה, בעלת ערכי חספוס מנינג בטווח של  $0.016-0.025$ . קיום של צמחיה טבולה באפיק תעלה את החספוס לטווח של  $0.022-0.033$  (Chow, 1959). לעומת זאת, חספוס תשתית חלוקית תלויה במאון (percentile) גבוה של ההתפלגות כגון  $d_{84}$ .

שמייצג את גובה התשתית (Cheng, 2015) אם כי אפשר להציב ערכים גנריים בטווח של 0.04-0.05 עד 0.07 (Chow, 1959). חשוב גם לציין שסביר להניח שצמחייה טבולה תיתלש לגמרי בספיקות גבוהות, החספוס ירד לערכי תשתית חרסיתית חלקה, ולכן היא שונה מאד מבחינת חספוס מהאזורים החלוקיים שאמורים להישאר לאורך זמן במגוון ספיקות, גם אם הזנבות הדקים של ההתפלגויות יוסעו ולא יחודשו.

באזורים החלוקיים, יהיו שני סוגי חתכים לכל צורת תשתית (עבור הבריכות ואשדות) בהתאם לסידור החלוקים בתשתית. חתך בודד ייצג את המדרגות ויראה כסדרת בולדרים לרוחב הנחל. בחתך מעבר מאזור חרסיתי לחלוקי תהיה מסגרת בולדרים שתגן חלקית על צורת התשתית (איור 4א). לכן, החספוס בחתך זה לכל רוחבו הוא אחיד כשהחספוס גבוה יותר בסמוך לשתי הגדות. כך גם יראה חתך רוחב של מדרגה. סוג החתך השני יהיה בתוך צורת התשתית ולכן יהיו בולדרים בסמוך לגדות (כחלק מהמסגרת) אולם בתוך האפיק עצמו החספוס יהיה קטן יותר ונמוך יותר עקב גודל החלוקים (איור 4ב).



איור 4. חתכי רוחב סכמתיים במעבר בין צורות תשתית (א) ובתוכן (ב). בחתכי מעברים יהיה חספוס גדול יותר עקב מסגרות הבולדרים. בתוך צורת התשתית החספוס הגבוה ביותר יהיה בסמוך לגדות שם יהיו בולדרים של המסגרת אבל בתוך האפיק עצמו החספוס יהיה נמוך יותר הן בגלל גובה התשתית הנמוך יותר והן בגלל גודל החלוקים הקטן יותר.

איור 5. מציג דוגמה למעבר מבריכה למדרגה. בספיקות נמוכות החספוס והשינויים בשיפועים יצרו חמצון של המים ואילו בספיקות גבוהות יותר פני המים יהיו יותר חלקים עקב העומק הגדול וההיעלמות הקפיצה ההידראולית (או זנק הידראולי).



איור 5. פרופיל צד ומעבר בין צורות תשתית חלוקיות במזרם היוצרות זנק הידראולי. ניתן לראות את השינויים בשיפוע, הערמות המים לאחור במורד המפל וחמצון של המים במערבל.

על מנת לחשב את החספוס ( $n$ ) המדויק בכל צורת תשתית השתמשנו בנוסחה הבאה מתוך Limerinos (1970):

$$n = [0.0926/(1.16+2\log R/d_{84})]R^{1/6} \quad (1)$$

כאשר  $R$  הוא רדיוס הידראולי.

התוצאות מוצגות בטבלה 1. ניתן לראות שיש ערכי חספוס גבוהים מאד כשהעומק רדוד ( $R=1$  מ') עבור שלושת צורות התשתית כיוון שבליטות החלוקים תופסת חלק נרחב משטח החתך הרטוב. אולם, כשהרדיוס ההידראולי גדל ( $R=1.5$  מ') הערכים צונחים בצורה משמעותית עבור בריכות ואשדות ומעומק מסוים החספוסים נותרים זהים בלי קשר לעליה ברדיוס ההידראולי. עבור מדרגות המקרה קצת שונה כיוון שהן תופסות חלק ניכר מהחתך בכל הספיקות. הערכים המחושבים (טבלה 1) וערכים גנריים לפי אופי החתך (Chow, 1959) די דומים ולא ניתן לקבוע ששיטה אחת עדיפה על השנייה.



**טבלה 1. ערכי חספוס מנינג מחושבים לפי נוסחה 1 עבור שלושת צורות התשתית.**

רדיוס הידראולי, מ'							גודל גרגר, מ"מ	
4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	$d_{84}$	
0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.08	215	מעבר
0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.08	119	פנים צורת תשתית
0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.08	430	מעבר
0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.08	294	פנים צורת תשתית
0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	996	מדרגה

**ז. חספוס פשט ההצפה**

חספוס פשט ההצפה יהיה תלוי בצפיפות הצמחייה הנטועה ולאורך זמן האם יבוצע ממשק של גיזום וניקוי הנשר של ענפים ועלים. על מנת לקבוע את הצפיפות הראשונית של נטיעת צמחיית הגדות יש לעיין במסמכים דוגמת Arcement and Schneider (1989) ו-Coon (1998). בארץ, נחלי איתן ותעלות ניקוז מקיימים צמחיית קנים צפופה שמשתלטת על הגדות ולעיתים גם על האפיק עצמו אם הזרימה איטית. למעשה, במקרים של שיטפון מעבר למלא-גדות צמחיה קנית גורמת לעליה דראסטית בגובה המים והצפות ולכן במקרים רבים רשויות ניקוז מסירות אותה לגמרי או עושות כיסוח מסיבי (השארת רק הגדמים) לפני תחילת כל עונת הגשמים. אמנם ממשק מסוג זה פותח לגמרי את האפיק ופשטי ההצפה אבל גורם לנזק אקולוגי כבד וגם חושף את הקרקע באזור הפגוע לסחיפה עד חידוש והתאוששות הצמחייה וכיסוי מחדש של הקרקע. לכן, יש למנוע השתלטות קנים מצד אחד ומצד שני לשמור על ממשק של פשט הצפה שמאפשר העברת מים קבועה ורציפה והקפדה על פינוי של נשר וגזם כדי שלא יצרו מכשול בספיקות גבוהות.

**ה. בחירת התפלגויות גודלי גרגר לתשתית נחל נעמן**

**1. השיקולים בבניית ההתפלגויות**

- לא תהיה אספקת חומר חלוקי מהמעלה באופן טבעי או בצורה מלאכותית (gravel augmentation) לאחר הבניה של האפיק החדש.
- שיהיה הבדל טקסטורלי משמעותי בין ההתפלגויות של בריכות (pools) ואשדות (riffles).

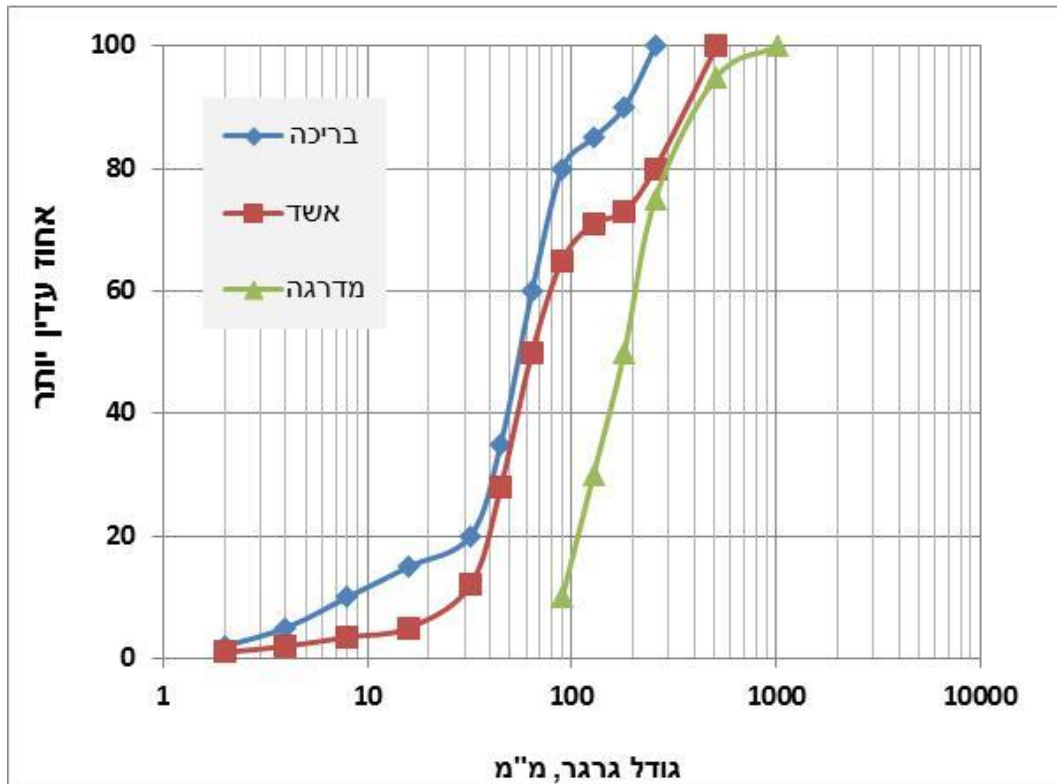
- מדרגה (step) היא צורת תשתית שאינה אופיינית לנחלים בעלי שיפוע נמוך (כמו נחל נעמן) לכן יש לשקול בזהירות את השימוש בה. במקרה וכן בונים מדרגות הן חייבות להיות עשויות מחלוקים גדולים מאד (cobble) ובולדרים. צורת תשתית זאת מהווה מעין בסיס ניקוז מקומי למעלה שלה ומהווה מחסום משמעותי לתנועת סדימנט, בעיקר גס. היא יוצרת מפל המחמצן את המים בספיקות נמוכות אך מהווה מכשול ניכר לתנועת בעלי חיים קטנים בגלל הבולטות והגובה שלה ביחס לתשתית סביבה.
- הזנב העדין של ההתפלגויות (חומר קטן מ-32 מ"מ) לא יישאר זמן רב בתוך צורות התשתית ולכן יש להקטין את חלקו היחסי. לכן, הפרקציה החולית לא הוכנסה כלל (גיזוע של ההתפלגויות ב-2 מ"מ).
- יצירת זנב גס משמעותי בכל ההתפלגויות שגם אם יישטף סדימנט החוצה בגאוויות עם ספיקות גדולות יישאר גוף סדימנטרי משמעותי לאורך זמן רב.
- הוספנו ביקור במעלה נחל תנינים (אזור אביאל) כדי לבחון איך נראית תשתית חלוקית של נחל חופי "דומה" בתוספת של דיגום חסרי חוליות כדי לעמוד על ההבדלים הביולוגיים בין צורות התשתית.

## 2. התפלגויות גודל הגרגר וכיצד יש לבנות אותן

באיור 6 מוצגות שלושת התפלגויות גודל הגרגר המוצעות עבור תשתית נחל נעמן. ניתן לראות שקיים דמיון מסוים בגוף הסדימנט העיקרי של בריכה ואשד (חציון של 56 ו-64 מ"מ, בהתאמה) אולם קיימים הבדלים ניכרים בזנבות הדקים והגסים כאחד. למדרגה בכלל אין זנב דק כי סדימנט זה אינו מחזיק במעלה או בצמוד לחלוקים גדולים מאד ובולדרים וממשיך מידיית למורד. בכלל, צריך להניח שכל הזנבות הדקים ישטפו באירועי זרימה גדולים כלומר התערובת של כל צורת תשתית תהיה גדועה (truncated) בחלקה התחתון לאחר זמן מה. את ההבדלים בגדלים בצורות התשתית השונות ניתן לראות במאונים (percentiles) בטבלה 2.

חשוב להדגיש את חשיבות הזנבות הגסים וכיצד יש לבנות אותם. יהיה צורך לסדר אותם ידנית בתוך צורות התשתית. לכל צורת תשתית תבנה מסגרת חיצונית מבולדרים (במעלה, במורד ובצמוד לשתי הגדות) על מנת שהסדימנט העדין יותר יהיה כלוא ומעט נמוך יותר מהמסגרת. הדבר יקשה על הזרם לשטוף סדימנט החוצה ובמקרים רבים גם אם הוא יזוז מרחק ההסעה יהיה קצר בתוך המסגרת. לאחר סידור המסגרת החיצונית ניתן יהיה לשפוך פנימה את כל הסדימנט פרט לחלוקים הגדולים מאד שגם אותם צריך יהיה לסדר ידנית לפי תבנית שתיקבע מראש. חלוקים אלה ישמשו כעוגנים (stone cells), יגדילו בצורה ניכרת את החספוס בתוך צורת התשתית וסדימנט גס שיזוז בתוכה ילכד במעלה שלהם בנגיעה (abutment) בהם או בריעוף (imbrication) ואילו חומר עדין יותר יושקע במורדם (Tribe and Church, 1999; Hassan and Church, 2000). סידור כזה מבוסס על מערבולות פרסה (horseshoe vortices) ומקבצי חלוקים (pebble clusters) שידועים כמייצבי תשתית (Brayshaw et al., 1983) כשהמיקרו-טופוגרפיה של החלוקים משחקת תפקיד חשוב הן בהסעה שלהם (Larone and Carson, 1976) והן אקולוגית. אזורים אלה של הפרעה מקומית לזרימה מחמצנים את המים בספיקות נמוכות ואילו בספיקות גבוהות יוצרים אזורי מסתור לחסרי חוליות ודגים שצריכים להסתתר מהזרם החזק מעליהם. תשתית שאינה מסודרת ובה יש בליטות ונחבאות של חלקיקים יוצרת בית גידול מורכב ואיכותי בניגוד לתשתית שטוחה לגמרי (planar)

(bed). כיוון שלנחל לא תהיה בכלל אספקה של סדימנט, הסידור הראשוני של צורות התשתית יקבע גם אם הן יחזיקו מעמד לאורך זמן וגם את איכות בית הגידול שיתפתח בתוכן.



איור 6. התפלגויות גודל גרגר מוצעות עבור נחל נעמן.

טבלה 2. מאונים של שלושת צורות התשתית. כל הערכים במ"מ.

מאון, d	מדרגה	אשד	בריכה
5	60	16	4
10	93	26	8
16	106	35	18
20	115	38	32
25	128	42	36
30	142	46	40
40	175	55	48
50	208	64	56
60	246	79	64
70	350	147	76
75	431	200	83
80	588	256	90
84	996	294	119
90	776	362	181
95	630	431	215
max	1024	512	256

### 3. יציבות צורות התשתית לאורך זמן במגוון רחב של ספיקות

על מנת לראות את עמידות צורות התשתית לאורך זמן יש לחשב מאמצי גזירה כדי להבין איזה פרקציות גודל יוסעו מהתשתית במגוון רחב של ספיקות. כיוון שהספיקות משתנות בזמן, בעזרת קביעה מראש של השיפוע, ובהנחה שלא ישתנה (כלומר נחל אין יכולת לחתור את התשתית החרסיתית הקוהיבית מתחת לחלוקים), משתמשים ברדיוס הידראולי כתחליף עבורם. נחל גדול ורחב רדיוס הידראולי שווה בערך לעומק ואילו נחל קטן (כמו במקרה של נחל נעמן) הרדיוס ההידראולי יהיה קטן מהעומק. ההגדרה של רדיוס הידראולי ( $R_h$ ) הוא:

$$R_h = A/W_p \quad .1$$

כאשר  $A$  הוא שטח החתך ואילו  $W_p$  הוא ההיקף המורטב שלו.

מאמץ גזירה ( $T$ ) המופעל על התשתית הוא:

$$T = \rho g R_h S \quad .2$$

כאשר  $\rho$  היא צפיפות המים (שווה ל-1),  $g$  הוא הכוח הגרביטציוני הפועל על החלוק (9.8 מ"שני<sup>2</sup>) ואילו  $S$  הוא השיפוע. יחס אמפירי בין גודל גרגר ( $d_i$ ) למאמץ גזירה קריטי ( $T_c$ ) מתוך נחלים רבים עפ"י עבודה של Komar (1988) מבוטאת כ:

$$T_c = [26 (d_i/10)^{1.21}] / 10 \quad .3$$

טווח הגדלים שהנוסחה מתאימה עבורו הוא מ-10 מ"מ עד 5000 מ"מ. השתמשנו במרווחים של 0.5 מ' ברדיוס ההידראולי (4-0.5 מ') ואילו בשיפועים מ-0.002 עד 0.006 שצריכים לכסות טווח רחב מאד של ספיקות ולהתאים לכל השיפועים של צורות תשתית נחל חופי. טבלה 3 מציגה את תוצאות החישובים של תזוזת חלוקים עפ"י נוסחה 3 ומאמצי הגזירה הנלווים. ניתן לראות שבספיקות בסיס (רדיוס הידראולי של 1-0.5 מ') רק הפרקציות הדקות ( $64 < M < 64$ ) יהיו פעילות פרט לשיפועים גדולים יותר (0.005-0.006) שאז חלוקים גסים מאד בתנועה. בעומקים גדולים יותר (רדיוס הידראולי מעל 1 מ') יקרו שני תהליכים:

1. חלק מהחומר העדין יישטף לגמרי החוצה מהמסגרות למורד ולא יתחדש.
2. חלק מהפרקציות הדקות יתייצבו כטלאים ויתחבאו בין חללים של חלוקים גדולים יותר או במורדם ויחד עם ביופילם שיתפתח עם הזמן יהיה קושי להזיזם, כתלות בכמה זמן יהיה לתשתית להתייצב עד האירוע הראשון בו תהיה תנועה משמעותית של התשתית.

למרות שחלק מהחלוקים (בעיקר הפרקציות הדקות) יוסעו באירועי זרימה משמעותיים ולא יתחדשו, אין לראות בתהליך זה כשלילי. הזרימות הגבוהות ישטפו גם חומר חרסיתי וינקו את התשתית החלוקית ולאורך זמן תתפתח תשתית יחסית גסה ויציבה (Buffington and Montgomery, 1999) שתהיה מובדלת מאד מתשתית חרסיתית.

טבלה 3. תוצאות חישובי מאמצי גזירה וגודל החלקיקים שינועו בשיפועים ורדיוסים הידראוליים שונים.

Water density, $\rho$	1	1	1	1	1	1	1	1
Accelration due to gravity, g	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8
Hydraulic radius, m	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
Slope	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
Shear stress, $\tau$ , N/m <sup>2</sup>	9.8	19.6	29.4	39.2	49	58.8	68.6	78.4
Grain size in motion, $d_i$ , mm	17	30	42	54	64	75	150	167
Water density	1	1	1	1	1	1	1	1
Accelration due to gravity	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8
Hydraulic radius	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
Slope	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
Shear stress, $\tau$ , N/m <sup>2</sup>	14.7	29.4	44.1	58.8	73.5	88.2	102.9	117.6
Grain size in motion, $d_i$ , mm	24	42	59	75	90	104	209	233
Water density	1	1	1	1	1	1	1	1
Accelration due to gravity	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8
Hydraulic radius	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
Slope	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
Shear stress, $\tau$ , N/m <sup>2</sup>	19.6	39.2	58.8	78.4	98	117.6	137.2	156.8
Grain size in motion, $d_i$ , mm	30	53	75	95	114	133	265	296
Water density	1	1	1	1	1	1	1	1
Accelration due to gravity	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8
Hydraulic radius	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
Slope	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Shear stress, $\tau$ , N/m <sup>2</sup>	24.5	49	73.5	98	122.5	147	171.5	196
Grain size in motion, $d_i$ , mm	64	113	159	200	242	282	319	355
Water density	1	1	1	1	1	1	1	1
Accelration due to gravity	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8
Hydraulic radius	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
Slope	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
Shear stress, $\tau$ , N/m <sup>2</sup>	29.4	58.8	88.2	117.6	147	176.4	205.8	235.2
Grain size in motion, $d_i$ , mm	74	132	184	234	281	326	371	414

גורם נוסף שצריך לקחת בחשבון בהסעת התשתית הוא שבניגוד לביופילם שמגדיל את מאמץ הגזירה הנחוץ לנייד חלקיקים מהתשתית (Salant, 2011), בעלי חיים שונים יכולים להזיז את התשתית או להכין אותה להסעה ניכרת לפני אירוע זרימה גדול, למשל דגים וסרטנים (Hassan et al., 2008; Statzner and Sagnes, 2008). עם זאת, ההשפעה תהיה בעיקר על פרקציות דקות ולא תשנה את התפלגויות גודל הגרגר הגסות בצורה ניכרת.

מומלץ לאחר סיום בניית הקטעים החלוקיים לבצע מעקב שנתי אחרי התפתחות התשתית לאורך זמן הן ע"י סקרי התפלגויות גודל גרגר במספר חתכים קבועים והן ע"י סימון מספר חלוקים גדולים מאוד ובולדרים בצבעים בולטים. סקרים כאלה צריכים להתבצע בתום עונת הגשמים בספיקות נמוכות ובעיקר אם היו אירועי זרימה משמעותיים שיכלו להסיע את התשתית כדי לאמוד את השינויים בזמן ובמרחב. כמו כן, בשנים שחונות שעובר הרבה זמן מאז שהתשתית נשטפת יש לשקול אירועי שטיפה מלאכותיים (flushing flows) עם יעדים מוגדרים וברורים (Kondolf and Wilcock, 1996). אירועים כאלה ניתן לבצע עם שני הסכרים בתעלה המנדטורית בשמורת עין אפק הן כדי לסלק השקעה מיותרת של חומר חרסיתי שהצטבר על פני השטח של התשתית והן כדי ליצור הפרעה בנחל, גם אם יחסית קצרה של מספר שעות או ימים בודדים (ברגמן וגלזמן, 2006).

## 1. מקורות

ברגמן, נ., גלזמן, ה., 2006. ממשק פתיחת וסגירת הסכרים בתעלה המנדטורית בשמורת טבע עין אפק: סיכום ניסוי משנת 2005. דו"ח סופי שהוגש לרשות הטבע והגנים, 23 עמ'.

Arcement, G.J., Jr., Schneider, V.R., (1989). Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2339, 38 p.

Brayshaw, A.C., Frostick, L.E., Reid, I., 1983. The hydrodynamics of particle clusters and sediment entrapment in coarse alluvial channels. *Sedimentology* 30, 137-43.

Buffington, J.M., Montgomery, D.R., 1999. Effects of sediment supply on surface textures of gravel-bed rivers, *Water Resources Research* 35, 3523-3530.

Cheng, N., 2016. Representative grain size and equivalent roughness height of a sediment bed. *Journal of Hydraulic Engineering* 142, 0.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001069, 06015016.

Chow, V.T., 1959. *Open-channel hydraulics*. New York, McGraw-Hill, 680 p.

Church, M., 2006. Bed material transport and the morphology of alluvial river channels. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 34, 325-354.

Coon, W.F., 1998, Estimation of roughness coefficients for natural stream channels with vegetated banks. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2441, 133 p.

Hassan, M.A., Church, M., 2000. Experiments on surface structure and partial sediment transport on a gravel bed. *Water Resources Research* 36, 1885-1895.

Hassan, M.A., Gottesfeld, A.S., Montgomery, D.R., Tunncliffe, J.F., Clark, G.K.C., Wynn, G., Jones-Cox, H., Poirier, R., MacIsaac, E., Herunter, H., MacDonald, S.J., 2008. Salmon-driven bed load transport and bed morphology in mountain streams. *Geophysical Research Letters* 35, L04405, doi:10.1029/2007GL032997.

Komar, P.D., 1988. Sediment transport by floods. In: Baker, V.R., Kochel, R.C., and Patton, P.C., (Eds.), *Flood Geomorphology*. John Wiley & Sons, 97-111.

Kondolf, M.G., Wilcock, P.R., 1996. The flushing flow problem: defining and evaluating objectives. *Water Resources Research* 32, 2579-2587.

Lagasse, P.F., Spitz, W.J., Zevenbergen, L.W., Zachman, D.W., Owen Ayres and Associates., 2004. *Handbook for predicting stream meander migration*. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Washington, D.C.

Langbein, W.B., Leopold, L.B., 1966. River meanders - theory of minimum variance. U.S. Geological Survey, Professional Paper 422-H, 15 pp.

Laronne, J.B., Carson, M.A., 1976. Interrelationships between bed morphology and bed-material transport for a small, gravel-bed channel. *Sedimentology* 23, 67-85.

Limerinos, J.T., 1970. Determination of Manning Coefficient from measured bed roughness in natural channels. *Water Supply Paper 1898B*, US Geological Survey, 47 p.

Lisle, T., 1979. A sorting mechanism for a riffle-pool sequence. *Geological Society of America Bulletin* 90, 1142-1157.

Lisle, T.E., Madej, M., 1992. Spatial variation in armouring in a channel with high sediment supply. In C. Thorne, & P. Tacconi (Eds.), *Dynamics of Gravel-Bed Rivers*. Chichester, Wiley, 277-293.

Milne, J.A., 1982. Bed-material size and the riffle-pool sequence. *Sedimentology* 29, 267-278.

Nanson, G.C., 1980. A regional trend to meander migration. *The Journal of Geology* 88, 100-108.

Nanson G.C., Hickin, E.J., 1983. Channel migration and incision on the Beatton River. *Journal of Hydraulic Engineering* 109, 327-337.

Nelson, J.M., Smith, J.D., 1989. Flow in meandering channels with natural topography. In: S. Ikeda, & G. Parker (Eds.), *River meandering*, Washington, D.C.: American Geophysical Union 69-102.

- Rosgen, D.L., 1994. A classification of natural rivers. *Catena* 22, 169-199.
- Salant, N.L., 2011. 'Sticky business': The influence of streambed periphyton on particle deposition and infiltration. *Geomorphology* 126, 350-363.
- Schumm, S., 1985. Patterns of alluvial rivers. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 13, 5-27.
- Statzner, B., Sagnes, P., 2008. Crayfish and fish as bioturbators of streambed sediments: Assessing joint effects of species with different mechanistic abilities. *Geomorphology* 93, 267-287.
- Tribe, S., Church, M., 1999. Simulations of cobble structure on a gravel streambed. *Water Resources Research* 35, 311-318.
- Williams, G.P., 1986. River meanders and channel size. *Journal of Hydrology* 88, 147-164.