



הטכניון  
מכון טכנולוגי לישראל

# משרד החקלאות האגף לשימור קרקע וניקוז מדריך לאמצעי ייצוב גדות נחלים ותעלות ניקוז



גדעון סיני, רן מולכו, יעקב מילשטיין, שמואל ארבל,  
מוגש להנהלת ענף הקרקע

## המדריך לייצוב גדות נחלים ותעלות ניקוז

### פתח דבר

האתגר הרב הטמון בייצוב אגן היקוות שלם, נחל או קטע תעלה קצר הוא משימה לא פשוטה המחייבת ניתוח מכלול רחב של נתונים. מתוך הכרה בהשלכות הסביבתיות והכלכליות הנגרמות ע"י ארוזיה וסחף בגדות ובקרקעית תעלות, יזם האגף לשימור קרקע וניקוז במשרד החקלאות הכנת מדריך זה. עבודה זאת נכתבה בשיתוף של פרופסור גדעון סיני מהפקולטה להנדסה אזרחית בטכניון, רן מולכו, מורדי תמיר ושמואל ארבל מהתחנה לחקר הסחף- יחידת המחקר של האגף לשימור קרקע וניקוז וכן בעזרת רפי הלוי ממשרד התכנון "נהרא" – מפות הצפה. עבודה זאת יצאה לאור על בסיס עבודה רבת היקף שנחלה חרוד שבתחום רשות ניקוז ונחלים ירדן דרומי. רשות הניקוז ביצעה עבודת ייצוב בצומח בקנה מידה גדול שכלל תחזוקה אינטנסיבית של הצומח בגדות לאורך מספר שנים. גם כאן הוכח באופן מעשי שניתן לייצב גדות נחלים בצומח שתול וזרוע לאורך שנים.

מדריך זה הורחב לתחום הייצוב ההנדסי הקשיח ומכסה היבטים עיקריים בנושא של ייצוב גדות. חקירת הנושא החלה בסקר ארצי של נחלים ונמשכה דרך מאות קילומטרים של גדות נחלים ותעלות במגוון רחב של תנאים. במקביל, נאסף ידע מספרות בינלאומית בתחום, הדנה בבעיות של חוסר יציבות ובפתרונות הנהוגים במקומות שונים בעולם. עבודה זאת אינה מתיימרת להיות ספר מתכונים לפתרון בעיות יציבות בגדות נחלים. התנאים המובילים לארוזיה והרס גדות הינם רבים ומורכבים ולא ניתן לענות עליהם מבלי לבחון כל מקרה לגופו. העבודה סוקרת את הסיבות לארוזיה, בעיות סחף, התמוטטות גדות ועוד. מוצעות שיטות ייצוב שונות הנהוגות בארץ ובעולם תוך ציון היתרונות והחסרונות של האמצעים השונים. מסמך זה מאיר מספר היבטים הקשורים בתכנון פרויקט של ייצוב גדות, מפרט נקודות מהותיות בביצוע ומציע דרך לביקורת העבודה. המדריך מתאים בין היתר לאנשי ניהול הרוצים להבחין בין מכלול הפרטים של החלופות השונות.

### הבעת תודה

היוזמה לעבודה זו היא פרי שיתוף פעולה בין רשות ניקוז ונחלים "ירדן דרומי" והאגף לשימור קרקע וניקוז במשרד החקלאות. העבודה נכתבה בתמיכתם הטכנית והמדעית של אנשים רבים מתחום שימור הקרקע, הניקוז, ביסוס ויציבות הקרקע. בעבודה נעזרנו רבות בפרקים שנכתבו ע"י שלמה מריש ז"ל אשר היה בין מניחי היסודות בנושא הייצוב בצומח. ברצוננו להודות לכל אלה שסיירו איתנו בשטח, השיאו עצות, אספו חומר ספרותי, סיפקו נתונים, תיקנו והעירו הערות, והביאו עבודה זאת לגמר ולהוצאה לאור.

מקוים אנו כי מדריך זה יוכל לשמש מהנדסים ומתכנני ניקוז, את רשויות הניקוז, קק"ל, מתכנני נוף ועוד. בהזדמנות זו אנו רוצים להודות לרמי גרתי ולצבי רבהון מנהלי האגף לשימור קרקע וניקוז בעבר ובהווה על הכרתם בחשיבות עבודה שכזו, על הדחיפה המקצועית, ועל סיועם בזמן ובמימון. לעובד דרור, תיאו להב ועינבל אברהם מרשות ניקוז ונחלים "ירדן דרומי" על סיועם בעיצוב הפרשה הטכנית ובמימון עבודה זאת.

תודות למשה גוטסמן, אפרים פיזיק, יוסי בר ורן פרחי טכנאי התחנה לחקר הסחף, יחידת המחקר של האגף לשימור קרקע וניקוז, על איסוף הנתונים מהשטח בחורף, בקיץ ובכל מזג אוויר. לעובדי שימור הקרקע והניקוז במשרד החקלאות – יורם טורציון, יעקב מילשטיין, בני יעקובי, יונתן אברהמס, רמי זיידנברג, וולדימיר קורפין.

לסולומון שמוקלר מנציבות המים אשר סייע בחומר תיאורטי, בסיועים בשטח ובעצות מועילות שתרמו רבות להוצאת מדריך זה.

לאריה שחר ולגד שליו אנשי שימור הקרקע שהיו בין מפלסי הדרך בתחום הייצוב בצומח בישראל ושטרחו והשיגו חומר ונתונים מנסיונות שביצעו במהלך השנים.

ליצחק משה, מוטי שריקי וארנון בן דרור אנשי שימור הקרקע של קרן קיימת חבל דרום שסיירו, לימדו וחלקו לנו מנסיונם הרב בשימור קרקע באדמות הלס שבנגב.

תודות לאנשי הביצוע יואב הדר – "הדר מערכות", למהנדס דן עובדיה – "אדמיר טכנולוגיות", ליהודה טולדנו – "רתם הנדסה" על עזרתם באיסוף נתוני יצרן על אמצעי ייצוב שונים וכן על הבאת דוגמאות של עבודות ייצוב גדות תעלות שנעשו בישראל.

לאנשי רשויות הניקוז שסיירו, הנחו, הביעו דעתם וייעצו – דויד פרגמנט ויונתן רז מרשות נחל הירקון, זאב לנדאו מרשות ניקוז ירקון, ניסים אלמון מרשות ניקוז שרון, מיכאל דור, צבי שיין ואפרים מרשות ניקוז קישון, משה ענווים מרשות ניקוז כינרת, משה יזרעאלי מרשות ניקוז כרמל, אלחנן וינברגר מרשות ניקוז שקמה בשור ויצחק יוגב מרשות ניקוז שורק לכיש.

על כולם תבוא הברכה.

## תוכן העניינים

### עמוד

7	1. מבוא.
8	1.1 מבנה המדריך.
11	1.2 גישה עקרונית.
12	2. הערכת יציבות תעלות.
13	2.1 מהירות מותרת ומאמצי גזירה.
15	2.2 עקרונית תגובה ושיווי משקל דינאמי של תעלות.
17	2.3 כושר הולכת סחף (Sediment Transport Capacity).
21	2.4 מיאנדרים ועיקולים.
22	2.5 שיפוע אורכי יציב (Graded Channel).
25	2.6 יחסים אמפיריים של מאפייני תעלות.
27	3. בעיות אופייניות בתעלות להולכת שיטפונות.
27	3.1 פירוט ודירוג האמצעים להולכת שיטפונות.
30	3.2 גורמים וצורות של חוסר יציבות.
32	3.3 מתקנים הידרוליים.
35	3.4 שליטה על הפרופיל האורכי (מפתנים, מפלים).
36	3.5 שליטה על מיאנדרים ועיקולים בתעלה.
36	3.6 יציבות מידרונות.
40	3.7 שליטה על השקעת סחף.
41	4. דוגמאות לבעיות יציבות.
43	5. איסוף מידע להערכת יציבות תעלות.
43	5.1 סקירה של ההתפתחות ההיסטורית.
44	5.2 פיענוח מפות ותצלומי אוויר.
44	5.3 פיקוח שדה.
46	5.4 סקירת התעלה ופשט ההצפה.
46	5.5 סקירת זרימות והערכתן.
47	5.6 מידע גיאולוגי וגיאוטכני.
47	5.7 הסעת סחף.
48	6. בחירת טכניקת ייצוב.
48	6.1 יעילות גישות חלופיות שונות.
53	6.2 היבטים סביבתיים.
54	7. ציפוי פני שטח והגנה מפני ארוזיה.
54	7.1 ציפוי אבן.
66	7.2 ציפוי קשיח.
70	7.3 מזרונים גמישים.
71	8. גישות לא ישירות להגנה מפני ארוזיה.
71	8.1 דייקים.
76	8.2 מעכבים.
79	9. ייצוב בעזרת צומח.

79	9.1 עקרונות.
81	9.2 יתרונות וחסרונות.
81	9.3 יישום טיפוס.
82	9.4 בחירת שיטת הייצוב.
83	9.5 תוכנית הייצוב.
83	9.6 הנחיות.
84	10. ביקורת התכנון.
84	10.1 תוואי האפיקים.
84	10.2 חתך האפיקים.
84	10.3 דרכים.
85	10.4 אמצעי ייצוב הגדות.
85	10.5 מתקנים הידרוליים.
85	10.6 פשטי הצפה ומפלסי בניה.
85	10.7 קווי תשתיות.
86	10.8 אישורים.
87	11. ממשק ניטור ותחזוקה.
87	11.1 סוגי תחזוקה.
87	11.2 פיקוח ואכיפה.
88	11.3 יישום .
89	12. ממשק אקולוגי.
95	מקורות

## נספחים

98	1. טבלאות לחישוב דירוג אבן ריפ רפ.
100	2. סיכום פעילות ייצוב בצומח בנחלי חרוד ועמל 1998-2005
106	3. מפרט ליישום יריעות לא ארוגות
108	4. נתוני יצרן – כוורות דופן מחוררת ומחוספסת
109	5. מפרט טכני להתקנת גביונים/מזרונים

## רשימת איורים

14	1. מהירות זרימה מותרת לפי כתלות בעומס הסחף במים
14	2. פירוס מאמצי גזירה בחתכים שונים.
14	3. פירוס מאמצי גזירה בחלקי התעלה השונים.

- 15 4. דוגמא למאמץ גזירה מותר במספר קרקעות קוהזיביות
- 18 5. מקדמי שזי עבור דרגות שונות של עומס סחף
- 18 6. מערכת טבעית של נחל
- 20 7. קיצור תוואי (Cut-off)
- 21 8. ארוזיה והשקעת סחף בקיצור תוואי
- 21 9. נחל המאופיין במיאנדרים
- 22 10. מאפיינים הקשורים בנחל ישר ובנחל בעל מיאנדרים
- 22 11. תיאור סכמתי של שיפוע הקרקעית עקב המפלים
- 23 12. אזורי התעלה השונים בהשפעת סדרת מפלים
- 24 13. שימוש במפתנים לעצירת שפילת השיפוע האורכי ושקיעת הסחף
- 24 14. שימוש בסיכרונים במשולב עם מפלונים לעצירת שפילת השיפוע האורכי ושקיעת הסחף במורד
- 24 15. מיון עקרוני של מתקני יצוב אורכי
- 25 16. הקשר בין הספיקה לבין המאפיינים: רוחב פני מים (א), גובה מים (ב), ושיפוע אורכי (ג).
- 35 17. המאזניים של ליון. מתוך Lane (1954)
- 37 18. תיאור סכמתי של סוגי גלישות שונות
- 41 19. תעלה מאספת באזור גניגר, יצירת ראשי ערוצים (א) ומפלים (ב).
- 41 20. נחל אמציה שימוש כושל בשני אמצעי יצוב. מפתנים וכוורות ממולאות עפר
- 42 21. מפתנים בנחל חרוד (א'), מפתנים בנחל שונם (ב')
- 42 22. ייצוב בגביונים, נחל איילון, קטע נתב"ג.
- 45 23. גלישת גדות, חלחול ופיפינג, התערצות צד לראשי ערוצים, חתירה בבסיס גשר
- 55 24. תרשים עקרוני של אבן ריפ רפ
- 58 25. קטע מיוצב באבן בבוהן התעלה מייד לאחר ביצוע (א) ולאחר שנה (ב)
- 59 26. צורת הנחת אבנים בציפוי תעלות ביבש
- 60 27. הקשר בין קוטר האבן הממוצע, מהירות הזרימה הפוגעת באבן ומשקלה
- 61 28. הקשר בין יחס המהירות הממוצעת נגד האבן למהירות הממוצעת בתעלה לבין היחס בין קוטר האבן לעומק המים
- 61 29. היחס בין מהירות הזרימה בכל גובה שהוא לבין מהירות הזרימה הממוצעת בתעלה
- 62 30. דוגמאות לבניה באבן שכבות
- 63 31. יצוב באבן בולדר מקומית, נחל דגה (א), יצוב באבן בולדר-השתלבות בסביבה, נחל שניר (ב).
- 65 32. אנליזה מכאנית של קרקעות

	33. שילוב צמחייה בכוורות (א), כשל של כוורות פוליאתיילן כתוצאה
68	מזרימות צד (ב)
75	34. דוגמאות לדייקים חדירים. רשתות ולוחות עץ.
76	35. דוגמאות לדייקים אטימים. אבן ריפ רפ ואדמה משורינת אבן.
77	36. דוגמאות למעכבים חדירים.
78	37. דוגמאות למעכבים אטימים בתוספת דייקים לשיפור ההגנה על הגדה.
89	38. מערך היחסים בין המאפיינים השונים במערכות אקולוגיות.
98	39. המשקל המרחבי של אבן ריפ רפ כתלות בקוטר האבן ומשקלה

### רשימת טבלאות

13	1. דוגמא למהירות זרימה מותרת בתעלות
	2. תגובות צפויות של מאפייני הנחל לשינויים של מס' פעולות ותנאים
16	סביבתיים
17	3. כוחות הפועלים על התעלה וגורמים למאמצי גזירה.
99	4. דירוג אבן ריפ רפ המיועדת להגנה במקומות בעלי טורבולנטיות נמוכה
106	5. תכונות טכניות – אורים 250
106	6. תכונות טכניות – אורים 300.
107	7. תכונות טכניות – אורים 500
109	8. מזרונים
110	9. גביונים
110	10. נתונים טכניים של התיל עפ"י EN 10244-2
114	11. מספר טבעות לפי סוג מזרון/גביון
114	12. גודל אבן למילוי מזרונים/גביונים

## **1. מבוא**

מדריך זה מלווה ומנחה את המשתמש החל ממניעה מראש של בעיות הייצוב, דרך זיהוי תופעות הקורות בשטח, אל הדרישות בתכנון פתרון, מלווה את העבודות ביישומן ועד לפיקוח על טיב והתאמת הפתרון לבעיות. מדריך זה סוקר את הסיבות העיקריות לכשל ולארוזיה בתעלות, מציע גישה לפתרון בעיות בתעלות, סוקר אמצעים המיועדים להתמודד עם התופעות, מספק נתונים טכניים על האמצעים השונים, מציע גישות חלופיות, מבקר העבודה בשטח ומלווה את התחזוקה.

השמירה על יציבות גדות נחלים ותעלות הניקוז כוללת התמודדות עם מספר תהליכים העלולים לגרום לנזק או להרס כגון: גריפת חלקיקי קרקע כתוצאה מהזרימה, ארוזיה של פני הקרקע, גלישה שכבתית של הקרקע, התמוטטות גדות, סתימת תעלות בסחף ובצומח ועוד.

קיימות שתי קטגוריות עיקריות להתמודדות עם גורמי הרס אלו. אמצעים בעזרתם ניתן להפחית את כוחות המים הפועלים על הגדות או אמצעים בעזרתם ניתן להגדיל את כוחות ההתנגדות של הגדות לארוזיה. אמצעים אלו ניתנים ליישם במערכת משולבת. ציפוי דפנות התעלה אינה מקטינה את אנרגיית הזרימה באופן משמעותי, ולכן פתרון בעיה נקודתית בעזרת ציפוי דפנות התעלה עלול להעביר את בעיית הארוזיה למורד הזרם או לגדה הנגדית.

לאחר שהתקבלה החלטה כי נחוץ שיקום או נחוצה הגנה של גדות הנחל מוצעות מספר שיטות לתיקון, שיקום או הגנה על הגדות בכדי להפחית את הפגיעות של הגדות לתהליך הארוזיה. החל מייצוב בעזרת צומח זרוע או שתול, שילוב צומח באמצעים ביו הנדסיים ועד שימוש באמצעים מכאניים הנדסיים קשיחים.

בחירת אמצעי הייצוב אמורה לבחון מכלול ההיבטים:

**יציבות** - יכולת אמצעי הייצוב לתת מענה לבעיה אליה הוא נדרש.

**ניקוז** - אמצעי הייצוב אינו מפריע לזרימה התקינה של הנחל אלא אם נועד לכך כאמצעי וויסות או השהייה.

**נוף** - השתלבות המתקן בסביבה.

**סביבה** - המתקן אינו מפריע לקיומם של בעלי החיים ושל הצומח המקומיים.

את צרכי התחזוקה העתידיים של אמצעי הייצוב יש לבחון כבר בשלב התכנון ויש לחשבם כחלק מהעלות הכוללת של החלופה האפשרית. בד"כ נעדיף אמצעים מקומיים מהסביבה על פני אמצעים מיובאים. יש לשפר את איכות המים ע"י הפחתת טמפרטורת המים והפחתת בעיית הצטברות משקעים וסחף. יש לראות את הנחל כמסדרון המחבר בין אזורים אקולוגיים שונים.

לצורך תכנון ובחירת אמצעי ייצוב יש לבחון מספר רחב של מאפיינים:

קרקעות אגן ההיקוות, התכסית, שיפועי האגן, אופי האגן מבחינת שימושי קרקע, הפיתוח האזורי, אקלים האגן, גשם – כמויות ועוצמות, רשת הניקוז, מידע הידרולוגי והידראולי, אופי הזרימה, היקף הארוזיה והסיבה לארוזיה, בחינה כלכלית של החלופות השונות ומידת הישימות לביצוע.

שיקולים בתכנון הגנה על גדות נחלים: נגישות האתר, דרגת הנחל, תדירות ספיקות, אפשרויות לתחזוקה בעתיד, מערך המיתקנים הרצויים, סוג הנחל וצורתו הגיאומטרית, עומס משקעים, סחופת וחומר

הקרקעית, הגנה בפני כשל המערכת, חתירות, אזורי מגע בין אמצעי ייצוב שונים ובין הקרקע, הצומח המקומי.

מדריך זה מיועד למתכנני ניקוז ומתכננים סביבתיים, לסגל רשויות הניקוז ומנהלות הנחלים הרוצים לבחון חלופות לפתרון בעיות של חוסר יציבות בנחלים, הרוצים להעמיק יותר בגורמים לחוסר היציבות והמעוניינים בכלים ללווי תהליך בחירת אמצעי הייצוב ולווי בכל שלבי העבודה הקשורים בפתרון סוגיות ייצוב בתעלות פתוחות.

במדריך, פרקים המתאימים גם לאנשי ניהול המזמינים עבודה ורוצים להבחין בין מכלול הפרטים של החלופות השונות, כמו גם לרשויות ניקוז, רשויות מקומיות, אגפי תכנון במשרדי ממשלה ועוד. המדריך יכול להוות בסיס איתן בגיבוש חלופות ובהתוויית מסלול מבוקר לביצוע פרויקט של ייצוב תעלות.

מטרת המדריך להציג היבטים כלליים ופרטניים בתכנון, ישום, פיקוח ותחזוקה של עבודות ייצוב בתעלות ניקוז.

במדריך מודגש הצורך בהבנת תהליכים של הסעת סחף, סחיפה ושקיעת סחף ושווי משקל דינאמי בתעלות. הבנה כזו תשפר משמעותית את פתרונות הייצוב. להערכתנו, במקרים רבים, הבנת התהליכים עשויה לשנות מהותית את הקונספציה.

בגלל מורכבות הנושא, לא ניתן להערכתנו, להציג את ייצוב התעלה כתרשים זרימה או כמתכון בישול שבו מספר תהליכים עוקבים וצומחים לקבלת החלטות. הגישה במדריך היא לסקור את הנושאים המהותיים ולספק כלים להתמודדות עם חוסר יציבות של תעלות. להלן הנושאים שנסקרים:

- בעיות הקשורות בהסעת סחף וסחיפה.
- כלים להערכת יציבות של תעלות - הערכת יציבות של תעלות מאפשרת לנו להגדיר בעיות יציבות בתעלה, לכמת את עוצמת הבעיות ולאבחן גישות עקרוניות לפתרון הבעיות.
- כלים לבחינת חלופות ייצוב - לאחר אבחון בעיות היציבות בתעלה, נדונה השוואה עקרונית של חלופות הייצוב. השוואת החלופות מתבססת על הניסיון המצטבר של אנשי רשויות הניקוז בארץ, סיורים רבים בתעלות וכן, על ספרות מקצועית מהארץ ומהעולם.
- פרטים טכניים של פתרונות ייצוב שונים - לפתרונות הייצוב השונים פרטים טכניים רבים אותם יש ללמוד. מידת היישום של הפרטים, במקרים רבים יוצרת את ההבדל בין כשל להצלחה.

## **1.1 מבנה המדריך**

### **פרק 1**

#### **פרק מבוא**

כולל ביאור מושגים, מטרת המדריך ותיאור הגישה העקרונית של ייצוב גדות תעלות ואפיקים.

### **פרק 2**

#### **הערכת יציבות תעלות**

זהו הפרק שמהווה עמוד שידרה, או בסיס תיאורטי של המושגים וההבנה של התהליכים שנסקרים בהמשך המדריך.

ניתן דגש על עקרונות תגובה ושיווי משקל דינאמי של תעלה, על יציבות השיפוע האורכי, שהוא פרמטר מרכזי ולמעשה שולט על החתך הרוחבי ועל תצורת האפיק.  
בהמשך, נדון מושג מרכזי – כושר הולכת הסחף באפיק - Sediment Transport Capacity.

### פרק 3

#### בעיות אופייניות בתעלות להולכת שטפונות

בפרק זה נסקרים גורמים לחוסר יציבות, מפורטים ומדורגים האמצעים המקובלים להולכת שיטפונות. בהמשך, מפורטות בעיות אופייניות כגון: בעיות הקשורות למתקנים הידרוליים עיקולים בתעלה, יציבות מדרונות ושליטה על הפרופיל האורכי.

### פרק 4

#### דוגמאות לבעיות יציבות

זהו ה"דובדבן" שכולל תיאור עסיסי של דוגמאות ממספר אתרים בארץ לבעיות יציבות שמהווים מקרי בוחן (case study).

### פרק 5

#### איסוף מידע להערכת יציבות

הבסיס לזיהוי ואפיון הבעיות היא גישה מקצועית ומפורטת לעבודת השדה להערכת היציבות. למרות שלהערכת יציבות מקצועית ומפורטת, הכוללת מעקב ותצפיות שוטפים, יש מחיר כלכלי, היחס בין העלות לתועלת הוא גבוה מאוד, אם ניקח בחשבון את התוצאות של אבחון שגוי. במילים פשוטות: פרויקט ייצוב גדות יצליח רק כאשר יתמקד בגורם הספציפי של חוסר היציבות (או כאשר למתכנן יש הרבה מזל). באיסוף המידע אומצה גישה סטנדרטית המקובלת בארה"ב הכוללת 7 צעדים.

### פרק 6

#### בחירת טכניקת ייצוב

בפרק זה מוצגת הגישה העקרונית לבחירת פתרון לבעיות מקומיות של חוסר יציבות (היתרונות והחסרונות של החלופות מפורטים בפרקים הבאים). בפרק מוגדרת ומפורטת היעילות של הגישות החלופיות ומפורטים שיקולים כלכליים וסביבתיים. גורמי היעילות כוללים בין היתר: עמידות, התאמה לחתירה בקרקעית ולשקיעה, אילוצים של עומק הזרימה, אילוצים של תנאי הגבול בקצה, התוויית התעלה והשפעה על קווי הזרם והארוזיה במעלה או במורד.

### פרק 7

#### צפוי פני השטח והגנה בפני ארוזיה

בפרק זה מפורטות חלופות שונות של ציפויים להגנה על פני התעלה מפני חתירה כגון: ציפוי אבן, ציפויים קשיחים אחרים, מזרונים גמישים וכדו'. בכל חלופה מצוינות העקרונות, היתרונות, החסרונות והיישום הטיפוסי.

## פרק 8

### גישות לא ישירות להגנה מפני ארוזיה

בפרק זה מפורטים אמצעים כגון דייקים ומעכבים (דורבנות), להגנה בפני ארוזיה ע"י הרחקת מהירויות הזרימה הגבוהות מהאזורים הרגישים לחתירה ה. בהמשך מפורטים אמצעים נוספים להטיית הזרימה. בכל חלופה מצוינות העקרונות, היתרונות, החסרונות והיישום הטיפוסי.

## פרק 9

### ייצוב בעזרת צומח

בפרק זה למעשה החלה העבודה. הדגשנו את התאמה של הצומח לתנאים הסביבתיים במספר רב של דוגמאות באזורי הארץ השונים. מפורטים העקרונות, היתרונות, החסרונות והיישום הטיפוסי של הצומח, כולל דגש בנושא הביצועי.

## פרק 10

### ביקורת התכנון

פרק זה מיועד למעשה להיות רשימת ביקורת (check list) לבחינת ההתאמה של תוכניות המתקבלות ברשויות הניקוז. הפרק חורג מפתרונות ספציפיים בנושא ייצוב וכולל פרמטרים רבים של בחינת תכנית להסדרת תעלות.

## פרק 11

### ביצוע עבודות ייצוב

פרק זה דן בתאום הביצוע לתכנון, במפרטים מיוחדים לביצוע ובמאפיינים סביבתיים הקשורים לביצוע עבודות בתעלות ובנחלים ולשיקום אתר העבודה.

## פרק 12

### ניטור ותחזוקה של עבודות ייצוב

חשיבות הניטור והתחזוקה ידועה אך לא תמיד מובנת ומיושמת ע"י מקבלי ההחלטות. הערכת גורם התחזוקה כרוכה בשיקול השקעה קטנה לעומת פוטנציאל לכשל או נזק משמעותי לפרוייקט כתוצאה מתחזוקה לא מספקת. כאשר קיימת תחזוקה וניטור ברמה גבוהה, המזמין יכול לכאורה להעדיף טכניקות פחות עמידות זולות יותר.

נדרשת זהירות של המתכנן בהסתמכות כבדה על תחזוקה עתידית הן בגלל גורמים משתנים שאינם בשליטת המזמין והן בגלל התנהגות אנושית צפויה - למזמין קל להתחייב לתחזוקה בעתיד מאשר לבצע אותה בעת הצורך.

בפרק להלן מפורטת גישה מקצועית וסטנדרטית לביצוע ניטור, תצפיות, מעקב ותחזוקה של עבודות ייצוב כולל פרטים טכניים.

ממשק אקולוגי

פרק זה דן בראייה כוללת על ההשפעה של הסדרת הנחלים והתעלות על הסביבה . שלל יעודי התעלה או הנחל יהיו נשכרים מקיום מערכת אקולוגית יציבה . אחת המטרות החשובות בשיקום נחל הוא יצירת גיוון , או הגדלת מספר המינים במערכת האקולוגית. מערכת אקולוגית מגוונת בדרך כלל תהיה יציבה יותר . בפרק מפורטים דגשים נוספים בנושא תחזוקה בראיה אקולוגית .

**1.2. גישה עקרונית**

רמת המורכבות של הזרימה ותנועת הסחף בנחלים ובתעלות, גבוהה ולא מאפשרת תכנון בזרימה אחידה ובתחתית יציבה- תכנון על פי "נתוני מעבדה" של זרימה תקינה (נורמאלית), קרקעית יציבה שאינה משתנה, שיפוע קבוע וכדו', במקרים רבים אינה עובדת ובמקרים רבים אף מובילה לכשל. יש להתייחס לכושר הסעת הסחף ולמעגלים מתמשכים של ארוזיה ושקיעת סחף. במקרים רבים פתרון של בעיית ארוזיה בגדה תעביר את הבעיה למקום אחר (גדה שניה, מורד, מעלה). לדוגמא - שינויי שיפוע אורכי או שינוי בחספוס בקטע תעלה משפיע גם במקומות אחרים. יש ללמוד את הבעיה ולבחור פתרון המותאם לבעיה באתר, פתרון מוצלח במקום אחד לא בהכרח מתאים למקומות אחרים הסובלים מבעיות דומות אך לא זהות. לא תמיד ניתן לפתור את בעיית היציבות באופן נקודתי. בבחירת הפתרון יש לשקלל את נושא התחזוקה. יש ללמוד את מגבלות אמצעי הייצוב וליישם בהתאם. הכוונה לשימוש לא מושכל בפתרונות ייצוב, כגון: ייצוב בצומח באזורים מרוססים או שימוש ברשתות גביונים בנחלים המכילים סחף אבן (נחל אבנון-ירוחם) או בנחלים בעלי שפכים קורוזיביים ועוד.

## 2. הערכת יציבות תעלות

### כללי

הערכת יציבות ברמה מסוימת נדרשת בשלבים ראשונים של גיבוש הפתרון בפרויקט על מנת להצביע על חלופות בהם צפויות בעיות יציבות משמעותיות ולהגדיר את הצרכים להמשך מחקר. עם התקדמות התכנון יידרשו הערכות מפורטות יותר.

במקרים מסוימים ההשלכות של חוסר היציבות לטווח ארוך ישפיעו מאוד על ישימות הפתרון. במקרים רבים, ברגע שנתקבלו החלטות מפתח יהיה קשה לשפר את הפרויקט על מנת להימנע מבעיות יציבות רציניות.

הגבול בין הקמת הפרויקט ועבודות התחזוקה המתמשכות אינו ברור דיו בד"כ. שיקולים של עלות תועלת, יהיו מורכבים עוד יותר כאשר סרגל הזמן של תגובת התעלה לשינוי שנגרם עם הסדרת התעלה ולחוסר היציבות, אינו ברור. אולי יהיה סביר להסתמך על תחזוקה על מנת להתמודד עם חוסר יציבות הדרגתי ומתמשך אך לא כך במקרה של התפתחות תגובה מהירה. הערכת היציבות יכולה להתבצע במספר רמות, החל מהערכת תהליך איכותית, המבוססת על תצפיות ועד להערכת כמותית בחלקה, המבוססת על תצפיות, נתונים ומודל נומרי. רמת הפירוט המתאימה, תלויה בגודל הפרויקט, במימדי הבעיה וחוסר היציבות, וכן ברמת הידע והמחקר הקיימים.

גישות וטכניקות מקובלות להערכת כמותית של יציבות תעלות כוללות:

מהירות מותרת, מאמץ גזירה מותר, יחסים גיאומטריים הידרוליים, ניתוח הסעת סחף וניתוח יציבות מדרונות.

רוב הטכניקות לא מספקות פתרון מושלם וניתן להתייחס אליהם כאל עזרים להערכה הנדסית ולא ככלים עצמאיים מספיקים.

לדוגמא: לא ניתן לקבוע על סמך טכניקות חישוב, האם הסדרת תעלה תגרור התפתחות מיאנדרים, בגלל גורמים שלא ניתנים להערכה פשוטה, כגון התפתחות צמחיה וקוהזיה. מומלץ להעדיף גישות מקומיות ומרחביות ונתונים אמפיריים או פתרונות שהוכחו כמספקים בהתאם לניסיון המצטבר, על פני גישות כוללניות.

היציבות של תעלות מפני חתירה או השקעת סחף היא תהליך מורכב ורב מימדי, המידע הקיים אינו מדויק כמו בתעלות לא חתורות. במקרה של התנגשות בין ההערכות האנליטיות לניסיון הקיים, נדרש משנה זהירות.

הגנה מספקת מפני ארוזיה אינה מבטיחה בהכרח מניעה של בעיות יציבות או השקעת סחף.

גישות פשוטות, מגדירות מהירות מירבית או מאמץ גזירה מותר בהעדר ספיקת סחף משמעותית.

גישות מורכבות יותר כוללות התייחסות לספיקות הסחף.

בפרויקטים של הגנה בפני שטפונות השקעת סחף עשויה להיות חשובה במידה דומה להימנעות מארוזיה.

נוסחאות חישוב מהירות זרימה בשיטות כגון נוסחת מנינג, מתייחסות למהירויות זרימה ממוצעת בחתך הזורם.

הערך האמיתי בנקודות בהם נוצרת ארוזיה, כגון: בגדה החיצונית בעיקול, בהיצרות פתאומית ובמעברים חדים, עלול להיות גדול יותר מהממוצע באופן משמעותי.

מאידך, בנקודות של שקיעת סחף המהירויות האמיתיות עלולות להיות קטנות מאוד.

## 2.1 מהירות ומאמצי גזירה

המושגים מהירות מותרת ומאמצי גזירה מותרים דומים, שניהם נועדו להגדיר תעלה ללא בעיות ארוזיה. לעומת זאת, בתכנון הסעת סחף בתעלות אירוזיביות, יש להבטיח כי כמות הסחף היוצאת מהמערכת שווה לכמות הסחף הנכנסת. שינויים במהירות המותרת או במאמצי הגזירה המותרים תוך התחשבות בהסעת הסחף הוצעו במספר מקורות בספרות המקצועית.

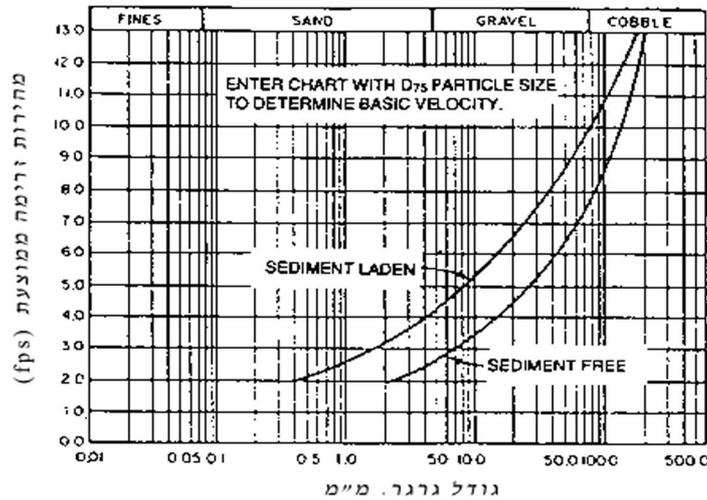
1. **מהירות זרימה מותרת:** התנהגות הזרימה בתעלות אירוזיביות מושפעת מהרבה גורמים פיזיים ומתנאי שדה מורכבים ולא ברורים כך שהערכה מדויקת של מהירות הזרימה המותרת אינה ריאלית. בארה"ב נעשו ניסיונות מעבדה שבחנו את מהירות הזרימה המותרת, המשתנה בהתאם לקרקעות או לחומרים המצפים את התעלה (טבלה מס' 1).

**טבלה מס' 1 : זוגמא למהירות זרימה מותרת בתעלות לפי (EM 1110-2-1601)**

מהירות זרימה ממוצעת (מ"/שנ')	חומר התעלה
0.7	חול דק
1.3	חול גס
2.0	אבנים קטנות
<b>עפר</b>	
0.7	סחף חולי
1.2	סחף חרסיתי
2.0	חרסית
<b>תעלות מיוצבות בצומח (שיפוע אורכי קטן מ 5%)</b>	
<b>Bermuda Grass</b>	
2.0	סחף חולי
2.6	סחף חרסיתי
<b>Kentucky Blue Grass</b>	
1.7	סחף חולי
2.3	סחף חרסיתי
<b>סלע</b>	
3.3	סלע משקע
2.6	אבן חול רכה
1.2	אבן פצלתית רכה, צפחה
6.6	אבן קשה

מהירות הזרימה המותרת בתנאי של עומס הסחף במים מפורטת ב איור מס' 1.

\* מהירות הזרימה הממוצעת בפיט לשניה.



איור מס' 1: מהירות זרימה מותרת לפי כתלות בעומס הסחף במים. (USDA 1977).

עקום זה בוצע עבור עומס סחף מסוים והוא ביטוי עקרוני של היחס בין מהירות הזרימה המותרת לגודל הגרגר ועומס הסחף המוסע במים. פרטים נוספים ניתן למצוא ב - (USDA 1977) וב - (Chow1959).

2. מאמצי גזירה: מאמצי גזירה גבוליים נקראים לעיתים גם כוחות גרר ונחשבים כקריטריון לארוזיה. ממוצע מאמצי הגזירה הגבוליים בזרימה אחידה מבוטא ע"י הנוסחה:

$$\tau_0 = \gamma RS$$

כאשר:

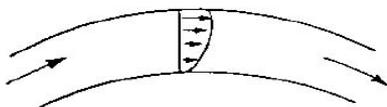
$$\tau_0 = \text{ממוצע מאמץ הגזירה (ק"ג/מ}^2\text{)}$$

$$\gamma = \text{משקל סגולי של המים (ק"ג/מ}^3\text{)}$$

$$R = \text{רדיוס הידרולי (מ')}$$

$$S = \text{שיפוע פני המים (מ'/מ')}$$

פיזור כוחות הגרר על פני חתך התעלה משתנה בהתאם לצורת חתך הזרימה. (איור מס' 2)



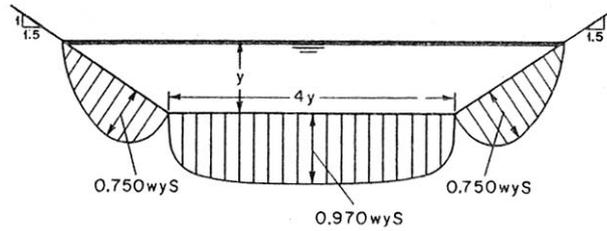
פירוס מאמץ הגזירה לרוחב חתך עקמומי (היטל על)



פירוס מאמץ הגזירה בחתך זרימה לא אחיד

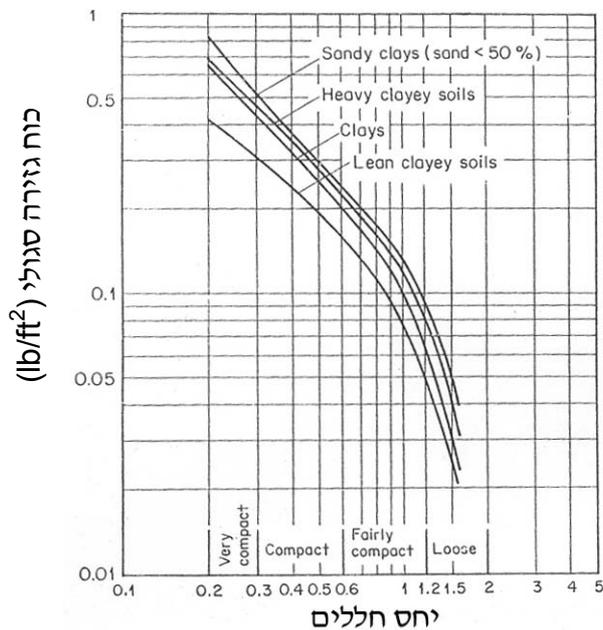
איור מס' 2: פירוס מאמצי גזירה בחתכים שונים.

פירוס מאמצי הגזירה אינו קבוע בהיקף המורטב (פרט לנחלים רחבים מאוד) ושונה בין הגדות לקרקעית (איור מס' 3).



איור מס' 3: פירוס מאמצי גזירה בחלקי התעלה השונים.

באדמות קוהזיביות למחצה או שאינן קוהזיביות ההגנה מפני ארוזיה תלויה בכימיה של המים, משכי הזרימה ומידת החשיפה לאוויר (Raudkivi and Tan 1984). מאפיינים אלו שונים מאוד בין נחלים ובזמנים שונים באותו הנחל עקב זיהומים, אירועים שיטפוניים המושפעים מהמעלה ועוד. באיור מס' 4 יש דוגמא למאמצי גזירה מותרים עבור מספר קרקעות קוהזיביות.



איור מס' 4: דוגמא למאמץ גזירה מותר במספר קרקעות קוהזיביות. לפי Chow 1959.

## 2.2: עקרונות תגובה ושיווי משקל דינמי של תעלות.

מאפיינים של חוסר יציבות והשקעת סחף באים לידי ביטוי בשני תחומים עיקריים: השפעה על קטע התעלה בו מתרחשת התופעה, וההשפעה על מעלה ומורד הקטע. כאשר מאפייני התעלה (עומק, רוחב, שיפוע) משתנים, התעלה תגיב ע"י שינוי חתך הזרימה, שינוי השיפוע או התנוחה של האפיק. לרוב, קשה לאפיין או להבדיל בין תגובה לאירוע שקרה או לתהליכים מתמשכים שהיו קורים בכל מקרה. בד"כ תגובת הנחל או התעלה בטווח הזמן הקצר יהיו בסמיכות לאתר בו התבצע שינוי, אך בטווח הארוך ניתן לצפות להשפעות הרחק במעלה או במורד הזרימה. כאשר הערכת היציבות מצביעה על בעיות אפשריות, בד"כ מבוצעות פעולות של הגנה על הגדות, מיתון השיפוע האורכי וכדו' המהוות חלק מהפעולות לשימור פני התעלה, אך פעולות אלו לא בהכרח ימנעו תגובות במעלה או במורד. לדוגמא, בנחל בו יש מיאנדרים נודדים, ייצוב הגדות בעיקולים יסיט את המיאנדר למעלה הנחל או למורדו.

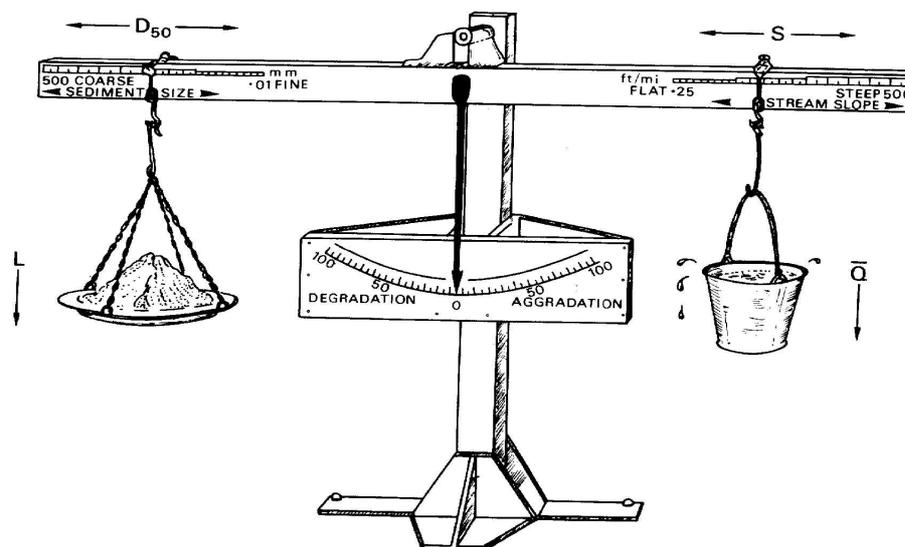
להלן טבלה של תגובות צפויות לשינויים בתעלה בעקבות ה- U.S. Army 1994

טבלה מס' 2: תגובות צפויות של מאפייני הנחל לשינויים של מס' פעולות ותנאים סביבתיים.

המשתנה הגורם לשינוי	אופי השינוי	רוחב	עומק	שיפוע	צורת התנוחה	אירוזית גדות
ספיקה	עולה	עולה	עולה	יורד	אין שינוי ניכר	עולה
	יורדת	יורד או לא משתנה	יורד	יורד או לא משתנה	אין שינוי ניכר בכמות השרטונות	יורד
ספיקת סחף	עולה	לא ברור	יורד	עולה באופן ניכר	עליה בחסימה ופיצול האפיק	ייתכן שיעלה
	יורדת	לא ברור	עולה	יורד	ירידה בפיצול האפיק	ייתכן שירד
גודל גרגר הסחף	עולה	לא מובהק	יורד	עליה ניכרת	לא ברור	לא ברור
	יורד	לא מובהק	עולה	תיתכן ירידה	לא ברור	לא ברור
מצב הגדות	הוספת הגנה של הגדות	יתכן שירד	יתכן שיעלה באופן מקומי	אין שינוי מהותי	בהתאם לתכנון	פחיתה באתר עצמו, צפי לעליה במורד
	הסרת צמחייה	עולה	יתכן שירד	אין שינוי	עליה בכמות השרטונות	עליה ניכרת

תיאור יפה של מערכת היחסים בין המאפיינים המשפיעים על תופעות של סחף בתעלה ניתן למצוא אצל

Lane (1954). איור זה מתאר בעזרת מאזניים את הקשרים הנ"ל (איור מס' 17).



איור מס' 17: המאזניים של ליינ. מתוך Lane (1954).

נמצא כי מתקיים קשר פרופורציוני בין ספיקת המים, שיפוע המים, ספיקת הסחף וקוטר הגרגר.

$$Q * S \sim Q_s * D_{50}$$

כאשר:

$$Q = \text{ספיקה (מ"ק/שני)}$$

$$S = \text{שיפוע (מ"מ)}$$

$$Q_s = \text{ספיקת הסחף (טון/יממה)}$$

$$D_{50} = \text{קוטר ממוצע (מ')}$$

מערכת היחסים בין המאפיינים מצביעה על כך שעליה בשיפוע האורכי מובילה להגדלה בהסעת הסחף בהנחה שספיקת המים וגודל הגרגרים נשאר קבוע. אם נחל עקלקל מוסדר ועובר יישור, צפוי כי השיפוע האורכי יגדל וכתוצאה מכך תגבר הסעת הסחף מהקטע המיושר, תוך התמתנות השיפוע במעלה ועליה בתלילות השיפוע במורד. בכך, הנחל מנסה להחזיר על כנו את השיפוע המקורי. תנוחת הנחל תגיב לשינויים בכניסת הסחף אם ספיקות הזרימה לא ישתנו. ככלל, עלייה בעומס המרחפים מייצרת צורות לא מאורגנות ובנוסף חסימות באפיק. נחל המפוצל בצפיפות רבה הוא דוגמא קיצונית לכך. אירוויזית גדות והעתקה של התעלה רגישים לעלייה בספיקות וירידה בהגנה של הגדות, במיוחד בהסרת הצמחייה. (סוללות צמודות לאפיק להגנה בפני שיטפונות יכולים להוות סיבה משמעותית בהגדלה של הספיקות).

### 2.3 כושר הולכת סחף (Sediment Transport Capacity)

כללי

נושא הסחף הינו אחד הנושאים המורכבים ביותר בהידראוליקה של תעלות עפר. הדעה הרווחת היא שמאמצי הגזירה הפועלים על הגדות והקרקעית הם הגורם העיקרי לארוזיה. אך למעשה נושא זה אינו בר הפשטה ואינו פתור עד תום גם בימינו. כאשר אנו בוחנים את התופעה במאקרו, אזי, מאמצי הגזירה אכן נחשבים לגורם העיקרי לארוזיה בתעלות (Mevorach et Al-1984), אך עם זאת, יש לזכור כי כוחות נוספים פועלים על הגדות ועל הקרקעית כגון: שינויי מפלס, שינויים בצורת גל הגיאיות, גלי רוח, מיחתור, חלחול ומשך זרימה. מאמצי הגזירה הכוללים יכולים לעלות על מאמצי הגזירה המרביים. (Kuiper 1965) בחן כוחות אלו ונירמל אותם למאמצי גזירה כמפורט בטבלה מס' 3.

**טבלה מס' 3: כוחות הפועלים על התעלה וגורמים למאמצי גזירה (Kuiper 1965).**

מאפיין הגורם לארוזיה	ערך המנורמל למאמצי גזירה
מאמצי גזירה או מהירות	1
שינוי מפלס	0.03
גלי רוח, פייפינג, ארוזיה משטחית	0.04
שינויים בצורת גל הגיאיות	0.08
כוחות חלחול	0.08
כוחות גרביטציה	0.09

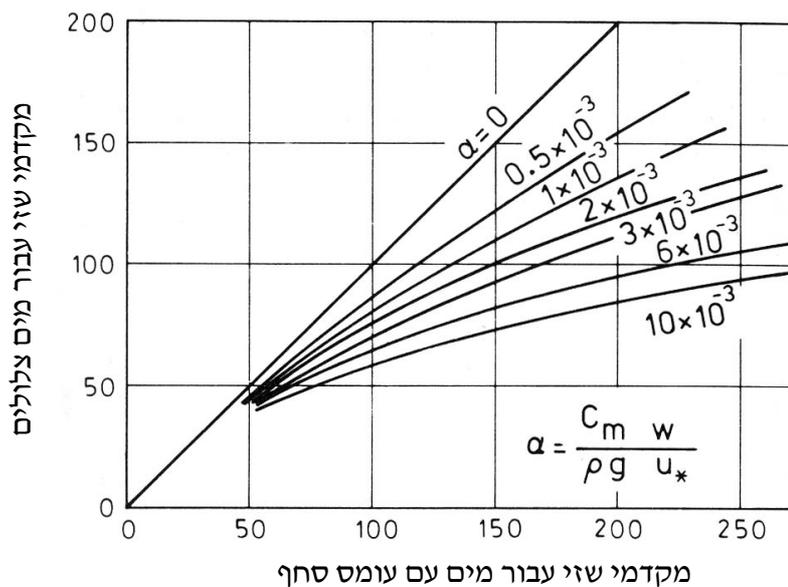
בנוסף לבחינת מאפייני הזרימה המשפיעים על הארוזיה בתעלה, יש לבחון את המאפיינים העיקריים של זרימה אלוביאלית בתעלה: ארוזיה, הסעת סחף והשקעת סחף. אלו קשורים ישירות לשינויים במאמצי הגזירה הממוצעים הנקבעים ע"י הזרימה בתעלה. עם עליית הספיקה מתגברים מאמצי הגזירה, כאשר הם עולים על מאמצי הגזירה המותרים לתנאי האפיק, מתחילה ארוזיה. כאשר הזרימה פוחתת, אותם חלקיקים שנשחפו קודם מתיישבים על קרקעית התעלה במקומות אחרים במורד הנחל. שיפוע הקרקעית מושפע מתהליך זה של ארוזיה והשקעת סחף וכתוצאה מכך המהירויות משתנות והשיפוע ההידרולי (כאשר הוא אחד המאפיינים המשפיעים על מאמצי הגזירה) משתנה, והנה מעגל סגור השואף להגיע לשווי משקל. למעשה, עד שלא יושג מצב של שיווי משקל, פעילות זו בין ארוזיה להשקעת סחף, תימשך. בתחילת תהליך ארוזיה קיימת השפעה גדלה לכיוון המעלה אשר גורמת להגדלה בכמויות הסחף. תהליך זה נפסק משום שמתחיל תהליך של השקעת סחף במורד אשר זוחל לכיוון המעלה כתוצאה מהשפעת ההערמות לאחור (backwater) עד להתייצבות וחוזר חלילה. לתהליך הארוזיה גבולות טבעיים

המוגבלים ע"י יכולת סופית של המים לשאת סחף (כושר הולכת סחף - Sediment transport capacity) הנמדדת ביחידת מסה ליחידת נפח ביחידת זמן או גרם/ליטר/שנייה. מאפיין זה תלוי במאפיינים כמו: ספיקה, צורת קרקעית התעלה, גודל גרגיר, צורת הגרגיר, קוהזיביות ועוד. ההערכה הרווחת היא שהמים אינם יכולים לשאת יותר סחף מכושר הולכת הסחף שלהם. מתוך כך, ניתן להסיק כי מים צלולים יכולים לשאת יותר סחף ומכאן שהם ארוזיביים יותר ממים הנושאים סחף. את היחס בין מים צלולים למים נושאי סחף ניתן לראות באיור מס' 5 בו בוחנים את מקדמי שזי עבור דרגות שונות של סחף במים. הקשר

בין מקדם שזי למקדם מאנינג מבוטא ע"י  $n = R^{1/6} / C$  כאשר  $n$  - רדיוס הדרולי (מ'),  $n$  - מקדם מאנינג,  $C$  מקדם שזי.

נוסחת שזי:  $V = C(RI)^{1/2}$  כאשר  $V$  - מהירות (מ"/שני),  $R$  - רדיוס הידראולי (מ'),  $I$  - שיפוע אורכי (מ"/מ').

$$V = 1/n R^{2/3} I^{1/2}$$

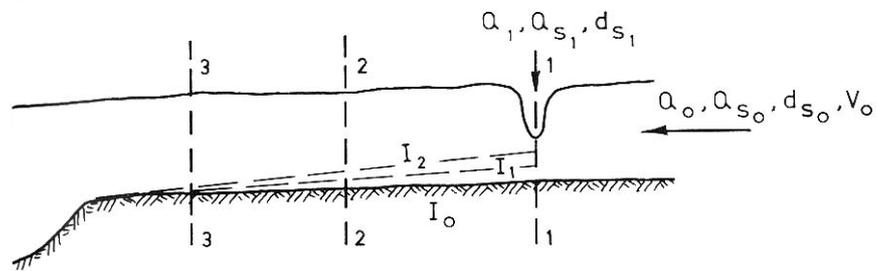


איור מס' 5: מקדמי שזי עבור דרגות שונות של עומס סחף ביחס למקדמי שזי למים צלולים. מתוך (Mevorach et Al. 1984).

$a$  - הינה ביטוי של מידת עומס הסחף במים חסר יחידות,  $Cm$  - משקל ממוצע של רכז הסחף במים,  $w$  - המהירות בה מתיישב הסחף,  $pg$  - משקל סגולי של המים,  $U^*$  - מהירות גזירה. בשל העובדה שמקדם שזי הינו ליניארי למהירות, מהירות הזרימה פוחתת משמעותית עבור עומסי סחף גבוהים. עבור  $a = 10 \cdot 10^{-3}$  מקבלים יחס של 100/270 בין מקדם שזי למים צלולים לבין מקדם שזי למים בעלי עומס סחף וזהו גם יחס המהירויות המחושב.

### 2.3.1: דוגמאות הממחישות את השפעת כושר הולכת סחף על אופי ומבנה והתעלה.

נניח כי קיימת תעלה בעלת ספיקת זרימה  $Q_0$ , ספיקת סחף  $Q_{s0}$ , והקוטר הממוצע של חלקיקי הסחף הינו  $d_{s0}$ , תנאים אלו הם קבועים במהלך התצפיות. בנוסף, השיפוע האורכי בתעלה  $I_0$  הינו מתון וכושר הולכת הסחף עדיין לא הגיע לרוויה. ראה איור מס' 6.



איור מס' 6: מערכת טבעית של נחל.

#### מקרה 1

כניסה של פלג קטן אל התעלה בחתך מס' 1. לזרימה מפלג זה יש ספיקת זרימה  $Q_1$ , ספיקת סחף  $Q_{s1}$ , והקוטר הממוצע של חלקיקי הסחף הינו  $d_{s1}$ , כל עוד  $Q_1$  ו- $Q_{s1}$  יהיו קטנים הם לא יגרמו לזרימה הראשית להגיע לרוויה בכושר הולכת הסחף שלה. אך כאשר עומס הסחף מהפלג יעלה, יגיע כושר הולכת הסחף בתעלה הראשית לרוויה ותתחיל השקעת סחף במורד חתך 1, בשל כך, המים בחתך 2 ישאו פחות סחף, ובחתך 3 עוד פחות. לאחר זמן מסוים ייווצר שיפוע אורכי תלול יותר חדש בקרקעית  $I_1 > I_0$ . בעקבות השינויים בשיפוע יחולו שינויים גם במהירויות הזרימה  $V_1 > V_0$ , תהליך זה יימשך כל עוד הזרימה באפיק הראשי לא תגיע לרוויה בכושר הולכת הסחף. השיפוע האורכי יגדל  $I_2 > I_1$  וכתוצאה מכך בקרקעית. בנקודת זמן זאת, הנחל הגיע לשיווי משקל זמני.

#### מקרה 2

תחילתו של מקרה זה בסופו של מקרה 1. כאשר לאחר זמן מה נוצר שיפוע אורכי חדש ותלול יותר באפיק הראשי -  $I_1$ . כעת ספיקת המים  $Q_1$  והסחף  $Q_{s1}$  מהפלג הצידי פוחתות. הספיקה המשותפת  $Q_i$  במורד הפלג פוחתת ואיתה גם פוחת כושר הולכת הסחף. אך שיווי המשקל מסוף מקרה 1 עדיין שואף להישאר לזמן מה וכך מתחיל שוב תהליך סחיפה עד שנוצר שיפוע קרקעית חדש, תלול יותר מתחילת מקרה 2 ומביא את המערכת למצב שיווי משקל חדש.

### מקרה 3

תחילתו של מקרה זה בסופו של מקרה 1. כאשר לאחר זמן מה יש שיפוע אורכי חדש ותלול יותר באפיק הראשי – ii. כעת ספיקת המים מהפגל  $Q_1$  עולה ואילו ספיקת הסחף  $Q_{s1}$  נשארת קבועה. לאחר זמן מה הזרימה באפיק הראשי תרד אל מתחת לכושר הולכת הסחף שלה, לפיכך, יתחיל תהליך ארוזיה עד להתייצבות שיווי משקל חדש ע"י כיוונון כושר הולכת הסחף של האפיק הראשי ע"י שינוי מאפייני ריכוזי הסחף. בסיום תהליך זה, התעלה הראשית מתייצבת על שיפוע קרקעית מתון יותר מסוף מקרה 1. באופן כללי ניתן לומר כי אם ספיקת הסחף  $Q_s$  וגודל גרגיר הסחף  $d_s$  נשארים קבועים, בעוד ספיקת הזרימה גדלה, המגמה באפיק תהיה ארוזיה ומיתון שיפוע הקרקעית. ולהפך, אם ספיקת הזרימה פוחתת עבור אותם תנאי סחף, המגמה באפיק תהיה השקעת סחף ויצירת שיפוע תלול יותר. כאשר יש עלייה או ירידה בספיקת הזרימה בלי שינוי דומה בספיקת המוצקים (סחף), מתחיל מצב מעבר בו כל המאפיינים המורפולוגיים נמצאים במצב של שיווי משקל מעורער. בנחלים קטנים בהם השונות באוכלוסיית הספיקות היא גדולה ( $Q_{max} \gg Q_{min}$ ) השינויים בשיפוע האורכי יהיו גדולים ( $I_{max} \gg I_{min}$ ) והמצב של שיווי המשקל המעורער יהיה קצר ביותר. בנחלים גדולים בהם השונות בספיקות והשיפועים התואמים אינה כה מובהקת, מצב שיווי המשקל המעורער יכול להיות ארוך יותר (ימים, שבועות או חודשים).

### מצב 4

תחילתו של מקרה זה בסופו של מקרה 1. כאשר לאחר זמן מה יש שיפוע אורכי חדש ותלול יותר באפיק הראשי – ii. המצב הוא כזה שספיקת הזרימה נשארת קבועה ואילו ספיקת המוצקים משתנה. מצב כזה קורה לרוב תחת השפעת פעילות אדם כגון: בניית סכר, שימור קרקע, פיתוח עירוני במעלה אגן ההיקוות, נטיעת או כריתה יערות ועוד.

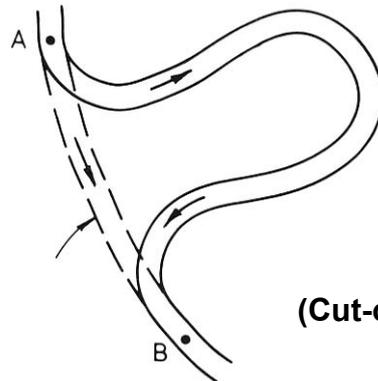
כאשר יש פחיתה בספיקת המוצקים  $Q_s$  הנחל ירד במהירות אל מתחת לכושר הולכת הסחף שלו. כתוצאה מכך יחל תהליך ארוזיה ויימשך עד שיווצר שיפוע אורכי מתון יותר. ולהפך, כאשר יש עלייה בספיקת המוצקים  $Q_s$  תכולת המוצקים במים עולה ומביאה את האפיק אל מעבר לכושר הולכת הסחף שלו ומתחילה השקעת סחף עד להתייצבות בשיפוע אורכי תלול יותר.

דוגמאות אלו אינן מביאות לידי ביטוי מאפיינים נוספים המשפיעים על תהליכי הארוזיה והשקעת הסחף, אך המסקנות העיקריות שהוצגו לגבי השינויים המורפולוגיים באפיק נכונות באופן עקרוני עבור נחלים אלוביאליים. אומנם דוגמאות אלו אינן כמותיות אך הן יכולות להצביע על תופעות להם ניתן להתייחס בתכנון הנדסי, כמו בדוגמאות המובאות להלן:

דוגמא 1: ספיקת הזרימה  $Q$ , ספיקת המוצקים  $Q_s$  וגודל גרגיר הסחף  $d_s$  נשארים קבועים, כאשר השיפוע האורכי פוחת מלאכותית. מצב זה קורה לרוב בתעלות ניקוז או בנחלים טבעיים קטנים, כאשר בונים מפלונים למנוע ארוזיה עקב שיפוע תלול מדי. תוצאה מיידית של מקרה זה היא ירידה בכושר הולכת הסחף וכתוצאה מכך הארוזיה תלך ותפחת. פתרון זה לרוב מתוכנן לספיקות התכן, בספיקות נמוכות יותר ייווצרו תנאים של השקעת סחף על הקרקעית.

דוגמא 2: מצב הפוך לדוגמא 1, ספיקת הזרימה  $Q$ , ספיקת המוצקים  $Q_s$  וגודל גרגיר הסחף  $d_s$  נשארים קבועים, כאשר השיפוע האורכי תלול יותר מלאכותית. מצב כזה ישויכול לקרות עקב הסדרה או הטיית האפיק (פעולות הנדסיות נפוצות כפתרון להגנה בפני שיטפונות). בתחילה, בתהליך המתמשך בין שנים

בודדות לעשרות שנים, תחל ארוזיה עקב הגדלה בכושר הסעת הסחף. עם הזמן השיפוע יתמתן עד שיתייצב על שיפוע מתון יותר.  
 דוגמא 3 : זוהי דוגמת הרחבה לדוגמא 2 הניתנת בנפרד משום שזוהי פעולה הנדסית נפוצה בהסדרות נחלים ונקראת קיצור תוואי (Cut-off) איור מס' 7.



**איור מס' 7: קיצור תוואי (Cut-off)**

הדיון על פעולת קיצור התוואי נדונה בהרחבה בפרק 3. בדיון זה אנו עוסקים רק בסוגיה לפיה הרום בנקודות A ו-B נשאר זהה לרום שלפני פעולת קיצור התוואי. השיפוע האורכי בין שתי הנקודות גדל משמעותית, מתקיימים שני מעברים בקטע: א) בין השיפוע המתון של מעלה נקודה A לבין השיפוע התלול בקיצור התוואי. ב) בין השיפוע התלול לבין השיפוע המתון במורד נקודה B. תהליך הארוזיה מתחיל לא רחוק מנקודה A, החומר שנסחף נישא לאורך קיצור התוואי ומושקע בקרקעית באזור נקודה B. עם הזמן הארוזיה נעה במעלה נקודה A והשקעת הסחף יורדת מטה מנקודה B איור מס' 7.



**איור מס' 8: ארוזיה והשקעת סחף בקיצור תוואי**

מצב זה נמשך עד להתייצבות שיפוע אורכי הדומה לשיפוע המקורי לפני קיצור התוואי. ראוי לציין כי רום קרקעית התעלה במעלה נקודה A ירד עם הזמן לעומת רום הקרקעית במורד נקודה B אשר יגבה לעומת הגובה המקורי לפני קיצור התוואי. מצב זה עלול לגרום הצפות במורד בספיקות גדולות משום ששטח החתך הוקטן והמים לא יכולים להיות מוכלים בתעלה.

## 2.4 מיאנדרים ועיקולים

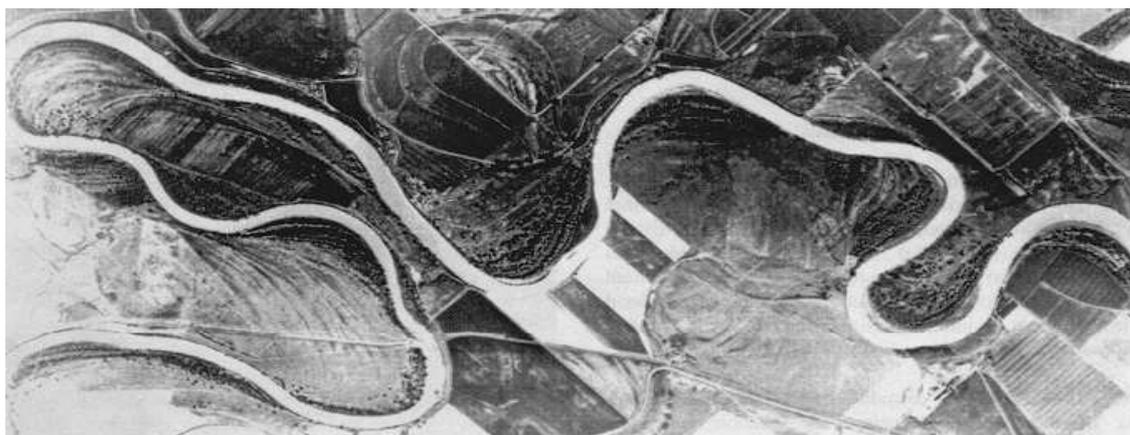
### כללי

נחלים משתנים באופן דינאמי ורצוף מבחינת המיקום, הצורה ומאפיינים מורפולוגיים נוספים, עם השינויים בספיקות ובמהלך הזמן. מתוך כך חשוב להבין מהם השינויים האפשריים עבורם יש לתכנן את

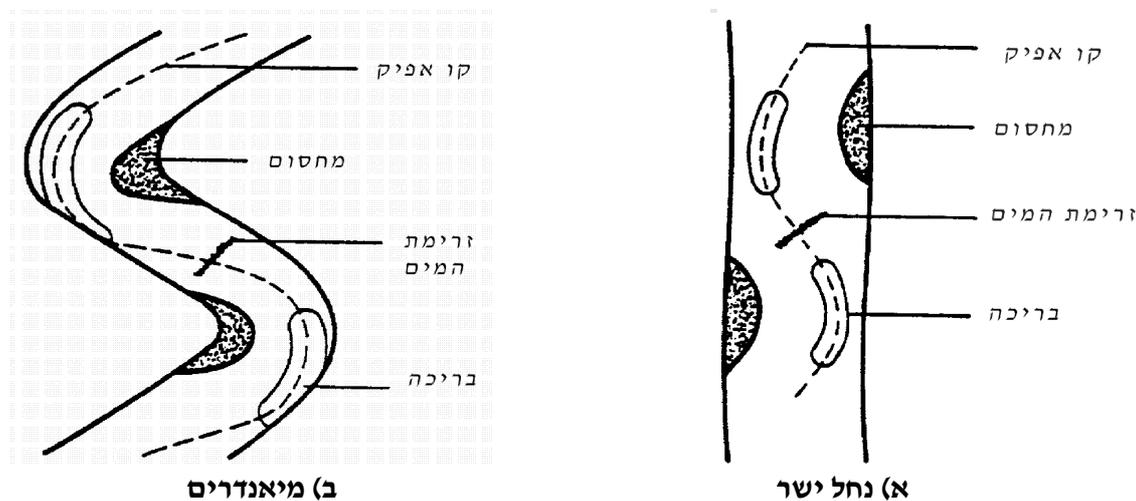
הנחל בעת הסדרה, במיוחד בפרוייקטים בהם משנים ומטפלים משמעותית בגדה. מאפייני הנחל נקבעים ע"י ספיקות המים והסחף, הרכב הקרקעית והגדות, השיפוע האורכי, מאפיינים גיאולוגיים והשתנות שלהם בזמן וע"י השפעת האדם.

### 2.4.1 צורת התעלה

צורת התעלה מתארת את תנוחת התעלה כשהמאפיין הבולט ביותר הינו מידת המיאנדרים שבו. נחל בעל מיאנדרים (איור מס' 8) הינו נחל המאופיין ע"י סידרה של שינויי כיוון או עיקולים ומחסומים. נדיר שנחלים אלוביאליים בטבע הינם בעלי קו ישר. גם בנחלים בהם התנוחה כמעט ישרה לאורך תקופה ארוכה, קו הזרימה מתנהל בקו בעל אופי מיאנדרים (איור מס' 9).



איור מס' 9: נחל המאופיין במיאנדרים.



איור מס' 10: מאפיינים הקשורים בנחל ישר (א) ובנחל בעל מיאנדרים (ב)

הסכימה באיור מס' 9 מתארת את המאפיינים הקשורים בזרימה בנחלים ישרים ובעלי מיאנדרים. גם בנחלים בהם הגדות יציבות או מוגנות תיווצר הצורה הסכימטית המתוארת באיור מס' 9א. קו האפיק מופיע לרוב בחלק העמוק ביותר בנחל. בעיקול קיים ריכוז קווי זרימה עקב הכוחות הצנטרפוגאליים מה שגורם לעומק לעלות בצד החיצוני של העיקול, אזור זה נקרא בריכה. האזור בו הזרימה מחליפה צד

נקרא מרכז זרימת המים. בצד השני של העיקול יש פחיתה משמעותית בקווי הזרימה ולפיכך המהירות יורדת וכתוצאה מכך באזור זה יש השקעת סחף.

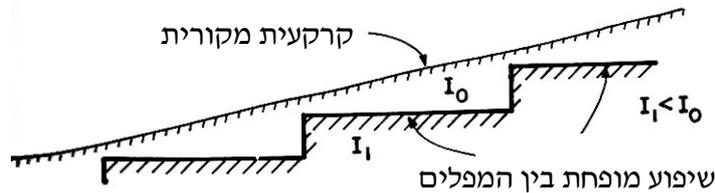
פיתוליות (Sinuosity) הינו הערך המתאר את דרגת המיאנדרים בנחל. הערך מוגדר כיחס בין אורך האפיק לאורך המרחק האווירי בין שתי נקודות באפיק. נחל ישר יאופיין בדרגת פיתוליות 1 ואילו דרגת פיתוליות של 3 ומעלה יוגדר כנחל מפותל.

תופעת המיאנדרים היא תופעה מרכזית ביצירת ארוזיות גדות. קיים קשר בין המיאנדרים לשיפוע האורכי, לרוב, התופעה מאופיינת בנחלים בעלי שיפוע נמוך, לדוגמה הירקון. בנחלים בעלי ערך פיתוליות גבוה, העומק המירבי יהיה לרוב בגדה הקעורה אך במורד במרחק מסוים ממנה. לעומת זאת בנחלים ערך פיתוליות נמוך גובה המים המירבי יהיה בכניסה לעיקול ותהיה חזרה מהירה לנורמה מייד לאחר העיקול.

### 2.5 שיפוע אורכי יציב (Graded Channel)

ברוב המקרים הפרופיל הבסיסי של השיפוע האורכי מוכתב ע"י שיפוע הקרקעית של האפיק. רוב המקרים של אי יציבות אורכית נובעים משיפוע תלול מדי המאיים על מצב שיווי המשקל המותאם לתנאים ההידרוליים, ההידרולוגיים ושקיעת הסחף של התעלה. שיפוע תלול מדי יכול ליצור ארוזיה בקרקעית ובגדות ולהסיע כמויות גדולות של סחף, צרורות, אבנים ובולדרים לכיוון המורד עד לאזור בו השיפוע מתמתן ובו מושקע הסחף, שם נוצרת בעיה של סתימת האפיק. תופעה זאת נפוצה בנחלים של אגנים ים תיכוניים וצחיחים למחצה.

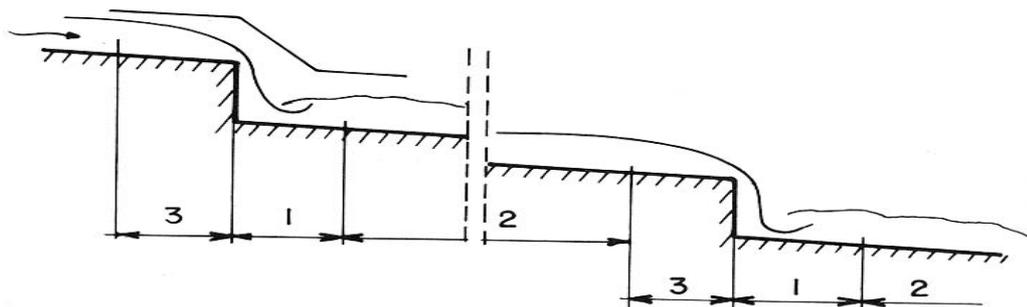
ע"י שימוש בסדרה של מפלים או מפלונים לאורך האפיק ניתן להפחית את השיפוע האורכי למידה הרצויה מבחינה הנדסית (איור מס' 10).



איור מס' 11: תיאור סכמתי של שיפוע הקרקעית עקב המפלים

השיפוע האורכי המופחת שבין שני מפלונים מתוכנן כך שמאמצי הגזירה בספיקת התכן לא יעלו על הערך המירבי המותאם לתנאי הקרקע באפיק (פרק 2.1). רצוי כי גובה המפלונים ולפיכך מספרם, ייקבע מתוך שיקולים הידרוליים וכלכליים זהירים. את אותה התוצאה ההידרולית ניתן להשיג ע"י מפל אחד או ע"י סדרה של מפלונים. כאשר השיפוע האורכי המותר על פי תנאי הקרקע הוא מתון ויש להעביר ספיקות גדולות, ניתן לנקוט בפתרון משולב של מיתון השיפוע יחד עם הגדלת חתך הזרימה בעזרת סוללות בקטעים בעייתיים למניעת גלישות הצידה ולהצפות במקומות לא רצויים.

מבחינה הידראולית, בכל סדרת מפלים ניתן להבחין בשלושה קטעים עיקריים כמו באיור מס' 11.



איור 12: אזורי התעלה השונים בהשפעת סדרת מפלים.

חלק 1 כולל את המפל עצמו והזנק ההידרולי הצמוד אליו במורדו. חלק 2 כולל את הקטע בין המפלים וחלק 3 הינו הגל היורד המוביל לעומק הקריטי במעלה כל מפל. הגל היורד הוא קצר ביותר ורובו מרוכז בקצהו (50% - 60% מגובה הנפילה הכולל מרוכז ב 10% - 15% מהאורך הכולל של הגל היורד). גל זה גורם לארוזיה מייד במעלה המפל בשל המהירויות הגבוהות בשל הירידה בעומק המים (עומק קריטי). אם עפר התעלה מתוכנן למאמצים המרביים בעומק נורמלי, אזי סביר כי תהיה ארוזיה צמוד למפל במעלה ואף תעמיד את המתקן כולו בסכנה. במורד, קיים זנק ההידרולי החותר תחת המפל ויש למגן את המפל במעלה ובמורד. המרחק של הזנק מהמפל אינו קבוע אך ניתן לשליטה.

בעיות של שפילת פרופיל התעלה הן בעיות נפוצות וחמורות בתעלות בעלות קרקעית העשויה מחול או חומר אירוזיבי אחר. בתעלות בעלות קרקעית אבנונית בה החלקיקים גסים יותר הקרקעית נוטה לעקב את תהליך השפילה של הפרופיל.

סוג הפוך של בעיית יציבות השיפוע האורכי היא כאשר שיפוע קטע התעלה מתון מדי ומתחיל לצבור סחף. בעיות כאלו יכולות לנבוע בעת פיצול התעלה למספר אפיקים או כאשר חופרים תעלה חדשה בה השיפוע אינו תואם את כושר הולכת הסחף (פרק 2.3).

ביודענו כי בטבע קיימת התופעה של שאיפה לשיווי משקל, נחלים אלוביאליים מנסים לתקן עצמם בהתאם לתנאים המשתנים בזרימה ובשאר המאפיינים הקשורים בה המגדירים מאזן דינאמי (פרק 2.2).

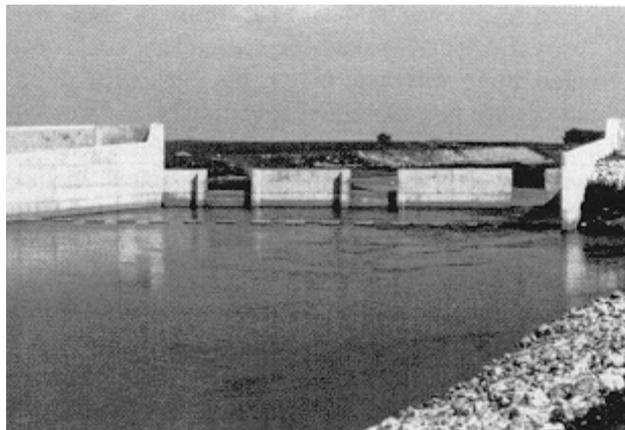
### 2.5.1 מתקנים לייצוב השיפוע האורכי

1. מפתנים : ניתן לשלוט בשפילת השיפוע האורכי ע"י שימוש במתקנים מדורגים לסירוגין לאורך הנחל. בין שתי נקודות



איור מס' 13: שימוש במפתנים לעצירת שפילת השיפוע האורכי ושקיעת הסחף במורד.

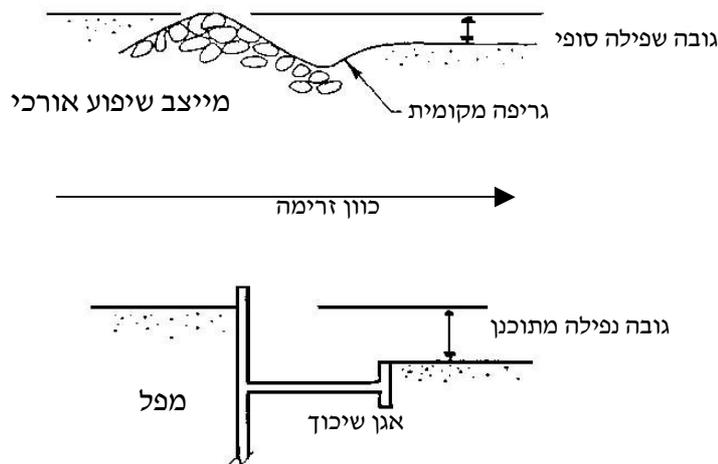
2. סיכרונים : שימוש משולב של סיכרונים ומפלונים המתאימים לטווח רחב של ספיקות.



איור מס' 14: שימוש בסיכרונים במשולב עם מפלונים לעצירת שפילת השיפוע האורכי ושקיעת הסחף במורד.

מתקנים כאלו מווסתים את הספיקה בעזרת הסיכרונים ואת השיפוע ע"י המפלונים. שימוש במתקנים אלו נעשה בעיקר בנחלים חתורים בכדי לבנות מחדש את השיפוע האורכי. צפוי כי מתקן זה ישמש כמלכודת סחף, ימתן את שיפוע התעלה ויקדם את היציבות הכללית של התעלה. השיקול בהחלטה על השימוש במתקנים אלו יהיה חלק מהתכנון המקדים של הפרויקט או לחלופין להמתין עד שייווצרו הבעיות בהתאם לשיקולים כלכליים, פוליטיים או הצפי לחומרת החתירות או הכשלים.

הסרת חסמים מהותיים בתעלה הראשית יכולה להשפיע על השיפוע האורכי באפיקי המשנה ויש להתחשב בכך בתוכניות הסדרה המשנות את תנאי הזרימה בתעלה. בעיקרון קיימות שתי גישות לייצוב השיפוע האורכי: מתקנים מייצבים ומפלים ראה איור מס' 14.

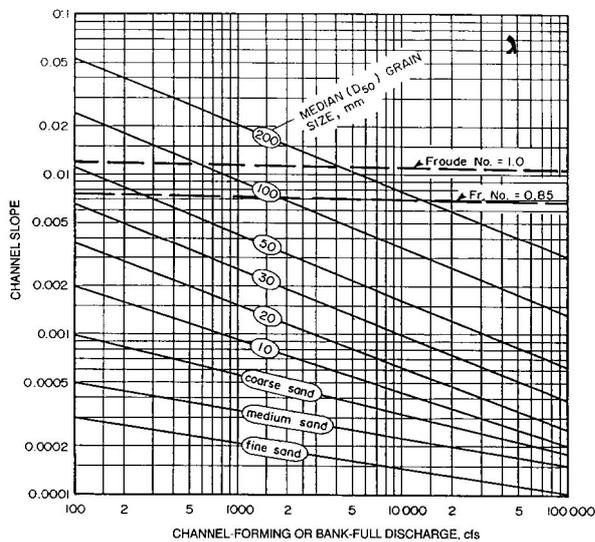
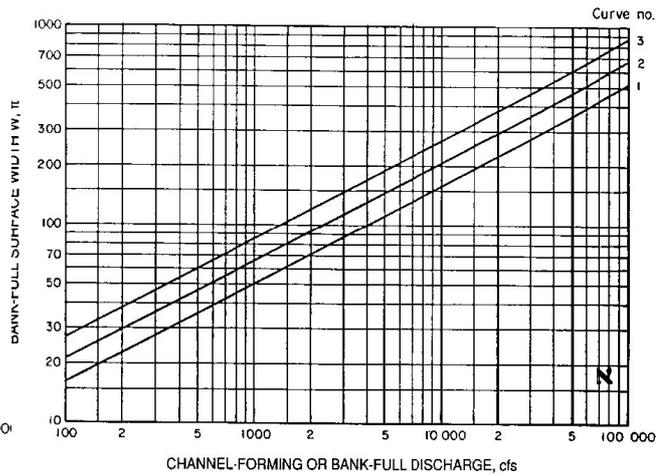
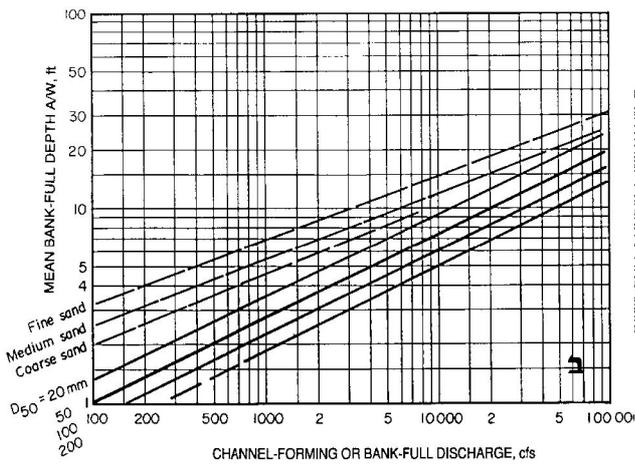


איור מס' 15: מיון עקרוני של מתקני יצוב אורכי.

מייצבי השיפוע האורכי יכולים להיות מאבן מקומית או מחומרים רבים נוספים ובמקרים רבים יכולים לשמש כחתך בקרה. לרוב, צפויה חתירה במורד המתקן כתוצאה מטורבולנציה מקומית ואיבודי אנרגיה. בניית מתקן כזה מחייבת תחזוקה וטיפול בחתירה לאחר תקופת תפעול מסוימת. המפל הינו מבנה מבוטן המבוסס אל תוך הקרקע. ניתן לבנות בצמוד אליו מתקן לשיכוך אנרגיה הבא לתת מענה לטורבולנציה במורד המתקן. מניסיון שנצפה בשטח, קיימת בעיית שאיבת חומרים דקים מתחת למתקן השיכוך וכתוצאה מכך הוא נשאר ללא ביסוס. לא ניתן להוסיף אבן לביסוס מתחת למתקן משום שאין גישה לשם. לבעיה זאת יש לתת פתרון הנדסי (בעזרת שן בטון בקצה מתקן השיכוך האנרגיה).  
3. העלאת חספוס התעלה: כאשר השיפועים הקיימים הם חורגים בצורה שולית בלבד, ניתן להגיע ליציבות אורכית ע"י העלאת חספוס פני התעלה למשל באמצעות בולדרים, הגברת הצומח השיחי בדפנות התעלה וכדומה.

## 2.6 יחסים אמפיריים של מאפייני תעלות

בין המאפיינים הגיאומטריים של התעלה לבין ספיקות התכן מתקיימים יחסים המגדירים את גבולות היציבות בתנאים השונים. יחסים אלו נחקרו בארה"ב ע"י (Us. Army 1994) ומובאים להלן. יחסים אלו נועדו לתת הערכה גסה לקביעת ערכי רוחב, גובה ושיפוע כתלות בספיקה ובקרקע התעלה. איור מס' 15.



- הספיקות באיורים אלו נתונות ב cfs עומק ורוחב התעלות נתונים ב ft, האיורים נלקחו מ (Us. Army 1994).
- $1 \text{ foot}^3/\text{sec} = 0.0283 \text{ m}^3/\text{sec}$
- $1 \text{ foot} = 0.3048 \text{ m}$

**איור מס' 16: הקשר בין הספיקה לבין המאפיינים: רוחב פני מים (א), גובה מים (ב), ושיפוע אורכי (ג).**

שרטוטים אלו יכולים להעיד על מידת ההתאמה בין המאפיינים הגיאומטריים לבין שינויים אפשריים בתעלה. למשל ע"י בניית סוללות לצד הגדות המשנות מהותית את היחס בין גובה, רוחב והספיקות האפשריות בתעלה.

אם הסעת הסחף בתעלה גבוהה אזי השיפועים המוצעים באיור מס' 15 ג' קטנים מדי וגובה הזרימה באיור מס' 15 ב' עשויים להיות גדולים מדי. תופעות אלו נכונות במיוחד עבור תעלות חוליות או בתעלות בעלות זרימות נדירות עם עומסי סחף גבוהים.

שימוש בשרטוטים אלו אינו יכול לעמוד בסתירה עם מגבלות על מהירות זרימה, מאמצי גזירה או תנאי יציבות של שיפוע אורכי או של יציבות מדרונות. במצבים בהם קיימת סתירה כזאת יש לעבוד לפי המגבלות ולא לפי שרטוטים אלו.

### 3. בעיות אופייניות בתעלות להולכת שיטפונות

#### כללי

קיימים מספר רב של אמצעים להסדרת תעלות על מנת להגדיל את כושר ההולכה בתעלות וכתוצאה, לשפר את השליטה על הזרימות השיטפוניות.

הסביבה המקומית ושיעור השיפור הרצוי בכושר ההולכה ישפיעו על בחירת שיטת ההסדרה. באופן כללי, באזורים עירוניים נדרשים חקירה ולימוד מפורטים יותר לקביעת האמצעים להולכת השיטפונות מאשר באזורים פתוחים, בגלל הפיתוח והתשתיות הצפופות. בגלל בעיות סביבתיות ובעיות של יציבות התעלות בפרויקטים רבים, נדרש להתייחס לרגישויות סביבתיות ולרגישויות של יציבות התעלות, בקביעת החלופה המועדפת.

#### 3.1 פרוט ודירוג האמצעים להולכת שיטפונות

הגדלת כושר ההולכה לשיטפונות באפיקים טבעיים כתגובה אוטומטית לבעיות הצפה, נתונה לביקורת והתקפה גוברת והולכת.

בטרם הסדרה רדיקלית של תעלה נדרש להתייחס ליתרונות העצומים של האוגר מחוץ לתעלה. היתרונות העצומים נובעים ממניעה או הפחתה של בעיות סביבתיות (כגון: הצפות באזורים אחרים במורד הזרימה, או פגיעה במערכת האקולוגית הרגישה בתחום האפיק), ובעיות יציבות התעלה כתוצאה משינוי מאזן דינמי קיים של סחיפה והשקעת סחף.

באגנים רבים האוגר הטבעי בשטחי ההצפה הופחת ע"י פיתוח חקלאי או עירוני. הזרימות נעשו מרוכזות יותר ע"י הטייה של זרימות רדודות באמצעות תעלות הטייה או סוללות. כתוצאה, עוצמת ספיקות השיא גדלה וכן גדלה השכיחות של אירועי ההצפה.

יצירת אוגר באגנים מחוץ לאפיק עשויה להפוך חזרה את המגמה השלילית להגדלת ספיקות השיא ושכיחותם, ככל הנראה, זו המדיניות המועדפת במספר רב של אזורים בעלי בעיות הצפה הולכות ומתמירות ללא פתרון אמיתי לטווח ארוך.

האמצעים להגנה בפני שיטפונות כוללים (מהקל אל הכבד):

א. הסרת מכשולים וצמחייה.

ב. ניקוי בתחום האפיק.

ג. הרחבת האפיק והעמקתו.

ד. שיפור תוואי או התוויית אפיק חדש.

ה. סוללות הגנה.

ו. הטייה למישורי הצפה למאגרים או לאפיקים אחרים.

אמצעים א-ד פועלים להגדלת כושר ההולכה ע"י הגדלת החתך הזורם, הקטנת ההתנגדות לזרימה וכדו', וע"י כך מורידים את מפלס פני המים ומקטינים את סכנת ההצפה.

אמצעי ה' – מגן באופן פיסי בפני הגל השיטפוני. (אינו מוריד ולעיתים מרים את מפלס פני המים).

אמצעי ו' – מקטין את הספיקות השיטפוניות ע"י הילוך הגאות בשטחי הצפה או במאגרים, או ע"י הטייה של חלק מהזרימות לאזורים פחות בעייתיים.

#### א. הסרת מכשולים וצמחייה

שיטה זו נפוצה כאשר נוצרת היצרות בחתך הזורם בד"כ ע"י צומח, עשבוני, שיחים, עצים, או הצטברות סחף ועצמים אחרים שנסחפו בזרם, וכאשר נדרש שיפור קטן יחסית בכושר ההולכה ההידרולי, השיפור מושג בד"כ ע"י הקטנת מקדם ההתנגדות לזרימה (החספוס).

השיפור כולל הסרת גזעי עצים, עצים רחבים החוסמים את הזרימה בתחום התעלה, פינוי סחף שהצטבר, פינוי שיחים, כיסוח צמחייה עשבונית, ופינוי עצמים שונים שנסחפו בזרם.  
בעיות אופייניות:

- נדרשת תחזוקה שוטפת על מנת להבטיח תפקוד מתמשך.
- תגובות אפשריות של יציבות ומאזן סחף, קשורות למהירויות גבוהות יותר והסרת צמחיה שהגנה באופן מקומי מפני ארוזיה.
- לעיתים נוצר שיפור ולעיתים נוצרת החמרה בבעיות יציבות, הניסיון בשטח הוא בד"כ המנחה הטוב ביותר.
- שמירה על הצומח הטבעי בד"כ מועילה לדגים, בע"ח ולמערכת הטבעית. חדירת אור מוגבר כתוצאה מהקטנת העלווה יכולה להגביר צימוח של מינים אחרים שיגררו החמרה בכושר ההולכה ההידרולי.

#### ב. ניקוי בתחום האפיק

פינוי של שכבה בעובי נתון בקרקעית התעלה (בהיקף המורטב בתחתית בד"כ בעובי 0.5-1.0 מ').  
אמצעי זה מתאים כאשר נדרש רק שיפור קטן בכושר ההולכה אך לא ניתן להשיגו ע"י הסרת הצומח והסרת מכשולים בלבד.

במקרים רבים העבודה מבוצעת מגדה אחת בלבד כך שהגדה הנגדית נותרת ללא הפרעה. רוחב הגדות נשאר ללא שינוי.

התגובות לשינוי במשטר הסעת הסחף והיציבות דומות לאלה שבהרחבת האפיק והעמקתו בסעיף ג' להלן.

#### ג. הרחבת האפיק והעמקתו

הרחבת האפיק והעמקתו מיושמת כאשר נדרש להגדיל משמעותית את כושר ההולכה.  
לדוגמא, כאשר תעלה באזור פתוח (כגון בשטחי בור או באזור חקלאי) הופכת להיות תעלה בתחום בנוי כפרי או לעיתים בתחום עירוני, או כאשר נדרש שיפור של תעלה בתחום עירוני להולכת שיטפונות בתקופת חזרה 1:100 שנה, ללא גרימת נזקים בהצפה.

אפשרויות ההרחבה כוללות הרחבה בתחתית התעלה, מיתון של שיפועי הדופן ע"י חפירה, העמקה, יצירת צידות בחפירה (ברמות) או שילוב של 2-3 אפשרויות מתוך האפשרויות לעיל.

גודל ההרחבה ייקבע עפ"י מפלסי ההצפה המבוקשים בתאום עם בעלויות השטח או רצועת השטח הפנוי להרחבה, ובהתחשב בהשפעה על הסביבה ובדרישות התחזוקה.

השימוש בצידות חפורות (ברמות) עשוי להפחית בעיות יציבות ע"י יצירת חתך מורכב ב-2 מפלסים. מפלס גבוה רחב ומפלס נמוך צר.

חתך כזה דורש בד"כ רצועת שטח רחבה יותר מהרחבה פשוטה אך יעיל יותר בהסעת סחופת בגלל שהמהירויות בספיקות קטנות גבוהות יותר.

בתוואי בו קיימים מיאנדרים, הסידור המועדף הוא של חפירה בצד הפנימי של העיקול.

בתעלות חפורות, רצוי שמפלס הברמה יתאים למפלס המים בספיקות "יוצרות התעלה" בתנאים שלאחר

ההסדרה. (המפלס הגבוה יתאים לספיקה בתקופת חזרה 1:2 עד 1:10 שנים).

#### ד. שיפורי תוואי והתוואי אפיק חדש

שיפורי תוואי והתוואי מחדש של אפיקים הייתה נפוצה מאד בעבר כאמצעי לשיפור כושר ההולכה ולהקטנת איבודי שטח ראוי לעיבוד בגלל עיקולים או נפתולים (מיאנדרים). לעיתים שיפורי התוואי לבשו צורה של התוואי מחדש שהחליפה את אורך המיאנדרים בתעלה ישרה קצרה, או לחילופין, קיצור של מיאנדרים בודדים. השיפור בכושר ההולכה מושג בחלקו בהגדלת השיפוע האורכי ובחלקו בהקטנת האיבודים המקומיים והחספוס. התגובה של אפיק להתוואי מחדש משתנה בהתאם למאפייני האפיק והסביבה. לעיתים התוואי מחדש של אפיקים בעלי מיאנדרים יציבים יחסית בשיפועים מתונים וגבולות ברורים לארוזיה לא גוררת תגובה משמעותית בעיקר כאשר קיימים מאגרים או שטחי הצפה המרסנים ומווסתים את ספיקות השיא. במקרים אחרים ישור של מיאנדרים גורר בעיות רציניות של חתירה, העמקת פרופיל הקרקעית ארוזיה בגדות ובחיבורים ליובלים. במקרים כאלה, ניתן לשקול התוואי מחדש רק בשילוב אמצעים לבקרת הפרופיל האורכי, ע"י מפלים הכוללים "מתקני צמצום" להקטנת המהירויות במעלה המפל ואגן שיכוך במורד המפל וע"י אמצעים להגנה על הארוזיה בגדות לשליטה על התפתחות מיאנדרים חדשים.

#### ה. סוללות הגנה

סוללות הגנה מבוצעות בד"כ על מנת להגן על רכוש בפשט ההצפה ללא הסדרה של האפיק עצמו. גם ללא נגיעה באפיק עצמו, הסוללות עדיין מהוות פוטנציאל לגרימת חוסר יציבות אלא אם הם ממוקמות רחוק מגדות התעלה. סוללות עלולות לגרום לספיקות שיא גבוהות יותר בגלל ריכוז הזרימה בתעלה והקטנה או מניעה של הזרימה בפשטי ההצפה. הקטנת כושר ההולכה בפשט ההצפה והקטנת האוגר בפשט ההצפה שגרם קודם לריסון ספיקות השיא מגדילים את ספיקות השיא, ומרכזים את הזרימה בתעלה. התגובה לשינוי במשטר הזרימה גורמת לשינויים באפיק במגמה להרחבת האפיק ולהארכת אורך המיאנדרים. הגדלת הספיקה משמעותית יותר באזורים מישוריים בהם באופן טבעי זרימות שחרגו מהגדות מוטות לאפיקים אחרים או לאזורי הצפה אחרים שאינם חוזרים לאפיק. ע"י כך הסוללות לא רק מגבילות את כושר ההולכה והאוגר בפשטי ההצפה אלא מונעים "בריחה של זרימות". קטעי סוללה ארוכים ישנו באופן מוחלט את המיאנדרים ויגרמו למיתון השיפוע ע"י השקעת סחף במורד וסחיפה במעלה. במיאנדרים פעילים קיימת סכנה שנדידת מיאנדרים תגרום "לתקיפה" נקודתית חזיתית של סוללה שממוקמת במרחק מהאפיק ותגרום לפריצה של הסוללה. בנקודת מבט של התחזוקה המתמשכת, לאורך זמן תיווצר תעלה בה קיימת הגנה על הגדות לכל אורכה בצורה כזו או אחרת.

#### ו. הטייה למשורי הצפה למאגרים או לאפיקים אחרים

תעלה עוקפת בד"כ נפרדת לחלוטין מהתעלה המקורית, אך לעיתים שתי התעלות נפגשות בקטעים מסוימים. היישום המוצלח ביותר של תעלות עוקפות הוא בתעלות בהם הסחופת והגרופת קטנים, במקרים אחרים ייווצרו בעיות בהסעה והשקעה של סחף. כאשר החלוקה של כושר הסעת הסחף בין שתי התעלות אינה תואמת את החלוקה של כושר ההולכה לזרימות השיטפוניות רצוי כי בתעלות עוקפות יותקנו מתקני בקרה בכניסה וביציאה.

ניתן לשפר תעלה להולכת שיטפונות ע"י הטיית זרימה אל מחוץ לתעלה למערכת אחרת או לתוך אגירה בשטחי הצפה אחרים.

כאשר זרימות מוטות החוצה בעיות הסחיפה במורד קטנות יותר, בד"כ צפויה השקעת סחף בתעלה המקורית או בתעלת ההטיה (או בשתי התעלות) בגלל שכושר הולכת הסחף ב – שתי התעלות יחד קטן מכושר הולכת הסחף בתעלה המקורית. חלוקת הסעת סחף אינה בהכרח פרופורציונית לחלוקת הספיקות.

הבעיה של השקעת סחף גוברת כאשר במורד ריכוזי הסחף גבוהים יותר באופן משמעותי והזרימות לאחר, ההטיה קטנות ולא מסוגלות להסיע את הסחף כלומר כאשר ספיקות הסחף גדולות מכוש הולכת הסחף (STC) באפיק

כאשר הזרימות מוטות לתעלה בה כושר ההולכה קטן ולא מתאים לתוספת הספיקה צפויות בעיות סחיפה משמעותיות.

התגובה הצפויה של התעלה תהיה התרחבות, התעמקות ומיתון של השיפוע האורכי ע"י חתירה במעלה והשקעת סחף במורד.

מנקודת מבט של הקטנת בעיות יציבות בתעלה ניתן לדרג באופן כללי את האמצעים להגנה בפני שיטפונות בסדר הבא:

א. אמצעים לא מבניים כגון: פינוי של השטח, מערכות אתרעה והגנה פסיבית – בנייה במפלסים גבוהים על עמודים וכדו' מעל מפלס ההצפה.

ב. סוללות הגנה רחוקות מהאפיק מעבר ל"רצועת המיאנדרים" (אם קיימת).

ג. סוללות בתחום "רצועת המיאנדרים".

ד. מאגרי ויסות והשהייה מחוץ לאפיק (detention basins).

ה. מאגרי שיטפונות (retention or detention basins) במעלה האגן.

ו. הטיה לתעלות עוקפות

ז. פינוי צמחיה ומיכשולים.

ח. הרחבת האפיק בחתך מורכב הזרימות הקטנות בתחום האפיק הקיים ללא הפרעה.

ט. הרחבת האפיק עם סוללות או בלעדיהם.

י. העמקת האפיק עם או בלי סוללות.

מנקודת מבט של הבטיחות מצד שני, תיעול כגון באמצעים ח', ט'. בד"כ מספקים הגנה טובה יותר מאשר אמצעים ב', ג', ה'.

יש לדון בקונפליקטים הקיימים בין שקולים של יציבות, ובטיחות יחד עם שיקולים אינטרסים מקומיים, שקולים כלכליים, חברתיים וסביבתיים.

בטבלה להלן מוסכם הפוטנציאל לגרימת חוסר יציבות באמצעי הגנה שונים.

### **3.2 גורמים וצורות של חוסר יציבות**

#### **כללי**

במציאות המורכבת בד"כ קשה להפריד גורמים בודדים לצורות של חוסר יציבות.

קשה להצביע על גורם מסוים לחוסר היציבות במערכת מורכבת או לחזות במדויק לאיזה צורות ניתן לצפות מתכנית מסוימת של הגנה בפני שיטפונות.

המשכיות של תהליכים קיימים (לדוגמא מיאנדריס). במקרים רבים התעלה להגנה בפני שיטפונות כבר במצב הקיים אינה יציבה והמצב עלול להחמיר לאחר השלמת הפרויקט. צורה נפוצה לחוסר יציבות היא נדידת מיאנדריס למרות שארוזיה צפויה בד"כ בגדה החיצונית (הקעורה) והשקעת סחף צפויה בגדה הפנימית (הקמורה) במקומות מסוימים יתכן מצב אחר.

### **3.2.1 הגדלת ספיקה**

תהליכי פיתוח באגן כגון עקירת פרדסים (או יערות), עיור, תיעול, והטיות עלולים להגדיל את הספיקות בהסתברויות נתונות.

ספיקות גדולות נוטות לגרום להרחבת החתך, נדידת מיאנדריס מואצת, ובסופו של תהליך הארכת המיאנדריס. שינויים בפרופיל האורכי. באופן כללי, במערכת בה ספיקת הסחף וגודל החלקיקים קבוע הגדלת הספיקה תגרור מיתון השיפוע ע"י חתירה במעלה והשקעת סחף במורד.

### **3.2.2 שיפור תוואי והתוית תעלות חדשות**

בקיצורי תוואי של תעלות קיימות צפויה לעיתים הגדלה משמעותית של הארוזיה במעלה ושל השקעת הסחף במורד, בגלל הגדלת השיפוע האורכי. ללא אמצעים לבקרת הפרופיל האורכי כגון "מתקני צמצום" בראש מפלים (שפועלים במגמה מנוגדת ליתרונות ההידרוליים של קיצורי תוואי), לקיצורי תוואי, עלולים להיות השלכות משמעותיות על יציבות התעלה (הגדלה משמעותית של ספיקות הסחף והשקעת סחף במורד) למרות שהארוזיה בגדות ונדידת המיאנדריס פוחתים באופן זמני עם יישור התעלות, הרבה תעלות מיושרות ללא הגנה על הגדות, נוטות לחזור למצב של מיאנדריס.

### **3.2.3 ויסות ספיקות ע"י מאגרים**

במעלה המאגר האפקטים של המאגר כוללים יצירת "דלתא", הערמות לאחור והרמת מפלסי המים באזור הקרוב, ויצירת מיאנדריס מוגברת. לכאורה, הקטנת הספיקות השיטפוניות והגדלת משך הזרימה בספיקות קטנות תגרום לעליה ביציבות במורד. למעשה, עפ"י הניסיון, ירידת המפלסים במורד עלולה להשפיע על יובלים שהתנקזו לאפיק הראשי ולגרור תגובה מורכבת יותר שתביא לחוסר יציבות. הקטנת ספיקות הסחף למורד (כתוצאה משקיעת כל הסחף במאגר), עלולה להיות מאוד משמעותית ולגרור חוסר יציבות של הפרופיל ושפילה כללית בקרקעית האפיק במורד. השפילה משמעותית יותר באפיקים בהם גודל הגרגיר דק ומוגבלת ע"י הציפוי של הקרקעית באפיקים בעלי גודל גרגיר גדול. הפעולות של הקטנת ספיקות השיא והקטנת כמויות הסחף, מפצות במידה מסוימת אחת על השנייה. בתגובה הנגרמת במורד. אם הקטנת ספיקות השיא גדולה דייה, השפילה בקרקעית תהיה לא משמעותית.

### **3.3 מתקנים הידרואוליים**

#### **כללי**

גישת התכנון של מתקנים הידרולים צריכה להיות מערכתית. המתקן ההידרולי צריך להיבחן כחלק מהאפיק ומהאגן. אילוצים הידרולים, אילוצים גיאוטכניים ואילוצים מבניים, הופכים את תכנון המתקן למשימה מורכבת. מיקום המיתקן ובחינת השפעתו על הסביבה ועל האפיק במורד ובמעלה, כגון השפעת הערמות המים לאחור, שינוי משטר הסחף וכן השפעה על תנועת בע"ח, דגים וכדו', צריכים להיבחן על רקע מטרות הקמת המתקן ואילוצים. להלן נתייחס ל-3 סוגים של מתקנים הידרוליים, מעבירי מים, סכרונים (מיגלשים) ומפלים פשוטים. ההתייחסות למתקנים הידרולים אחרים כגון גשרים, מתקני כניסה צידיים, מגלשים צידיים, צמתים, כניסות מתעלות מישנה ועיקולים, דומה. התייחסות נוספת מפורטת בהמשך הדיון.

#### **א. מעבירי מים**

מעביר מים הוא תעלה עם קירוי באורך קצר בד"כ המתוכנן להעברת מים דרך סוללת עפר או סוללת סלעים (בד"כ בכביש, במסילות ברזל או בסכר). זהו מתקן הידרולי המתוכנן להעביר ספיקות שטפוניות או ספיקות קבועות אחרות (השקיה וכדו'). מבחינה הידרולית התכונה הדומיננטית של מעביר המים הוא האם הוא זורם בחתך מלא או לא. ניתן לחלק את מעביר המים ל-3 קטעים: כניסה (קטע היצרות או התכנסות קווי הזרם), הצינור (הגחון) והיציאה (קטע התרחבות). במקרים רבים מעבירי מים מתוכננים לנוכחות תנאי זרימה קריטית בצינור על מנת להגדיל את הזרימה ליחידת רוחב. ולהקטין את שטח החתך הזורם (ובהתאם להקטין את העלות). הזרימה במורד ובמעלה מעביר המים באופן טיפוסי היא תת קריטית. עם ההתקרבות לכניסה למעביר המים ההיצרות גורמת להגדלת מהירות הזרימה. בספיקת התכן משטר הזרימה בקטע הצינור קרוב לקריטי.

#### **ב. סכרונים (מגלשים)**

סכרון (או מגלש) הוא מתקן המתוכנן להרים את פני המים באפיק. במורד הסכרון, האנרגיה הקינטית דועכת (או נשברת) במתקן שיכון אנרגיה. במעלה קיים חתך בקרה – סף הגלישה. התללה (chute), או המפל מיועדים להעברת המים בין סף הגלישה למתקן שיכון האנרגיה. למרות שהסכרון או המגלש מתוכנן לתנאי זרימה ספציפיים עליו להיות מותאם לטווח של ספיקות. סף הגלישה מתוכנן בד"כ להולכת הספיקה באופן יעיל ובטוח, במינימום עלות. במקרה של תעלת עפר, הגיאומטריה של סף הגלישה מתוכננת כך שאורך הדיפון יהיה קצר כלומר תכנון גאומטרי של הסף ישאף לקצר את אורך השפילה לקראת המתקן ככל הניתן.

עבור חתך מלבני לדוגמא ניתן לקבוע את רוחב תחתית הטרפז ואת שיפוע הצד כן שמצד אחד לא תיגרם הערמות נוספת לאחור בתעלת העפר במעלה ומצד שני לא תיגרם שפילה בתעלת העפר שתחייב קטע דיפון ארוך במעלה המפל .

קביעת הגיאומטריה נעשית בחישוב איטרטיבי בד"כ כך שעקום רום ספיקה (האופייני) של סף הזרימה יהיה קרוב לעקום רום ספיקה של קטע התעלה במעלה .  
קיימים מספר סוגים של ספי גלישה המקובלים ביותר הם מגלש רחב קודקוד , מגלש חד קודקוד ומגלש מעוגל .

#### מגלש רחב קודקוד (Broad crested weir)

מגלש שטוח בו האורך עם כיוון הזרימה (הרוחב) גדול יחסית לעומק (טיפוסי אורך 3.0-1.5 פעמים עומק הזרימה) .

כאשר המתקן רחב מספיק (האורך עם כוון הזרימה), קווי הזרם יהיו מקבילים לסף הזרימה ופירוס הלחץ קרוב להידרוסטטי .  
נוסחאות הזרימה והמקדמים מבוססים על זרימה קריטית בסף בסמוך לסף הגלישה . מקדם המגלש האופייני 1.704 . לעיתים מגלש רחב קודקוד משמש כמכשיר מדידת זרימה .

#### מגלש חד קודקוד (Sharp crested weir)

מגלש המאופייני ע"י קצה חד . פירוס הלחץ במגלש אינו הידרוסטטי וקיימת עקמומיות חדה של קווי הזרם .

#### מגלש מעוגל (Ogre crest weir)

הגיאומטריה הבסיסית של המגלש המעוגל מחקה את הקו התחתון של המים במגלש חד קודקוד במצב של ספיקת התכן .  
מקדם המגלש המעוגל גדול יותר לעומת מגלש רחב קודקוד (המגלש יעיל יותר כך שבעומד נתון הספיקה גבוהה יותר ) מקדם המגלש האופייני בספיקת התכן 2.190 . עבור עומד גבוה מאשר ספיקת התכן מקדם המגלש גדול יותר בגלל שהלחץ על סף הגלישה קטן מהאטמוספירי . עבור עומד קטן יותר מאשר ספיקת התכן מקדם המגלש קטן יותר , בגלל שהלחץ על סף הגלישה גדול מהאטמוספירי .

#### תכנון התללה (Chute)

ברגע שהזרימה עברה את סף הגלישה הזרימה מואצת ע"י הגרביטציה לאורך התללה .  
חישוב הזרימה בתללה מורכב . רוב החישובים של הערמות לאחור אינם מתאימים ( הזרימה אינה אחידה קיימת התפתחות של הזרימה , הזרימה אינה בלחץ הידרוסטטי וקיימת השפעה של האוויר שמתערבב עם הזרימה ) .

המהירות המרבית נאמדת באופן גס ע"י הקשר ע"י  $V_{max}=2g(H-d\cos \theta)$  לעיתים התללה מתוכננת במדרגות , המדרגות יוצרות חספוס או התנגדות לזרימה שמקטין את המהירות במורד ומקטין את אורך אגן השיכוך הנדרש .

### תכנון אגן השיכוך או שוברי אנרגיה

משככי אנרגיה מתוכננים לשיכוך האנרגיה במורד התללה לפני כניסתה לאפיק .  
מתקני שיכוך מקובלים :

1. אגן שיכוך סטנדרטי **Stilling basin** – יצירת זנק הידרולי שמעביר את משטר הזרימה ממשטר על קריטי למשטר תת קריטי, תוך איבוד אנרגיה משמעותי, קיימים מספר דגמים סטנדרטיים ונוסחאות לקביעת הגיאומטריה בכל דגם .
2. **flip bucket** – הרמת הזרם והטלתו לבריכת השקטה במורד .
3. אגן שיכוך מסוג אימפקט – קיר או מחסום ניצב שיוצר התנגשות (אימפקט) עם הזרימה .

### הזנק ההידרולי

- זנק הידרולי הוא מעבר פתאומי מזרימה במשטר על קריטי לזרימה במשטר תת קריטי .  
תהליך טורבולנטי מאוד המאופיין בגלים, נתזים, איבוד אנרגיה ותוספות אוויר .  
האזור הטורבולנטי נקרא בד"כ הרולר . אפיון הזנק ההידרולי נעשה בד"כ ע"פ מספר פרוד במעלה.  
מקובל לתכנן מתקן לשיכוך אנרגיה בתחום המוגדר כזנק יציב ראה טבלה להלן,  $4.5 < Fr < 9.0$  .  
בתכנון מתקן שכך נדרש להבטיח פעולה בטוחה בתחום של ספיקת (ולא רק בספיקת השיא) .  
לעיתים המצבים הבעייתיים מתרחשים בספיקות קטנות מספיקות התכן .  
הזנק צריך להיות מוכל כולו בתחום אגן השיכוך בכל מצבי הזרימה .  
נזקים כגון חתירה וקביטציה מתרחשים במספר מקרים :
- מתקן קצר או רדוד מדי – הזנק מתרחש מחוץ למתקן .
  - גיאומטריה גרועה או חוזק לא מספק של רצפת אגן השיכוך, הבלוקים, סף האגן או של המפל במעלה וכתוצאה – נזק בקביטציה .
  - ספיקות גבוהות מספיקות התכן . בספיקות גבוהות יתכן שיהיה מקובל לסבול ארוזיה ברמה מסוימת אך נדרש כי הבטיחות של הסכר תובטח .
  - חלחול מתחת לרצפת הבטון, ניקוז לא מספק, וכוחות עילוי ולחצים גבוהים .
  - תכנון הידרולי עקרוני לקוי לדוגמא חוסר התאמה בין מפלס המים במורד (TWRL) לגובה הזנק במורד – הגובה הצמוד השני (JHRL) גורם לכך שהזנק ההידראולי לא מתרחש באגן השיכוך .

### ג. סידרת מפלים או תכנון אשדות

- תכנון סכרונים סטנדרטים במתקנים בעומד קטן עלול להיות לא כלכלי .  
ובד"כ נעדיף משיקולי פשטות, תכנון מפל או סידרת מפלים בטור .  
המקרה הפשוט ביותר של מפל הוא מפל אנכי בתעלה מלבנית רחבה .  
לקראת המפל הזרימה מואצת . אם הזרימה במעלה היא תת קריטית במעבר צפויה זרימה קריטית. בגלל פירוס הלחצים השונה מפירוס הידרוסטטי בד"כ מקום חתך הבקרה במרחק 3-4 פעמים העומק הקריטי, שבמעלה הנפילה. עומק הזרימה בסף קרוב ל  $0.715 dc$  .  
בנקודת הנפילה צפויים לחצים גבוהים על התחתית ושינויים משמעותיים של הלחץ .  
אגם השיכוך צריך להיות מחוזק בהתאם בנקודת הנפילה ובנקודת הזנק ההידרולי .

### 3.4 שליטה על הפרופיל האורכי

בפרק זה נעסוק בבעיות אופייניות הקשורות בשינויים בפרופיל האורכי ובדרכים מוצעות לטיפול בהן. כפי שנכתב בפרק 2.5 בו נותחו בפירוט הבעיות שקשורות בשיפוע האורכי, הדרכים המקובלות להתגבר על בעיות אלו עוסקות במיתון השיפוע האורכי תוך דחיסת הפרשי הגובה למקומות נקודתיים בהם ניתן לטפל.

במתקנים מסוג זה הבעיות האופייניות מתרחשות לרוב בראש ובמורד המתקן ההנדסי. במעלה המיתקן התופעה קורת בשל שפילת המים עקב הנפילה מתוך כך יש הקטנה בחתך הזורם וכפיצוי לכך, המהירות גדלה. על תופעה זאת ניתן להתגבר במספר אופנים:

1. ע"י היצרות של חתך הזרימה ניתן ליצור היערכות של המים במעלה המיתקן ובכך לפצות על השפילה עקב הנפילה.

2. ע"י דיפון מעלה המיתקן בכדי למנוע ארוזיה.

הבעיה השנייה מתרחשת במורד המפל בו נוצר בור עקב הזנק ההידרולי הגורם להסעת החלקיקים הדקים. הזנק ההידרולי משתנה במיקומו ובגודלו והוא קשור בגובה הנפילה ומאופי חתך הזרימה במורד. קיימים שני סוגי עיקריים של זנק הידרולי:

1. זנק מקומי – זנק זה קורה בצמידות למפל וניתן לכלוא אותו לאזור מצומצם ע"י העמקה של נקודת הנפילה או בחספוס מורד הזרימה וזאת בכדי ליצור טיבוע של הזנק ולצמצם אותו באורכו ולתחום אותו לאזור הקרוב למפל. בכך ניתן ליצור הגנה על הקרקעית והגדות באזור מוגדר ומצומצם.

2. זנק שלוח - זהו זנק היכול לנדוד למורד. מצב זה קורה כאשר גובה המים במורד הזרימה אינו יוצר טיבוע על הזנק במקום הנפילה, בכך קשה לצפות היכן יתרחש הזנק והוא יכול להופיע במקום מרוחק מהמפל באזור בו לא דיפנו את הקרקעית. יש ליצור שוב מצב של טיבוע הזנק במורד באמצעים שונים (חיספוס המורד, חתך היצרות וכדומה) בכדי לתחום את הזנק לאזור מוגדר ובר טיפול. לצורך שליטה על השיפוע האורכי יש להבין כי השיפוע האורכי מושפע מהספיקה וגודל הגרגיר ומשפיע על הסחף - ארוזיה או השקעת סחף.

באיור זה ניתן לראות כי המצב בו השפעת הספיקה Q גדולה מהשפעת עומס הסחף L קורה כאשר השיפוע תלול מדי עבור גודל הגרגיר אזי תיווצר ארוזיה. ולהיפך, תיווצר השקבת סחף כאשר התנאים הפוכים.

### 3.5 שליטה על מיאנדרים ועיקולים בתעלה

נחלים אלוביאליים בעלי מיאנדרים לרוב נמצאים באמצע או במורד אגן ההיקוות. תנוחה של נחל כזה מאופיינת במבנה עקלקל החותר בגדה אחת ויוצר מחסום בגדה השנייה. תהליך זה מאופיין בנדידת המיאנדרים למורד.

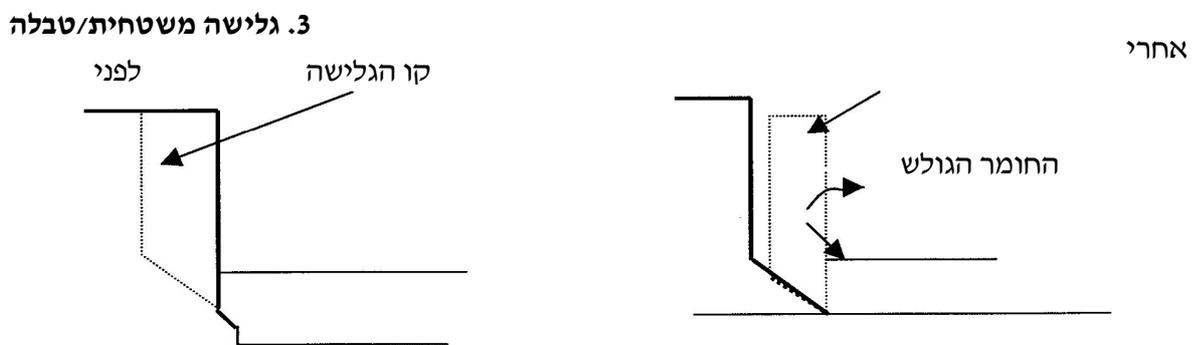
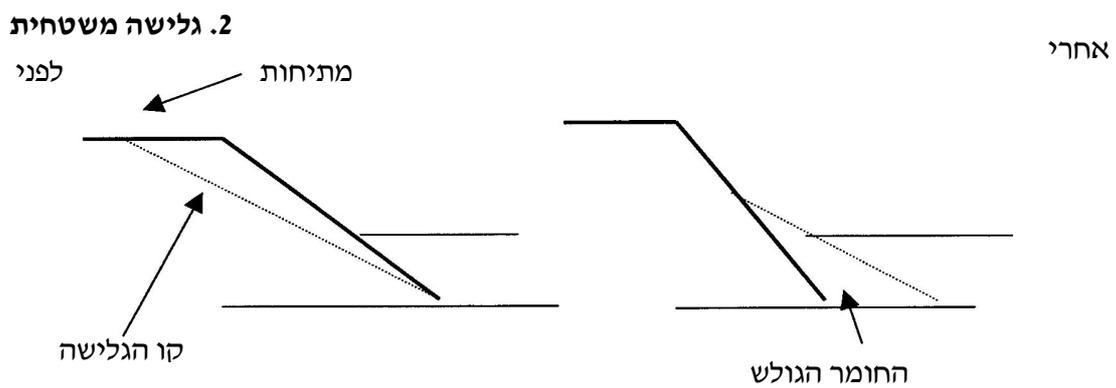
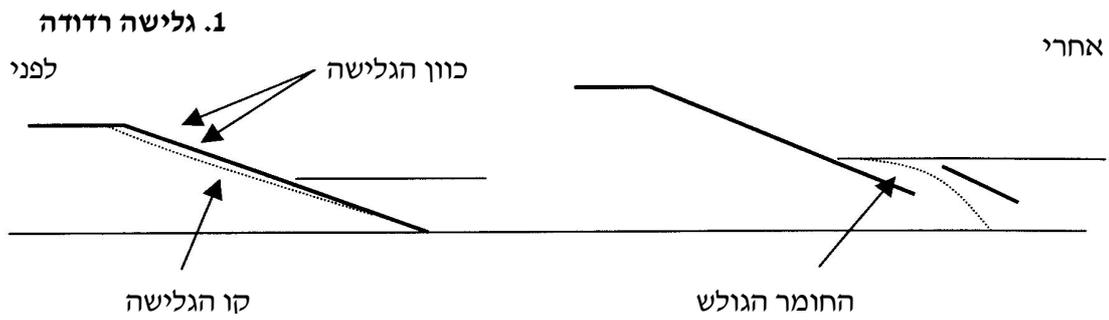
המיאנדרים מקשים על סילוק המים המהיר בעת הצפות, בתוכניות ניקוז רבות מנסים ליישרם או לקצרים. נחל בעל פיתוליות (ראה פרק 2.5) מהווה מערכת שלמה של מיאנדרים. כל שינוי בעיקול מסוים במערכת משנה את שיווי המשקל העדין בנחל, וגורר תגובה ושינוי כלשהו בחתכי זרימה באפיק, תנוחת הנחל והשיפוע האורכי. במקרים רבים, הנחל הינו מערכת שעברה שינוי ממצבו המקורי ולא תמיד הוא סיים את תגובתו לשינוי. אחד השינויים העיקריים שעושים הוא יישור תנוחת האפיק או הגדלתו.

לסיכום, מספר תופעות מאפיינות נחלים בעלי מיאנדרים: סירוגיות עיקולים, שיפועים נמוכים, פשטי הצפה רחבים. תופעות אלו יכולות לגרום למספר בעיות יציבות: קריסת גדות, נדידת מיאנדרים, חתירה והשקעת סחף.

השיפוע האורכי של הנחל מייצג לרוב שיווי משקל הקיים בנחל. כאשר מבצעים יישור מיאנדר, מתערער שיווי המשקל וצפוי כי הנחל ישאף לחזור למצבו הקודם או לשינוי בנקודה אחרת. צפוי כי תהיה השפעה על ספיקת הסחף ואולי אף על נדידת המיאנדר למקום אחר.

### **3.6 יציבות מדרונות**

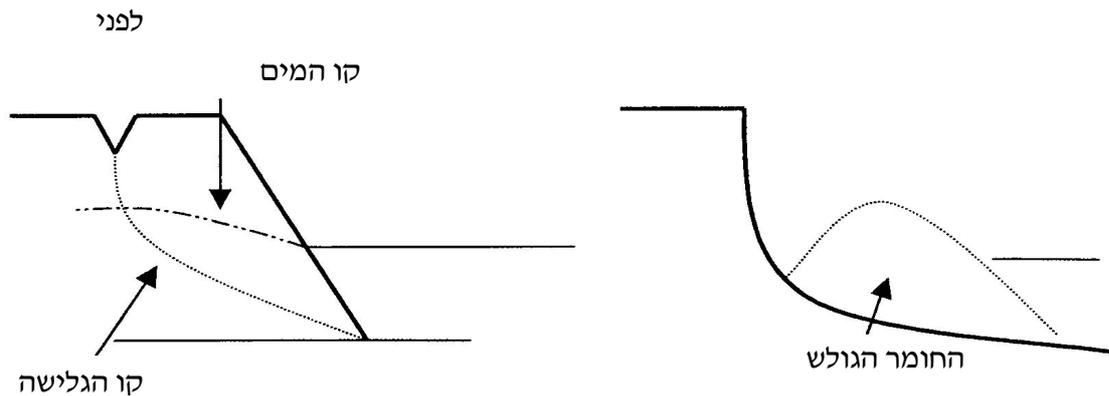
קיימים מספר סוגים של גלישות קרקע בגדות. הגלישות יכולות להיות עמוקות, רדודות או קריסה של גוש שלם. המאפיינים המשפיעים על קריסות אלו הם: סוג הקרקע, גיאומטריית הגדה, הידרולוגיה של נגר עילי ותת קרקעי וצמחייה. גדות יכולות לקרוס באופן פתאומי במיוחד אם קיימת ארוזיה פעילה על פני השטח, גריפת חלקיקים מבוהן הגדה, העמסה במשקל יתר של הגדה (במקרים רבים ע"י גשם). באיור מס' 17 ניתן לראות סכמתית את סוגי הגלישות השונים.



איור מס' 18: תיאור סכמתי של סוגי גלישות שונות

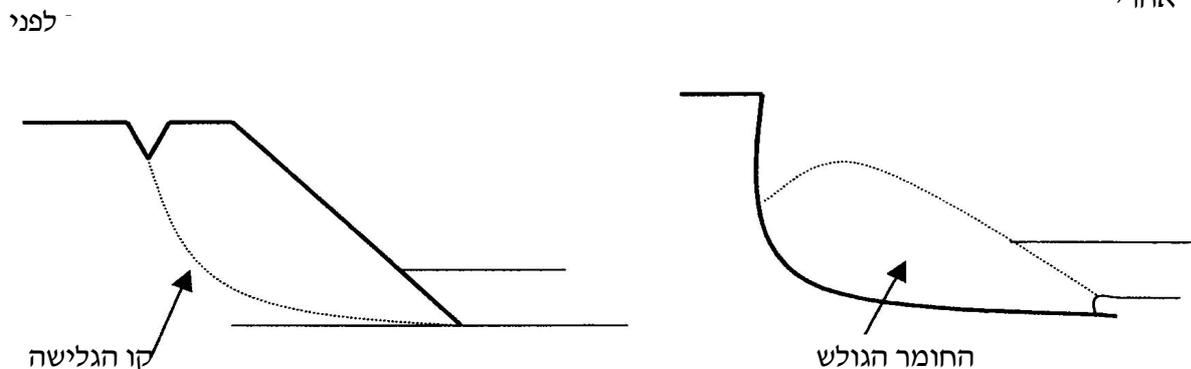
#### 4. גלישה מעגלית בחומר הומוגני

אחרי



#### 5. גלישה מעגלית / חולשה

אחרי



איור מס' 18 המשך : תיאור סכמתי של סוגי גלישות שונות

1. גלישה רדודה מתרחשת כאשר שכבה של חומר גדה גולשת לאורך מישור הכשל המקביל בסמיכות לפני הקרקע. מנגנון קריסה זה הוא נפוץ ביותר בקרקעות בעלות קוהזיה נמוכה והוא מתעורר כאשר זווית הקרקע גדולה מזווית החיכוך הפנימי של חומר הגדה. הגלישות הנמוכות חושפות את תת הקרקע אשר אינו מיוצב ע"י צמחייה ומאפשרות גריפת חומרים ע"י הרס פני הקרקע. גלישות הקרקע מהוות הפרעה נוספת עקב הצטברות גושי קרקע באפיק ובאספקת סחף לנחל. גלישות נגרמות גם ע"י זרימות הגורפות את גרגרי בוהן הגדה המהוה יסוד לגדה כולה, עקב כך גולשת השכבה העליונה של הגדה.
2. גלישה מעגלית הינה תזוזה עמוקה של גושי קרקע מגדה שלמה או מחלקה לאורך עקומת הרס. עקומת הגלישה יוצרת הטיה פנימה של הגדה. תופעה זאת מתרחשת בגדות גבוהות בשיפועים נמוכים ובקרקעות בעלות קוהזיה גבוהה. הגלישה מתעוררת בעיקר ע"י עומד מים בקרקע המעמיס על שכבת הקרקע. גלישת גוש הקרקע מהוה מעין הגנה זמנית על בוהן הגדה, אך עם הזמן היא עתידה להיסחף ולהיעלם. הגלישה המעגלית נחשבת לצורה חמורה של אי יציבות קרקע הנוגעת לתנועה של נפחי קרקע גדולים, שיבוש מוחלט של פרופיל הגדה, הרס של בתי גידול של צומח והרס מבנה הגדה תוך נסיגה מהירה של קו

הגדה פנימה. גלישה מעגלית היא סימן ברור של אי יציבות מבנית וקו הגדה לא יכול להיות יציב עד שלא יוגבל באמצעי עזר תוך התערבות משמעותית ביצירת פרופיל חדש ושיפור תנאי הניקוז של הגדה.

3. הגלישה המשטחית-טבלה, מתרחשת כאשר גוש/טבלה של קרקע מתמוטט אל תוך האפיק. לרוב, שברים וסדקי מתיחה עמוקים מפרידים גושי קרקע מהגדה. כשל מסוג זה מאפיין קרקעות רדודות, תולות ובעלות קוהזיה נמוכה-בינונית. הכשל מתעורר בעזרת גריפת גרגרי קרקע בבוהן הגדה, קריעת גושי קרקע עקב מתיחה או תנועת מים בקרקע בלחצים גבוהים. גוש הקרקע המתמוטט מהוה הגנה זמנית על בוהן הגדה. כמו בגלישה מעגלית, גם כשל זה נחשב חמור, המחייב התערבות מסיבית בשיקום והגנה על הגדה.

4. גלישה נתמכת הינה גלישה או התמוטטות של שכבה קוהזיבית ויציבה אשר נשענת על שכבת קרקע מסוג אירוזיבי לא קוהזיבי. השכבה התחתונה נחתרת ע"י הזרימות וכאשר המשקל העצמי של השכבה העליונה עולה על יכולת הנשיאה של השכבה התחתונה, מתרחשת התמוטטות. בשלב ראשון, הגוש המתמוטט מעכב את תהליך החתירה בגדה משום שהוא מגן על בוהן הגדה, אך עם גריפת החומר ע"י המים, תהליך החתירה מתחדש. גם כשל זה הוא חמור, הוא מאפיין חתירה אקטיבית המעידה על הימצאות שכבה חלשה בתוך הגדה. סביר כי נסיגת הגדה תיתמשך אלא אם ינקטו אמצעים לעצירת התהליך.

5. נפילה של גושי קרקע בודדים או חלקיקי קרקע ישירות אל התעלה יכולה להתרחש בעקבות נביעות מים (בצבוץ) תוך שטיפת חומרים דקים מהגדה וערעור יציבות של גושים שלמים. התופעה מתרחשת בעיקר בשיפועים תלולים, בקטעים החשופים מצומח ובצורות חלשות של אדמות קוהזיביות.

### **3.6.1 מאפיינים מחלישים**

ניתן להגדיר מספר סוגי מאפיינים האחראים לירידה בהתנגדות לארוזיה ולהקטנת היציבות המכאנית של הגדה:

**שטיפה:** השטיפה מובילה להחלשת הגדה ע"י הפחתת הקוהזיה תוך שטיפת מינרלי חרסית בתמיסת הקרקע אל מחוץ לגדה. תהליך זה פוגע ביציבות המכאנית של הקרקע וביכולת ההתנגדות שלה לארוזיה, מובילה לאי יציבות ולארוזיה עקב זרימות וגלים בעת זרימה. מידת הפגיעות של הגדה לשטיפה, תלויה במידה רבה במינרלי החרסית ובכימיה של מי הנקבובים. ניתן להעיר כי זיהום בתת הקרקע יכול להחריף משמעותית את השטיפה.

**דריכה / רמיסה:** הדריכה או הרמיסה מחלישים את הגדה ע"י הרס המבנה של קרום הקרקע. קרום זה עשוי אגרגטים הקשורים זה לזה במבנה מכני מסוים ובקשרים אלקטרוכימיים המחברים אותם יחדיו, בכך הם מעניקים לקרקע קוהזיה. רמיסת הקרקע מפרידה קשרים אלו ויוצרת מסת קרקע המתפקדת כחומר אמורפילחלוטין. ההתנגדות לארוזיה של הקרקע תלויה במידה רבה בקרום הקרקע.

**הרס הצומח על הגדות:** לצומח מספר תפקידים מכריעים בהגנה על גדות הנחלים (ראה פרק 9). הרס הצומח יכול לנבוע ממספר סיבות וביניהן: ריסוסים מכוונים להדברת הצמחייה, ריסוסים בסביבה החקלאית, רעיית יתר, הסדרת נחלים – יצירת תוואי חדש החשוף מצומח, או תחזוקה אגרסיבית, כניסת מיני צמחים משתלטים המפירים את האיזון הבוטאני הקיים, קריסת גדות או אירוזיה הגורפת את גרגרי הקרקע ועוד. צומח הגדות הוא בעל חשיבות יתרה הן בעיגון שכבות הקרקע העליונות אל השכבות התחתונות והן בהפחתת מהירות הזרימה בסביבה המיידית של הגדה.

**לחץ נקבובים חיובי:** לחץ הנקבובים החיובי נוצר כאשר ניקוז המים מתת הקרקע דרך הגדה מופחת. בכך נוצר עומד מים הלוחץ על גושי קרקע לכיוון האפיק. ההסתברות לגלישת גוש קרקע אל התעלה גדלה.

לחץ מים נקבובי מאפיין נחלים בהם מפלס המים באפיק יורד במהירות, תכונה זאת מאפיינת את מרבית נחלי האכזב השיטפוניים, וגדות העשויות מקרקעות לא נקיזות.

**תהליכי ייבוש והרטבה:** תהליך ייבוש הקרקע בקיץ גורם להתכווצות הקרקע, להסתדקותה ולשבירת הקשרים האלקטרוכימיים בין גרגרי הקרקע. לרוב, צפוי כי בפנות הדרומית המקבלת קרינת שמש חזקה יותר תופעה זאת תהיה נרחבת יותר. גרגרי הקרקע הרופפים, רגישים יותר לארוזיה ונסחפים בקלות יתרה עם הזרם. תופעה זאת משמעותית יותר בנחלים בהם אין צמחייה המצלה על הגדה בעלווה וקושרת את החלקיקים בעזרת שורשים.

### **3.7 שליטה על השקעת סחף**

איבוד כושר הולכה לזרימות שיטפוניות עקב שקיעת סחף היא בעיה נפוצה הנגרמת לעיתים קרובות בגלל חוסר יציבות של הפרופיל האורכי, או כתוצאה מהרחבת האפיק שמקטינה את כושר הסעת הסחף לאורך הקטע המוסדר. הטיית שיטפונות, מעקפים, אגירה מחוץ לאפיק עלולים גם כן להקטין את כושר הסעת הסחף באפיק הראשי.

השקעת סחף עלולה להיווצר במורד קטע ההסדרה בקטע בו לא בוצעה הסדרה כלשהי בגלל הסעת סחף מוגברת מקטע ההסדרה.

השקעת סחף נגרמת בדרך כלל על ידי סחף חולי, סילטי או חרסיתי, השקעת צרורות פחות אופיינית פרט למניפות סחף.

שיטות מקובלות לשליטה על השקעת סחף כוללות:

- תכנון תעלות המסוגלות להוליך את ספיקות הסחף הצפויות.
- אגני שיקוע לסחף במעלה הפרוייקט, על מנת לתפוס חלק מהסחף, נדרשת חפירה תקופתית לפינוי הסחף המצטבר.
- שליטה על הפרופיל האורכי והסחיפה באפיקים שבמעלה.
- אמצעי שימור קרקע במעלה האגן.
- חפירה תקופתית ופינוי סחף שמצטבר באפיק.

#### 4. דוגמאות לבעיות יציבות

בפרק זה מובאות מספר דוגמאות של בעיות יציבות, אמצעי ייצוב למניעת בעיות ייצוב וכשלים של אמצעי ייצוב, בתנאים המיוחדים לאתר.

##### 4.1 תעלת ניקוז מאספת, גניגר.

תעלה זאת אוספת מים מכביש מזרע-נהלל וכן מי נגר עילי מהשדות הסמוכים. השיפוע תלול מדי עבור תעלה זאת וכן מי נגר נכנסים מהשדות בצורה לא מבוקרת. התוצאה: העמקה מתמשכת של הקרקעית, יצירת ראשי ערוצים בכל כניסה של זרימות צידיות (איור 19א') ויצירת מפלים באופן טבעי לאורך התעלה (איור 19ב').



איור מס' 19: תעלה מאספת באזור גניגר, יצירת ראשי ערוצים (א) ומפלים (ב).

אגן ההיקוות של תעלה זאת הוגדל עקב עבודות הנדסיות במעלה, ספיקות השיא גדלו, התעלה שלא הייתה מותאמת לשינויים אלו, הגיבה בהתחטרות קשות, יצירת מיאנדרים ועיקולים ומדרגות.

##### 4.2 נחל אמציה.

הנחל הוסדר ויוצב בשני אמצעים. האחד במפתנים לייצוב השיפוע האורכי והשני בכוורות במילוי עפר. לאחר זרימות שטפוניות, לא נותר דבר מהאמצעים שננטו. כנראה שהמפתנים לא הצליחו לייצר שיפוע המותאם לזרימות המצויות בנחל זה. ברור כי בכישלון המפתנים, לכוורות הממולאות בעפר לא היה כל סיכוי לעמוד בזרימות השיטפוניות המאפיינות נחל זה. יתכן והיה כאן גם כשל תכנוני במרחקים בין המפתנים וגם בביצוע.



איור מס' 20: נחל אמציה – שימוש כושל בשני אמצעי ייצוב. מפתנים וכוורות ממולאות עפר.

### 4.3 מפתנים בנחל חרוד ובנחל שונם.

בניית מפתנים בתוואי התעלה הוא פתרון יעיל בד"כ (איור מס' 21א). חישוב לא נכון במרווחים בין המפתנים יכול לאפשר מהירויות גבוהות מדי לתעלה ולגרוף הקרקע תוך יצירת מפלים גדולים מהמתוכנן (איור 21ב).

במסגרת סקר הנחלים שערכנו, נמצא כי הבעיות העיקריות בייצוב במפתנים נובעות מכמה סיבות: אי הקפדה על רווח מתאים / מרחק מתאים בין המפתנים, יישום לא נכון של הפרשי גבהים. בתעלות בהן לא מבצעים שיכוך אנרגיה במורד נוצרות חתירות העלולות למוטט את המתקן או למנוע את תפקודו.



איור מס' 21: מפתנים בנחל חרוד (א'), מפתנים בנחל שונם (ב')

### 4.4 גביונים בנחל איילון, קטע נתב"ג.

"שדרת הגביונים" בנחל איילון קטע נתב"ג, מספקת הגנה יעילה לגדות האפיק ולקרקעית. במקביל נוצרה בעיית תחזוקה של כיסוח הצומח הגדל בסחף שנלכד בין האבנים ויוצר בית גידול נוח להתפתחות צמחייה בקרקעית. יש קושי להכניס כלים מכניים לעבודות תחזוקה על גבי הגביונים, קשה לנקות את האפיק מפסולת וגרוטאות ובנוסף, המכסחות ההידרוליות אינן מגיעות למרחקים ארוכים כך שלא ניתן לכסח את הצומח בקרקעית.



איור מס' 22: יצוב בגביונים, נחל איילון, קטע נתב"ג.

## 5. איסוף מידע להערכת יציבות תעלות

### כללי

- הערכת יציבות תעלות (ראה פרק 2) דורשת איסוף מידע על התעלה ועל אגן ההיקוות שלה. פרק זה מספק מדריך לאיסוף מידע הנדרש לביצוע פעולות ייצוב או פעולות אחרות בתעלה. לרוב המידע שיידרש יהיה טופוגרפיה (מדידות), סוגי קרקעות ומאפיינין, נתונים הידראוליים, הידרולוגיים, תכנון גיאוטכני והערכה סביבתית.
- גישה מקצועית ומפורטת לעבודת השדה בהערכת היציבות בגדות היא הבסיס לזיהוי ואפיון של הבעיות. נדרשת שיטה עקבית לתצפית, לרישום וזיהוי תהליכים מתמשכים בתעלה ואבחון המצב הקיים. למרות שלהערכת יציבות מקצועית יש מחיר כלכלי יש לה יחס עלות תועלת גבוה מאוד, אם ניקח בחשבון את התוצאות של איבחון שגוי.
- הערכה מדויקת של בעיות בגדות תומכת בבחירה של החלופה שתספק את התגובה המתאימה ביותר. הערכה מדויקת תמנע אסטרטגיות לא יעילות בפתרון בעיות יציבות ובתחזוקה או תכנון יתר שגורם להוצאות מיותרות.
- במילים פשוטות: פרויקט ייצוב גדות יצליח רק כאשר יתמקד בגורם הספציפי של חוסר היציבות. (או כאשר למתכנן יש הרבה מזל).
- להלן מפורטים 7 צעדים לזיהוי ותיעוד המצב באתר:
1. לימוד הבעיה והמטרות - איסוף מידע היסטורי והכנות לעבודת השטח.
  2. גיליון תצפית – יצירת גיליון סטנדרטי שאוסף את התצפיות מהשטח ואת ההסברים לתהליכים, לשימוש המתכננים ומקבלי החלטות.
  3. מפת סביבה – הצגה גראפית של קטע האפיק הבעייתי של המורד ושל המעלה, לצורך תיעוד מוצע שרמת המיפוי תהיה בסטנדרטים מתאימים שייקבעו.
  4. תאור מפורט של התעלה והגדות - מדידות וסקר קרקע כולל תוכניות מדידה חפירת בורות מחפרון על פי הצורך וסקר של הצמחייה.
  5. תיאור הבעיה – השלמת הסברים לתהליכים ולתצפיות שבשלבם הקודמים. מוצע להתייחס בתאור גם לקטעים הבעייתיים ביותר וגם לקטעים הפחות בעייתיים לפני קביעת האפיון הכללי.
  6. התנאים בבוהן התעלה – בשלב זה נתמקד בתצפיות ובהסברים שלהם באזור בעייתי וחיוני - בוהן התעלה. תאור התנאים יכול התייחסות לצורת חתך הרוחב, הצמחייה וסימני סחיפה.
  7. מפת גדות ופרופילים - בשלב האחרון המתבצע במקביל לשלבים 4,5,6 מתקבל תוצר שהוא מפה מפורטת ופרופילים אופייניים שמציגים את הפריסה המרחבית של תופעות שונות. ניתן לבצע שימוש יעיל בתצלומים וסקיצות שהוכנו בשלבים הקודמים.
- הערך של התצלומים גדול יותר באופן בולט כאשר יש להם יחוס מרחבי ברור במפה מפורטת.

### 5.1 סקירה של ההתפתחות ההיסטורית

בהערכת מערכת של נחל קיים, חשוב לזהות את ההתפתחות ההיסטורית אשר השפיעה על המורפולוגיה והיציבות שלה. יש אזורים בהם המאפיינים הנוכחיים של הנחלים הם תוצאה של פעולות, שינויים והפרעות שנעשו בעבר (הסטת אפיקים, ייבוש ביצות וכו'). במקרים רבים יהיה קשה לאתר תיעוד של פעולות אלו. עם זאת, בעזרת מפות מתקופות שונות, צילומי אוויר שונים, תוכניות, סקרים מקדימים וכו' ניתן לקבל רמזים על שינויים מהותיים שאירעו בשטח. בכך ניתן להשיג מידע חשוב ביותר.

המידע ההיסטורי נדרש לפרויקט המקומי בנחל וכן על אגן ההיקוות במעלה האפיק. שינויים בקנה מידה גדול בשימושי הקרקע משפיע לרוב מהותית על יציבות הנחל ע"י שינויים בספיקות השיא, תנאי הנקיות של האגן ואספקת הסחף. מידע על הצפות משמעותיות מהעבר, תיקונים ושדרוגים של גשרים ומתקנים הנדסיים אחרים יכולים להיות לעזר רב.

### **5.2 פענוח מפות ותצלומי אוויר**

מפות טופוגרפיות בקני מידה שונים וממועדים שונים יכולות להצביע על מערכות הניקוז הטבעיות ועל השינויים אשר חלו באגן ההיקוות, על האפיקים ועל תנוחת הנחל ומרחבי ההצפה שלהם. הערכה של פרופילים אורכיים יכולים להתקבל ממפות קונטורים. מידע זה יכול להיות יעיל ביותר בעיקר לנחלים גדולים ופחות לנחלים קטנים.

רצף של תצלומי אוויר, הם לרוב כלי החישה מרחוק היישובי ביותר ללימוד הנחל והשינויים שחלו בו. איכות הצילום והתאמת קנה המידה יכולים להשתנות מהותית בין תאריכים שונים. צילום מגובה נמוך או צילום בקנה מידה גדול אינם תמיד הכלי הטוב ביותר לייצוג מאפייני נחל במיוחד באזורים המושפעים מהפרעות כגון חורשות, מטעים וכו', מכיוון שמאפייני התעלה מיטשטשים בצילום ע"י הצמחייה וההבדלים בין מרבצי השקעת סחף מיטשטשים. קנה המידה המיטבי נע בין 10,000:1 לבין 30,000:1. כאשר משווים בין תצלומי אוויר ממועדים שונים יש להתחשב בגובה מפלס המים בנחל בעת הצילום (ניתן להערכה בעזרת תחנה הידרומטרית ונתוני גשם). יש לנקוט בזהירות במימד האופקי בהשמת שכבות מידע ממועדים שונים, ניתן להיעזר בנקודות בקרה קבועות מהתצלומים.

כיום ניתן להשתמש גם בתצלומים או הדמאות לוויין לניתוח מאפיינים שונים של קרקעות ושימושי קרקע באגן ההיקוות. נושא זה נמצא בפיתוח מואץ ונמצא ככלי יעיל ביותר במיוחד בשילוב של מערכות לעיבוד נתונים ומערכת (GIS). בכלים אלו ניתן לקבל בקלות יחסית מידע על שינויים בשימושי קרקע, תזוזת גדות או אף מיקום אפיק, נדידת מיאנדרים ושינויים במפלסי הצפה. ניתוח רב משתני בבסיס נתונים ממוחשב על בסיס רב שכבתי מסוגל לתת תמונה טובה על השינויים והמצב העכשווי של התעלה. הדמיה בין אם היא מלווין ובין אם היא מתצלומי אוויר ניתנת לתיקון והתאמה בעזרת (GIS) למפות קיימות של האזור עליו שואפים לקבל מידע. ע"י בניית שאילתות מתאימות בבסיס הנתונים ניתן לקבל כלי החלטה טובים במהימנות רבה. גישה זאת יכולה להקדים כל פעולה אחרת המבוצעת בשטח ויכולה לחסוך מאמצים רבים.

### **5.3 פיקוח שדה**

בהערכת יציבות של נחל או של אגן היקוות, תצפיות שדה הן בעלות תפקיד חשוב ביותר. פיקוח השדה צריך להיעשות לאחר מחקר והתבוננות במפות ובתצלומי אוויר כדי לקבל תמונה על המרחב כולו. רצוי כי פיקוח השדה ילווה בצילומים מאתרים נבחרים ובתיאור בכתב של הבעיות באתרים הנצפים.

חשוב שהפיקוח יעשה ע"י אדם המנוסה בתחום ההידראוליקה או בתחום בעיות יציבות. עדיף שהביקורים באתר יהיו בזמנים בהן הזרימות נמוכות ושהגדות תהיינה חשופות מצומח כך שניתן לראות את הקרקעית ואת בוהן התעלה. תצפיות נוספות בעת הצפה ואירוע זרימה מפותח יכולות ללמד עוד על מקרי קיצון.

ניתן להשתמש גם במכשירים רושמי זרימות מהם ניתן להסיק על משכי זרימה, נפחי מים וספיקות שיא.

לאחר זרימות ניתן לראות סימני שיא על הגדה. הרחופת הצפה על המים נתפסת על הגדה וניתן להסיק ואף לחשב מתוכה את ספיקות השיא בשיטת העבר שיפוע (גרתי וחובריו 1999). יש לבחון בזהירות נתונים שנאספו סמוך לגשרים, העלולים להשפיע נקודתית על מהלך הזרימה התקין, עם זאת במקרים רבים נרשמים קווי זרימה מירביים על קירות מעבירי מים או על עמודי גשרים כך שניתן לקבל רמזים על זרימות באפיק.

יש לעקוב אחר אזורים בהם קיימת תופעה של התמוטטות גדות (איור מס' א'23), בעיות חלחול ופייפינג (איור מס' ב'23), התערצות צד (איור מס' ג'23), חתירה בבסיס גשר איור מס' ד'23). דוגמאות אלו ואחרות יכולות ללמד אותנו על בעיות מקומיות או אזוריות איתן יש צורך להתמודד.



איור מס' ב'23: חלחול ופייפינג



איור מס' א'23: גלישת גדות



איור מס' ד'23: חתירה בבסיס גשר



איור מס' ג'23: התערצות צד לראשי ערוצים

**5.3.1 מאפיינים לחקירת שדה:** קיימים מספר מאפיינים עיקריים אותם יש לחקור ביתר תשומת לב בשדה לצורך הבנת הגורמים המשפיעים על יציבות התעלה.

א. **התנאים במעלה אגן ההיקוות:** קיימים מספר מאפיינים עיקריים כמו טופוגרפיה, קרקעות, צומח, שימושי קרקע ושינויים העלולים להשפיע על יציבות האפיק. אזורי אירוזיה והשקעת סחף, מקורות תורמי סחף, שינויים בהתפתחות ראשי ערוצים, מערכות ניקוז והשקיה, שינוי בתצורות פני קרקע.

- ב. **תנוחת האפיק והגדות** : מבנה גיאולוגי, תזוזת אפיק, נדידת מיאנדריס וקרקות הגדות, גלישות קרקע בגדות, שינוי מפלס בנחל, הגנה על הגדות, תנאי הצפה משתנים. שינויים בפרופיל הנחל עקב שינויים בתנועת סחף.
- ג. **פני מים ופרופיל הידראולי** : סימני שיא של גובה מים, תנאי ופשט ההצפה, מהירות זרימה וחספוס.
- ד. **תנאי מורד הנחל** : הפרעות קודמות, מאפיינים העלולים להיות רגישים לטיפול במעלה.

#### **5.4 סקירת התעלה ופשט ההצפה**

קיימים מספר מאפיינים עיקריים המשפיעים על פשט ההצפה ועל התעלה : **טופוגרפיה** : יש לבצע סקירה טופוגרפית או פוטוגרמטרית לצורך קבלת קווי גובה (קונטורים) של תוואי התעלה ופשט ההצפה (Floodplain). בעזרת קווי הגובה ניתן לקבל את הפרופיל האורכי של התעלה ושל פשט ההצפה.

**חתכי רוחב** : סקירת חתכי הרוחב בתעלה יכולים להראות שינויים בכיסוי בצומח, שינויים נראים לעין של קרקעות הגדות, הגנה על הגדות, סימני שיא של זרימות מהעבר. מיקום חתכי הרוחב צריך לייצג את מגוון התנאים באפיק, עיקולים, ישורת, הצרויות והתרחבויות.

**פרופיל אורכי** : הפרופיל האורכי אמור לשקף מפלסי קרקעית, מפלסי מים של זרימות שיא וזרימות בסיס, רום כתפי הגדות, מפלים, מבנים. את הפרופיל האורכי יש לקשור (במדידה) לנקודות קבע (עמודי חשמל, יציקות בטון בסביבה, כבישים וכדומה) לצורך מעקב על שינויים.

**חומרים וקרקות** : יש לקחת דגימות קרקע מייצגות מהחתך האורכי של התעלה בכדי לאבחן את מגוון וגודל גרגיר הקרקעות הנמצאות בתעלה. באזורים המושפעים משפכי תעשייה חקלאות או קולחים, יש לאבחן את החומרים המצויים במים ובקרקעית ולקבל הערכה על מידת השפעתם על קרקעות וצמחיית התעלה ופשט ההצפה.

#### **5.5 סקירת זרימות והערכתן**

**כללי** : נתונים על הזרימות בתעלה הכרחיים לכל ניתוח הנדסי של יציבות התעלה. הנתונים הנדרשים הינם : רישומי ספיקות, תדירות הצפות ומשכי זרימה. בנחלים בהם יש תחנה הידרומטרית ניתן לקבל נתונים אלו ללא בעיות מיוחדות. בנחלים בהם אין תחנה הידרומטרית יש ליצור הידרוגרף סינתטי על בסיס דמיון עם אגן/תעלה דומים בהם קיים מידע על זרימות, או לחלופין להשתמש במודל הידרולוגי המעודכן לאזור בו מתבצע פרויקט.

**רישומי ספיקות** : הרציפות ההיסטורית של נתוני ספיקות השיא מועילה ביותר בפרשנות של סקר השדה. באגנים קטנים תשומת לב מירבית צריכה להינתן דווקא לספיקות השיא יותר מאשר לספיקות יומיות או חודשיות. נדירות של אירוע זרימה גדול יכול להטעות את הערכת יציבות התעלה במובן ארוך הטווח. לעומת זאת, אירוע שקרה לא מזמן יכול ליצור רושם מוגזם על אי יציבות התעלה לטווח ארוך. לאחר אירוע שטפוני גדול או חריג, יש לבחון את היסטוריית האירועים שזרמו בנחל כדי להבין ולחשב את הסתברותו של האירוע הנוכחי. משכי הזרימה מספקים מושג כללי על התדירות בה מתקיימת תנועת חומרי מצא ולמיצוע נפחי סחף שנתיים.

## 5.6 מידע גיאולוגי וגיאוטכני

מידע גיאולוגי וגיאוטכני הוא חשוב כדי להעריך את יציבות התעלה. יש חשיבות רבה בהבנת המקורות הגיאולוגיים והמאפיינים הגיאוטכניים של הקרקעות והסחף הבאים בקשר עם התהליכים הדינמיים המתרחשים בתעלה. מידע כזה יכול להתקבל מדו"חות קודמים שנעשו באזור או משילוב יועצי קרקע מומחים.

תנאים גיאוטכניים של קרקעות אלוביאליות, חרסית, סילט וחול לעיתים קרובות מסתיימים בקריסת גדות עקב מינהור (פייפינג), התהוות שבר מאמצים ותנועת גושי קרקע. קרקעות אגמיות עשויות להיות משוכבות ובעלות תכונות אי יציבות רבות. קרקעות לס יכולות להיות יציבות בשיפועים מאוד תלולים כאשר הן יבשות, אך כאשר הן מורטבות או כאשר הן נתונות בלחצים אירוזיביים הן קורסות.

## 5.7 הסעת סחף

נושא הסעת הסחף מכוסה בפרק 2.4. בהרבה מקרים ובמיוחד כאשר מטפלים בנחלים קטנים, חסר המידע הדרוש לניתוח מעמיק של סוגיית הסחף. אולם ניתן לקבל הערכות איכותיות ע"פ מספר נקודות:

1. ניתן לדרג את הסעת הסחף בחלוקה גסה (מעטה, בינונית ורבה) ולאפיין זרימות ע"י צופים בעלי ניסיון ע"י תצלומי אוויר או מנקודות קרקעיות. תעלה בעלת הסעת סחף מרובה תחשוף אזורים רבים, על הקרקעית יהיו חלוקים עגולים ללא צמחייה. בתעלה עם הסעת סחף מועטה הגדות יהיו יציבות, על אבנים וגרגרים בקרקעית תהיה התפתחות אצות.
2. דרגת עומס שטיפת חלקיקי הקרקע יכולה להימדד ע"פ מצב החלק העליון של הגדה או פשט ההצפה. בתעלות בהן עומס שטיפת חלקיקים גבוה, תהיה קיימת שכבה מוצקה שלא מאוכלסת ע"י צמחייה. ואילו בתעלות בהן עומס שטיפת החלקיקים נמוך יראו חלקיקים גראנולריים על החלק העליון של הגדה או בפשט ההצפה.
3. בנחלים בהם קיימת תופעת נדידת מיאנדרים, דירוג הסעת הסחף קשור קשר הדוק עם עיתוי נדידת המיאנדרים.
4. נחל רב ערוצי, מאופיין במקרים רבים (אם כי לא תמיד), בדרגת הסעת סחף גבוהה. מיאנדר עקמומי בו לא נראה (בהיטל על) נקודת חסימה, מאפיין נחלים בעלי הסעת סחף נמוכה.

## **6. בחירת טכניקת ייצוב**

### **כללי**

להלן, תוצג גישה עקרונית לבחירת פתרון לבעיות מקומיות של חוסר יציבות בתעלות או באפיקים טבעיים.

אנו מניחים כי בפרקים הקודמים הוגדרו הגורמים והמכניזם של חוסר היציבות והובן כי עבודות ייצוב נקודתיות מהוות רכיב במערכת מורכבת.

לעיתים, עבודות הייצוב הנקודתיות מהוות מרכיב יחיד בפרוייקט הסדרת הנחל.

בפרקים הבאים 7-9 יפורטו המרכיבים של פרוייקטים לייצוב תעלות.

בפרק זה מוצגים העקרונות לבחירת טכניקת ייצוב. החלופות השונות לא מתוארות בפרוט וכן לא מפורטים, היתרונות, החסרונות והיישום הטיפוסי, אלא מפורטים בפרקים הבאים.

המסגרת הכללית לבחירת פתרון ייצוב ניתנת לביטוי ע"י:

- א. יעילות הגישות החלופיות.
- ב. שיקולים סביבתיים.
- ג. שיקולים כלכליים.

אנו מפרידים בין התאמה כללית או עקרונית של טכניקת ייצוב בה נדון להלן, לבין התאמה תכנונית לאחר שקלול מכלול האילוצים והקריטריונים לתכנון.

### **6.1 יעילות גישות חלופיות**

גורמי היעילות הבאים משפיעים על בחירת שיטת ייצוב לפרוייקט מסוים:

- א. עמידות.
- ב. התאמה לחתירה ולשקיעה.
- ג. עומק הזרימה.
- ד. אילוצים של תנאי הגבול בקצה.
- ה. התווית התעלה.
- ו. השפעה על קווי הזרם.
- ז. השפעה על הארוזיה (או השפעה על שקיעת הסחף) במעלה או במורד.

#### **6.1.1 עמידות**

רק לעיתים רחוקות ניתן ביטוי כמותי לתקופת התכן של המבנה. לדוגמא, בפרוייקטים בהם נערך ניתוח כדאיות כלכלית. בד"כ מסווגים הפרוייקטים כפרוייקטים לטווח ארוך או פרוייקטים לטווח קצר.

דוגמאות לפתרונות לטווח קצר:

- א. ייצוב בפתרון חירום בזמן שטפונות יוצאי דופן הדורש התערבות מיידית ללא אפשרות לתכנון פתרון קבוע.
- ב. ייצוב מקומי של אפיק שנחתר בתוואי חדש, כאשר ההצפה היא למשך זמן קצר והסיכון שבעתיד החתירה תהיה באותה נקודה, נראה סביר.

בד"כ הפרוייקטים יהיו לטווח ארוך ובמקרה של ספק, סביר להניח כי תקופת התכן של הפרוייקט ארוכה, מכיוון שהוצאות העבודה והציוד בפרוייקט הם בד"כ ההוצאות הגדולות ביותר.

שיפור או שדרוג של החומרים לחומרים עמידים יותר יבטיח בד"כ יחס עלות תועלת גבוה בהגדלת מקדם הביטחון.

מקרים של תקופת תכן מיוחדת יכולים לכלול ציפייה להשפעה של פרוייקטים עתידיים על תוואי האפיק המוסדר או הקמת מאגר שישפיע על הפרוייקט בעתיד וכדו'.

כאשר פרוייקט עלול להיות מושפע בעתיד משפילה של הקרקעית בקטע האפיק במורד או מתוזה של עיקול בקטע האפיק במעלה, נדרשת התייחסות מתאימה בקביעת אורך הקטע להסדרה.

### דרישות תחזוקה

הערכת גורם התחזוקה כרוכה בשיקול השקעה קטנה לעומת פוטנציאל לכשל או נזק משמעותי לפרוייקט כתוצאה מתחזוקה לא מספקת.

כאשר קיימות תחזוקה וניטור ברמה גבוהה, המזמין יכול להעדיף טכניקות פחות עמידות, זולות יותר. נדרשת זהירות של המתכנן בהסתמכות כבדה על תחזוקה עתידית, הן בגלל גורמים משתנים שאינם בשליטת המזמין והן בגלל התנהגות אנושית צפויה-למזמין קל להתחייב לתחזוקה בעתיד מאשר לבצע אותה בעת הצורך.

ההחלטה על פתרון פחות עמיד צריכה להתבסס על ראייה מפוכחת ואולי פסימית של ביצוע התחזוקה בעתיד.

באופן כללי, נראה כי ניתן לתכנן את רוב שיטות הייצוב בסיכון נמוך לכשל. לפיכך, החשיבות של התכנון המפורט והביצוע בד"כ משמעותיות יותר מהקביעה העקרונית של שיטת הייצוב.

### הסעת עצמים זרים וסחופת

עצמים המוסעים עם הזרם, כגון גרוטאות, עצים שנשחפו וכדו', עלולים לגרום לנזקים כבדים ברמה כזו שטכניקות מסוימות לא יהיו כלכליות או ייפסלו על הסף.

### קורוזיה ושחיקה

שחיקה וקורוזיה יקטינו מאוד את העמידות של פתרונות המתבססים על מרכיבים מתכתיים. הגורמים המכריעים הם הימצאות חומרים כימיים קורוזיביים במים (לדוגמא: בקישון, בירקון ובנחלים אחרים בהם שפכים תעשייתיים), ושחיקה בגלל ריכוזי גרופת וסחופת גבוהים במהירויות זרימה גבוהות (לדוגמא בנחלים שטפוניים בנגב ובערבה).

הציפויים הפגיעים ביותר לשחיקה וקורוזיה כוללים מזרונים גמישים של גושי בטון וגביונים.

3 דרכים למניעת או הקטנת הסיכון לכשל בסביבה של קורוזיה או שחיקה:

- טכניקה עמידה - שימוש בציפויים קשיחים, ציפויי אבן, ציפוי שטח הגביונים בחומרים פלסטיים או אספלט, הימנעות מחלקי מתכת.
- מרכיבים מיוחדים - גלון כבד או ציפוי PVC לחוטי המתכת. שימוש בכבלים סינטטיים או כבלי פלדת אלחלד.
- קביעת תחומים שונים לפתרונות בנחלים זורמים.
- מתחת למים - חומרים עמידים לקורוזיה הקשורה למים ושחיקה
- בין קו המים לצמחייה הקבועה – עמידות לקורוזיה הקשורה למים, לאויר ולשחיקה ברמה נמוכה.
- מעל קו הצמחייה – תיתכן הגנה מסוימת של כיסוי הצמחייה מפני קורוזיה ושחיקה.

## סיכונים נוספים

במקרים מסוימים יש לצפות לוונדליזם, גניבות, בעיות הקשורות לבע"ח ושריפות. מניעת פיתויים או "פרצות הקוראות לגנב" תקטין את הסיכון לוונדליזם וגניבות. חומרים מסוימים מהווים מטרה ברורה לגניבות כגון לוחות עץ, לוחות בטון אבנים מסותתות בצורה או גודל אטרקטיבי, כבלים ומותחנים. יצירת "חיים קשים" לגנבים, לדוגמא: ע"י מרכיבים גדולים יותר ומורכבים יותר לפירוק או הריסה עשויה להועיל. הגנה מפני פגיעת בע"ח – הגנה זמנית על הצומח מפני רעייה ע"י גידור וכדו'. שימוש במינים מקומיים מתאימים ופחות אטרקטיביים לבע"ח. שריפות – ברור כי חומרים מסוימים דליקים יותר. באזור בהם שריפות שכיחות רצוי להשתמש באמצעים עמידים ולא להישען על שרותי הכבאות או אמצעים אחרים לכיבוי שריפה.

### 6.1.2 התאמה לחתירה בקרקעית ולשקיעה

עבור תנאים זהים, קיים יתרון משמעותי לשיטת הייצוב שמתאימה את עצמה לחתירה בקרקעית ולשקיעה בגדות על פני שיטות ייצוב קשיחות. התכנון והביצוע של שיטות קשיחות לחלוטין צריך להיות זהיר וגם אז נדרשת תוספת של חומרים גמישים בנקודות קריטיות.

### 6.1.3 עומק זרימה

עומק המים הצפוי בזמן הביצוע מגביל את שיטות הייצוב המעשיות. המצב הפשוט הוא בעבודה באפיק היבש או אפיק שיש לו פרקי זמן ארוכים יבשים, כך שהציפוי כולו מבוצע מעל פני המים. המצב נעשה מורכב כאשר לאפיק קיימת זרימת בסיס קבועה, בעובי כמה עשרות ס"מ או יותר. בחירת אמצעי הייצוב מתחת למים משמעותית. בד"כ טכניקת הייצוב המתאימה תשלב אמצעי שניתן ליישום באמינות גבוהה מתחת למים עם אמצעי זול יותר לייצוב הגדות שמעל המים. הפתרון המורכב או היקר ביותר יהיה בנחלים בהם עומק הזרימה גדול ממספר עשרות ס"מ ובוהן התעלה עמוק בתוך האפיק. טכניקה מעניינת במקרה כזה "מביאה את הנחל לאתר העבודה". ע"י ייצוב במילוי אבן מחוץ לאפיק, בתוואי רציף וחלק מעבר לגדת הנחל הקיימת (תעלה במילוי אבן בגדה (trenchfill) ברגע שהארוזיה באפיק מגיעה למילוי האבן, מילוי האבן שוקע עד שנוצר כיסוי יעיל של הגדה למניעת המשך הארוזיה.

### 6.1.4 אילוצים הקשורים בשמירת קווי הגדות הקיימים

ייתכנו מקרים בהם לא ניתן לחרוג מהגדות הקיימות ולא ניתן למתן את שיפועי הדופן או מקרים בהם לא ניתן ליצור משטח מתאים לציפוי שייגן על הגדה בפני ארוזיה, בגלל עלות גבוהה או מתקנים סמוכים לגדה. הגבלות הקשורות בסילוק עודפי חפירה עלולות גם כן ליצור צורך במיזעור החפירה בגדות.

במקרים בהם לא ניתן לסבול חתירה כלשהי ונדרש פתרון ייצוב מיידי יהיה צורך לשקם את הגדות, בד"כ בעזרת קירות תמך או טרסות אבן ומילוי עפר.

במקרים בהם ניתן לסבול מידה מוגבלת של חתירה, מילוי וחפירה עשוי להיות מתאים.

גישה זו מחייבת תשומת לב מיוחדת לקטעי הגדות שבמילוי, באמצעות הגנה על הבוהן, פילטר או גיאוטקסטיל ושימוש בציפוי גמיש שיותאם לתזוזות או גלישות של הגדה.

נדרש שחומר המילוי לא יהיה אטום על מנת למנוע מינהור ע"י שכבות חדירות יותר בגב חומר המילוי.

חומר מילוי לא קוהזיבי יתאים מאד בגלל אפשרות נוחה להידוק ולמניעת גלישה.

הידוק מלא יהיה יקר אך הידוק ברמה מסויימת באמצעות המעברים של כלי החפירה והמשאיות כדאי מאד, מכיוון שיקטין את חוסר היציבות בעלות מינימאלית.

#### **6.1.5 אילוצים הקשורים בהתוויית התעלה**

הימנעות משינויי התווייה קיצוניים ע"י אימוץ התוואי הכללי הקיים יהיה בד"כ זול יותר מהתווייה מחדש ויש לו יתרון בכך שישנה פחות את מאפייני הזרימה.

אולם. לעיתים אילוצים של מבנים או מתקנים קיימים ומתוכננים או תנאים הידרוליים לא נוחים של עיקול חד או גדה מאד לא אחידה יחייבו תיקוני תוואי.

אם נדרשים תיקוני תוואי, התווייה חלקה וזורמת יותר תהיה עדיפה משיקולים הידראוליים ומבניים, אך התווייה לא רגולרית תהיה עדיפה משיקולים של יצירת גיוון של החי והצומח.

#### **6.1.6 השפעה על קווי הזרם**

שינוי הגאומטריה של התעלה או לעתים אפילו עבודות ייצוב הגדות ישנו במידה מסוימת את ההידרוליקה של הזרימה.

ההשפעה על קווי הזרם לעיתים לא ניתנת לחיזוי, אולם ניתן לבחון את הרגישות להשפעות פוטנציאליות בהנחות שונות.

למזלנו, עבור רוב הפרוייקטים לייצוב גדות בהיקף מוגבל גם הנחות פסימיות יביאו למסקנה שלא צפויה השפעה משמעותית.

הנמכה של קווי הזרם עלולה לגרום להשפעות הלא רצויות הבאות:

- שפילה של קו הקרקעית ביובלים המתחברים לאפיק הנדון.
- פגיעה בחי ובצומח בזרימות נמוכות.
- הנמכת קו פני מי התהום הסמוך לאפיק.
- הקטנה של היציבות הגיאו-טכנית של גדות התעלה.
- היצרות או סתימת התעלה ע"י צומח.
- צורך בחפירה או ניקוי במורד האפיק.

הנמכה חמורה של קווי הזרם קשורה בד"כ לתיעול בקטעים ארוכים וההשפעה של הגנה על הגדות בלבד תהיה בד"כ לא משמעותית ולא ניתנת להערכה בדיוק.

## זרימות שטפונית

בתעלות המוסדרות לשליטה על שטפונית ובעיקר באפיקים קטנים, נדרש לבחון לעומק את ההשפעות של עבודות ההסדרה והייצוב על כושר ההולכה.

גישה של ציפוי ככל הנראה לא תקטין את כושר ההולכה. כל ציפוי צפוי להיות מחוספס פחות מגדות בהם קיימת ארוזיה. (בעיקר כאשר בעבודת ההכנה לציפוי מבוצעת החלקה ומיתון של שיפועי הדופן. דייקים ומעכבים צפויים להקטין את כושר ההולכה ע"י היצרות החתך הזורם וע"י השקעה צפויה של סחף ועידוד הצומח בגדות, אך מצד שני תיתכן העמקה של החתך וריכוז של הזרימה במרכז האפיק ישפרו את כושר ההולכה. ניתן לחזות במקרים מסוימים ע"י מודלים נומריים ופרופילים הידרוליים את השינויים הצפויים בפני המים.

בגישה שמרנית ניתן יהיה להניח כי:

- לא תהיה העמקה בתעלה המיוצבת.
- צפויה השקעת סחף משמעותית בין המתקנים המעכבים.
- גדות מיוצבים יהיו מכוסות בסופו של תהליך בצמחיה הדומה לצמחיה הטבעית באפיק או בגדות יציבים.

## זרימות נמוכות

הגישה להשפעה של פרויקט ייצוב על הזרימות הנמוכות פחות ברורה. מפלסים נמוכים יותר צפויים כאשר האפיק המורדי יהיה צר ועמוק יותר. באופן דומה ניתן יהיה לחזות במקרים מסוימים את השינויים הצפויים בפני המים ע"י מודלים נומריים וחישוב בפרופילים הידרוליים.

### 6.1.7 השפעה על הארוזיה במעלה או במורד

השלב האחרון בהערכת היעילות של גישות חלופיות לייצוב הגדות הוא לבחון השפעה פוטנציאלית על הארוזיה במעלה או במורד הזרם.

בחינת ההשפעה של פרויקטים גדולים לייצוב קטעי אפיק בעיקר כאלה הכוללים בנוסף שינויים משמעותיים באגן ההיקוות (מאגר השהייה, טיפול אגני וכדו'), מורכבת ונדונה בפרקים הקודמים. להלן התייחסות צרה יותר המציגה את הקשור להשפעה הפוטנציאלית של חלופות ייצוב שונות. באופן כללי סביר לטעון כי ייצוב גדת אפיק לא ישפיע באופן משמעותי על מעלה האפיק. סביר יותר כי המעלה עלול להשפיע על הקטע המיוצב במקרה של תזוזה או נדידה של האפיק במעלה. האפשרות שמניעת ארוזיה בנקודה מסוימת תשפיע על הארוזיה במורד סבירה יותר. למרות שהארוזיה הכללית במורד לא צפויה להשתנות, עדיין ייתכנו שינויים מקומיים, אך בעיה זו דומה בכל טכניקות הייצוב שנבחר מכיוון שכל פעולה שתחסן את תזוזת האפיק תשנה את התנהגות האפיק בעתיד ברמה מסוימת, ככל שהשינויים בתוואי האפיק ובגיאומטריה קטנים יותר כך ההשפעה תהיה קטנה יותר.

על מנת לבחון לעומק את ההשפעה של הפרויקט נדרש מחקר או ניתוח הידרולי וגיאומורפולוגי.

## **6.2 היבטים סביבתיים**

### **כללי**

ההתייחסות להלן של השיקולים הסביבתיים היא בגישה סביבתית רחבה שנדונה בפרקים נוספים במדריך, כאשר ניתן דגש לגורמים המשפיעים על בחירת פתרון הייצוב באתר נתון. הצלחה או כשלון של פרויקט ייצוב במקרים רבים נובעת מההשפעות הסביבתיות. המשקל של השלכות סביבתיות שליליות עלול להיות מכריע גם כאשר הפרויקט יהיה יעיל לחלוטין מבחינת גדות יציבות.

### **6.2.1 השלכות סביבתיות פוטנציאליות.**

#### **סביבת החי והצומח לאורך האפיק**

ההשלכות הפוטנציאליות כוללת:

**איכות המים** – פגיעה באיכות המים במהלך הביצוע שונה במשטר הסעת הסחף לאחר הביצוע העלאת טופ המים כולל הסרה ש לצל שהיה קיים קודם לכן ע"י העלוה. או הקטנת טמפרטורת המים בגלל כיסוי הצומח.

נוכחות תשטיפים או חומרים מזהמים שמתפרקים מהחומר לייצור הגדות

**דגים** – שנויים בגודל ובפירוס מהירויות הזרימה.

שינויים בתצורות תחתית התעלה ובעומק התעלה, השפעות לא ישירות על הדגים בגלל ציפורים או בע"ח הניזונים מדגים.

**יצורים החיים בתחתית התעלה** – חומר התחתית הטבעי הוחלף בחומר של ייצוב התעלה. שינויים כאלה עלולים להיות קטלניים ליצורים חד תאיים בתחתית התעלה ותיתכן השפעה על המשך שרשרת המזון.

### **6.2.2 סביבת הגדות**

ההשפעה על סביבת הגדות עלולה להיות משמעותית יותר ולטווח ארוך יותר מאשר נראה.

אזור השימור לאורך רצועות האפיקים מהווה מרכיב מרכזי במערכת הסביבתית והשלכות של פגיעה בו עלולות להיות מרחיקות לכת מכדי שניתן יהיה לצפותן.

לרצועת השימור תפקיד חשוב בקיום ובגיוון המינים של הצומח (מים וחומרי הזנה) ובקיום ושמירת מגוון המינים של החי (מים, מזון, מחסה). רצועות השימור מהוות פרוזדור לתפוצה של מינים ב"כיסים" בהם נשמרים התנאים הטבעיים באזורים מתפתחים.

החומר האורגני הנוצר בגדות (צומח, רקב וחרקים) שנופל לתוך המים מהווה מקור אנרגיה למערכת הטבעית.

הפעילות בזמן הביצוע עלולה לפגע ישירות או להפריע לתנועת בע"ח באפיק, בפעילות טבעית כגון חיפוש מזון, קינון, חיזור וכדו'

**פגיעה כזו עלולה להיות משמעותית עבור מינים נדירים או מינים בסכנת הכחדה.**

## 7. ציפוי פני שטח והגנה מפני ארוזיה

שריון הוא אמצעי הגנה הבא במגע ישיר עם גדת הנחל עליה הוא מגן, לרוב הוא נקרא ציפוי. את האמצעים לציפוי פני השטח ניתן לחלק למספר קבוצות עיקריות:

1. ציפוי אבן.
2. ציפוי קשיח.
3. גביונים ומזרוני אבן.

יתרונות: ציפוי ושריון פני שטח הגדה הינה גישה יעילה ובדוקה היכולה להיות מתוכננת במדויק ובמיוחד לאתר ולמצב הייחודי. ההגנה על הגדה מפני ארוזיה היא יעילה ומיידית. בנוסף ניתן גם לתכנן הגנה גם מזרימות עיליות מעבר לגדה.

חסרונות: לרוב נדרשת עבודת הכנה של הגדה כגון: הסדרת שיפוע הגדה והחלקת השטח. עבודות אלו מייקרות את עלות המיתקן, נזק אקולוגי והפרעה למבנים קיימים. שיעור עבודות העפר הכרוכות בסוג זה של הגנה על הגדה יהיה משמעותי במיוחד אם יש צורך בשינוי תוואי האפיק, עבודות חפירה או מילוי. ישום יעיל של הגנה על הגדות בעבודות תת מימיות במים עמוקים או במהירויות זרימה גדולות, לרוב מסובך ועלותו יקרה. לכמה חומרי ציפוי נדרש תקציב נוסף לפתרון בעיות חזותיות או אקולוגיות.

שיקולי תכנון: לציפוי חייב להיות משל ו/או כוחות אחיזה כאלו שישאירו אותו במים כאשר יופעלו עליו כוחות הידראוליים או מעצמים המוסעים בנחל ע"י הזרימה. הציפוי חייב למנוע יציאת סחף משמעותי מהגדות כתוצאה מטורבולנטיות הזרימה או מזרימות תת קרקעיות. כל שיטות הציפוי מחייבות שיקולי יציבות גיאוטכניים זהירים של הגדות, ולעיתים נדרש שימוש ביריעות גיאוטכניות או בחומר גרנולרי לניקוז הגדה ובכדי למנוע בריחת חומר מתחת הציפוי.

### 7.1 ציפוי אבן

בפרק זה נסקור את השיטות המקובלות לציפוי אבן של גדות נחלים תוך בחינה של היתרונות והחסרונות של האמצעים השונים. פירוט רחב יותר על ניסויים שנערכו בארה"ב ניתן למצוא ב:

U.S. Army Corps of Engineers (1990)

השיטה הנפוצה ביותר לציפוי גדות באבן הינה אבן ריפ רפ או אבן שפוכה. שריון האבן מיושם באבן מדורגת שהיא למעשה תערובת של אבנים בגדלים שונים. האבנים הגדולות מיועדות להגנה בפני הכוחות ההידרוליים של המים והאבנים הקטנות נועדו למנוע את תזוזת האבנים הגדולות ולמנוע בריחת חומר גדות דרך המרווחים שבין האבנים הגדולות. על האבנים להיות מסלע קשה. אבנים מסלע וולקני (בזלת, גרניט ועוד) או סלעי משקע קשים (גיר, דולומיט וכו'). אבנים ממסלע פריך או מסיס אינן מתאימות.

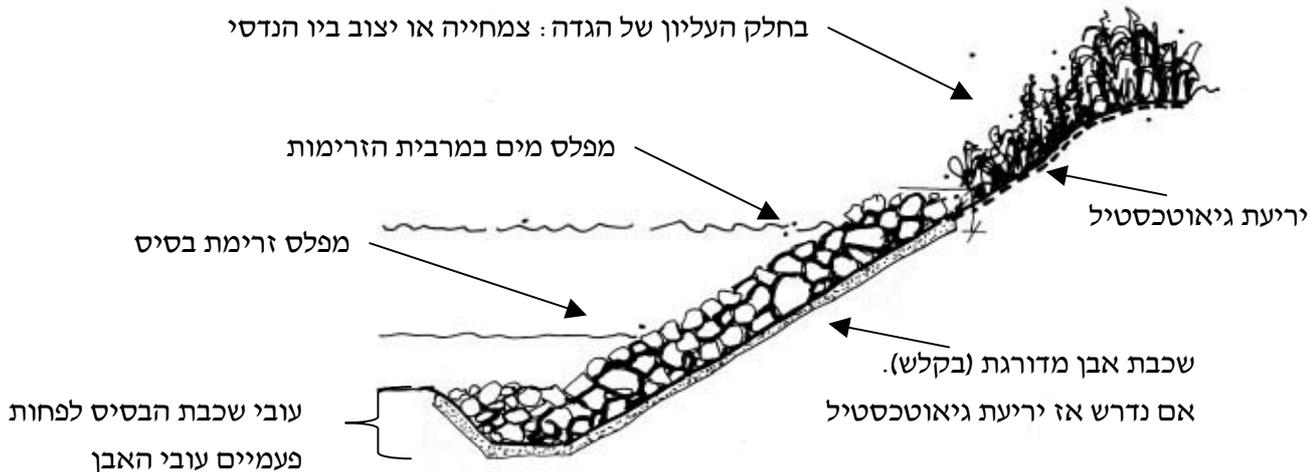
יתרונות: בשל העובדה שציפוי אבן הינה שיטה מקובלת, קיים מידע רב העוסק בשיטה במצבים שונים. ציפוי האבן הוא בעל עמידות רבה ויישומו יכול להיות בהתאמה רבה לפני השטח. האבן הינו אמצעי טבעי

שאינו יוצר מפגעים סביבתיים או נופיים, זמינותו גבוהה ברוב חלקי ישראל ומחירו זול באופן יחסי לציפויים קשיחים אחרים. לאחר זמן מה יש השקעת סחף בין החריצים ומתפתחת צמחיית בר הגדלה ומכסה את האבנים. ציפוי אבן המיושם בהדרגתיות מהווה נקז גם למים תת קרקעיים המתנקזים מהגדה ויכולים לגרום להתמוטטות של הגדה.

**חסרונות:** במצבים מסוימים עלות המתקן יכולה להיות יקרה בשל מחירי הובלה גבוהים ועלות גבוהה של עבודה בכלים כבדים. לעיתים, עקב התרבות צמחיית הבר נוצרת הפרעה לזרימה ויש קושי בתחזוקת הגדות בגלל אי אחידות פני השטח ובגלל שלכלי התחזוקה אין אפשרות לנסוע על גבי הציפוי.

### 7.1.1 ריפ רפ

ציפוי ריפ רפ מוגדר כאבן מדורגת השפוכה על הגדה ומסודרת באופן אחיד על הגדה. יתרונותיה וחסרונותיה של שיטה זאת מפורטים בתחילת פרק 7. באיור מס' 24 ניתן לראות את ההסבר העקרוני ליישום באבן ריפ רפ.



איור מס' 24: תרשים עקרוני של אבן ריפ רפ

**שיקולי תכנון:** תכנון של הגנת גדה באבן ריפ רפ אינו מיועד לנחלים בעלי שיפוע אורכי הגדול מ 2%. יש לבחון מספר מאפיינים נוספים של האבן והגדה עליה יש להגן: צורת האבן, גודל, משקל, עמידות, מידת דירוג האבן, עובי שכבת הריפ רפ, שיפועי הדופן של הגדה, חספוס, צורת הגדה, עקמומיות תוואי הנחל והשיפוע של הגדה הנגדית.

חומר הקרקעית ומאפייני הגריפה שלה ייקבעו את מאפייני התכנון של בוחן הגדה, שהוא חיוני בציפוי ריפ רפ של הגדות. הצורך בניקוז מים תת קרקעיים יקבע את סוג הפילטר בו יש להשתמש כמניעה מפני בריחת חומר מהגדה (פרק 7.1.6). יש לתכנן את ציפוי הריפ רפ כך שיעמוד בפני הזרימות הגדולות ביותר המתוכננות בנחל. להלן מספר מאפיינים הרצויים בתכנון אבן ריפ רפ:

## א. מאפייני אבן הריפ רפ

1. צורת האבן: צורת ריבוע לאבן היא הצורה העדיפה על פני צורת מלבן מפני שכך הן מסתדרות זו לצד זו באופן העמיד יותר לתזוזות. עדיף כי לאבן יהיו שוליים חדים ופאות חלקות, משטחים עגולים של האבן מאפשרים תזוזה של האבן, וכוחות החיכוך שלהם נמוכים מאשר פאות של אבנים ריבועיות. ככל שהאבן תהיה מדורגת יותר תתקבל מסה אחידה הפחות רגישה לארוזיה. היחס בין אורך ורוחב האבן הוא כדלקמן: לא יותר מ 30% מהאבנים מקיימים יחס של 2.5 בין האורך לרוחב, לא יותר מ 15% מהאבנים מקיימים יחס של 3 בין האורך לרוחב, ולא יתקיים יחס העולה על 3.5 בין האורך והרוחב.

2. היחס בין גודל האבן ומשקלה: יכולת הריפ רפ להיות עמיד בפני ארוזיה, קשורה בגודל ובמשקל האבנים. יחס זה נאמד לפי הנוסחה:

$$D_{50} = 100 * \left( \frac{6w}{\pi * \gamma_s} \right)^{\frac{1}{3}}$$

כאשר:

$D_{50}$  = קוטר ממוצע של האבן (ס"מ).

$W$  = משקל האבן (ק"ג)

$\gamma_s$  = משקל סגולי של האבן = 2650 (ק"ג/מ<sup>3</sup>).

3. משקל יחידת אבן: המשקל המרחבי במצב יבש של יחידת אבן נע לרוב בין 60 ל 70 ק"ג/מ<sup>3</sup>. אבן ריפ רפ לרוב רגישה למשקל זה ויש לדייק בכך ככל הניתן. ראה נספח מס' 1 איור מס' נ1.

4. דירוג האבן: דירוג אבן בשריון גדות בריפ רפ משפיע על עמידות הריפ רפ בארוזיה. מפרט האבן צריך לעמוד בטווח רצוי, בהתאם לסוג הזרימות אליהן הוא מתוכנן. גבולות הטווח מסומן במשקל וגודל  $D_{30}(\min)$ ,  $D_{100}(\max)$ ,  $W_{50}(\min)$ , וכי. כאשר  $D$  מסמל גודל ו  $W$  מסמל משקל. המספר מסמל אחוז משקלי וה-  $\max$ ,  $\min$  מסמלים גבולות עליונים ותחתונים של הטווח. ראה טבלאות בנספח מס' 1 טבלה מס' נ1.

ככל שתהיה יותר הקפדה על כללי הדירוג, מחיר אבן הריפ רפ יעלה. נמצא כי המגבלה לעבודה באבן ריפ רפ תהיה כאשר דירוג האבן לא יעלה על  $7 * D_{85} / D_{15}$ . יש כמובן מאפיינים נוספים אליהם יש לשים לב:

- איכות האבן, כלומר עמידות בתנאי שירות.
- עלות לטון במחצבה, יש לבדוק האם המחצבה יכולה לספק את האבן הדרושה.
- מספר הטונות הדרושות.
- מרחק נסיעה.
- עלות הובלה.
- עלות הנחת האבן.

- עלות פיקוח על העבודה, נוח יותר להבטיח כיסוי שווה בדירוג צר מאשר בדירוג רחב.
- בדיקה האם נדרש פילטר אבן/גיאוטכני בנוסף.

5. עובי השכבה: כל האבנים צריכים להיות מוכלות באופן סביר בתוך שכבת הריפ רפ כדי לייצר את ההגנה המירבית מפני כוחות ארוזיביים. אבנים בגודל בולט, אפילו בנקודות בודדות יכולות לגרום לקריסת המתקן עקב מניעת התמיכה ההדדית בין האבנים ונעילת האבנים האחת עם השניה, יצירת חללים גדולים בין האבנים וחשיפת הפילטר או המצעים ויצירת טורבולנציה מקומית המסיעה את החומרים הדקים והאבנים הקטנות משם וכתוצאה מכך נהרסת התשתית עליה מונח הריפ רפ. עובי שכבת האבן צריך להיות גדול מקוטר האבנים הגדולות ביותר או לפחות 1.5 פעמים מהמשקל המרחבי הממוצע. בחלקים בהם הריפ רפ מונח מתחת למים יש לעבות את שכבת האבן ב- 50%.

## ב. מאפייני האפיק

1. שיפועי דופן: עמידות ציפוי הגדות בריפ רפ מושפע ע"י תלילות שיפוי הדופן של חתך הזרימה. לא רצוי ששיפועי הדופן יהיו תלולים מ 1 לגובה על 1.5 לרוחב. במקרים מיוחדים בהם יש הכרח בשיפועי דופן התלולים מזה, יש לסדר ידנית את האבנים והשימוש יהיה באבנים גדולות יותר המקובעות טוב יותר אל הגדה. מטעמי יציבות, שיפועי הדופן המומלצים לעבודה בריפ רפ לא יהיו תלולים מ- 1: 2 או 1: 3. כאשר שיפוע הדופן תלול משיפוע שכבת הריפ רפ, יש להשתמש באבנים גדולות יותר. שינוי מהיר של מפלס המים וכן זרימת מים תת קרקעית דרך הדופן (פייפינג) יכולים לגרות לבעיות יציבות של הגדה וקריסתה. נושא זה יש לנתח בנפרד כבעיית יציבות.
2. חספוס האפיק: כוחות הגזירה ומהירויות הזרימה תלויות בחספוס האפיק, צורתו, יישורו. בשל כך, יש לקחת בחשבון מאפיינים אלו בקביעת גודל האבן הדרושה לייצוב בריפ רפ. מקדמי המאנינג המקובלים לחישוב הם בין 0.033 לבין 0.043 (ע"פ U.S. Army Corps of Engineers, 1990).
3. עקמומיות האפיק: בפיתולים, מהירויות הזרימה וכוחות הגזירה המופעלים על הגדה גדולים יותר (על גדה אחת) יותר מאשר המהירות הממוצעת בחתך בהבדלים של עשרות אחוזים.

### 7.1.2 ציפוי אבן בבוהן הגדה

ייצוב אורכי באבן של בוהן הגדה נועד למניעת קריסת הגדה עקב חתירות בחלק התחתון של הגדה. קטע זה של האפיק הוא רגיש ביותר לחתירות ויש לטפל בו בתשומת לב. בכדי להגן על בוהן הגדה מצפים באבן בין 1/3 ועד ל 2/3 התחתונים של הגדה. הנחת היסוד בשריון בוהן הגדה טוענת כי כאשר בוהן הגדה מיוצבת, החתירה בחלק העליון של הגדה תימשך עד להשגת שיפוע דופן יציב. ההשלמה של יציבות הדופן תושג ע"י צמחייה שתכסה ותשריין את הגדה. שיטה זאת יעילה במיוחד בנחלים בהם הגדה יציבה יחסית (כתוצאה מצמחייה, חומר בעל קוהזיה, מהירויות זרימה נמוכות) וניתן לעצור את הארוזיה ע"י הגנה על בוהן הגדה. סוג זה של ישום מתאים במיוחד לנחלים קטנים ובינוניים. קיימת חשיבות לכך שגובה השריון באבן לא יוצף בתדירויות גבוהות, כך שמרבית הזרימות הקטנות והבינוניות יזרמו בגובה שריון האבן (איור מס' 25).



א



ב

**איור מס' 25: קטע מיוצב באבן בבוהן התעלה מייד לאחר ביצוע (א) ולאחר שנה (ב)**

**יתרונות:** חסכון בחומר ובעבודות, השיטה מאפשרת לצמחייה לכסות ולהגן על הגדה. ניתן לתחזק את הגדה עד החלק המיוצב באבן.

**חסרונות:** שיטה זאת מגינה רק על החלק התחתון של הגדה ואינה מונעת נזקים בחלקים העליונים של הגדה. קטעים אלו חשופים לארוזיה של זרימות ממושכות, אירועי נגר עם זרימות מהירות במיוחד בתקופה של התייצבות הגדה מבחינת צמחייה. קיים קושי רב בתחזוקת האפיק באזור הבוהן. **שיקולי תכנון:** ברוב המקרים התכנון יהיה כמשולש במשקל של 3 עד 6 טון אבן למטר אורך. גובה השריון ינוע בין 1 ל 1.5 מטר מעל הקרקעית. כחלק בלתי נפרד מעבודות האבן יש לשמר ככל שניתן את הצמחייה המקומית בחלקים העליונים של הגדה. (ניתן להסיר את השכבה העליונה של פני הקרקע ולפזרה בשנית בתום העבודות ההנדסיות). במעלה ובמורד השריון באבן יש להטמיע את האבן אל תוך הקרקע בכדי למנוע איגוף של המים מאחורי האבן.

### **7.1.3 ציפוי באבן בנויה ביבש**

דרך מקובלת להגברת יציבות ציפוי הגדות באבן היא ע"י בניה וסידור ידני של האבנים ללא בטון בין האבנים (יבש). בשיטה זאת מקבלים משטח חלק ויציב יחסית לאבן ריפ. גם בשיטה זאת יש לבנות פילטר המונע יציאת חומרי מצע מדופן הגדה (ראה פרק 7.1.6).

**יתרונות:** בשיטה זאת ציפוי האבן מספק הגנה יציבה על הגדות, מקדמי המאנינג של התעלה נמוכים יותר ( $n \sim 0.02-0.025$ ), מהירויות הזרימה גבוהות יותר לחתך הנתון, קל יותר בתחזוקה. התוצאה היישומית של שיטה זאת נותנת תוצאה אסתטית מרשימה.

**חסרונות:** שיטת ישום זאת היא עתירת עבודת כפיים ומקצועית יותר, כתוצאה מכך היא יקרה יותר. האבן הנדרשת לעבודה היא בעלת פאות ישרות המאפשרת עבודה נוחה יותר ותוצאה יציבה יותר אך עלותה יקרה יותר.

**שיקולי תכנון:** לפי כינורי (1967), את ציפוי האבן יש לבנות לפי כללי בניה מקובלים, כלומר יש למנוע פגישת תפר בשורה אחת עם תפר בשורה שניה. האבנים אינן מסותתות לצורה גיאומטרית כלשהי, אך חודים בולטים, אשר עלולים להפריע לקשר טוב יש לקצץ בפטיש. במידה והאבן רחבה יותר בצד אחד וצרה יותר בצד השני, יש להניחן כך שהצד הצר יהיה מופנה כלפי מטה (ראה ציור מס' 26).



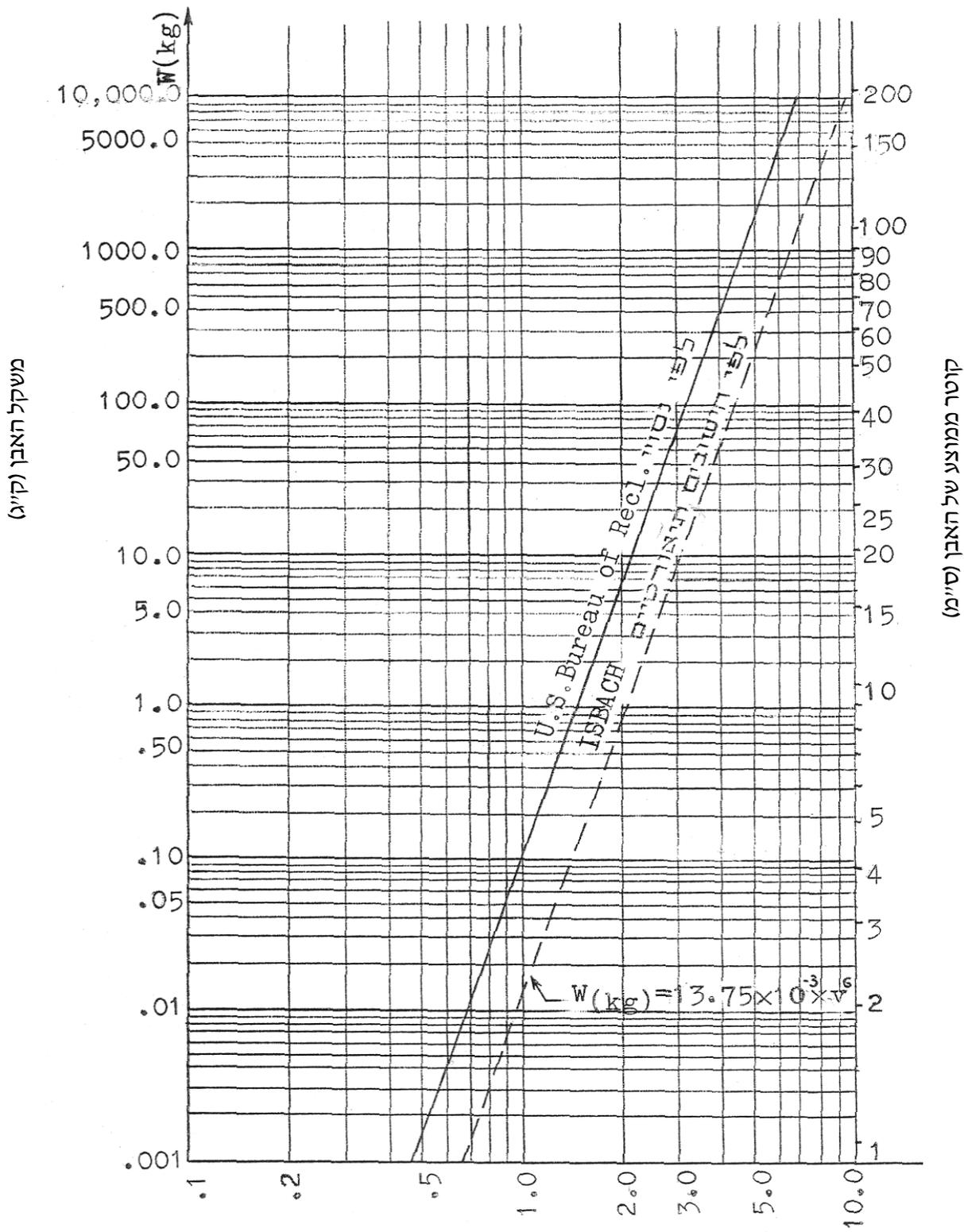
נכון



לא נכון

**ציור מס' 26: צורת הנחת אבנים בציפוי תעלות ביבש.**

האבנים צריכות להיות לחוצות היטב זו לזו. יש לעבד את האבנים כך שלא יישארו חללים ביניהן העולים על 3-4 ס"מ. הזוויות בפינות האבנים המסותתות צריכות להיות גדולות מ  $90^{\circ}$ . את הריצוף יש לבנות בשכבה אחת בלבד, אלא אם יש צורך בשכבת מסננת תחת הריצוף. משרד הפיתוח האמריקאי (U.S. Bureau of Reclamation) פרסם דיאגרמה ממנה ניתן להבין את היחסים בין קוטר האבן הממוצעת מהירות הזרימה הפוגעת באבן ומשקל האבן (איור מס' 27).



משקל האבן (ק"ג)

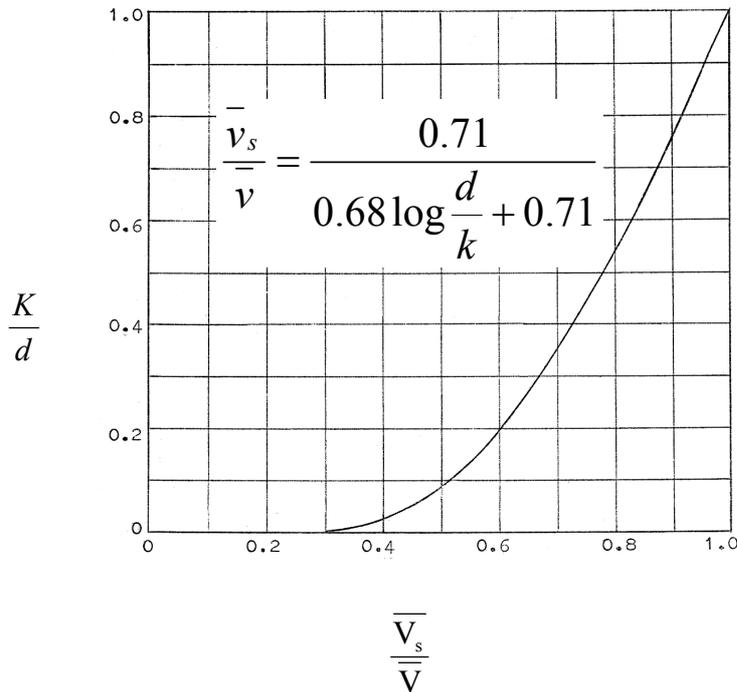
קוטר ממוצע של האבן (ס"מ)

מהירות הזרימה הפוגעת באבן (מ"/שנ')

איור מס' 27: הקשר בין קוטר האבן הממוצע, מהירות הזרימה הפוגעת באבן ומשקלה.

ע"פ U.S. Bureau of Reclamation

כדי לחשב את המהירות הפוגעת באבן ניתן להיעזר באיור מס' 28 ממנה ניתן להוציא את הקשר בין המהירות הממוצעת בחתך הזרימה, המהירות הממוצעת המופעלת על האבן, קוטר האבן ועומק הזרימה.



איור מס' 28: הקשר בין יחס המהירות הממוצעת נגד האבן למהירות הממוצעת בתעלה לבין היחס בין קוטר האבן לעומק המים.

כאשר :

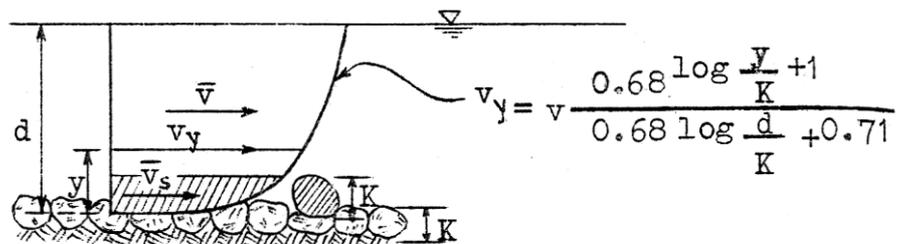
$\bar{V}_s$  - מהירות ממוצעת נגד האבן (מ"שני).

$\bar{V}$  - מהירות ממוצעת בחתך התעלה (מ"שני).

d - עומק המים (מ).

K - קוטר האבן (מ).

לקבלת היחס כללי בין מהירות הזרימה בכל גובה שהוא בתעלה לבין מהירות הזרימה הממוצעת בתעלה ניתן להיעזר באיור מס' 29.



איור מס' 29: היחס בין מהירות הזרימה בכל גובה שהוא לבין מהירות הזרימה הממוצעת בתעלה.

כאשר :

$y$  - גובה המים בנקודת הבדיקה (מ').

$\bar{V}_y$  - מהירות המים בגובה הבדיקה (מ'/שני).

#### **7.1.4 ציפוי באבן בנויה ברטוב**

שיטה זאת דומה לאבן הבנויה ביבש, אלא שכאן עדיף שימוש באבן גיאומטרית על מנת להבטיח התקשרות טובה בין האבנים. יש להשאיר פתחים לניקוז מים מהגדות. יתרונות: בשיטה זאת ציפוי האבן מספק הגנה יציבה יותר על הגדות, מקדמי המאנינג של התעלה נמוכים עוד יותר מאשר הבניה ביבש, מהירויות הזרימה גבוהות יותר לחתך הנתון, קל יותר בתחזוקה. ניתן להשתמש באבנים הקטנות ב 40% מהאבן הדרושה לבניה ביבש. חסרונות: דומים לציפוי אבן ביבש. שיקולי תכנון: דומים לציפוי אבן ביבש. בשל העובדה כי ציפוי זה הינו אטים למים יש חשיבות בהנחת פתחי ניקוז לשחרור לחצים הידרוסטאטיים.

#### **7.1.5 אבן שכבות בנויה**

בשיטה זאת משתמשים באבן שכבות גדולה, מסותת היושבת על פילטר גיאוטכני הפרוס על הגדה ומעליו אבן בקלש כמדרג מתחת למשטח. פתרון יישומי זה מספק הגנה טובה ויעילה על הגדה במקומות בהם מהירויות ונפחי הזרימה גבוהים. קיימת חשיבות רבה לבניית תשתית מתאימה למבנה זה. לאחר הנחת האבנים הגדולות, יש לסגור החריצים באבנים קטנות יותר להקטנת בעיות טורבולנציה מקומית העלולה לשאוב חומרי מצע מהתשתית. שיטה זאת יושמה בהצלחה יתרה במספר אתרים ברחבי רשות הניקוז שרון, חוף הכרמל וירקון.



**בניה באבן שכבות - נחל אלכסנדר, קטע אלישיב.**



**בניה באבן שכבות - נחל שכם, קטע כביש 6. איור מס' 30: דוגמאות לבניה באבן שכבות.**

יתרונות: השיטה מספקת הגנה יעילה על הגדה גם במהירויות זרימה גבוהות. אבן השכבות מהווה פיתרון הנדסי בעל חזות מרשימה ומתאימה בשימוש באתרים בהם החשיבות נופית מהווה שיקול נכבד. דרישות תחזוקה מינימאליות.

חסרונות: לרוב, השיטה יקרה. הדבר קשור במרחק מהמחצבה ממנה מייבאים את חומר הגלם. היישום דורש מיומנות גבוהה במיוחד. יישום לא מקצועי עלול לערער את המבנה כולו.

שיקולי תכנון: העבודה מבוצעת באמצעות כלים הנדסיים כבדים. את האבן התחתונה מניחים אל תוך הקרקעית והיא מהווה יסוד לכל קיר ההגנה. רצוי כי האבנים תהיינה בעלות פאות ישרות משתי צידן.

### 7.1.6 אבן בולדר בנויה

השיטה זהה לבניה באבן שכבות, אלא שאבני הבולדר אינן מגיעות בגודל אחיד, מה שמחייב עבודה מקצועית בסידור האבנים כך שלא יתמוטטו.

יתרונות: דומים לבניה באבן שכבות. באתרים רבים ניתן למצוא אבן מתאימה, עובדה המוזילה משמעותית את עלות הפרוייקט (איור מס' 31א'), חזות הפרוייקט יכולה להשתלב בסביבה (איור 31ב').  
חסרונות: דומים לבניה באבן שכבות.



איור מס' 31: יצוב באבן בולדר מקומית, נחל דגה (א), יצוב באבן בולדר-השתלבות בסביבה, נחל שניר (ב).

### 7.1.7 מסננת אבן כמצע

בציפוי תעלות באמצעים חדירים למים קיימת סכנה של שטיפת חומרים דקים מתשתית גדות ואפיק התעלה. שטיפת החומרים יכולה להוות איום על יציבות המבנה ויש ליצור מסננת המונעת תהליך זה. כיום קיים שימוש נרחב בפילטר גיאוטכני עשוי בד לא ארוג המאפשר יציאת מים מהגדה אל חתך הזרימה אך מונע הסעת חומרי תשתית מהגדה אל האפיק. פילטר גיאוטכני זה מיושם במרבית ציפויי התעלה הקיימים כיום.

בשימוש באבן כאמצעי הגנה על הגדות והאפיק יש ליצור מסננת אבן מדורגת (בקלש) המשמשת גם כמצע נוח ליישום ציפוי האבן.

יישום מסננת האבן תהיה שונה בין סוגי הקרקעות השונים:

**1. מסננת על גבי אדמה לא קשירה**: כאשר ציפוי האבן מונח על גבי אדמה לא קשירה (בעיקר חול דק) יכול להיווצר מצב של שטיפת גרגרי קרקע מתחת הציפוי ולקריסת הציפוי עקב כך. יש להשתמש בשכבת מצע של חומר גרגרי מדורג שיימנע יציאת גרגרי קרקע אך יאפשר יציאת מים מהתשתית אל האפיק. כינורי (1967) מביא קריטריונים מומלצים לבחינת החומר התשתית של האפיק ובהתאם חומר המצע המדורג בו יש להשתמש:

$$\frac{D_{15,f}}{D_{15,b}} = a ; \quad 5 < a < 40$$

$$\frac{D_{15,f}}{D_{85,b}} = b ; \quad b < 5$$

$$\frac{D_{85,f}}{M} = c ; \quad c \geq 5$$

כאשר :

$D_{15,f}$  = קוטר הגרגיר במסננת, ממנו 15% של כלל הגרגרים קטן יותר.

$D_{15,b}$  = קוטר הגרגיר בחומר המסונן, ממנו 15% של כלל הגרגרים קטן יותר.

$D_{85,f}$  = קוטר הגרגיר במסננת, ממנו 85% של כלל הגרגרים קטן יותר.

$D_{85,b}$  = קוטר הגרגיר בחומר המסונן, ממנו 85% של כלל הגרגרים קטן יותר.

$M$  = המידה הגדולה ביותר של הפתח בין אבני הציפוי, או כל פתח אחר דרכו יש למנוע את תנועת

גרגרי העפר.

עקום האנליזה המכאנית של המסננת צריך להיות באופן כללי מקביל לעקום של החומר המסונן (העפר בו התעלה חפורה). לפיכך, לצורך תכנון נכון של המסננת יש להכין אנליזה מכאנית של חומר זה.

ראה איור מס' 32.



**2. מסננת על גבי קרקעות קוהזיביות:** הקריטריונים לתכנון מסננת לאדמות הלא קשירות מבוססים על גודל גרגיר ואינם מתאימים לתכנון מסננת באדמות קוהזיביות (לדוגמא חרסית), בשל העובדה שהחורים יהיו קטנים מדי והמסננת תהיה אטימה. כמו כן לחרסית יש חוזק לגזירה המקשה על שטיפת העפר אל תוך המסננת.

על כן השימוש המומלץ הינו של שכבות חומרים גסים יותר כגון: גרגיר סומסום במגע עם החרסית ומעליו עדשית גדולה או פולית קטנה בשכבות של 10 ס"מ.

**3. מצע לא מדורג:** במקרים בהם אין חשש של תנועת מים מהקרקע אל התעלה, הסיכוי של גריפת חומרי המצע קטן. אך תהליכי הייבוש וההרטבה של הקרקע ממנה עשויה תשתית האפיק עשויה להביא לכשל הציפוי בשל התנועות החוזרות ונישנות שלו. במקרים כאלו רצוי להניח מצע של חומר גרנולרי (חול גס, חצץ דק או צרורות קטנים) בעובי שכבה של 10-15 ס"מ מתחת לציפוי ללא כל דירוג. תפקיד המסננת הינו לספוג את הזעזועים של תהליכי הייבוש וההרטבה ולהפחית את העומסים על הציפוי עצמו.

#### **7.1.7 בד גיאוטכני**

הבד הגיאוטכני בא לתת מענה על בעיות טכניות הקשורות ביישום פילטר אבן (בקלש) מתחת לאמצעי ייצוב. הוא מיועד למנוע יציאת חומרים דקים מתחת לאמצעי הייצוב תוך מתן אפשרות ניקוז המים מהגדה אל האפיק. ניתן לבחור ולהתאים בד גיאוטכני מהסוג הרצוי באתר העבודה ע"פ גודל הגרגיר של הקרקע ולפי חוזק למתיחה אליו הבד נדרש. קיימים בדים ארוגים ובדים לא ארוגים כשהשוני ביניהם הוא שבד לא ארוג נמתח בצורה שווה בכל צידיו ואילו בד ארוג הוא בעל כושר מתיחה יותר גדול בצד אחד. בפרק 4 בנספחים ניתן למצוא נתונים טכניים על סוגים שונים של בדים גיאוטכניים והמלצות יצרן ליישומם.

**יתרונות:** מייעל משמעותית את העבודה, נוח ביישום, אינו דורש כלים הנדסיים כבדים, ניתן להתאמה לגודל הגרגיר של הקרקע באתר, ניתן להתאמה למאמצי המתיחה אליהם הבד נדרש, קיימים בדים בעלי אורך חיים ארוך.

**חסרונות:** הבד מהווה גוף זר בקרקע, קיימת בעיית תפר בין היריעות, ביישום ישיר של אמצעי הייצוב על הבד קיימת סכנה של קריעת הבד, קיימים בשוק סוגי בדים מתכלים שלאחר תקופת זמן מתכלים בקרקע ומאפשרים לדקים לצאת מתחת אמצעי הייצוב.

#### **7.2 ציפוי קשיח**

בפרק זה נסקרות מספר שיטות לציפוי קשיח של הגדה. ציפוי קשיח הינו חומר המיושם על הגדות והנועד לתת הגנה בפני ארוזיה ללא כל גמישות והשתנות עקב שינויים באפיק או בגדה (התרחבות והתכווצות וכו'). מרבית הגישות של הציפוי הקשיח קשורות בבטונים וההבדלים ביניהם הם בשיטת הזיון או הקשירה בין קטעי הציפוי השונים.

**יתרונות:** שיטת הייצוב הקשיח מספקת הגנה יעילה על הגדות גם במהירויות גבוהות במיוחד, החספוס ההידרולי נמוך, ונמנעת אינפלטרציה אל הגדה. לרוב ציפויים אלה חסינים לכשל עקב מפגעי אדם (נסיעת כלי רכב על הגדה, סחופת, קורוזיה וכו').

**חסרונות:** ציפוי קשיח מחייב תכנון הנדסי קפדני וכן בקרת איכות גבוהה. מחירם ברוב המקרים יקר יותר משיטות אחרות. יישום בתנאים רטובים מתאפשר רק בעזרת יריעות גיאוטכניות מיוחדות. במקרים

רבים התוצאה הסופית אינה משתלבת בסביבתה באופן טבעי ונדרש מאמץ נוסף בכדי להטמיע את הציפוי בסביבה. קיימת בעיית עם התפיחה וההתכווצות של הקרקע באדמות חרסיתיות. יישום טיפוס: הציפוי הקשיח מיועד לאתרים בהם אבן הריפ רפ, הייצוב בצומח או פתרונות אחרים לא יעמדו ביעילות במהירויות התכן או במוקדי טורבולנציה מקומיים, או שיהיו יקרים מדי ליישום. הציפוי הקשיח מיושם נקודתית בסביבת מתקנים הידרוליים או באתרים בהם יש צורך מוגבר להגן על הגדה (עמודי חשמל, צנרת וכו'), או כאשר הדפנות תלולות מאוד ולא ניתן להרחיב את האפיק בכדי ליצור גדות מתונות יותר.

שיקולי תכנון: תשומת לב מרבית ליציבות הגיאוטכנית של הגדה. יש לוודא כי נושא הניקוז העילי מטופל ואין כניסות מים מעל כתף הגדה וכן הניקוז התת קרקעי מטופל ע"י נקזים המיושמים בציפוי עצמו. הציפוי חייב לרדת אל תוך הקרקעית ולעיתים אף יש לצפות את הקרקעית עצמה. גריעת חומר מתחת לציפוי הקשיח תגרות לקריסתו בסופו של דבר.

הציפוי הקשיח הנפוץ ביותר הינו ציפוי בבטון. הבטון מיושם במספר גישות עקרוניות:

1. יריעות של כוורות פוליאטילן הנפרשות על הגדה ועליהן מוזרק בטון.
2. רשתות ברזל הנפרשות על הגדה עליהן מוזרק בטון והן מהוות זיון לבטון.
3. בניית קירות אבן המטובעת בבטון.

### **7.2.1 כוורות פוליאטילן מוזרקות בטון**

שיטת ציפוי הדופן בכוורות פוליאטילן מוזרקות בטון הינה שיטה נפוצה מאוד בארץ. היא משמשת כאמצעי יעיל לייצוב מדרונות, מניעת גלישה שכבתית ולמניעת ארוזיה בגדות נחלים. הכוורות מיושמות על גדות הנחל כאמצעי עזר לציפוי הדפנות בבטון. תפקיד הכוורות למנוע גלישת הבטון אל תחתית המדרון. קיימות גם כוורות מחוררות המאפשרות קשר בטוני בין התאים השונים וכן קיימת אופציה לזיון הבטון בברזל.

יתרונות: הכוורות מיושמות בישראל כבר כמה שנים במספר רב של אתרים בהצלחה יתרה. ניתן לקבל תוצאה יעילה בזמן קצר ביותר. הכוורות נוחות להובלה (הן מגיעות מקופלות ונפרשות באתר העבודה), ניתן לשלוט על הגימור הסופי של הבטון (מידת החספוס, גודל האגרנט והצבע ע"י פיגמנט). ניתן לשלוט במקדמי המאנינג ע"פ הגימור הסופי ואופי החלקת הבטון.

בשל העובדה שכוורות הבטון עשויה תאים בדידים יש לה גמישות מסוימת היכולה לסבול שינויים בקרקע ברמה מסוימת. ניתן להחסיר תאים בודדים ולשתול בהם צמחייה המתאימה לכיסוי והשתלבות המתקן בסביבה (איור מס' 33 א').

חסרונות: הכוורות כציפוי קשיח רגישות להתכווצות ולתפיחה בקרקע, שבר של מספר תאים יכול ליצור אזור ממנו נשאבים חלקיקי קרקע מתחת לציפוי ולהוביל לקריסתו. קיימת בעיית אסתטיות. יש חשיבות רבה להגן על הציפוי מפני זרימות צד המסוגלות לגרוף חומר מתחת למתקן (איור מס' 33 ב').

שיקולי תכנון: מספר יצרנים מייצרים את כוורות הפוליאטילן ולכל יצרן יש את דרישות ההתקנה הספציפיות שלו. אם זאת, באופן כללי ניתן לומר כי: כוורות הפוליאטילן מגיעות במספר גבהים, יש לקבוע את הגובה בהתאם לחוזק הדרוש מהמתקן כנגד כוחות השבר של תנועת הקרקע וכנגד הכוחות ההידרוליים המופעלים על המתקן בעוצמה רבה. ביישום כוורות פוליאטילן יש לבחון מס' הדגשים:

- 1) על הכוורות לעמוד בתקן מבדקה מורשה.

- (2) יש לדרוש מספר תאים למ"ר בהתאם להוראות היצרן ובהתאם למפרט המתכנן.
- (3) הכוורות יהיו עמידות בפני קרינת U.V.
- (4) יש לבחון שימוש ביריעות בד גיאוטכני בעל משקל מרחבי מתאים בהתאם להוראות התכנון והקרקע. יש לפרוס הבד בחפיפה של לפחות 30 ס"מ בין היריעות השונות.
- (5) הכנת שטח הגדה עליה מיושמות הכוורות יהיה חלק ומיושר בשיפוע ובגובה הסופי לפריסה (לאחר הפחתה של גובה הכוורות).
- (6) בכתף התעלה יש ליצור עוגן של הכוורות עם יתדות אל תוך השתיית בהתאם להוראות היצרן.
- (7) הכוורות נפרסות ונמתחות בעזרת יתדות.
- (8) מילוי הכוורות בבטון יהיה לפי הוראות יצרן, ניתן ליישם הבטון ישירות ממערבל הבטון, או ע"י משאבה או ע"י פיזור ידני בעזרת מגרפות. יש לקחת בחשבון שקיעה של כ 5 ס"מ. גובה הבטון ימולא ויוחלק לרום הכוורות.
- (9) יש לפתוח פתחי ניקוז לשחרור לחצים הידרוסטטיים.
- (10) מקדמי המאנינג לתכנון קשורים באופי גימור הבטון ונעים סביב 0.012 - 0.019 (לפי נתוני יצרן).



ב



א

איור מס' 33: שילוב צמחייה בכוורות (א), כשל של כוורות פוליאתילן כתוצאה מזרימות צד (ב)

## **7.2.2 רשתות ברזל מוזרקות בטון**

רשתות הברזל מוזרקות הבטון מהוות תבנית ברזל מרחבית המשמשת ככלוב ליציקת ולזיון קונסטרוקטיבי של בטון. הרשתות עשויות ברזל מגולוון ללא נקודות ריתוך. הרשתות מגיעות במספר גבהים בהתאם לצורך הנקבע בתכנון.

**יתרונות:** הרשת יוצרת מרחב תלת ממדי אחיד הקשור לכל אורכו ללא קווי תפר. הרשת עצמה מהווה זיון למשטח הבטון ואין צורך בזיון נוסף. ניתן ליישום בדפנות תלולות במיוחד (תלול מ 2: 1) בהתזה או ביציקה רגילה בדפנות מתונות יותר. היישום הוא פשוט ונוח, מה שמאפשר עבודה מהירה ויעילה. לפי הוראות יצרן אין חובה בשימוש ביריעות גיאוטכניות. בשל גיליון הברזל ניתן להסתפק ב כסוי בטון של 2 ס"מ.

**חסרונות:** יישום לא נכון של הבטון יכול ליצור כיסי אויר בתוך הרשתות. בשל קשיחות המתקן הוא סובל מהבעיות של ציפוי קשיח שהוזכרו בפרק 7.2.

**יישום טיפוסי:** הרשתות מיועדות לציפוי גדות עם דפנות תלולות, מגלשי מים מכבישים, איטום קרקעות למים וייצוב מקומי של מתקנים הידרוליים בנחל.

ניתן לשלוט על הגימור הסופי של הבטון (מידת החספוס, גודל האגרנט והצבע ע"י פיגמנט). ניתן לשלוט במקדמי המאנינג ע"פ הגימור הסופי ואופי החלקת הבטון. גודל האגרנט בבטון מוגבל ל"1.

**שיקולי תכנון:** השטח המיועד לציפוי חייב להיות מפולס ומיושר כדי שהרשת תוכל להיצמד אליו. יש ליצור חפיפה בין החלקים המחוברים כ-4 ס"מ לאורך וכ-15 ס"מ לרוחב. באתרים בהם יש צורך לנקז את הגדות יש להחדיר צינורות ניקוז בקוטר 2" – 5", באורך כפול מעובי שכבת הבטון אל תוך הרשת בעת יישום הבטון. ברשתות בעובי 4 ס"מ, עובי שכבת הבטון תהיה 8 ס"מ. ברשתות בעובי 8 ס"מ, עובי שכבת הבטון תהיה בין 12 ל 15 ס"מ.

מקדמי החספוס של מאנינג ינועו בין 0.012 ל 0.017 תלוי בגימור הבטון וגודל האגרנט.

### **7.2.3 צפוי תעלות בבטון**

ציפוי תעלות בבטון מיושם לרוב בתעלות עירוניות בהן יש צורך בהעברה מהירה של הזרימות במקדמי חיכוך נמוכים מאוד. לרוב, שטח החתך מוגבל, ובמקרים רבים עובדה זאת מחייבת תכנון של קירות אנכיים (נחל דליה, נחל בית העמק) או ציפוי בטון עם אבן בשיפועים מתונים יותר.

**יתרונות:** ניצולת העברת הספיקות היא היעילה ביותר בדפנות אנכיות, הבטון הוא חלק יחסית ומתקבלים ערכי מאנינג נמוכים ביותר 0.13-0.17 תלוי בגימור הסופי של הבטון.

החוזק המכאני של הקירות הוא גבוה ביותר (תלוי בעובי הקיר וזיון הברזל). ניתן לתחזק בקלות יחסית.

**חסרונות:** יקר, מפגע אסתטי, אין נגישות לציבור אל הנחל.

**שיקולי תכנון:** שיקולי התכנון של הבטון הם מעבר ליעודו של מדריך זה, קיימים מספר מאפיינים אליהם יש לשים לב בתכנון ובביצוע: יחסי מים צמנט כאלו שיתנו עבירות פלסטית של הבטון (יש לערוך ניסוי מקדים של החומר הרצוי) למניעת נזילת הבטון במדרון. גודל האגרנט צריך להיות קטן מחצי עובי הציפוי בהפחתת עובי ברזל הזיון.

זיון הבטון מתחייב כאשר על ציפוי הבטון פועלים כוחות חיצוניים כגון: כוחות עילוי, לחצים הידרוסטאטיים משני צידי הציפוי, לחצי הקרקע (כאשר שיפוע דפנות התעלה תלול מזווית השפיכה הטבעית של הקרקע) או כאשר צפוי כי קיר זה יכול לשמש כלי רכב כמעבר אירי בנחל. חשוב שהברזל יהיה באמצע הבטון ולא יהיה חשוף.

בקיר הציפוי יש לשמור על תפרי התפשטות ויש להבחין בין בניית מבנים הידרוליים לבין קיר הציפוי גם אם הם סמוכים זה לזה. את תפרי ההתפשטות רצוי למלא בחומר גמיש. במקומות בהם העבודה נעשית בחלקים, יש ליצור קוצי ברזל מהיציקה הישנה בכדי ליצור התקשרות טובה עם היציקה החדשה. רצוי כי תפר העבודה יהיה גם תפר הפסקת עבודה (אם ניתן). יש ליצור גם תפרי התכווצות הגורמים להסתדקות הבטון (עקב תהליך הייבוש) במקומות ידועים וקבועים מראש.

במקומות בהם צפויים לחצים הידרוסטאטיים יש צורך לפתוח פתחים לשחרור הלחץ עם מסננת מודרגת מתחתם. בקרקעות בעלות מוליכות מים נמוכה (טין, חרסית) יש ליצור מצע של שכבה מוליכה מתחת לציפוי.

### **7.3 מזרונים גמישים**

גביונים ומזרוני אבן הינם תאי רשת מתכת המופרדים במחיצות, מחוברים זה לזה וממולאים באבן. המתקן מיועד בין השאר לציפוי, הגנה ולייצוב גדות תוך גמישות מסוימת, חדירות המתקן למים ובניית קיר כמקשה אחת. מזרוני האבן ניחנים באותן תכונות אך הגובה שלהם נמוך ביחס למאפייני השטח שלו. הגביונים ממולאים באבן באתר העבודה. רשתות הגביונים מגיעות מצופות PVC או מגולוונות. בנספח מס' 6 ניתן למצוא מפרטים לביצוע גביונים ומזרוני אבן.

**יתרונות:** הגביונים ומזרוני האבן מספקים הגנה יעילה על התעלה, הם חדירים למים כך שמתאפשר ניקוז הגדות אל התעלה, הם ניחנים בגמישות מסוימת המסוגלת לסבול התכווצות ותפיחה של הקרקע, סחף יכול לשקוע בין האבנים ולאפשר כיסוי בצומח של הגביונים.

**חסרונות:** החדירות למים עלולה לשטוף את החלקיקים הדקים מתחת למתקן ובכך לגרום לקריסתו, גמישות יתר יכולה להוות מגבלה, במקרים לא מעטים דווח על בעיות תחזוקה משום שכלים כבדים לא יכולים לעלות על הגביונים בשל רגישות תאי הברזל לקריעה, לעיתים המכסחות נתפסות בגדר הברזל וקורעת אותו, באפיקים בעלי סחף אבנוני במהירויות גבוהות (בעיקר בנחלי הדרום) הרשתות נקרעות וכל האבנים נשטפות מהגביונים. קיימת רגישות לקורוזיה בתעלות בהם יש שפכים תעשייתיים עם זיהום בחומרים קורוזיביים.

**שיקולי תכנון:** יישום בהתאם להוראות יצרן (נספח 6) בהתאם למגבלות שצוינו בחסרונות יכול להוות חלופה יעילה במיוחד בשילוב מתוכנן עם צמחייה.

## 8. גישות לא ישירות להגנה מפני אירוזיה

### כללי

פרק זה דן בגישות עבודה אשר אינן נפוצות מאוד בישראל. מעט עבודות ייצוב מסוג זה בוצעו בישראל ולפיכך רוב המידע בפרק זה מובא ממקורות חוץ ובעיקר ממדריך עבודה שנכתב בארה"ב - Biedenharn et al -1997.

העיקרון העומד בבסיס הגישות הלא ישירות להגנה מפני אירוזיה הוא עיקרון הפחתת מהירות הזרימה באזור הגדות. ע"י בניית מתקנים המשתרעים אל תוך חתך הזרימה מכוונים את הזרימה כך שהכוחות ההידראוליים המופעלים על הגדות יהיו ברמה לא אירוזיבית.

את הגישות הלא ישירות ניתן לחלק לשתי קבוצות עיקריות:

דייקים ומעקבים, כאשר שתי קבוצות אלו ניתנות לחלוקה משנית של אטימים וחדירים.

יתרונות: לרוב אין צורך בהכנה מוקדמת של הגדות. תכונה זאת מוזילה משמעותית את העלויות

הכרוכות בעבודה, מקטינה את הפגיעה בסביבה, העבודות הן בתחום הנחל (אין צורך באישורים מבעלי ענין נוספים), מבטלת טיפול בעודפי חומר ולרוב מאפשרת לקווי המיתאר של תעלות הניקוז מעבר לגדה להישאר כמו שהם. הקווים הגיאומטריים או מיתווה האפיק יכול להשתנות אם כי לא תמיד ניתן לכוון מראש את השינוי הצפוי.

הגישות העקיפות מעלות בד"כ את היציבות הגיאוטכנית של הגדות ע"י הפחתה של הסעת הסחף מבוהן התעלה, על אף שתהליך זה הינו תהליך איטי.

חסרונות: במקומות בהם בעית היציבות הגיאוטכנית של הגדות נובעת מניקוז של מים מעבר לגדות השיטה המוצעת אינה יעילה.

בשל השינויים המשמעותיים בקוי הזרם, גיאומטריית הנחל, החיספוס ומאפיינים הידראוליים נוספים היכולים להיות מושפעים משימוש במתקנים להגנה לא ישירה מפני אירוזיה, יש לנקוט במשנה זהירות ובמעקב אחר ההשפעה על מורפולוגית הנחל.

מאחר והמתקנים להגנה לא ישירה הינם מתקנים החודרים אל תוך הנחל, התשתית והקונסטרוקציה שלהם יכולה להיות מסובכת (במיוחד בתקופת הזרימות).

### 8.1 דייקים ומעכבים

דייקים מוגדרים כמערכת של מיבנים אינדבדואליים הבולטים אל תוך הנחל לרוב בניצב אל הזרימה. מעכבים מוגדרים כמבנה רציף המקביל לזרימה. הם יכולים להופיע כמבנה בודד, שניים או יותר הסמוכים או קשורים זה לזה.

יתרונות: דייקים ומעכבים יכולים לכוון ולשנות את האפיק אם פעולה זאת נדרשת. הם יכולים להיות מתאימים גם להגדלת או להתפתחות צמחייה מעוצה בגדות. במיקרים רבים ניתן להשתמש גם בחומר מקומי לבניית המתקנים, השימוש בדייקים ומעכבים מאפשרים שיתוף מספר רחב של מאפיינים סביבתיים כחלק מהמתקן. כתוצאה מכך ניתן להעשיר את הפאונה והפלורה המקומיים.

חסרונות: המתקנים הכוללים חומרים מתכלים או חיבורים מכאניים עשויים לעבור התבלות ולההרס ע"י הטבע או האדם.

קיבולת הנחל בזרימות גבוהות יורדת בתחילה מייד לאחר בניית המתקן, אלא שלרוב לאחר זמן מה יוצר אפיק עמוק יותר וצר יותר במרכז הזרימה תופעה המגדילה את יעילות הזרימה ויכולת העברת הספיקות בחתך הזרימה. אלא שלא תמיד ניתן לחזות את ההשפעות העתידיות של שינוי קווי הזרם לא במודלים

פיזיקליים ולא במודלים נומריים. לפיכך יש לנקוט במשנה זהירות בשימוש בשיטה זאת כאשר קיימת סכנה גדולה מהצפה באזור האפיק.

**שימושים טיפוסיים:** דייקים ומעכבים יכולים להיות מיושמים במגוון רחב של תנאים. אם כי השימוש הנפוץ ביותר הוא בנחלים בעלי אפיק רחב, זרימה נמוכה ובעלי הסעת חומר מתונה עד גבוהה של חומר מהקרקעית. זרימה נמוכה מקטינה את הצורך במתקנים גבוהים ורוחב גדול של האפיק מאפשר לנחל לשנות כיוון וגיאומטריה, ואספקה גבוהה של חומר נחל תאיץ את תהליך השינויים הרצויים. באתרים בהם יש צורך בהגנה ארוכת מרחק, כדי להזיל עלויות, מבצעים המתקנים באופן גדל כך שהשינוי יהיה הדרגתי.

השימוש בשיטות אלו מבוצע בנחלים רחבים בהם קיימת בעיית יציבות גדות ורוצים להרחיק את הזרימות המהירות מהדפנות בעיקולים במעלה או במורד הדופן המשורינת, שהם מוקדים בהם קיימת בעיית סחף (גריעה או אספקה).

דייקים ומעכבים יכולים להיות מיושמים באתרים בהם יש צורך בייצוב בצומח אך התנאים ההידרוליים אינם מאפשרים זאת. כתוצאה משינוי במשטר הסחף יוצרו אתרים מתאימים להתפתחות צמחייה שתתרום ליציבות הגדות, או שתתמוך בצמחייה בחלקים העליונים של הגדה. אין מפרט מוגדר של בניית דייקים או מעכבים אם כי התכנון והיישום נכתבו על סמך נסיון ומודלים שנכתבו ע"י (Brown, 1985) וע"י צבא ארה"ב (USACE, 1981). בתכנון דייקים ומעקבים יש לעבוד לפי מספר עקרונות עיקריים:

- א) יש לשים לב לחשיבות התנאים ההידרוליים והגיאומורפולוגיים המתקיימים בנחל. הקפדה על פרטי המיתקן ההנדסי תהיה חסרת חשיבות ללא התייחסות נאותה לתנאים הסביבתיים של המיתקן.
- ב) פשטות צריכה להיות מטרה תכנונית. עיקרון זה מוביל בתכנון הנדסי בכלל ובתכנון דייקים ומעקבים בפרט. ככלל, עדיף לתכנן מתקן בו מיושמים מספר המרכיבים והחיבורים המכאניים המינימליים ההכרחיים. עיקרון זה מוזיל המתקן והופכו לעמיד יותר.
- ג) בתכנון המתקן יש להשתמש בחומרים פשוטים וזמינים לביצוע.
- ד) יש לשאוף לבצע מתקנים אלו בעונה היבשה. בנחלים בהם קיימת זרימה כל השנה, יש לבחון שימוש באמצעים טרומיים.

### **8.1.1 דייקים**

**יתרונות:** היתרונות של הדייקים ביחס למעכבים הם שלרוב הם יהיו זולים יותר ממעכבים עבור אותו מצב. לאחר שהנחל "מאמץ" את המצב הראשוני שנוצר עקב בניית המתקן, ניתן להגדיל את הדייק עוד לתוך הנחל אם זה נחוץ בכדי להשיג את מטרת לשמן יושם המתקן.

**חסרונות:** החסרונות של הדייקים ביחס למעכבים הם שלרוב הם יהיו יעילים פחות מהמעכבים במניעת אירוזיה בגדות. דייקים יותר פגיעים לסחופת צפה מאחר והם מיושמים בניצב לזרימה. בנוסף, אירוזיה בין מערכת הדייקים יכולה להיות חמורה יותר.

**יישומים טיפוסיים:** השימוש בדייקים נעשה לרוב באפיקים ישרים ובעיקולים בעלי רדיוס גדול מאחר ויישום בעיקולים ברדיוסים קטנים יחייבו דייקים רבים ליחידת אורך. ואפשר ותהיה שיטת הגנה אחרת יעילה וחסכונית יותר.

**שיקולים בתכנון** : שיקולי תכנון מעבר לשיקולים שהוזכרו בתחילת הפרק הינם מורכבים ביותר. למתכנן המעוניין במיפרטים יותר מדוייקים לתכנון מומלץ לקרוא את עבודתו של (Brown, 1985).  
 התכנון עוסק במספר מאפיינים עיקריים :

- (א) חדירות.
- (ב) אורך.
- (ג) מרווחים.
- (ד) הזווית ביחס לזרימה.
- (ה) גובה הדייק.
- (ו) החיבור בין הגדה לדייק.
- (ז) תכנון ההגנה בפני גריפת חומר.

(א) החדירות מוגדרת כיחס בין השטח הפתוח בדייק לבין כלל שטח הדייק ולרוב מבטוא באחוזים. אם הנחל נושא כמות קטנה של רחופת (אשפה, עלים, ענפים וכו') או שהמתקן נמוך מספיק כך שרוב הזרימות חולפות מעליו, מידת החדירות יכולה להיחשב כ as maid. לעומת זאת אם קיימת רחופת במידה בינונית או גבוהה יש להפחית את מידת החדירות לאחר זמן תפעול מסוים. ה- FHWA (1985) מציע שכאשר נדרשת הפחתה משמעותית במהירות הזרימה, כמו למשל בעיקולים חדים, לא מומלץ שהחדירות תעלה על 35%. באתרים בהם נדרשת הפחתה מתונה יותר של מהירות הזרימה ניתן להעלות את מידת החדירות לכדי 50%. בנחלים בהם פוטנציאל האירוויביות נמוך וקווי הזרימה ישרים ניתן להעלות את מידת החדירות לכדי 80%. ה- (USACE, 1981) מציע שמידת החדירות תרד עם הירידה בגדול ובכמות החלקיקים המוסעים בתרחיף הזרימה. כלומר הגדלת החדירות אפשרית כאשר כמות גדולה יותר של מרחפים מוסעים בנחל, או שנחוצים פחות מתקנים חדירים כאשר יש כמויות סחף קטנות או כשהסחף מכיל ברובו חלקיקים קטנים. מידת חדירות המתקן קשורה קשר ישיר לחומרים מהם עשוי המתקן.

(ב) אורך כל מתקן אינדבידואלי (מהגדה ועד לסוף הדייק) מוכתב ע"י היישור הרצוי של הנחל. כאשר הצורך היחידי הוא בייצוב הגדות חשוב אורך המתקן אינו כה פשוט. ה- FHWA (1985) מציע שאורך הדייק משפיע על גריפת חומר בקצה הדייק ועל זווית הזרימה המוסטת ע"י הדייק. כפי הנראה, אורך המתקן תלוי גם במידת חדירותו כדלהלן :

אורך דייק מומלץ (אחוז מרוחב הערוץ)	חדירות (%)
15% או פחות	0 - 35
25% או פחות	80

לחדירות בין 35% לבין 80% יש לחשב ע"פ אינטרפולציה ליניארית את האחוז מרוחב הערוץ בין 15% לבין 25%. רוחב הערוץ מוגדר רוחב כתפי הערוץ.  
 אם הדייק מיועד להסטת הזרימה אזי אורך המתקן יעלה על המגבלות המצוינות, אורך הדייק יעלה בהתאם לצורך ולאפשרויות באתר.

- ג) אורך ומירווח בין דייקים מחושבים לרוב במיקשה אחת. בין שני המאפיינים הללו מתקיימת מערכת יחסים של אורך דייק גדול מאפשר ריווח גדול בין דייקים ולהיפך. ההחלטה צריכה להיקבע ע"פ שיקולים כלכליים, עיצוביים או סביבתיים. ב- FHWA (1985) ניתן למצוא תחשיבים ע"פ עקמומיות הנחל. ה- USACE (1981) מציע ריווח בין דייקים של פי 6.3 מאורך הדייק כריווח לא שמרני (אפיק ישר, אדמה לא אירוזיבית), ופי 3 מאורך הדייק באתרים בהם התכנון שמרני. בעבודה של California Department of Highways (1960) הומלץ על יחס של ריווח בין דייקים = אורך הדייק אלא אם ניתן לקבל תלמים עקב התמוטטות גדות בין הדייקים. בכל מקרה גם הריווח בין הדייקים וגם אורך הדייק הבדיד תלויים במאפיינים מקומיים נוספים. אם מחשבים את הריווח בהתאם לעקמומיות הנחל יש לקחת בחשבון כי התנאים ישתנו לאחר יישום המתקן, ואז רצוי לחשב ריווח לפי גישה שמרנית יותר.
- ד) הזווית ביחס לזרימה היא מאפיינת את קו הזרימה העתידי. דייקים המתוכננים לאורך הקצר ביותר בין קו הגדה לבין קו האפיק העתידי יהיו מן הסתם הזולים ביותר. לרוב קו הדייק יהיה ניצב לקו זרימה, לקו הגדה או לפשרה בין שני הקווים. אם הזווית המתוכננת ל 150 מעלות בדייק מסויים, הדייק במורד יחושב לפי מינימום 90 מעלות.
- ה) גובה הדייק במערכת קשור קשר הדוק עם גובה הגדה עליה יש להגן. מספר עקרונות בסיסיים מנחים מומלצים בתכנון: גובה הדייק לא יעלה על גובה ראש הגדה, אך לא נמוך ממטר מגובה זרימת תכן. דייקים חדירים יהיו נמוכים מהזרימות שנושאות את הרחופת העיקרית. דייקים אטימים יהיו תחת מים בגובה מירבי של 1 מטר בזרימות הגבוהות אליהן הוא מתוכנן. יישום עקרונות אלו נחשב לתכנון שמרני, משום שהם נכתבו עבור המשרד האחראי על דרכים מהירות בארה"ב (FHWA). גובה הדייק יקבע במקרים רבים את עלות העבודה ולכן כל עוד מצליחים להגן על בוחן הגדה ניתן להסתפק בגבהים נמוכים מכפי שצוין בעקרונות הללו. כללי אצבע נוספים שנכתבו מתוך נסיון: גובה הדייק יהיה 1/3 ועד 2/3 מגובה הגדה או 1/3 ועד 2/3 המרחק בין גובה הזרימה הנמוכה ביותר לבין גובה הזרימה המירבית של אחת לשנתיים.
- ו) החיבור בין הגדה לדייק חייב להיות מתוכנן כך שהזרימה לא תנתק את הדייק מהגדה. יש ליצור חפירה אל תוך הגדה ולהאריך את הדייק אל תוך הגדה, קטע זה נקרא שורש הדייק. יש להגן על החלק היורד של הגדה ובגישה שמרנית אף מעט במעלה הדייק. הגנה זאת מיושמת בגלל שקשה להעריך את מהירויות הזרימה הנוצרות עקב בניית המתקן. אך קיימים מספר כללי אצבע ליישום: שורש הדייק יחדור לגדה לפחות כמו גובה הדייק. אם ניתן להעריך את גודל החתירה בגדה עקב בניית המתקן יש להוסיף גודל זה לגודל שורש הדייק. רצוי לייצב בצומח את הגדה באזורים הסמוכים לדייק. בשל העובדה כי אזור זה מופר וממולא בחומר נקיז יותר, סביר כי האזור יהיה נתון ללחצי ניקוז תת קרקעיים ולפיכך רצוי להשתמש בביד גיאוטכני ובחומר מדורג המונע יציאת חלקיקי אדמה ועליו אדמה חרסיתית כבושה. השריון במורד הדייק צריך להיות לפחות פעמיים גובה הדייק, ובמעלה הדייק (אם צריך) אורך השריון יהיה כגובה הדייק. לרוב, מעלה הדייק מהווה אתר להשקעת סחף. אבן היא האפשרות האופטימלית לבניית שורש הדייק גם אם הדייק בנוי מחומר אחר, וזאת משום שעמידות שורש הדייק בפני ארוזיה היא קריטית. במקרים חמורים בניית שורש הדייק מייקרת את המתקן כך שיותר זול לשריין את הגדה באמצעי אחר ללא דייק.

ז) הגנת הדייק בפני גריפת חומר נועדה למנוע התמוטטות וחתירה של הדייק. במקרים רבים משתמשים בגביונים או ריפ רפ בכדי למנוע גריפת חומר מהדייק או כדי לתקן חורים שנפערו בדייק. לרוב הגנה זו מונעת מבנה קונסטרוקטיבי גדול יותר שלעיתים יקר יותר. ניתן להוסיף מאפיינים קונסטרוקטיביים נוספים בקצה הדייק (צורת L או T) בכדי להרחיק עוד את גריפת החומרים מהדייק.

### **8.1.2 דייקים חדירים**

**יתרונות:** היתרונות של הדייקים החדירים על הדייקים הלא חדירים הינם שהם יותר יעילים בנחלים בעלי ריכוז מרחפים גבוה ולרוב עלותם נמוכה יותר.

**חסרונות:** החסרונות של הדייקים החדירים שהם פחות עמידים מדייקים מאבן או מחומרים לא חדירים אחרים, לרוב הם נחשבים פחות אסתטיים אף על פי שבסופו של דבר בעיה זו תופחת עקב גדילת הצמחיה.

#### **שיקולי תכנון:**

א) עמודים או סוללות לדייק יכולים להיות עץ מטופל, ברזל מגולוון או בטון. בחירת החומר לקונסטרוקציה הדייק חייבת להתחשב באיכות המים בנחל. הדייק יכול להיות גדר רשת מחומר סינטטי כזה או אחר המחובר לצינורות הקשורים לגדה. ניתן להשתמש גם בצמחייה המקומית עצים או שיחים המעוגנים היטב לקרקע. בארה"ב קיים שימוש נרחב בלוחות המחוברים בכבלים לגדה ומעוגנים מדי פעם בעמודים לתוך הקרקעית. חשוב לבחור חומרים המטופלים כנגד קורוזיה או ריקבון.

ב) תכנון מבנה הוא תהליך חזרתי. המטרה הינה להשיג את הגובה והחדירות הרצויים במינימום עלות. יש לבחור חומרים תוך שימת לב לעלותם וליישומם הטכני. ישנם מספר משתנים שיש לקחת בחשבון בעת תכנון דייקים עשויי שבכה או גדר: עומסי צד (כוחות חיכוך, רחופת). מרווחים, גודל ומידת החדירה של הסוללות אל הגדה. גודל הכבלים, גדרות, לוחות.

הפגיעות לכשל של המתקן מעומסי צד עולה עם גובה המתקן מאחר וזרוע המומנט המשיע גדול יותר, החשיפה לרחופת גדולה יותר והמהירות גדולה יותר. לפיכך, כל היערכות לטיפול בסוגיות אלו מייקר את המתקן עם העלייה בגובה המתקן. כלל אצבע הוא כי עמודים או סוללות חודרות צריכים להיות לפחות 1/2 עד 2/3 מסך אורך העמוד או הסוללה אל תוך האדמה. מאפיין זה תלוי בסוג אדמת הגדה או חומר הקרקעית של הנחל, מידת אפשרות גריפת חומר ועומסי צד צפויים מכוחות הידרוליים ורחופת.



לוחות עץ



רשתות

**איור מס' 34: דוגמאות לדייקים חדירים. רשתות ולוחות עץ.**

היתרונות והחסרונות של דייקים אטימים תוארו בסעיף הקודם. דייקים אטימים יכולים להיבנות ממגוון חומרים: אבנים, גביונים, אדמה, חול, חומר ואדי, שקים ממולאים בחול או פסולת בנין, לוחות מתכת, עץ, גושי בטון, אספלט או בבניה של קיר.

אבנים וגביונים הינם חומרים נפוצים המשמשים לבניית דייקים אטימים אם כי אינם אטימים לחלוטין. מידת חדירותם כה נמוכה כי הזרימה העוברת דרכם, זניחה.

שיקולי תכנון: אבן מדורגת היא פחות קריטית לדייקים עשויי אבן מאשר להגנת הגדה בריפ רפ עבור אותו הנחל. תזוזת האבנים כתוצאה מגריפת חומר אמורה להסתדר לבד אם גודל האבנים מספק. גודל האבן המקסימלית הדרושה לדייק גדולה מהגודל המירבי בו משתמשים לריפ רפ עבור אותו הנחל, משום שהדייק יוצר הפרעה לזרימה הגורמת לטורבולנטיות גבוהה בעלי כוחות הידרוליים גדולים. בעיקרון קיימת עדיפות ליצירת מארג אבנים בעלי גודל שונה בכדי ליצור אטימות מירבית ומניעת הסעת חומר דרך הדייק, אלא שהדבר כרוח בד"כ בהעלאת עלויות.

רוחב האבן בקצה הדייק תלוי במידה רבה בגריפת החומר הצפויה באזור זה ובגובה הדייק. כאופן מעשי ניתן לומר שאבנים בקוטר של 60 ס"מ הם הגודל המינימלי המתאים. ככל שגודל הדייק גדל יגדל גם הקוטר המינימלי של האבנים.

שיפועי דופן הדייק יעמדו על לפחות 1 לגובה על 1.5 לרוחב ובקצה הדייק השיפוע יהיה אף מתון מזה. שימוש באדמה כבסיס העיקרי של הדייק עם שריון אבן מחייב שימוש בפילטר גיאוטכני.



אדמה עם שריון אבן



אבן ריפ רפ

איור מס' 35: דוגמאות לדייקים אטימים. אבן ריפ רפ ואדמה משוריינת אבן.

## 8.2 מעכבים

היתרונות והחסרונות של המעכבים הושוו למאפיינים של הדייקים בסעיף 8.1.1.

יישום טיפוס: היישום הטיפוסי במעכבים הינו בנחלים בהם יש צורך ליישר או לעצב מחדש את תוואי האפיק. כאשר העיקול בנחל, מידת האירוזיביות של הגדה, עומס המרחפים או התנאים ההידרוליים חמורים מדי בשביל להשתמש בדייקים ביעילות או בעלויות סבירות. השימוש במעכבים גם יכול להימצא כזול יותר מחלופת שריון הגדה באמצעים קשיחים אחרים.

שיקולי תכנון: שיקולי התכנון הקשורים במעכבים מעבר למה שצוין בפרק 8.1 הם: מיקום, גובה ועיגון המיתקן.

א) כאשר מיועד המעקב לצורכי הגנת הגדות ולא לצורכי התוויה מחדש של האפיק, מיקום המיתקן יהיה מעט אחרי בוחן הגדה. יש לבצע חתכים של הגדה המשוקמת ולקבוע את נקודת בוחן הגדה ולהעביר קו בין החתכים לקביעת מיקום המעכבים. ככל שצורת תוואי האפיק מורכבת יותר יש לסמן מספר רב יותר של חתכים לקביעת מיקום המעכבים.

ב) גובה או רום המעקב נקבע לפי השיקולים שנקבעו לדייקים והוא קשור בקשר הדוק עם הגובה הצפוי של זרימת המים ומידת האירוזיביות של הגדה. האזורים הקריטיים אליהם יש לשים לב הינם מעלה ומורד המעקב, שם צפויים עומסים הידרוליים מוגברים על הגדה ולפיכך שם יש להרים המעקב לגובה הגדה עליה רוצים להגן.

ג) את המעקב עצמו יש לקבע לגדה בגובה המעקב עצמו. את המרווח בין עוגנים אלו יש לחשב על פי אמות מידה קונסטרוקטיביות, הריווח יכול לעלות על הריווח שהומלץ לדייקים. יש לקבע עוגנים אלו במקומות הקצרים ביותר בין הגדה למעקב עצמו.

### **8.2.1 מעכבים חדירים**

יתרונות: היתרונות של המעכבים החדירים על אלו האטימים הם שהמעכבים החדירים יותר יעילים בנחלים בעלי עומס סחף גדול ושהם בד"כ זולים יותר.

חסרונות: לרוב הם פחות עמידים מאשר מעכבים אטימים עשויי אבן או חומרים אחרים ולרוב המתקן נראה פחות אסתטי.

שיקולי תכנון: רוב שיקולי התכנון דומים לשיקולי התכנון של דייקים חדירים. שיקולים נוספים לתכנון מעבר למה שהוזכר למעכבים: לעיתים יש צורך בשורה כפולה להגברת יציבות המעקב ולהקטנת הזרימות בין המעקב לגדה. בין השורות הכפולות ניתן למלות במגוון רחב של חומרים, ענפים ועוד המפחיתים את מהירויות הזרימה ליד הגדה. כמוכן שהחומר המוסף בין שתי השורות יקבע את הקיים של המתקן. דוגמאות למעכבים חדירים ניתן לראות באיור מס' 36:



**איור מס' 36: דוגמאות למעכבים חדירים**

### **8.2.1 מעכבים אטימים**

היתרונות והחסרונות של מעכבים אטימים נסקרו בהשוואה למעכבים חדירים, שיקולי התכנון של מעכבים אטימים דומים מאוד לשיקולי התכנון של הדייקים האטימים. ניתן להחשיב מעכבים אטימים מאבן כמשרייך הבוחן של הגדה.

את המעכבים האטימים ניתן ליישם נקודתית באזורים בעייתיים כגון עיקולים חדים או באזורים בעלי פוטנציאל אירוזיביות גבוה.

אל המעכבים ניתן להוסיף גם דייקים קטנים כמו באיור מס' 37.



**איור מס' 37: דוגמאות למעכבים אטימים בתוספת דייקים לשיפור ההגנה על הגדה.**

בדוגמא המוצגת באיור מס' 37 ניתן לראות שימוש משולב של מעכבים ודייקים המסיטים את הזרימה המהירה מהדופן החיצונית בעיקול אל הגדה ממול בה יש השקעת סחף (בשל המהירויות הנמוכות). בכך תיווצר קרוב לודאי, השפעה על רדיוס העיקול, והכוחות המופעלים על הגדה החיצונית יופחתו.

## 9. ייצוב בעזרת צומח

### כללי

את תהליכי הסחיפה הטבעיים איננו יכולים לעצור או למנוע, ניתן רק להאיץ אותם או למתן אותם. מטבעם של נחלים שמתקיימת בהם בדרך קבע פעילות אירוזיבית ואין כל ערובה להצלחה של עבודות ופעולות לריסון תהליכים אלו.

תעלות מהוות לרוב בית גידול טוב לצומח. הן עוברות בקרקעות אלוביאליות, במקומות בהם מתרכזים המים באופן טבעי כך שהצומח נהנה מתוספת מים לבד מן הגשם. תעלות מתכסות באופן טבעי בצומח, אך לא תמיד בכזה המתאים מבחינתנו לייצוב הגדות.

את מקומן של שיטות ייצוב "קשיחות" מקובלות מחליפות היום שיטות ייצוב "ירוקות" – ייצוב בצומח או ייצוב משולב. ייצוב באבן המשולב בייצוב בצומח נותן יותר מבחינת היחס של "עלות - תועלת" בנוסף לכך שהוא יותר ידידותי לסביבה ומהווה בית גידול טבעי לבע"ח.

גישה זו צריכה להיות משולבת בשמירה על פשטי הצפה והימנעות מבניה בתחומם, איתור נקודות תורפה ומקומות רגישים לסחיפה ולייצבם ביחד עם עבודות לתחזוקת נחלים ותעלות.

הייצוב בצומח הוא זול יותר לעומת אמצעים אחרים.

כל אתר שמתקיימת בו פעילות סחיפה, הוא ייחודי בגלל המגוון הרב של הגורמים המשתתפים ומשפיעים בתהליכי הסחיפה.

פרק זה בא לסייע במידע ולהשלים תכנון נכון של פעולות לייצוב גדות נחלים.

האמצעים לייצוב, השיטה וסוג הצומח הם פרי התנאים הסביבתיים הייחודיים לכל אתר ואתר.

ייצוב בצומח הוא אמצעי "טבעי" של שימוש בזריעה או שתילה של צמחי תרבות או צמחי בר חד או רב-שנתיים.

מטרת הייצוב בצומח היא להגן על שטחים רגישים מבחינה מורפולוגית מפני סחיפה (ארוזיה). שטחים אלה יכולים להיות דיונות, סוללות ומדרונות, דרכי מים ונחלים. כיסוי בצומח של פני השטח בשעור מתאים, מייצב את הקרקע או את הגדות, ומגן מפני תהליכי סחיפה.

לייצוב בצומח יש היבטים מעשיים, היבטים כלכליים והיבטים נופיים – אסתטיים.

בפרק זה נתרכז בשימוש בייצוב בצומח להגנת גדות נחלים ותעלות.

מהבחינה המעשית הצומח מגן על הגדות בהוותו חיץ בין הזרימות המהירות ובין פני הקרקע, הוא גם מאט את מהירות הזרימה ואת הכושר האירוזיבי שלה. כוח התאחיזה של השורשים מלכד את הקרקע ומייצב אותו. יישום של ייצוב בצומח בד"כ הוא מהיר והוא זול בביצוע. מבחינה נופית אין ספק שמראה של גדות מדושאים בצבע ירוק או אפילו בצהוב, המגוונים במיני עצים ושיחים מהווים תרומה אסתטית וסביבתית לאדם ולבעלי החיים.

הבעיה בייצוב גדות נחלים בצומח היא של ייצוב ה"בוהן".

### 9.1 עקרונות

עבודות שונות המתבצעות בגדות נחלים או תעלות ובמיוחד עבודות "הסדרה", כרוכות בשינוי רוחב האפיק ובעייצובו מחדש. העבודות חושפות לרוב שכבות קרקע סטריליות הרגישות ביותר לסחיפה נהרית וגם לארוזיה של מכת טיפות הגשם - לסחיפה משטחית ולסחיפה ערוצית. עד להתבססות מחדש של הצומח טבעי המייצב את הגדות ניתן להשתמש בשיטות ייצוב "ביו הנדסיות", או בשפה פשוטה – ניתן לייצב בצומח את הגדות, ליצור "חברת חלוץ" שתגן על הקרקע מפני סחיפה ובמהלך הזמן תוחלף

בתהליכים טבעיים ע"י הצומח המקומי. מובן כי ניתן להוסיף אלמנטים נופיים למהלך זה. ראוי לציין כי הייצוב בצומח מתלווה בדרך כלל לעבודות הנדסיות שונות המתבצעות בשטח ומשלים אותו.

יצירת חיץ של צומח לאורך הגדות של תעלות ואפיקים, מייצב את הגדות ע"י מניעת התמוטטות הגדות ייצוב מתוכנן באזורי חולשה. רצועת זו חייבת להיות מתוחזקת בכיסוי צומח עשבוני. עייצוב וייצוב נכונים של שפוע הגדות וכיסוי קבוע שלהם בצומח, מקטין את הוצאות התחזוקה של ניקוי ופינוי הסחף מהאפיקים.

תנאי הסביבה: באגרו-טכניקה מתאימה ניתן לגדל כמעט בכל מקום צמחי כיסוי, אולם אם הצומח אינו מתאים לתנאי הסביבה נצטרך להתערבות אגרו-טכנית מתמשכת. מטרתנו כאמור לבור את הצומח המתאים לתנאי הסביבה הנתונה.

התנאים המשפיעים על הבחירה ועל הממשק:

תנאי רטיבות: כמות הגשם השנתית ותדירות הבצורת.

טמפרטורות: במיוחד חשובים התנאים הקיצוניים כמו בבקעת הירדן, בנגב או במקוות הררים.

משטר הזרימה ואיכות המים:

- זרימה שיטפונית בחורף, תדירות השיטפונות, מהירויות הזרימה.
- זרימה קיצית של מי ניקוז, עודפי השקיה, נביעות ומעינות.
- זרימת מי קולחין או ביוב ואיכותם.

הקרקע: סוג הקרקע ומידת פוריותה, השתנותה עם העומק.

▪ עמידותה בפני סחיפה.

▪ מליחותה ומציאות נביעות (לעיתים יש קשר בין השניים).

בעיות הקשורות באגרוטכניקה של השטחים החקלאיים סביב:

▪ הצורך בחציית התעלה בעת העיבודים.

▪ הצורך בנסיעה לאורך התעלה.

▪ השימוש בקוטלי עשבים שונים בסביבה החקלאית.

▪ רעיה מבוקרת או לא מבוקרת של בקר וצאן.

האגרוטכניקה לייצוב ולתחזוקה בתעלה:

▪ אפשרות העיבוד בדיסקוס.

▪ אפשרות העיבוד בשרשרת זיזים – מכשולים, תשתיות.

▪ אפשרות פתיחת תלמים.

▪ אפשרות הצנעת הזרעים.

▪ אפשרויות ההשקיה – מקורות המים, איכותם, ספיקה מכסימלית, אפשרות הנחת מערך השקיה חד פעמי או מערך לשימוש חוזר.

▪ אפשרות הקציר, הכיסוח וביצוע פעולות תחזוקה אחרות.

## **צורת החתך באפיק המתוכנן לייצוב בצומח**

אמצעי תחזוקה עיקרי של תעלות מדושאות הוא קציר או כיסוח, לכן יש לבחור חתך רוחב של אפיק המאפשר תנועה ועבודה של כלים חקלאיים בצורה בטוחה ויעילה. ציוד חקלאי רגיל יכול לפעול בשיפוע דופן של 1:4 או 1:3 בתנאי שהשיפוע נקי מאבנים בולטות ומערוצים עמוקים עקב סכנת התהפכות לציוד וסיכון חיים למפעיל. ציוד מתאים לעבודה הן מקצרות או מכסחות צד המופעלות ע"י זרוע כאשר המגבלה היא אורך המדרון. על כן עדיף לתכנן ולבצע שיפועי דופן של 1:3.5 או 1:4 הנוחים יותר לביצוע ולתחזוקה בעת הצורך.

### **9.2 יתרונות וחסרונות**

**יתרונות** הייצוב בצומח הם קלות ומהירות היישום, בעיקר של זריעה. יתרון כלכלי של עלות נמוכה ליחידת שטח.

יתרונות נופיים וסביבתיים. הפתרונות הם ידידותיים לסביבה, בעלי חזות נאה וטבעית, משמשים בית גידול למגוון של בעלי חיים.

**חסרונות** הייצוב בצומח – הביצוע צריך להיות בעונה המתאימה, ביצוע במועד לא מתאים עלול לפגוע בקליטת הצומח, להשפיע על שיעור הכיסוי שלו בשטח ומכאן על יעילות הייצוב. במקרים קיצוניים אף עלול לגרום לכשל בביצוע. הרבה פעמים ייצוב בצומח הוא משלים או מלווה ייצוב קשיח – הוא אינו יכול לעמוד כאמצעי בפני עצמו למשל במהירויות זרימה העולות על 2.5 מ' בשניה. אין פתרונות לייצוב באזורים בהם כמות המשקעים קטנה מ-250 מ"מ.

### **9.3 יישום טיפוסי**

ניתן לייצב בצומח בארבע דרכים או במשולב ביניהן:

1. ע"י ייצוב טבעי – לתת לצומח הטבעי להתפתח ממאגר הזרעים הקיים בקרקע או בסביבה. התהליך הוא ארוך ויכול להמשך כשנתיים או שלוש. במהלך זמן זה ניתן ע"י כיסוח או ע"י ריסוס ברירני לנסות ולכוון את התפתחות הצומח. הסכנה העיקרית בשיטה זו היא רגישות הגדות לסחיפה בעיקר בעונה הראשונה.
2. ע"י זריעה. ניתן לזרוע עשבים חד שנתיים חורפיים או קיציים. הראשונים נובטים עם הגשמים והם יעילים בעיקר לקראת אמצע החורף שאז מושג עומד וגודל צומח היכול למלא תפקיד במניעת סחיפה. ע"י זריעת עשבים רב שנתיים קיציים, ניתן מחודש אפריל עד תחילת ספטמבר. יש להשקותם במהלך כל הקיץ. ככל שמקדימים מקבלים כיסוי טוב יותר אך משך תקופת הטיפול מתארך וכן גם עולות הוצאות ההשקיה.
3. ע"י שתילה. השתילה מתבצעת בקיץ (ר' להלן). היתרון הגדול של השיטה הוא מבחר של עשבים המותאמים לתנאים השונים. ניתן להגיע לאחוז כיסוי מלא עד החורף. עשבים אלו הם משתרעים, המשתרשים משריגים או עם קני שורש ולכן מייצבים את הקרקע היטב.
4. שתילת שיחים ועצים. יכולה להתאים לתנאים מיוחדים. אין לשתול במרכז האפיק אלא אם רוצים ליצור הפרעה מכוונת לזרימה. נטיעת עצים יכולה לבוא כדי להצל על דרך מים למניעת התפתחות של קנה וסוף או מסיבות נופיות. בכל מקרה יש לבחור במקום נטיעה המאפשר עבודות תחזוקה. כאמור, הייצוב נעשה ע"י זריעה או שתילה של צמחי תרבות או צמחי בר. הזריעה היא בעיקר של דגניים או קטניות, לחוד או בתערובת. שתילה, של מיני דשאים (בחלקם עקרים), ונטיעה של שיחים ועצים.

עיתוי: את עבודות הייצוב של דרכי מים ניתן לבצע בשני מועדים עיקריים: שתילה: יש לבצע מחדש מאי ועד אוגוסט. כדי להגיע להתבססות הצומח ולכיסוי מירבי של השטח – רצוי להקדים. בשתילה מאוחרת נגיע לכיסוי חלקי של השטח בגלל בעיות קליטה עקב החום ובגלל משך הזמן הנותר ממועד השתילה עד תחילת החורף (התקצרות שעות היום וירידת טמפרטורות) דבר העלול לגרום לכשלון פעולת הייצוב. השתילה מחייבת מערך השקיה אשר מאפשר השקיה בפולסים ובכמויות עולות לדונם במהלך הגידול.

זריעה: כדאי לזרוע גדות ודרכי מים ממחצית או מסוף חודש ספטמבר כדי להגיע להתבססות ולגודל אפקטיבי של הצומח כדי לעמוד בעוצמות גשם וזרימות נגר או גאוויות. לשם כך יש צורך בהשקיית עזר להנבטה ולגידול עד בא הגשמים ולהשקיה בפרקי היובש בין הגשמים.

נטיעה: נטיעת עצים או שיחים, בודדים או בקבוצות קטנות יש לשתול בחלק הגבוה של הדופן כך שלא יפריעו לזרימה ויאפשרו עבודות תחזוקה באפיק או בגדה. כדאי לטעת בסוף חודש ינואר ובמהלך פברואר. יש צורך בהשקיית עזר במהלך הקיץ ואף בעונה הבאה. יש לגדר את העצים כדי להגן עליהם בשנים הראשונות. התאמת העצים תהיה עפ"י סוג הקרקע, האיזור (משקעים וטמפ"ו) ועפ"י הצרכים.

דרכי מים בשיפוע של 1.5% או יותר צריכות ייצוב. ייצוב בשיפועים קטנים יותר עלול לגרום להצטברות סחף בתחתית התעלה.

#### **9.4 בחירת שיטות הייצוב:**

בבחירת שיטות הייצוב קובעים הגורמים הבאים:

- מהירות הזרימה בתעלה (מהירות התכן) והסיכוי למהירות חריגה.
- הסיכוי (והסיכון) לשיטפונות.
- נזקים צפויים לקטעים שאינם מיוצבים ועלויות תיקון צפויות.
- צורת האפיק – פיתולים והפרעות לזרימה.
- אופי בית הגידול – האזור, סוג הקרקע, האקלים ומשטר הגשם, אופי זרימת המים בתעלה ואיכות המים.
- חלופות אחרות לייצוב (ייצוב הנדסי).
- אפשרויות השקיית הצומח לייצוב.
- מועד סיום עבודות עפר במידה וזה קטע לשיקום.
- צרכים סביבתיים ונופיים.

במקומות שהייצוב בצומח לא נותן מענה (אקלים, מהירויות זרימה) יש להשתמש בשיטות ייצוב הנדסיות. בתעלות לחות כל השנה עם זרימות של מים או ביוב, כדי למנוע התפתחות צומח לא רצוי, יש לשתול מיד צמחי אחר רטוב כמו דוחן זוחל, ליפיה זוחלת, תלתן הביצות או תלתן זוחל.

תעלות ניקוז בתוך ישובים או בסמוך להם כדאי לדשא ובכלל זה גם את הגדות. יש לכך יתרון נופי אסתטי, הדבר מונע התפתחות צומח ח"ש כמו גדילן וברקן וגם נוח יותר לכסח ולתחזק דשא מאשר קוצים גבוהים. מקומות רגישים הצמודים למבנים הידראוליים או בפיתולים חדים רצוי לדשא בזריעה או בשתילה בהשקיה.

### **9.5 תכנית הייצוב**

כמו תכניות למתקנים הנדסיים, גם ייצוב בצומח מחייב הכנת תכנית מתאימה לצרכים ולדרישות ובדיקתה היא באחריות הענף לתכנון שימור הקרקע. התכנית תכלול את הנחיות העבודה, מפרטים לביצוע ואומדן עלויות. התכנית יכולה להיות משולבת בתכנית הנדסית.

### **9.6 הנחיות**

- לאחר זיהוי ואיתור קטעי חולשה, הגדרת תהליכי הסחיפה, איסוף נתונים, אפיון תנאי הזרימה ניתן לייצב עפ"י תכנית.
- יש להימנע מתכנון יתר הגורם לעודף הוצאות, בנייה ללא צורך, השפעות סביבתיות נרחבות אך גם מתכנון חסר הגורם לא אחת לכשל.
- שמור על הצומח הטבעי הקיים.
- המנע מפעילות בניה בעונת הגשמים.
- יצב בצומח מקומות שהופרו או בוצעו בהם עבודות – בהקדם ככל האפשר.
- התאם את הצומח לסוג הקרקע באזור.
- הקפד על איכות הזרעים, להשתמש בזרעים מובחרים עם אחוז נביטה גבוה ונקיים מעשבי בר.
- חשוב לעבד את הקרקע, להכין מצע זרעים מתאים ולדשן את השטח טרם הזריעה – עפ"י תוצאות של בדיקות קרקע. בזריעה של דרכי מים רצוי להשתמש בכמות כפולה מהכמות המקובלת בגידול חקלאי. כדי להבטיח עומד מתאים. הזריעה בשתי וערב כאשר המהלך הראשון הוא לאורך השיפוע והמהלך השני הוא בניצב. רצוי להשתמש במזרעות ולא במפזרות צנטריפוגליות בגלל חשיבות עומק ההצנעה. במידה וניתן להשתמש במזרעות אי פליחה הרי זה עדיף ומונע את הצורך בעיבוד השטח.

## **10. ביקורת התכנון**

### **כללי**

בחינת השגת מטרות התכנון על רקע פרופילים הידרוליים מפורטים.  
בחינת ספיקות התכן על סמך תחנות הידרומטריות באגנים אנלוגיים, על סמך ספיקות תכן קיימות וספיקות מירביות ידועות.  
קביעת ספיקת "גדות מלאות" full bank flow לצורך תכנון גיאומורפולוגי של התעלה.  
בחינת הצורך בהידרוגרפים מלאים וחישוב הילוכי גאות בשטחי הצפה משמעותיים.

### **10.1 תוואי האפיקים**

- א. תוואי האפיקים המועדף בתעלות מתוכננות יהיה קו הגיא הטופוגרפי.
- ב. בתעלות מוסדרות יש להימנע מעיקולים ברדיוסים קטנים מ – 3 פעמים רוחב התעלה.
- ג. רדיוסים מינימלי רצוי באפיקים בינוניים וגדולים 7-8 פעמים רוחב התעלה, ובאפיקים קטנים 10-12 פעמים רוחב התעלה.

### **10.2 חתך האפיקים**

- א. החתך ייקבע משיקולים הידרוליים בהתאם לספיקות התכן. יש לבחון את החתך ליציבות הפרופיל האורכי ולמניעת שקיעת סחף או סחיפה ולשאוף לכושר הולכת סחף הדומה למצב הקיים (Sediment Transport Capacity).
- ב. יתרון משמעותי לשיפועי דופן מתונים משקולי התבססות הצמחייה ותחזוקת התעלה והצמחייה.
- ג. יתרון משמעותי לחתך כפול – דו מפלסי. חתך הבנוי מחתך צר לזרימת בסיס בחלק התחתון וממפלס עליון רחב לזרימת גאוויות.

היתרון של חתך כפול נובע משמירה על משטר הסעת הסחף הקיים בד"כ, וכן ביצירת גיוון של התעלה, הרצוי ושיקולים אקולוגיים (בעיקר התבססות צמחיה ובע"ח), וכן משיקולים של משטר הסעת הסחף בתעלה.

### **10.3 דרכים**

- א. דרכי שרות לתחזוקה חיוניים ביותר בהתאם לרמת הדרכים, הנקבעים ע"י רשות הניקוז.
- ב. במקרים רבים קושי בתחזוקה ללא דרכי שרות. בעיקר בתעלות רטובות בקיץ, או בחתך תעלה צר שאינו מאפשר נסיעת כלים.
- ג. דרכי מים (תעלות הגנה רדודות לאורך דרכי השרות). להגנה על דופן התעלה מזרימת מים לא מבוקרת מהשטח ישירות לתעלה.
- ד. התכנון מחייב מתקני כניסה וניתוב הזרימה למתקני הכניסה ושיפועים אורכיים רציפים של דרכי המים.

ה. כאשר זרימת המים מהשדה לתעלה אינה משמעותית, יש להבטיח בכל מקרה דרך השרות תהיה בשיפוע נגדי לזה של השדה. (שיפוע רוחבי החוצה מהתעלה).

#### **10.4 אמצעי ייצוב הגדות**

- א. התאמת אמצעי הייצוב שנבחר למהירויות המירביות בתקופת חזרה 10:1 שנים.
- ב. שימוש באמצעים טבעיים אבן, צמחייה במידת האפשר.
- ג. הגנה על נקודות תורפה – בוהן המדרון ותחתית התעלה, מתקני כניסה מהגדות, מראשי תעלות, זנקים הידרוליים, היצרויות פתאומיות, מעבירי מים וכד'.

#### **10.5 מתקנים הידרוליים**

תכנון מתקן ראש שיכנס את הזרימות בראש קטע ההסדרה לתוך האפיק המוסדר במורד.

תכנון הידרולי למתקנים הידרוליים, לבחון את הגיאומטריה במתקני שיכוך. לוודא כליאת זנקים הידרוליים בתחום המתקנים.

לוודא התייחסות לבלט חופשי וממדים שיאפשרו גישה ותחזוקה של המתקנים.

לוודא מעברים הידרוליים הדרגתיים ככל הניתן, במורד ובמעלה, כולל אורך קטעי ריצוף מתאימים.

#### **10.6 פשטי הצפה ומפלסי בניה**

אין להגביה גדות או להרים סוללות ללא בחינת ההערמות הנוספת הנגרמת בגלל ההיצרות של חתך הזרימה.

אין לאפשר התרוממות פני המים מעל ל – 0.3 מ' בתקופת חזרה 100:1 שנה. בקטעי נחל שהוסדרו לתקופת חזרה חקלאית אין להגביה יותר מגדה אחת.

נדרש לבחון האם קיימות תשתיות רגישות (מבנים וכדו') בגדה הנמוכה.

רומי הצפה המתוכננים בתקופת חזרה 50:1 שנה בתוספת בלט של 0.6 מ' יהיו הרומים המינימליים לחצרות באזורי מגורים. רומי רצפות המבנים יהיו בגובה 1.2 מ' לפחות מעל רום פני המים הצפוי בתקופת חזרה 50:1 שנה.

פשטי הצפה בתקופת חזרה 50:1 שנה שייקבעו בתכנון מפורט יהיו בסיס להגדרת אזורים בסיכון להצפה ויקבעו את התחומים למגורים. בתוך תחום פשט הצפה ניתן לפתח שטחים חקלאיים או פארקים, גינון וכו'.

#### **10.7 קווי תשתיות**

תכניות קווי תשתיות חוצות או מקבילות יתואמו ויאושרו בשלבי התכנון השונים ע"י מינהלת הנחל ורשות הניקוז לאחר שייבחנו שיקולים סביבתיים בהערכת נחיצות התשתיות, בקביעת התוואי, בחינת היבטים גאומטריים, חזותיים ואקולוגיים.

חציות יתוכננו כך שלא ייצרו בעיות ניקוז במעלה וכך שיאפשרו מעבר ברוחב ובגובה מתאים לבע"ח, לרכבים חקלאיים, לתחזוקה, לנופש וכו'. החצייה תהיה במידת האפשר בניצב לנחל (לא באלכסון).

תינתן עדיפות לגשרים ע"פ מעבירי מים מסוג קופסה, ייבחנו חומרי הגמר ויעשה שימוש בצומח למיזעור של הפגיעה החזותית.  
מיקום התשתיות לאורך התעלות והנחלים יחסית לאפיקים ולדרכי השרות, מיקום עמודי סימון, עמודי שילוט וכו' יותאמו עם רשות הניקוז ורשות הנחל.  
חציות צנרת, כבלים וכו' יהיו במידת האפשר תת קרקעיות במפלסים מתאימים ומאושרים ע"י רשות הניקוז, ובגיאומטריה שתאפשר מעבר לדרכי השרות לאורך הגדות.

#### **10.8 אישורים**

יש לקבל את אישור רשות הניקוז ורשות הנחל, לכל עבודה בתחום הנחלים והתעלות לרבות רצועות המגן.  
לוודא אישורים נוספים בשלב התכנון הכללי (בזק, חברת חשמל, כבלים, רשות העתיקות וכדו').

## **11. ממשק, ניטור ותחזוקה**

הצלחתו של פרוייקט ייצוב תעלה תלויה בסופו של דבר, בתחזוקה שוטפת ולאורך זמן. כאשר מדובר בנחל המיוצב בצומח, אנו דנים במערכת אקולוגית הרגישה ביותר לפגיעה ובתנאי המחיייה שלה. יש להכיר כי התקציב המושג, לעיתים בעמל רב לבצוע פרוייקט ייצוב, מהווה פתח לסעיף תקציבי שוטף לצורכי תחזוקה. תחזוקה נאותה תלויה במידע מהימן ועדכני מהשטח על מצב התעלה, על תגובת התעלה בזמן לאמצעי ייצוב שהוסף לנחל.

### **11.1 . סוגי תחזוקה**

בעיקרון יש כמה צורות של תחזוקת תעלות :

1. **תחזוקה מונעת**: טיפול יסודי באגן ההיקוות הכולל הפחתת נגר משטחים פתוחים ושטחים מבוינים בשיטות שונות של שימור קרקע, באפיקי משנה ע"י אמצעים שונים של עיכוב הנגר והשקעת הסחף, יצירת תשתית לאזור תפעולי בצידי התעלות (דרכי שירות) עם שיפוע הפוך לתעלה והסדרת כניסה מסודרת של עודפי נגר אל התעלה. תקציב תחזוקה זה יכול להתבצע על בסיס קבוע תוך גיבוש סדרי עדיפויות באגן ההיקוות מהמעלה למורד.
2. **תחזוקה שוטפת**: תחזוקה מתוכננת מראש המבוצעת בעונות קבועות וכוללת בתוכה:
  - א. כיסוח הצומח בגדות ובקרקעית התעלה. מעבר של כלי כיסוח שונים, פעם עד שלוש פעמים בשנה תלוי בקצב ההתפתחות של הצמחייה בתעלה. חשוב לציין כי במחקר שפורסם ב 2004 (שקדי וחובריו – 2004) נמצא כי ניתן להפחית משמעותית את קצב הכיסוח. בנספח מס' 2 ניתן למצוא מפרט תחזוקה המבוצע בנחל חרוד במהלך השנים האחרונות.
  - ב. ניקוי התעלה ממפגעים המפריעים למהלך התקין של הזרימה. פסולת מסוגים שונים המושלכת לתעלות וחוסמת את אפיק הזרימה. ענפים ויריעות ניילון הנתקעים במעבירי כביש, בצינורות ובשבכות.
3. **תחזוקת שבר**: תיקון נזקים המתפתחים עקב הזנחה, תיקון נזקים נקודתיים למתקנים בתעלה או לגדות עצמן הקורים באופן אקראי ובלתי צפוי.
4. **תחזוקת כשל**: תחזוקה מיידית כתוצאה מכשל במערכת הניקוז העלולה לסכן חיי אדם, תשתיות או רכוש יקר ערך, שדות וכו'. על רשויות הניקוז האמונות על מערכות הניקוז, להיערך למצב כשל ולהגיב בזמן אמיתי או בסמוך לו.

### **11.2 . פיקוח ואכיפה**

כדי לקיים תחזוקה נאותה יש לסייר ולפקח בתעלות. לאחר עונת הגשמים צריך לעבור על התעלות ולבחון באם יש נזקים המחייבים תיקון. לרוב, סיור כזה יכול להתבצע רק לאחר כיסוח הצמחייה המתפתחת במהלך החורף ומסתירה נזקי ארוזיה והתמוטטויות בגדות. פעולת הפיקוח מדגישה את העובדה כי יש גוף האחראי על עורק הניקוז ועל ניקיון הנחל ולא ניתן להשתמש ברצועת הנחל ללא היתר לשימושים אחרים כגון: בינוי, חקלאות, תשתיות מסוגים שונים, השלכת פסולת וכו'. ע"י פיקוח שוטף ניתן לזהות מפגעים בנחל כבר בשלביהם הראשונים, לפעול לטפל בהם או להסירם. בנושא זה, יש לשתף פעולה בין כל הגורמים הנוגעים בדבר – רשויות ניקוז, המשרד לאיכות הסביבה, רשות הטבע והגנים ורשות העתיקות.

### **11.3 . יישום**

פעולת התחזוקה צריכה לבוא בחשבון כבר בעת תכנון פרויקט ההסדרה/שיקום/ייצוב הנחל. לעיתים החלופות השונות ידרשו משאבי זמן וכסף שונים לחלוטין. מדיניות התחזוקה צריכה להיות מובנת, מוגדרת ולטווח זמן ארוך. במימון הפרוייקט יש להקצות משאבים לפעולות סוגי התחזוקה שהוזכרו בפרק 11.1.

החלופה בתכנון פרויקט צריכה להיות כזאת השואפת לתחזוקה מינימאלית, אלא אם מדובר בפרוייקט המשרת צרכים או היבטים נוספים עבורם נדרשת תחזוקה אינטנסיבית יותר.

## 12. ממשק אקולוגי

נושא הממשק האקולוגי עולה בשנים האחרונות בשל ההכרה ההולכת וגוברת בשמירת הסביבה ומשאביה. פרק זה נשען על מספר עבודות שנעשו בארץ, על הנחיות עבודה שהוצאו ע"י המשרד לאיכות הסביבה, המנהלה לשיקום נחלי ישראל (קפלן, 2001) ומדריך לניהול נחלים של U.S. Army Corps of Engineers (2000).

הנחל הינו בראש ובראשונה מערכת אקולוגית, אשר נועד לה תפקיד מוגדר בהולכה סדירה של מים, ומקום חשוב כאקוסיסטמה בעלת ייחוד אקולוגי ונופי.

שלל יעודיו של הנחל - בין אם הם ייעודי טבע ונוף, או ייעודי רווחה, תיירות ונופש - יצאו נשכרים מקיומה של מערכת אקולוגית יציבה, בריאה, מאוזנת ובת-קיימא. מערכת פגומה או חסרה, תפגע בהשגתו של כל אחד מן הייעודים הללו. תפיסה זו מבוטאת בדברים הבאים:

"מטרת ההתייחסות האקולוגית - להבטיח שתכנית שיקום הנחל תישען על עקרונות אקולוגיים המאפשרים קיום לאורך זמן של המאפיינים הטבעיים של הנחל. כך יתאפשר מיצוי מירבי של "שירותי המערכת ecosystem services" שמספק הנחל. מטרת השיקום להבטיח שמירת ערכי טבע ונוף וקיום תנאים בהם עשוי הנחל וסביבתו לשמש כאתר לפעילות קייט, נופש וספורט. בנוסף לתפקודי הנחל כערוץ ניקוז, השיקום האקולוגי משמש גם כאמצעי להבטחת "בריאות" הנחל לטווח ארוך וצמצום התלות במעורבות אנושית (תחזוקה) בתפקודו" (אביטל גזית, 2001).

הכרה והבנת התהליכים האקולוגיים בנחל הם תנאי הכרחי להטמעתם בתכנית השיקום: "הכוח המניע את העיסוק באקולוגיה הוא הרצון להבין את אופן פעילותו של הטבע. הבנה זו תאפשר לחזות אירועים חשובים המתרחשים במערכת הטבעית, תסייע בניהול וממשק של יחידות טבעיות ... תתרום לשימור ערכי טבע מוגדרים ... ואולי אפילו תאפשר שחזור יחידות פגועות. מאידך גיסא תאפשר הבנה שכזו גם לפתח או לשנות יחידות טבעיות, מטעמים שונים, מתוך הבנת משמעותם של שינויים כאלה והשפעותיהם" (פרבולוצקי ופולק, 2001).

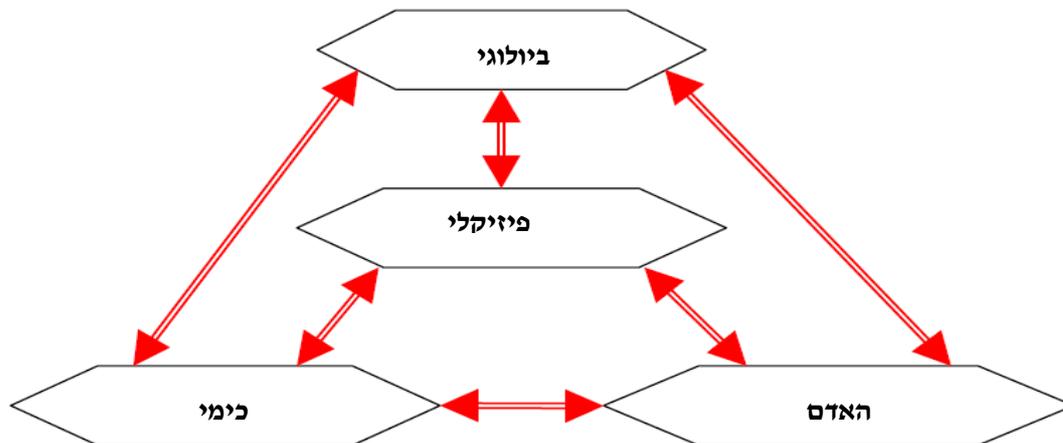
לשון אחר - ניהול וממשק הנחל, שימור ערכי טבע ונוף לאורכו, כמו גם פיתוח גדותיו לשימושי פנאי ותיירות, כל אלה נדרשים להבנת המרכיבים האקולוגיים של מערכתו, על התהליכים המתקיימים בינם לבין עצמם.

בנוסף, נודעת חשיבות רבה להכרת ההתערבות האנושית במכלול מערכות הנחל. רק על בסיס הבנה מקיפה זו, יושגו תוצאות שיקום נאות ומיטבי מבחינת יחסי אדם-סובב.

בניסוי שנערך בנחל ברקן ע"י רשות הטבע והגנים והתחנה לחקר הסחף פותחו ונבדקו מספר שיטות לתחזוקת נחלים תוך שמירה על בתי הגידול הטבעיים והמערכות האקולוגית לאורכם.

שיטות התחזוקה שנבחנו היו: ללא כיסוח כלל, כיסוח של שתי הגדות מדי שנה, כיסוח גדה צפונית בלבד מדי שנה, כיסוח גדה אחת מדי שנה כשבכל שנה גדה אחרת. לא נצפו נזקים משמעותיים לגדות במהלך שלוש שנות המחקר. מתוצאות ניסוי זה עולה כי ניתן לצמצם משמעותית את רמת הכיסוח הצמחיה בגדות הנחל ובכך לאפשר מקום מחסה לעופות ולבעלי חיים.

בכל מערכת אקולוגית מתקיימת מערכת יחסים מורכבת בין מספר משתנים תלויים המכתיבים את המאפיינים הפיזיקליים הביולוגיים והכימיים שבסביבה (איור מס' 38).



### איור מס' 38: מערך היחסים בין המאפיינים השונים במערכות אקולוגיות.

שינוי באחד מהמאפיינים בין אם ע"י אדם ובין אם באופן טבעי, תגרור תגובה לא בהכרח חזויה אשר תגרור תגובה בשאר המאפיינים של המערכת האקולוגית. לכן רצוי שתתקיים הבנה בסיסית של התהליכים הגיאומורפולוגיים, ההידרולוגיים, המערכת האקולוגית בנחל והשפעות האדם והטבע. מספר מאפיינים מבניים נושאים בתפקיד עיקרי בהגדרת פונקצית מערכת אקולוגית:

1. הידרולוגיה והידרוליקה: כוללים כמויות ספיקת נגר על בסיס שנתי, עונתי ואירוע חולף. תיזמון ומשך אירוע הנגר, תהליכים על פני השטח הכוללים מהירות, טורבולנציה, מאמצי גזירה, שפילה ודעיכה במפלסי המים, מי תהום, גודל והסתברות החלקיקים הזורמים ושטף הסחופת באפיק.
2. איכות מים: כמות החמצן המומס במים, המלחים, רעלים וחומרים מזהמים אחרים, חומרים צפים למיניהם, רמת ה-PH, צחנה, שקיפות המים, פרופיל הטמפרטורות במים ועוד.
3. מצב הקרקע: מוגדר ע"י כימיית הקרקע, מידת האירוזיביות, חדירות, תכולה אורגנית, יציבות הקרקע, ההרכב הפיזיקלי הכולל גודל גרגרים ומיקרופאונה ועוד.
4. מצב גיאולוגי: מאופיין ע"י סלע פני הקרקע ותת הקרקע, שכבות קרקע נוספות ואקוויפר.
5. טופוגרפיה: מאופיין ע"י מתאר פני השטח; התבליט (רום ושיפועים), המיקום והחלק היחסי בתוך אגן ההיקוות.
6. מורפולוגיה: מצביע על תצורת המערכת האקולוגית הכוללת מאפייני תת הקרקע. היטל העל והגיאומטריה של הנחל.
7. הצומח ועולם החי: בכלל זה צפיפות, מגוון, שיעור צמיחה, אריכות ימים, נוכחות מינים מקומיים, פרודקטיביות, יציבות, גודל וגיל מיון, השפעה על מינים בסכנת הכחדה, שכיחות מחלות, בעיות גנטיות, דילול גנטי, מידת הרגישות לחומרים רעילים ולחצים ביוטיים שונים.
8. חומרי הזנה, קיבולת נשיאה והעברת מזון: המאפיין הינו פונקציה של חומרי הזנה זמינים ויכולת העברתם בין החלקים השונים של הנחל.

### מאפיינים שימושיים

תפקיד בסיסי של נחלים הינו העברת מים וסחף וכתוצאה מכך מרבית המאפיינים הפיזיקליים, הביולוגיים, הכימיים והחברתיים מושפעים מכך. מעבר המים והסחף מושפעים מפעולות הגומלין עם הגיאולוגיה, האקלים, ההידרולוגיה, תהליכים גיאומורפולוגיים, פדולוגיים וביוטיים.

אדמות הסחף האלוביאליות של גדות הנחל מתפקדות כאקוויפרים רדודים המשפיעים על תנאי לחות הקרקע המעודדים גידול צמחייה. צומח גדות הנחלים תורם לגיאומורפולוגיה של הנחל ולתיפקודים ההידרולוגיים שלו ועוזר לבסס את המרכיבים הבסיסיים של בתי הגידול הביולוגיים הקשורים במים וביבשה כאחד. הצמחייה מהווה מעין כלי קיבול של לחצי מעלה האפיק והיא חשובה ביותר לאיכות המים.

בשל המורכבות הרבה של מאפייני המערכת האקולוגית שהוזכרו, תהליך שיקום אקולוגי לוקה בדרך כלל בהגדרות ברורות של בחינת הכמות והאיכות של פעולות שמבצעים בנחל. מידע מתקבל על הדעת ונוהל ביקורתי מתוחכם אינם בלתי רגילים. דרושים קריטריונים ברורים המגדירים את מימדי המערכת האקולוגית הכוללת את מארג המזון המורכב, בתי הגידול המגוונים, והתהליכים הפיזיים, הכימיכליים והביולוגיים המשתנים. עובדה זאת מחייבת פעולה רב תחומית של גופים שונים בכדי ליצור ניהול תקין של המערכת.

### תיאור אקולוגי

**גיוון:** אחד מהמטרות האקולוגיות החשובות ביותר בשיקום או בניהול תקין של נחל היא הגברת מגוון המינים במערכת. הגיוון הביולוגי ומספר היצורים מזן מסוים הנמצאים במקום נתון בנחל תלויים במגוון בתי הגידול הזמינים. באופן טבעי, מערכות נחל יציבות מאפשרות מגוון רחב של בתי גידול זמינים. אולם הערכה כמותית של מגוון בתי הגידול במערכת הינה בעייתית.

מגוון מינים נמדד ע"י עושר, שפע (מספר מינים מזן מסוים), ומדד המבוסס על פרופורציה באוכלוסיה הינם שלושת הקטגוריות למדידת מגוון מינים.

בתי הגידול בתוך הנחל הינם המקומות בהם פריטים, להקות דגים, או אורגניזמים אחרים יכולים למצוא את המאפיינים הפיזיים והכימיים המתאימים כמקום מחייה עבורם. מאפייני בתי הגידול כוללים איכות מים, מקומות בהם ניתן להשריץ, אזורי הזנה ונתיבי נדידה. איכות בתי הגידול משפיעה על שפע ובריאות האורגניזמים האקוויטיים כמו גם על הרכב המינים.

**מצב הזרימה:** מאפייני הזרימה בזמן ובמרחב כמו זרימה מהירה למול זרימה איטית, עמוקה מול רדודה, טורבולנטית מול מתונה והצפות למול זרימה בחתך האפיק יכולות להשפיע ברמת המיקרו והמאקרו. מינים רבים רגישים למהירות הזרימה בגלל שהיא מייצגת מנגנון עיקרי בהעברת מזון ונוטריינטים ויתר על כן, מהירות הזרימה מסוגלת להגביל את היכולת של אורגניזמים להישאר במיקטע נחל. מיני אורגניזמים יכולים להיות רגישים לשינויים בזרימה בזמן המסוגלים לשנות את המבנה הפיזיקלי של חתך הזרימה.

**כסות:** כסות חתך האפיק בתצורת בולדרים או עצים גדולים יכולה ליצור בתי גידול לחסרי חוליות ודגים, מקומות מחסה ממהירויות הזרימה ומטורפים.

צמחיית הגדות היא מאפיין בעל חשיבות רבה בכסות החתך משום יכולתה לסוכך על הגדות ולהחליש בכך את עוצמת קרינת השמש וכתוצאה מכך את טמפרטורת המים בנחל. שמש ישירה מחממת את המים באופן משמעותי, במיוחד בעונת הקיץ בה המים רדודים. שינויים של  $2-6^{\circ}\text{C}$  יכולים להיות בעלי משמעות ביולוגית ולשנות את דפוסי החיים של המינים האקוויטיים.

**מצע - תשתית:** המצע או תשתית הנחל מורכבים ממגוון רחב של חומרים הכוללים: חרסית, חול, צורות, אבנים, בולדרים, חומר אורגני ועוד. השתנות של התשתית משפיעה על החומרים האורגניים

המצטברים, הייצור והפירוק שלהם. מכלול אוכלוסיית הצומח ובעלי החיים מגיבים למשתנים המושפעים מהשינויים של מצע התשתית.

**בתי הגידול של הגדות ופשט ההצפה:** גבולות האזור הרטוב של הנחל מגדירים גבולות אקולוגיים. המים בגדות שקטים באופן יחסי והסחף יציב כאשר בית הגידול נקבע ע"י אבנים, צמחים ואי סימטריות של הגדה. קצה אזור הגדה הוא חלק מהמסדרון של הנחל ומהווה בית גידול לאוכלוסיות יבשתיות ואקוויטיות כאחד. קו הגבול בין הרטוב והיבש משתנה בהתאם לזרימה ואיתו גם משתנה המיקום הפיזי של בית הגידול ומארג המזון הזמין. פשט ההצפה בכתפי הגדות מהווה אף הוא בית גידול למיני צמחים המסוגלים לחיות עם פחות מים, מיני עופות ובעלי חיים אחרים. בעת ארוע הצפה נשטפים חומרים אורגניים, סחף ונוטריינטים מפשט ההצפה ומגיעים לנחל או שהם מוסעים למקום אחר ומהווים חלק ממארג המזון והאנרגיה הכולל בנחל.

**איכות המים:** איכות המים יכולה להימדד ע"י טמפרטורת המים, החמצן המומס ורמת ה-PH. טמפרטורת המים מווסתת תהליכים ביוכימיים ופיזיולוגיים באורגניזמים אקוויטיים. מערכת היחסים בין טמפרטורה לגדילה, התפתחות והתנהגות הינה חזקה מספיק בכדי להשפיע על מינים מתחום גיאוגרפי רחב. טמפרטורה הינה אחד מהמאפיינים העיקריים המשפיעים על הדגה בנחל דרך ריכוזי החמצן המומס. ריכוזים מתאימים של חמצן מומס הכרחיים לא רק לשם שמירת אורגניזמים אקוויטיים בחיים, אלא גם בכדי לשמר את יצרנותם, מרצם והתפתחותם. החמצן חודר למים דרך ספיגה ישירות מהאטמוספירה וע"י פוטוסינטזה של צמחים. באופן טבעי יש בנחלים חמצן מומס בשפע, כך שלרוב פאונת (עולם החי) הנחלים יש תחום צר בו היא מסוגלת לחיות והיא רגישה ביותר לירידה ולו זמנית של ריכוזי החמצן. דגים יכולים להיחנק למוות כאשר הדרישה לחמצן במים גבוהה עקב תהליכים ביולוגיים וכימיים הצורכים יותר חמצן מכמות החמצן הנכנסת למים ע"י דיפוזיה ופוטוסינטזה. תנאים של מחסור בחמצן מומס במים יכולים להתהוות בזרימה איטית, טמפרטורות גבוהות גידול נמרץ של צמחיית מים, אצות או ריכוזים גבוהים של חומר אורגני.

בנוסף, אוכלוסיות רבות בנחל רגישות לזיהום המקטין את ריכוזי החמצן המומס באופן כימי. **רמת ה-PH:** היצורים החיים בנחלים חיים ומשגשגים לרוב בתנאים פעילות מימנית ניטרלית (רמות PH הנעות בין 6-8). חריגות מתחום זה לכוון סביבה בסיסית או חומצית מגבירות את הלחץ על מגוון רחב של מינים וכתוצאה מזה להיעלמותם. רמות ה-PH יכולות להיות מושפעות מזיהומי שפכים המוזרמים לנחל, נגר עירוני המנקז כבישים או אפילו גשם חומצי הנובע מפליטות של אזורי תעשייה.

**פלורה ופאונה:** השלמות האקולוגית של מסדרון הנחל קשורה ישירות למאפיינים של אוכלוסיות הצומח בנחל ובסביבתו. אוכלוסיות צומח אלו הן בעלות ערך רב למעגל האנרגיה של האוכלוסיות הביולוגיות, מאפשרת בתי גידול פיזיים וקרינת שמש מתונה בנחל ובסביבתו. רגישות בעלי החיים למאפיינים של אוכלוסיית הצומח מאופיינת ומדודה (שקדי וחובריו 2004). מינים מסוימים של בעלי חיים קשורים במינים מסוימים של צמחים או בתקופה מסוימת בחייהם. גם מבנה הצומח בסביבת הנחל קשורה ומשפיעה על היצורים האקוויטיים ע"י אספקת חומר אורגני מתאים למארג המזון הכולל, הצלת המים ויצירת כסות מגוננת על הגדות.

מסדרונות הנחלים משמשים את חיות הבר כבתי גידול ומהווים עבורם כמקור מים במיוחד עבור יונקים. מסדרונות הנחל הם בעלי חשיבות עליונה בתיחזוק מיגוון של בעלי חוליות מכל הסוגים. צפיפות גבוהה של עלים מהווה מחסה ומקום קינון למינים רבים של עופות. מסדרון הנחל עצמו משמש כמסדרון נדידה של מינים של עופות ובעלי חיים. מיגוון בעלי החיים והצמחים מהווה אינדיקטור למצב בו נתון מסדרון הנחל.

לדעתנו יש לקיים מספר דגשים עיקריים בתחזוקת הנחלים כדי להגדיל את אוכלוסיית בעלי החיים והעופות ברצועת הנחל:

1. יש להימנע ככל הניתן מכיסוח אינטנסיבי של גדות הנחלים ויש לשמרם במצבם הטיבעי.
2. להגנת הגדות מפני סחיפה יש למתן שיפועים ולייצב בצומח. הצמחים שיבחרו יהיו ממינים והסוגים של צמחיית גדות מקורית האופיינית לאזור.
3. במידה שרוחב הנחל או עומקו אינם מאפשרים העברת ספיקות שיטפוניות במהירות מספקת, יש לשאוף תחילה, להרחיב את קטעי הנחל הבעייתיים תוך שמירה על שיפוע מתון של הגדות. למזעור הנזקים לחי ולצומח תבצע הרחבת האפיק רק בגדה אחת. מצב זה אפשרי במרבית אגן הנחל, במקומות שבהם הנחל חוצה שטחים חקלאיים. בכל מקרה, יש להימנע מיצירת תעלות מלבניות (כגון, תעלות עם קירות מאונכים המצופים אבן או בטון).
4. כיסוח רצוף של צומח הגדות פוגע במקומות המסתור של בעלי-חיים, באתרי הקינון ובמזונם, ופוגע בקצב התחדשות הצומח. לכן, בעת כיסוח צומח הגדות, מוצע להימנע מלכסח בו-זמנית את שתי הגדות, ובנוסף להשאיר רצועות צומח בהתפתחותו הטבעית ("איים") בכל אחת מהגדות בכתמים שאורכם לא יפחת מאורך השטח המכוסה. יש לשאוף כי בכל קטע של הנחל ישמר המצב הטבעי של לפחות מחצית מהשטח המכוסה בצומח. תכנית הכיסוח תוכן בתיאום עם רשות הניקוז.
5. יש להימנע משרפת צומח גדות כאמצעי לניקוי הצומח. שרפה פוגעת בבעלי-חיים ובאורגניזמים שונים בשכבת הקרקע העליונה, גורמת לסחיפת קרקע מואצת מגדות הנחל ועלולה להתפשט לאזורים נוספים.
6. למניעת פגיעה בציפורים מקננות, לא יבוצע כל טיפול בצומח הגדות בעונת הקינון (מארס-יוני).
7. באירועים שיטפוניים חריגים העולים בעצמתם על הספיקה המרבית יש לאפשר הצפת שטחים חקלאיים. מן הראוי לתכנן את מפלסי הגדות כך שאפשר יהיה לכוון את פשט ההצפה לשטחים פתוחים שיוכלו לקלוט מים מבלי לגרום נזקים לחקלאות. במקביל, יש לתכנן את שטחי החקלאות המועדים להצפה כך שהתנקזותם אחרי שפילת המים תהיה מהירה וללא הפרעות.
8. ככלל, יש להימנע מבניית סכרים או מפלי אבן ובטון בקטעי נחל רטובים וזורמים. במידה שיש צורך אמיתי לבניית סכרים או מפלים, ייעשה הדבר באופן שלא ימנע מעבר חופשי של בעלי-חיים אקוואטיים (למשל, דגים) לאורך הנחל בשני הכיוונים. סכרים ומפלים אלה ייבנו בהתאם לניסיון שנצבר בנחל אלכסנדר ובמקומות אחרים, כולל יצירת "סולמות דגים".
9. הכשרת דרכים בתחום התכנית חיונית לשרות, לתחזוקה, למעבר חקלאים, מטיילים, רוכבי אופניים וכו'. יש למנוע מעבר כלי רכב פרט לצרכי תחזוקה לאורך האפיקים, משיקולים של שמירת טבע ואי פגיעה בנוף, בצומח או בחי.
10. לגשרים ולמתקנים הידראוליים נוספים המתוכננים כגון סכרים, מפלים וכו', השפעה סביבתית על הנחל מבחינת משטר הזרימה, משטר הסעת הסחופות, מבחינה ויזואלית, וכן מבחינת קיטוע של מערכת הנחל – אפשרות למעבר לבני אדם ובעלי חיים, וכן המשכיות של הגדות הצמחייה הטבעית וכו'.

11. היבטים גאומטריים של המתקנים יקבעו בתכנון הידראולי והנדסי מפורט תוך בחינת היבטים חזותיים כגון בטון חשוף, חזיתות של מבנים, אפשרות לתצפית מהדרך, והיבטים סביבתיים נוספים.
12. אין לרסס גדות נחלים או קטעי נחל רטובים (למשל, נגד נביטה או יתושים). במידה שיש בעיית יתושים, יש להשתמש בהדברה ביולוגית (על ידי דגים או באמצעות B.t.i.). בכל מקרה אין להשתמש במלריוול או ב-m.l.o. ובדומיהם בשל הנזק שהם גורמים לאורגניזמים נוספים, כמו גם למפגעי ריח ונוף.

- Bentrup Gary, Hoag J. Chris, 1998.** The practical streambank bioengineering guide. USDA - Natural Resources Conservation Service.
- Barfield, B.J., R.C. Warner, and C.T. Haan. 1981.** Applied Hydrology and Sedimentology for Disturbed Areas. Oklahoma Technical Press
- Drees Lauren. 2001.** Performing Quality Flow Measurements at Mine Sites. National Risk Management Research Laboratory. EPA 600/R-01/043.
- Chow Ven Te. 1959.** Open channel hydraulics. McGraw-hill.
- U.S. Army Corps of Engineers - 1990.** Construction with Large Stone. Engineer Manual 1110-2-2302.
- U.S.D.A. 1966.** Handbook of channel design for soil and water conservation. Prepared By Stillwater Outdoor Hydraulic Laboratory Stillwater, Oklahoma
- Brown, S.A. 1985.** Design of spur-type streambank stabilization structures. FHWA/RD-84/101, Federal Highway Administration, McLean, VA.
- U.S. Army Corps of Engineers 1981** Streambank Erosion Control and Demonstration Project (Section 32), Final Report to Congress, Appendix H - Evaluation of Existing Projects.
- U.S. Army Corps of Engineers. 2000** Stream Management. Water Operations Technical Support Program by J. Craig Fischenich, Hollis Allen.
- U.S. Army Corps of Engineers. 1994** Channel Stability Assessment for Flood Control Projects. Engineer Manual 1110-2-1418.
- FHWA 1985.** Design of spur-type streambank stabilization structures. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Report No. FHWA/RD 84/101, McLean, VA.
- California Department of Highways 1960.** Bank and shore protection in California highway practice. State of California, Documents Section, Sacramento.
- Biedenharn D. S., Elliott C. M., Watson C. C. 1997.** The WES Stream investigation and streambank stabilisation handbook. Waterways Experiment Station (WES). Vicksburg, Mississippi. USA.
- U.S. Department of Agriculture. 1977.** "Design of Open Channels," Technical Release No. 25, Soil Conservation Service, Washington, DC.
- Raudkivi, A. J., and Tan, S. K. 1984.** "Erosion of Cohesive Soils," Journal of Hydraulic Research, Vol 22, No. 4, pp 217-233.

- Chang, H. H. 1980.** Stable Alluvial Canal Design, Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers, Vol, 106, No. HY5, pp 873-891.
- Mevorach, J. Kinori, B.Z. 1984.** Manual of surface drainage engineering Vol II, Elsevier.
- Kuiper, E. 1965.** Water resources development, Butterworths, London, England.
- Lane, E.W. 1953.** Design of stable channels. *Trans. Am. Soc. Civ. Engrs.*, 120:1234-1260.

**שקדי, י. וולצ'אק, מ. סיני, י. שדות, א. ארבל, ש. מולכו, ר. 2004.** תחזוקת נחלים ותעלות ניקוז מתוך היבטים אקולוגיים. דוח סופי למחקר שהוגש להנהלת ענף הקרקע.

**קפלן, מ. 2001.** נחלי ישראל, עקרונות תכנון מסמך מדיניות. המשרד לאיכות הסביבה.

**גזית, א. 2001.** הפרק האקולוגי מתוך: תכנית אב לנחל הקישון, רשות נחל קישון.

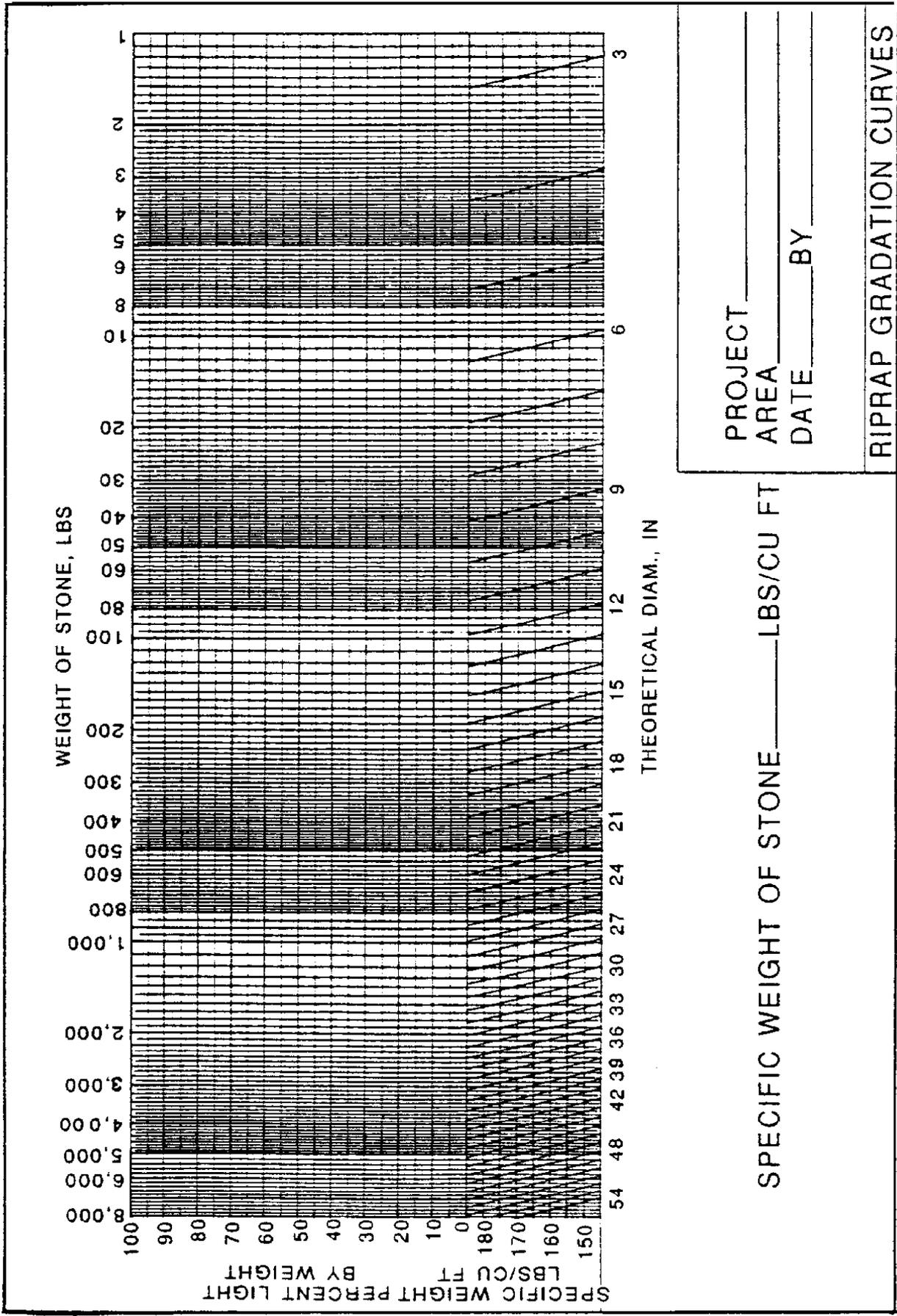
**פרובולצקי, א., ופולק, ג., 2001.** אקולוגיה - התיאוריה והמציאות הישראלית, כרטא, ירושלים.

**כינורי, ב"צ. 1967.** הנדסת ניקוז, מדריך למהנדסי מים, ניקוז על קרקעי, ציפוי תעלות. תה"ל תכנון המים לישראל. חיפה.

**גרותי, ר. ארבל, ש. גטקר, מ. 1999.** חישוב ספיקות שיא בשיטת העבר שיפוע. פרסום M-62 התחנה לחקר הסחף. האגף לשימור קרקע וניקוז.

# נספחים

נספח מס' 1: טבלאות לחישוב דירוג אבן ריפ רפ.  
 איור מס' 39: המשקל המרחבי של אבן ריפ רפ כתלות בקוטר האבן ומשקלה.



טבלה מס' 4 : דירוג אבן ריפ רפ המיועדת להגנה במקומות בעלי טורבולנטיות נמוכה.

D <sub>100</sub> (max) (in.)	100		50		15		D <sub>50</sub> (min) (ft)	D <sub>30</sub> (min) (ft)
	Max	Min	Max <sup>2</sup>	Min	Max <sup>2</sup>	Min		
Specific Weight = 155 pcf								
12	81	32	24	16	12	5	0.48	0.70
15	159	63	47	32	23	10	0.61	0.88
18	274	110	81	55	41	17	0.73	1.06
21	435	174	129	87	64	27	0.85	1.23
24	649	260	192	130	96	41	0.97	1.40
27	924	370	274	185	137	58	1.10	1.59
30	1,268	507	376	254	188	79	1.22	1.77
33	1,688	675	500	338	250	105	1.34	1.94
36	2,191	877	649	438	325	137	1.46	2.11
42	3,480	1,392	1,031	696	516	217	1.70	2.47
48	5,194	2,078	1,539	1,039	769	325	1.95	2.82
54	7,396	2,958	2,191	1,479	1,096	462	2.19	3.17
Specific Weight = 165 pcf								
12	86	35	26	17	13	5	0.48	0.70
15	169	67	50	34	25	11	0.61	0.88
18	292	117	86	58	43	18	0.73	1.06
21	463	185	137	93	69	29	0.85	1.23
24	691	276	205	138	102	43	0.97	1.40
27	984	394	292	197	146	62	1.10	1.59
30	1,350	540	400	270	200	84	1.22	1.77
33	1,797	719	532	359	266	112	1.34	1.96
36	2,331	933	691	467	346	146	1.46	2.11
42	3,704	1,482	1,098	741	549	232	1.70	2.47
48	5,529	2,212	1,638	1,106	819	346	1.95	2.82
54	7,873	3,149	2,335	1,575	1,168	492	2.19	3.17
Specific Weight = 175 pcf								
12	92	37	27	18	14	5	0.48	0.70
15	179	72	53	36	27	11	0.61	0.88
18	309	124	92	62	46	19	0.73	1.06
21	491	196	146	98	73	31	0.85	1.23
24	733	293	217	147	109	46	0.97	1.40
27	1,044	417	309	209	155	65	1.10	1.59
30	1,432	573	424	286	212	89	1.22	1.77
33	1,906	762	565	381	282	119	1.34	1.94
36	2,474	990	733	495	367	155	1.46	2.11
42	3,929	1,571	1,164	786	582	246	1.70	2.47
48	5,864	2,346	1,738	1,173	869	367	1.95	2.82
54	8,350	3,340	2,474	1,670	1,237	522	2.19	3.17

<sup>1</sup> Stone weight limit data from ETL 1110-3-120 (HQUSACE, 1971 (14 May) "Additional Guidance for Riprap Channel Protection, encl. 1," U.S. Government Printing Office, Washington, DC). Relationship between diameter and weight is based on the shape of a sphere.

\* הגדלים בטבלה נתונים ביחידות בריטיות.

## **נספח מס' 2: סיכום פעולות ייצוב בצומח בנחל חרוד ועמל (1998-2005)**

**תכנון, מעקב, וכתובת הדו"ח – יעקב מילשטיין, משרד החקלאות, תא שימור קרקע, מחוז העמקים.**  
פעולות ייצוב בצומח בנחל חרוד, החלו בשנת 1998 בשתילה ידנית של מספר מיני דגן קיציים רב-שנתיים בקטע A- מול קיבוץ ניר דוד (י.מילשטיין- 2000).

במקביל בוצע ניסיון של שתילה ממוכנת עם דוחן-מכחיל בשיפועי דפנות של 3.5:1. בשתילה הידנית נשתלו המינים: דוחן קיפח, עשב פנגולה ודוחן-מכחיל. כאשר בבהונות דפנות הנחל נשתל דוחן-קיפח ומעליו נשתלו עשב פנגולה ודוחן.  
**תוצאות כיסוי צמחי בשנים: (2004-1998)**  
כעבור 6- שנים מגמר השתילה הכיסוי הצמחי ממשיך לייצב את דפנות הנחל. כמו כן התפשטות צמחי הקנה פחתה באופן משמעותי, אודות לכיסוחים מכניים שנתיים. יש לציין כי ההשקיה הופסקה לאחר 3-שנים ובשנת 2001 ניתנה השקיית עזר בכמות של כ-100מק/דונם. (ר. מולכו וחובר" 2004).  
בפברואר 2006 לאחר כיסוח מכאני שבוצע בקיץ 2005 התקבלה התמונה הבאה:  
באפיק נוצרה חתירה לעומק של כ-1-מ" ומשני צדדיה התפתחו צמחיית מים ללא צמחי קנה. על דפנות הנחל ניכרת התחדשות של דוחן-מכחיל ואילו צמחי עשב הפנגולה נעלם.

### **גשר נבות**

ב 1999 בוצעה שתילה נוספת בנחל חרוד בהתאם לתוכנית שלי שהתבססה על יישום מסקנות מתוצאות ניסוי ניר דוד ועל שמירה על האופי האקולוגי של הנחל.  
**תוצאות כיסוי צמחי בשנים (2004-1999)**  
כעבור 5-שנים מגמר השתילה, הכיסוי הצמחי (דוחן-קיפח, מכלוא יבלית ועשב פנגולה) שהיה בשלבי החמה והצהבה שונים, עמד יפה בפני שטפונות ב-2001 ו-2002 ו-2003. בקטע התחנה ההידרומטרית ועד צומת נבות חושבה ספיקת שיא של 28-33 מקש"נ, מהירות ממוצעת 2-מ/שנייה(הסתברות לספיקה זו כ-20%).  
השקיית השטח הופסקה כבר לאחר שנתיים ומאז לא ניתנה כל השקיית עזר.  
בפברואר 2006 לאחר כיסוח מכאני, האפיק ללא חתירות, התפתחו צמחי קנה, אולם בבהונות הנחל משתרע דוחן-קיפח משתלב בתוך צמחי הקנה.  
בדפנות מצוי כיסוי עלוותי יבש של **יבלית מכלוא** שבחלקו נוטה להתחדש, השומר על שלימות הדפנות. לאחר 6- שנים מהשתילה, מתחילה לחדור צמחייה טבעית המורכבת מינבוט וארכובית שבטבטית ומיני חד שנתיים.

בשנת 2000 בוצעה שתילה ידנית מזרחית ומערבית **לגשר 669 החדש(בית אלפא)**. התכנון המקורי לא כלל ייצוב בצומח, אלא התבסס על **דיפון באבן** בעלויות גבוהות, אולם היא שונתה בעקבות פנייה של ר הניקוז למתכנן לשמור על **סביבה ירוקה** בדפנות הנחלים במגמה ליצור ערוצי נחל ירוקים ידידותיים לסביבה, פיתוח אתרי שהייה ובילוי לאורך נחלים בשילוב פיתוח נופי תיירות ברצועת הנחלים. (ר. ניקוז ירדן דרומי 1999).

#### תוצאות כיסוי צמחי (2000-2004)

כעבור 4- שנים מהשתילה, הכיסוי הצמחי המשיך לייצב את דפנות הנחל. באפיק נוצרה התערצות בקטע הקרוב לגשר בעומק של כ-1.5 מ" וברוחב של כ-2 מ" מזרחית ומערבית לגשר. בבהונות הנחל מצוי דוחן ללא צמחי קנה. בדפנות כיסוי צמחי של יבלית מכלוא ועשב פנגולה בשלבי הצהבה. השקיית השטח הופסקה לאחר 3-שנים, ב-2003 ניתנה השקיית עזר בכמות של כ-120 מק/דונם/שנה. קטע שתילה זה עמד יפה מאוד בפני שטפונות 2003. -בו נמדדה ספיקה של כ-63 מק/שנייה ומהירות זרימה של כ-2.8 מ/שנייה. יש לציין כי הספיקה התקרבה מאוד לספיקת התכן. בפברואר 2006 התמונה הנ"ל דומה לאחר כיסוח מכאני שנוצע ב-2005.

#### מזרחית לגשר כביש הפרדסים

**בשנת 2000** בוצעה **שתילה סתוית** בקטע נוסף של הנחל, כמויות המים שניתנו היו פחותות מכמויות המים שניתנו בשתילה הקיצית בגשר 669 החדש. ההשקיה הופסקה לאחר 3-שנים ומאז לא ניתנה כל השקיית עזר.

#### תוצאות כיסוי צמחי (2000-2004)

כעבור 4- שנים מהשתילה דפנות הנחל נשארו שלימות וללא כל חתירות, אולם בקטעים מסוימים נעלמה יבלית המכלוא כנ"ל לגבי הדוחן המכוסה בצמחי קנה. ב-פברואר 2006 התמונה דומה לנ"ל, לאחר הכיסוח המכאני התחדשו צמחי הקנה אולם התחדשות צמחי יבלית המכלוא היא חלשה. יש לציין כי בקטעים מסוימים **מרססים** סביב בורות ביוב המצויים בדופן דרומי וכנראה ישנה השפעה שלילית על הצמחים מסביב. בעקבות הצלחת הייצוב בצומח בקטעים השונים בנחל חרוד, ביקשה ר. ניקוז ירדן דרומי להרחיב את פעולות הייצוב לקטעים נוספים בנחל חרוד. בשנת 2001 הכנתי **תוכנית-אב לייצוב בצומח לנחלי חרוד ועמל**(כביש 669 הישן-כביש גדעונה) התוכנית מתיחסת לשטח של כ-130 דונם, היא מבוססת על עקרונות השתילה שבוצעה בפרוייקטים הקודמים. (י. מילשטיין 2001). באוקטובר 2001 יצא דוח" ביניים פנימי מלווה בתמונות המתעדות את השטפונות בנחל.

#### **ייצוב בצומח בנחל עמל (כביש ניר דוד בית שאן עד כניסה לנחל חרוד)**

רשות ניקוז ירדן דרומי מעוניינת לשים דגש על ההיבט הנופי של הנחל תוך כדי שמירת הדפנות התלולות מחתירות. בנחל ישנה זרימה מתמדת של מים מבריכות דגים ולכן צפויה להתפתח צמחיית קנה לא רצויה על פני הדפנות. במקור תכננתי לשתול ליפיה זוחלת, מין משתרע בקו-המים ומעליה יבלית מכלוא במשולב עם עשב פנגולה ובשולי הדפנות לשתול שורת מיני צמחים חוסכי-מים נמוכים שניתן יהיה לכסח.

בפועל שתלו בבהונות הנחל דוחנן-קיפח ומעליו נשתלה יבלית מכלוא בלבד. השקיה ניתנה בשנתיים הראשונות לשתילה ובשנה השלישית ניתנה השקיית עזר בלבד.

#### תוצאות כיסוי צמחי(2001-2004)

הכיסוי הצמחי שמר יפה על הדפנות התלולות מחתירות כאשר הדוחנן משתרע על הבהונות והיבלית מכסה את שתי הדפנות. באפיק התפתחו צמחי קנה, אולם ניתן למנוע את התפשטותם לדפנות ע"י כיסוחים מכאנים. בפברואר 2006, לאחר שני כיסוחים מכאנים, הבהונות מכוסות בצמחי קנה המכסים על צמחי הדוחנן ומעליהם צמחי יבלית מכלוא בעיקר בגדה הדרומית.

#### **ייצוב בצומח (2002)קטע י"א מהתמזגות נחל שונם עד כביש- 71**

בסוף יולי 2002 בוצעה שתילה על שטח של כ-30 דונם דוחנן קיפח, יבלית מכלוא ועשב פנגולה. ניתנה השקיה בשנת השתילה והשקיית עזר בכמות של כ-50מק/דונם/שנה.

#### תוצאות כיסוי צמחי (2002-2004)

כעבור שנתיים הכיסוי הצמחי שמר יפה מאוד על דפנות הנחל. כמוכן האפיק נשאר ללא חתירות אולם עם צמחי קנה וצמחיית מים. ב-2003 עדיין אין לראות צמחי דוחנן בנחל, אולם בשנת 2004 החלו להופיע על הבהונות. לעומת זאת מיני היבלית מכלוא ועשב פנגולה מתמידים בהתפשטותם על הדפנות ומצטיינים בהתחדשותם לאחר כיסוחם ועם רדת הגשמים הראשונים. בפברואר 2006 לאחר כיסוח מכאני סתווי, שתי דפנות הנחל נשארו שלימות ללא חתירות. כמו-כן גם האפיק ללא חתירות. בבהונות הנחל שולט דוחנן-מכחיל ואילו באפיק מתחדשת צמחיית מים (סוף וכו") אולם צמחי הקנה נעלמו ברוב הקטעים השתולים אודות לכיסוחים. יש לציין כי גם היבלית ודוחנן היו השנה בשלבים מתקדמים של הצהבה והתייבשות, אולם התאוששו יפה עם הגשמים.

#### **מסקנות**

##### **תחזוקה בממשק כיסוח**

לאחר תקופת ביסוס שמתחילה כ-6 שנים מהשתילה, מומלץ להמשיך בכיסוחים דו-שנתיים: כיסוח באביב וכיסוח שני בסתיו המאוחר. היות וכיסוח מוקדם בסתיו מאפשר התחדשות מעצימה של צמחי הקנה ולקראת החורף נאלצים לבצע כיסוח נוסף הכרוך בעלויות גבוהות. ישנן שנים מרובות גשמים בהן מתפתחת צמחיית רחבי-עלים חד-שנתיים אשר מונעת את התפתחות של המינים השתולים בכך שהיא מצלילה עליהם. במצב כזה חיוני לבצע כיסוח נוסף מוקדם בסתיו.

##### **כמויות מים**

כמות מים ממוצעת לדונם בשנה נעה בין 400-500 מק/דונם בשנה הראשונה של השתילה

בשנים הבאות ניתן להפחית בכמות בהתאם למצב הרטיבות בקרקע.  
בשנים שחונות במיוחד יש לתת השקיית עזר בכמות של כ-100 מק/דונם עד להתבססות של צמחייה טבעית בשטח.

### **מועד השתילה**

מועד השתילה הרצוי הוא יוני יולי , בתקופה זו מתפתח כיסוי צמחי יעיל על פני הדפנות כבר כעבור חודשיים –שלושה מהשתילה וניתן להפחית בכמויות המים .

### **מערכת השקיה**

מומלץ לשלב את מערכת הטפטוף הנחוצה להשקיית ביסוס עם המטרה קבועה המבוססת על חיבור קו ממטירים נייד לנקודות יציאה קבועות במרחק של כ-100 מ"בין נקודה לנקודה. כדאי לבחון החלפת מערכת הטפטוף בהמטרה קבועה גם לתקופת הביסוס ע"י כך נימנע סכנת סחיפת הטפטפות בשיטפונות וסכנת פגיעה בצנרת של מכרסמים.

### **שתילה ממוכנת**

בעבר המלצתי וגם כיום מומלץ לבצע ניסוי של שתילה ממוכנת החל משיפועי דפנות 1: 3.5 עם דוחן-מכחיל ודוחן-קיפח .  
בשיפועי דפנות התלולות מ1: 3.5 מוצע לערוך ניסוי חדש המבוסס על חיתוך פיזור והצנעת שלוחות בצורה מכאנית.(א. שוחט-2005).  
לפעולות של חיתוך ופיזור קיים מערך של כלים חקלאיים אולם יש ליישם למטרת ייצוב בצומח. לעומת זאת יש מקום לבחון פיתוח זרוע הידראולית שעליה ניתן יהיה להרכיב קלטר/דיסק/מעגילה. זרוע זו תשמש גם לזריעה ולהצנעה של מינים חד-שנתיים בסתיו בתור אמצעי ייצוב ראשוני, כמו-כן, ניתן יהיה לזרוע מינים רב-שנתיים, דגנים וקיטניות למניעת גלישות רדודות מדפנות תעלות ניקוז וסוללות.(י. מילשטיין-2005).

### **הישרדות מינים רב-שנתיים**

**דוחן-קיפח-המין העמיד ביותר** מבין שאר המינים, בגלל **התחדשותו המהירה** בזרימות קיציות. מין זה מותאם לשתילה לבהונות הנחל, אולם הוא נוטה להתפשט גם לעבר הדפנות ולדחוק צמחייה חד-שנתית וגם לצמצם את התפתחות צמחי הקנה בדפנות הנחל.  
**מכלוא יבלית** (-coast cross) -מין זה מחזיק מעמד יפה עד ל-5 שנים מהשתילה, לאחר מכן, נוטה להצהיב ולהתייבש ללא תוספת של מים.  
**דוחן-מכחיל-מיו** זה בעל כושר הישרדות גבוה, אולם התחדשותו היא איטית .  
לאחר שנים שחונות, מתחדש עם הגשמים(ניר דוד ).  
היות והדוחן נשתל בחלק העליון של דפנות הנחל, הוא מצוי במרחק מהמים וזו סיבה טובה להתחדשותו האיטית בסביבה יבשה.  
**עשב פנגולה-המין הפחות עמיד לתנאי יובש**, בניר דוד ובגשר נבות **נעלם** כעבור כ-5 שנים.

## **סיכום**

פעולות ייצוב בצומח שבוצעו בנחלי חרוד ועמל(1998-2002), הוכחו כיעילות במניעת חתירות בדפנות הנחלים, הפחתה משמעותית בהתפתחות צמחי הקנה בדפנות ותרמו רבות לשיקומם. לאחר הסדרת נחל חרוד ב-1998, ניטעו חורשות של עצי בוסתן (שקדים, רימונים, זיתים, חרובים וכו') ע"י קק"ל במקומות שונים לאורך הנחל. בעקבות ייצוב דפנות הנחל בצומח, ניטעו במספר קטעים שיחים ועצים בחלק העליון של דפנות הנחל צמחייה אופיינית לגדות נחלים בישראל (הרדוף הנחלים, ערבה, שיח אברהם, צפצפה וכו') זאת למרות שנטיעה בתחום החתך הזורם של הנחל בעייתית מבחינת הניקוז(לא מוכד). מעבר לכך, יש להקפיד כי כל נטיעה לא תהווה הפרעה לתחזוקה השוטפת(צפיפות, מרווחים וכו') ותאפשר לעבוד עם כלים מכנים לתיקון נזקים חריגים בנחל.

בשנים האחרונות ניכרת מגמה לשתול שיחים גם בשטחים שיוצבו בצומח, אולם נהיו חשופים, בשטחים אלו מרססים להשמדת עשבייה לפני הנטיעה ובכך יוצרים שטחים סטריליים מצמחייה ומגדילים את סכנת התמוטטות דפנות הנחל לזרימות שטפוניות.

יתרה מזאת במסגרת פעולות ריסוס להדברת יתושים החיוניות מבחינה תברואתית נפגעה התפתחות הדוחן במספר קטעי ייצוב. לכן יש להקפיד לרסס רק על פני קרקעית האפיק ולהימנע ככל האפשר מריסוס בהונות הנחל.

ככלל מומלץ להימנע מריסוסי הדברת עשנים ולהעדיף כיסוחים מכאניים.

ייצוב בצומח חיוני בעיקר בשנה הראשונה להסדרת הנחל כאשר הקרקע חשופה מצמחייה ויש חשש להתמוטטות הדפנות עקב זרימות שטפוניות, במשך השנים המינים השתולים הולכים ונעלמים ובמקומם ניכנסת צמחייה טבעית של מינים חד ורב שנתיים רצויים ויש לשמרם ע"י כיסוחים שנתיים והשקיית עזר בשנים שחונות במיוחד.

**שיקום דפנות נחלי חרוד ועמל מהווה מודל לשיקום דפנות נחלים בהם מתקיימת קיצית.**

**שיטת ייצוב בצומח היא דרך איכותית לייצוב דפנות נחלים היא זולה בהרבה מייצוב באבן, נוחה לתחזוקה ותורמת רבות לאיכות הסביבה.**

**תפיסה זאת מאפשרת לראות את הנחל לא רק כעורק ניקוז אלא גם כאתר משיכה לתושבי הסביבה ולמטיילים.**

## **מקורות**

ט. קיפניס י. מילשטיין, מ. אמזלג, א. שחר(1985)-ייצוב אפיקי נחלים באמצעות מכלוא יבלית Coast Cross 1.

ש. מריש ז"ל(1980)-ייצוב צמחי בדרכי מים ותעלות, הוצאת האגף לשימור קרקע וניקוז, משרד החקלאות. המדריך המקצועי.

י. מילשטיין (1991)- שתילה ממוכנת לייצוב דרכי מים במטעים באדמות כבדות השדה כרך ע"א חוברת י"י.

מ. קרין (1997)-שיקום נחל חרוד, מים והשקיה, גיליון 366.

ר. מולכו, ש. ארבל, י. מילשטיין, ולדימיר קורפין (2004)- סקר אמצעי ייצוב הנדסיים ובצומח בנחלים ותעלות עפר, דו"ח ביניים(2003), התחנה לחקר הסחף, תחנה ניסיונית ערבה(ערדום).

רשות ניקוז ירדן דרומי(1999)-ייצוב צמחי, פרסום פנימי.

י. מילשטיין(2000)-יישום שיטות לייצוב צמחי במסגרת שיקום נחל חרוד, מים והשקיה

- י.מילשטיין(2001)-תכנית- אב לביצוע פרויקטים בייצוב צמחי, נחלי חרוד ועמל(דו"ח ביניים).
- י.מילשטיין(2004)-שיקום דפנות נחלי חרוד ועמל כמודל לשיקום דפנות נחלים בהם מתקיימת זרימה קיצית, מים והשקיה.
- י.מילשטיין(2005)-לשלוט על הזרימה, עקרונות היישום של שתילה ממוכנת לייצוב דפנות תעלות ונחלים באמצעות צמחייה, יבול שיא, גיליון 14.
- א. שוחט (2005)-ייצוב גדות, יבול שיא, גיליון 13.

### נספח 3: מפרט לביצוע יריעות לא ארוגות

כללי: הפרדה וסינון עבור תעלות ניקוז תעשה באמצעות יריעות לא ארוגות מסוג אורים העשויות מסיבי פוליאסטר. להלן מס' דוגמאות של נתונים טכניים של בדים לא ארוגים מסוג אורים  
נתונים טכניים:

היריעה אורים מיוצרת בדרגות שונות של משקל החל מ 200 גרם/מ<sup>2</sup> ועד ל 500 גרם/מ<sup>2</sup> בהתאם לצורך.

טבלה מס' 5 - תכונות טכניות – אורים 250 :

<u>אורים 250</u>	<u>תקן</u>	<u>סוג בדיקה</u>
פוליאסטר		סוג
250		משקל [גרם/מ <sup>2</sup> ]
>110	ASTM D 4632 GRAP	עיבור בקריעה MD [%]
>110	ASTM D 4632 GRAP	עיבור בקריעה CDM [%]
650	ASTM D 4632 GRAP	חוזק בקריעה MD [N]
550	ASTM D 4632 GRAP	חוזק בקריעה MD [N]
350	ASTM D4833	עמידות בניקוב [N]
1600	ASTM D 3786	חוזק פקיעה [kpa]
300	ASTM D 4533	חוזק לקריעה [N]
1.11	ASTM D 4491	מוליכות מים [s <sup>-1</sup> ]
0.15	ASTM D 4751	גודל נקבים AOS [מ"מ]

טבלה מס' 6 - תכונות טכניות – אורים 300 :

<u>אורים 300</u>	<u>תקן</u>	<u>סוג בדיקה</u>
פוליאסטר		סוג
300		משקל [גרם/מ <sup>2</sup> ]
>110	ASTM D 4632 GRAP	עיבור בקריעה MD [%]
>110	ASTM D 4632 GRAP	עיבור בקריעה CDM [%]
700	ASTM D 4632 GRAP	חוזק בקריעה MD [N]
600	ASTM D 4632 GRAP	חוזק בקריעה MD [N]
545	ASTM D4833	עמידות בניקוב [N]
2585	ASTM D 3786	חוזק פקיעה [kpa]
320	ASTM D 4533	חוזק לקריעה [N]
1.1	ASTM D 4491	מוליכות מים [s <sup>-1</sup> ]
0.11	ASTM D 4751	גודל נקבים AOS [מ"מ]

סוג בדיקה	תקן	אורים 500
סוג		פוליאסטר
משקל [גרם/מ <sup>2</sup> ]		500
עיבור בקריעה MD [%]	ASTM D 4632 GRAP	>110
עיבור בקריעה CDM [%]	ASTM D 4632 GRAP	>110
חוזק בקריעה MD [N]	ASTM D 4632 GRAP	1000
חוזק בקריעה MD [N]	ASTM D 4632 GRAP	1200
עמידות בניקוב [N]	ASTM D4833	715
חוזק פקיעה [kpa]	ASTM D 3786	2840
חוזק לקריעה [N]	ASTM D 4533	550/700
מוליכות מים [s <sup>-1</sup> ]	ASTM D 4491	0.78
גודל נקבים AOS [מ"מ]	ASTM D 4751	5
		0.1

הובלה ואחסנה :

יריעות לא ארוגות מסופקות לאתר בגלילים, ברוחב 2.5 מטר, הגליל עטוף לצורך הגנה בשק אטום. שק זה נושא תג הכולל נתוני היריעה וכן את מספר האצווה. אחסנת הגלילים באתר תעשה בתנאים נקיים ויבשים, ויש להגן על הגלילים בפני נזקים מכאניים, וכן לכסותם בכדי למנוע קרינת שמש ישירה (U.V).

שלבי העבודה :

1. הכנת השטח :

- 1.1 חישוב ופניני השטח מעצמים זרים כגון שורשים, בולדרים ומכשולים אחרים.
- 1.2 לאחר קבלת שטח פנוי ונקי יש לוודא כי השטח יהיה בשיפוע המתאים ויהודק לדרגה הנדרשת עפ"י הדרישות המופיעות בפרק חומר המילוי והוראות המפקח בשטח.

2. פריסת היריעה

- 2.1 את היריעה יש לפרוס באופן שלא יוצרו קמטים, קפלים ו/או תזוזות אחרות.
- 2.2 היריעה תיפרס בתחתית ובצמוד לדפנות התעלה כך שיוותר מכל צד אורך יריעה מספיק על מנת לבצע את הסגירה העליונה כמתואר תכניות.
- 2.3 החפיפות בין יריעות מקבילות יהיו 50 ס"מ לפחות, יש לאבטח את החפיפות בעזרת יתד ו/או פינים במרחקים של 4 מטר לאורך החפיפה.
- 2.4 חפיפה אורכית בסיום גליל 1 מטר אורך.

3. מילוי על גבי יריעת היריעה :

3.1 חומר המילוי בהתאם לסעיף חומר המילוי במפרט.

3.2 את המילוי יש להניח תוך כדי הקפדה על זהירות מרבית בכדי למנוע נזק מכאני כתוצאה מעבודת השפיכה והפיזור.

4. הידוק :

4.1 הידוק וצפיפות החומר ותכונותיו יעשה בהתאם להנחיות המתכנן במפרט חומר המילוי.

#### נספח 4: נתוני יצרן – כוורות דופן מחוררת ומחוספסת

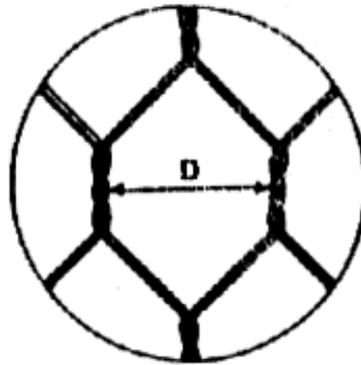
<u>מס'</u>	<u>סוג בדיקה</u>	<u>ערך נדרש</u>	<u>שיטת בדיקה</u>												
1	סוג חומר	HDPE													
2	צפיפות (גר/סמ"ק)	0.935-0.965	ASTM D 1505												
3	תכולת פחמן (אחוזים מהמסה)	1.5-2.5	ASTM D 1630												
4	עמידות בהיווצרות סדקי מעמס (שעות)	3000 מינימום	ASTM D 1693												
5	צבע	חום													
6	מיצבי צבע HALS	2%													
7	סוג דופן	מחוספסת													
8	עובי דופן (מ"מ)	1.5 ± 10%	ASTM D 751 ANNEX-A												
9	סוג חיבור	הלחמה אולטרה סונית מלאה													
10	עומק תא/ מינימום כוח קריעה של חיבור בקילוף (ניוטון)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>עומק התא</th> <th>כוח קריעה</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5</td> <td>575</td> </tr> <tr> <td>7.5</td> <td>862</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>1150</td> </tr> <tr> <td>15</td> <td>1725</td> </tr> <tr> <td>20</td> <td>2300</td> </tr> </tbody> </table>	עומק התא	כוח קריעה	5	575	7.5	862	10	1150	15	1725	20	2300	PTM 0312
עומק התא	כוח קריעה														
5	575														
7.5	862														
10	1150														
15	1725														
20	2300														
11	היריעה תעמוד בכוח קריעה של 72.5 ק"ג למשך 30 יום רוחב היריעה 100 מ"מ והבדיקה תבוצע בטמפי' החדר עפ"י ASTM E 41		PTM 0313												
12	קוטר חור (מ"מ)	10													
13	מרחק בין מרכזי חורים סמוכים יהיה 19 מ"מ בין טורים אנכים ו- 12 מ"מ בין שורות אופקיות														
14	מרחק החורים מקצוות צדי התאים יהיה 25 מ"מ														
15	שטח החורים כ- 16% משטח היריעה														

## נספח 5: מפרט טכני להתקנת גביונים/מזרונים

מזרונים וגביונים מיושמים מעל ל-100 שנה. המוצר הינו פשוט וקל לישום. מעקב אחר הוראות ההתקנה המפורטות במסמך זה יאפשרו את ביצוע העבודה ברמה הנדסית גבוהה.

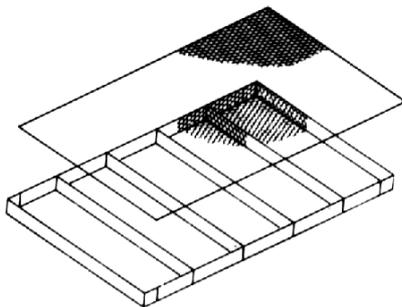
### נתונים טכניים

ארגזים במידות שונות המיוצרים מרשת פלדה מגולוונת השזורה בשזירה כפולה double twist בצורת משושים. הרשת מצופה ב Galmac בכמות העומדת בתקן האירופי : EN 10244-2. הגביונים ו/או המזרונים יהיו מאושרים ע"י ה- BBA (British Board of Agreement) מכון ממשלתי בריטי המאשר את נכונות תכונות המוצר והאופן המומלץ לתכנון. סוגים וגדלים של המזרונים/גביונים יופיעו בטבלאות 1,2 בהתאמה.



איור מס' 1 – גודל עין

### טבלה מס' 8 –מזרונים

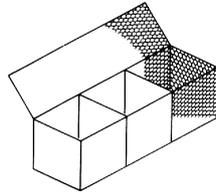
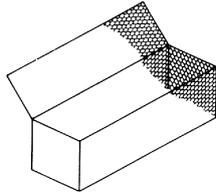


גודל עין 8'6 [ס"מ]		
גודל		
אורך [מ']	רוחב [מ']	גובה [מ']
4	2,3	0.17
6	2,3	0.17
4	2,3	0.23
6	2,3	0.23
4	2,3	0.30
5	2,3	0.30
6	2,3	0.30

\*\*במזרונים קוטר התיל  $\Phi = 2.2$  מ"מ

\*\*\*במזרונים עם ציפוי P.V.C קוטר התיל בלי הציפוי  $\Phi = 2.2$  מ"מ, עם הציפוי  $\Phi = 3.2$  מ"מ.

**טבלה מס' 9 – גביונים :**



גודל עין 10'8 [ס"מ]		
גובה [מ']	רוחב [מ']	אורך [מ']
0.5	1,2	2
0.5	1,2	3
0.5	1,2	4
1	1,2	1.5
1	1,2	2
1	1,2	3
1	1,2	4

\*\* בגביונים קוטר התיל  $\Phi = 3.0$  מ"מ .

\*\*\* בגביונים מצופים P.V.C קוטר התיל בלי הצפוי  $\Phi = 2.7$  מ"מ , עם הצפוי  $\Phi = 3.7$  מ"מ .

**טבלת מס' 10 – נתונים טכניים של התיל עפ"י EN 10244-2**

קוטר תיל [מ"מ]	2.0	2.2	2.4	2.7	3.0
משקל שכבת Galmac $gr / m^2$	215	230	230	245	255
סטייה בקוטר התיל [מ"מ]	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07

**אריזה:**

- המזרונים ו/או הגביונים מגיעים לאתר כשהם משוטחים ומקופלים בחבילות.
- הגביונים ארוזים בחבילות, גביון כולל בתוכו מכסה + מחיצות.
- חבילות המזרונים מורכבים מבסיסים (Bases) ומכסים (Lids) כאשר הבסיסים מכילים את המחיצות.

**הובלה ואחסנה:**

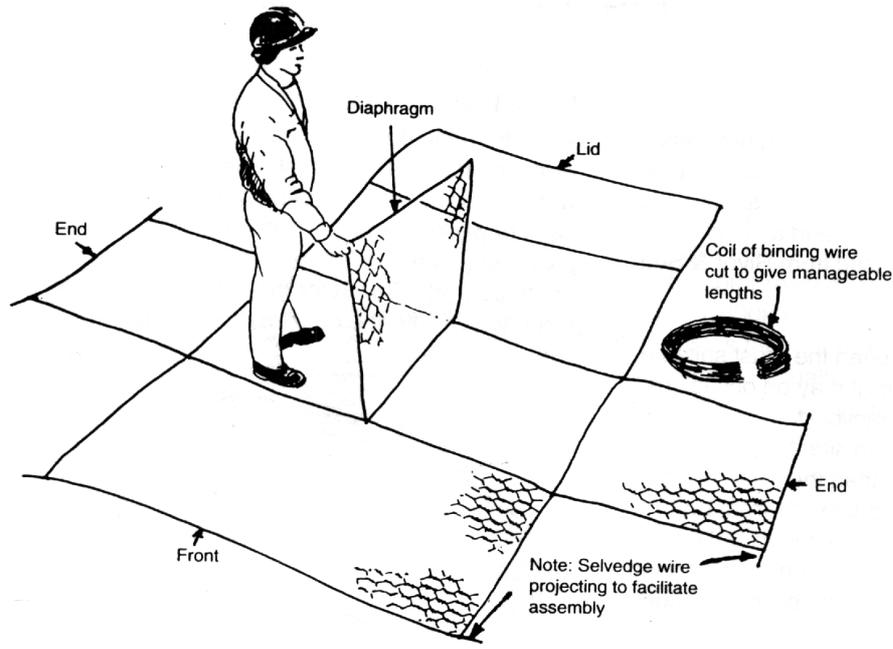
הגביונים ומזרונים מסופקים לאתר בחבילות סגורות , לכל חבילה מוצמד תג עם ציון : גודל עין , עובי תיל , מספר יחידות , סוג ושם החברה המספקת .  
בזמן הגעת הגביונים/ המזרונים לאתר יש לאחסן את החבילות בתנאים נקיים , יש להגן על החבילות בפני נזקים מכניים .

**הכנת השטח להרכבת המזרון/גביון :**

1. חישוף פינוי השטח מעצמים זרים כגון : שורשים, בולדרים ומכשולים אחרים.
2. לאחר קבלת שטח נקי יש לוודא כי השטח מהודק בדרגת ההידוק הנדרשת במפרט .

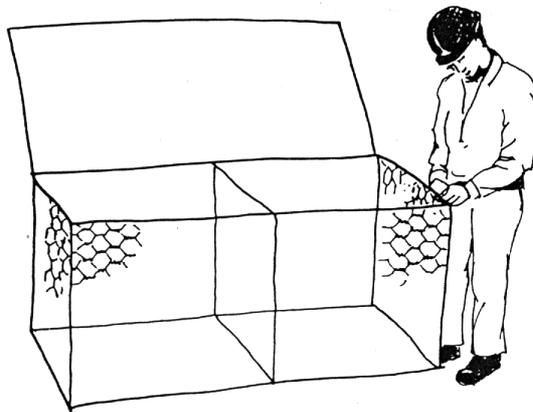
**הרכבת הגביון/מזרון :**

1. פתח את חבילה והוצא ממנה יחידה , הנח אותה על משטח אופקי .
2. פתח את הגביון או את המזרון על משטח נקי וחשוף מבולדרים ופסולת אחרת אשר יכולה להסב נזק למוצר . הפתיחה תהיה בצורה אופקית כמתואר באיור מס' 2 .  
במזרונים יונח הבסיס ולאחר מילוי באבנים ייסגר ע"י שימוש במכסה .



איור מס' 2 .

3. הרם את צידי הגביון/מזרון ואת החזית והגב וחבר בניהם ע"י טבעות בכל פינה , הצב את המחיצה וחברה אל חזית וגב הגביון /מזרון באמצעות טבעות כמתואר באיור מס' 3 .
4. הנח את הגביון/מזרון במקום המיועד לו וחברו לכל הגביונים/ מזרונים הסובבים אותו כל עין שניה (עין כן , עין לא) . בגביונים צד אליו מחובר המכסה יהיה בחזית כך שהסגירה תהיה מוסתרת (מאחורי החזית) .



איור מס' 3 .

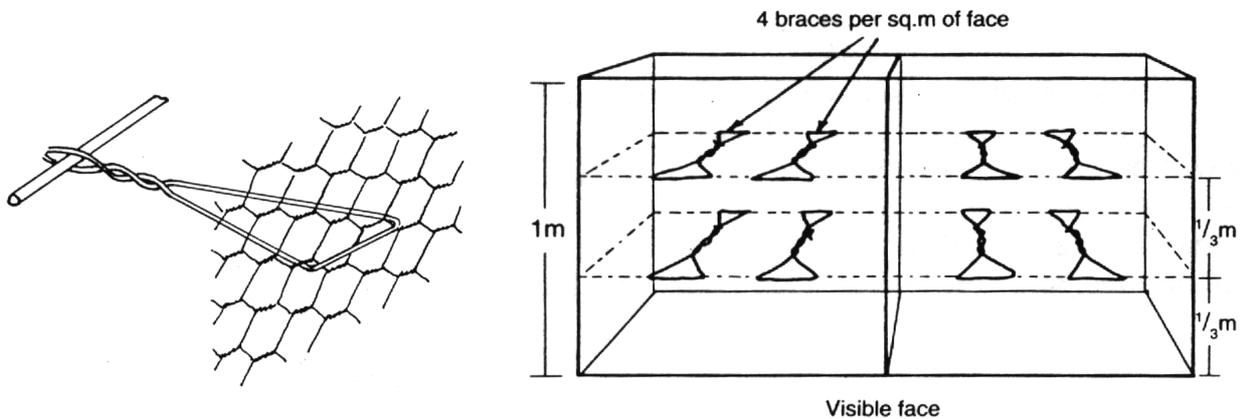
**הנחת הגביון/מזרון וחיבורו עם שאר הגביונים/מזרונים וקרקעית הבסיס .**

1. הגביונים ו/או המזרונים יונחו על גבי על גבי יריעות בד גיאוטכני במשקל 300 גר"/מ"ר , היריעה תהיה עמידה בפני קרינת U.V . אין למתוח את הבד בזמן פריסתו. הבד יתרומם עד לקצה נקודת המגע שבין הגביון ו/או המזרון עם הקרקע (כך שלא יהיה מגע ישיר בין הקרקע לבין הגביון/מזרון ) היריעה הגיאוטכנית תפריד בין קרקע לבין הגביון/מזרון .

2. דפנות הגביונים/מזרונים יהיו מישוריים ויעשו בקווים ישרים בכל כיוונים, יש להקפיד על קווים ישרים בחזית הגביונים/מזרונים.
3. את מזרונים/ הגביונים יש לעגן בקרקע באמצעות יתדות ברזל בקוטר 14 מ"מ ובאורך 100 ס"מ, עיגון הגביונים/מזרונים לקרקע יעשה ע"י 4 יתדות בארבע פינות הגביון/מזרון.
4. בנוסף לאמור בסעיף 4 יותקנו יתדות במקומות שיקבעו ע"י המפקח לפי הצורך.
5. כל גביון/מזרון יורכב בהתאם למפרט בסעיף הרכבת הגביון/מזרון.
6. חיבור בין שני גביונים / מזרונים יעשה ע"י טבעות כל עין שניה (עין כן, עין לא).
7. פינות אשר להם אין מגע עם גביון/מזרון נוסף יש לסגורם באמצעות טבעות כל עין שניה.
8. לאחר חיבור לפי המפורט לעיל יש לוודא שהגביונים מתוחים ע"י תיל מתיחה בגבהים של  $1/3$  ו-  $2/3$  מ' ובכמות של 4 יחידות למ"ר. (ע"פי המתואר באיור מס' 4) וזאת על מנת לאפשר חזית אחידה וישירה. בגביון בגובה של חצי מטר יש להניח את התיל בגובה 0.25 מ' ובכמות של 4 יחידות למ"ר.

### היריעה הגיאוטכנית

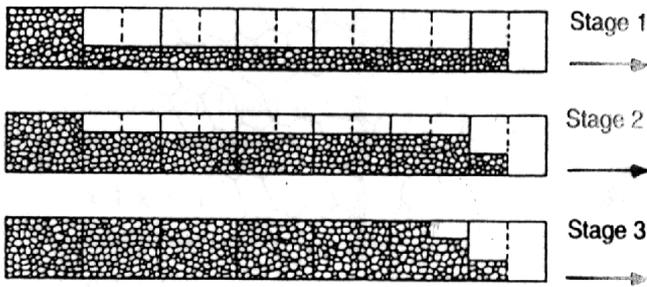
על פני תוואי יסוד הקירות ובכל מישור מגע בין קרקע לגביונים/ מזרונים /או בין קרקע למילוי אבן מאחורי הגביון/מזרון יש לפרוש יריעה גיאוטכנית מנקזת. היריעה הגיאוטכנית תונח כך שיתקבל משטח ישר, מבלי לגרום למתיחת היריעה. חיבור בין חלקי יריעות יבוצע בחפיפה שלא תפחת מ- 40 ס"מ. היריעה תהיה מפוליפרופילאן/פוליאסטר ומיוצרת בתהליך מיחוט.



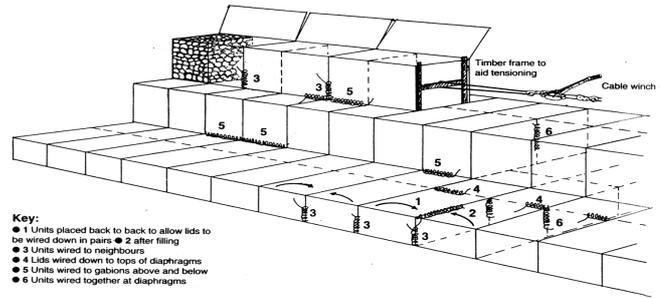
איור מס' 4.

### מילוי האבן

1. גודל וסוג האבן יפורטו בסעיף המיועד לכך.
  2. האבנים יסודרו בתוך הארגז בעבודת ידיים, תוך שמירה על מינימום חללים ומרווחים בין האבנים.
- חזית שתישאר חשופה לעין יש לסדרה ידנית עם אבנים חסרי פינות חדות.**
3. יש להשתמש במתיחת הגביון בכדי ליצור חזית ישרה ואחידה ראה איור מס' 5.
  4. מילוי הגביונים יעשה בדרוג כאשר לאחר מילוי הגביון הראשון ימולאו הגביונים בגובה  $1/3$  ו-  $2/3$  כמתואר באיור מס' 6.
  5. מילוי האבן יהיה כ- 2-4 ס"מ מעל גובה הדפנות הגביון/מזרון.



ציור מס' 6 .



ציור מס' 5 .

**סגירה**

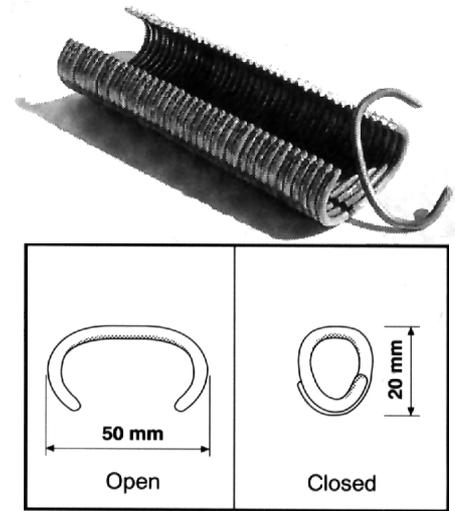
1. לאחר מילוי האבן לגובה המתאים יש לסגור את המכסים .
2. הסגירה תעשה ע"י, טבעות כל עין שניה (עין כן עין לא ) ובזמן הסגירה יש לחבר את גביונים הסמוכים ע"י חיבור טבעות .

**סטייה:**

1. הנחת ארגזי הגביונים/מזרונים תבוצע כך שהסטייה ביחס לקווי התכנון לא תעלה על 3 ס"מ.
2. גביונים אשר לא יעמדו בדרישה זו יפורקו ע"י הקבלן על חשבונו ויבנו מחדש על חשבונו.

**הקשירה בין ארגזי ו/או מזרוני הגביונים:**

הקשירה תבוצע באמצעות טבעות פלדה מיוחדות. הטבעות יקשרו ע"י מכופף פנאומטי (איור מס' 7) הטעון בטבעות. הטבעות יהיו בעלות חוזק מתיחה של 170 ק"ג/מ"מ וקוטר 3.0 מ"מ .



איור מס' 7

סוג הטבעות עפ"י סוגי הגביון/מזרון :

1. טבעות פלדה מצופה אבץ במשקל מינימלי של 270 גרם/מ"ר לשימוש בגביונים/מזרונים שאינם מצופים ב- P.V.C .
2. טבעות מנירוסטה Stainless steel לשימוש בארגזים גביונים /מזרונים מצופים P.V.C

### טבלה מס- 11 מספר טבעות לפי סוג מזרון/גביון

מזרון		גביון		סוג
0.3-0.25	0.23-0.15	0.5	1.00	גובה [מ']
20-15	18-15	60-40	40-30	מספר טבעות מ"ק, מ"ר

\*\* כמות הטבעות בטבלה עפ"י ישום טבעת כל בעין שניה .

### האבנים למילוי הגביונים/מזרונים:

- האבנים שימשו למילוי הגביונים/מזרונים יהיו ממקור מאושר ויעמדו בדרישות המתוארות :
1. אבן קשה, הומוגנית, ללא סדקים ובקיעים וללא קצוות חדים, נקיה מכל חומר אורגני זר, חופשית ממבני תאים וללא משטחים חלשים. האבן צריכה להתנגד לבליה פיזית כגון רוחות ומשקעים העלולים לגרום להתפרקותה.
  2. המשקל הסגולי המינימלי של האבן יהיה לפחות 2.4 טון/מ"ק.
  3. מקדם הספיגות של האבן לא יעלה על 1.5%.
  4. בדיקות האבן תבוצענה בהתאם לדרישות המפקח באתר, חוזק הלחיצה במצב רוויה יהיה 5000 ניוטון/סמ"ר.
  5. אין להשתמש באבן כורכר או אבן חולית גירית שאינה עומדת בדרישות הנ"ל (כגון קירטון).
  6. כמות שברי אבן או חצץ לא תעלה על 5% מכלל הנפח.
  7. גודל האבנים עבור הגביונים יהיה בתחום 120 מ"מ - 200 מ"מ כפי יצויין בטבלה הבא .
  8. אין להכניס לתוך הגביונים אבן אשר קוטר קטן מגודל העין של הגביון.
  9. יש למלא את הגביון באבנים בצורה צפופה, כך שאחוז החללים יהיה מינימלי ותוך הקפדה שלא ייווצרו שקעים ו/או בליטות בפני הגביון.
  10. בפאת הגביון שתהיה גלויה לעין יש להניח את האבנים בצורה מסודרת ונאה.
  11. על הקבלן לקבל אישור לטיב האבנים ומידותיהן לפני הנחתם .
  12. המפקח ראשי לפסול אבנים אשר אינם מתאימים לעבודת הגביונים/מזרונים עפ"י דעתו .

### טבלה מס' 12 – גודל אבן למילוי מזרונים /גביונים

<u>גודל אבן מילוי</u>		עובי [מ']	סוג
<u><math>D_{50}</math> [מ"מ]</u>	<u>גודל אבן [מ"מ]</u>		
110	150-70	0.17-0.15	מזרון
120	150-70	0.25-0.23	
125	150-70	0.3	
190	250-120	0.5/1.0	גביון

## הנחיות לפיקוח באתר

- וודא כי הגביונים ו/או המזרונים **מאושרים ע"י ה-BBA** (British Board Of Agreement) מכון ממשלתי בריטי המאשר את נכונות תכונות המוצר והאופן המומלץ לתכנון .
- ודא כי היריעה הגאוטכנית תואמת את דרישת המפרט .
- בדוק את כיוון ואופן פריסת היריעות הגיאוטכנית .
- פתיחת המזרון /גביון תהיה על משטח נקי וישר .
- לפני מילוי הגביון/מזרון המפקח יודא כי הגביון/מזרון מונחים במקום הנכון , כך שבגביון המכסה ייסגר לצד הפנימי ולא כלפי חוץ .
- חיבור ע"י הטבעות יעשה לפני המילוי , טבעת בכל עין שניה .
- לפני תחילת המילוי יש לוודאות כי קיימים כבלי מתיחה (כפי שצוין במפרט בסעיף הנחת הגביון בתת סעיף 11 )
- בחזית הגביון / המזרון הנגלית לעין על הקבלן למלות באבנים מסודרות ולא בולטות כך שיווצר חזית ישרה ואחידה .
- לפני סגירה יש לדאוג כי המזרון/ גביון ממולא כ- 4 ס"מ מעל גובה הדופן .
- בזמן סגירת הגביון/ מזרון יש לוודאות כי הסגירה נעשתה ע"י טבעת בכל עין שניה.
- המפקח יקפיד כי הגביונים/מזרונים יסודרו בקווים ישרים ואחידים .
- המפקח ידרוש כי בתחילת העבודה יינתנו הוראות ביצוע מפורטות ע"י נציג ספק הגביונים/מזרונים אשר יבקר בשטח העבודה .