

## התפלגות תפוקת הסחף בצחיח קיצון: אגן נחל נחושתן כמקרה בוחן

ר' ארמוזה-זבולוני<sup>1</sup>, י' שלומי<sup>1</sup>, א' עבאדי<sup>1,2</sup>, ר' שם-טוב<sup>1</sup>, י' לרון<sup>1,3</sup>

1 מו"פ מדבר וים המלח

2 המכון לארכיאולוגיה ובית ספר ג'ק, ג'וזף ומורטון מנדל ללימודים מתקדמים במדעי הרוח, האוניברסיטה העברית

3 המחלקה לגאוגרפיה ופיתוח סביבתי, אוניברסיטת בן גוריון בנגב

רשמי התקשורת: rachel@adssc.org + 972 52 8215249

john@bgu.ac.il yanai.samar@gmail.com itay@adssc.org rastov@gmail.com

### ת ק צ י ר

הצטברות סחף במאגרים מסייעת הן להבנת תהליכים הידרולוגיים, ביניהם תהליכי הסעה והשקעה של סחף בשיטפונות, והן לבחינה ארוכת-טווח של תדירות שיטפונות באגני הניקוז ועוצמתם. בעבודה זו נבחנו תפוקות הסחף של נחל נחושתן (שטחו 15.7 קמ"ר), המנקז את חלקה הדרומי של בקעת תמנע. המאגר נוצר בשנות החמישים של המאה הקודמת בעקבות בניית סוללת הגנה על מכרות הנחושת בתמנע, ומאז, במרוצת שישים השנים מאז הקמתו, מצטבר בשטחו סחף בעקבות שיטפונות בזק.

לצורך המחקר חפרנו 17 בורות, שיצרו ארבעה חתכים מורכבים בשטח המאגר. הרכב השכבות אופייני בחתכים סטרטיגרפיים שכללו שכבות סילט וחרסית ששקעו מרחיפה, ושכבות סחף גס-גרגר של חול ושל חלוקים שהורבדו בגריפה. מתאם סטרטיגרפי המבוסס על אופי שכבות האירועים אפשר כימות של תפוקת הסחף בפרק זמן של שישה עשורים. הסטרטיגרפיה כוללת זיהוי של 13 שכבות אירוע בבורות העמוקים ביותר, המייצגים 13 אירועי שיטפונות בזק, שאירעו בממוצע פעם בארבע שנים וחצי. דפוס ההשקעה מאופיין בסחף גס-גרגר בעיקר במעלה המאגר ובמרכזו. במורד המאגר, שבו פוחתת מהירות הזרימה, ההשקעה כוללת בעיקר סילט וחרסית, ואילו במרכז המאגר, שבו העומק היה מרבי, שקעה שכבה חרסית עבה. נפח כל הסחף ששקע במאגר הוא כ-16,600 מ<sup>3</sup>, שהם כ-23,200 טון (1,478 טון/קמ"ר בשישים שנה או בממוצע 24.6 טון/קמ"ר\*שנה). תפוקת הסחף דומה לתפוקות שחושבו בעבר עבור הנחלים חיון ונקרות. 13 שכבות האירוע הן עדות לחמישה אירועים קטנים, לשבעה אירועים בינוניים ולאירוע אחד גדול במיוחד, שכמות הסחף שלו – 434 טון/קמ"ר – היא 29% מתפוקת הסחף שהוסעה בששת העשורים. האירוע שהתחולל ב-25.10.2015 נגרם מסופה שירדו בה 32–50 מ"מ גשם באגן הניקוז. זמן החזרה של אירוע כזה מוערך ב-1:50 שנה.

המחקר הנוכחי באגן נחל נחושתן נעשה באגן ניקוז בינוני באקלים צחיח קיצון. תיעוד זה ומחקרים קודמים שבוצעו באקלים צחיח קיצון, הם עדות ייחודית לתהליך הסעה והשקעה של סחף, שהוא מעצב הנוף העיקרי באזורים מדבריים.

מילות מפתח:

תפוקות סחף

שיטפונות בזק

צחיח קיצון

סטרטיגרפיה

מאגר יבש תמידית

### 1. מבוא

(and Wilhelm, 2001) – משפיעים על כמות הסחף המוסע בשיטפון ועל אופיו. תפוקת הסחף באירוע שיטפון מושפעת גם מגורמים כשימושי קרקע, כיסוי צמחייה ומשך הזמן העובר בין אירוע שיטפון למשנהו (Nichols et al., 2013). שטף הסחף ופילוג גודל החלקיקים הנעים בשיטפון תלויים בעוצמת הזרימה, המתרחשת בשני אופנים: בסמוך לתשתית ובמגע איתה היא כגרופת (bedload), ובמערבלים במי השיטפון – כרחופת (suspension) (Allen, 1982).

הערכה של תפוקת הסחף נעשית בכמה גישות, ומושתתת על אופני תנועת החלקיקים ושקיעתם. הערכת תפוקת הסחף בזמן תנועת החלקיקים בזרם המים נעשית בכלים אלה: מדידת הרחופת בדיגום

הערבה הדרומית מאופיינת באקלים קיצוני שיש בו מיעוט גשם וטמפרטורות גבוהות. ממוצע עובי הגשם הוא 25 מ"מ/שנה, והוא ניחן בשונות גבוהה בזמן ובמרחב (Sharon, 1972). באירועי גשם שיוורדים בהם מטחי גשם בעוצמה גבוהה, נוצר נגר המחולל בנחלי האזור שיטפונות בזק, שתדירותם ועוצמתם משתנה מאוד בין האירועים (Dayan and Morin, 2006; Schick, 1988).

התשתית הגאולוגית והגאומורפולוגית של אגני הניקוז משפיעה על ספיקת השיא ועל נפח הנגר (גרינבאום ושותפים, 2003; מאירי, Laronne, 2015). אופי הזרימה ותכונות השיטפון – השיא והמשך (Laronne, 2015).

של סלעים. הטקטוניקה ותהליכי הסחיפה יוצרים מורפולוגיות מגוונות במשרע שיפועים רחב, שכולל מצוקים אנכיים בשולי הבקעה ובשטח הר תמנע הנמצא במרכז, ונופים שטוחים במרכז אגני הניקוז. מגוון הסלעים באגן נחל נחשתן כולל סלעים מגמתיים (גרניט וגברו, כ-15% כיסוי), סלעי משקע ימיים (אבן גיר ודולומיט, כ-3% כיסוי) ותצורות אבן חול (המכילות בחלקן נחשת, כ-50% כיסוי). שאר שטח האגן כולל טרסות נחל עתיקות, מניפות סחף וערוצים אלוביאליים (Beyth et al., 2018).

מאגר נחל נחשתן הוקם בשנת 1958 כחלק מעבודות הפיתוח להפעלת מכרות הנחשת בתמנע. עשרות שנים חסמה סוללת המאגר את מעבר מי השיטפונות למורד נחל נחשתן ולערבה. המאגר מעולם לא הוצף לכל גובהו והסחף במאגר לא סולק, משום כך הסחף ששקע בו הוא עדות שלמה לשיטפונות ולתפוקות הסחף מעת הקמתו ועד היום. במשך השנים הביאה הצטברות הסחף לעלייה במפלס התשתית ולירידה ניכרת ביעילות האגירה של המאגר. משום כך באירועי גשם עוצמתיים עלולים מי השיטפונות להציף את האזור התיירותי, ולסכן את התשתיות שבמקום ואת הפעילות התיירותית. חישוב תפוקת הסחף באגן הניקוז נחל נחשתן עוזר בתכנון ובתחזוקה של מפעל הניקוז, המסדיר את אפיק הנחל ואת אזור המאגר.

## 2.2 אפיון הסטרטיגרפיה

במטרה לבחון את הרצף הסדימנטרי במאגר נחשתן ולחשב את תפוקת הסחף האירועית, אפיינו את הסטרטיגרפיה ב-17 בורות שנחפרו באמצעות מחפרון ברחבי המאגר עד לעומק התשתית האלוביאליית. בחירת מיקום הבורות תוכנן על מנת ליצור שלוש שורות שייצרו חתכים מורכבים. בחתכים א-ג שורה אחת היא בצמוד לסוללה, שורה נוספת במרכז והשלישית בכניסה למאגר (איור 1). בכל שורה נחפרו חמישה בורות, ושני בורות נוספים (חתך ד) נחפרו סמוך לאזור כניסת המים למאגר בשל שיקולים שעלו בזמן עבודת השדה. הדיגום המרחבי כיסה את מרבית שטח המאגר, ואפשר לצמצם שטחים מתים בנייתוח התוצאות. גודל השטח הנסקר הוא 100x200 מטרים, והמרחק הממוצע בין הבורות הוא 40 מטרים. התברר שכתוצאה מעבודה של כלים מכניים במקום יש ליקויים במיקום בור מספר 1, לכן בוצעה חפירה נוספת (בור 1.5) בסמיכות (איור 1).

עבודת השדה התבצעה בתאריכים 8-9 באוקטובר 2018 בשטח המאגר הסכור בסוללת הגנה (איור 2). הבורות נחפרו במחפרון כדי לאפשר ניתוח של החתכים תוך כדי עמידה בתוך הבורות (איור 2ב) עד לעומק התשתית האלוביאליית הקודמת לזמן הקמת הסכר. תשתית קודמת זו היא שכבה הכוללת ריבוי חלוקים המפוזרים במטריקס של סחף דק-גרגר ללא סדר ברור או שיכוב. לאחר ניקוי יסודי הוגדרו שכבות בכל בור, נמדדו ותועדו בציור ובצילום. השכבות שתועדו כללו בסדר יורד מלמעלה למטה: חרסית, סילט, חול וחלוקים (ראו דוגמה לשכבות אירוע באיור 2ג). כיוון שהסחף שוקע באופן הדרגתי, קשה לקבוע גבול ברור בין סילט ובין חול, ומסיבה זו איחדנו את הסחף בגדלים אלה. באופן דומה, גם החלוקים שוקעים אל תוך תשתית חולית גסת-גרגר, ולכן הגדרנו אותם כ"חול וחלוקים" – הוא הסחף ששקע מגרופת.

המים, ניטור העכירות (Alexandrov et al., 2003; Lekach and Helley and Smith, 1971) והגרופת בדגימה ידנית (Schick, 1982) ובדגימה אוטומטית (Reid et al., 1998), מלכודות גרופת (Lucia et al., 2013) וחיישנים למיניהם (Geay et al., 2017). הערכה של תפוקת הסחף האירועית מתבצעת גם במשקעי מאגרים (Laronne and Wilhelm, 2001). הסחף המצטבר במאגרים הוא ארכיון מעולה לתפוקת הסחף, ואף כי המידע הנדלה ממשקעי הסחף אינו ברזולוציית זמן גבוהה, הוא המדויק ביותר לתפוקות ארוכות (Geilhausen et al., 1987; Hereford, 2012). כל עוד ידועה יעילות הלכידה של המאגר או האגם (Reinwarth et al., 2018). שקיעה של חלקיקים בשטח המאגר תלויה בירידה במהירות ובמערבוליות של הזרם הנכנס למאגר. חלקיקים גדולים שוקעים מהר. בהתאם לכך, בכניסה לשטח המאגר יורדת אנרגיית הזרימה, והחלקיקים הגסים יותר המוסעים בגרופת שוקעים ראשונים. לאחר מכן שוקעים החלקיקים המרחפים בכל שטח המאגר. זמן השקיעה של חומר חרסיתי תלוי בעומק המים ובתנועה בהם, למשל תנועה הנגרמת מרוח ומגלים (Laronne, 2000).

בישראל נערכו מחקרים אחדים לתייעוד תפוקת הסחף באזורים אקלימיים וגאוגרפיים מגוונים: אזור מאגר איילון הוא ים תיכוני; אזור מאגר רחף – צחיח; נחל אשתמוע – צחיח למחצה, ואילו נחל יעל הוא אזור צחיח קיצוני. מחקרים אלה ואחרים מצביעים על שונות גבוהה בתפוקת הסחף בין אזורים אקלימיים וגם על הצורך בהמשך מחקר על תפוקת הסחף באגני ניקוז בעלי אפיונים שונים (Fischhendler et al., 2003; Laronne et al., 2002; Schick and Lekach, 1993; Schwartz and Greenbaum, 2008). מידע על אודות שקיעת סחף במאגרים יכול לשמש להערכת קצבי סחיפה והנמכת הנוף (דנודציה). בהיבט היישומי, מידע על תפוקת סחף חשוב לתהליכי תכנון, כיוון שלהצטברותו יש השלכות על עמידות של מבנים, כבישים ותשתיות. במחקר הנוכחי חקרנו את תפוקת הסחף במאגר נחל נחשתן, הסחף שהורבד באירועי שיטפונות במרוצת שישים השנים האחרונות. חישובנו את תפוקת הסחף הכללית והאירועית, ובחנו את אחוז הסחף מתוך כלל הנגר בשני אירועי השיטפונות האחרונים. תוצאות המחקר שופכות אור על מאפייני הסחף באגני ניקוז מסדר גודל בינוני, הנמצאים באקלים צחיח קיצוני.

אלה הן ארבע מטרות המחקר:

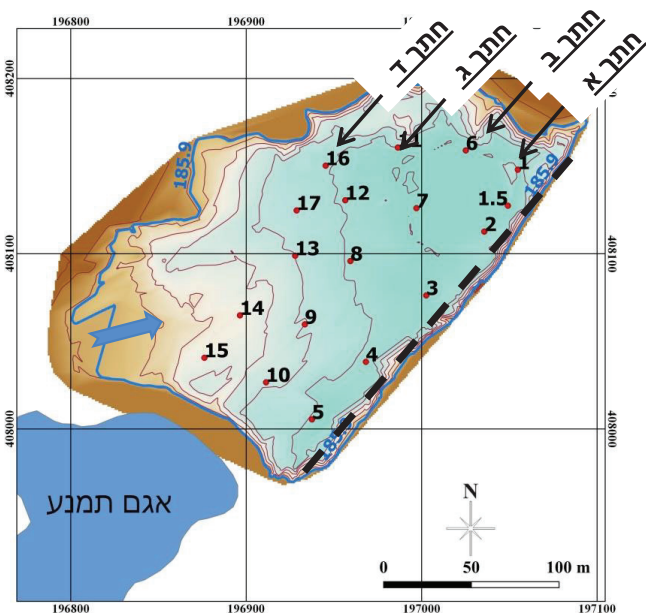
- בחינת הרצף הסדימנטרי שנוצר בשישים השנים האחרונות סמוך לסוללה בנחל נחשתן
- חישוב תפוקת הסחף הכללית והאירועית
- חישוב ריכוז הסחף בנגר באירועי השיטפונות הגדולים שהתרחשו בשנים 2010 ו-2015
- הסקת מסקנות לגבי אופי הסחף בשיטפונות באזור צחיח קיצוני והשוואתו לנתונים אזוריים וכלל-עולמיים.

## 2. שיטות

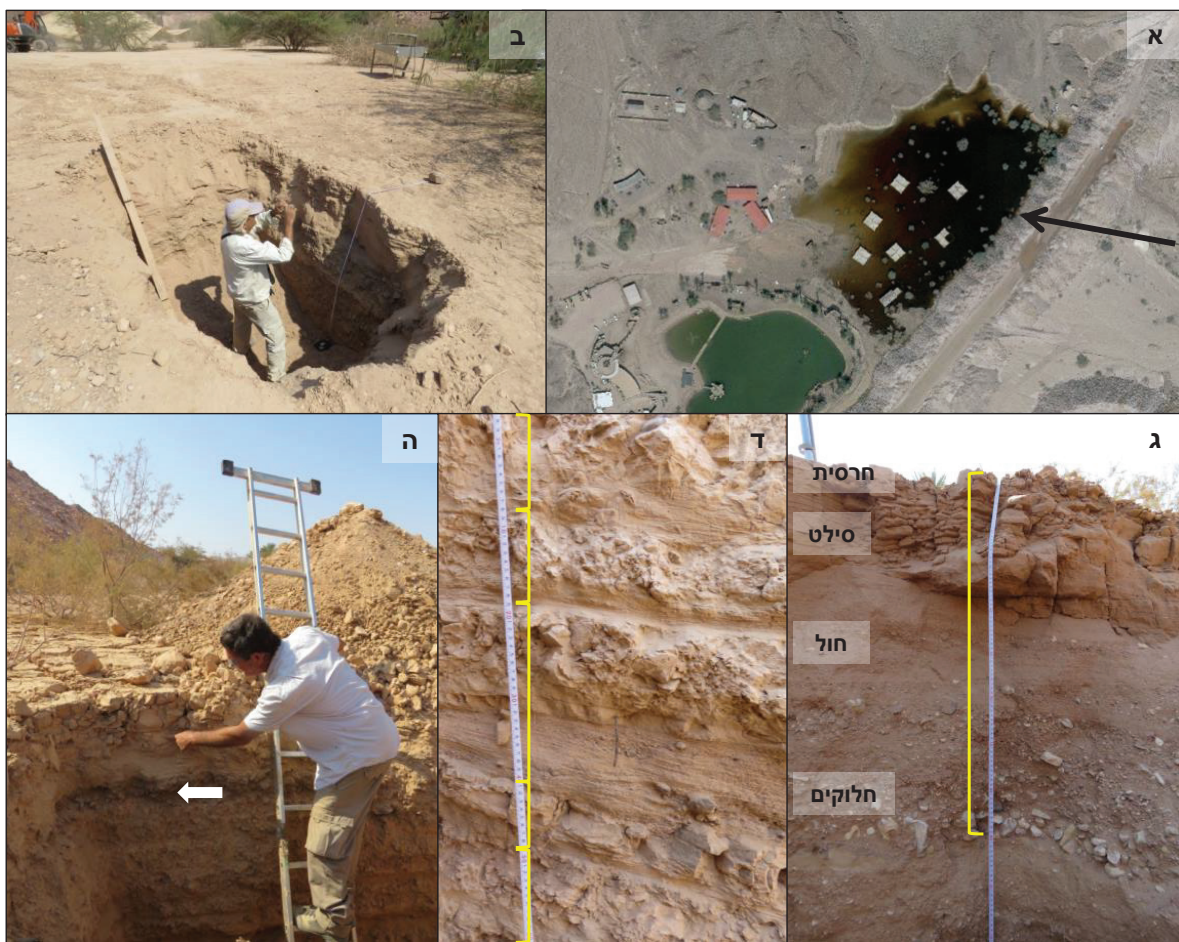
### 2.1 אתר המחקר

בקעת תמנע ממוקמת בערבה הדרומית, כ-30 ק"מ צפונית לאילת, ומנוקזת בחלקה הצפוני על ידי נחל תמנע ובחלקה הדרומי על ידי נחל נחשתן. ההיסטוריה הגיאולוגית של נחל נחשתן חושפת מגוון רחב

ההפרדה בין אירועי שיטפונות נקבעה על פי רוב באמצעות מיקום שכבות החרסית בעלות הקוהזיה, ששקעו מרחיפה. שכבת החרסית של כל יחידת סחף אירועי היא תמיד הגבול העליון של ההשקעה באירוע נתון, ולכן היא הוצצת בין שני אירועים עוקבים (איור 2). בבורות הרדודים שעיקר ההשקעה בהם היא של סילט, אפיינו חול וחלוקים את הגבול בין שני אירועים על פי המעבר בין פרקציות גסות-גרגר (חול) גם וגרנולות) לפרקציות הדקות יותר (חול דק וסילט). בכל הבורות, למעט בבורות 4 ו-5, הובחנה מתחת לשכבות השייכות לאירוע השיטפון האחרון שכבה של מילוי מלאכותי (להלן "המילוי המלאכותי", איור 2ה). שכבת המילוי פוזרה ונכבשה במאגר כדי להשמיש את אזור המאגר לפעילות פנאי. את החומר פזרה הנהלת פארק תמנע במהלך שנת 2015, לפני השיטפון שפקד את האזור בחודש אוקטובר (תקשורת אישית, צוות תפעולי פארק תמנע). שכבה זו הכילה חומר כהה יותר, ככל הנראה ארקוזה גרניתית מפוררת, שנוצרה בעקבות בליה טבעית של החומר המגמתי, האופייני לאזור הר תמנע הסמוך. שכבה זו, שנמצאה במרבית הבורות, שימשה סמן כרונולוגי ברצף הסטרטיגרפי באתר. בבורות העמוקים ביותר (בורות 1.5 ו-2) ביצענו התאמה בין כל אירועי השיטפונות שתועדו במטרה לקבוע את מספר האירועים ואת עוצמתם בהתבסס על שינויים במרחב.



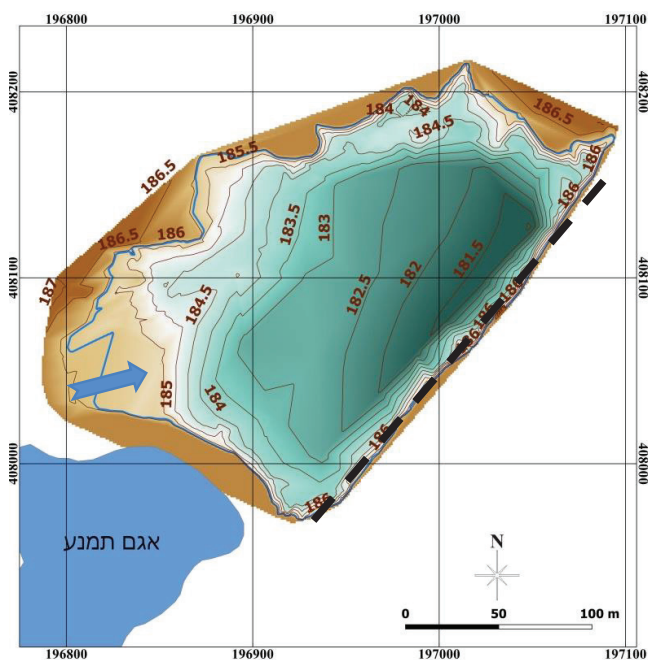
**איור 1:** המבנה הטופוגרפי של אזור המאגר לאחר אירוע השיטפון ב-2015. כיוון החתכים (T-א), הבורות (1-17), כיוון הזרימה (חץ כחול) ומיקום הסוללה (קו מקווקו) מסומנים על גבי המפה. קווי הגובה בשטח המאגר מייצגים 0.5 מטר רווח אנכי. מפלס המאגר בשיטפון 2015 מסומן בקו כחול



**איור 2:** חתכים סטרטיגרפיים במאגר נחושתן. א - האגמון שנוצר לאחר השיטפון הגדול באוקטובר 2015 בשטח המאגר החסום על ידי הסוללה (מסומנת בחץ שחור). מצד שמאל למטה, אגם תמנע התיירותי שאינו מושפע משיטפונות. ב - חפירה ותיעוד החתכים הסטרטיגרפיים. בצילום נראה בור מספר 15. ג - עובי סחף ניכר (89 ס"מ) בבור מספר 15 בכניסה למאגר, מאירוע השיטפון באוקטובר 2015. הסחף מורכב משכבה דקה יחסית של חרסית ומשכבה עבה של סילט, חול וחלוקים. ד - אפיון רצף אירועי שיטפונות בבור מספר 3 (הנמצא סמוך לסוללה) על פי שיכוב אופייני של חול וחלוקים, סילט וחרסית. משקע חרסיתי וחולי ששקע באירוע אוקטובר 2015 בבור מספר 3, ותחתיו חומר מילוי מלאכותי (חץ לבן) שהוכנס כחלק מעבודות התשתית בפארק



בשטח המאגר הוא 2.25 מ' בחלקו העמוק ביותר, ו-60 ס"מ בשוליו (איור 1).



איור 3: שחזור המבנה הטופוגרפי של אזור המאגר לאחר בניית סוללת ההגנה ב-1958. כיוון הזרימה (חץ כחול) ומיקום הסוללה (קו מקווקו) מסומנים על גבי המפה

### 3.2 אפיון חתכים סטרטיגרפיים

אפיון חתכים סטרטיגרפיים ב-17 הבורות מציג דפוס השקעה טיפוסי למאגר (Laronne, 2000). בחתך המאפיין אירוע שיטפוני (ראו דוגמה באיור 2; תיאור החתכים, איור 4) נראה כי תחילה שוקעים החלוקים והגרנולות אל תוך הפרקציה של החול הגס. מעל שכבת החול הגס שוקע חול נוסף: בחלק התחתון החול הגס יותר, ומעליו החול דק-הגר. בהדרגה נמצאו בתוך השכבה החולית גם פרקציות דקות יותר של סילט. ההשקעה הדרגתית ולכן לא ניתן להפריד באופן מדויק בין הסילט לחול, אך אפשר להבחין שגודל הגרגרים בשכבות מתדקם כלפי מעלה. מעל שכבת החול הדק והסילט נמצאה שכבת החרסית, היוצרת משטחים קשיחים ושברים.

בכניסה למאגר ניכרת השקעה רבה של הפרקציה גסט-הגר, ובאזורים העמוקים יותר סמוך לסוללת ההגנה יש בעיקר השקעה של חומר דק-גרגר – סילט וחרסית. נוסף לכך בכניסה למאגר, באזור שבו הצטברות הסחף נמוכה ומגיעה ל-60 ס"מ, יש עדות למספר מצומצם של אירועי שיטפונות. לעומת זאת בעומק המאגר ליד הסוללה ניכרת עדות להשקעה מסיבית שעולה על 2 מ', ומקורה ב-13 אירועי שיטפונות (איור 4). בכניסה למאגר קשה לאבחן את כל אירועי השיטפונות. הבורות הרדודים בשולי המאגר, לדוגמה בורות 4 ו-5, מאופיינים גם הם במספר נמוך של אירועי שיטפונות.

בצפון-מזרח המאגר תשתית הנחל המקורית היא העמוקה ביותר (בורות 1.5–3), ובהתאם לכך שכבת החרסית היא העבה ביותר, בעיקר השכבה של אירועי השיטפונות המוקדמים. במהלך הזמן גרמה התמלאות המאגר בסחף לעליית פני השטח, ושטח ההצפה גדל. התהליך גרם לפיזור אחיד יותר של עובי שכבות החרסית בשטח זה של המאגר.

### 2.3 מיפוי GIS וחישוב תפוקת הסחף

מיפוי שטח המאגר בוצע באמצעות GPS TRIMBLE GE07 בכ-1,800 מיקומים ברחבי המאגר. באמצעות המדידות יצרנו מפה טופוגרפית ב-GIS, המתארת את פני השטח לאחר אירוע השיטפון האחרון, באוקטובר 2015 (איור 1). מפה נוספת המתארת את הטופוגרפיה באזור המאגר מיד לאחר הקמת הסוללה ולפני הצטברות סחף במאגר, הוכנה באמצעות GIS על סמך עומק התשתית המקורית של הנחל ב-17 בורות (איור 3). השוואה של שתי המפות הכוללות מיפוי גבהים מאפשרת חישוב של תפוקת הסחף הכללית במאגר, הכוללת גם את שכבת המילוי המלאכותית שיש להפחיתה.

תפוקת הסחף ברצף אירועי השיטפונות חושבו בשילוב שתי שיטות: (1) חישוב תפוקת הסחף באירועי השיטפונות של 2010 ו-2015 ועבור שכבת המילוי המלאכותית, בוצע באמצעות השוואות של מפות תלת-ממדיות (רסטרים שהוכנו בתוכנת GIS); (2) תפוקת הסחף של יתר אירועי השיטפונות חושבו מעובי השכבות בורות 1.5 ו-2, שבהם תועדו כל האירועים. לאחר חישוב כלל נפח המאגר החסרנו את תפוקת הסחף של אירועי השיטפונות שאירעו ב-2010 וב-2015 ושל נפח המילוי המלאכותי (שהגיעו לכמצצית סך כל הסחף) מתפוקת הסחף הכללית.

### 2.4 אפיון אירועי שיטפונות שהתרחשו בשנים 2010 ו-2015

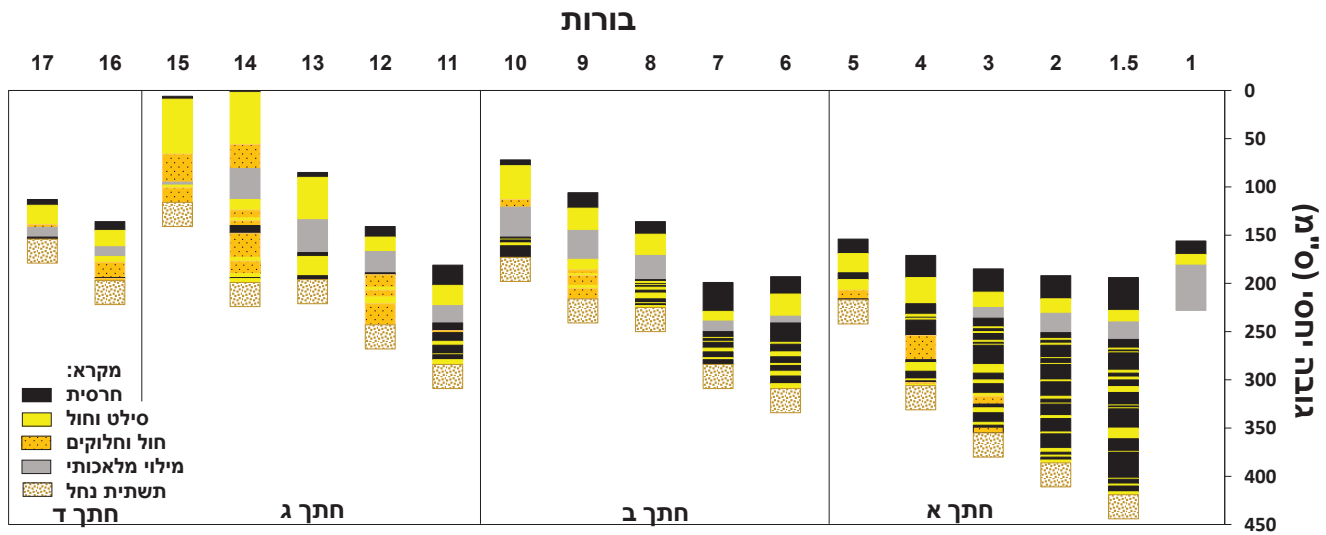
בתאריכים 18.1.2010 ו-25.10.2015 תועדו שני אירועי שיטפונות גדולים בנחל נחושתן. במהלך האירועים התרחשה זרימה חזקה באפיק המרכזי של הנחל, וכמות גדולה של נגר וסחף הצטברו במאגר. באירועים אלה תועד עובי הגשם באמצעות מדי גשם זעירים שנקבעו בכמה מיקומים באגן הניקוז. כמו כן תועד מפלס המים במאגר, והוא שאפשר חישוב של שטח ההצפה של המאגר ושל נפח הנגר. נפחי המים בשני האירועים הגדולים אפשרו חישוב של אחוז הסחף בנגר. ההפרש בין מפלס המים המרבי במאגר ובין תשתיתו בשני האירועים מייצג את סך כל נפח כניסת המים למאגר. בנחלים מדבריים יש איבודי תמסורת ניכרים, אך מאחר שקרקעית המאגר מורכבת מכמה שכבות חרסית ששקעו אחרי כל אירוע שיטפון, איבודי מים לחלחול הם זניחים, כל עוד מפלס המים המרבי נמדד סמוך לכניסת המים למאגר.

### 3. תוצאות

#### 3.1 מבנה המאגר

שחזור המבנה הטופוגרפי של הנחל באזור המאגר לפני הסכירה התאפשר בשימוש ב-GIS ומציאת עומק התשתית האלוביאלית של הנחל לפני השקעת הסחף (איור 3). לפני סכירת הנחל היה המיקום העמוק ביותר בפנינה הצפון-מזרחית, והזרימה נעה מהאזור הרדוד בצד הדרום-מערבי לכיוון צפון-מזרח. באמצעות זיהוי הגובה הטופוגרפי הנוכחי חישבנו את כמות הסחף שהצטבר במאגר במשך שישים שנה, משנת 1958 עד שנת 2018. תפוקת הסחף באותו פרק זמן מוערכת ב-16,600 מ<sup>3</sup> שהם כ-23,200 טון (1,060 מ<sup>3</sup>/קמ"ר ו-1,480 טון/קמ"ר, בהתאמה, בהתבסס על משקל סגולי בלתי מופר 1.4 טון/מ<sup>3</sup>).

הטופוגרפיה הנוכחית מראה מבנה דומה למבנה שהיה שישים שנה קודם לכן. האזור העמוק של המאגר נמצא בפנינה הצפון-מזרחית ואילו החלק הרדוד של המאגר בפנינה הדרום-מערבית. עובי הסחף שהצטבר



**איור 4:** תיאור הסטרטיגרפיה של סחף שהצטבר במאגר על פי גובה יחסי. חתכים א-ד מייצגים חלוקה של הבורות לארבע שורות המקבילות לסוללת ההגנה (ראו איור 1). גובה 0 מייצג את פני השטח במיקום הגבוה ביותר, שהוא בור 14

במאגר. אף על פי שאירוע שיטפון 2015 היה גדול יותר מהאירוע בשנת 2010, תכולת הסחף במים הייתה דומה: 8.8%-ו-7.2%, בהתאמה.

**טבלה 1:** תפוקת הסחף ונפח הנגר במאגר נחושתן לאחר אירועי שיטפון שאירעו בשנים 2010 ו-2015

שיטפון 2015	שיטפון 2010	
50-32	40-23	עובי הגשם באירוע (מ"מ)
77,100	36,100	נפח הנגר במאגר (מ <sup>3</sup> )
4,860	1,850	תפוקת סחף נפחית (מ <sup>3</sup> )
6,800	2,590	תפוקת סחף מוערכת (טון)
433	166	תפוקת הסחף ליחידת שטח (טון/קמ"ר)
8.8	7.2	אחוז הסחף מכלל הנגר (%)

בבורות שנחפרו אופיינו שכבות חרסית, סילט, חול וחולקים. שכבת המילוי המלאכותי אותרה במרבית הבורות מלבד בבורות 4 ו-5 שבשולי המאגר. התשתית המקורית של הנחל אותרה בכל הבורות מלבד בבור 1, שהיה מופר מתחת לשכבת המילוי. הגובה הטופוגרפי הנוכחי של המאגר משופע ומשתנה בטווח של כ-200 ס"מ. מיקום החתכים והבורות מתואר באיור 1.

### 3.3 אפיון אירועי שיטפונות שהתרחשו בשנים 2010 ו-2015

בחתכים הסטרטיגרפיים בולט אירוע שיטפון גדול יחסית, עובי הסחף הניכר שהוא השקיע נצפה בכל הבורות. זהו אירוע השיטפון האחרון שתועד בנחל והתרחש ב-25.10.2015. ממוצעי העובי של שכבת סחף זו הם 85 ס"מ בכניסה למאגר (בעיקר חול), 42 ס"מ בסמוך לסוללה (בעיקר חרסית) ו-26 ס"מ בשולי המאגר. באמצעות נתוני החתכים הסטרטיגרפיים ותייעוד שטח ההצפה באירוע השיטפון שהתרחש ב-2010 אפשר לזהות בבירור את שכבת הסחף שהצטברה בעקבות השיטפון חמש שנים אחר כך.

נוסף לתפוקת הסחף שנמדדה במחקר הנוכחי, נמדד נפח הנגר שהצטבר במאגר בשני האירועים שנזכרו, ובאמצעות מדי גשם זעירים נמדד עובי הגשם באגן הניקוז (טבלה 1). עובי הגשם באירוע השיטפון של שנת 2010 נע בתחום 23-40 מ"מ, והוביל להצטברות של כ-36,100 מ<sup>3</sup> מים במאגר. תפוקת הסחף הנפחית באירוע זה הייתה 1,850 מ<sup>3</sup>, והתפוקה המשקלית הוערכה ב-2,590 טון (בהתבסס על ההערכה שצפיפות הסחף היא כ-1.4 טון ל-מ<sup>3</sup>) (Larone and Wilhelm, 2001). משקל תכולת הסחף באירוע זה הוא 7.2% ממשקל המים במאגר. באירוע השיטפון בשנת 2015 היה עובי הגשם באזור 32-50 מ"מ, והוא יצר אגם שנפחו 77,100 מ<sup>3</sup>. תפוקת הסחף הנפחית הייתה 4,860 מ<sup>3</sup> (6,800 טון). אחוז הסחף הוא 8.8% ממשקל המים

### 3.4 תפוקת הסחף

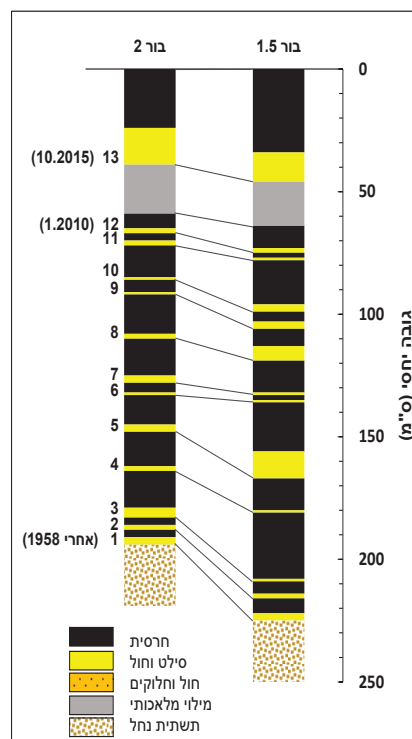
שכבת הסחף העבה ביותר נמצאה בבורות 1.5 ו-2. נמצאו בהם עדויות ל-13 אירועי שיטפון, וכמו כן נמצא שעובי החרסית הממוצע גדול פי 2.5 מעובי השכבה החולית. בבורות אלה בחנו ביתר פירוט את המתאם בין אירועי שכבות הסחף (איור 5) כדי לאפשר התאמה בין כל השכבות בשני הבורות. בשל התאמה זו התאפשר להעריך את תפוקת הסחף באירועי שיטפונות בכל שטח המאגר (איור 6). תפוקת הסחף האירועית נעה בין 398 טון באירועים הקטנים ל-6,800 טון באירוע הגדול ביותר שהתרחש ב-2015. בחישוב תפוקת הסחף באירועי השיטפונות ביחס לגודל אגן הניקוז (15.7 קמ"ר) נמצא כי תפוקת הסחף האירועית משתרעת בטווח 25-433 טון/קמ"ר.

#### 4. דיון

בעת כניסת מי שיטפונות למאגרי מים יבשים תמידית, שוקע מרבית הסחף גס-הגרגר במעלה המאגר, אם כי בתחילת האירוע נכנס חלקו למורד המאגר כאשר המאגר יבש. החלקיקים דקי-הגרגר מרחפים זמן ניכר ושוקעים בכל מרחב המאגר – בעיקר בחלקו המורדי העמוק (Larone, 2000). בחתכי הבורות במאגר נחושטן נצפה דפוס אופייני זה. בבורות הקרובים לכניסה למאגר יש השקעה של חול וחלוקים, ובבורות העמוקים עיקר השיכוב הוא חרסית וסילט (איור 4). בבורות הנמצאים בכניסה למאגר אין עדות לכל אירועי השיטפונות שתועדו בבורות העמוקים, אלא רק לאירועים האחרונים. הסבר לכך הוא שבעת כניסה של גל גאות המסיע סחף, מוסרות חלק מהעדויות שהצטברו באירועים קודמים, בעיקר במעלה המאגר. בניגוד לבורות בכניסה למאגר, שבהם מוסר הסחף והעדויות לשיטפון – חלקה או כולה – נעלמת, הבורות בשוליים מתעדים את האירועים הגדולים, שבהם מגיע שטח ההצפה עד לשולי המאגר או אירועים, שעיקר הזרימה בהם מגיעה מאפיק צדדי המתנקז גם הוא למאגר.

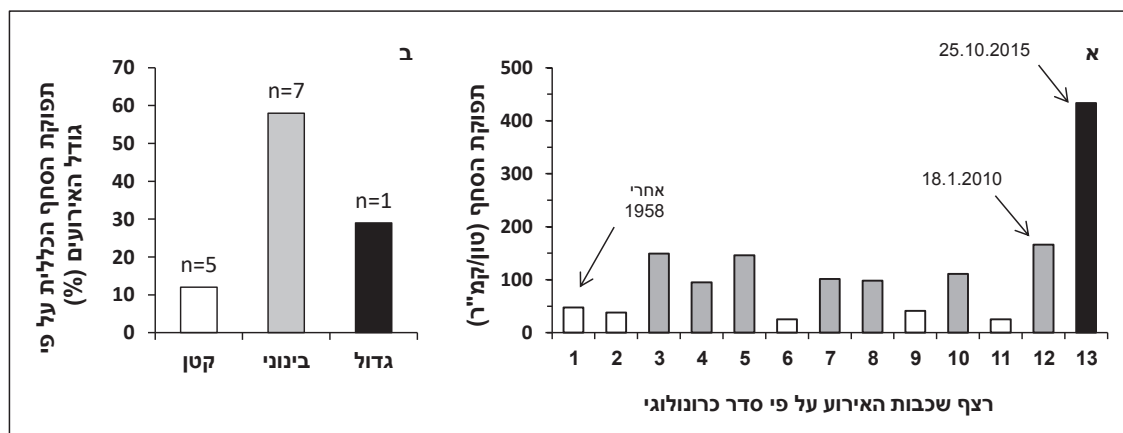
במחקר הנוכחי בחנו את תפוקות הסחף במאגר נחושטן בשישים השנים האחרונות. תקופת הזמן הארוכה אפשרה לאמוד קצבי סחף המייצגים במידה גבוהה את אגן הניקוז בהסתמך על הטענה שכבר בוססה באזורים אקלימיים שונים למעט צחיח קיצון (Wolman and Miller, 1960): עדות לתפוקות סחף שנצברו במשך חמישים שנה היא בסיס נתונים המספק תיאור כמותי ואיכותי של אגן הניקוז בתפקודו הנוהה.

תפוקת הסחף באגן הניקוז מושפעת בין היתר מגודלו, מסוג המסלע ומתדירות אירועי השיטפונות (Schwartz and Greenbaum, 2008). ביחס לאגני ניקוז גדולים באזורים מדבריים, שבהם רוחב ואורך הערוצים גדלים ככל שגדל אגן הניקוז, ההנחה המקובלת היא שתפוקת הסחף (לקמ"ר) קטנה ככל שגדל אגן הניקוז. בשל איבודי תמסורת באזור האלוביאלי, יחסי נגר-גשם קטנים, וחלה ירידה ביכולת הסעת הסחף. לאנגביין ושום (Langbein and Schumm, 1958) תיארו את השינויים בתפוקות הסחף השנתיות (ספיקות הסחף) במגוון



**איור 5:** תיאור המבנה הסטריטיגרפי של שני הבורות העמוקים (1.5-2) והמתאם הסטריטיגרפי בין 13 אירועי השיטפונות שתועדו בבורות (בהתאמה לאיור 6)

אירועי השיטפונות חולקו לשלוש קבוצות גודל: אירועים קטנים שהניבו 25–48 טון/קמ"ר סחף, אירועים בינוניים עם 96–166 טון/קמ"ר סחף, ואירוע חריג בגודלו שתרם 433 טון/קמ"ר סחף (איור 6א). על פי חלוקה זו, במהלך שישים שנות הצטברות סחף במאגר אירעו 5 אירועים קטנים שתרמו כ-12% מכמות הסחף הכללית למאגר, 7 אירועים בינוניים שתרמו כ-58% מהכמות הכללית, ואירוע אחד גדול שתרם 29% מסך הסחף (איור 6ב). סביר להניח כי במהלך שישים השנים שהצטבר בהן סחף במאגר אירעו זרימה קטנים נוספים, שתרומתם לסחף במאגר לא השאירה חותם מזהה.



**איור 6:** א) אפיון תפוקות הסחף על פי שלוש קטגוריות גודל: גדול (שחור), בינוני (אפור) וקטן (לבן) א - תפוקת הסחף על פי סדר כרונולוגי של אירועי השיטפונות ב - תפוקת הסחף הכללית על פי גודל האירועים

מגמתיים ואבני חול. כ-30% משטח אגן הניקוז הוא טרסות נחל ישנות ואפיקי זרימה. נחל נחושתן דומה לנחלים חיון ונקרות הזורמים בקווי רוחב צפוניים יותר, והמאפיינים הליתולוגיים שלהם כוללים בעיקר סלעי משקע ימיים ושיפועים נמוכים מקו פרשת המים אל אזור ההתנקזות בערבה. בשני נחלים אלה שטח האגנים הנרחב יותר מאפשר השקעת סחף בערוצים ובפשטי הצפה, וגורם לתפוקות סחף ממוצעות נמוכות.

היבט נוסף של תפוקות הסחף הוא היחסים בין תדירות הסעת סחף ובין גודלה ויעילותה. במשך שישים שנה הוסע מרבית הסחף (58%) ב-7 אירועי זרימה בינוניים, ו-29% ממנו הוסעו באירוע השיטפון הגדול ביותר שתועד. למרות הנטייה לזכור ולהעריך את האירועים הגדולים ביותר, כמו אירוע השיטפון הגדול שהתרחש ב-2015, ומייצג אירוע שזמן החזרה שלו הוא 1:50 שנה, במבט ארוך-טווח דווקא האירועים הבינוניים הם בעלי ההשפעה הגדולה יותר באספקת הסחף (Wolman and Miller, 1960). נשאלת אפוא השאלה, האם לאירועים בינוניים, שהם המקור העיקרי לתפוקת סחף נחלית, יש תפקיד חשוב בדנדוציה – סחיפת הנוף. תפוקת סחף נחלית איננה זהה בהכרח ליצירת נוף נחלי. באזורים צחיחים למחצה ובעיקר באזורים צחיחים גדלה יעילותם של אירועים גדולים ביצירת נוף נחלי. התופעה בולטת ככל ששטחו של אגן הניקוז קטן יותר (Wolman and Gerson, 1978). כך למשל, מעבר של אירוע גדול יגרום להרחבת הערוץ, ולאחר מכן לא יחזור לרוחבו המקורי, אלא ימשיך להתרחב, ועקב כך יכתוב את יצירת הנוף (Graf, 1983).

תפוקות הסחף משתנות בין אזורים אקלימיים שונים (Langbein and Schumm, 1958), בין נחלי איתן ונחלי אכזב, בין אגנים בעלי מאפיינים גיאולוגיים וגיאומורפולוגיים שונים ובין אירועים בעלי ספיקות שונות. לאיסוף מידע על תפוקות הסחף יש חשיבות באומדן כמויות הסחף המוסעות ומושקעות במוצא הנחלים, בין היתר כדי להעריך קצבים של דנדוציה. המחקר הנוכחי באגן נחל נחושתן נעשה באגן ניקוז קטן יחסית באקלים צחיח קיצון. תיעוד זה, המסכם תפוקות סחף לאורך שישה עשורים, ובצירוף מחקרים קודמים שנערכו באקלים צחיח קיצון (Schick and Laronne and Wilhelm, 2001; Lekach, 1993), תורמים עדות ייחודית לתהליך ההסעה וההשקעה של הסחף – מעצב הנוף העיקרי באזורים מדבריים.

## מימון

מחקר זה מומן על ידי משרד המדע והטכנולוגיה (alona17525) ועל ידי רשות ניקוז ונחלים ערבה.

## תודות

אנו מודים למ' סילבר שסיפק לנו DEM של נחל נחושתן, לה' גינת שהצעותיו עזרו לשפר את המחקר, ולצוות פארק תמנע על תמיכה בביצוע הסקרים. נוסף על אלה, תודות לשני השופטים שבחנו את המאמר על הערותיהם הבונות.

אזורים אקלימיים. אומנם הבדיקה שנעשתה לא התבססה על אגנים באקלים צחיח קיצון, אך הערכתם של שני החוקרים לספיקות הסחף בתנאי אקלים של 25 מ"מ גשם בשנה (=1 אינץ', 76 טון למייל רבוע), משתווה לספיקת הסחף הממוצעת השנתית באגן נחל נחושתן (65 טון למייל רבוע).

התוצאות ממאגר נחושתן מראות שבאגן ניקוז בינוני (15.7 קמ"ר) בסביבה המאופיינת באקלים צחיח קיצון התרחשו 13 אירועי שיטפון בשישים השנים האחרונות – בממוצע, אירוע שיטפון מדי ארבע שנים וחצי. נראה שתוצאות אלה אינן כוללות אירועי זרימה קטנים, שלא השאירו סימן הניתן לזיהוי בחתכי הבורות. ממוצע השיטפונות בתקופת המחקר הושפע מתקופת בצורת מעוטת שיטפונות שפקדה את הערבה הדרומית בשנים 1995–2009 (Ginat et al., 2011; Katz et al., 2015). ייתכן שתדירות נמוכה של אירועי השיטפונות בנחל נחושתן בפרק זמן זה, הובילה למצאי תפוקות סחף שנתיות נמוכות ביחס לנחלים יעל, נקרות וחיון (טבלה 2).

**טבלה 2:** תפוקת סחף באגני ניקוז באקלים צחיח קיצון. # ההערכות בוצעו על פי ערך של 1.5 טון לקוב לפי הערה במקור

מקור	תפוקת סחף ממוצעת לשיטפון (טון/קמ"ר)	תפוקת סחף ממוצעת שנתית (טון/קמ"ר* שנה)	מספר אירועי שיטפונות	אורך המחקר בשנים	גודל אגן הניקוז (קמ"ר)	נחל
Schick and Lekach, 1993	318 <sup>a</sup>	127 <sup>a</sup>	4	10	0.5	נחל יעל
מחקר נוכחי	114	24.6	13	60	15.7	נחל נחושתן
Laronne and Wilhelm, 2001	179.5	71.8	8	20	984	נחל נקרות מאגר עין יהב
Laronne and Wilhelm, 2001	69.5	38.6	5	9	1256	נחל חיון מאגר עשת

בנחל יעל, הממוקם כ-30 ק"מ דרומית לנחל נחושתן, תועדו במהלך עשרים שנה (1967–1976, 1981–1990) 11 אירועי זרימה, שחלקם היו גדולים מאוד (Schick and Lekach, 1993), בקירוב אירוע שיטפון מדי שנתיים. גם בנחלים חיון ונקרות תועדו שיטפונות אחת לשנתיים. תפוקות הסחף הממוצעות לשיטפון בנחל נחושתן (114 טון/קמ"ר), שנמצאו נמוכות ביחס לנחל יעל (318 טון/קמ"ר), אך בטווח שבין תפוקות הסחף בנחלים נקרות וחיון (179.5 ו-69.5 טון/קמ"ר, בהתאמה) (Laronne and Wilhelm, 2001), נובעות מהמאפיינים של אגני הניקוז.

תפוקות הסחף הממוצעות לשיטפון, שבנחל יעל היו גבוהות פי 2.5 ויותר משאר האגנים, נובעות ככל הנראה מכמה מאפיינים. אגן נחל יעל משתרע על פני שטח קטן (0.5 קמ"ר), ומאופיין בתשתית של סלעים מגמתיים מותרים, שיפועים חדים ואפיקים צרים, המעודדים את הסעת הסחף למורדו. לעומתו, אגן נחל נחושתן נמצא בבקעת תמנע, המאופיינת בתשתית מגוונת הכוללת סלעי משקע ימיים, סלעים

## מקורות

- Ginat, H., Shlomi, Y., Batarseh, S., Vogel, J., 2011. Reduction in precipitation levels in the Arava Valley (Southern Israel and Jordan), 1949–2009. *Journal of Dead-Sea and Arava Research* 1, 1–7.
- Graf, W. L., 1983. Flood-related channel change in an arid-region river. *Earth Surface Processes and Landforms* 8, 125–139.
- Helley, E. J., Smith, W., 1971. Development and calibration of a pressure-difference bedload sampler. U.S. Geological Survey Open File Report. Menlo Park.
- Hereford, R., 1987. Sediment-yield history of a small basin in southern Utah, 1937–1976: Implications for land management and geomorphology. *Geology* 15, 954–957.
- Katz, T., Ginat, H., Eyal, G., Steiner, Z., Braun, Y., Shalev, S., Goodman-Tchernov, B. N., 2015. Desert flash floods form hyperpycnal flows in the coral-rich Gulf of Aqaba, Red Sea. *Earth and Planetary Science Letters* 417, 87–98.
- Langbein, W. B., Schumm, S. A., 1958. Yield of sediment in relation to mean annual precipitation. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 39, 1076–1084.
- Laronne, J. B., 2000. Event-based deposition in the ever-emptying Yatir Reservoir, Israel. In: Hassan, A. M., Slaymaker, O., Berkowicz, S. M. (Eds.), *The hydrology-geomorphology interface: Rainfall, floods, sedimentation, land use*, Vol. 261. International Association of Hydrological Sciences Publication. Wallingford. pp. 285–302.
- Laronne, J. B., Wilhelm, R., 2001. Shifting stage-volume curves: Predicting event sedimentation rate based on reservoir stratigraphy. In: Anthony, D. Ethridge, F., Harvey, M., Laronne, J. B., Mosley, M. P., (Eds.), *Applying geomorphology to environmental management*. Water Resources Publications. Denver. pp. 33–54.
- Laronne, J. B., Lekach, J., Cohen, H., Alexandrov, Y., 2002. Experimental drainage basins in Israel: Rainfall, runoff, suspended sediment and bedload monitoring. In: Renard, K. G., McElroy, S. A., Gburek, W. J., Canfield, H. A., Scott, R. L. (Eds.), *First interagency conference on research in the watersheds*. United States Department of Agriculture Research Service. Benson. pp. 168–172.
- Lekach, J., Schick, A. P., 1982. Suspended sediment in desert floods in small catchments. *Israel Journal of Earth Sciences* 31, 144–156.
- גרינבאום, נ', שלמון, ע', שיק, א', 2003. השלכות גאומורפולוגיות ויישומים הידרולוגיים של ניסויי חידור מדורניים בסובב צחיח קיצון. *אופקים בגאוגרפיה* 57–58, 44–69.
- מאירי, ע', 2015. השפעת תכונות פני השטח על יחסי גשם-נגר במדבר צחיח קיצון בתנאי גשם טבעיים. עבודת גמר לשם קבלת תואר מוסמך, האוניברסיטה העברית. ירושלים.
- Alexandrov, Y., Laronne, J. B., Reid, I., 2003. Suspended sediment concentration and its variation with water discharge in a dryland ephemeral channel, northern Negev, Israel. *Journal of Arid Environments* 53, 73–84.
- Allen, J. R. L., 1982. *Sedimentary structures: Their character and physical basis*. Elsevier. Amsterdam.
- Beyth, M., Segev, A., Ginat, H., 2018. Stratigraphy and structure of the Timna Valley and adjacent ancient mining areas. In: Ben-Yosef, E. (Ed.), *Mining for ancient copper: Essays in memory of Beno Rothenberg*. The Institute of Archaeology of Tel Aviv University. Tel Aviv. pp. 3–20.
- Dayan, U., Morin, E., 2006. Flash floods-producing rainstorms over the Dead Sea: A review. In: Enzel, Y., Agnon, A., Stein, M. (Eds.), *New frontiers in Dead Sea Paleoenvironment Research*. The Geological Society of America. Boulder. pp. 53–62.
- Fischhendler, I., Enzel, Y., Gvirtzman, H., 2003. Estimation of sedimentation rates under Mediterranean conditions deduced from the Mishmar Ayyalon Reservoir, Israel. *Israel Journal of Earth Sciences* 52, 21–29.
- Geay, T., Belleudy, P., Gervaise, C., Habersack, H., Aigner, J., Kreisler, A., Seitz, H., Laronne, J. B., 2017. Passive acoustic monitoring of bedload discharge in a large gravel bed river: Acoustic monitoring of bedload transport. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 122, 528–545.
- Geilhausen, M., Otto, J. C., Morche, D., Schrott, L., 2012. Decadal sediment yield from an Alpine proglacial zone inferred from reservoir sedimentation (Pasterze, Hohe Tauern, Austria). In: Collins, A. L., Golosov, V., Horowitz, A. J., Lu, X., Stone, M., Walling, D. E., Zhang, X. (Eds.), *Erosion and sediment yield in the changing environment*. International Association of Hydrological Science Press. Wallingford. pp. 161–172.



- Schick, A. P., 1988. Hydrologic aspects of floods in extreme arid environments. In: Baker, V. R., Kochel, R. C., Patton, P. C. (Eds.), *Flood geomorphology*. John Wiley and Sons. New York. pp. 189–203.
- Schick, A. P., Lekach, J., 1993. An evaluation of two ten-year sediment budgets, Nahal Yael, Israel. *Physical Geography* 14, 225–238.
- Schwartz, U., Greenbaum, N., 2008. Extremely high sediment yield from a small arid catchment – Giv'at Hayil, northwestern Negev, Israel. *Israel Journal of Earth Sciences* 57, 167–175.
- Sharon, D., 1972. The spottiness of rainfall in a desert area. *Journal of Hydrology* 17, 161–175.
- Wolman, M. G., Gerson, R., 1978. Relative scales of time and effectiveness of climate in watershed geomorphology. *Earth Surface Processes* 3, 189–208.
- Wolman, M. G., Miller, J. P., 1960. Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. *Journal of Geology* 68, 54–74.
- Lucía, A., Recking, A., Martin-Duque, J. F., Storz-Peretz, Y., Laronne, J. B., 2013. Continuous monitoring of bedload discharge in a small, steep sandy channel. *Journal of Hydrology* 497, 37–50.
- Nichols, M. H., Nearing, M. A., Polyakov, V. O., Stone, J. J., 2013. Sediment budget for a small semiarid watershed in southeastern Arizona, USA. *Geomorphology* 137–145, 180–181.
- Reid, I., Laronne J. B., Powell, D. M., 1998. Flood flows, sediment fluxes and reservoir sedimentation in upland desert rivers. In: Wheater, H., Kirby, C. (Eds.), *Hydrology in a changing environment*. John Wiley and Sons. Chichester. pp. 377–386.
- Reinwarth, B., Riddell, E. S., Glotzbach, C., Baade, J., 2018. Estimating the sediment trap efficiency of intermittently dry reservoirs: Lessons from the Kruger National Park, South Africa. *Earth Surface Processes and Landforms* 43, 463–481.