



שיטפונות עבר בנחל צין

יאיר גלעדי

כאשר

מתכננים את פיתוחם של מפעלי תעשייה, חקלאות ותחבורה באזורים מדבריים, יש להתחשב בתופעת השיטפונות ולצמצם את סיכונה. הכרת תופעת השיטפונות והבנתה מאפשרות גם לאמוד את שיעור המילוי החוזר של אקוות מדבריות כדי לתכנן את השאיבה מהן. ניתוח של עוצמת השיטפונות ותדירותם אמור לסייע בהערכה סטטיסטית של השיטפונות הגדולים שפוטנציאל ההרס שלהם גבוה.

אחד מבסיסי הנתונים לחיזוי של השיטפונות הוא מעקב אחרי השינויים הגלובליים במערכות האקלים, כמו התחממות כדור הארץ, והמקומיים – כמו תהליכי התייבשות או התגברות הגשמים באזורים הנבדקים. בסיס נתונים אחר הוא זיהוי שיטפונות העבר, תדירותם ועוצמתם. מידע על שיטפונות העבר מרחיב את בסיס הנתונים ומאפשר ידע הידרולוגי רציף של אלפי שנים על השיטפונות הגדולים בנחלים.

עד השנים האחרונות התבסס המידע על השיטפונות בארץ ובעולם על בסיס נתונים צר של שיטפונות מדודים. בסיס נתונים זה הוא צר במיוחד באזורים צחיחים בגלל המספר הקטן של נחלים שבהם מוצבים מכשירי מדידה של שיטפונות ובגלל התקופות הקצרות יחסית מאז שהוצבו אמצעי מדידה אלה. תחנות המעקב הוותיקות ביותר מספקות נתונים של עשרות שנים בלבד. משנות ה־80 של המאה ה־20 התקדם מדע הפלאור־הידרולוגיה הנחלית — "חקר ההידרולוגיה של העבר", והעוסקים בו מצאו שיטות חדשות לזיהוי שיטפונות עבר, לפיענוחם ולאומדן עוצמתם.

שיטפונות עבר הם שיטפונות גדולים, שהתרחשו בעבר הרחוק או בעבר הקרוב בנחלים שעליהם אין מידע הידרולוגי או בנחלים שבהם יש תחנה הידרומטרית והשיטפונות התרחשו טרם הצבת התחנה. השיטפונות מזוהים ומנותחים על סמך שרידים שהשאיר השיטפון על גדות הנחל, בפתחי יובלים ובמערות שבדפנות הנחלים, ושרידים המעידים על הגובה אליו הגיעו המים בעת השיטפון. עוצמת השיטפון נקבעת על פי ספיקת השיא שלו. ספיקת שיא היא כמות המים העוברת בחתך הנחל (הרוחב הממוצע של הנחל מקרקעיתו עד גובה פני המים הזורמים בשיטפון) ביחידת זמן, ברגע שהמים הגיעו לשיא הגובה ושיא המהירות. מקובל להתייחס לספיקה ביחידות של מטר מעוקב לשנייה.

בשנת 1993 התפרסם מחקר של L.L.Ely וצוות חוקרים שבו דווח על 251 שיטפונות עבר ב־19 נחלים במדינות אריזונה ויוטה שבארה"ב. מניתוח הנתונים ניתן היה ללמוד על שתי תקופות בהן תדירות השיטפונות הייתה גדולה יותר: הראשונה לפני כ־1000 שנה והשנייה בסוף המאה ה־18. החוקרים הסבירו כי השינוי בתדירות השיטפונות נגרם בשל שינויי טמפרטורות גלובליים בחצי הכדור במעבר מתקופה קרה לתקופה חמה יותר.

בשנת 1996 התפרסם מחקר נוסף של L.L.Ely וצוות חוקרים על שחזור נתוני שיטפונות עבר בנהר במערב הודו מ־1700 השנים האחרונות. בניתוח נתונים אלו זיהו החוקרים הגדלה ניכרת בתדירות השיטפונות ובעוצמתם לפני 300-400 שנה. הגדלה זו מוסברת בפעילותם של צקלונים טרופיים במערכת המונסונים.

הידרולוגיה של שיטפונות עבר נבדקה לראשונה בארץ בנחלים הגדולים של הנגב המרכזי — נחל צין, נחל פארן ונחל נקרות — במסגרת עבודת הדוקטור של נעם גרינבאום. מחקר זה הוא הראשון שנעשה באקלים צחיח קיצוני. ב־1997 עשו נעם גרינבאום ואשר שיק שימוש באותה שיטה בנחל חימר ובנחל אשלים בדרום מדבר יהודה עבור מפעלי ים המלח, וגרינבאום ויהודה אנזל עשו זאת ב־1998 בנחלים בינוניים וקטנים בנגב עבור נציבות המים.

נתונים הידרולוגיים בנגב

הנתונים ההידרולוגיים המדודים בנגב מצומצמים. באזור הצחיח הקיצוני של הנגב המרכזי והדרומי, שבו כמות המשקעים השנתית הממוצעת קטנה מ־100 מ"מ, מתרחשים מעט אירועי זרימה. השתרעות סופות הגשם קטנה יחסית לגשמי צפון הארץ ומרכזה. התחנות ההידרולוגיות הראשונות של השירות ההידרולוגי הוקמו בשנות ה־50 של המאה ה־20 בנחל צין, בנחל פארן, בנחל נקרות וביובליהם. רק בנחלים אלו קיים בסיס נתונים של חמישים שנה ויותר, אך רק במעט תחנות הוא רציף. אחדות מהתחנות נהרסו על־ידי השיטפונות ולא חודשו. בשנות ה־80 וה־90 הקים השירות ההידרולוגי תחנות מעטות בנחלים הגדולים, כך שמרוב נחלי הנגב אין מידע הידרולוגי. נתונים פזורים מנחלים לא ממוכשרים נאספו במדידות בלתי ישירות שנערכו על־ידי הצוות ההידרולוגי של התחנה לחקר הסחף, השירות ההידרולוגי והקבוצה לחקר שיטפונות מהמחלקה לגיאוגרפיה של האוניברסיטה העברית. בשנים 1995-1996 החלה התחנה לחקר הסחף בהצבת מכשירי מדידה באגני ניקוז קטנים ובינוניים, שמהם הולכים ונאספים נתוני זרימה. איכות נתוני הזרימה במדבר אינה גבוהה, בגלל משטר הזרימה המשתנה ובגלל תהליכי החתירה והמילוי המתרחשים בתשתית האפיק במהלך השיטפון.

נתונים הידרולוגיים בנחל צין

לנחל צין ישנם נתונים הידרולוגיים מדודים מזה למעלה מ־60 שנים. נתונים אלו מקורם בתחנות הידרומטריות של השירות ההידרולוגי — חמש מהן באפיק הראשי ושתיים ביובלים.

בנחל צין התחתון מתרחשים בממוצע כ־4.2 שיטפונות בשנה. ב־10% מהשנים אין כלל שיטפונות. ספיקות השיא המקסימליות שנמדדו הן: ב־1991 550 מ"ק/שנייה, ב־2004 1280 מ"ק/שנייה וב־2010 820 מ"ק/שנייה.

התחנה ההידרומטרית הראשונה הוקמה על־ידי מפעלי חברת האשלג הארץ־ישראלית (מפעלי ים המלח כיום) והיא פעלה בשנים 1935-1946. בשנים אלה נמדדו בתחנה 38 שיטפונות, מהם עשרה שיטפונות שעוצמתם מעל 100 מ"ק/שנייה. בסיס נתונים זה מוגדר כסדרת שיטפונות היסטוריים מאחר ואינו רציף עם סדרות הנתונים המדודות. בסדרה היסטורית זו תועדו בשנת 1945 שני שיטפונות גדולים במיוחד, שספיקתם המוערכת היא 600 מ"ק/שנייה ו־550 מ"ק/שנייה.

איך מגלים שיטפונות שאירעו בעבר

שיטפונות עבר הם שיטפונות שהתרחשו קודם לתקופות המדודות. שחזור של שיטפונות עבר מבוסס על סימני הזרימה הגבוהים של אותם שיטפונות. סימנים אלה הם בעיקר חומרי סחף שהובילו מי השיטפון אשר שקעו כשהמים האטו את זרימתם. סימנים אחרים הם שרידי עצים שצפו על פני המים הזורמים, הוסטו אל גדת הנחל ונשארו על הגדות. משקעים אלו שוקעים באתרים שבהם מהירות הזרימה יורדת באופן דרסטי, כגון: פתחי יובלים המוצפים במעלה היובל, כאשר המים של היובל נפגשים במים גבוהים של שיטפון באפיק הראשי העוצר את כניסת המים מהיובל לאפיק הראשי וגורם לעליית מפלס המים ביובל. כמו כן המשקעים נותרים כתוצאה ממכשולים שגורמים להאטת הזרימה, במערות שבדפנות הנחל או בהתרחבות של האפיק. בקטעי קניונים צרים, סימני זרימה אלה גבוהים במיוחד ולכן הם נשמרים לאורך שנים רבות. פסים של חומר אורגני מעצים שנסחפו במי השיטפון נפוצים באזור הצחיח של הנגב. מאחר והם שקעו לאורך דפנות הנחל ניתן לשחזר לפיהם את הגובה אליו הגיעו המים בזמן השיטפון. השתמרות חומר סחף שאינו אורגני עשויה להגיע למאות ולאלפי שנים, בעוד שהחומר האורגני של העצים ששקעו בצדי הנחל משתמר מאות שנים.

המחקר ההידרולוגי

שחזור ספיקות השיא של שיטפונות עבר מבוססת על הגיאומטריה של סדרת חתכי רוחב, תוואי ושיפוע אפיק קבועים. בנחלים שמתחתרים במסלע קשה מתפתח בדרך כלל קניון צר ועמוק יחסית שבו המים בעת שיטפון עולים לגובה רב. באתרים כאלה ניתן לשחזר בדיוק רב יחסית את רום המים, שהרי הם משמשים כעין תחנות הידרומטריות טבעיות. ניתן להניח כי תוואי הנחל, חתך הרוחב של הנחל ושיפוע האפיק, אינם משתנים באופן ניכר במשך מאות או אלפי השנים האחרונות. הנחה נוספת היא שסימני הזרימה מייצגים את רום המים בשיא השיטפון.

קביעת ספיקות השיא של שיטפון עבר מסתייעת בתוכנה הנדסית הידראולית המחשבת את גובה פני המים עבור ספיקות שונות. התוכנה הוכנה עבור זרימת מים בתעלות מלאכותיות לשימושים הנדסיים והותאמה לזרימות מים באפיקים טבעיים. השוואת גובה סימני הזרימה עם הגבהים המחושבים על ידי התוכנה, נותנת הערכה מינימלית של ספיקת השיא.

מצב אופטימלי הוא מיקום של אתר מחקר בקרבת תחנה הידרומטרית פעילה, המאפשר כיול של חישובי התוכנה באמצעות שיטפונות מדודים.



קביעת גיל השיטפון

- לקביעת גיל השיטפון נעזר המחקר בשתי שיטות עיקריות:
1. שיטת איזוטופיות: פחמן 14 – שיטה זו מופעלת על דוגמאות של חומר אורגני דק ששקע ממי השיטפון הנבדק. כמו כן ניתן לדגום חומר אורגני מתוך שרידי העצים שנשארו מאותו שיטפון. שיטה זו מדויקת ומתאימה ל-50,000 השנים האחרונות. המכשיר מודד את שארית האקטיביות של הפחמן 14 בדעיכתו. אקטיביות זו משווה לרמת הפחמן 14 האטמוספרי המוערך כקבוע מהעבר עד ימינו. הגיל המתקבל ממעבדת התיארוך הינו גיל הפחמן 14 לפני ההווה, כשההווה מוגדר כשנת 1950. בדוגמאות צעירות משנת 1950, ניתן להגיע לדיוק של עד קביעת שנת ההתרחשות. בתקופה זו נוצרו רמות פחמן 14 גבוהות בגלל הניסויים הגרעיניים, ועובדה זו מאפשרת תיארוך מדויק.
 2. שיטת תיארוך אופטית: שיטה המבוססת על פליטת קרינת אור עקב הארת גבישי קוורץ ופֶלֶקְסֶפְט (פצלת השדה). עוצמת הקרינה הנפלטת היא יחסית לזמן שעבר מאז החשיפה הקודמת לאור השמש. השיטה מחייבת איפוס של שעון הזמן באמצעות חשיפה מלאה של גרגירי המשקע לקרינת השמש וקבירתם לאחר מכן. שיטה זו חשובה במיוחד במדבר עקב מיעוט החומר האורגני.

אתר המחקר בנחל צין

נחל צין הוא נחל גדול הזוכה לשיטפונות רבים וגדולים. ניתן היה לשער שגם בעבר היו בו שיטפונות גדולים, שניתן יהיה לזהות אותם. אתרי המחקר שנבחרו בנחל צין הם קניונים סלעיים יציבים, בהם שקעו משקעי שיטפונות של כמה אירועי זרימה שניתן להפריד ביניהם. אזור המחקר של גרינבאום הוא קטע נחל באורך של 800 מ' וברוחב של 25-40 מ' בקניון התחתון של נחל צין החתור בסלע גירי קשה. שטח הניקוז באתר 1150 קמ"ר, ושיפוע האפיק הממוצע 0.01. התחנה ההידרומטרית "עקרבים", שפעלה בשנים 1951-1981, ממוקמת כ-8 ק"מ במעלה והתחנה ההידרולוגית "ערבה", הפועלת משנת 1989, ממוקמת כ-6 ק"מ במורד. לאורך הקניון נמצאו אתרים רבים של משקעי שיטפונות בעיקר בפתחי יובלים – מהם שלושה אתרים נחקרו בפירוט.

סדקי מתח בטין בקרקעית מאגר נקרות לאחר השיטפון

תוצאות המחקר

במסגרת המחקר שוחזרו בנחל צין 26 שיטפונות עבר בעלי ספיקת שיא של 200-1500 מ"ק/שנייה שהתרחשו במהלך 2000 השנים האחרונות. נתונים אלו מגדילים את טווח ספיקות השיא מ-600 מ"ק/שנייה – ספיקה מדודה, ל-1500 מ"ק/שנייה – ספיקת שיא של שיטפון עבר. פיזור השיטפונות ב-2000 השנים האחרונות מראה התקבצויות של שיטפונות בתקופות מסוימות, המתחלפות עם תקופות שבהן השיטפונות נדירים ומעטים. שיטפונות קטנים ובינוניים עשויים להתקיים גם בתקופות של היעדר שיטפונות גדולים, אך הם אינם נקלטים באתרי המחקר, מכיוון שהשיטפונות הגדולים "מנקים" את החומר שהשאירו השיטפונות הקטנים בשולי הנחל. התוצאות מראות שתי תקופות של שיטפונות רבים וגדולים. התקופה הראשונה חלה מ-1380 עד 920 שנים לפני זמננו. בתקופה זו זוהו 12 שיטפונות עבר גדולים, שניים מהם גדולים מאוד, שספיקתם 1100 מ"ק/שנייה ו-1500 מ"ק/שנייה. התקופה השנייה שבה הופיעו שיטפונות רבים היא 65 השנים האחרונות.



שיטפון במעוק של נחל צין
בנקודת כניסתו לערבה

גרינבאום דיווח כי מ־2000 עד 1730 שנים לפני זמננו היו בנחל צין חמישה שיטפונות בתדירות גבוהה ובעוצמות נמוכות יחסית, המעידים על אקלים לח יותר עם עוצמות גשם נמוכות יחסית. על-פי קליין מפלס ים המלח בתקופה זו היה 330- מ' והאקלים היה הרבה יותר לח מהיום. על-פי מחקרו של פרומקין מפלס ים המלח בתקופה זו היה 375- מ' והאקלים קצת לח יותר מאשר היום; המחילות הקרסטיות בהר סדום המיוחסות לתקופה זו רחבות למדיי, מה שמעיד על תדירות שיטפונות בעוצמה גבוהה.

מ־1730 עד 1380 שנים לפני זמננו זוהו רק שני שיטפונות עבר. על-פי מחקריהם של פרומקין וקליין מפלס ים המלח באותה תקופה היה נמוך: בין 395- מ' לבין 400- מ' ואקלים התקופה מוערך כיבש. רוחב הצינורות הקרסטיים מתקופה זו בהר סדום צר ביותר. גם ריכב רובין, שבדק את אקלים הנגב בתקופה הביזנטית, טוען שאופי מערכות איסוף הנגר העירוני בהתיישבות כנגב שהחל במאה הרביעית ועד המאה השביעית, מעיד על אקלים צחיח.



שיטפון בנחל ערבה

תנודות אקלימיות ב־2000 השנים האחרונות

תוצאות המחקר של שיטפונות העבר בנחל צין הושוו אל מידע אקלימי שנגזר מתחומי מחקר אחרים — בעיקר מניתוח התנודות האקלימיות שהשפיעו על מפלס ים המלח ב־2000 השנים האחרונות. מתברר שבין שתי מתודות המחקר ישנה התאמה בזיהוי התקופות הגשומות לעומת התקופות היבשות. תקופות עם שיטפונות רבים בנחל צין נקשרות לתקופות של מפלסים גבוהים בים המלח, ולהיפך — תקופות של שיטפונות מעטים נקשרות למפלסי ים נמוכים.

עמוס פרומקין ושותפיו לחקר המערות הקרסטיות בהר סדום הקישו מרוחב המחילות שבמערות הר סדום על עוצמת השיטפונות שהיו בשטח המחקר בתקופות מוגדרות. ציפורה קליין חקרה את תנודות מפלס ים המלח ותנודות אקלימיות בארץ ישראל בתקופות היסטוריות. היא הסיקה מהגובה המשתנה של מפלס ים המלח בתקופות השונות על השינויים האקלימיים באזור. ההתאמות בין נתוני שני מחקרים אלה למחקר השיטפונות יוצרות את התמונה הבאה:



שיטפון בנחל ערבה ליד חצבה



שיטפון בנחל נקרות

בין 1380 ל-920 שנים לפני זמננו זוהו 12 שיטפונות עבר גדולים, שספיקת שניים מהם גדולה מ-1000 מ"ק/שנייה. בתקופה זו, על-פי קליין, היה מפלס ים המלח 350- מ'; על-פי פרומקין הגיע מפלס ים המלח ל-385 מ'. מפלסים אלה מעידים על אקלים לח יותר מאשר היום, כפי שבא לידי ביטוי גם בשיטפונות נחל צין.

בתקופה שבין 920 ל-530 שנים לפני זמננו נמצאו עדויות לחמישה שיטפונות גדולים – דבר המעיד על תקופה צחיחה עם עוצמות גשם גבוהות מדי פעם בפעם.

בין 530 שנים לפני זמננו ועד שנת 1935 נמצאו עדויות לשני שיטפונות גדולים. מפלס ים המלח התאפיין באותה תקופה בקצב משתנה של ירידת המפלס. שתי הנחות אלו מצביעות על אקלים צחיח יותר בשנים אלו. אם מקבלים את עמדותיהם של קליין ושל פרומקין, הרי התקופות שבהן התרחשו שיטפונות רבים בנחל צין תואמות את התקופות בהן האקלים בצפון הארץ היה לח יותר.

שיטפונות בנחל צין

בעשר השנים בין השנים 1935 ל-1945 נמדדו בנחל צין 38 שיטפונות, מהם שניים גדולים מ-200 מ"ק/שנייה. בין השנים 1951-1995 נמדדו בנחל צין 98 שיטפונות, מהם רק שלושה שספיקתם עלתה על 200 מ"ק/שנייה. ממוצע השיטפונות בשנים 1935-1945 היה 3.2 שיטפונות לשנה, לעומת ממוצע של 2.4 שיטפונות לשנה בשנים 1936-1995.

סיכום

זיהוי שיטפונות העבר וניתוחם מרחיבים את בסיס הנתונים של השיטפונות למאות ואלפי שנים. הגדלת בסיס הנתונים משפרת את יכולת החיזוי של שיטפונות עתידיים – אמצעי המשמש כלי עזר למתכנני פיתוח פעילות האדם במדבר (כבישים, מפעלים, יישובים ושטחים חקלאיים). בסיס נתונים זה מספק גם מידע לניתוח שינויים במשטר ההידרולוגי הקשורים לתגודות אקלימיות.

בנחל צין זוהו 26 שיטפונות עבר בעלי ספיקות גבוהות שהתרחשו ב-2000 השנים האחרונות. ממצא זה מאפשר זיהוי של מעברים מתקופות עתירות שיטפונות גדולים לתקופות שבהן השיטפונות הגדולים נדירים.

השינויים בתדירות השיטפונות בנחל צין ובעוצמתם נקשרים היטב לשינויים במפלס ים המלח ואלה קשורים לשינויים בכמות הגשם באגן הניקוז של הירדן. תקופות עתירות שיטפונות בנחל צין מקבילות לתקופות לחות שבהן מפלס ים המלח היה גבוה, וההיפך – תקופות של שיטפונות מעטים מתאימות למפלס ים נמוך, דהיינו: תקופות יבשות יותר.

תגודות בתדירות השיטפונות המדודים בנחל צין ובעוצמתם בשנים 1935-1995, תואמות תגודות בכמות הגשם המדודות כנגב בשנים אלו. עובדה זו מחזקת את הקשר בין תדירות השיטפונות ועוצמתם לבין כמויות הגשם באותו זמן ובאותו אזור, ומאפשרת להשתמש בקשר זה בניתוח תגודות הידרולוגיות ארוכות טווח המזוהות בתוך סדרות נתונים של שיטפונות עבר.