

יער, מים ואש – פיתוח מודל להערכת תרומתו של היער הרב-תכליתי לשירות ויסות הנגר ולהערכת השפעתן של שרפות יער עליו

אלון לוטן^{*1} | יואב פלד² | לאה ויטנברג²

- 1 מרכז קדס לחקר גגות ירוקים, אוניברסיטת חיפה
 - 2 בית הספר למדעי הסביבה, אוניברסיטת חיפה
- * alonlotan19@gmail.com

תקציר

לאחר השרפה. תוצאות המחקר מראות שהמודל שפותח מתאר בצורה טובה את פוטנציאל הנגר באזור המחקר, ומצביעות על ירידה מובהקת ביכולת היער לווסת נגר לאחר השרפה. בעקבות השרפה נמצאו עלייה בערכי CN, ירידה בסף המשקעים הנדרש להיווצרות נגר, והופעת נגר עילי בתת-אגן קטן (4.3 קמ"ר) שלא נצפו בו אירועי נגר בתנאי טרום-שרפה. הממצאים מדגישים את תרומתם של יערות צפופים ורב-שכבתיים למיתון הנגר ואת רגישות התגובה ההידרולוגית להפרעות מסוג שרפה. שילוב כלים מבוססי חישה מרחוק ומידול הידרולוגי מאפשר הערכה מרחבית וכמותית של שינויים בשירות ויסות שהיער מספק, ומהווה בסיס תומך לקבלת החלטות בניהול יער בכלל ובניהול יער רב-תכליתי בפרט באופן בר-קיימא ובמסגרת היערכות לשינוי האקלים.

יערות ים תיכוניים מספקים מגוון רחב של שירותי מערכת אקולוגית, ובהם ויסות נגר עילי, הפחתת הצפות וצמצום בסחיפת הקרקע. השירותים האלה תלויים במידה רבה במבנה הצומח, ברציפות הכיסוי וביחסי הגומלין בין הקרקע והצומח. לכן, לאופן ניהול היער, בשגרה ולאחר הפרעות, יש השפעה רבה על אספקתם של השירותים השונים. שרפות יער מהוות הפרעה משמעותית למערכות האקולוגיות של יערות, ועלולות לפגוע ביכולתו של היער לספק שירותי ויסות הידרולוגיים, בייחוד באזורים ים תיכוניים המועדים לאירועי גשם קצרים ובעוצמות גבוהות. מטרתו של מחקר זה הייתה לפתח מודל מרחבי להערכת התרומה לשירות ויסות הנגר שנובעת מהשטחים שבניהול קק"ל ביערות הרי ירושלים בכלל, ומהיער הרב-תכליתי בהם בפרט, וכן לבחון את השפעת שרפת היער שהתרחשה באזור באוגוסט 2021 על שירות זה. בשלב הראשון נערך מיפוי של תכנית הקרקע ותצורות הצומח ברזולוציה גבוהה באמצעות שילוב של כלי חישה מרחוק ולמידת מכונה. תוצרי מיפוי זה היוו בסיס להערכת פוטנציאל הנגר באמצעות שיטת CN בתוך המודל ההידרולוגי HEC-HMS. מדידות ספיקה בתחנה ההידרומטרית שבמורד אגן נחל שורק שימשו לכיול ולאומות של המודל. חומרת השרפה מופתה באמצעות מדד של חישה מרחוק (dNBR) ושולבה בהתאמת ערכי ה-CN

מילות מפתח

מודל הידרולוגי, שירותי מערכת אקולוגית, HEC-HMS, Curve Number

מבוא – שירותי מערכת אקולוגית ושירותי יסות ביערות ים תיכוניים

המושג 'שירותי מערכת אקולוגית' מתייחס למכלול סוגי התועלת הישירה והעקיפה שהחברה האנושית מפיקה מתפקודן של מערכות אקולוגיות, טבעיות וכאלה המנוהלות בידי אדם. מאז שנטבע והוגדר במסגרת הערכת המילניום (Millennium Ecosystem Assessment), נעשה מושג זה לכלי מרכזי בהבנת הקשר בין תהליכים אקולוגיים, רווחת האדם וקבלת החלטות תכנוניות וניהוליות (MEA, 2005). גם בישראל נערכה הערכה מקיפה של התרומה של המערכות האקולוגיות השונות לקיומם ולרווחתם של תושבי ישראל (לוטן ואח', 2019). שירותי המערכת האקולוגית מקובצים לרוב לשלוש קטגוריות עיקריות: שירותי אספקה – מוצרים מוחשיים וישירים שהאדם מפיק מהטבע; שירותי יסות – תהליכים טבעיים שמווסתים תנאים סביבתיים; שירותי תרבות – ערכים לא חומריים דוגמת נוף, פנאי וחינוך. בבסיס שלוש הקטגוריות הללו נמצאים תהליכים אקולוגיים תומכים (שנקראים לעיתים 'שירותי תמיכה'). התהליכים הבסיסיים האלה מאפשרים את קיומה של המערכת האקולוגית, ולכן גם את אספקת כל שאר השירותים. שירותי הוויסות יהיו מוחשיים כחות בטווח הזמן הקצר, אך יש להם תפקיד מרכזי בשמירה על יציבות אקולוגית, בצמצום סיכונים סביבתיים ובהבטחת רווחה כלכלית וחברתית בטווח הבינוני והארוך (Díaz et al., 2018).

יערות מספקים מכלול רחב ומורכב של שירותי מערכת אקולוגית התורמים באופן ישיר ועקיף לרווחת האדם ולתפקוד מערכות סביבתיות בקני מידה מקומיים, אזוריים ועולמיים (Anderegg et al., 2020). הם מהווים מקור לשירותי אספקה, כגון עץ, ביומסה, מים ומשאבים ביולוגיים, ובמקביל מספקים שירותי יסות מרכזיים, הכוללים קיבוע ואגירת פחמן, ויסות אקלים ומיקרו-אקלים, ויסות מחזור המים באמצעות הפחתת נגר עילי, הגברת חלחול והשהיית זרימות שיא, שיפור איכות המים באמצעות סינון משקעים ומזהמים ומניעת סחיפת קרקע וייצוב מדרונות באמצעות כיסוי צמחי ומערכות שורשים מפותחות (Aznar-Sánchez et al., 2018). נוסף על כך, יערות תורמים לוויסות הפרעות טבעיות, ובהן שרפות, סערות רוח והתפרצויות מזיקים ומחלות. כמו כן, מבנה היער, הרכב המינים בו וממדי המגוון הביולוגי משפיעים על עמידות המערכת ועל יכולתה לשמור על תפקוד לאורך זמן (Pausas and Keeley, 2019). לצד השירותים האלה, יערות מספקים שירותי תרבות חיוניים, ובהם ערכי נוף, פנאי, חינוך, זהות, השראה אומנותית ורוחנית ורווחה נפשית, שתורמתם החברתית והכלכלית הולכת ומתחדדת, בייחוד באזורים המיושבים בצפיפות (Velasco-Muñoz et al., 2022). בבסיס כלל השירותים

הללו מצויים התהליכים האקולוגיים התומכים, כגון ייצור ראשוני, מחזורי נוטריינטים, יצירה ופוריות של הקרקע, וכן המגוון הביולוגי (רוטנברג ויקיר, 2018), המאפשרים את ההפקה של כלל שירותי האספקה, הוויסות והתרבות. למכלול שירותי המערכת, ובעיקר לשירותי הוויסות, תרומה מצטברת ליציבות אקולוגית ולחוסן כלכלי וחברתי, ומכאן חשיבותם בניהול ובשיקום של יערות בעידן שמתרחשים בו שינוי האקלים, הפרעות גוברות ולחצי פיתוח גדולים.

גם בישראל נמצא שיערות וחורשים מספקים מגוון רחב של שירותי מערכת אקולוגית, ובכלל זה שירותי אספקה, כמו ביומסה מעוצה ומרעית לצאן ובקר ולדבורי דבש; שירותי יסות, כמו ויסות אקלים מקומי ועולמי (לכידת פחמן), ויסות איכות האוויר, האבקה וויסות סחיפת קרקע, נגר והצפות; שירותי תרבות, כמו פנאי ונופש, אסתטיקה ונוף, מסורת, זהות ושייכות. לצד זאת, נמצא שגורמים מחוללי שינוי ישירים משפיעים לרעה על מערכות היער והחורש בישראל, בעיקר שינוי בשימושי הקרקע, זיהום, ניצול יתר של משאבים ושרפות, שבהשפעתם שטחן של המערכות האקולוגיות של היערות והחורשים קטן, ותפקודן נפגע, מה שגורם לירידה באספקת מרבית שירותי המערכת האקולוגית (לוטן ואח', 2019).

ויסות נגר והצפות

מבין שירותי הוויסות, שירות ויסות הנגר העילי נחשב לאחד המרכזיים, אך גם לאחד הקשים לכימות ולהערכה. שירות זה מתבטא בהפחתת נכח הנגר, בהאטת מהירות הזרימה, בהקטנת ספיקות שיא ובהארכת זמן התגובה ההידרולוגית של האגן לאירועי גשם (Hua et al., 2022). תפקוד זה מכחית סיכונים הצפה, מצמצם סחיפת קרקע והסעת סדימנטים, ותורם לשימור איכות המים במורד האגן. ויסות הנגר פועל דרך שילוב מספר מנגנונים: לכידת משקעים (interception) בחופת העצים, תהליכי אידוי-דיות, שיפור תכונות הקרקע (חדירות, מבנה, תכולת חומר אורגני), והגנה פיזית על פני הקרקע באמצעות נשר וצומח תת-יער (Keles, 2019). המנגנונים האלה מושפעים במידה רבה מתצורת הצומח, מצפיפותו ומהמבנה הרב-שכבתי של היער. לפיכך, לא כל יער מספק את שירות ויסות הנגר באותה מידה, וקיימת שונות גבוהה בין יער צפוף ורב-שכבתי לבין יער פתוח או מערכת עשבונית. למשל, במחקר שנערך בצפון מקסיקו (ממוצע משקעים רב-שנתי 947 מ"מ) נמצאו הבדלים בשיעורי הלכידה: 19.2% ביערות אורנים, 13.6% ביערות אלונים ו-23% ביערות מעורבים (Silva and Rodríguez, 2001). מחקר רוחב, שבחן לאורך 30 שנה 29 מינים שונים ב-63 אתרי מחקר במדינות אירופיות באגן הים התיכון (צרפת, יוון, איטליה, פורטוגל וספרד) עבור כמות משקעים שנתיים של 200–1,600 מ"מ, הראה כי בממוצע

על פי תורת ניהול היער החדשה של קק"ל (אסם ואח', 2014) מרבית שטחי היערות בישראל נכללים בקטגוריה של "יער רב-תכליתי", שייעודו העיקריים הם לשמור על רצף השטחים הפתוחים, להביא לידי ביטוי את המגוון הנופי הישראלי ולספק מגוון שירותי מערכת אקולוגית. השטחים האלה מנהלים באופן אקסטנסיבי, מתוך הישענות על תהליכים של התחדשות טבעית, סוקצסיה ואדפטציה (אסם ואח', 2014), ולכן מאופיינים בדרך כלל במגוון של צומח מעוצה ועשבוני, כולל עצי מחט ממקור נטוע ועצי חורש ים תיכוני מקומיים. שטחי היער הרב-תכליתי מכוונים לשמר תפקוד אקולוגי גבוה ולתת מענה לצרכים אקולוגיים, נופיים, חברתיים וכלכליים תוך הסתמכות על ממשק מינימלי (פורת ואח', 2017; אוסטרובסקי ואח', 2024). עם זאת, הגדרה זו אינה מלווה תמיד בכלים כמותיים המאפשרים להעריך כיצד החלטות ממשק שונות, בהתנהלות שגרתית או לאחר הפרעות, משפיעות בפועל על אספקת שירותי הוויסות, ובפרט על ויסות הנגר. פער זה מחדד את הצורך בגישות מחקריות המשלבות מידע מרחבי אמפירי ומידול תהליכים כבסיס לפיתוח ממשק יער מושכל ומותאם למאפייני המערכת האקולוגית ולשירותים העיקריים שהיא מספקת. על רקע זה **מטרת המחקר** היא לפתח מערכת מרחבית-כמותית להערכת תרומת היערות הרב-תכליתיים שבניהול קק"ל לשירות ויסות נגר עילי. מטרה זו הושגה באמצעות פיתוח מודל למיפוי מדויק ועדכני של תצורות הצומח העיקריות ביער ושילובו בפיתוח של מודל הידרולוגי אגני כדי להעריך את התרומה של השטחים שבניהול קק"ל להתפתחות ולמיתון של זרימות מים באגן היקוות בעקבות ירידת משקעים. חשיבות השירות וחשיבות השימוש במודל מודגמות דרך הערכה של השינוי בנגר העילי בעקבות שרפת יער שגורמת להסרה חלקית או מלאה של כיסוי הצומח. שני החלקים, המודל למיפוי הצומח והמודל ההידרולוגי, יאפשרו הערכה מושכלת של פעולות הממשק המינימלי המוצעות בתוכניות האב ושל תרומתן להפכת מרב שירותי המערכת האקולוגית בכלל וויסות נגר עילי בפרט.

אזור המחקר ושיטות עבודה

המחקר נערך באזור היערות שבהרי ירושלים (יער הקדושים, יער הסטף ויער צרעה ואשתאול), במעלה אגן נחל שורק, תוך התמקדות בשטחים שבניהול קק"ל. אזור זה מאופיין באקלים ים תיכוני ובטופוגרפיה הררית, שבולטת יותר בחלקו המזרחי (ממזרח לבית שמש) ומתונה יותר בחלקו המערבי, ויש בו שונות גבוהה בכיסוי הצומח. באוגוסט 2021 התרחשה באזור שרפה נרחבת בשטח 11,000 דונם (איור 1), ובמחקר השווינו בין התנאים בשטח לפני השרפה ולאחריה.

79% מהמשקעים חודרים דרך החופה (throughfall) עם ערכים גבוהים במיוחד באלונים (85–88%) ונמוכים יותר באורנים (עד 70%) (Llorens and Domingo, 2007). שיעורי האידוי-דיות מאגני היקוות מיוערים נמצאו גבוהים משמעותית בהשוואה לאגנים שהקרקע בהם חשופה או מכוסה בצמחייה עשבונית או שיחית, ועשויים לעמוד על 90% מכמות המשקעים השנתית (Huxman et al., 2005). בישראל תיעדו שילר ואח' (2003) ברמת הנדיב שיעור אידוי-דיות שנתי של 416 מ"מ באלון מצוי (*Quercus calliprinos*), ובמחקר נוסף בגליל נמצא כי שיעורי הדיות של אלוני התבור (*Q. ithaburensis*) ביער נעים בין 183.7 ל-239 מ"מ, שהם כ-30–55% מכמות המשקעים השנתית (Schiller et al., 2010).

בעקבות מכלול התהליכים הללו ההידרוגרף (גרף המתאר את שינוי הספיקה בזמן בנקודת מוצא מסוימת) של אגן היקוות מיוער צפוי להתאפיין בספיקות שיא נמוכות, בנפח נגר קטן ובזרימות ממושכות יותר בהשוואה לאגן שאינו מיוער; הממצאים האלה אוששו גם במחקר שנערך ביער ים תיכוני בספרד. במחקר זה נמצא כי לעוצמות הגשם יש השפעה מוגבלת יחסית על גודל ספיקות השיא, וכי עומק מפלס מי התהום היה הגורם המסביר המרכזי ביחסי גשם–נגר. תוצאות המחקר חיזקו את ההנחה כי יערות מפחיתים שיטפונות וסחיפת קרקע, בייחוד במדרונות תלולים (Serrano-Muela et al., 2008).

להפרעות בכלל ולשרפות יער בפרט יש השפעה מורכבת על התגובה ההידרולוגית ועל רכיבי מחזור המים באגני היקוות מיוערים; שרפות יער מובילות לעלייה חדה בכמות המים המגיעה ישירות לקרקע, ומכאן להגברה של הנגר העילי ושל קצבי סחיפת הקרקע (Wittenberg, 2012). כמויות הסחף שנמדדו לאחר שרפות במערכות ים תיכוניות עלולות להגיע לכ-1.2 טונות לקמ"ר לכל מ"מ גשם ולעלות על מאות טונות לקמ"ר, ערכים החורגים מהגבול העליון המקובל של 'סחף קרקע נסבל' (קצב אובדן מרבי שאינו עולה על קצב היווצרותה הטבעי של הקרקע, ואינו פוגע ביצרנות לאורך זמן), המוערך ב-100 עד 140 טונות לקמ"ר לשנה (Verheijen et al., 2009); סחף בהיקף גדול יותר נחשב לבלתי הפיך בטווחי זמן של עשרות שנים, בהתחשב בקצב הטבעי האיטי של התפתחות קרקעות (Morgan, 1992). סחיפת קרקע לאחר שרפה מלווה באובדן נוטריינטים ומינרלים, בפגיעה במרקם ובמבנה של הקרקע, ובפרט בהרס שכבת הקרקע המינרלית העליונה (אופק A). אי לכך, ישנן לה השלכות מרחיקות לכת על תהליכי שיקום הצומח והמגוון הביולוגי, על יציבות מדרונות ועל תפקוד מערכות אקולוגיות באגנים שרופים (Wittenberg and Malkinson, 2014).



איור 1

השרפה בהרי יהודה, אוגוסט 2021
צילום: נעמה טסלר

חודשים לכל תקופה) כדי ללכוד הבדלים פנולוגיים בין כיסויי קרקע (למשל עשבוניים חד-שנתיים לעומת חורש או יער ירוק-עד). דיוק הסיווג הוערך באמצעות נקודות תיקוף ייעודיות, והתקבל דיוק כולל של 96.3%. לאחר הסיווג הלועזי נוספו שכבות מרחביות של חקלאות, שטחים בנויים או סלולים, דרכים ושבילים, מקווי מים ומחצבות ממאגרי מידע לאומיים ו-OpenStreetMap, ובוצע תת-סיווג ליחידות יער על סמך נתוני קק"ל עבור פיקסלים שסווגו ככיסוי עצים. מיפוי זה היווה בסיס למידול ההידרולוגי ולהערכת שירות ויסות הנגר (ראו להלן).

הערכת שירות ויסות הנגר

הערכת שירות ויסות הנגר בוצעה באמצעות מודל ההידרולוגי אגני HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) שפיתח חיל ההנדסה האמריקאי (USACE, 2012). המודל מדמה את המרת הגשם לנגר באמצעות שקלול תהליכים כגון הפסדי חידור (חלק מהמים שחוזרים לקרקע ואינם תורמים להיווצרות נגר) וזרימה עילית (מים הזורמים על פני הקרקע כאשר קצב הגשם עולה על קצב החידור או כשהקרקע רוויה), ועל-ידי יצירה של הידרוגרף. המודל מאפשר להפיק מדדים הידרולוגיים ברמת תתי-האגנים – נפח נגר, ספיקת שיא, זמן השהיה (lag time) ומשך הזרימה, ולהריץ

מיפוי כיסוי ושימושי הקרקע

מטרת חלק זה הייתה ליצור מפת כיסוי ושימושי קרקע (LULC, Land Use Land Cover) עדכנית וברזולוציה גבוהה, ובתוך כך גם לפתח מודל פשוט למיפוי צומח, הנשען על ערוצי לוויין חינוניים, כזה שניתן יהיה לחזור עליו בעתיד. מאפייני כיסוי הקרקע בשטחים הטבעיים והנטועים שבאזור המחקר זוהו באמצעות מודל סיווג מבוסס למידת-מכונה (Random Forest) שהורץ ב-Google Earth Engine, ושאוּמַן ותוקף על גבי תצלומי אורתופוטו ברזולוציה גבוהה (יערות הקדושים ואשתאול מתאריך 31.5.2019, רזולוציה של 50 ס"מ). כ-150 נקודות אימון ותיקוף סומנו במיקומים שניתן היה לקבוע לגביהם את כיסוי הקרקע בוודאות גבוהה מתוך האורתופוטו, וסיווגי שטח שימשו לאימות סיווגים בלתי-ודאיים או להסרתם מתהליך האימון. הסיווג התמקד בתצורות הצומח הים תיכוני העיקריות הרלוונטיות לתפקוד ההידרולוגי ולמיפוי שירותי המערכת האקולוגית, וכלל חמש קטגוריות: צמחייה עשבונית (כולל קרקע חשופה או טרשים), שיחייה, יער או חורש פתוח עם תת-יער עשבוני, יער או חורש פתוח עם תת-יער שיחני, ויער או חורש צפוף (כיסוי עצים $\leq 50\%$). משתני הקלט כללו קומבינציה של 11 ערוצים ומדדים מלוויין Sentinel-2, שחושבו כממוצע עונתי לשתי תקופות (אביב וסתיו 2019, ממוצע של שלושה

ונתוני המשקעים בהם הוזנו למודל ברזולוציה של עשר דקות מחמש תחנות מטאורולוגיות. לכל תת-אגן הוזנו נתוני התחנה הסמוכה לו ביותר. כיול המודל והערכת ביצועיו נעשו באמצעות השוואת הנפח הכולל, עיתוי ספיקת השיא וצורת ההידרוגרף בתוצאות המחושבות של המודל ובנתונים שנמדדו בפועל.

הערכת השפעת שרפת יער על שירות ויסות הנגר

השפעת שרפת היער על תפוקת הנגר העילי הוערכה באמצעות השוואה בין תוצרי המודל ההידרולוגי במצבי טרום-שרפה ולאחר שרפה בתת-אגן שרובו נמצא בתוך האזור שנשרף באוגוסט 2021. מיפוי חומרת השרפה התבסס על מדד פרופורציה השרפה המנורמלת, NBR (Normalized Burn Ratio), המחושב מערוצי תת-אדום קרוב, NIR (Near Infrared), ותת-אדום קצר-גל, SWIR (Shortwave Infrared), של הלוויין Sentinel-2. חומרת השרפה הוגדרה על פי ההפרש בין ערכי NBR לפני השרפה ואחריה (dNBR). חומרת השרפה נקבעה לפי ערכי dNBR בטווחים שונים: נמוכה (100–269), בינונית (270–659) וגבוהה (660–1,300) (Key and Benson, 2006). בהתאם לחומרת השרפה עודכנו ערכי ה-CN, ובהיעדר נתוני שדה ישירים, יושמה גישה מקובלת בספרות המקצועית, שבה ערכי CN של כל סוג כיסוי קרקע (למעט מקווי מים) קיבלו תוספת בהתאם לחומרת השרפה: 5 יחידות לשרפה בחומרה נמוכה, 10 לבינונית ו-15 לגבוהה (Havel et al., 2019; Coschignano et al., 2018). על בסיס עדכון זה הופקה מפת ערכי CN לאחר השרפה, ששימשה קלט להדמיות הנגר במודל ההידרולוגי.

הדמיות הנגר בוצעו עבור אותם אירועי גשם ותוך שימוש באותם פרמטרים שיושמו בתרחישי טרום-שרפה, במטרה לבדוד את השפעת השינוי בכיסוי הצומח והקרקע. תוצרי המודל כללו חישוב והשוואה של נפח הנגר, ספיקות השיא, זמן ההשהיה ומשך הזרימה בין מצבי טרום-שרפה ולאחר שרפה ברמת תת-האגן וברמת האגן כולו.

תוצאות

מפת כיסוי קרקע ושימושי קרקע

בעזרת המודל למיפוי צומח המתבסס על ערוצי לוויין, שפותח במסגרת מחקר זה, ובשילוב עם מיפוי יחידות הממשק של קק"ל ומידע על שטחים חקלאיים, בנויים, סלולים ומופחים ממקורות לאומיים, הופקה מפת כיסוי קרקע ושימושי קרקע לאזור המחקר, הכוללת 11 קטגוריות של LULC (טבלה 1). באגן המחקר נמצאה שונות מרחבית גבוהה בהרכב כיסוי הקרקע. בתוך השטחים המנוהלים על

תרחישים שונים של שינויים בכיסוי ושימושי הקרקע עם דרישות נתונים מתונות יחסית.

חישוב הנגר במודל בוצע בשיטת SCS (Soil Conservation Service), שבמסגרתה נאמדו הפסדי הידור באמצעות שיטת ה-SCS Curve Number, והפקת ההידרוגרפים התבססה על שיטת SCS Unit Hydrograph. הפרמטר המרכזי במודל הוא מקדם הנגר CN (Curve Number), מדד חסר יחידות שערכו נע בין 30 ל-100, שמשמש להערכת פוטנציאל הנגר משטח נתון. ערכו נקבע כפונקציה של שימוש הקרקע וכיסוי הקרקע, תנאי הלחות המוקדמים (Antecedent Moisture Condition, AMC) וסיווג הקרקע לקבוצה הידרולוגית (Hydrologic Soil Groups, HSG). סיווג הקרקעות השונות באזור המחקר (על פי שכבת הקרקעות של משרד החקלאות, 1970) לארבע קבוצות הידרולוגיות נעשה לפי כושר הידור שלהן: מקבוצה A, המאופיינת בחדירות גבוהה ובפוטנציאל נגר נמוך (כגון חול), ועד לקבוצה D, המאופיינת בחדירות נמוכה ובפוטנציאל נגר גבוה (כגון חרסיות כבדות). ככלל, ערכי CN נמוכים מעידים על איבוד מים גבוה (חידור ואידוי-דיות) ועל פוטנציאל נגר נמוך, בעוד ערכים גבוהים מייצגים שטחים בעלי פוטנציאל נגר גבוה.

במחקר זה ערכי ה-CN, ששוויו לשילובים של סוג הקרקע, שימושי הקרקע וכיסוי הקרקע ומצב הלחות הצפוי לפני אירוע הגשם, התבססו על הספרות המקצועית (Hong and Adler, 2008; USDA, 2009), תוך ביצוע התאמות ייעודיות לאופי הצומח הים תיכוני בשטח המחקר (טבלה 1). לצורך דיוק הפרמטרים, נערך ניתוח של אחוז כיסוי העצים, השיחים והעשבונים בתצורות החורש והיער השונות (צפוף ופיתוח), וחושבו ערכים ממוצעים ששימשו לקביעת ערכי ה-CN הסופיים.

גבולות האגן הופקו ממודל גבהים דיגיטלי (Digital Elevation Model, DEM), ששימש גם לחישוב פרמטרים מורפומטריים, ובהם שיפוע ממוצע ואורך זרימה. אגן המחקר חולק ל-180 תתי-אגנים בעזרת מודל הגבהים, תוך ניסיון לשמור על הומוגניות יחסית בשימושי הקרקע ובכיסוי הקרקע בתוך כל תת-אגן. זמן ההשהיה חושב על מאפייני האגנים והטופוגרפיה, ושימש לקביעת צורת ההידרוגרף.

כיול המודל נעשה בסדרה של הרצות והתבסס על נתוני ספיקה מהתחנה ההידרומטרית שורק-יסודות שאליה מתנקז האגן הנכלל באזור המחקר, ועל חישוב או תיקון של מספר פרמטרים הידרולוגיים. נבחרו חמישה אירועי גשם בין השנים 2018–2020 שנמדדה בהם זרימה משמעותית,

Curve Number				מרכיבי תצורות הצומח (וחלקם היחסי (אחוזים)				אחוז משטח היער	כיסוי קרקע ושימושי קרקע
קרקע לחה (AMC II)		קרקע יבשה (AMC I)							
HSG D	HSG C	HSG D	HSG C	עצי יער או חורש	שיחים	עשבוניים	קרקע חשופה		
84.3	79.4	71.1				90	10	0.4	צמחייה עשבונית
80.7	75.8	66.2	59.8		90		10	4.2	שיחייה
81.9	76.6	67.8	60.9	30		60	10	12.6	יער או חורש פתוח עם צמחייה עשבונית
79.9	74.6	65.1	58.3	30	60		10	27.6	יער או חורש פתוח עם שיחייה
78.6	72.9	63.4	56.2	70	30			48.9	יער או חורש צפוף
95	90	86.5	79.1					1	שטח בנוי או סלול
100	100	100	100					-	מים
89	87	77.7	74.8					-	מחצבה
89	87	77.7	74.8					2.7	שביל לא סלול
89	85	77.7	72					0.2	חקלאות גידולי שדה
82	76	67.9	60.1					2.3	חקלאות מטעים

טבלה 1

כיסוי קרקע ושימושי קרקע, אחוזי הכיסוי שלהם ביערות הרי ירושלים וערכי CN שלהם לפי פירוט המרכיבים של תצורות הצומח באזור המחקר

נתוני אחוז הכיסוי מתייחסים למצב בתוך שטחי היערות המנוהלים בידי קק"ל; באגן כולו אחוזי הכיסוי אחרים. HSG הוא סיווג הקרקע לקבוצה הידרולוגית על סקלה A-D, שבין חדירות גבוהה ופוטנציאל נגר נמוך (A) לחדירות נמוכה ופוטנציאל נגר גבוה (D).

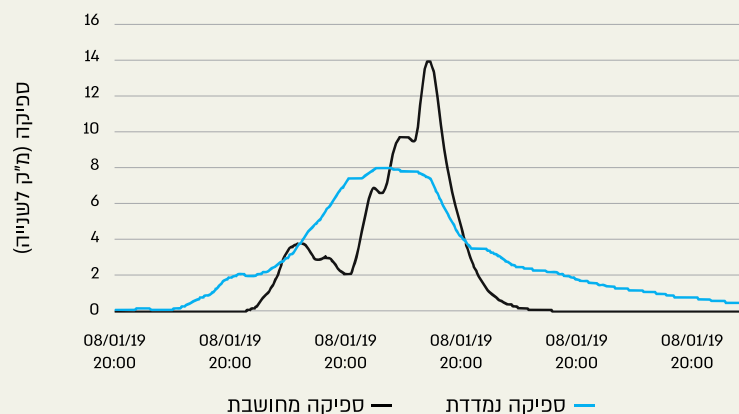
ערכי ה-CN משקפים את ההבדלים בין תצורות הצומח ואת השפעת סוג הקרקע ותנאי הלחות הקודמים. בניתוח של אחוז הכיסוי החלקי של תצורות הצומח השונות בתוך שטחי יער או חורש נמצא שביער או בחורש צפופים חופות העצים מכסות בממוצע כ-70% מהשטח, ואילו ביער או בחורש פתוחים הן מכסות בממוצע כ-30% מהשטח. השלמת הכיסוי ל-100% בכל אחת מהתצורות האלה מתקבלת משילובים שונים של שיחיה, עשבונים וקרקע חשופה, ובהתאם לכך משויכים ערכי CN משוקללים שונים לכל קטגוריה (טבלה 1).

ניכר שבתצורות שאינן מעוצות (צמחייה עשבונית) מתקבלים ערכי CN גבוהים יחסית, המעידים על פוטנציאל מוגבר ליצירת נגר עילי, בייחוד בתנאי קרקע לחה (AMC II) שערכי ה-CN מגיעים בה ל-79–84. לעומת זאת, תצורות יער או חורש, ובפרט הקטגוריה הצפופה, מאופיינות בערכי CN נמוכים יותר (73–79), המעידים על כושר הפחתת נגר גבוה יותר. נוסף על כך, במהלך כיוול המודל נמצא שבהתבססות על ערכי CN במצב של קרקע יבשה (AMC I) מתקבל מודל טוב יותר, גם כאשר מדובר באירועי גשם באמצע החורף. במבט מרחבי ישנם באגן נחל שורק שטחים נרחבים עם

ידי קק"ל תצורות יער או חורש מכסות כמעט 90% מהשטח, ועיקר הכיסוי הוא של יער או חורש צפוף (48.9%), ואחריו יער או חורש פתוח עם כיסוי שיחני (27.6%) ויער או חורש פתוח עם כיסוי עשבוני (12.6%). תצורות נמוכות יותר, כגון שיחיה (4.2%) וצמחייה עשבונית (0.4%), מהוות חלק קטן יחסית מהשטח, בעוד ששימושי קרקע אנתרופוגניים (שטחים בנויים, דרכים, חקלאות) תופסים בסך הכול אחוזים בודדים בלבד משטחי היערות (טבלה 1).

הערכת שירות ויסות הנגר

מבחינת תהליך כיוול המודל, הידרוגרף היחידה (תגובת הנגר של אגן ניקוז ליחידת גשם אפקטיבי בעוצמה אחידה ובמשך קבוע) חושב במערכת HEC-HMS על בסיס מודל SCS תוך שימוש בפרמטר זמן השהיה כמרכיב מרכזי בעיצוב ההידרוגרף. זמן ההשהיה מוגדר כפרק הזמן שבין מרכז הכובד של הגשם היעיל לבין שיא הספיקה, וחושב כנגזרת של זמן הריכוז לכל תת-אגן בנפרד. החישוב התבסס על מאפיינים מורפומטריים, ובהם האורך ההידראולי והשיפוע, שהופקו ממודל הגבהים הדיגיטלי, וכן על ממוצע משוקלל של ערכי ה-CN בכל תת-אגן.



איור 2

השוואה בין הספיקה המחושבת לספיקה הנמדדת בתחנה ההידרומטרית באירוע גשם בתאריכים 8-10 בינואר 2019

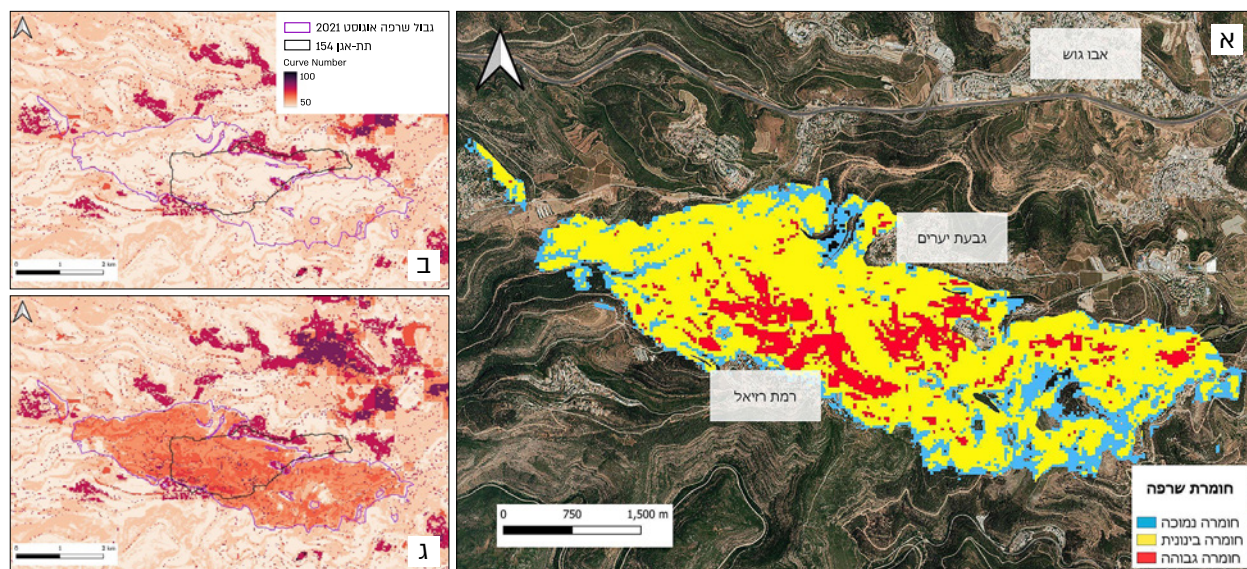
סטייה של 20-30%. נוסף על כך, המודל חזה היטב את עיתוי התפתחות הזרימה והופעת ספיקת השיא, וההידרוגרף שהתקבל מהמודל דומה בקירוב להידרוגרף שנמדד בפועל בתחנות ההידרומטריות (איור 2).

הערכת השפעתה של שרפה על שירות ויסות הנגר

חומרת שרפה מוגדרת על פי מידת הפגיעה בצומח ובקרקע: חומרה נמוכה מתבטאת בפגיעה חלקית בצמחייה ובשימור רוב הכיסוי, חומרה בינונית כוללת פגיעה נרחבת בחופת העצים ובתת-היער, ואילו חומרה גבוהה מאופיינת

ערכי CN גבוהים (כלומר, תורמים נגר), בעיקר במעלה האגן – אזור העיר ירושלים והיישובים הרבים שסביבה – ובמורד – אזור העיר בית שמש והשטחים החקלאיים הרבים שמצפון-מערב לה. לעומת זאת, במרכז האגן, שם נמצאים מרבית שטחי היער, ערכי ה-CN נמוכים יחסית, כלומר, שירות ויסות (מיתון) הנגר בהם גבוה.

בסיכומו של דבר, בהשוואת נפח הזרימה המחושב באמצעות מודל HEC-HMS המכיל לנפח המדוד בתחנה ההידרומטרית בחמשת אירועי הגשם שנבחרו לכיול, נמצאה



איור 3

השרפה בהרי יהודה, אוגוסט 2021

א. מפת חומרת השרפה; ב. ערכי CN לפני השרפה; ג. ערכי CN אחרי השרפה. העלייה המשמעותית בערכי ה-CN לאחר השרפה משקפת ירידה בכוח החידור של הקרקע ופגיעה ביכולת היער לווסת נגר עילי, בייחוד באזורים שנפגעו בחומרת שרפה בינונית וגבוהה. באירועים ב-ו-ג מסומנים גבולות השטח שנשרף (קו סגול) וגבולות תת-האגן שנבחר (קו שחור).

איכותי ונוח ליישום של כיסוי הצומח מאפשר לדעת במאמץ קטן יחסית את מצב המערכת האקולוגית בשטחים נרחבים, לעקוב אחר תהליכי התחדשות צומח (סוקצסיה) טבעיים ובעקבות הפרעות, כמו שרפות, ולקבל החלטות מושכלות בתכנון ובממשק של היער. נוסף על כך, שירותי מערכת אקולוגית רבים תלויים בעיקר בתצורת הצומח ובמצבה, כך שהיא משמשת אינדיקטור עבורם, ולכן מפת צומח מאפשרת מיפוי של מגוון רחב של שירותי מערכת אקולוגית (Lavorel et al., 2017).

מיפוי שירות ויסות נגר

מודל HEC-HMS שהופעל וכויל במסגרת מחקר זה הפיק ברוב המקרים תוצאות טובות בהשוואה לערכים שנמדדו באירועי גשם שונים בתחנה ההידרומטרית, וזאת למרות גודלו של אגן ההיקוות, שעבורו היה נתון מדוד (כ-405 קמ"ר) שהכניס 'רעשים' ומורכבות לתגובה ההידרולוגית. המודל מבוסס על סדרת פרמטרים הידרולוגיים הכוללת משקעים, חדירות קרקע, נגר עילי, אידוי-דיוט פוטנציאלי, אוגר המים בקרקע וזרימת בסיס בנחלים, כך שמדובר במערכת גמישה הניתנת להתאמה לצורכי המשתמש. אף על פי שהכיוול התבסס על חמישה אירועי גשם בלבד (בגלל מיעוט אירועי זרימה שנמדדו בתחנה ההידרומטרית בשנים שמיפוי כיסוי הקרקע ושימושי הקרקע נערך עבורן), התקבל מודל בעל ביצועים טובים. כיוון שאמינות המודל משתפרת ככל שמתווספים נתונים אמפיריים מדויקים לכיוול, רצוי לבחון את המודל שהתקבל גם בשנים הבאות ולשפר את דיוקו בהתאם למדידות זרימה נוספות.

ממצאי המחקר מדגישים את חשיבותו של מבנה יער צפוף ורב-שכבתי, הכולל חופת עצים מפותחת, תת-יער שיחני וכיסוי קרקע רציף, כמנגנון מפתח בוויסות הנגר. תרומה זו נובעת משילוב של לכידת משקעים בחופה שמפחיתה את הכמות ואת העוצמה של המים המגיעים לקרקע, יחד עם שיפור תכונות הקרקע, הגדלת החידור והאוגר והשהיית הזרימה. לעומת זאת, יערות פתוחים ותצורות צומח הכוללות תת-יער עשבוני או קרקע חשופה מאופיינים בפוטנציאל נגר גבוה יותר, גם ללא שינוי בשימושי הקרקע.

שירות ויסות נגר ושרפות יער

יערות ים תיכוניים הם חלק מפסיפס נופי, המשקף יחסי גומלין מורכבים בין תנאים משתנים של אקלים וגאומורפולוגיה, תצורות נוף מגוונות והשפעת אדם ארוכות שנים. היערות מספקים מגוון רחב של שירותי מערכת אקולוגית חיוניים. מבחינת שירותי ויסות, ליערות תפקיד מרכזי בהגנה על הקרקע, בניהול מקורות מים ובשמירה על מיקרו-אקלים (Nocentini et al., 2022). שינוי האקלים,

בשרפה מלאה של הצומח, באובדן כיסוי הקרקע ובפגיעה משמעותית בתכונות הקרקע (Keeley, 2009). לפי מיפוי חומרת השרפה ב-2021, כ-55-60% משטח השרפה נפגעו בחומרה בינונית, כ-25-30% בחומרה גבוהה, וכ-10-15% בחומרה נמוכה. התפלגות זו משקפת פסיפס מרחבי אופייני לשרפות יער ים תיכוניות – אזורים נרחבים של פגיעה משמעותית בכיסוי הצומח לצד מוקדים מצומצמים יותר של פגיעה קיצונית או נמוכה (איור 3א). בעקבות השרפה חלה ירידה בשירות ויסות הנגר, שבאה לידי ביטוי בעלייה משמעותית בערכי ה-CN בתחום האגן השרוף (איור 3ב, 3ג). לפני השרפה ערכי ה-CN היו ברובם נמוכים עד בינוניים, בטווח של כ-55-65, והציגו פיזור הטרוגני עם מוקדים מצומצמים בלבד של ערכים גבוהים בסביבת היישובים גבעת יערים ורמת רזיאל. לאחר השרפה ניכרות האחדה מרחבית ועלייה חדה בערכים: מרבית שטח האגן מציג ערכי CN של כ-70-85, ובאזורים מסוימים אף קרוב ל-90. שינוי זה משקף, ככל הנראה, ירידה בממדי האידוי-דיוט ובכוסר החידור של הקרקע, ובא לידי ביטוי בשינוי בתגובת האגן למשקעים, כלומר גידול פוטנציאלי בנגר העילי לאחר השרפה.

תוצאות החישוב מצביעות על קיצור זמן ההשהיה ועל עלייה בספיקת השיא בתרחיש שלאחר השרפה, בהשוואה למצב טרום-שרפה. ערך ה-CN הממוצע באגנים השרופים עלה מ-59.9 לפני השרפה ל-68.6 לאחר השרפה. עלייה זו הובילה להתפתחות נגר (מחושב) בתת-אגן קטן בשטח של 4.3 קמ"ר, שלא ייצר נגר בתנאי כיסוי הצומח טרום-שרפה. ההידרוגרף שלאחר השרפה מאופיין בעלייה חדה ומהירה יותר לספיקת השיא ובהתפתחות זרימות בתת-אגנים קטנים, כמו זה שנבחן במחקר זה.

דיון

מיפוי כיסוי הצומח

לצד התקדמות רבה במודלים ובכלי חישה מרחוק למיפוי כיסוי צומח, קיים עדיין קושי לא מבוטל במיפוי מדויק הכולל סיווג לתצורות צומח ספציפיות, בייחוד במיפוי מפורט ברזולוציה גבוהה וברמה מקומית (Dadon et al., 2019; Delaney et al., 2025). לכן, לשיטת המיפוי שיושמה במחקר זה, אף על פי ששימשה 'רק' שלב ביניים בדרך למיפוי שירות ויסות הנגר, וכיוון שהראתה דיוק גבוה ביכולתה לחזות את תצורות הצומח אל מול תאי שטח ידועים, יש חשיבות רבה גם בפני עצמה. ראשית, שימוש במודל בשטחים טבעיים ונטועים אחרים באזור הים תיכוני בישראל יאפשר לקבל סיווג מדויק יחסית וברזולוציה גבוהה יחסית בהשוואה למפות סיווג אחרות הקיימות כיום בישראל. שנית, מיפוי

להתאוששות אקולוגית וכשיפור תפקודי המערכת, גישת שירותי המערכת האקולוגית מצביעה על שקלול תמורות (trade-off) מבני ותפקודי בין שירותים שונים שהצמחייה מספקת. כלומר, המנגנונים התורמים לשירות מסוים עלולים לפגוע בשירותים אחרים, וגם להעמיד את המערכת כולה בסיכון (Mori et al., 2017). הצפיפות והמורכבות המבנית של הצמחייה משפרות את שירותי הוויסות ההידרולוגיים באמצעות סדרת מנגנונים פיזיקליים וביולוגיים המפחיתים את כמות המים הזמינה במערכת. נוסף לשיעורי דיות גבוהים, שטח עלווה גדול יוצר מעין שכבת חיץ שלוכדת חלק ניכר מהמשקעים בצמרת העצים (interception), ומפחיתה את עוצמת הפגיעה של טיפות הגשם בקרקע. מעבר להשפעה הממתנת על זרימות עיליות, מערכות שורשים עמוקות מנצלות מים מעומק פרופיל הקרקע ומפחיתות את המילוי החוזר למי התהום, תהליך המוביל לירידה בשפיעת המעיינות ובזרימות הבסיס בערוצי הנחלים (Vicente-Serrano et al., 2021), ולמעשה פוגע בשירות אספקת המים. צפיפות גבוהה של צמחייה, הכוללת מספר קומות יער (שיחים, עצים ומטפסים) מגבירה באופן משמעותי את הסיכון להתפרצות שרפות נרחבות. רציפות ביומסה מאפשרת מעבר אש רציף במרחב (אופקי ואנכי) והתגברות על מכשולים ומחסומים טבעיים (דוגמת ערוצי נחלים או מחשופי סלע). המעבר משרפות קרקע לשרפות צמרות המאופיינות בעוצמה גבוהה (סולם אש), עשוי להאיץ את קצב התפשטות השרפה ולהקשות על מאמצי הכיבוי. מחקרים מלמדים כי הגנה אינטנסיבית על היערות והחורשים דרך דיכוי שרפות עשויה להוביל להצטברות מסה גדולה של חומרי בערה ולפוטנציאל נפיץ של שרפות יער נרחבות (Pausas and Keeley, 2019). למשל, האירוע שמכונה מגה-שרפות בדרום קליפורניה בשנת 2007 (Keeley et al., 2009) מיוחס לשילוב תנאי מזג אוויר קיצוניים, גיל הצמחייה ועומס חומרי בערה ביערות. מבנה הצומח היערי הצפוף פועל, אפוא, כמנגנון דו-ערכי: בטווח הזמן הקצר הצמחייה תורמת לוויסות נגר עילי ולהפחתת סיכונים הידרולוגיים, אך בטווח הזמן הבינוני-ארוך הצטברות הביומסה מגדילה את הפגיעות לאירועי שרפה קיצוניים, בייחוד כאשר מתקיימים תנאי סף אקלימיים של יובש ורוחות.

לצמחייה הצפופה בכיסוי גבוה שתורמת לוויסות הנגר באופן מיטבי יש גם צד שלילי בהקשר האקולוגי. הצטופפות (סגירת) היער והחורש היא תהליך המתרחש באופן טבעי במרבית האזורים הים תיכוניים בישראל, כאשר הרעייה נמנעת או מבוקרת ולא פורצות שרפות. ההצטופפות מגבילה את האפשרות של צמחייה שיחנית ועשבונית נמוכה להתבסס, ומורידה את הכתמיות בתצורות הצומח המאפיינת את החורש הים תיכוני. בסופו של דבר, היא מקטינה את המגוון הביולוגי (Perevolotsky and Sheffer,

לחצי פיתוח, כריתה ושרפות פוגעים במכלול השירותים המסופקים, ולכן נדרשים הבנה וכימות שיטתי של השירותים השונים כבסיס מרכזי לניהול יער בר-קיימא (Boix-Fayos et al., 2020). ממצאי המחקר מחזקים את ההנחה הזו, ומדגישים את תפקידו המרכזי של היער הרב-תכליתי כמספק שירותי ויסות הידרולוגיים, ובפרט את תרומתו למיתון נגר עילי, להאטת זרימות שיא ולהפחתת סיכונים הצפות וסחיפת קרקע. תוצאות המחקר מצביעות על קשר ברור בין מבנה הצומח, צפיפותו והרציפות המרחבית שלו לבין התגובה ההידרולוגית של האגן, וממחישות כיצד שרפות יער פוגעות באופן ישיר ביכולת זו. העלייה המובהקת בערכי ה-CN לאחר השרפה, לצד קיצור זמן ההשהיה והעלייה בספיקה הכללית ובספיקת השיא בפרט, משקפות פגיעה בשירות ויסות הנגר ברמת תת-האגן. ממצא זה מחזק את ההבנה כי חשיבותם וממדיהם של שירותי ויסות, בניגוד לשירותי אספקה, ניכרים כאשר הם נפגעים ולא מסופקים, בדרך כלל לאחר הפרעה משמעותית. בהקשר זה, הופעת נגר בתת-אגן קטן שלא ייצר נגר בתנאי טרום-שרפה, היא אינדיקציה רגישה לפגיעה בשירות וויסות הנגר כאשר ההשפעה האגנית הכוללת עשויה להיות מתונה יותר.

שרפות יער משנות באופן מהותי את מאפייני הצומח והקרקע, ובכך פוגעות ביכולתו של היער לווסת את הנגר (Wittenberg and Inbar, 2009). לשרפות יש השפעה דיפרנציאלית על מיני הצומח ועל התגובה ההידרולוגית של השטחים הפגועים. למשל, מחקרם של Ohana-Levi ואח' (2018) מצביע על ההשפעה המשמעותית של שרפות בחומרה גבוהה ביערות אורנים נטועים בהשוואה לשטחים המאופיינים בצמחייה טבעית מקומית. במחקרם נמצא שהפגיעה בצומח הובילה לשינוי במשטר הנגר ולהגברה של ספיקת השיא ושל נפח הנגר הכולל בשיעור של כ-47%-39. במהלך תקופת ההתחדשות של הצמחייה נצפתה ירידה בתגובת הנגר, בשיעור של כ-9%-7.7. במחקר נוסף שנערך באגן נחל אורן בכרמל בעקבות השרפה בכרמל ב-2010, נמצא כי ספי המשקעים שנדרשו ליצירת נגר עלי פחתו בכ-50% לזרימה ראשונה (120-150 מ"מ בשנים רגילות, 52-65 מ"מ לאחר השרפה) וב-70% לאירוע הזרימה השני; מספר אירועי הזרימה השנתי באגן עלה באופן מובהק מ-4.4 אירועים בשנה לפני השרפה ל-8 אירועים בשנה לאחריה (עלייה של כ-80%). משך הזרימה ארך באופן מובהק עם עלייה בכמות המשקעים, וריכוז הסדימנטים המרחפים לאחר השרפה עלה בשניים עד שלושה סדרי גודל בהשוואה לריכוז הסדימנטים המרחפים בשנים שקדמו לה (Greenbaum et al., 2021).

שירותי מערכת אקולוגית של היער – שקלול תמורות

בעוד שחורש צפוף ומפותח נתפס לעיתים כסמן

(2011), שהוא רכיב חשוב ביציבות המערכת האקולוגית בכלל ואחד מיעדי הממשק של היער הרב-תכליתי בפרט.

שירות ויסות נגר – היבטים ממשקיים

ניהול שטחי יער דורש איזון בין היתרונות של יער צפוף ורב-שכבתי בהיבטים של נגר וסחיפת קרקע, לבין החסרונות שיש ליער כזה מבחינת המגוון הביולוגי, הסיכון לשרפות והפגיעה בשירותי מערכת אקולוגית אחרים. נוסף על כך, חלקות יער שעוברות התפתחות או התאוששות טבעית לאחר שרפה (סוקצסיה) ומגיעות לתצורת המטרה במינימום התערבות, כפי שתורת ניהול היער של קק"ל משנת 2014 מנחה לגבי היער הרב-תכליתי, חוסכות משאבים רבים. עם זאת, כדי להגיע לתצורת היער הרצויה בכלל וכדי לשמור ולשפר את שירות ויסות הנגר בפרט, ניתן לבצע ממשק סלקטיבי-פרטני לכל חלקת יער לפי מאפייניה ומיקומה באגן, הן באופן שוטף הן כתגובה לשרפה. González-Romero et al. (2022) מציינים שהטיפול בשטח יער שנשרף נועד להפחית נגר באופן מקומי ולהקטין את הקישוריות ההידרולוגיות-סדימנטולוגיות, ומדגישים כי יעילות ההתערבות תלויה במיקום היחידה המטופלת בתוך אגן ההיקוות. הם מבחינים בין האזורים של ראשי הערוצים (headwaters) והגבעות, שחשופים יותר לסחיפת קרקע ולכן ללא התערבות עלולים לעבור התאוששות צומח איטית, לבין המדרונות ואזורי הגאיות וגדות הערוצים שבתחתית האגן, שם בדרך כלל התפתחות הצומח מהירה יותר בגלל הצטברות סחף ולחות גבוהה (González-Romero et al., 2022). כמו כן, שטחי יער צפופי צמחייה או כאלה שעברו טיפול גאו-ביו-מורפולוגי להקטנת נגר וסחיפה (טראסות, סכרונים וכדומה) ומספקים רמה גבוהה של ויסות נגר, תורמים באופן משמעותי להידרולוגיה של האגן כאשר הם משובצים במרחב בין שטחים שנוטים לתרום נגר (כמו חקלאות ואזורים בנויים), יותר מאשר כשהם מכסים שטח גדול ורצוף הממוקם לצד שטחים גדולים תורמי נגר (García-Comendador et al., 2017). לכן, על סמך תוצאות מחקר זה בשילוב עם הספרות מנקודת מבט של נגר וקישוריות הידרולוגיות, נכון יותר לאפשר ולתכנן פיזור של שטחים צפופי צומח במדרונות של אגני היקוות גדולים כמו אגן נחל שורק. במדרונות תלולים הסיכון לנגר ולסחיפת קרקע גבוה במיוחד, והצמחייה הצפופה תקל על קליטת מרבית הנגר שמגיע מהמעלה, ותאפשר להקטין זרימות שיטפוניות והצפות במורד. נוסף על כך, בגלל חלקו המשמעותי של הצומח, בעיקר זה המעוצה, באספקת שירות ויסות הנגר, יש חשיבות גדולה לתמיכה בהתאוששות צמחיית היער לאחר שרפה, כך שערכי ה-CN של השטח השרוף יעלו וישונו להיות כפי שהיו לפני השרפה מהר ככל האפשר. אחרי השרפה בכרמל של 1989 נמצא שאפילו הצימוח הראשוני בשנה השנייה

אחרי השרפה שיצר כיסוי חלקי של הקרקע החשופה, הפחית את הנגר בסדר גודל אחד ואת הסחיפה בשני סדרי גודל (Inbar et al., 1998). ההמלצה המקובלת באזורים ים תיכוניים היא לאפשר למערכת להתאושש באופן טבעי ככל האפשר, להימנע מכניסה לשטח עם כלים שעלולים לפגוע במרקם הקרקע ובתהליכי התפתחות הצומח, ואף להשאיר את חלקי העצים המתים, וכל זאת כדי לעודד את הצימוח הטבעי (Wagenbrenner et al., 2021). בסיכומו של דבר, תגובת הנגר לאחר שרפה וההתאוששות ההידרולוגית הן תוצאה של יחסי גומלין מורכבים בין צומח, קרקע ומבנה האגן, ולכן ניהול אפקטיבי חייב להיות מבוסס הקשר מרחבי (catchment-scale) ולא רק מקומי, ומותאם למצב המערכת לפני השרפה ולתנאי האקלים והאגן כולו.

סיכום ומסקנות

שרפות יער גורמות לשינויים מהותיים בתכונות הפיזיקליות, הכימיות והביולוגיות של הקרקע, בכיסוי הצומח ובתנאי פני השטח. השינויים האלה משפיעים באופן ניכר על התגובה ההידרולוגית של מדרונות ואגני ניקוז. ערכי ה-CN משקפים את השינויים האלה באופן יעיל, ומאפשרים הבנה טובה וחיזוי מדויק של תגובת הנגר לאחר שרפה בקני מידה מרחביים שונים. מודל HEC-HMS מדגיש את חשיבות הכיסוי הצמחי, ובפרט צמחייה צפופה ורב-שכבתית, בהפחתת נגר יעיל ובמיתון תהליכי סחיפת קרקע. המודל מעלה כי השינוי ביחסי גשם-נגר היה גבוה יותר בקנה המידה של תת-אגנים, שם נצפתה ירידה משמעותית בערך הסף הנדרש ליצירת נגר עודף (infiltration-excess runoff), מה שמדגיש את הרגישות הגבוהה של תאי שטח קטנים לשינויים בכיסוי הצומח ולפגיעה בתכונות הקרקע בעקבות שרפות. השימוש במודל מאפשר הערכה שיטתית של תרומת אזורי יער שונים להפחתת נגר וסחיפה, וכן זיהוי אזורי סיכון הדורשים ניהול ייעודי. תדירותם של אירועי גשם קצרים ועוצמתיים עולה בגלל שינוי האקלים, ותופעה זו מעלה את הביקוש לשירות מחד גיסא. מאידך גיסא, שטחים פתוחים רבים הופכים לשטחים בנויים בחלקים שונים של אגני היקוות (למשל, בנייה נרחבת באזור ירושלים ובאזור בית שמש באגן נחל שורק), באופן המצמצם את היצע השירות. ההיבטים האלה, יחד עם אירועי שרפה גדולים שתדירותם עולה עם השנים, מדגישים את הצורך לנהל את שטחי היער והחורש במטרה לשפר או לשקם שירותי מערכת אקולוגית.

ממצאי המחקר תומכים בגישה של ניהול יער מכוון שירותי מערכת אקולוגית, ומציעים כי יער רב-תכליתי שמתחזק באופן מינימלי תוך שמירה על מורכבות מבנית ועל רציפות

מחודשת של ממשק היער, להתאמת הצפיפות, ההרכב ומבנה הצומח, ולשילוב שיקולי יסות נגר, לצד שירותים ושיקולים נוספים, כחלק אינטגרלי מתוכניות ממשק יערניות.

כיסוי, מסוגל להפחית סיכונים הידרולוגיים גם בעידן של שינוי האקלים והתגברות אירועי קיצון. בהקשר זה, שרפות יער אינן רק אירוע הרסני, אלא גם חלון הזדמנויות לבחינה

מקורות

- Havel A, Tasdighi A, and Arabi M. 2018. Assessing the hydrologic response to wildfires in mountainous regions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(4), 2527–2550.
- Hong Y and Adler RF. 2008. Estimation of global SCS curve numbers using satellite remote sensing and geospatial data. *International Journal of Remote Sensing*, 29(2), 471–477.
- Hua F, Bruijnzeel LA, Meli P, Martin PA, Zhang J, Nakagawa S, et al. 2022. The biodiversity and ecosystem service contributions and trade-offs of forest restoration approaches. *Science*, 376(6595), 839–844.
- Huxman TE, Wilcox BP, Breshears DD, Scott RL, Snyder KA, Small EE, et al. 2005. Ecohydrological implications of woody plant encroachment. *Ecology*, 86(2), 308–319.
- Inbar M, Tamir MI, and Wittenberg L. 1998. Runoff and erosion processes after a forest fire in Mount Carmel, a Mediterranean area. *Geomorphology*, 24(1), 17–33.
- Keeley JE. 2009. Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, 18(1), 116–126.
- Keeley JE, Safford H, Fotheringham CJ, Franklin J, and Moritz M. 2009. The 2007 southern California wildfires: Lessons in complexity. *Journal of Forestry*, 107(6), 287–296.
- Keles S. 2019. An assessment of hydrological functions of forest ecosystems to support sustainable forest management. *Journal of Sustainable Forestry*, 38(4), 305–326.
- Key CH and Benson NC. 2006. LA-1 landscape assessment (LA) sampling and analysis methods. In: Lutes DC, Keane RE, Caratti JF, Key CH, Benson, Nathan C, et al. FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. p. LA-1-55.
- Lavorel S, Bayer A, Bondeau A, Lautenbach S, Ruiz-Frau A, Schulp N, et al. 2017. Pathways to bridge the biophysical realism gap in ecosystem services mapping approaches. *Ecological Indicators*, 74, 241–260.
- Llorens P and Domingo F. 2007. Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe. *Journal of Hydrology*, 335(1–2), 37–54.
- Mori AS, Lertzman KP, and Gustafsson L. 2017. Biodiversity and ecosystem services in forest ecosystems: A research agenda for applied forest ecology. *Journal of Applied Ecology*, 54(1), 12–27.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Island Press, Washington, DC.
- Nocentini S, Travaglini D, and Muys B. 2022. Managing Mediterranean forests for multiple ecosystem services: Research progress and knowledge gaps. *Current Forestry Reports*, 8(2), 229–256.
- Ohana-Levi N, Givati A, Paz-Kagan T, and Karnieli A. 2018. Forest composition effect on wildfire pattern and run-off regime in a Mediterranean watershed. *Ecohydrology*, 11(4), e1936.
- אוסטרובסקי ג, קרואני א, פורת י, אייזנבנד א, סיאקי ג, היבשר נ ואח'. 2024. **היערכות ניהול היער בישראל לשינוי האקלים**. מסמך מדיניות והנחיות מקצועיות. קרן קימת לישראל.
- אסם י, ברנד ד, טאובר י, פרבולוצקי א וצורף ח. 2014. **תורת ניהול היער בישראל: מדיניות והנחיות לתכנון ולממשק היער**. ירושלים: קרן קימת לישראל, אגף הייעור.
- לונטן א, גרוסברד ש, ספריאל א ופייטלסון ע (עורכים). 2019. **מערכות אקולוגיות ורווחת האדם – הערכה לאומית, דו"ח ממצאי מפתח**. המארג – התוכנית הלאומית להערכת מצב הטבע, מוזיאון הטבע ע"ש שטיינהרדט, אוניברסיטת תל אביב.
- פורת י, צורף ח ואסם י. 2017. תכנית אב ליער ככלי תכנוני לניהול יער מוכון מטרה – יער הקדושים כמודל. **אקולוגיה וסביבה**, 50–56, (2), 8.
- קליין ת, שפרינגר ע, פיקלר ב, אלבז ג, כהן ש ויקיר ד. 2014. יעילות ניצול מים בעצי יער: עדיפות לאורן ירושלים על פני אלון מצוי. **אקולוגיה וסביבה**, 50–56, (2), 8.
- רוטנברג א ויקיר ד. 2018. ייעור, אקלים ועתיד היערות בישראל. **אקולוגיה וסביבה**, 50–56, (2), 8.
- Anderegg WR, Trugman AT, Badgley G, Anderson CM, Bartuska A, Ciais P, et al. 2020. Climate-driven risks to the climate mitigation potential of forests. *Science*, 368(6497), eaaz7005.
- Aznar-Sánchez JA, Belmonte-Ureña LJ, López-Serrano MJ, and Velasco-Muñoz JF. 2018. Forest ecosystem services: An analysis of worldwide research. *Forests*, 9(8), 453.
- Boix-Fayos C, Boerboom LG, Janssen R, Martínez-Mena M, Almagro M, Pérez-Cutillas P, et al. 2020. Mountain ecosystem services affected by land use changes and hydrological control works in Mediterranean catchments. *Ecosystem Services*, 44, 101136.
- Coschignano G, Nicolaci A, Ferrari E, Cruscomagno F, and Iovino F. 2019. Evaluation of hydrological and erosive effects at the basin scale in relation to the severity of forest fires. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 12(5), 427.
- Delaney B, Tansey K, and Whelan M. 2025. Satellite remote sensing techniques and limitations for identifying bare soil. *Remote Sensing*, 17(4), 630.
- Díaz S, Pascual U, Stenseke M, Martín-López B, Watson RT, Molnár Z, et al. 2018. Assessing nature's contributions to people. *Science*, 359(6373), 270–272.
- García-Comendador J, Fortesa J, Calsamiglia A, Calvo-Cases A, and Estrany J. 2017. Post-fire hydrological response and suspended sediment transport of a terraced Mediterranean catchment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(14), 2254–2265.
- González-Romero J, López-Vicente M, Gómez-Sánchez E, Peña-Molina E, Galletero P, Plaza-Álvarez P, et al. 2022. Post-fire management effects on hillslope-stream sediment connectivity in a Mediterranean forest ecosystem. *Journal of Environmental Management*, 316, 115212.
- Greenbaum N, Wittenberg L, Malkinson D, and Inbar M. 2021. Hydrological and sedimentological changes following the 2010-forest fire in the Nahal Oren Basin, Mt. Carmel Israel—a comparison to pre-fire natural rates. *Catena*, 196, 104891.

- Verheijen FG, Jones RJ, Rickson RJ, and Smith CJ. 2009. Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. *Earth-Science Reviews*, 94(1–4), 23–38.
- Vicente-Serrano SM, Domínguez-Castro F, Murphy C, Peña-Angulo D, Tomas-Burguera M, Noguera I, et al. 2021. Increased vegetation in mountainous headwaters amplifies water stress during dry periods. *Geophysical Research Letters*, 48(18), e2021GL094672.
- Wagenbrenner JW, Ebel BA, Bladon KD, and Kinoshita AM. 2021. Post-wildfire hydrologic recovery in Mediterranean climates: A systematic review and case study to identify current knowledge and opportunities. *Journal of Hydrology*, 602, 126772.
- Wittenberg L. 2012. Post-fire soil ecology: Properties and erosion dynamics. *Israel Journal of Ecology and Evolution*, 58(2–3), 151–164.
- Wittenberg L and Inbar M. 2009. The role of fire disturbance on runoff and erosion processes—a long-term approach, Mt. Carmel case study, Israel. *Geographical Research*, 47(1), 46–56.
- Wittenberg L and Malkinson D. 2014. Monitoring Water Repellency Effects on Post-wildfire Infiltration and Runoff. In: EGU General Assembly Conference Abstracts (p. 6025).
- Pausas JG and Keeley JE. 2019. Wildfires as an ecosystem service. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 17(5), 289–295.
- Perevolotsky A and Sheffer E. 2011. Integrated management of heterogeneous landscape—Mediterranean Israel as a study case. *Israel Journal of Ecology and Evolution*, 57(1–2), 111–128.
- Schiller G, Unger ED, Cohen S, and Herr N. 2010. Water-use by Tabor and Kermes oaks growing in their respective habitats in the Lower Galilee region of Israel. *Forest Ecology and Management*, 259, 1018–1024.
- Serrano-Muela MP, Lana-Renault N, Nadal-Romero E, Regúes D, Latron J, Martí-Bono C, et al. 2008. Forests and their hydrological effects in Mediterranean mountains. *Mountain Research and Development*, 28(3), 279–285.
- Silva IC and Rodríguez HG. 2001. Interception loss, throughfall and stemflow chemistry in pine and oak forests in northeastern Mexico. *Tree Physiology*, 21(12–13), 1009–1013.
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE). 2012. HEC-HMS Hydrologic Modeling System, User's Manual, Version 4.0, CPD-74A. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
- USDA. 2009. Hydrologic Soil-Cover Complexes. National Engineering Handbook: Part 630—Hydrology.
- Velasco-Muñoz JF, Aznar-Sánchez JA, Schoenemann M and López-Felices B. 2022. An analysis of the worldwide research on the socio-cultural valuation of forest ecosystem services. *Sustainability*, 14(4), 2089.



יער אשתאול לאחר שרפה, 21 במאי 2025
צילום: עינת בהט, באדיבות ארכיון הצילומים של קק"ל