



שרפת יער נצרת-דבורייה: חישה מרחוק להערכת חומרת שרפה, שימוש ותובנות

עידית טיקוצקי^{1,2,3*} | נעם לוין^{4,2} | אלי ארגמן^{3**}

- 1 המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי – מרכז וולקני
 - 2 המחלקה לגיאוגרפיה, האוניברסיטה העברית בירושלים
 - 3 התחנה לחקר הסחף, משרד החקלאות ופיתוח הכפר
 - 4 המרכז לחקר חישה מרחוק, בית הספר למדעי כדור הארץ והסביבה, אוניברסיטת קווינסלנד, סיינט לוסיה, קווינסלנד, אוסטרליה
- * idit.tikotzki@mail.huji.ac.il
** eliar@moag.gov.il

תקציר

השרפה. אחוז כיסוי צמרות גבוה מאפיין את דרגות החומרה הגבוהות. הממצא מצביע על השפעת צפיפות הנטיעה, ומכאן על חשיבות הדילול והמרווח בין העצים לצורך הפחתת נזקי שרפה. כמו כן, מצאנו כי המדד המשקף את השינוי בתכולת הכלורופיל היה בעל המתאם הגבוה ביותר לאחוז כיסוי הצמרות, ונראה שיתרונו של מדד זה נובע מהדומיננטיות המרחבית של תצורת הצומח המחטני בשטח השרפה. המחקר מראה את חשיבות השילוב בין מידע לווייני ובין תצ"א בעל רזולוציה מרחבית גבוהה לשם הערכת נזקי שרפה.

שרפות הן חלק מהמערכת האקולוגית הים תיכונית, ושכיחותן צפויה להתגבר עקב שינוי האקלים בכלל וההתחממות הגלובלית בפרט. מחקר זה עוסק במיפוי ובסיווג של חומרת שרפה באמצעות טכניקות עיבוד תמונה המבוססות על חישה מרחוק ולמידת מכונה. שרפת יער נצרת-דבורייה, מיום 9.10.2020, שימשה חקר מקרה לאפיון שטחי שרפה בעלי דרגות חומרה שונות. הניתוח התבסס על דימומים (satellite images) עוקבים של הלויין Sentinel-2 של סוכנות החלל האירופית ועל תצ"א של קק"ל מתאריך 25.10.2020 (כשבועיים לאחר השרפה). מתוך דימומי הלויין חישבנו מדדי צומח שונים, המשקפים את השינויים שחלו בתכולת הכלורופיל או המים בצומח בעקבות השרפה. בעזרת התצ"א בנינו קטלוג המורכב מחמש דרגות של חומרת שרפה, המותאם להערכת הנזק החזותי לצומח. כילנו את מדדי הצומח באמצעות הקטלוג ומצאנו כי המדדים מאפשרים הפרדה בין קטגוריות שונות, המעידות על חומרת הנזק לצומח. ממצא נוסף העולה מן המחקר הוא הקשר בין אחוז כיסוי הצמרות ודרגת חומרת

מילות מפתח

מדדי צומח, סקר צומח, שרפת יער

מבוא

הקרקה. כמו כן, ניתן למדוד את עומק שכבת האפר ואת הידרופוביות הקרקע (Parson et al., 2010).

עם זאת, מדובר בתהליך מורכב ויקר, שמצריך כוח אדם רב, ודגימות מרובות של נקודות אימות בשטח, שהמידע המתקבל מהן נקודתי ולא מרחבי. לעיתים יכולים לחלוף מספר חודשים בין השרפה לבין הסקר הקרקעי (Edwards et al., 2013), ולכן סביר להניח שתוצאות הסקר יהיו מושפעות לא רק מנזקי השרפה, אלא גם משיקום השטח לאחר השרפה (Key and Benson, 2006).

חישה מרחוק מאפשרת איסוף, מדידה ופענוח של נתונים ללא מגע ישיר עם השטח, לרוב באמצעות לוויינים או חיישנים מוטסים (Lentile et al., 2006). זמינות נתוני הלוויינים מאפשרת ניטור רציף של כמות הצומח היבש הזמין לבעירה (Yebra et al., 2013), כימות היקף השרפה, הערכת חומרתה וניטור קצב שיקום היער (Robichaud et al., 2020). בניגוד לסקר קרקעי, חישה מרחוק מספקת מידע מרחבי על נזקי השרפה, ומצריכה פחות משאבים נוכח הנגישות למידע לווייני זמין ללא עלות.

מטרת המחקר היא אפיון כלי קבלת החלטות לשיקום שטחי יער לאחר שרפה באמצעות בחינת מידת ההתאמה בין חומרת הנזק לצומח עקב שרפה כפי שהיא משתקפת מפענוח של תצ"א (תצלום אוויר), ובין מדדי צומח המחושבים באמצעות דימותי לוויין (satellite images). השאלה המרכזית שעמדה בפנינו היא איזה מהמדדים שאנו בוחנים הוא הטוב ביותר לאפיון את חומרת הנזק לצומח בעקבות שרפה.

שיטות מחקר

אזור המחקר: יער נצרת-דבורייה

ב-9 באוקטובר 2020 פרצה שרפה ביער נצרת-דבורייה מצפון לעמק יזרעאל. מוקד העשן הראשון דווח בשעה 7:30 סמוך לדבורייה, ועד 14:30 הגיעה השרפה לשולי השכונת המזרחיות של נוף הגליל (מרחק של כ-3.2 ק"מ) וגרמה נזק לרכוש. מפעל התעשייה הצבאית (תע"ש) לייצור תחמושת קלה, הממוקם כ-400 מטר מקו הבתים הראשון של נוף הגליל, כותר על ידי הלהבות, אך לא נפגע הודות לפעילות אינטנסיבית של כוחות הכיבוי (איור 1).

יער נצרת-דבורייה הוא חלק מיער בית קשת המשתרע על רכס הרי נצרת שבגליל התחתון, מצפון לעמק יזרעאל (כ-400 מטר מעל פני הים). הטופוגרפיה באזור זה תלולה וכוללת שיפועים חדים (>30°) במפנים הדרומיים וכן בין ההרים והערוצים המבטרים אותם.

במהלך השרפה נפגעו כ-4.7 קמ"ר של יער נטע-אדם (כ-75% ממנו עצי מחט), חורש טבעי, אלונים וברושים. היער המחטני בשטח השרפה מוגדר כיער בוגר או מתבגר (אסם

בשלושת העשורים האחרונים אנו עדים לשרפות יער גדולות שהתרחשו בישראל ופגעו בחלקות יער ובמרחב הפתוח המיועדים לרווחת הציבור. הקרבה בין יישובים למערכות אקולוגיות (wildland-urban interface), ובפרט לצומח טבעי, מגבירה את הסיכון להתפתחות שרפות עקב רשלנות (Radeloff et al., 2005). נוסף על כך, העלייה הצפויה בטמפרטורות עקב שינוי האקלים עלולה להוביל לעלייה בתדירות שרפות חמורות בעשורים הקרובים (IPCC, 2021), שיסכנו אנשים, מבנים ותשתיות.

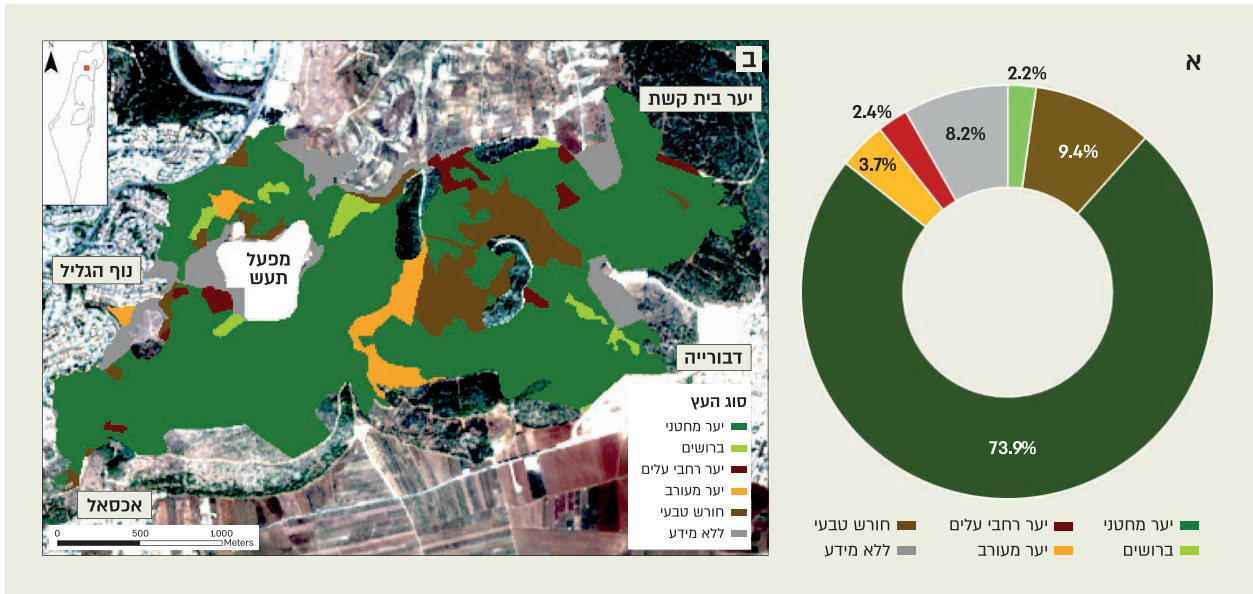
כמו באזורים אחרים באגן הים התיכון, גם בישראל הפכו שרפות היער והחורש לתופעה שכיחה שתדירותה הולכת וגוברת (Tessler et al., 2019), והגורם לרובן המכריע הוא האדם (בשוגג או במזיד; Levin et al., 2016). מרבית השרפות מתרחשות בחודשי הקיץ, אך השרפות הגדולות מתרחשות לרוב בעונות המעבר, במצבים סינופטיים של שקע שרבי או אפיק ים סוף (Levin and Saaroni, 1999), ובייחוד בעונת הסתיו (Kutiel, 2012).

נוסף על תנאי האקלים, נמצא בספרות המחקרית כי לתצורת הצומח השפעה על התפשטות שרפות ועל חומרתן. מאפיינים שונים, כמו גובה הצומח (Gale and Cary, 2022), צפיפותו (Safford et al., 2012), תכולת הלחות בו (FMC – מסת המים בתוך הצומח ביחס למסה היבשה) ואינטראקציות בין צפיפות הצומח לתכולת הלחות בו, נמצאו כבעלי השפעה על חומרת השרפה (Yebra et al., 2013).

הנזקים שנגרמים לשירותי המערכת האקולוגית משרפות כוללים עלייה בזיהום אוויר, פגיעה בחי ובצומח, עלייה בכמות הנגר במדרונות ובאפיקי נחלים, סחף קרקעות והצפות (Bowman et al., 2020). לשיקום השטח השרוף נודעת חשיבות מבחינת החי והצומח, מערכות הניקוז (טבעיות ומלאכותיות) וכן לציבור הרחב, שהיער מהווה עבורו "ריאה ירוקה" ואזור פנאי ונופש. על כן, לצורך שיקום שטח שרוף בעוצמות פגיעה שונות יש למפות ולסווג את חומרת השרפה. כלי קבלת החלטות חדשניים יכולים לשמש מנהלי שטח ומקבלי החלטות לניהול המשאבים ולהגדרת הפעולות הדרושות בתהליך השיקום.

מיפוי והערכה של חומרת שרפה ניתן לבצע באמצעות סקר שמאות קרקעי ובאמצעות חישה מרחוק, ואף מומלץ לשלב בין השיטות. הפענוח הקרקעי מספק מידע נקודתי, ותוצאותיו משמשות לאימות, לסיווג ולכיול של המידע הנאסף באמצעות חישה מרחוק (Parson et al., 2010).

סקר שמאות קרקעי מאפשר לאמוד מגוון של נזקים לתכסית הצומח או לקרקע, למשל, פגיעה בחופות העצים, בתת-היער, בכיסוי הקרקע, במצב בית השורשים ובמבנה



איור 1

שכבת 'עומדי יער' בניהול קק"ל

(א) התפלגות אחוז שטח השרפה מבחינת סוגי העצים. (ב) מפת התמצאות וסוג העץ בשטח השרפה. הנתונים באדיבות ולדימיר בזברחי, קק"ל, אוקטובר 2020.

2A מיום 12.10.20). שני הדימומים היו נטולי עננות מעל אזור המחקר.

לצורך בחינת השפעת השרפה על תכסית הצומח חישבנו מדדי צומח ספקטראליים (אלגוריתמים המשלבים שני ערוצים או יותר). המדדים חושבו באמצעות תוכנת Envi® והם מבוססים על שני מדדים מקובלים: NDVI ו-NBR. מדד הרגיש לתכולת הכלורופיל בצמח (Tukcer, 1979). מדד זה חושב מהדימום לפני השרפה (7.10) ומזה שאחריה (12.10), וההפרש בין המדדים ($\Delta NDVI$) מלמד על חומרת השרפה.

מדד הרגיש לתכולת המים בצומח (Key and NBR, 2006). מדד זה חושב מהדימום לפני השרפה (7.10) ומזה שאחריה (12.10), וההפרש בין המדדים (ΔNBR) מלמד על חומרת השרפה. כמו כן, חושב גם ההפרש המנורמל (ΔNBR), מדד שתוכנן כדי להתמודד עם שטחים הטרוגניים, שמתאפיינים בשונות מרחבית מבחינת סוגי הצמחייה וצפיפותה (Miller and Thode, 2007).

שלב 2 – יצירת קטלוג להגדרת חומרת שרפה

כדי לשמור על עקביות בפענוח החזותי של חומרת הנזק לצומח, יצרנו קטלוג (טבלה 1) להגדרת נזקי השרפה, ובו חמש דרגות חומרה (גבוהה, בינונית-גבוהה, בינונית, נמוכה ולא נשרף). ביססנו את הקטגוריות נמוכה, בינונית ובינונית-גבוהה על מדריך השטח של משרד החקלאות האמריקאי למיפוי חומרת הפגיעה בקרקע לאחר שרפה (Parson

ושות', 2014). במרבית השטח (91.8%) העצים ניטעו לפני שנת 1990, וביתר השטח לאחר מכן.

התנאים המטאורולוגיים ביום השרפה נאספו מתחנת תבור כדורי של השירות המטאורולוגי, ועולה מהם כי ביום השרפה המצב הסינופטי היה של אפיק ים סוף. הטמפרטורה המרבית בשעות הצהריים הייתה 39.5 מעלות צלזיוס, הלחות היחסית הייתה כ-10%, והחל משעות הלילה (3:00) ועד אחר הצהריים (17:00) נשבו רוחות צפון-מזרחיות.

שלבי העבודה ומאגרי המידע

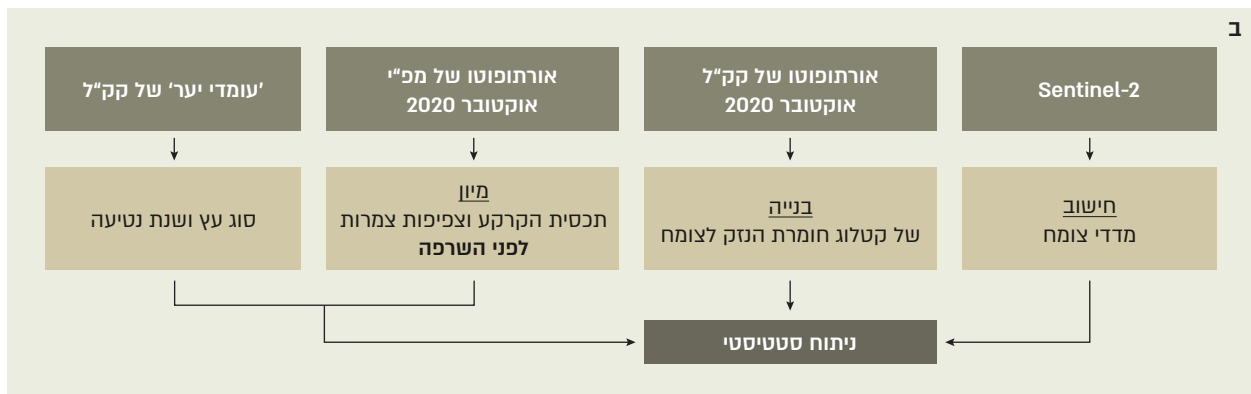
שיטת העבודה הסתמכה על חמישה מקורות וכללה ארבעה שלבים, והיא מסוכמת בטבלה ובתרשים זרימה (איור 2).

שלב 1 – איסוף מידע לווייני

הניטור נעשה באמצעות תוצרי Level-1C (Top-Of-Sentinel-2A) של לווייני Atmosphere reflectance ו-Sentinel-2B של סוכנות החלל האירופית. הרזולוציה המרחבית של הלוויינים היא 10 מטר לפיקסל עבור ערוצי VNIR (400–900 ננומטר) המתאימה לחישוב מדדי צומח מקובלים, ו-20 מטר לפיקסל עבור ערוצי NIR (700–800 ננומטר) ו-SWIR (1,600 ו-2,100 ננומטר) המתאימים לחישוב מדדי חומרת שרפה.

ללוויינים רזולוציה עיתית של חמישה ימים, והשתמשנו בדימום שנסרק יומיים לפני השרפה (Sentinel-2B מיום 7.10.20) ובדימום שנסרק שלושה ימים אחריה (Sentinel-

מקור	רזולוציה	שימוש	סוג נתון	א
סוכנות החלל האירופית (European Space Agency)	10 מטר 20 מטר 20 מטר	Δ NDVI Δ NBR R Δ NBR	Sentinel-2 Pre-fire 07/10/20 Post-fire 12/10/20	
קק"ל	0.05 מטר	פענוח חזותי של חומרת הנזק לצומח ב-300 תצפיות	אורתופוטו אוקטובר 2020	
המרכז למיפוי ישראל (מפ"י)	0.2 מטר	מיון מונחה מסוג Support Vector Machine לפני השרפה	אורתופוטו יולי 2020	
קק"ל	פוליגונלית	נתוני תכסית	GIS	שכבת
קק"ל	פוליגונלית	מיפוי נזקי שרפה	GIS	שכבת



איור 2

מקורות מידע ושיטות העבודה

(א) טבלת סיכום של מקורות המידע והשיטות ששימשו במחקר זה. אורתופוטו: תצלום אוויר מיושר ומעוגן, לאחר הסרת עיוותים טופוגרפיים. GIS: מידע גאוגרפי המייצג שטח (ולא נקודות או קווים); (ב) תרשים זרימה של שיטת העבודה.

של 300 תצפיות אקראיות בעלות רדיוס קבוע של 15 מטר (Key and Benson, 2006) בעזרת האלגוריתם Create Random Points של התוכנה ArcGIS Pro. עבור כל נקודת תצפית הערכנו חזותית את חומרת הנזק לצומח על סמך אורתופוטו שקיבלנו מקק"ל (מתאריך 25.10.2020) ועל בסיס הקטלוג שהגדרנו בשלב השני (שלב 2). לאחר מכן חישבנו מדימותי הליוויין את המדדים הספקטראליים Δ NDVI, Δ NBR ו-R Δ NBR, וכן חישבנו את אחוז כיסוי צמרות העצים מתוך תוצרי המיון שיצרנו בשלב השלישי (שלב 3). בהמשך, ביצענו ניתוח שונות חד-כיוונית (One-Way ANOVA) בתוכנה JMP[®]15, ובחנו את המובהקות הסטטיסטית ($p < 0.05$) של דרגות חומרת השרפה מבחינת ערכי המדדים הספקטראליים ומבחינת אחוז כיסוי הצמרות. בשלב הבא השתמשנו במבחן Tukey-Kramer HSD כדי למצוא את הקטגוריה או הקטגוריות השונות באופן מובהק מאחרות.

(et al., 2010). הוספנו את הקטגוריות 'לא נשרף' ו'חומרה גבוהה' כדי לתאר שני מצבי קצה – שטחים שלא נפגעו בשרפה כלל, או שטחים שהשרפה הותירה בהם רק גדמי עצים וחשפה את הקרקע ישירות למכת טיפות גשם. החלוקה לדרגות חומרה היא איכותית ומתבססת על נראות פגיעת האש בצומח ובפני השטח.

שלב 3 – איסוף מידע תומך

חלק מנתוני התכסית – סוג העצים, גילם, אחוז כיסוי הצמרות – נאספו, וחלק מהם חושבו. המידע על אודות סוג העצים וגילם התקבל מתוך שכבת 'ועמדי יער' של קק"ל. המידע על אודות אחוז כיסוי הצמרות בשטח השרפה חושב על ידינו על בסיס תצ"א של המרכז למיפוי ישראל (מפ"י) מיולי 2020, כחודשיים לפני השרפה, באמצעות מיון מונחה מסוג Support Vector Machine של התוכנה ArcGIS Pro 2.8.1.

שלב 4 – דגימות וניתוח סטטיסטי

כדי לאמוד את חומרת הנזק לצומח מהשרפה ערכנו מדגם

בספרות המחקרית נמצא קשר בין צפיפות עצים (מספר עצים ליחידת שטח) לפני השרפה לחומרתה. מידע זה לא

הסבר	תמונה לדוגמה	דירוג
<p>לא נשרף אזור שלא נפגע בידי האש</p>		<p>1</p>
<p>חומרה נמוכה שרפת נשר ופגיעה בקרקע ללא פגיעה בצמרות</p>		<p>2</p>
<p>חומרה בינונית שרפת נשר, פגיעה בקרקע ופגיעה בלתי הפיכה בעד 50% מצמרות העצים</p>		<p>3</p>
<p>חומרה בינונית-גבוהה שרפת נשר, פגיעה בקרקע ופגיעה בלתי הפיכה ביותר מ-50% מצמרות העצים</p>		<p>4</p>
<p>חומרה גבוהה שרפת נשר, פגיעה בקרקע ושרפת צמרות, ענפים וגזעים</p>		<p>5</p>

טבלה 1

קטלוג להגדרת חומרת הנזק לצומח מהשרפה על בסיס אורתופוטו של קק"ל מאוקטובר 2020, כשבועיים לאחר השרפה

בהתאמה). מתוך התצפיות של פגיעה בצומח, 116 תצפיות השתייכו לקטגוריית החומרה הבינונית-גבוהה, 80 לחומרה הבינונית ו-48 לחומרה הגבוהה.

ניתוח סטטיסטי

מצאנו כי ככל שדרגת החומרה של הנזק לצומח הייתה גבוהה יותר, כך גם ממוצע ערכי המדדים הספקטראליים היה גבוה יותר. כמו כן, מצאנו כי כל המדדים הספקטראליים היו דומים בכושר ההפרדה בין דרגות החומרה הגבוהות (בינונית-גבוהה וגבוהה), אך אפשר לראות שונות בין המדדים ביחס לכושר ההפרדה בין חומרות השרפה הבינונית, הנמוכה וכתמים שלא נשרפו.

המדדים ΔNBR ו- $\Delta NDVI$ היו בעלי כושר הפרדה מובהק בין דרגות החומרה הבינונית והנמוכה, אך לא אפשרו הפרדה בין החומרה הנמוכה וכתמים שלא נשרפו. עם זאת, למדד ΔNBR כושר ההפרדה גבולי ($p=0.07$) בין החומרה הנמוכה וכתמים שלא נשרפו, וייתכן שמידע נוסף היה מסייע להפרדה. כמו כן, מצאנו כי למדד $RANBR$ כושר הפרדה מובהק בין דרגה נמוכה ובין כתמים שלא נפגעו מהאש, אך הוא לא אפשר הבחנה בין חומרת שרפה בדרגות נמוכה ובינונית (איור 3).

היה זמין לנו, ועל כן מיפינו את כיסוי הצמרות לפני השרפה באמצעות מיון מונחה (כפי שמפורט בשלב 3) וחישבנו בכל אחת מהתצפיות את אחוז כיסוי הצמרות. לאחר מכן בדקנו את המתאם בינו ובין ערכי המדדים הספקטראליים (שחושבו בשלב 1) בכל אחת מקטגוריות חומרת השרפה.

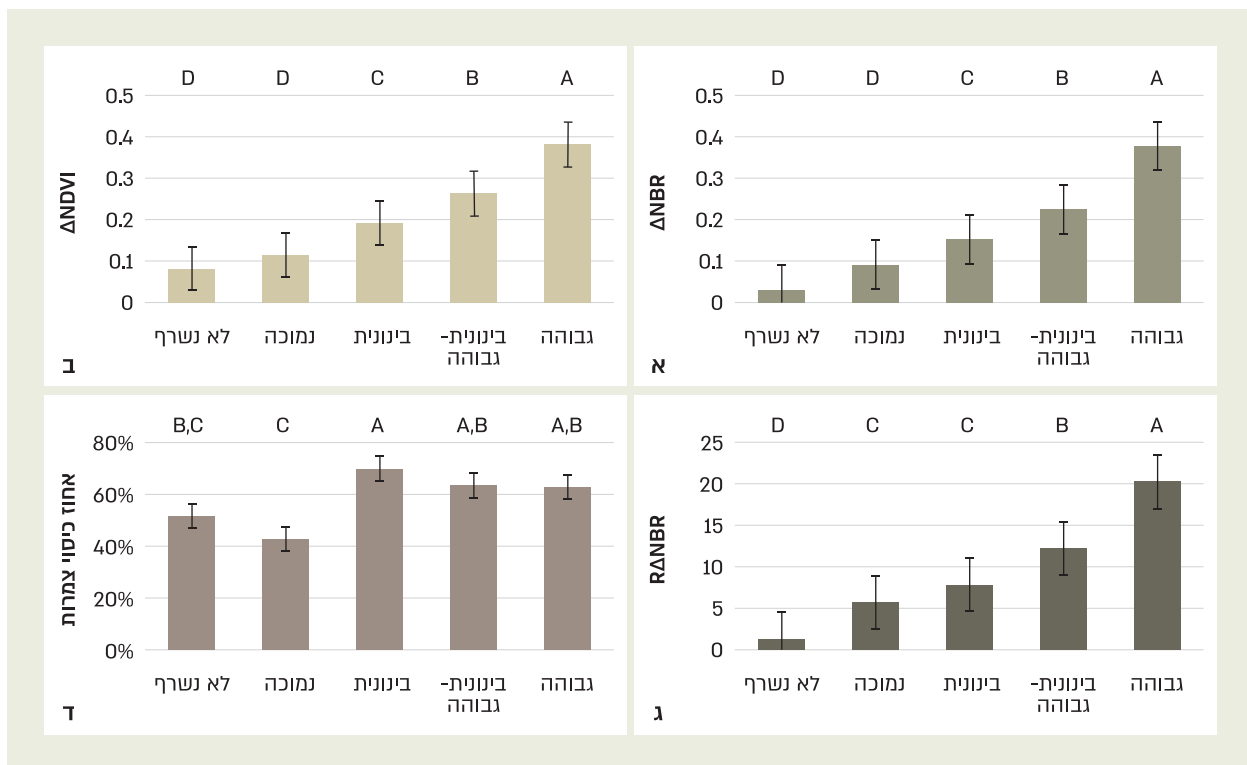
תוצאות

תכסית קרקע לפני השרפה

באמצעות מיון מונחה של אורתופוטו של מפ"י מיולי 2020, מצאנו כי רוב שטח השרפה (כ-60%) היה מכוסה בצומח, ומיעוטו קרקע (כ-30%) או מחשוףי אבן (כ-7%). כ-3% מהשטח לא סווגו, והם כללו בעיקר דרכי אספלט ודרכים לבנות.

ניתוח ממצאי המדגם

אפיינו חזותית כל אחת מ-300 התצפיות על סמך הקטלוג (טבלה 1) ומצאנו כי מתוך 300 תצפיות, ב-244 (כ-81.3%) נצפתה פגיעה בצמרות העצים. שאר התצפיות שויכו לחומרה הנמוכה או לשטחים שלא נשרפו כלל (9.7% ו-9%,



איור 3

תוצאות מבחן Tukey-Kramer HSD לכל דרגת חומרת שרפה שהוגדרה באמצעות הקטלוג על סמך האורתופוטו
 האותיות מייצגות קבוצות המובחנות סטטיסטית זו מזו עבור ΔNBR (א); $\Delta NDVI$ (ב); $RANBR$ (ג); אחוז כיסוי הצמרות לפני השרפה, שחושב באמצעות אורתופוטו של מפ"י מיולי 2020.

על ערכי המדדים לאחריה, מצאנו כי קטגוריית החומרה הגבוהה ביותר, המאופיינת בכתמיות הומוגנית של נזקי השרפה לצומח, נמצאה כקטגוריה המושפעת ביותר מאחוז כיסוי צמרות (איור 5).

המדד $\Delta NDVI$ נמצא כבעל המתאם הגבוה ביותר עבור כל אחת מדרגות החומרה, כאשר הקטגוריה הגבוהה, המשקפת שרפת עצים והותרת גזמים, נמצאה כבעלת המתאם הגבוה ביותר ($r=0.76$), אחריה הקטגוריה הבינונית-גבוהה ($r=0.59$) ואחריה הקטגוריה 'לא נשרף' ($r=0.56$). המדד ΔNBR מציג את המתאם הגבוה ביותר בקטגוריית החומרה הגבוהה ($r=0.81$), אך בשאר הקטגוריות כושר ההפרדה שלו נמוך מזה של $\Delta NDVI$. המדד $RANBR$ נמצא כבעל כושר ההפרדה הנמוך ביותר.

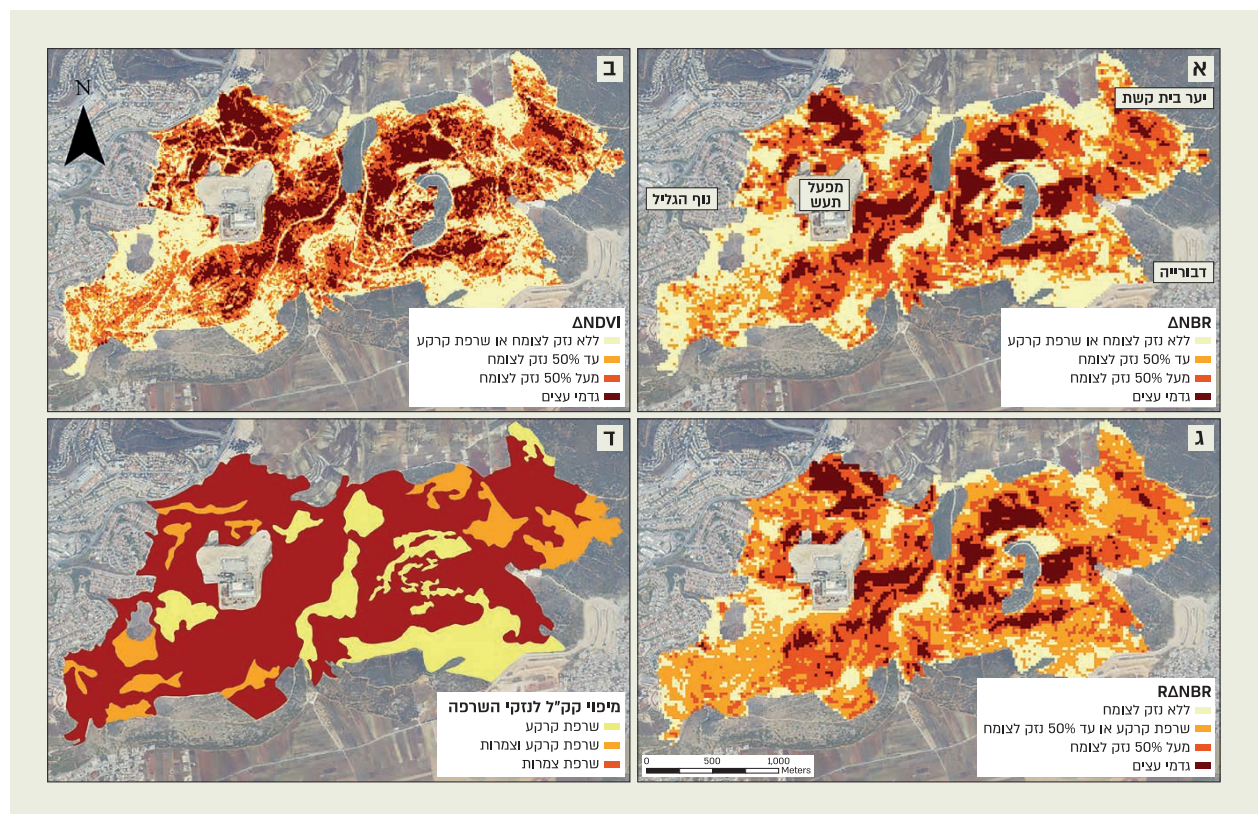
דין ומסקנות

ניתוח המדדים הספקטראליים מראה כי הם מאפשרים הפרדה בין קטגוריות הקטלוג, המשקפות את נזקי השרפה לצומח – ככל שהכגיעה בצומח עולה, כך עולה ממוצע ערכי המדדים הספקטראליים. מצאנו שכל המדדים מאפשרים

בבחינת השונות בין קבוצות עבור אחוז כיסוי צמרות מצאנו כי בדרגות החומרה הכוללות פגיעה בלתי הפיכה בצמרות העצים (בינונית, בינונית-גבוהה וגבוהה), ממוצע אחוז כיסוי הצמרות לפני השרפה היה גבוה מ-63%. עבור הקטגוריות של שרפה ללא פגיעה בצמרות, נמצא כי ממוצע אחוז כיסוי הצמרות לפני השרפה היה נמוך מ-43%. עבור הקטגוריה המעידה על שטח שכלל לא נפגע, התקבל כי אחוז כיסוי הצמרות דומה לרוב הקטגוריות (למעט בינונית), וייתכן שמדובר באזורים בשטח השרפה שהאש כלל לא הגיעה אליהם.

על בסיס ניתוח זה מיפינו את חומרת השרפה. איור 4 מציג את המדדים הספקטראליים מכוילים על בסיס הקטלוג ותוצאות המבחנים הסטטיסטיים, כך שהערך העליון של קטגוריה אחת מוגדר כערך התחתון של הקטגוריה שבאה אחריה. כמו כן, מוצג מיפוי שקיבלנו מק"ל לחומרת השרפה בסיווג לשלוש דרגות: שרפת קרקע – שרפה בדרגה נמוכה, שרפת קרקע וצמרת – שרפה בדרגה בינונית, ושרפת צמרות – שרפה בדרגה גבוהה.

כאשר בחנו את השפעת אחוז כיסוי הצמרות לפני השרפה



איור 4

מיפוי חומרת השרפה על פי מדדים ספקטראליים ונתוני ק"ל לחומרת השרפה. (א) ΔNBR ; (ב) $\Delta NDVI$; (ג) $RANBR$; (ד) מיפוי ק"ל לנזקי השרפה.

שרפת קרקע ללא פגיעה בצומח. מנגד, הוא אינו מאפשר אבחנה ברורה בין החומרה הנמוכה לבינונית, כלומר בין שרפת קרקע לשרפת עד 50% מהצמרות. הקטגוריות האלה פשוטות לסיווג חזותי, אבל קשה להפריד ביניהן מבחינת המובהקות הסטטיסטית בעת שימוש במדד זה ($p=0.1$). נוסף על כך, מצאנו התאמה נמוכה מאוד של המדד לאחוז כיסוי הצמרות, כלומר המדד כמעט ואינו מושפע מנזקי הצומח ברוב דרגות החומרה. תוצאה זו תואמת מחקר אחר (Cai and Wang, 2022) שמצא כי השימוש ב-RANBR עלול להוביל להערכת חסר גם בשטחים הומוגניים יחסית, שיש לעצי המחט דומיננטיות מרחבית בהם.

לאחר מיפוי כיסוי צמרות העצים באמצעות מיון מונחה, מצאנו כי בדרגות החומרה הכוללות פגיעה בלתי הפיכה בצמרות העצים (בינונית, בינונית-גבוהה וגבוהה), ממוצע אחוז כיסוי הצמרות לפני השרפה היה גבוה מ-63%. עבור קטגוריית החומרה הנמוכה, הכוללת שרפה ללא פגיעה בצמרות, נמצא כי ממוצע אחוז כיסוי הצמרות לפני השרפה היה נמוך מ-43%.

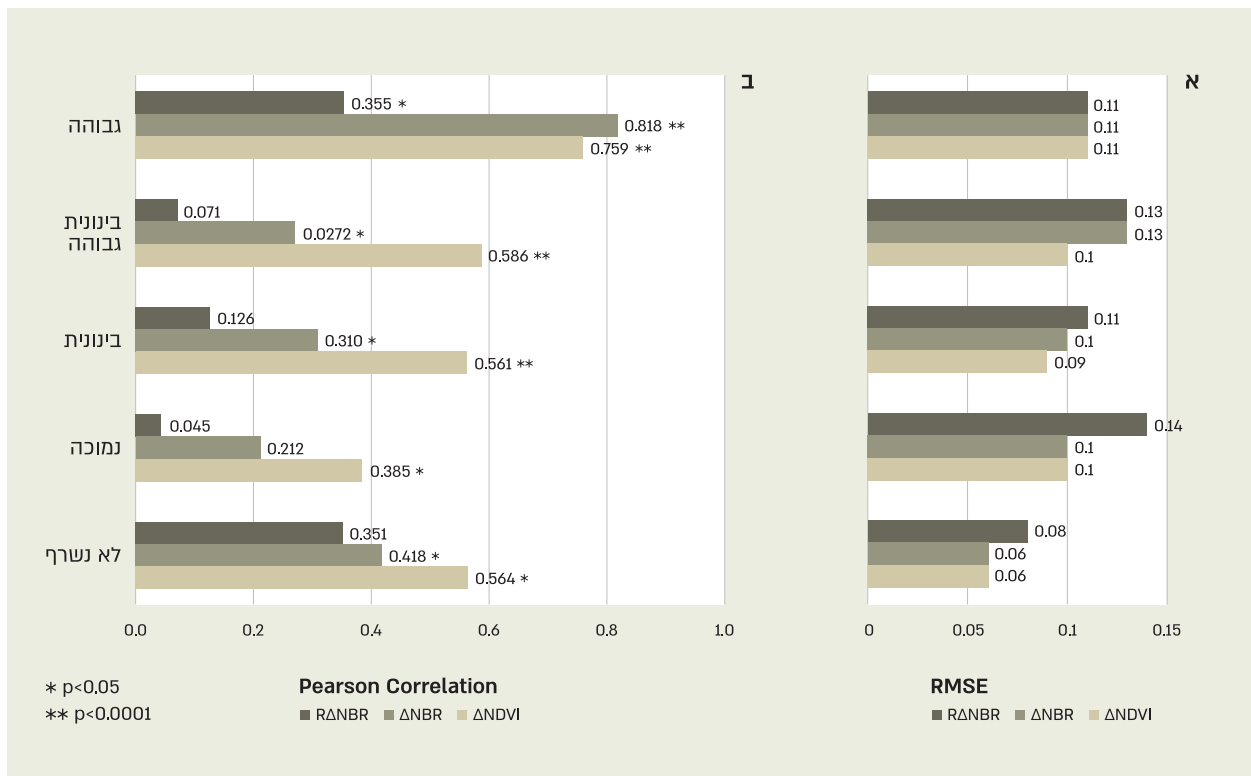
הממצאים מדגישים את חשיבות דילול העצים לשם מיתון שרפות (אסם ושות', 2013), ומצביעים על חשיבות דילול הצומח בכלל, כולל תת-היער (Tsiouvaras et al., 1989),

הפרדה בין דרגות חומרה בינונית-גבוהה וגבוהה, המובילות לפגיעה קשה בצמרות העצים.

מאיך גיטא, בדרגות החומרה הבינונית ומטה (בינונית, נמוכה ולא נשרף), הכוללות פגיעה חלקית בצומח או שטחים שלא נפגעו בשרפה, ההבדל בין המדדים הספקטריים קטן (איור 3). מגמה דומה נצפתה גם במחקרים אחרים (Lyndersens et al., 2016).

נמצא שהמדדים ΔNBR ו- ΔNDI היו יעילים לזיהוי חומרת השרפה הבינונית, המאופיינת בפגיעה בלתי הפיכה בעד 50% מצמרות העצים. קטגוריה זו מורכבת לסיווג חזותי מכיוון שהיא דורשת מהמסווג להעריך את היחס בין צמרות פגועות ושאינן פגועות בכל תצפית (טבלה 1). עם זאת, נמצא כי המדדים לא הבחינו בין כתמים של חומרה נמוכה, המתאפיינים בפגיעה מתונה בפני הקרקע (ללא פגיעה בצמרות), ובין כתמים שלא נשרפו. רגישות המדדים לאיתור שינויים בתכולת המים או בתכולת הכלורופיל בצומח (ΔNBR , ΔNDI , בהתאמה), יכולה להסביר מדוע כושר ההפרדה שלהם נמוך כאשר עוצמת השרפה אינה באה לידי ביטוי בשרפת צמרות.

המדד RANBR התגלה כבעל כושר אבחנה בין הקטגוריות 'לא נשרף' ו-'חומרה נמוכה', ומצאנו שהוא מאפשר לזהות



איור 5

המתאם בין אחוז כיסוי הצמרות וערכי המדדים הספקטריים של הצומח במדגם בכל אחת מדרגות החומרה של השרפה (א) שורש הטעות הריבועית הממוצעת (לאחר נרמול שלושת המדדים הספקטריים); (ב) מקדם המתאם של Pearson ומובהקותו בכל דרגת חומרה.

על כן, מדד NDVI שחושב (בסוף העונה היבשה) לפני השרפה מעיד על פעילות פוטוסינתזה במחטי האורן, אך לא על תכולת המים בהן, בעוד שמדדים מבוססי SWIR מעידים על תכולת המים בצמח. לפיכך, Δ NDVI מעיד על נזקי השרפה כאשר הצומח נמצא כביכול במצב מיטבי (מבצע פוטוסינתזה, אך למעשה נמצא בעקה), בעוד Δ NBR מעיד על נזקי השרפה כאשר הצומח נמצא בדרגת יובש מסוימת. מאפיינים ייחודיים אלה של הצומח המחטני יכולים להסביר את יתרונו של Δ NDVI בהערכת חומרת שרפה ביער מחטני מחד גיסא, ואת יתרונם של מדדים מבוססי SWIR (Δ NBR ו-RANBR) בשרפות צומח עשבוני (למשל, ברמת הגולן) מאידך גיסא.

מחקר זה מדגים שימוש בטכניקות עיבוד תמונה המבוססות על חישה מרחוק ועל למידת מכונה לצורך אפיון שטחים שנשרפו בדרגות שונות של חומרה. תובנה מרכזית העולה ממנו היא השפעת תצורת הצומח, צפיפותו ותכולת הלחות בו על הערכת חומרת שרפה. למעשה, מאפיינים אלה של הצומח משפיעים על התפשטות שרפות, בהיותם תיאור מצבו של 'דלק' השרפה. מכאן נובעת חשיבות המיפוי השוטף של המאפיינים האלה, ובייחוד צפיפות הצומח ומידת הלחות בו, לצורך הערכת הסיכון לשרפות עתידיות.

תודות

המחברים מודים לרועי הראל, לאילון כלב, למיכאל ספרינצין ולולדימיר בזברחי מקק"ל על מתן מידע וחומרי עזר, לאילון רונן ולאודה הרמן מהתחנה לחקר הסחף במשרד החקלאות ופיתוח הכפר על הסיוע הטכני, הנכונות והזמינות, ולמבקרים האנונימיים על ההערות המועילות. ע"ט מודה לקרן המלגות למצוינות אקדמית בגיאוגרפיה ע"ש דוד עמירן (האוניברסיטה העברית בירושלים).

למטרה זו.

כאשר בחנו את השפעת אחוז כיסוי הצמרות על ערכי המדדים מצאנו כי הייתה עדיפות למדד Δ NDVI על פני המדדים Δ NBR ו-RANBR (איור 5). תוצאה זו מעניינת על רקע האפקטיביות של מדדים מבוססי ערוצי SWIR (כמו Δ NBR או RANBR) במיפוי שרפות (Key and Benson, 2006), אך יש לציין כי גם במחקרים אחרים נמצא כי בפרק זמן של עד שנתיים לאחר שרפה המדד Δ NDVI נותן תוצאות טובות יותר ביערות מחטניים (Chen et al., 2011).

הסברים ליתרונותיו של Δ NDVI על פני מדדים מבוססי SWIR יכולים להיות קשורים לטכנולוגיה או למיני העצים בשטח השרפה. מבחינה טכנולוגית, שימוש בלוויין Sentinel-2 מוביל לכך שהרזולוציה המרחבית של Δ NDVI גבוהה פי ארבעה מזו של המדדים מבוססי ערוצי SWIR (100 ו-400 מ"ר לפיקסל, בהתאמה), כלומר הפיקסלים של Δ NBR ו-RANBR מכילים יותר אובייקטים והם הטרוגניים יותר מאלה של Δ NDVI.

הסבר נוסף יכול להיות קשור למיני העצים בשטח השרפה. בספרות המדעית נמצא כי לאורך שנה הידרולוגית תכולת מים נמוכה בעצי מחט לא באה לידי ביטוי באופן בולט בערכי NDVI (Hardy and Burgan, 1999). כמו כן, נמצא כי ענפים מחטניים שנכרתו, ללא ניסיון לשמור על הלחות שלהם, הראו שינויים קטנים יותר ב-NDVI ביחס לענפים של רחבי עלים שטופלו באותו האופן, וזאת עד 72 שעות מהכריתה (Richardson and Berlyn, 2002). יש לסייג כי במקרה של שנות בצורת עוקבות ניתן לראות מגמת ירידה בערכי NDVI (Taylor et al., 2020).

השרפה ביער נצרת-דבורייה התרחשה בסוף העונה היבשה של שנה הידרולוגית גשומה מהמוצע (פורת, 2020), וברוב השטח שנשרף (כ-3.6 קמ"ר) נטועים עצי מחט ובעיקר אורן ירושלים (כ-1.7 קמ"ר), שתכונותיו האקו-פיזיולוגיות מתבטאות בעמידותו ליובש (שילר, 2013; Atzmon et al., 2004).

מקורות

- Atzmon N, Moshe Y, and Schiller G. 2004. Ecophysiological response to severe drought in *Pinus halepensis* Mill. trees of two provenances. *Plant Ecology*, 171(1), 15–22.
- Bowman DM, Kolden CA, Abatzoglou JT, Johnston FH, van der Werf GR, and Flannigan M. 2020. Vegetation fires in the Anthropocene. *Nature Reviews Earth and Environment*, 1(10), 500–515.
- Cai L and Wang M. 2022. Is the RdNBR a better estimator of wildfire burn severity than the dNBR? A discussion and case study in southeast China. *Geocarto International*, 37(3), 758–772.

- אסם י, ברנד ד, טאובר י, פרבולוצקי א וצורף ח. 2013. תורת ניהול היער בישראל – מדיניות והנחיות לתכנון ולמשק היער. **אקולוגיה וסביבה**, 4(2): 129–130.
- אסם י, ברנד ד, טאובר י, פרבולוצקי א וצורף ח. 2014. **תורת ניהול היער בישראל: מדיניות והנחיות לתכנון ולמשק היער** (מהדורה ראשונה). קק"ל, אגף הייעור ויחידת הפרסומים, קשרי ציבור.
- פורת ע. (2020/08/24, 12:20). **סיכום עונת הגשם 2019/2020**. השירות המטאורולוגי הישראלי. <https://ims.gov.il/he/node/100>
- שילר ג. 2013. **גידול עצי יער ויערות בישראל, ארץ של סכר המדבר**. <https://israelforests.wordpress.com/>

- Lydersen JM, Collins BM, Miller JD, Fry DL, and Stephens SL. 2016. Relating fire-caused change in forest structure to remotely sensed estimates of fire severity. *Fire Ecology*, 12(3), 99–116.
- Parson A, Robichaud PR, Lewis SA, Napper C, and Clark JT. 2010. *Field guide for mapping post-fire soil burn severity*. General Technical Report. RMRS-GTR-243. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Radeloff VC, Hammer RB, Stewart SI, Fried JS, Holcomb SS, and McKeefry JF. 2005. The wildland-urban interface in the United States. *Ecological Applications*, 15(3), 799–805.
- Richardson AD and Berlyn GP. 2002. Changes in foliar spectral reflectance and chlorophyll fluorescence of four temperate species following branch cutting. *Tree Physiology*, 22(7), 499–506.
- Robichaud PR, Lewis SA, Brown RE, Bone ED, and Brooks ES. 2020. Evaluating post-wildfire logging-slash cover treatment to reduce hillslope erosion after salvage logging using ground measurements and remote sensing. *Hydrological Processes*, 34(23), 4431–4445.
- Safford HD, Stevens JT, Merriam K, Meyer MD, and Latimer, AM. 2012. Fuel treatment effectiveness in California yellow pine and mixed conifer forests. *Forest Ecology and Management*, 274, 17–28.
- Taylor A, Biswas T, Randall JM, Klausmeyer K, and Cohen B. 2020. Parched pines: A quantitative comparison of two multi-year droughts and associated mass mortalities of bishop pine (*Pinus muricata*) on Santa Cruz Island, California. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 6(1), 20–34.
- Tessler N, Borger H, Rave E, Argaman E, Kopel D, Brook A, et al. 2019. Haifa fire restoration project – Urban forest management: A case study. *International Journal of Wildland Fire*, 28(7), 485–494.
- Tsiouvaras CN, Havlik NA, and Bartolome JW. 1989. Effects of goats on understory vegetation and fire hazard reduction in a coastal forest in California. *Forest Science*, 35(4), 1125–1131.
- Tucker CJ. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150.
- Yebra M, Dennison PE, Chuvieco E, Riaño D, Zylstra P, Hunt Jr ER, et al. 2013. A global review of remote sensing of live fuel moisture content for fire danger assessment: Moving towards operational products. *Remote Sensing of Environment*, 136, 455–468.
- Chen X, Vogelmann JE, Rollins M, Ohlen D, Key CH, Yang L, et al. 2011. Detecting post-fire burn severity and vegetation recovery using multitemporal remote sensing spectral indices and field-collected composite burn index data in a ponderosa pine forest. *International Journal of Remote Sensing*, 32(23), 7905–7927.
- Edwards AC, Maier SW, Hutley LB, Williams RJ, and Russell-Smith J. 2013. Spectral analysis of fire severity in north Australian tropical savannas. *Remote Sensing of Environment*, 136, 56–65.
- Gale MG and Cary GJ. 2022. What determines variation in remotely sensed fire severity? Consideration of remote sensing limitations and confounding factors. *International Journal of Wildland Fire*, 31(3), 291–305.
- Hardy CC and Burgan RE. 1999. Evaluation of NDVI for monitoring live moisture in three vegetation types of the western US. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65, 603–610.
- IPCC. 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Péan C, Berger S, et al. (Eds)]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA Cambridge University Press. doi: 10.1017/9781009157896.
- Key CH and Benson NC. 2006. Landscape assessment (LA). In: Lutes DC, Keane RE, Caratti JF, Key CH, Benson NC, Sutherland S, and Gangi LJ. *FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system*. General Technical Report. RMRS-GTR-164-CD. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. p. LA-1-55, 164.
- Kutiel H. 2012. Weather conditions and forest fire propagation – The case of the Carmel fire, December 2010. *Israel Journal of Ecology and Evolution*, 58(23), 113–122.
- Lentile LB, Holden ZA, Smith AM, Falkowski MJ, Hudak AT, Morgan P, et al. 2006. Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. *International Journal of Wildland Fire*, 15(3), 319–345.
- Levin N and Saaroni H. 1999. Fire weather in Israel – Synoptic climatological analysis. *Geojournal*, 47(4), 523–538.
- Levin N, Tessler N, Smith A, and McAlpine C. 2016. The human and physical determinants of wildfires and burnt areas in Israel. *Environmental Management*, 58(3), 549–562.



הר כסולות והשכונות המזרחיות של נוף הגליל לאחר השרפה באדיבות: רועי הראל, קק"ל



יער נצרת-דבורייה יומיים לאחר השרפה, 11.10.2020 צילום: אלי ארגמן