



ניתוח הנזקים שגרמה סופת הרוח במרץ 2020 ליערות קק"ל

מיכה סילבר, אסף יופיטר ואנונו, שילי דור־חיים, משה שחק, ארנון קרניאלי *

המעבדה לחישה מרחוק, המכונים לחקר המדבר, אוניברסיטת בן־גוריון בנגב
karnieli@bgu.ac.il *

תקציר

נמצאה התאמה טובה בין מספר העצים שנפלו לבין מפנה המדרונות. על כן, ניתן להסיק שבשחריה נפלו יותר עצים בשיפועים שפנו לדרום־מזרח ובאזורים של צפיפות דלילה של עצים. מסקנות הפרויקט הן ששיטות חישה מרחוק באמצעות רחפנים, לידר ודימותי לוויין (ונוס) נמצאו יעילות למיפוי נזקי הסוכה ולאפיין מדויק של משתנים מרחביים הקשורים לעצים שנפגעו. שילוב של נתונים טופוגרפיים ומטאורולוגיים אפשר להעריך את הסיבות שגרמו לנזקים אלה. כמו כן, תוצאות המחקר מוכיחות שמעתה יש להביא בחשבון את גורם סופות הרוח במעקב אחר התפתחות המערכות שבניהול קק"ל בנגב.

סופת הרוחות והגשמים החריגה ב־11–12 במרץ 2020 גרמה נזקים כבדים ביערות קק"ל, שהתבטאו בשבירה ובעקירה של עצים רבים בכל אזור לכיש ודרומה עד מבואות באר שבע. המחקר המוצג עוסק בחקר אירוע קיצון בעיקר לנוכח התחזיות של אירועי קיצון הצפויים באזורנו כחלק בלתי נפרד משינוי האקלים, ומתרכז ביערות אמציה ושחריה, מוקדי הנזק העיקריים. בעקבות הסופה ערכו פקחי קק"ל סקר קרקעי ותיעוד אווירי באמצעות רחפן כדי לאתר, למפות ולצלם את אזורי נפילת העצים. במקביל ניתחה את האירוע המעבדה לחישה מרחוק של אוניברסיטת בן־גוריון בקמפוס שדה בוקר תוך שימוש בצילומי הרחפן, בדימותי לוויין, בנתונים מטאורולוגיים ובנתונים על מועדי נטיעות. הממצאים ביער אמציה מראים התאמה טובה בין כיוון הרוח בליל הסופה לבין כיוון הנפילה. עם זאת, לא נמצאה התאמה מובהקת בין צפיפות עצים, מפנה ושיפוע לבין מספר העצים שנפלו. ההסבר הסביר להיקף הנזק ביער אמציה הוא, כנראה, שילוב של מכות רוח עזות בליל הסופה עם לחות קרקע גבוהה בשל הגשמים הרבים שירדו באזור בינואר, בפברואר ובמרץ. לעומת זאת, ביער שחריה

מילות מפתח

חישה מרחוק, טופוגרפיה, הלוויין ונוס, מערכת לידר, משקעים

מבוא

שמערכות יער צפויות להיות מושפעות ממערכת משולבת של אסונות אקלים, הכוללים עלייה בהיקף ובעוצמה של גלי חום וקור, שיטפונות וסופות רוח (Seidl et al., 2011).

רקע

בסופת הגשמים והרוחות החריגה שהתרחשה בתאריכים 11–12 במרץ 2020 נגרם נזק רב לעצים ביערות קק"ל במרחב שבין קרית גת ועד דרומית ליער להב הסמוך לבאר שבע. אלפי עצים נשברו או נעקרו מהאדמה ונפלו במהלך הסופה (איור 1). מוקדי הנזק המשמעותיים ביותר התרחשו מזרחית לקרית גת, ביערות שחריה ואמציה. דו"חות של השירות המטאורולוגי בישראל לחורף 2020 מעידים על כמות משקעים הגבוהה ב־20% עד 30% מהממוצע הרב־שנתי בחודש ינואר, בעוד שחודש פברואר היה מעט חם יבש מהממוצע. מנגד, חודש מרץ הסתכם בכמות משקעים חודשית גבוהה בהרבה מהממוצע הרב־שנתי. בשפלת יהודה, בנגב הצפוני ובהרי ירושלים הכמות הייתה כפולה מהממוצע. גרף שושנת רוחות מתאריך 12 במרץ 2020 (איור 2) מציג רוח חזקה ממזרח ומדרום־מזרח במשך שעות רבות, בייחוד בתחנת לכיש.

מחקרים רבים הראו שהפרעות סביבתיות, כדוגמת בצורות, שרפות, שיטפונות, סופות גשם, סופות רוח ואחרות, משפיעות על המבנה והתפקוד של יערות, וכי לאירוע יחיד משמעותי של הפרעה, כגון סופת רוח העוקרת עצים, השלכות על התפתחות מערכת היער (Paine et al., 1998; Scheffer et al., 2001; Buma, 2015). הפרעות כגון אלה משאירות אחריהן מורשת ביולוגית שמשפיעה בטווח הארוך על תפקוד המערכת, מאחר שהיא יוצרת שינויים בתבנית העצים, בייצור הראשוני ובתהליכי מחזור היסודות (Franklin et al., 2000, 2007). כמו כן, ההפרעה קובעת את תגובות המערכת לגשם ולנגר עתידיים (Paine et al., 1998; Frelich and Reich, 1999; Buma, 2015) ולהפרעות נוספות, כגון שרפות (Senf and Seidl, 2021). בארה"ב ההשפעה המשותפת של הפרעות רוח ושרפות מוערכת בכ־2 מיליון הקטר בשנה (Dale et al., 2001). עד כה לא נחקרו בנגב ההשפעות של עוצמות הרוח על המערכות האקולוגיות שבניהול קק"ל, היות שנהגו להתבסס על הנחות מוקדמות שההפרעות הן בעיקרן רעייה, שרפות ובצורות. הנחות מוקדמות אלה אינן עומדות במבחן המציאות לנוכח תחזיות שינוי האקלים שמעריכות ששינוי משטר הרוחות הוא בלתי נמנע (Dale et al., 2001). כל התחזיות מצביעות על כך



איור 1

דוגמה לנזקי הסופה בליל 11–12 במרץ 2020 ביער שחריה נראה כי כל העצים נפלו באותו הכיוון.

מטרת המחקר

דקות) הושגו מאתרי תחנות השירות המטאורולוגי בישראל ומאתר משרד החקלאות ופיתוח הכפר.

יער אמציה

יש כיסוי תצלומי רחפן של יער אמציה לאחר אירוע הסופה. הצילומים הבודדים ברזולוציה גבוהה עברו תיקון גאומטרי ליצירת פסיפס רציף של השטח המצולם. אף על פי שחפיפת תמונות הרחפן לא הייתה מיטבית, וחלה בשל כך הסטה לצד של 10–15 מטרים, התוצר שימש לביצוע דיגיטציה ידנית לעצים עומדים ולעצים שנפלו. מאחר שבתמונות הרחפן ניתן להבחין בשורשים ובצמרות עצים נופלים, בוצעה דיגיטציה של כיוון הנפילה. לאחר מכן, חושבו האורך וכיוון הנפילה של העצים הנופלים, וסומנו נקודות מיקום השורשים (תחילת המקטע). מאפיינים טופוגרפיים כמו גובה, שיפוע ומכנה המדרון, חושבו לכל העצים (עומדים ונופלים) ממודל תבליט דיגיטלי (Digital Terrain Model) (DTM) ברזולוציה של 4 מטר. צפיפות העצים נגזרה מעצים עומדים ונופלים יחד.

יער שחריה

נעשה שימוש בנתוני לידר אווירי משני תאריכים שמכסים

מטרת המחקר הייתה לנתח את ההתאמה בין גורמים, כמו טופוגרפיה ועוצמת הרוח, לנזקים שגרמה הסופה ב־11–12 במרץ 2020 ליערות קק"ל, בדגש על יערות שחריה ואמציה. הניתוח בוצע על מידע שנאסף דרך חישה מרחוק, נתונים מטאורולוגיים ומועדי נטיעות. למיטב ידיעת המחברים, לא נעשה עדיין מחקר פרטני שבדק השפעה של אירוע קיצון על המבנה והתפקוד של יערות בארץ.

שיטות המחקר

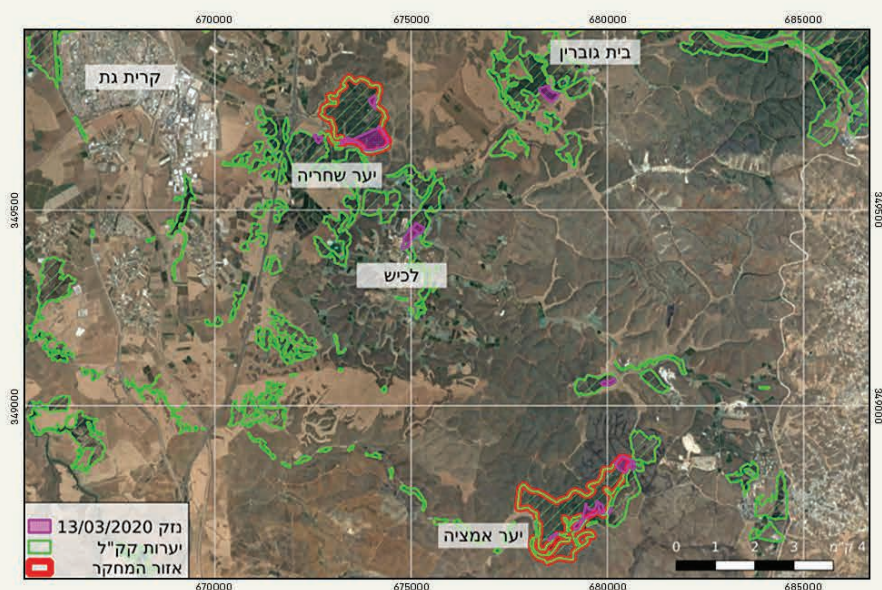
אזור המחקר ומקורות מידע

העבודה התמקדה בשני יערות שמרבית נזקי הסופה התרחשו בהם – אמציה ושחריה, הממוקמים בדרום השפלה, מזרחית לקרית גת (איור 3). חלק מנתוני החישה מרחוק ששימשו בעבודה זו סופקו על ידי קק"ל וחלק נאספו על ידי המעבדה לחישה מרחוק של אוניברסיטת בן-גוריון בקמפוס שדה בוקר (טבלה 1). נוסף על כך, כמויות משקעים (במרווחים של שעה) ונתוני מהירות רוח (במרווחים של 10



איור 2

גרפים של שושנת הרוחות מחמש תחנות מטאורולוגיות ב־12 במרץ 2020 תחנת משרד החקלאות בלכיש (ליד יער אמציה) מציגה רוחות דרום-מזרחיות חזקות ומתמשכות במהלך אירוע הסופה.



איור 3

מפת אזור המחקר

האזורים התחומים בירוק הם יערות קק"ל, בסגול אזורי נזק שדווח על ידי פקחי קק"ל, ובאדום יערות שחריה ואמציה.

נתונים	מקור	מיקום	איכות המידע	זמן רכישה המידע
תמונות רחפן	קק"ל	אמציה	חפיפה חסרה	לאחר הסופה
פוליוגון נזק	קק"ל	אמציה ושחריה	גסה	לאחר הסופה
עומדי עצים	קק"ל	אמציה ושחריה	לפי חלקה	ארכיון
לידר אווירי *	אוניברסיטת בן-גוריון	שחריה	רזולוציה של 1 מטר לפיקסל	לאחר הסופה
לידר אווירי	אוניברסיטת בן-גוריון	שחריה	רזולוציה של 1 מטר לפיקסל	2015
דימותי לוויין	כרויקט ונוס *	כל היערות במרחב	רזולוציה של 5 מטר לפיקסל	קיא, לפני הסופה ואחריה
נתונים מטאורולוגיים	השירות המטאורולוגי	4 תחנות	גבוהה	מרווח של 10 דקות בין מדידות
נתונים מטאורולוגיים: משקעים, רוח, טמפרטורה	משרד החקלאות	2 תחנות	גבוהה	שעתית

טבלה 1

מקורות מידע

* הסבר המונחים מופיע בהמשך

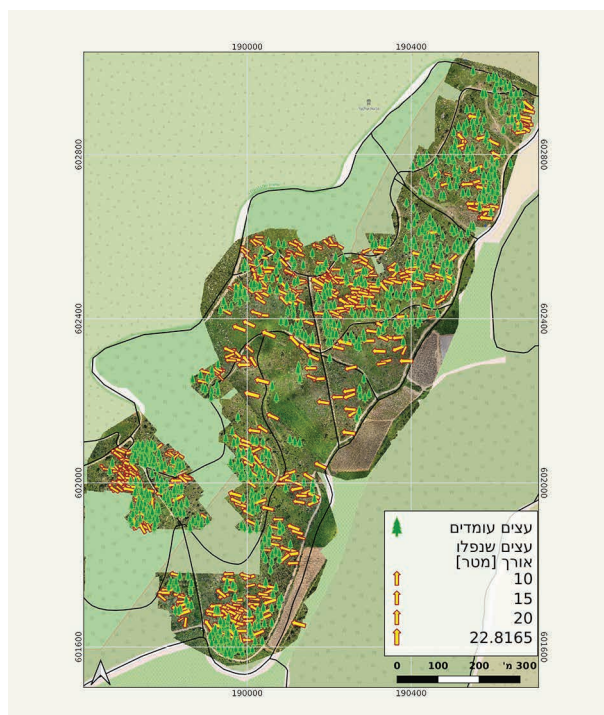
את כל האזור. לידר (LiDAR) הוא מערכת "גילוי אור ומדידתו" שבלועזית נוצרה משילוב המילים אור (Light) ומכ"ם (Radar) (Light Detection And Ranging). הלידר משתמש בקרני לייזר להכנת מפות תלת־ממדיות בהפרדה גבוהה, ולכן יש לו שימושים רבים בתחום היערנות. נתוני לידר מ־2015 הם בצפיפות של נקודת סריקה אחת למ"ר, ובטיסה חדשה שבוצעה במהלך הקיץ, לאחר אירוע הסופה, בצפיפות נקודת סריקה של 2 נקודות למ"ר. נתונים אלה שימשו לסימון עצים על ידי יצירת מודל של גובה חופה (Canopy Height Model – CHM) מנקודת הענן. עצים בודדים אותרו באמצעות אלגוריתם "הגובה המרבי המקומי" (local maxima) מה־CHM. על ידי השוואה בין הנתונים החדשים ונתוני הארכיון הושגו שתי שכבות נקודה של עצים עומדים. נוסף על כך, חולצו מנתוני הממ"ג (GIS) של קק"ל עומדי עצים, עם נתוני שתילה לכל חלקה. באמצעות מידע זה מוסכו עצים הצעירים שנשתלו לאחר שנת 2000 כדי להבטיח כי רק עצים בוגרים ייכללו בשני הסטים של נתוני הלידר.

יש לציין כי צילומי הרחפן לאחר הסופה המכסים את יער שחריה, לא צולמו בחפיפה מספקת, ולכן לא יכולנו לבצע יישור גאומטרי. היות שכך, נעזרנו בנתונים מהלוויין ונוס (VENμS – Vegetation and Environment on a New Micro Satellite), שהוא לוויין לחישה מרחוק המשמש את סוכנות החלל הישראלית. השווינו דימויים מנתוני הלוויין ברזולוציה של 5 מטר משנים עוקבות, וכך חישבנו מידע על אזורי נפילת העצים. בגין החורף הגשום ב־2019–2020 יערות קק"ל היו עשירים בצמחייה עשבונית חד־שנתית, ולכן לא ניתן להבחין בעצים בעונה הגשומה ולסווג אותם. לעומת זאת, בדימוי העונה היבשה, מדד צמחייה (– NDVI Normalized Difference Vegetation Index) אמור לייצג עצים בלבד ללא חד־שנתיים, ולכן השוואה בין דימוי קיץ מ־2019 ומ־2020 שימשה לסיווג האזורים שניזוקו.

תוצאות

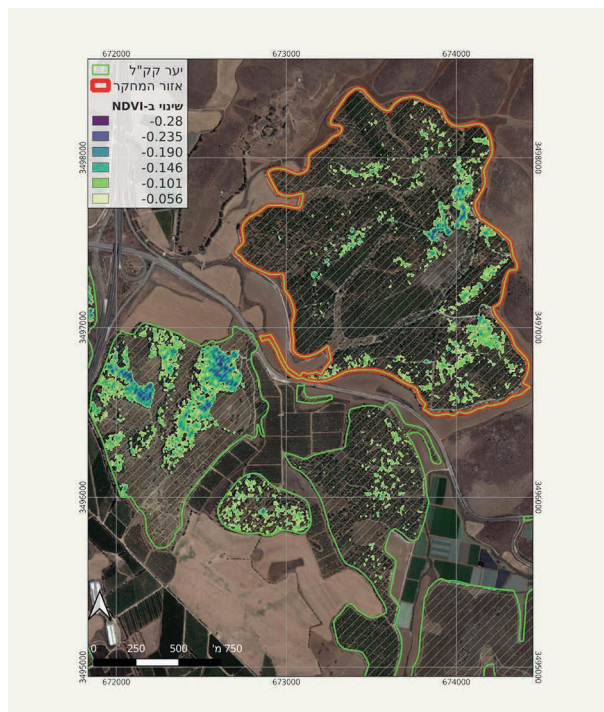
יער אמציה

בניתוח תמונות הרחפן סומנו כקווים מהשורשים לכיוון הצמרת 474 עצים נופלים, וכנקודות – 620 עצים עומדים. לפיכך, 43% מהעצים נפלו במהלך הסופה. מפת העצים הנופלים והעומדים באמציה מוצגת באיור 4. ניתן לראות כי רוב העצים נפלו לכיוון מערב דרום־מערב. ניתוח כלל כיווני נפילת העצים אל מול שיפוע המדרון וניתוח כיוון הנפילה אל מול מפנה המדרון לא הראו קשרים מובהקים. עם זאת, ניכר כי העצים הנופלים נמצאו במיקום של שיפועים גדולים יותר. הרגרסיה הלוגיסטית (מודל סטטיסטי המתאר קשר אפשרי בין משתנה איכותי/קטגורי, המכונה "המשתנה המוסבר",



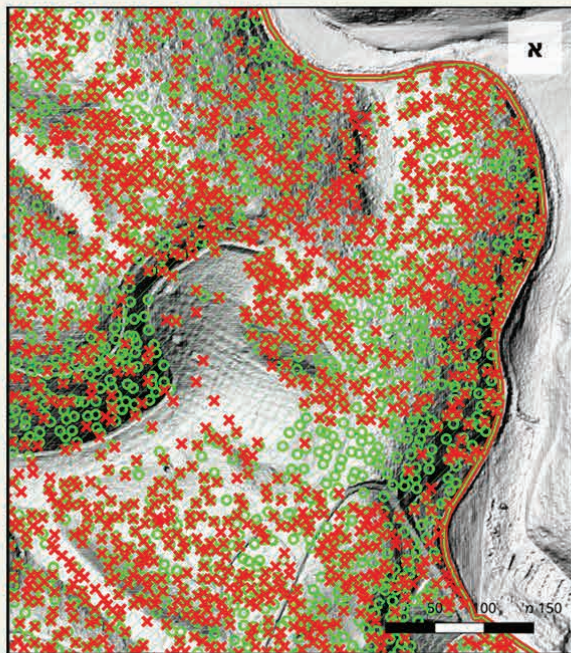
איור 4

מפת עצים נופלים ועומדים ביער אמציה לאחר סופת רוח במרץ 2020
כיוון החץ מראה את כיוון נפילת העץ. אורך החץ מסמן את אורך קטע העץ שנפל.

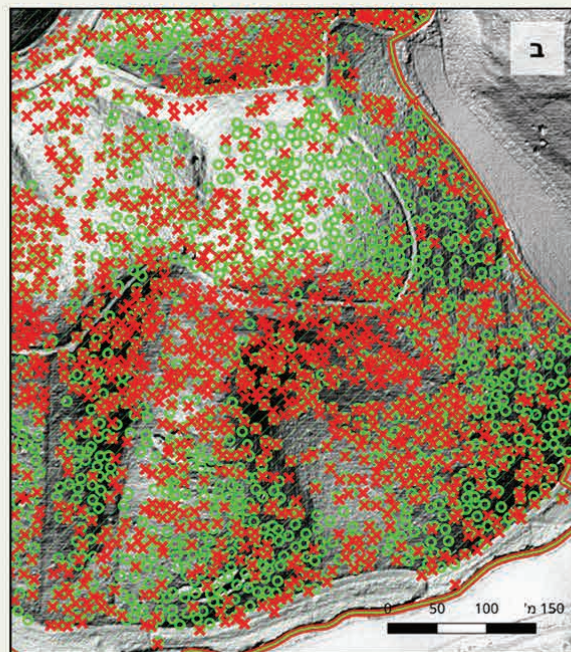
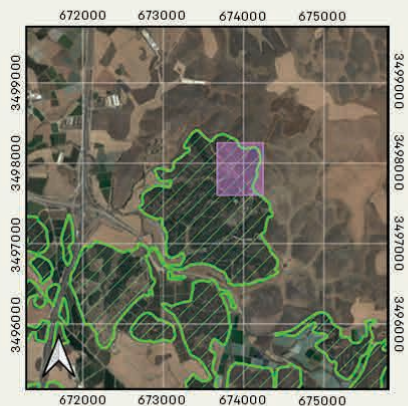


איור 5

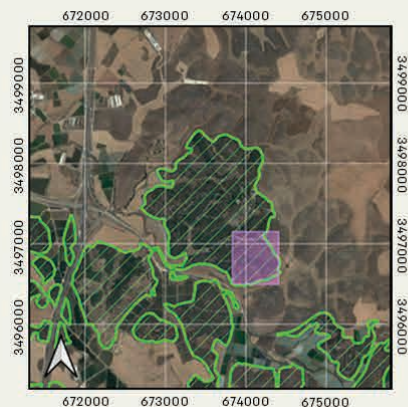
אזורי הנזק ביער שחריה שחושבו מניטור השינוי בערכי NDVI בין דימוי הלוויין ונוס בקיץ 2019 ובקיץ 2020



○ עצים 2015
 × עצים 2020



○ עצים 2015
 × עצים 2020



איור 6

מיקומי עצים שנותחו מנתוני הלידר ביער שחריה באמצעות שימוש במודל של גובה חופה (CHM) כל אריח מציג מפת תקריב של אזור ביער. עיגולים ירוקים מסמלים עצים מנתוני 2015, X אדום מסמל עצים ב-2020 לאחר הנזק. מפה מדרונות: (א) צפון-מזרח, (ב) דרום-מזרח.

סומנו כ-"עומדים" (איור 6). יש לציין כי בחלק מהמיקומים, עצים שנחתמו מופיעים בנתונים של 2020 ולא בנתונים של 2015. ניתן להסיק מכך כי העצים גדלו מעבר לגובה המינימום (7 מטר) שנבחר כערך סף בניטוח ה־CHM בין תאריכי הלידר המוקדם והחדש. לכן, סביר להניח כי אחוז העצים הנופלים היה בפועל גבוה יותר.

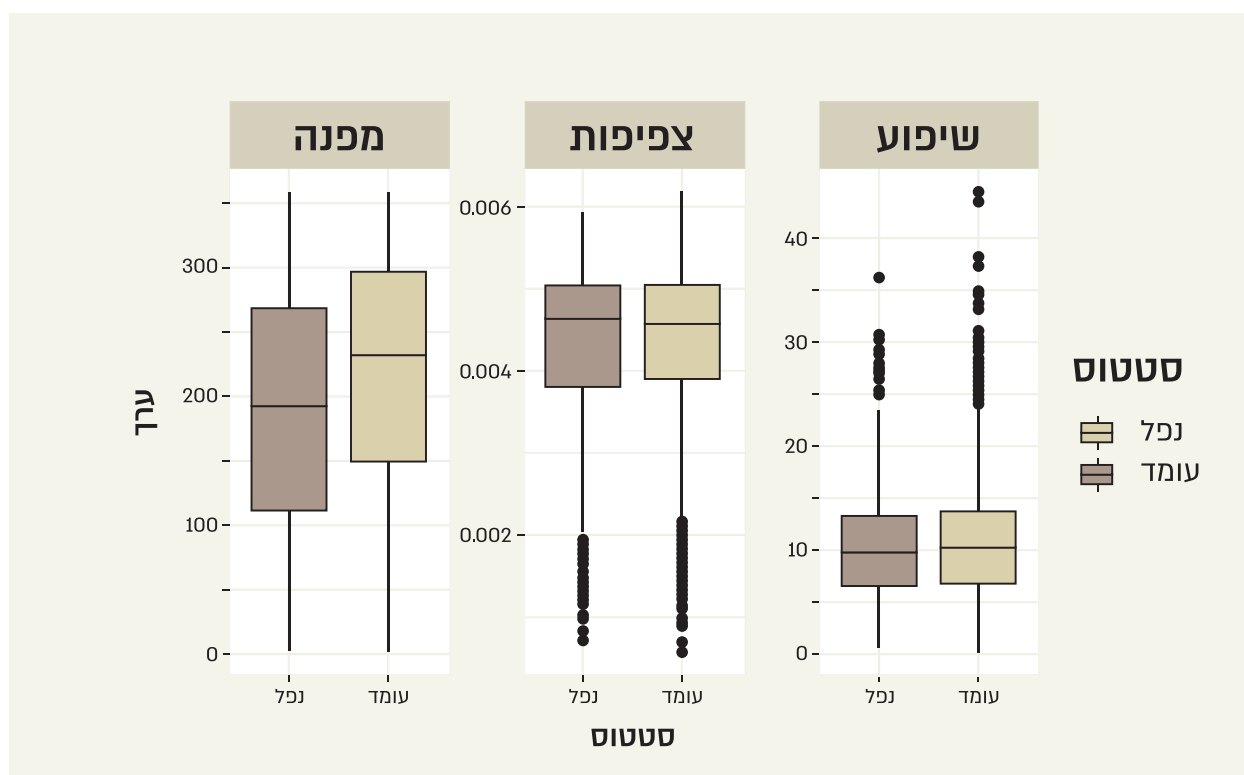
נוסף על כך, רשת (grid) צפיפות עצים הוכנה באמצעות שימוש בלידר, וכן הוכן מודל שטח דיגיטלי (Digital Terrain Model, DTM) ברזולוציה גבוהה, המאפשר ליצור מפות שיפוע ומפנה. בדומה למה שנעשה ביער אמציה, בוצעה רגרסיה לוגיסטית עם קטגוריית "עומד/נפל" כמשתנה מוסבר וצפיפות עצים, מפנה ושיפוע מדרון כמשתנים מסבירים. שלא כמו התוצאות ביער אמציה, כל המשתנים המסבירים נמצאו כתורמים משמעותית למשתנה הקטגורי "עומד/נפל" (ערכי p הקטנים מ־0.01 מעידים כי ניתן לדחות את השערת האפס). לפיכך, צפיפות נמוכה, שיפועים מתונים וזווית מפנה קטנה (לכיוון מזרח ודרום) תרמו לנפילת עצים. תרשים קופסה באיור 7 מראה הבדל סטטיסטי מובהק בממוצע מפנה המדרונות בין עצים נופלים ועומדים, בעוד

ובין משתנים אחרים המכונים "משתנים מסבירים" קבעה כי רק שיפוע המדרון הוא משתנה מסביר. משתנה זה נמצא כמשפיע מובהק של הסיווג שנוצר (ערך p של 0.01). לכן, יותר עצים נפלו במדרונות משופעים מאשר בוואדיות או לאורך רכסים.

יער שחריה

באיור 5 מסומנים אזורי הנזק ביער שחריה לפי עוצמת השינוי במדד הצמחייה (NDVI) שחושב מתמונות הלווין ונוס בין קיץ 2019 לקיץ 2020. נראה כי הנזקים העיקריים נגרמו ברכסים ובמדרונות המזרחיים (בפינה הדרום־מזרחית של היער). לפי שיטה זאת חושב שטח האזור שניזוק (545 דונם) ביחס לסך כל שטח יערות שחריה, 3,750 דונם. מסתבר כי 14.5% מהשטח ניזוקו מהסופה.

במטרה למנות את מספר העצים הנופלים הוכן אזור חיץ של 8 מטרים המקיף את עצי הנטיעות לאחר 2015. אזורי העצים שלא הצטלבו עם אזור החיץ, הוגדרו כעצים שניזוקו. בהתאם לכך, 16.7%, בערך 1,600 עצים, לא נתחמו על ידי הלידר לאחר אירוע הסופה וסומנו כ-"נופלים", ושאר העצים



איור 7

תרשים קופסה של המשתנים המסבירים – שיפוע, צפיפות עצים ומפנה

נראה הבדל סטטיסטי מובהק בממוצע מפנה המדרונות בין עצים נופלים ועומדים, בעוד שההבדלים בממוצעים של שני המשתנים האחרים אינם מובהקים. הפער הגדול בין ערכי ממוצעי המפנה בין עצים נופלים ועומדים מעיד על אפקט משמעותי של משתנה זה.

כי אזורים ביער בעלי צפיפות נמוכה וגם מדרונות הפונים לכיוון מזרח ודרום, היו יותר חשופים לנזק. מאחר שלא קיים מיפוי זמין של כיוון הנפילה ביער שחריה, לא ניתן להסיק מסקנה חד־משמעית בנוגע להשפעת כיוון הרוח. יש לציין כי עונת 2019–2020 הייתה הגשומה ביותר מאז 1991. חלק מהעצים נעקרו מהקרע עם השורשים. הנזקים נגרמו, ככל הנראה, בגין הגשמים הכבדים שירדו במהלך הסופות בחודשים ינואר וכברואר והובילו ללחות קרקע גבוהה ביערות. לאחר מכן, במהלך הסופה החריגה בחודש מרץ, גשמים נוספים ורוחות חזקות הותירו את העצים חשופים לעקירה על ידי משבי רוח עוצמתיים. העובדה כי חלק מהעצים נמצאו שבורים בגזע, מספר מטרים מעל הקרקע, מעידה על העוצמה הקיצונית של משבי הרוח.

מחקר זה מצביע על כך שלאירועי קיצון אקלימיים עשויה להיות השפעה שלילית על יערות. במקרה שלפנינו, הצירוף של קיצוניות בגשם וברוח הביא לנפילה ולעקירה של עצים, והן שינו את תבנית היער, דבר שיכול להשפיע על תפקודו.

תודות

המחברים מודים בחום לעובדי קק"ל – מיכאל ספרינצ'ין, גיל סיאקי ואלכסנדרה סביצקי על הסיוע בנתונים ובלוגיסטיקה.

שההבדלים במומצעים של שני המשתנים האחרים אינם מובהקים.

דיון ומסקנות

המודלים הידועים כיום להערכת נזקי סופות רוח ליערות הם ברובם תיאוריים (Dobbertin, 2002; Lindemann and Baker, 2002; Kupfer et al., 2008). לעומתם, שיטות חישה מרחוק באמצעות רחפנים, לידר ודימותי לוויין (כדוגמת נוס) נמצאו יעילים למיפוי נזקי סופת הרוח ולאפיון מדויק של משתנים מרחביים הקשורים למספר העצים שנפגעו. שילוב של נתונים טופוגרפיים ומטאורולוגיים אפשר להעריך את הסיבות שגרמו לנזקים אלה.

מאחר שצפיפות העצים ביער אמציה הייתה דלילה יותר מאשר בשחריה, ההערות והמסקנות מתייחסות לכל יער בנפרד. הנזק באמציה היה חמור יותר. מעל 40% עצים נופלים באמציה לעומת פחות מ-20% בשחריה. כיוון הנפילה ברוב העצים שניזוקו באמציה היה באופן אחיד לכיוון מערב, וגרף שושנת הרוחות (איור 2) מעצים את המסקנה כי משבי רוח חזקים מדרום־מזרח היו גורם משמעותי לנזק. יותר עצים נפלו במדרונות בהשוואה לרכסים ולואדיות.

נראה כי סיבות הנזק בשחריה שונות. קיימת הוכחה סטטיסטית לכך שצפיפות עצים, שיפוע, וביחוד מפנה המדרון, משפיעים על נפילת העצים. התוצאות מעידות

מקורות

- Station. <https://ims.data.gov.il/ims>. אתר השירות המטאורולוגי בישראל.
- אתר משרד החקלאות ופיתוח הכפר. <http://www.meteo.co.il/Report/stationreport>
- Frelich LE and Reich PB. 1999. Neighborhood effects, disturbance severity, and community stability in forests. *Ecosystems*, 2, 151-166.
- Kupfer JA, Myers AT, and McLane SE. 2008. Patterns of forest damage in a southern Mississippi landscape caused by hurricane Katrina. *Ecosystems*, 11, 45-60.
- Lindner M, Maroschek M, Netherer S, and Kremer A. 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*. 259, 698-709.
- Paine RT, Tegner MJ, and Johnson EA. 1998. Compounded perturbations yield ecological surprises. *Ecosystems*, 1, 535-545.
- Scheffer M, Carpenter S, Foley JA, Folke C, and Walker B. 2001. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 413, 591-596.
- Senf C and Seidi R. 2021. Mapping the forest disturbance regimes of Europe. *Nature Sustainability*, 4, 63-U102.
- Seidl R, Fernandes PM, and Fonseca TF. 2011. Modelling natural disturbances in forest ecosystems: A review. *Ecological Modelling*, 222, 903-924.
- Buma B. 2015. Disturbance interactions: Characterization, prediction, and the potential for cascading effects. *Ecosphere*, 6, 1-15.
- Dale VH, Joyce LA, McNulty S, Neilson RP, Ayres MP, Flannigan MD, Hanson PJ, Irland LC, Lugo AE, Peterson CJ, Simberloff D, Swanson FJ, Stocks BJ, and Wotton BM. 2001. Climate change and forest disturbances. *Bioscience*, 51, 723.
- Dobbertin M. 2002. Influence of stand structure and site factors on wind damage comparing the storms. *Snow Landscape Research*, 77, 187-205.
- Franklin JF, Lindenmayer D, MacMahon JA, Mckee A, Magnuson J, Perry DA, Waide R, and Foster D. 2000. Threads of continuity. *Conservation Science in Practice*, 1, 8-16.
- Franklin JF, Mitchell RJ, and Palik BJ. 2007. *Natural Disturbance and Stand Development Principles for Ecological Forestry*. General Technical Report NRS-19. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research