

גיל ספיר ז"ל

היחידה להנדסת סביבה, מים
וחקלאות, הטכניון – מכון טכנולוגי
לישראל

יוחאי כרמל

היחידה להנדסת סביבה, מים
וחקלאות, הטכניון – מכון טכנולוגי
לישראל

מאמר זה עבר שיפוט עמיתים

ציטוט מומלץ

ספיר ג וכרמל י. 2010. חיזוי
התחדשות צומח אחרי שרפה
ביערות אורן נטועים. *אקולוגיה
וסביבה* 1(3): 14–23.



יערות נפתלי לאחר שרפות במהלך מלחמת לבנון השנייה, קיץ 2006 | צילום: גיל ספיר ז"ל

חיזוי התחדשות צומח אחרי שרפה ביערות אורן נטועים

3 באוקטובר, 2010

גיליון סתיו 2010 / כרך 1(3)

[חזית המחקר](#)

תקציר

קק"ל משקיעה משאבים רבים בשיקום שטחי יער מחטני שנשרפו. עם זאת, יערות רבים מתפתחים לכיוונים שונים מהצפוי. היכולת לחזות נכונה את התפתחות הצומח לאחר שרפת יער מחטני נטוע אמורה לשפר את קבלת ההחלטות לכיווני ממשק מתאימים. עבודה זו בוחנת את הגורמים הקובעים את כיוון התפתחות הצומח אחרי שרפה ובודקת את האפשרות לחזות מהי תצורת הצומח שתפתח בשטח במהלך 15–20 שנה לאחר השרפה בהיעדר התערבות. כדי לממש שתי מטרות אלה בנינו מודל סטטיסטי שבו המשתנה המנובא הוא תצורת הצומח 20 שנה לאחר השרפה, והמשתנים המסבירים הם תכונות היער וסביבתו בעת השרפה. הנתונים למודל נאספו ב-11 יערות שמצאנו בהם מגוון טיפוסי צומח, שונים מאוד בהרכב ובגובה. יער אורנים התחדש רק ב-5 מתוך 11 היערות שנדגמו. יערות שבהם התחדש יער האורן התאפיינו בקרקע רנדזינה בהירה, על מפנים דרומיים ומזרחיים, ובמדרונות מתונים. חורש אלון מצוי התחדש אף הוא ב-5 יערות. שטחים שבהם החורש החליף יער אורנים בעקבות שרפה התאפיינו באדמת טרה רוסה ובמפנים צפוניים. התחדשות שיחים הייתה נפוצה יותר והם נמצאו ב-8 יערות שונים. גורמים נוספים שהשפיעו על התחדשות אורן, חורש או שיחים היו עונת השרפה והמרחק מיערות אורנים שלא נשרפו. התוצאות הראו שכבר בעת השרפה ניתן לקבוע אם בעוד שני עשורים סביר שיתחדש בשטח יער אורנים ללא התערבות קק"ל (המודל חזה היטב את הצומח ב-94% מיחידות הדגימה). ניתן לעשות שימוש מעשי בכלי זה: גם בשטחים שהמודל חזה בהם התחדשות טבעית של האורן, וגם בשטחים שבהם צפויה התחדשות של חורש ים תיכוני – ניתן לחסוך נטיעות יקרות.

מבוא

שרפות רבות פורצות מדי קיץ ביערות הנטועים בישראל, מרביתן שרפות קלות שנגרם בהן נזק מועט לצומח המעוצה. עם זאת, מדי שנה נשרפים כ-8,400 דונם בממוצע של שטחי יער מחטני נטוע וחורש טבעי, שלפי מדיניות קק"ל יש צורך לבצע בהם שיקום צמחי ונופי [14]. קק"ל משקיעה משאבים רבים בשיקום שטחים אלה לאחר השרפות בעלות כוללת של כ-24 מיליון ₪ בשנה [2].

מנהלי השטח מחליטים אם לבצע שיקום פעיל או להימנע מפעולה בהתבסס על ניסיון מצטבר. לאור תוצאות שיקום הייעור לאחר שרפה בעשורים האחרונים מסתבר שגם יערות שעברו שיקום פעיל וגם אלה שנעזבו לאחר שרפה התפתחו לכיוונים שונים מהצפוי, כאשר גם המינים הדומיננטיים וגם קצבי הגידול שונים מהמתוכנן. לדוגמה, בחלקים מהשטח שנשרף בשער הגיא ביולי 1995 גם הטיפול בצמחייה הקיימת וגם נטיעת עצים לא הביאו לשיקום המתוכנן [3]. בעת תכנון השיקום של היער השרוף בשער הגיא התברר כי לא קיימת שיטה לחיזוי ההתחדשות העתידית של הצומח [1].

היכולת לחזות נכונה את התפתחות הצומח לאחר שרפת יער מחטני נטוע אמורה לשפר את קבלת ההחלטות לכיווני ממשק מתאימים. בשטחים שבהם צפויה התחדשות עצמית של היער ניתן יהיה להימנע מפעולות שיקום ולחסוך בכך משאבים רבים. לשם כך יש צורך בידע כמותי על הגורמים המשפיעים על התחדשות הצומח אחרי שרפה בישראל. כיום ליערני קק"ל יש ידע איכותי בלבד. למשל, ידוע שיערות אורן ירושלים על קרקעות רנדזינה בהירה נוטים להתחדש מעצמם אחרי שרפה, בעוד שעל קרקעות טרה רוסה במקרים רבים האורן אינו מתחדש. במקרים אלה הצומח הדומיננטי לאחר השרפה הופך להיות חורש של עצים רחבי עלים, שמקורם בתת-היער שלפני השרפה. לעומת זאת, במקרים אחרים מתחדשים רק מיני שיחים ובני-שיח, וגם שנים רבות אחרי השרפה אין כמעט עצים בשטח. בישראל עסקו מספר מחקרים בהתחדשות האורן אחרי שרפה ותיארו את התהליך בפרוטרוט [8, 18, 19, 20, 21, 22, 23]. מחקרים אלה התמקדו ביער ספציפי, ורובם תיארו את התהליך בשנותיו הראשונות, כך שקשה להסיק מהם מסקנות לגבי ההתחדשות הצפויה באזורים אחרים ולאורך תקופה של 20 שנה.

אזור אגן הים התיכון הוא אחד האזורים המורכבים למחקר אקולוגי [16, 17], ויש קשיים מיוחדים בפיתוח מודלים לחיזוי התנהגות המערכת האקולוגית בו [25]. מחקר שנערך בספרד קובע שעדיין אין מודלים כמותיים טובים המתאימים לאזורים ים תיכוניים [32]. הקשיים הרבים שמעמיד הצומח הים תיכוני כוללים מורכבות פיזיוגנומית, מורכבות התהליכים האקולוגיים המתרחשים בו וחוסר בנתונים כמותיים [32]. בעשור האחרון התפרסמו מספר מחקרים העוסקים בחיזוי דינמיקה של צומח ים תיכוני [6, 26, 27]. מחקרים אלה לא עסקו בהרכבי מינים או חברות צמחים, אלא בתצורות הצומח (בתה עשבונית, בתת-בני-שיח, גריגה [שיחים], חורש ויער מחטני) או בקבוצות תפקודיות (functional groups). בעבודה זו בחרנו להשתמש בצורות החיים לצורך יצירת מודל של התחדשות צומח אחרי שרפה. המודלים של התפתחות צומח ים תיכוני לאחר שרפה עוסקים בטווחי זמן של 3–5 שנים, ואנו מפתחים כאן מודל החזה 15–20 שנה.

מטרות מחקר זה הן: (1) לבחון מה הגורמים הקובעים את כיוון התפתחות הצומח אחרי שרפה, ומה חשיבותם היחסית. (2)

לבנות מודל שיכול לחזות את תצורת הצומח שתתפתח בשטח במהלך 15–20 שנה לאחר השרפה (יער אורן, חורש, גריגה-בתה או עשבונים) לפי נתונים הקיימים בידי היערן כבר בעת השרפה.

הרציונל לניבוי כזה הוא כדלקמן: אם יתברר שניתן לחזות מיד לאחר שרפה ובמידה רבה של מהימנות את תצורת הצומח שתתפתח בשטח בהיעדר התערבות, הרי שניתן לקבל החלטות מושכלות על אופן שיקום היער תוך חיסכון ניכר במשאבי זמן וכסף. כדי לממש שתי מטרות אלה בנינו מודל סטטיסטי שבו המשתנה המנובא הוא תצורת הצומח 20 שנה לאחר השרפה, והמשתנים המסבירים הם תכונות היער וסביבתו בזמן השרפה.

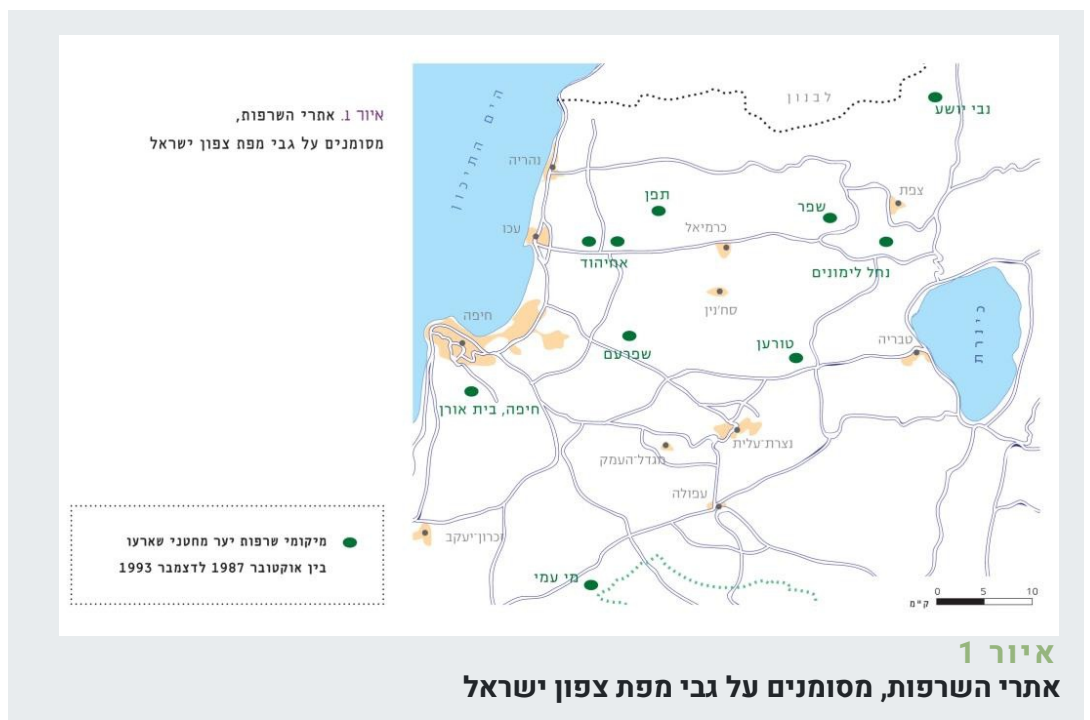
שיטות

כללי

בשנים 2007–2008 דגמנו יערות מחטניים שנשרפו 15–20 שנה קודם לכן. בכל אתר תיעדנו באופן מפורט משתנים אקולוגיים שניתן היה לתעד כבר בעת השרפה (סוג הקרקע, הטופוגרפיה, מרחק מיערות שכנים וכו') וכן מידע מפורט על מצב הצומח כיום. הנתונים שאספנו שימשו לבניית מודלים סטטיסטיים שבהם המשתנה המנובא הוא מצב הצומח כיום, והמשתנים המסבירים הם תנאי השטח לפני השרפה.

איסוף נתוני השרפות

בחרנו 11 יערות שנשרפו בתקופה שבין אוקטובר 1987 לדצמבר 1993 (איור 1). כל השרפות היו של יערות מחטניים ובעוצמה חזקה (שרפות צמרות), שטח השרפה היה גדול מ-10 דונם, ובכולן היער לא ניטע מחדש לאחר השרפה (טבלה 1). באזורים שנשרפו איתרנו 28 תאי שטח שונים זה מזה בסוג הקרקע, בכיוון המפנה ובאופי המדרון. בכל תא שטח דגמנו יחידות מעגליות ששטחן 30 מ"ר (רדיוס 3.1 מ'). בממוצע, דגמנו חמש יחידות דגימה בכל תא שטח, ובסך הכול 138 יחידות דגימה. יחידות הדגימה באותו תא שטח התאפיינו ברוב המקרים באותו סוג קרקע, אך היו שונות זו מזו במשתני הטופוגרפיה ובכיסוי של תצורות הצומח השונות בעת הדגימה.



טבלה 1. יערות האורן הנתונים שנשרפו ושימשו לאיסוף הנתונים

שם יער	שנת השרפה	עונת השרפה	שנת נטיעה	שטח שרוף (דונם)	מספר תאי שטח	מספר יחידות הדגימה
אחיהוד א'	1989	סתיו	1971	17	1	5
אחיהוד ב'	1991	אביב	1952	10	1	5
בירה	1990	קיץ	1975	20	2	9
טורען	1990	סתיו	1969	65	2	11
מי עמי	1992	סתיו	1972	10	2	7
נבי יושע	1989	סתיו	1958	20	2	13
נחל לימונים	1990	אביב	1967	20	2	10
פארק הכרמל	1989	קיץ	טבעי	5,300	4	22
שפר	1993	קיץ	1950	500	8	39
שכרעם	1990	סתיו	1988	12	3	11
תבן	1990	סתיו	1977	10	1	5

טבלה 1

יערות האורן הנתונים שנשרפו ושימשו לאיסוף הנתונים

בכל יחידת דגימה תיעדנו את מצב השטח: הטופוגרפיה, המסלע, הקרקע והמרקח ליערות שכנים. מידע נוסף על תנאי השטח, כולל היסטוריית השרפות, גיל היער בעת השרפה ועונת השרפה, הפקנו מנתוני קק"ל. במקביל, תיעדנו בכל יחידה את מצב הצומח כיום. לשם כך הגדרנו חמש תצורות צומח: יער עצי אורן, חורש ים תיכוני, גריגה (שיחים), בתת בני-שיח, ובתה עשבונית. בכל יחידת דגימה הערכנו את אחוזי הכיסוי של כל אחת מחמש התצורות.

זודלים סטטיסטיים לחיזוי הצומח לאחר שרפה

מטרת המודל היא לחזות את תצורת הצומח שתשלוט בשטח כ-20 שנה לאחר השרפה על סמך נתונים הידועים כבר בזמן השרפה עצמה. בחרנו ברגרסיה לוגיסטית [1] שהיא מודל סטטיסטי שבו המשתנה התלוי הוא קטגוריאל. המשתנה התלוי הוא מצב הצומח העכשווי, 15–20 שנה לאחר השרפה. סיווגנו את מצב הצומח העכשווי בכל תא שטח לפי תצורת הצומח הדומיננטית באותו תא שטח, לאחד מחמישה מצבי צומח: יער מחטני, חורש רחב עלים, גריגה (שיחים), בתה (בני-שיח), ובתה עשבונית. בנינו ארבעה מודלים של רגרסיה לוגיסטית, לחיזוי ההסתברות להתבססות יער, חורש, גריגה ובתה בהתאמה. לא נבנה מודל לצומח עשבוני משום שמצאנו רק שני תאי שטח, שניהם באותו יער (נבי יושע), שבהם התצורה הדומיננטית 20 שנה לאחר שרפה הייתה צומח עשבוני.

המשתנים המסבירים

אחת ממטרות המודל היא לתמוך בהחלטה על טיפול בשטח מיד לאחר השרפה. על כן הכנסנו למודל החיזוי רק משתנים מסבירים הניתנים למדידה מיד לאחר השרפה. בחרנו משתנים העשויים להשפיע על הסיכוי להתבססות כל אחד מטיפוסי הצומח:

- סוג הקרקע – משפיע על הצומח, וצפוי שישפיע על אופן התחדשות הצומח לאחר שרפה. הקרקעות באזורי המחקר סווגו לשלושה סוגים עיקריים: טרה רוסה, רנדזינה כהה ורנדזינה בהירה. סוג הסלע לא הוכנס למודל מאחר שהוא נמצא במתאם חזק עם סוג הקרקע.
- טופוגרפיה – משפיעה על כמות הקרינה ולכן על משק המים של הצמח. בדקנו מפנה (הערכה בעזרת מצפן) ושיפוע המדרון בתא הדגימה (הערכת עין). המפנה הוא משתנה מעגלי (0° – 360°) ועל כן חישבנו את היטלי המפנה על הציר צפון–דרום ועל הציר מזרח–מערב, כדי ליצור שני משתנים למידת הצפוניות (מפנה, ציר צפון–דרום) ולמידת המזרחיות (מפנה, ציר מזרח–מערב), בהתאמה.
- עונת השרפה – משפיעה על מועד ההתחדשות מזרעים ועל שפע ההתחדשות. הגדרנו משתנה קטגוריאל ובו שלוש קטגוריות: אביב (מרץ–מאי), לאחר פיזור זרעי חד-שנתיים ולפני פיזור זרעים של עצי האורן; קיץ (יוני–אוגוסט), לאחר סילוק חלק מזרעי חד-שנתיים, ותוך כדי פיזור זרעי עצי האורן; סתיו (ספטמבר–אוקטובר), לאחר

- סילוק רוב זרעי החד-שנתיים וחלק מזרעי עצי האורן ובעת פיזור זרעי עצי החורש הטבעי. גיל היער בעת השרפה – משקף את פוטנציאל הפצת הזרעים של עצי היער מיד לאחר שרפה [15,19].

המודלים והערכות

לצורך הניתוח השתמשנו ברגרסיה לוגיסטית בצעדים (stepwise logistic regression), שבה בכל צעד מתווסף למודל משתנה נוסף מבין המשתנים המסבירים הפוטנציאליים [11]. התהליך נפסק כאשר הוספת משתנים מסבירים נוספים אינה משנה את הפרמטרים במודל באופן מובהק. המשתנים הקטגוריאליים תורגמו לצורך הרגרסיה למשתני דמה (dummy variables) בינאריים, וכל המשתנים הרציפים עברו התמרת ארקסינוס שייצבה את השונות בשגיאה [11].

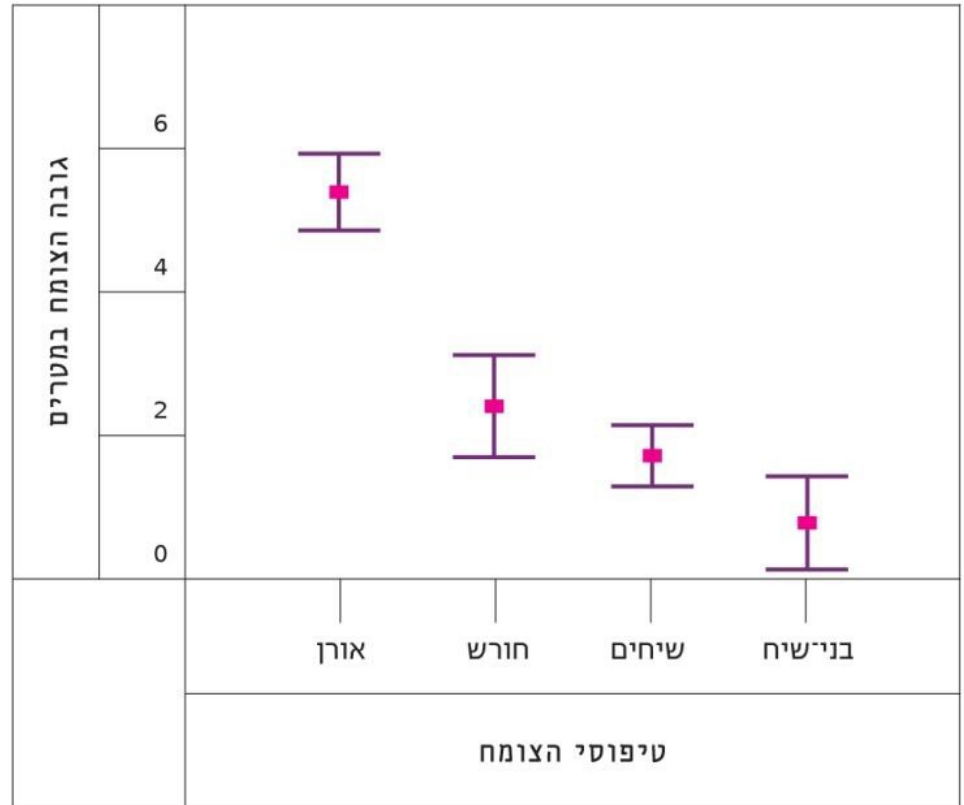
המובהקות הסטטיסטית של כל מודל נבדקה ב-Hosmer & Lemeshow goodness of fit. ברגרסיה לוגיסטית המשתנה החזוי הוא קטגוריאלי, ועל כן אין משמעות לשונות המוסברת. קיימים מדדים חלופיים ($pseudo-R^2$), ומתוכם בחרנו במדד [11] Nagelkerke, המקבל ערכים בין 0 לבין 1.

כדי לבדוק את הדיוק הכולל של מערכת המודלים, ביצענו הפעלה של המודלים על נתוני המקור, לחיזוי תצורת הצומח בעוד 20 שנה על פי מצב הצומח בעת השרפה. המודלים הופעלו בסדר קבוע: (1) מודל האורן שימש לחיזוי האתרים שצפוי בהם יער אורן, (2) מודל החורש לחיזוי התאים שצפוי בהם חורש, (3) מודל גריגה שימש לחיזוי התאים שצפויה בהם דומיננטיות של שיחים, (4) מודל בתה לחיזוי התאים שיהיו בשליטת בתה של בני-שיח. בהנחה שחיזוי מספר קטגוריות קטן יותר יגדיל את הדיוק, בדקנו גם את הדיוק הכולל של חיזוי מצב הצומח כאשר מסווגים אותו לשלוש קטגוריות בלבד – (1) מחטניים, (2) חורש, (3) גריגה ובתה. בכל המודלים, יחידת דגימה סווגה לתצורת צומח מסוימת אם ההסתברות לכך הייתה גבוהה מ-50%. בדיקת הדיוק של המודלים נעשת על-ידי בדיקת מספר ההתאמות בין מצב הצומח בחיזוי המודלים לבין מצב הצומח בנתוני המקור. הדיוק הכולל של המודלים הוא סכום ההצלחות בחיזוי תצורת הצומח הרלוונטית.

תוצאות

ב-11 היערות שנדגמו מצאנו מגוון טיפוסי צומח, שונים מאוד בהרכבם ובגובהם (איור 2, טבלה 2). דומיננטיות של גריגה (שיחים) הייתה הנפוצה ביותר (14 תאי שטח ב-8 יערות שונים), ואחריה התחדשות אורן (7 תאי שטח ב-5 יערות שונים), עצי חורש (5 תאי שטח ב-5 יערות שונים), בתת בני-שיח (5 תאי שטח ב-3 יערות שונים) ובתה עשבונית (שני תאי שטח ביער אחד).

איור 2. גובה ממוצע ($\pm$ שגיאת התקן SE) של טיפוסי הצומח השונים כ-20 שנה לאחר השרפה



איור 2
 גובה ממוצע ($\pm$ שגיאת התקן SE) של טיפוסי הצומח השונים כ-20 שנה לאחר השרפה

טבלה 2. שכיחות טיפוסית הצומח ביערות השונים 20-15 שנה אחרי השרפה (מספר יחידות הדגימה שבהן נמצא כל טיפוס צומח)

סך הכול	בתה עשבונית	בתה בני־שיח	גריגה (שיחים)	חורש ים תיכוני	יער אורן	
5				5		אחיזה א'
5					5	אחיזה ב'
17			5		12	בית אורן
5				5		חיפה
11			6	5		טורען
8			3	5		מי עמי
13	12		1			נבי יושע
10			5		5	נחל לימונים
39		5	24	5	5	שפר
11		4	7			שפרעם
5		3	2			תפן
138	12	12	53	25	36	סך כל יחידות הדגימה
32	2	3	15	5	7	סך כל תאי השטח
	1	3	8	5	4	סך כל היערות

טבלה 2
שכיחות טיפוסית הצומח ביערות השונים 20-15 שנה אחרי השרפה
(מספר יחידות הדגימה שבהן נמצא כל טיפוס צומח)

יער אורנים

אורנים התחדשו רק בכשליש מהיערות שנבדקו, ורק ברבע מתאי השטח שנבדקו. הגובה הממוצע של עצי האורן בעת הדגימה היה 5.5 מ' (איור 2). השטחים שיער האורן התחדש בהם התאפיינו בקרקע רנדזינה בהירה, על מפנים דרומיים ומזרחיים ובמדרונות מתונים. שרפה בקיץ הגדילה את הסיכוי להתחדשות אורנים, בעוד ששרפה באביב הקטינה סיכוי זה (טבלה 3). המודל הסטטיסטי שבחן את התחדשות יער האורן היה הטוב מבין המודלים, וחזה נכונה את התחדשות האורנים ב-34 מתוך 36 יחידות דגימה.

טבלה 3. חוצאות המודלים הסטטיסטיים (גודל מדגם בסוגריים)

ההשפעה על המשתנה החזוי מסומנת ב + / - ומתארת את אופי ההשפעה של המשתנה על הסיכוי לקבל תצורת צומח מסוימת. לדוגמה, סימן - ליד המשתנה 'מדרון' במודל יער מחטני פירושו שככל שהמדרון תלול יותר, ההסתברות לקבל יער מחטני קטנה יותר. סימן + ליד מפנה (ציר מזרח-מערב) פירושו שככל שהמפנה מזרחי יותר, הסיכוי ליער מחטני גבוה יותר.

המודל וגודל המדגם	משתנים במודל	השפעה על המשתנה חזוי	מדדים לטיב המודל	
			מדד Nagelkerke לשונות המוסברת	פרופורציית יחידות הדגימה מהקטגוריה הרלוונטית שסווגו נכון במודל
יער מחטני (36)	סוג קרקע (רנדזינה בחירה) מפנה (ציר צפון-דרום) מפנה (ציר מזרח-מערב) מדרון עונת השרפה (אביב) עונת השרפה (קיץ)	+ - + - - +	0.97	0.95
חורש (25)	גיל היער בשרפה מפנה (צפון-דרום) סוג קרקע (טרה רוסה) עונת השרפה (אביב)	- - + +	0.77	0.76
שיחים (53)	גיל היער בשרפה עונת השרפה (סתיו) מפנה (צפון-דרום) מדרון סוג קרקע (טרה רוסה) עונת השרפה (אביב)	+ - + + + -	0.60	0.72
בני-שיח (12)	גיל היער בשרפה מפנה (מזרח-מערב) מדרון	- + -	0.50	0.33

טבלה 3

תוצאות המודלים הסטטיסטיים (גודל מדגם בסוגריים)

ההשפעה על המשתנה החזוי מסומנת ב + / - ומתארת את אופי ההשפעה של המשתנה על הסיכוי לקבל תצורת צומח מסוימת. לדוגמה, סימן - ליד המשתנה 'מדרון' במודל יער מחטני פירושו שככל שהמדרון תלול יותר, ההסתברות לקבל יער מחטני קטנה יותר. סימן + ליד מפנה (ציר מזרח-מערב) פירושו שככל שהמפנה מזרחי יותר, הסיכוי ליער מחטני גבוה יותר.

חורש ים תיכוני

חורש החליף את יער האורנים בעקבות שרפה בשטחים שכללו אדמת טרה רוסה על מפנים צפוניים. הגובה הממוצע של עצי החורש 15–20 שנה לאחר השרפה היה 2.5 מ' בלבד. הסיכוי להתחדשות חורש עלה כאשר היער נשרף בגיל צעיר ובעונת האביב, והיה מצוי במרחק רב יחסית מיערות אורנים שכנים שלא נשרפו (טבלה 3). המודל חזה היטב את התחדשות החורש ב-19 מתוך 25 יחידות הדגימה שבהן נמצא החורש כתצורה דומיננטית.

גריגה

גריגה כתצורה דומיננטית נמצאה כמעט בכל היערות שנשרפו. אזורים שבהם היה שלטון של שיחים התאפיינו בקרקע טרה רוסה או חוואר, במדרונות תלולים ועל מפנים דרומיים. הסיכוי לשליטת שיחים עלה בשרפות קיץ (טבלה 3). המודל חזה נכון כ-70% מהיחידות ששיחים התחדשו בהם.

בתה

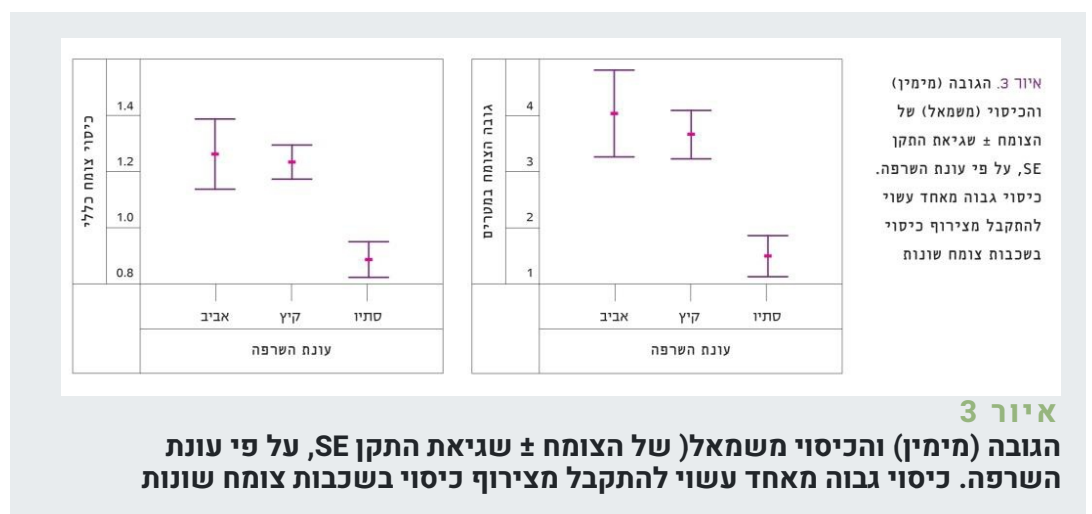
תצורה שלטת של בתה נמצאה בארבעה יערות שונים. לפי המודל הסטטיסטי, תצורה זו התקבלה בדרך כלל ביערות שנשרפו בגיל צעיר, על אדמת טרה רוסה ובמדרונות מתונים. המודל היה מובהק אך השונות המוסברת שלו הייתה נמוכה. המודל הסטטיסטי של בני-שיח היה חלש מהמודלים האחרים, והצליח לחזות רק שליש מיחידות הדגימה שבשליטת בני-שיח.

צומח עשבוני

צורת צומח זו, ללא צומח מעוצה בשטח, נמצאה רק ביער נבי יושע, בשני תאי שטח בלבד. על כן לא נבנה מודל לקבוצה זו.

עונה

לעונת השרפה הייתה השפעה חזקה על כיסוי הצומח ועל גובהו (איור 3): בשטחים שנשרפו בסתיו הצומח היה באופן מובהק נמוך יותר ודליל יותר מאשר בשטחים שנשרפו בקיץ ובאביב. כאשר בדקנו כל תצורת צומח בנפרד, תוצאות אלה היו מובהקות לגבי אורנים, חורש ושיחים, אך לא לגבי בני-שיח.



ביצועי המודלים

המודלים לתצורות הצומח השונות נבדלים זה מזה ביכולת החיזוי שלהם, בין 97% לאורנים לבין 33% לבני-שיח, אך כל המודלים היו מובהקים ($p < 0.05$). צירוף של ארבעת המודלים בטור אֶפְשֶׁר לסווג את הצומח לחמש תצורות: יער אורנים, חורש, שיחים, בני-שיח ועשבוניים. צומח עשבוני הוגדר כתצורה הדומיננטית בתא שטח שבו ההסתברות לקבל כל אחת מתצורות הצומח האחרות הייתה קטנה מ-50%. הדיוק הכולל בחיזוי חמש תצורות הצומח הללו היה 70%, ומרבית השגיאות היו בחיזוי שיחים ובני-שיח. בהמשך קיבצנו את השיחים ובני-השיח לתצורה אחת בניסיון להגדיל את הדיוק הכולל של המודל, וזאת על חשבון מידת ההפרדה בין טיפוס צומח שונים. הדיוק הכולל של מערכת המודלים החוזה השתייכות לאחת משלוש תצורות צומח – יער אורנים, חורש, שיחים ובני-שיח – היה 94%.





ינקום יער ביריה השרוף לאחר מלחמת לבנון השנייה | צילום: חיים אזולאי. באדיבות ארכיון הצילומים של קק"ל

דיון

רוב המחקרים על התחדשות צומח אחרי שרפה ביערות אורן ירושלים ואורן ברוטיה עסקו ביערות טבעיים, בשנים הראשונות לאחר השרפה, ובדרך כלל עסקו ביער בודד [4, 8, 9, 10, 17, 18, 21, 22, 23, 28, 29, 30]. רק מחקרים בודדים בדקו יערות אורן יותר מעשור לאחר השרפה [13, 20]. המחקר הנוכחי בדק את תוצאת ההתחדשות הטבעית של הצומח, ללא התערבות, ביערות נטע-אדם של אורן ירושלים 15–20 שנה לאחר השרפה, במספר רב של יערות במקביל. ממצאי המחקר מראים שעצי האורן

מתחדשים רק בחלק קטן מהיערות שנשרפו. נמצא שהתהליך הוא במידה רבה דטרמיניסטי, כלומר ניתן במהימנות רבה לחזות מראש אם האורנים יתחדשו או לא. הגורמים העיקריים הקובעים אם תתרחש התחדשות טבעית של אורנים הם הקרקע, הטופוגרפיה ועונת השרפה. הממצא ששרפה בקיץ מגדילה את הסיכוי להתחדשות אורן בהשוואה לשרפה באביב עשוי להיות מוסבר בכך שזרעי האורן מופצים בעיקר בקיץ. גם אם התרחשה השרפה מעט לפני הפצת הזרעים, סביר שהיא גרמה להפצה מסיבית של הזרעים מיד לאחריה. גם העובדה שאורנים התחדשו בעיקר על קרקע רנדזינה אך לא על קרקע טרה רוסה, בעוד שחורש ים תיכוני התחדש על קרקע טרה רוסה אך לא על רנדזינה, תואמת ידע יערי קודם. הממצא שהתחדשות הצומח לאחר שרפות בסתיו היא מועטה מאד בהשוואה לשרפות באביב ובקיץ היה חדש לנו, ואין לנו הסבר ברור לכך. מחקרים קודמים הראו שקיים יחס חיובי בין גיל היער להתחדשות יערות אורן. במחקר הנוכחי לא מצאנו קשר כזה, אולי משום שכמעט כל היערות שנשרפו היו בגיל (בני 15–80 שנים), וזמינות הזרעים לא הייתה גורם מגביל.

שני מחקרים על התחדשות יער טבעי של אורן ירושלים לאחר שרפה בקנה מידה מרחבי גדול נערכו בספרד [24] (9–10 שנים לאחר שרפה) וביוון [31] (8 שנים לאחר שרפה). כמו במחקר הנוכחי, גם שני המחקרים הללו מצאו שונות גדולה בהתחדשות האורנים מאתר לאתר, ובמקרים רבים התחדשות האורן הייתה מועטה ביותר. בשלושת המחקרים נמצא כי גם כיוון המפנה וגם תלילות המדרון היו בין הגורמים המרכזיים שהשפיעו על התחדשות האורן, אולם פרט לשני משתני טופוגרפיה אלה לא נמצאו גורמים משותפים נוספים. ביוון לא נבדקו משתנים משפיעים נוספים. בספרד, גורמים משפיעים נוספים היו צפיפות היער וגובהו לפני השרפה, כמויות ענפים בשטח לאחר השרפה, ונוכחות טרסות; בישראל גורמים נוספים היו סוג הקרקע ועונת השרפה.

סביר להניח שבמשך הזמן צפויה התפתחות של עצי חורש גם ברוב האזורים הנמצאים כיום בשליטת שיחים. אינדיקציה לכך מצאנו במודל הסטטיסטי שהראה שחורש התפתח בדרך כלל על מפנים צפוניים, ואילו שיחים על מפנים דרומיים. ידוע שהתהליך התחדשות החורש מהיר יותר על מפנים צפוניים, אך מתקיים גם על מפנים דרומיים [12,5]. דומיננטיות של בני-שיח נמצאה רק בשלושה תאי שטח, בשלושה יערות שונים. לא מצאנו גורמי סביבה משותפים לשלושת האתרים הללו, מה שהשתקף גם במודל הסטטיסטי של בני-שיח, שסיפק יכולת חיזוי נמוכה מאד. עם זאת, צירוף של שיחים ובני-שיח לקבוצה אחת העלה מאד את יכולת החיזוי של מערכת המודלים.

תוצאות המחקר עשויות לשמש בסיס לקבלת החלטות על טיפולי נטיעות אחרי שרפה. מערכת המודלים שנבנתה במסגרת המחקר מראה שכבר בעת השרפה ניתן לקבוע ברמת דיוק גבוהה ביותר אם בעוד שני עשורים צפויה התחדשות יער אורנים בשטח ללא התערבות קק"ל. ניתן לעשות שימוש מעשי בכלי זה: בשטחים שבהם המודל חוזה התחדשות טבעית של האורן ניתן לחסוך נטיעות יקרות.

לגבי אזורים שבהם לא צפויה התחדשות טבעית של אורנים לאחר השרפה - ניתן לחזות אם תוך 20 שנה נוכל למצוא חורש בשטח, או לחילופין נמצא בו שיחים / בני-שיח. ההחלטות על התערבות בשטח במקרים כאלה אינן פשוטות. בהנחה שצפויה התחדשות חורש באזור, או לחילופין, בהנחה שהשטח צפוי להתכסות במיני שיחים ובני-שיח למשך עשרות שנים - נשאלת השאלה האם ברצוננו להתערב בתהליך הטבעי, ולהטות את ההתחדשות לכיוון של יער מחטני בעזרת נטיעות? החלטה כזו צריכה להתקבל על בסיס שיקולים אקולוגיים, אך תוך התחשבות גם בשיקולים אחרים. בהקשר זה ראוי לציין שעל פי ניסיון העבר בשיקום שרפת שער הגיא, הטיפול בצמחייה הקיימת ונטיעת עצים לא הביאו לשיקום המתוכנן [3]. גם אזורים שניטעו באורנים לא התפתחו מהר יותר מאזורים ללא נטיעות, ולעתים התכסו בשיחים או בעצי חורש [3]. המודל פותח על סמך נתונים מהגליל ומהכרמל, אך אנו סבורים שהתנהגות הצומח אחרי שרפה באזור הרי יהודה אינה שונה מאוד, ועל כן ניתן להשתמש בו גם באזור זה.

לסיכום, מדיניות הייעור מורכבת משיקולים שאינם מדעיים בלבד. עם זאת, עבודה זו מראה שהתחדשות האורנים אחרי שרפה היא דטרמיניסטית וניתנת לחיזוי בעזרת מספר קטן של משתנים, ועל כן ניתן להשתמש בכלים מדעיים כדי לשפר קבלת החלטות ספציפיות על פעולות שיקום אחרי שרפה.

תודות

תודות לקק"ל על התמיכה הנדיבה במחקר זה, ועל שהעמידה לרשותנו את מאגר המידע היערי שלה, ובו נתוני השרפות. עמית דולב, עדי נעלי, ישראל טאובר, גידי נאמן, ומבקר אנונימי העירו הערות חשובות על גרסה קודמת של מאמר זה.

'זכרו של גיל ספיר, מאת ישראל טאובר, קק"ל

במשך שנים ארוכות היה גיל ספיר מעמודי התווך של הייעור בישראל. הוא הגיע לקק"ל לאחר סיום התואר השני שבמהלכו עשה עבודת מחקר בתחום החורש הטבעי שרבים משתמשים בתוצאותיה עד היום שנים רבות לאחר סיומה. הוא שימש במגוון תפקידים בקק"ל - יערן, מנהל אזור גליל תחתון, מנהל

מדור הסקר, מנהל המחלקה למשאבי יער באגף הייעור ומנהל מחלקת יער במרחב צפון. הוא אחראי לכמה מהפרויקטים המשמעותיים ביותר בייעור בישראל וביניהם פיתוח מערכת היערנות, מיפוי היער באמצעות מערכת מידע גאוגרפי, הקמת מערך הדרכה ליערנים, קליטתם ושילובם של יערנים עולים ממדינות חבר העמים בעבודת הייעור, בניית אוסף הנחיות מקצועיות לעבודות ייעור וקידום מחקרים בתחום הייעור והסביבה. כאדם, גיל היה משכמו ומעלה באהבת האדם שבו, באחוזה שלו, ביושר האישי כלפי עצמו וכלפי אחרים וברוח הטובה שהשרה על כל הסובבים אותו. לצד הסנטדרטים המקצועיים הגבוהים שהכתיב כמנהל, היה אהוב ומוערך על הכול כחבר. לאחר שפרש מעבודתו בקק"ל החל מחקר דוקטורט בטכניון, אך לפני שנתיים נפטר במפתיע ממחלה קשה. יהי זכרו ברוך.

מקורות

1. אהרונסון ש. 1997. שיקום היער השרוף בהרי יהודה – טיוטה. ירושלים: קרן קיימת לישראל, רשות הטבע והגנים, המשרד לאיכות הסביבה.
2. ספיר ג. 1999. עלויות נטיעה ויער צעיר. קרית חיים: קרן קיימת לישראל, אגף הייעור.
3. צורף ח. 2003. תכנית שיקום היער השרוף בהרי יהודה – היבטים תכנוניים ולקחים (עבודת קורס). ירושלים: האוניברסיטה העברית בירושלים.
4. Broncano M, Retana J, and Rodrigo A. 2005. Predicting the recovery of *Pinus halepensis* and *Quercus ilex* forests after a large wildfire in northeastern Spain. *Plant Ecology* **180**: 47-56
5. Carmel Y and Kadmon R. 1999. Effects of grazing and topography on long-term vegetation changes in a Mediter-ranean ecosystem in Israel. *Plant Ecology* **145**: 243-254
6. Carmel Y, Kadmon R, and Nirel R. 2001. Spatiotemporal predictive models of Mediterranean vegetation dynamics. *Ecological Applications* **11**: 268-280
7. De las Heras J, Mart nez-Snchez J, Gonz lez-Ochoa A, Ferrandis P, and Herranz J. 2002. Establishment of *Pinus halepensis* Mill. saplings following fire: effects of competition with shrub species. *Acta Oecologica* **23**: 91-97
8. Eshel A, Henig-Sever N, and Ne'eman G. 2000. Spatial variation of seedling distribution in an east Mediterranean pine woodland at the beginning of post-fire succession. *Plant Ecology* **148**: 175-182
9. Eugenio M and Lloret F. 2004. Fire recurrence effects on the structure and composition of Mediterranean *Pinus halepensis* communities in Catalonia (northeast Iberian Peninsula). *Ecoscience* **11**: 455-462
10. Gonzalez-Ochoa A, Lopez-Serrano F, and de las Heras J. 2004. Does post-fire forest management increase tree growth and cone production in *Pinus halepensis*? *Forest Ecology and Management* **188**: 235-247
11. Hosmer D and Lemeshow S. 2000. Applied logistic regression: Wiley-Interscience
12. Kadmon R and Harari-Kremer R. 1999. Landscape-scale regeneration dynamics of disturbed Mediterranean maquis. *Journal of Vegetation Science* **10**: 383-402

- Kazanis D and Arianoutsou M. 2004. Long-term post-fire vegetation dynamics in *Pinus halepensis* forests of Central Greece: A functional group approach. *Plant Ecology* **171**: 101-121 .13
- KKL. 2005. Forest Fires Database, Keren Kayemet Le'Israel, Forest Information Unit, .Forest Department .14
- Nathan R, Safriel U, Noy-Meir I, and Schiller G. 1999. Seed release without fire in *Pinus halepensis*, a Mediterranean serotinous wind-dispersed tree. *Journal of Ecology* **87**: 659-669 .15
- Naveh Z. 1975. The evolutionary significance of fire in the Mediterranean region. *Plant Ecology* **29**: 199-208 .16
- Naveh Z. 1990. Fire in the Mediterranean: a landscape ecological perspective. In: Goldammer JG (Ed). *Fire in Ecosystem Dynamics. Mediterranean and Northern Perspectives*. The Hague: SPB Academic Publishing .17
- Ne'eman G. 1997. Regeneration of natural pine forest-review of work done after the 1989 fire in Mount Carmel, Israel. *International Journal of Wildland Fire* **7**: 295-306 .18
- Ne'eman G, Goubitz S, and Nathan R. 2004. Reproductive traits of *Pinus halepensis* in the light of fire – a critical review. *Plant Ecology* **171**: 69-79 .19
- Ne'eman G and Izhaki I. 1998. Stability of pre-and post-fire spatial structure of pine trees in Aleppo pine forest. *Ecography* **21**: 535-542 .20
- Ne'eman G and Izhaki I. 1999. The effect of stand age and microhabitat on soil seed banks in Mediterranean Aleppo pine forests after fire. *Plant Ecology* **144**: 115-125 .21
- Ne'eman G, Lahav H, and Izhaki I. 1992. Spatial pattern of seedlings 1 year after fire in a Mediterranean pine forest. *Oecologia* **91**: 365-370 .22
- Ne'eman G, Lahav H, and Izhaki I. 1995. Recovery of vegetation in a natural East Mediterranean pine forest on Mount Carmel, Israel as affected by management strategies. *Forest Ecology and Management* **75**: 17-26 .23
- Pausas J, Ribeiro E, and Vallejo R. 2004. Post-fire regeneration variability of *Pinus halepensis* in the eastern Iberian Peninsula. *Forest Ecology and Management* **203**: 251-259 .24
- Pausas JG. 1999. Response of plant functional types to changes in the fire regime in Mediterranean ecosystems. A simulation approach. *Journal of Vegetation Science* **10**: 717-723 .25
- Pausas JG. 2003. The effect of landscape pattern on Mediterranean vegetation dynamics: A modelling approach using functional types. *Journal of Vegetation Science* **14**: 365-374 .26
- Pausas JG and Lavorel S. 2003. A hierarchical deductive approach for functional types in disturbed ecosystems. *Journal of Vegetation Science* **14**: 409-416 .27
- Schiller G, Ne'eman G, and Korol L. 1997. Post-fire vegetation dynamics in a native .28

- Pinus halepensis* Forest on Mt. Carmel, Israel. *Israel Journal of Plant Sciences* **45**: 297-308
- Spanos I, Daskalakou E, and Thanos C. 2000. Postfire, natural regeneration of *Pinus brutia* forests in Thasos island, Greece. *Acta Oecologica* **21**: 13-20 .29
- Thanos C, Daskalakou E, and Nikolaidou S. 1996. Early post-fire regeneration of a *Pinus halepensis* forest on Mount Parnis, Greece. *Journal of Vegetation Science* **7**: 273-280 .30
- Tsitsoni T. 1997. Conditions determining natural regeneration after wildfires in the *Pinus halepensis* (Miller, 1768) forests of Kassandra Peninsula (North Greece). *Forest Ecology and Management* **92**: 199-208 .31
- Zavala MA and Burkey TV. 1997. Application of ecological models to landscape planning: the case of the Mediterranean basin. *Landscape and Urban Planning* **38**: 213-227 .32