

בישראל בתגובה לתקופת יובש ממושכת

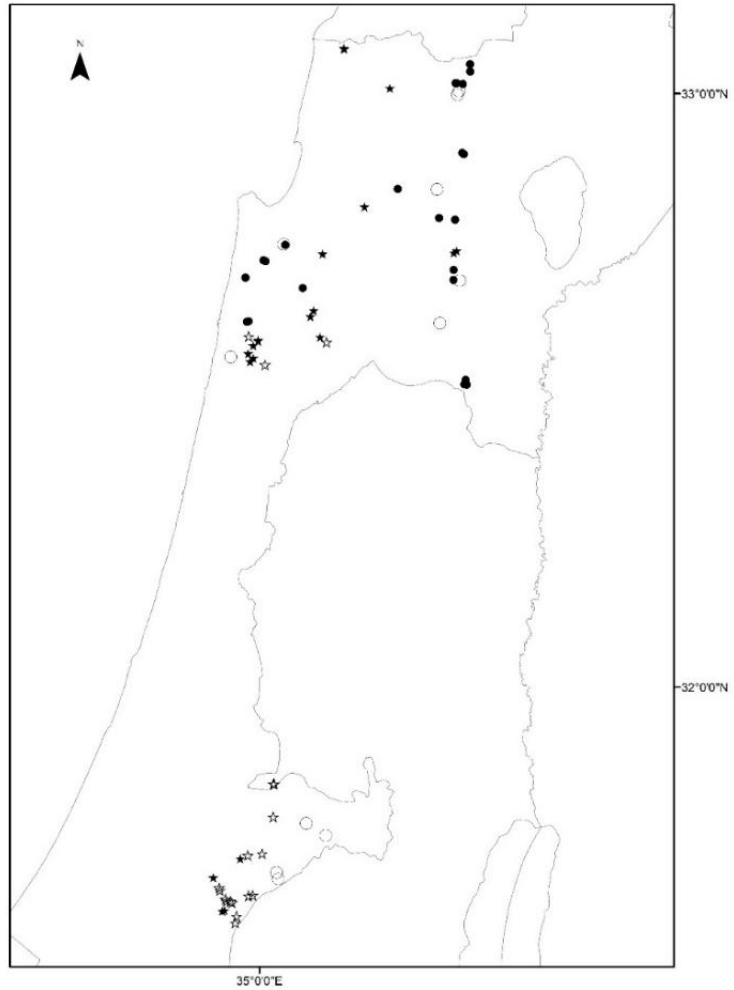
נספח 1. פירוט השיטותאתרי המחקר ואיסוף נתוני הצומח והסביבה

ערכנו את הסקרים בשתי נקודות זמן בהפרש של עשור – 2008/9, ו-2018/9. הסקר הראשון כלל 94 אתרים בכלל האזור הים תיכוני בישראל, מתוכם בסקר השני ניפינו 23 אתרים שבהם ארע שינוי בכיסוי הקרקע כתוצאה מפעילות אנושית ישירה או עקיפה – שריפה, המרת השטח לשימוש האדם (חקלאות, בנייה ופיתוח), או פעילות יזומה של עיצוב נוף הצומח על-ידי מנהלי השטח (רט"ג או קק"ל) מלבד ממשק רעייה – כריתת אורנים, טיפול באזורי חיץ ודילול צומח יזום.

עבור כל אחד מ-71 האתרים שסקרנו ב-2018/9 קבענו על-פי ממצאים בשטח האם האתר ללא רעייה או עם פעילות רעייה נמוכה או אם האתר עם פעילות רעייה בינונית או חזקה של בקר וצאן. קבענו את סוג הקרקע בכל אתר טרה רוסה על סלע קשה, גיר ודולומיט או רנדזינה על סלע רך באתרים של סלע קירטון או חוואר (הכוללים רנדזינה כהה או בהירה). אופן החלוקה לאתרים מפורט ב Sheffer et al. 2014^[3].

בסקר נמצאו 10 אתרים עם קרקע טרה-רוסה וללא רעיה ו-22 עם רעיה, ו-18 אתרים עם קרקע רנדזינה ללא רעיה ו-20 עם רעיה. איור 1 מציג את מפת האתרים. ממוצע המשקעים גבוה יותר באופן מובהק באתרים עם קרקע טרה-רוסה (ממוצע = 592 מ"מ לשנה) בהשוואה לאתרים עם קרקע רנדזינה (ממוצע 510 מ"מ לשנה) ($t=2.93$, $Sig.=0.005$). עם זאת, אופן הניתוח בהשוואת מודלים איפשר להבחין בין האפקט של משתני המשקעים וסוג הקרקע. ואמנם, מתוך המודלים המיטביים, רק עבור מין אחד, אשחר (ראו להלן), מצאנו מודלים מיטביים המשלבים השפעה של סוג הקרקע וכמות משקעים על השינוי בכיסוי.

בישראל בתגובה לתקופת יובש ממושכת



איור נ1. הפיזור המרחבי של 71 אתרי הסקר

סוג הקרקע ומשטר הרעייה מסומנים: עיגול – טרה רוסה, כוכב – רנדזינה. ריק – ללא רעיה או רעייה חלשה. מלא – רעייה בינונית עד חזקה.

בכל אתר סקרנו את כיסוי הצומח המעוצה לאורך 5 חתכים באורך 16 מ' המצויים במרחק 50-100 מטר אחד מהשני על מנת להשוות את כיסוי הצומח בכל אתר בין שני מועדי הסקר. הדיוק המרחבי של הנקודות הממופות לא אפשר השוואה מדויקת ברמת החתך בין שתי נקודות הזמן ולכן הניתוח של דגמי הצומח וכן ההשוואה בין הסקרים נערכה ברמת האתר ולא ברמת החתך הבודד. רשמנו את כיסוי הצומח ברמת המין למעט מספר טקסונים בהם הרישום בסקר 2008/9 היה ברמת הסוג בלבד (בעיקר בני שיח). חישבנו את הכיסוי הכללי לפי נוכחות מינים מעוצים לאורך החתך ברזולוציה של 10 ס"מ ליחידת דיגום שנסכמה כאחוז השטח בו ישנו כיסוי צומח מעוצה כלשהו, ללא התחשבות ברב-שכבתיות אפשרית של מספר מינים. מספר המינים והסוגים שנרשם עבור האתר נאמד כעושר המינים

בישראל בתגובה לתקופת יובש ממושכת

המקומי. בעקבות חשש כי רישום המינים בסקר 2008/9 היה מוטה לחסר של רישום מיני מטפסים בתוך החורש, בחרנו להשתמש בעושר המינים בסקר 2018/9.

ניתוח אקלימי: הניתוח נעשה על שלשה משתנים עבור כל אחד מאתרי המחקר, החל משנת 1980 (משנה זו נאספו נתוני אקלים ממספר רב יחסית של אתרים) ועד 2018 – סוף הסקר השני:

1. כמות משקעים שנתית – (מ"מ לשנה הידרולוגית). הנתון מבוסס על [נתוני השירות המטאורולוגי הישראלי](#), ברזולוציה של 500 מ' לתא שטח.
2. אינדקס העונתיות של פיזור כמות המשקעים השנתית (Seasonality Index – SI) [2, 4], המבוסס על נתוני השירות המטאורולוגי הישראלי (IMS).
3. אינדקס פלמר לאמדת היובשנות (Palmer Drought Severity Index – PDSI) – מדד המשקלל את המשקעים, האידוי ועוצמת הרוח. הנתונים לקוחים ממודל Terra Climate, ברזולוציה מרחבית של 4 ק"מ [1].

במקרה בו נמצאו מספר אתרים סמוכים באותו תא הם אוחדו בניתוח המגמות האקלימיות לנקודה אחת. כתוצאה מכך, עבור כמות המשקעים ואינדקס העונתיות ניתחנו 64 אתרים, ועבור אינדקס היובשנות 47 אתרים.

בחנו את המגמות האקלימיות בשלושת המשתנים במספר אופנים:

1. ניתוח א-פרמטרי באמצעות Theil-Sen Regression – Mann-Kendall's Tau עבור סדרת הזמן המלאה 1980-2018 בכל אתר [2, 5]. [Click or tap here to enter text.](#) לאחר הניתוח של כל אתר בנפרד, ניתחנו את הקשר בין שיפוע המודל שהתקבל לכל אתר בניתוח הא-פרמטרי, Sen המתאר את המגמה הקיימת באתר, עבור כל אחד מהמשתנים האקלימיים, עם כמות המשקעים הממוצעת בכל אתר, באמצעות מודל רגרסיה ליניארית.
2. שינוי יחסי בכמות המשקעים – בחנו את השינוי בכמות המשקעים השנתית בין ממוצע תקופת המחקר בין הסקרים (2008-2018) בהשוואה לתקופה שלפניה (1980-2008) והקשר שלו לגרדיינט המשקעים במרחב.

השינוי בין שתי התקופות, עבור כל אחד מהמשתנים האקלימיים, חושב לפי משוואה 1:

$$Relative\ change\ (\%) = \frac{(mean\ 2009\ to\ 2018 - mean\ 1980\ to\ 2018) \times 100}{mean(1980\ to\ 2018)}$$

בישראל בתגובה לתקופת יובש ממושכת

כיסוי צומח מעוצה כללי – בחנו את השפעת הגורמים האקלימיים והסביבתיים על השינוי באחוז כיסוי הצומח המעוצה ברמת האתר בין שני הסקרים.

השינוי היחסי בכיסוי הצומח חושב לפי משוואה 2:

$$\text{Relative change in cover (\%)} = \frac{(\text{cover}2018 - \text{cover}2009) \times 100}{\text{cover}2009}$$

ניתוח הקשר בין הגורמים המסבירים והשינוי בכיסוי נעשה באמצעות השוואת מודלים שונים בשיטת הנראות המרבית (Maximum Likelihood Estimation, MLE), השווינו בין מודלים אלטרנטיביים, ליניאריים ולא-ליניאריים. המודלים כללו כמשתנים בלתי-תלויים את המשתנים האקלימיים, כממוצע רב-שנתי של תקופת הסקר או כשינוי היחסי בין תקופת הסקר לתקופה שלפניה (משוואה 1). בחנו מודלים שכללו גם את ההשפעות של עושר המינים בסקר השני, סוג קרקע ונוכחות רעייה (שני האחרונים כמשתנים קטיגוריאליים), אחוז כיסוי הצומח בסקר הראשון, וגובה מעל פני הים (מ'). בחרנו שלא לשלב את השיפוע והפנות כמשתנים מסבירים שכן באתרים רבים נמצאה שונות גבוהה בתנאי טופוגרפיה בתוך האתר בין חתכי הדיגום. השתמשנו במדד AIC (Akaike Information Criterion) בכדי להשוות בין המודלים החלופיים ולבחור את המודל הפרסימוני ביותר.

מינים דומיננטיים: בחנו את השינוי בכיסוי של מיני העצים והשיחים שנמצאו ביותר מ-40% מאתרי הסקר. בניתוח לא נכללו מיני מטפסים, גם אם הם נמצאו באתרים רבים, שכן ישנו חשש להטיה שלילית של הנתונים של נוכחות מיני מטפסים בסקר הראשון.

בחלק מהתצפיות נמצא 0% כיסוי עבור מינים שונים בסקר 2008/9 וגבוה מ-0 בסקר 2018/9. דבר זה הגביל את השימוש במשוואה 2 לבחינת השינוי היחסי באתרים אלו. במקום זאת, השינוי נבחן כהפרש באחוז הכיסוי בין שני הסקרים, ללא קשר לכיסוי ההתחלתי, לפי משוואה 3:

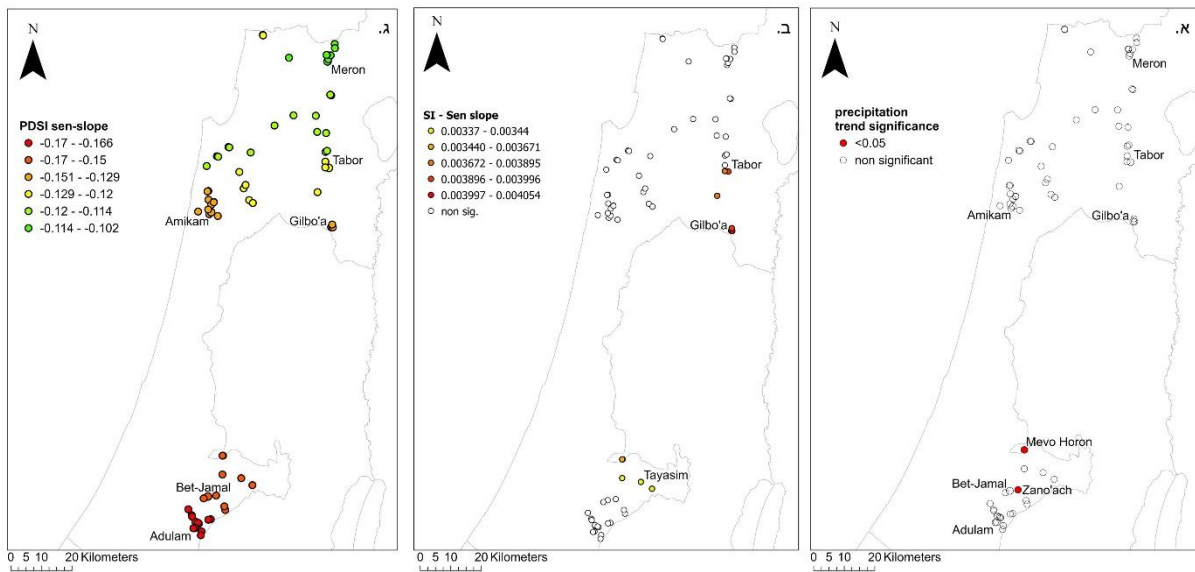
$$\text{Species change in cover} = \text{cover}2018 - \text{cover}2009$$

השפעת הגורמים האקלימיים והסביבתיים על השינוי בכיסוי המינים נבחנה בעזרת השוואת מודלים בניתוחי MLE, באופן דומה לכיסוי הצומח המעוצה הכללי. על מנת לבודד את השפעת הכיסוי ההתחלתי על עוצמת השינוי, בחנו את השינוי בכיסוי כל מין עם הכיסוי בסקר הראשון (כלומר, הכיסוי ההתחלתי) כמשתנה מסביר עצמאי בין המשתנים הבלתי תלויים במודלים.

בישראל בתגובה לתקופת יובש ממושכת

נספח 2. תוצאות שינויים ומגמות המשתנים האקלימיים

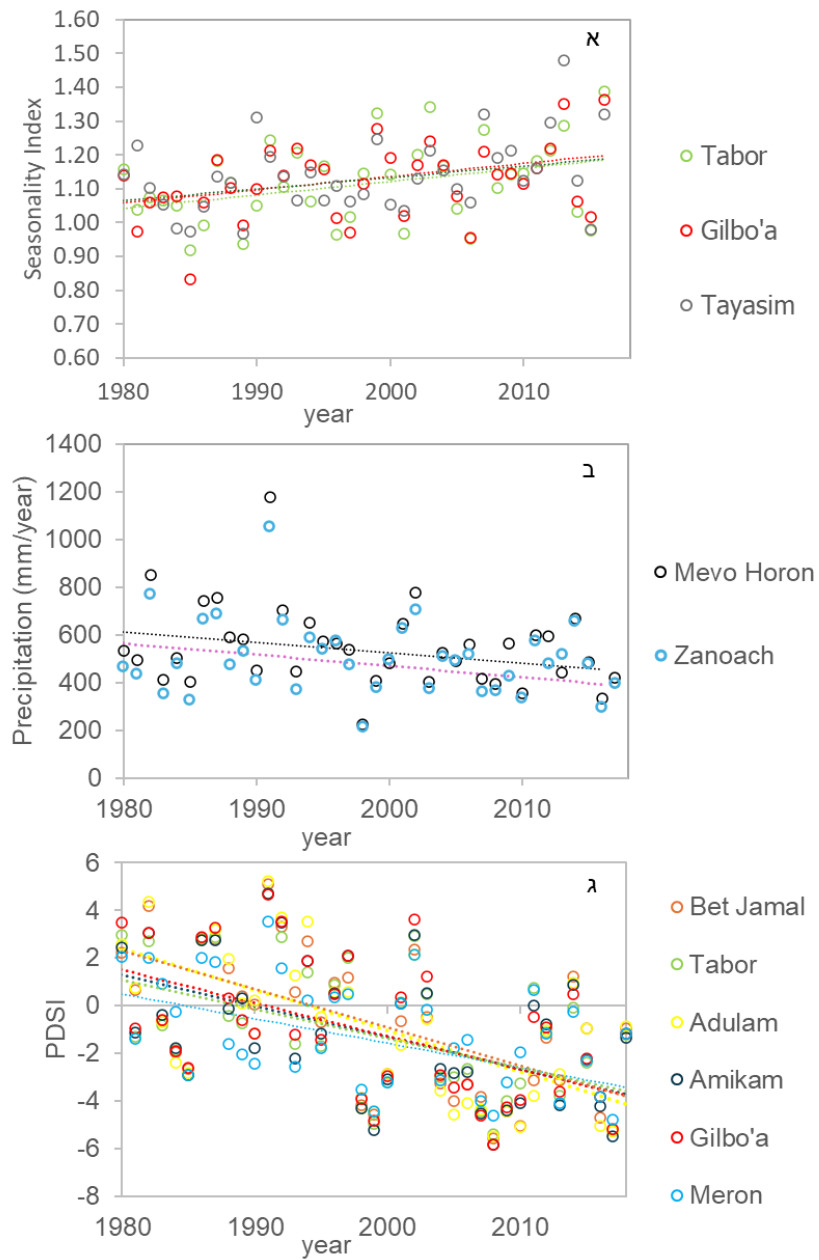
בניתוח סדרות הזמן 1980-2018 בכל אחד מאתרי הסקר, לא מצאנו מגמה מובהקת בכמות המשקעים השנתית במרבית אתרי הסקר (98%), למעט שני אתרים המצויים בשפלת יהודה, בהם נמצאה מגמה מובהקת של ירידה מתונה בכמות המשקעים לאורך התקופה (איורים נ2א, נ3א). בסדרות הזמן של אינדקס העונתיות (seasonality index) מצאנו מגמת עלייה מובהקת ב-11 מתוך 64 האתרים (17%). אתרים אלה מרוכזים בשני אזורים, הרי יהודה ומזרח הגליל, ובשאר האתרים לא נמצאה מגמה מובהקת באינדקס העונתיות (איורים נ2ב, נ3ב). בסדרות הזמן של אינדקס היובשות פאלמר (PDSI) מצאנו מגמה שלילית מובהקת בכל האתרים (איור נ2ג), מה שמעיד על ירידה בזמינות המים בקרקע. בנוסף, מצאנו קשר מובהק וחזק בין השיפוע של המגמה של אינדקס ה PDSI לאורך השנים למוצע הרב-שנתי של הגשם בכל אתר ($R^2=0.68$, $F=95.5$, $P<0.0001$). האזורים היובשניים יותר הם אלו שנמצאו בעלי מגמת ההתייבשות החזקה יותר בהשוואה לאתרים הגשומים יותר מבין אתרי הסקר (איורים נ2ג, נ3ג, נ4).



איור נ2. הפיזור המרחבי של מגמות האקלים לאורך השנים 1980 עד 2018 באתרי המחקר

צבע הנקודה בכל אתר מסמן את מובהקות או ערך השיפוע של מגמות מדדי האקלים המובהקות לאורך השנים באמצעות ניתוח Theil-Sen Regression. (א) מגמת כמות משקעים השנתית בזמן. האתרים המצוינים בשם בעלי מגמה מובהקת המופיעה באיור נ3א. (ב) מגמת אינדקס העונתיות (SI) בזמן. סדרות הזמן באתרים המצוינים בשם מופיעות לדוגמה באיור נ3ב. (ג) מגמת אינדקס פאלמר ליובשות (PDSI). סדרות הזמן באתרים המצוינים בשם מופיעות לדוגמה באיור נ3ג.

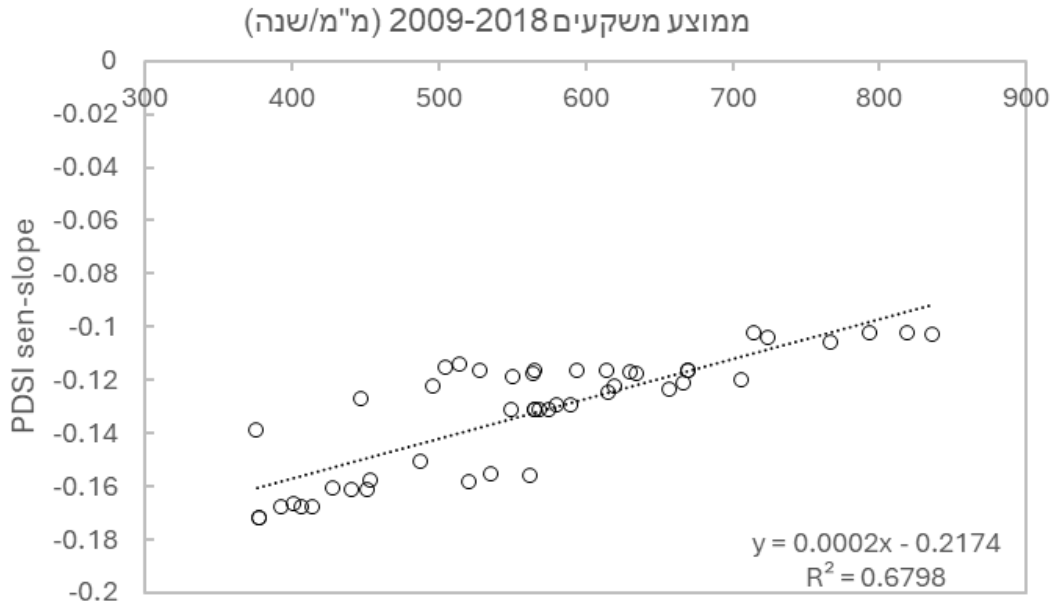
בישראל בתגובה לתקופת יובש ממושכת



איור 3. סדרות זמן עם מגמות מובהקות במדדים האקלימיים

מובהקות ושיפוע המגמה על פי ניתוח Theil-sen Regression עבור רצף השנים 1980-2018 באתרים לדוגמה. (א) מגמת כמות המשקעים השנתית לאורך הזמן הייתה מובהקת בשני אתרים, מבוא חורון שיפוע = -4.72 , זנוח שיפוע = -4.75 . (ב) מגמת אינדקס העונתיות (SI) לאורך הזמן הייתה מובהקת וחיובית ב-11 אתרים, מוצגים לדוגמה: תבור שיפוע = 0.00397 , גילבוע שיפוע = 0.00390 , וחר הטיסים שיפוע = 0.00341 . (ג) מגמת אינדקס פאלמר ליובשנות (PDSI) לאורך הזמן הייתה מובהקת בכל האתרים ומוצגת בשישה אתרים לדוגמה – בית ג'מאל שיפוע = -0.1614 , תבור שיפוע = -0.1226 , עדולם שיפוע = -0.1719 , עמיקם שיפוע = -0.1311 , גלבוע שיפוע = -0.1388 , ומירון שיפוע = -0.1029 .

בישראל בתגובה לתקופת יובש ממושכת



איור נ4. הקשר בין שיפוע מגמת אינדקס היובשנות (PDSI sen-slope) לאורך תקופת 1980-2018 וכמות המשקעים השנתית הממוצעת בכל אתרי המחקר

בישראל בתגובה לתקופת יובש ממושכת

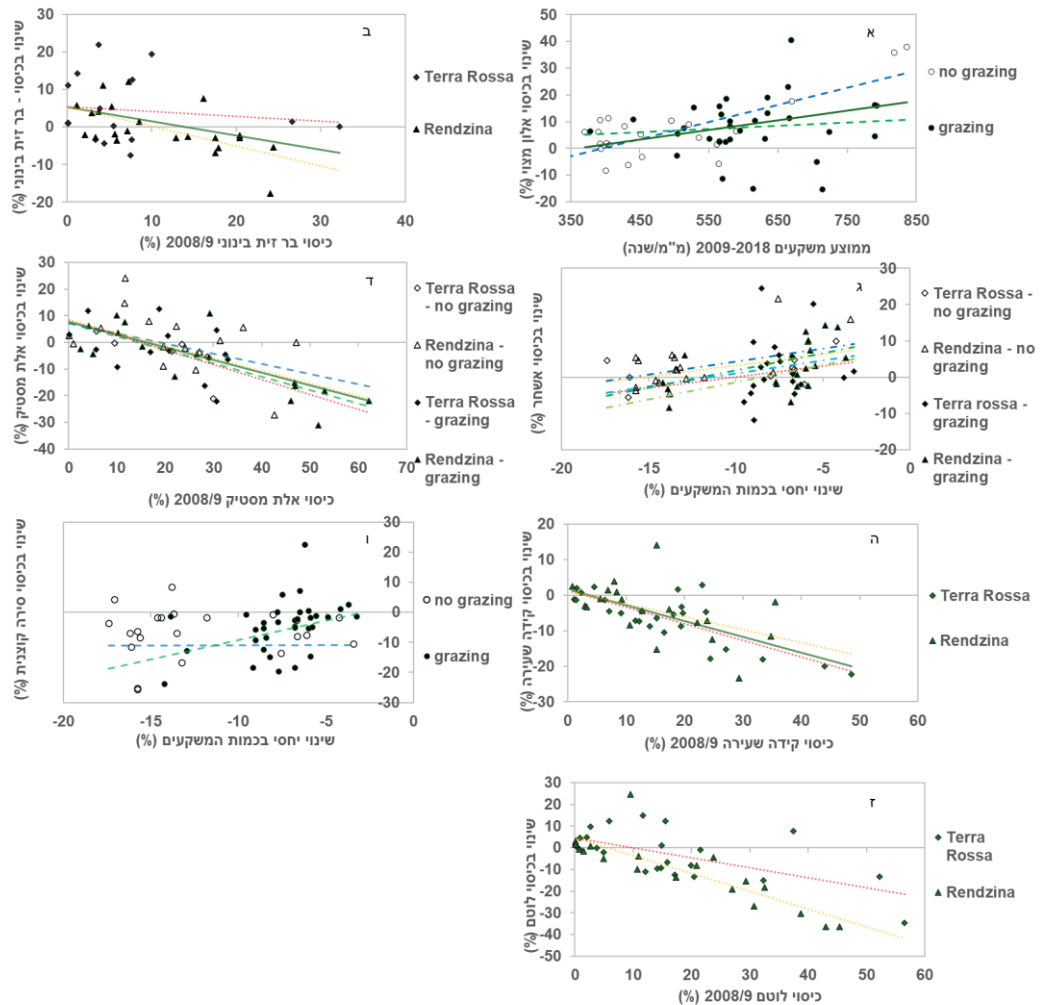
נספח 3. תוצאות שינויים בכיסוי מיני עצים ושיחים דומיננטיים – פירוט המודלים המיטביים

המודלים המיטביים המסבירים את השינוי בכיסוי המינים הדומיננטיים בין סקר 2008/9 וסקר 2018/9 מפורטים בטבלה נ1, ובאיור 5 המציג את דגמי השינוי על פי תחזיות המודל המיטבי עבור כל מין.

מין	מודל	R ²	ΔAICc
אלון מצוי	0	0.25	$[-26.3_n, 0.8_g] + [0.07_n, 0.01_g] \times \text{Precipitation} \#$
	1.18	0.16	$-12.84 + 0.4 \times \text{Precipitation} \#$
	1.19	0.19	$-16.27 + [0.05_n, 0.04_g] \times \text{Precipitation}$
בר-זית בינוני	0	0.25	$5.43 - [0.13_t, 0.53_r] \times P. latifolia \text{ 08} \#$
	1.83	0.16	$5.26 - 0.38 \times P. latifolia \text{ 08} \#$
אשחר	0	0.26	$10.57 + 0.62 \times \text{precipitation change} - [0.64_t, 0.17_r] \times Rhamnus \text{ 08} \#$
	0.38	0.28	$12.27 + [0.71_n, 0.95_g] \times \text{precipitation change} - [0.61_t, 0.13_r] \times Rhamnus \text{ 08} \#$
אלת מסטיק	0	0.41	$7.69 - 0.48 \times P. lentiscus \text{ 08} \#$
	0.73	0.43	$7.14 - [0.38_n, 0.5_g] \times P. lentiscus \text{ 08} \#$
	1.82	0.42	$8.32 - [0.56_t, 0.48_r] \times P. lentiscus \text{ 08} \#$
קידה שעירה	0	0.45	$1.54 - 0.44 \times C. villosa \text{ 08} \#$
	1.35	0.46	$1.24 - [0.46_t, 0.37_r] \times C. villosa \text{ 08} \#$
סירה קוצנית	0	0.39	$5.19 - [0.46_n, 1.5_g] \times \text{precipitation change} + [0.16_n, 0.99_g] \times \ln(S. spinosum \text{ 08})$
	1.79	0.4	$[2.04_n, 7.37_g] - [4.46_n, 1.31_g] \times \text{precipitation change} + [0.003_n, 1.28_g] \times \ln(S. spinosum \text{ 08}) \#$
לוטם	0	0.62	$0.43 - [0.46_t, 0.82_r] \times Cistus \text{ 08} \#$

טבלה נ1. המודלים המיטביים המסבירים את השינוי בכיסוי המינים הדומיננטיים בין סקר 2008/9 וסקר 2018/9. Precipitation - ממוצע המשקעים בין השנים 2009-2018, precipitation change – שינוי יחסי בכמות המשקעים (משוואה 1), $h = \text{ללא רעייה}$, $g = \text{עם רעייה}$, $t = \text{קרקע טרה-רוסה}$, $z = \text{קרקע רנדזינה}$. שם המין-08 (לדוג' *P. latifolia* 08) – אחוז כיסוי המין בסקר 2008/9, מיצג את הכיסוי ההתחלתי עבור כל מין. המודלים המסומנים ב# הם אלו המוצגים באיור 5.

בישראל בתגובה לתקופת יובש ממושכת



איור 5. השינוי בכיסוי המינים הדומיננטיים כתלות במשתנים המסבירים במודלים המיטביים. המודלים המוצגים הם אלו המסומנים ב# בטבלה נ1. קו רצוף כהה – ללא אינטראקציה. מודלים עם אינטראקציות (בין המשתנה בציר ה-X לנוכחות רעייה, או מסלע) מוצגים בקווים לא רצופים, קו מקווקו מציג את המודל עבור השפעת רעייה, בכחול ללא רעייה, ובירוק עם רעייה. קו מנוקד מציג את המודל עבור השפעת סוג קרקע, באדום קרקע טרה רוסה, ובצהוב קרקע רנזדינה. השפעה משולבת (אינטראקציה) של משתנים רציפים, השינוי היחסי בכמות המשקעים ואחוז הכיסוי ההתחלתי, עם רעייה וסוג הקרקע מצאנו רק עבור אשחר (ג). קו מנוקד-מקווקו מציג את המודל עבור קרקע טרה רוסה ללא רעייה בכחול בהיר ועם רעייה בירוק בהיר, קרקע רנזדינה ללא רעייה בכחול כהה, ועם רעייה ירוק כהה. עבור השינוי בכיסוי אשחר מוצגים גם המודלים האדיטיביים הכוללים השפעה של הכיסוי ההתחלתי ושל השינוי היחסי בכמות המשקעים, בקו המתאר את השינוי בכיסוי עבור כיסוי התחלתי ממוצע – 6.8%.

בישראל בתגובה לתקופת יובש ממושכת

נספח 4. ניתוח מתאם השינוי בכיסוי מינים

הקשר האפשרי בשינוי בכיסוי של המינים הדומיננטיים נבחן באמצעות מתאם פירסון לבחינת קשר ליניארי אפשרי בין עלייה של האלון המצוי, המין הדומיננטי שנמצא בכלל האתרים בעלייה, לעומת מיני השיחים שנמצאו בירידה בכלל האתרים. בניתוח זה לא נמצא כל מתאם, חיובי או שלילי בין האלון כל אחד מהמינים או כיסויים הכולל (סך כיסוי ארבעת המינים ביחד).

שחים – כללי	סירה קוצנית	לוטם	קידה שעירה	אלת מסטיק		
-0.048	-0.025	0.009	0.074	0.000	Pearson Correlation	אלון מצוי
0.730	0.875	0.954	0.655	1.000	Sig. (2-tailed)	
54	43	43	39	42	N	

טבלה נ2. המתאם בין השינוי בכיסוי אלון מצוי ומיני השיחים.

בישראל בתגובה לתקופת יובש ממושכת

מקורות

1. Abatzoglou JT, Dobrowski SZ, Parks SA, and Hegewisch KC. 2018. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific Data* **5**: 170191.
2. Drori R, Ziv B, Saaroni H, Etkin A, and Sheffer E. 2021. Recent changes in the rain regime over the Mediterranean climate region of Israel. *Climatic Change* **167**(1): 1–21.
3. Sheffer E, Canham CD, Kigel J and Perevolotsky A. 2014. An integrative analysis of the dynamics of landscape-and local-scale colonization of Mediterranean woodlands by *Pinus halepensis*. *PloS One* **9**(2): e90178.
4. Walsh RPD, and Lawler, DM. 1981. Rainfall seasonality: Description, spatial patterns and change through time. *Weather* **36**(7): 201–208.
5. Yosef Y, Aguilar E, and Alpert P. 2019. [Changes in extreme temperature and precipitation indices: Using an innovative daily homogenized database in Israel.](#) *International Journal of Climatology* **39**(13): 5022–5045.