

היעילות האקו-הידרולוגית של מערכות קציר נגר לאורך מדרונות באזור צחיח למחצה בטווח הקצר והארוך

אלי ארגמן^{1*} | נתנאל בורו^{2,1} | עידית טיקוצקי^{3,1} | אילן סתוי^{4,5}

- 1 התחנה לחקר הסחף, האגף לשימור קרקע וניקוז, משרד החקלאות ופיתוח הכפר
 - 2 המחלקה למדעי הקרקע והמים, הפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה ע"ש רוברט ה. סמית, האוניברסיטה העברית בירושלים
 - 3 המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי – מכון וולקני
 - 4 מו"פ מדבר וים המלח, יטבתה
 - 5 קמפוס אילת, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב
- * Eliar@moag.gov.il

תקציר

באתרי הנטיעה הוותיקים (2005, 2009) נצפתה עלייה מובהקת בערכי מדד NDVI (ממוצע עונתי) לאחר בניית מערכות קציר הנגר. כמו כן, נצפה קשר חיובי ומובהק בין כמות המשקעים העונתיים למדד הצומח. בניגוד לכך, באתר הנטיעה הצעיר (2016) לא נמצאו מגמות כאלה. כמו כן, נמצא שבטווח הקצר בניית המערכות השפיעה לרעה על מדד הצומח, שהתבטא בירידה מובהקת של מדד NDVI הממוצע בעונת הנטיעה הראשונה, בהשוואה לאתר הביקורת. ממצאים אלה מאוששים את ההנחה כי למרות השפעה שלילית בטווח הקצר, בניית המערכות מסייעת לניצול נגר ומכאן לשיפור במצב הצומח וליצירת מערכת בת-קיימא בטווח הארוך בצורה דומה או אף משופרת בהשוואה למצב המדרונות ה'טבעיים'.

באזור צפון הנגב נצפו בעשורים האחרונים תהליכי התדלדלות קרקע אינטנסיביים בעקבות עלייה בלחץ הסביבתי, הנובע בעיקר מפעילות האדם. נוסף על כך, מגמות שינוי האקלים מצביעות על התמעטות משקעים ועל עלייה בטמפרטורת המינימום. שילוב מגמות אלה מאיים על תפקוד צומח עונתי במדרונות 'טבעיים'.

במחקר ארוך טווח שנערך ביער השגרירים הממוקם בצפון הנגב, נבחנו ההשפעות של שינוי בשימוש הקרקע מרעייה אינטנסיבית ליער סוואנה הנתמך במערכות קציר נגר – שיחים ולימנים. במחקרים קודמים הוכח כי המערכות האלה מסייעות לשימור ולשיפור של המערכת האקו-הידרולוגית, מגבירות את זמינות המים לצומח הנטוע ומסייעות בוויסות דליפות נגר לאפיקי נחלים ובמיתון סחיפת קרקע.

המחקר התמקד בהשפעות העיתיות, בטווח הקצר והארוך, של השינוי בשימוש הקרקע. לשם כך, נבחרו ארבעה אתרי עניין – שלושה אתרי נטיעות שניטעו בשנים: 2005, 2009 ו-2016, ואתר ביקורת שלא הופר במהלך כל שנות הניטור.

בכל אחד מהאתרים נבנה בסיס נתונים עיתי של מדד הצומח המנורמל (NDVI), שנלקח מדימותי לוויין בין השנים 2000–2021, וחושב היחס בין ערכי המדד הממוצע ובין כמות המשקעים העונתיים.

מילות מפתח

חישה מרחוק, יער סוואנה, מדד הצומח, שיחים, NDVI

מבוא

Gutierrez et al., 2015) הראו כי פעולות הייעור עלולות לפגוע בתפקוד הגאו-אקולוגי של מדרונות בשטחים מיוערים.

החל משנות ה-50 של המאה ה-20 קק"ל מקדמת פעולות ייעור בצפון הנגב (Orenstein et al., 2012). בעשורים האחרונים ממשק הייעור הנפוץ באזורים האלה הוא נטיעה של יער סוואנה, המתאפיין בנטיעת מיני עצים עמידים לתנאי יובש, בצפיפות דלילה, לאורך מדרונות מתונים ובתרונות (Shachak et al., 1998; Brand et al., 2008). ממשק זה מאפשר התבססות צומח עשבוני נוכח היווצרות של תנאי מיקרו-אקלים משופרים (Helman et al., 2014; Mussery et al., 2016).

פעולה נוספת לשימור מים ולמניעת סחיפה היא קציר מי נגר (runoff water harvesting). טכניקה עתיקה יומין זו לאיגום מלאכותי של מי גשם הניגרים על פני הקרקע, מאפשרת גידול עצים, שיחים וצומח עונתי באקלים צחיח וצחיח למחצה. ניתוב מלאכותי של מי נגר לשקעים מתן את דליפת הנגר וסחיפת הקרקע מהמדרון, משמר את איכות הקרקע, ומשפר את זמינות המים לצמח. אדמות הלס הנפוצות בצפון הנגב מתאפיינות בכושר חידור נמוך, המאיץ היווצרות נגר וסחיפת קרקע. לכן, שימוש בטכניקות קציר נגר חיוני לשימור ואף לשיפור של המערכת האקולוגית (Grum et al., 2017; Paz-Kagan et al., 2017).

אם כן, ניכר כי ניהול ממשק יער סוואנה בשילוב מערכות קציר נגר מהווה אמצעי אקו-הידרולוגי חיוני לשיפור זמינות המים לצומח ולניהול אגני בר-קיימא. השפעות בניית מערכות קציר נגר על תכונות הקרקע, בטווח הקצר והארוך, ניכרות, ותוארו בעבודות קודמות (Stroosnijder et al., 2012; Stavi et al., 2015; Stavi and Argaman, 2016). עם זאת, ההשפעות ארוכות הטווח של בניית מערכות קציר הנגר על הצומח במדרונות לא נבחנו במחקרים קודמים.

קק"ל משלבת מערכות קציר נגר לניהול בר-קיימא של יער סוואנה על ידי בניית שיחים ולימנים. שיח הוא סוללת עפר מלאכותית רדודה הנבנית לאורך מדרונות בעלי שיפוע מתון, ומיועדת לאיגום מי הנגר ולקליטת החומר הקרקעי שנשחף ממעלה המדרון. קיטוע המדרון על ידי מערכת של שיחים מובילה למיתון מהירות זרימת מי הנגר ומכאן להפחתה ניכרת של תפוקות הסחף המשטחי והערוצי. לימן הוא מערכת קציר נגר המוקמת לאורך בתרונות ואפיקים ראשוניים, ומיועדת, נוסף על סכירת מי הנגר, לריסון ולוויסות של הזרימה. הלימנים מסייעים למתן את מהירות הזרימה באפיקי נחלים ובתעלות ניקוז. שני סוגי המערכות האלה משמשים את קק"ל לניהול ממשק יערות סוואנה במטרה למנוע הרס מדרונות, בתרונות ואפיקים.

מטרת מחקר זה היא לבחון את מידת השפעת השינוי בשימוש הקרקע מאדמת מרעה ליער סוואנה הנתמך במערכות קציר נגר מדרוני (שיחים), בטווח הקצר והארוך,

תהליכי התדלדלות קרקע, 'טבעיים' או מעשה ידי אדם, מתרחשים בהדרגתיות, ולרוב סמויים מהעין בטווח הקצר (Argaman et al., 2020). התהליכים האלה משפיעים לרעה על תפקוד מערכות אקולוגיות (Ramon et al., 2012), ומביאים לפחיתה בתכולת החומר האורגני בקרקע, לפגיעה ביציבות תלכיד קרקע ולאיתוס של פני הקרקע. כתוצאה מכך, נגרמים צמצום בשיעור חידור המים לקרקע, הקטנת זמינות המים לצומח, האצת תהליכי נגר וסחיפה, ומכאן הרס המדרונות.

תחזיות האקלים לחלקו המזרחי של אגן הים התיכון מנבאות פחיתה בכמות המשקעים (Golodets et al., 2015) במקביל לגידול בתקופות יובש בין סופות גשם (Deitch et al., 2017). מאידך גיסא, במאמרם של Drori ושות' (2021) נחזה לצפון הנגב גידול בכמות המשקעים אך התקצרות של עונת הגשמים ופחיתה במספר ימי הגשם. נוסף על כך, Yosef ושות' (2019) חזו פחיתה בכמות המשקעים ובמספר ימי הגשם, שתלווה בעליית הטמפרטורה היומית הממוצעת, ותוביל להחמרת תדירות תקופות היובש בעשורים הקרובים. במחקר שערכו Argaman ושות' (2020) בפארק סירת שקד שבצפון-מערב הנגב, דווח כי בין השנים 1994–2013 נמדדה עלייה מובהקת של הטמפרטורה המינימלית בד בבד עם ירידה בלחות היחסית ובמהירות הרוח, שהובילו לעלייה בערכי ההתאדות הפוטנציאלית.

למשטר הגשמים (משך סופת גשם, עוצמתה ותדירותה) השפעה ישירה ועקיפה על עמידות הקרקע בפני התדלדלות כימית ופיזיקלית (Nearing et al., 2017; Middleton, 2019). לכן, חוסר הוודאות לגבי השפעת שינוי האקלים על משטר הגשמים מחייב היערכות מקדימה לצורך מיתון הפגיעה באיכות הקרקע, ומיתון דליפת נגר וזיהום בשל סחיפת קרקע לא מבוקרת במדרונות ובאגני ניקוז.

בעבודתם של Argaman ושות' (2020), שבחנה את ההשפעה של תקופות יובש על המשטר ההידרולוגי באגן מבודד הממוקם בפארק סירת שקד, נמצא כי תקופות יובש ממושכות הובילו לפגיעה בכיסוי צומח עונתי במדרונות טבעיים, שגרם לעלייה בדליפת הנגר מהמדרונות אל מחוץ לגבולות האגן.

נוסף על אלה, באקלים צחיח וצחיח למחצה, עלייה בלחצים סביבתיים, הנובעים מחקלאות אינטנסיבית, מרעיית יתר ומביעור צומח מעוצה, היא גורם אנושי משמעותי המאיץ את הפגיעה בפני הקרקע ובעמידותה בפני שינוי האקלים (Stavi et al., 2020).

פעולות ייעור המתפרסות על פני שטחים נרחבים נפוצות באזורים רבים, והוכחו כאמצעי יעיל לניהול בר-קיימא של אגני ניקוז (Schwarzel et al., 2020; Forster et al., 2021). מנגד, מחקרים אחרים (Rotem et al., 2014; Moreno-

המטאורולוגי. נתוני גשם סופתי ועונתי נמדדו במהלך שנות הניטור בתחומי היער החל משנת 2008. נתונים היסטוריים וחסרים הושלמו מתחנות גשם סמוכות של משרד החקלאות והשירות המטאורולוגי לאחר כיוול ואינטרפולציה גאו-מרחבית מבוססת IDW (Inverse Distance Weighing). מכיוון שהמרחק הגאוגרפי בין האתרים קטן, הנחנו כי כמות תפרוסת המשקעים העונתית דומה בכל האתרים. הנחה זו מתבססת גם על מדידות גשם סופתי במדי גשם הממוקמים באתרי הניטור, מאחר שלא נמצאו הבדלים ברורים בין כמות המשקעים הסופתית מאתרי הניטור ובין הנתונים מהתחנות המטאורולוגיות הסמוכות.

מערך הניטור הקרקעי החל לפעול בעונת הגשמים 2008/9 (עונת גשמים מתחילה בחודש ספטמבר ומסתיימת בסוף חודש אוגוסט העוקב). המערך כולל מידע על אודות תכונות הקרקע במדרונות ובאפיקים (שיחים ולימנים, בהתאמה) וכן מאזן מים עונתי בלימנים.

ניטור לווייני רציף של מדדי צומח וקרקע באתרים נבחרים בוצע החל מספטמבר 2000 בהסתמך על מדדי צומח מחיישי Terra ו-AQUA של לווייני MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer).

ניטור צפיפות הצומח ומצבו ביער השגרירים נעשה באמצעות מדד NDVI (Rouse et al., 1974), הרגיש לתכולת הכלורופיל בצמח. המדד זמין מתוך נתוני לוויינים, והניטור

באמצעות הערכת מצב הצמחייה על ידי שימוש במדד NDVI מדימותי לוויין.

שיטות וחומרים

אתר המחקר

המחקר התבצע בתחומי יער השגרירים, יער סוואנה שנטיעתו החלה בשנת 2005 ונמשכת עד ימים אלה (איור 1). היער משתרע על פני שטח של כ-25 קמ"ר, וממוקם בצפון הנגב. האתר הוא חלק מרשת של 14 תחנות ניטור אקולוגי ארוכות טווח בישראל (LTER ISRAEL, 2023). מערך הנטיעות בתחומי היער מתבסס על מערכות שיחים ולימנים שהוקמו על פני מדרונות בעלי שיפוע מתון (9%–3%). ממוצע המשקעים הרב-שנתי באזור (1991–2020) הוא 287 מ"מ, ומתאפיין בשונות בין-שנתית גבוהה (השירות המטאורולוגי הישראלי, 2023). מספר ימי הגשם הממוצע לעונה ($1.0 < \text{מ"מ ליום}$) הוא 38 ± 6 .

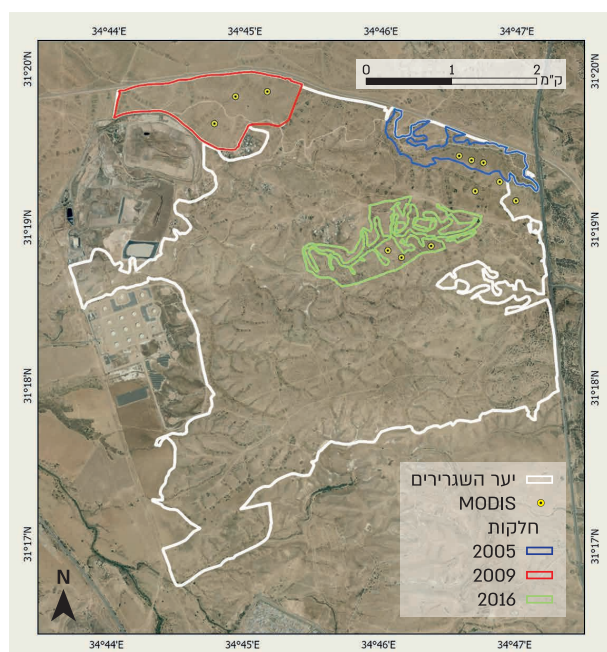
טיפוס הקרקע העיקרי בתחומי היער הוא לס (Loessial Loessial) (Singer, 2007) (Calcic Xerosol) בעל מרקם חולי-אבקתי (Sandy clay loam) (Stavi and Argaman, 2016). תכולת החומר האורגני הממוצעת נעה בין 0.7% באזורים שנבנו בהם מערכות קציר נגר לאחרונה, ועד ל-1.95% במדרונות שלא נבנו בהם מערכות קציר נגר.

מגוון הצומח הנטוע כולל מינים שונים, ובהם אשל הפרקים (*Ziziphus spina-christi*), שיזף מצוי (*Tamarix aphylla*) ושקמה (*Ficus sycomorus*). עד לנטיעת היער היו הקרקעות באזור חשופות במשך שנים ארוכות לרעיית יתר בלתי מבוקרת, שהובילה להאצת החתירה של בתרונות יובלי הנחלים כרכור ופטיש. לאחר בניית מערכות קציר הנגר העצים הנטועים מושקים שנתיים לפחות, עד להתבססות רעייה מבוקרת אסורה בחמש שנים הראשונות לאחר הנטיעה. היקף כיסוי חופת הצומח הנטוע נע בין 1.28% ועד 0.49% באתרי הנטיעות הוותיקים והצעירים, בהתאמה (בורו ושות', 2023).

ניטור השפעת שינוי שימוש הקרקע – בין העונות 2000 ועד 2020 – נבחן בארבעה אתרים ברחבי היער שגיל העצים בהם נע בין 15 ועד ארבע שנים (איור 1), על פי הפירוט הבא: א. 15 שנים ממועד הנטיעה – נטיעות "2005"; ב. 11 שנים ממועד הנטיעה – נטיעות "2009"; ג. ארבע שנים ממועד הנטיעה – נטיעות "2016"; ד. מדרונות ללא מערכות קציר נגר – "ביקורת".

חומרים

נתונים מטאורולוגיים וכן כמויות משקעים נאספו מתחנות מטאורולוגיות סמוכות, כולל גילת, שובל ואשל הנשיא המנוהלות על ידי משרד החקלאות ופיתוח הכפר והשירות



איור 1

מפת התמצאות יער השגרירים

הנקודות הצהובות מייצגות את מיקום הפיקסלים של לוויין MODIS שנבחרו לייצג את אתרי העניין.

(BACI) בכל אתרי המחקר להערכת השונות העיתית של מדד יעילות הגשם לפני בניית מערכות השיחים ואחריה (Thiault et al., 2017; Chevalier et al., 2019).

נעשה תוך שימוש בבסיס הנתונים MOD13Q1 ו-MYD13Q1 מתוך חיישני AQUA ו-TERRA הנישאים על גבי לווייני MODIS בעלי רזולוציה מרחבית של 250 מטר לפיקסל (USGS, 2023).

תוצאות

בהשוואה לממוצע המשקעים הרב-שנתי (1991–2020, 287 מ"מ), נצפתה הפחתה משמעותית אך לא מובהקת בתקופה שבין 2000–2020 (ממוצע משקעים עונתי 261.0 ± 76.4 מ"מ). בין העונות 2005 ל-2012 נמדד רצף של שנים שחונות, וכמות המשקעים העונתית הממוצעת בהן הייתה נמוכה מהממוצע הרב-שנתי באופן מובהק (איור 2א). באופן מיוחד, בעונות 2007, 2008 ו-2010 נמדדה כמות משקעים של 150, 168 ו-152 מ"מ, בהתאמה. הערכים האלה נמוכים ב-48%–40% מהממוצע הרב-שנתי של האזור (1991–2020). בחינת תפוסת ימי הגשם והמשקעים החודשיים בשנים השחונות מראה שמספר ימי הגשם בחודשים נובמבר ודצמבר נמוך בהשוואה לממוצע הרב-שנתי (איורים 2ב, 2ג). באופן דומה, כמות המשקעים בחודשים נובמבר-ינואר נמוכה באופן מובהק ($p < 0.01$) מהממוצע הרב-שנתי, ועומדת על 55 מ"מ בממוצע בהשוואה ל-69 מ"מ בשנה ממוצעת. ניתוח משתני אקלים שנבחנו בתקופת הניטור הצביע על מגמה דומה לזו שזיהו יוסף ושות' (2019). כמות המשקעים בעונות 2005, 2009 ו-2016, הייתה דומה (218.1, 218.5 ו-201.9 מ"מ, בהתאמה), ונמוכה באופן ניכר מהממוצע הרב-שנתי.

במהלך תקופת הניטור נצפו שינויים ניכרים בערכי מדד NDVI הממוצע בין העונות. הערכים המרביים נמדדו בשנים הגשומות יותר מהממוצע הרב-שנתי, והנמוכים ביותר במהלך השנים השחונות, ללא קשר ברור למועד בניית מערכות השיחים. במהלך רצף השנים השחונות (2005–2012) נמדדה נקודת ההיפוך (tipping point) של מדד NDVI בין העונות ההידרולוגיות 2008–2009. ההשפעה של תרומת המשקעים על מדד NDVI לאחר עונת 2008 במדרונות הביקורת הייתה גבוהה ומובהקת ($p < 0.01$) בהשוואה לעונות שלפני נקודת ההיפוך למרות תנודות משמעותיות של המשקעים במהלך עונות הניטור העוקבות (איור 3א). מגמה דומה נמדדה לאחר בניית מערכות השיחים באתרים "2005" ו-"2009" בהשוואה לשנים שלפני בנייתם. כצפוי, במדרונות "2016" תרומת המשקעים למדד NDVI הייתה פחותה בהשוואה לשנים שלפני בניית השיחים. בנייתו BACI לבחינת הממוצע הרב-שנתי של מדד יעילות הגשם (RUE) במהלך תקופת הניטור מצאנו כי הערך הממוצע של מדד יעילות הגשם במדרונות הביקורת לאחר נקודת ההיפוך היה 0.664, גבוה ב-12.7% בהשוואה

שיטות

תדירות הנתונים מאפשרת בחינה עונתית ושנתית של שינויים במצב הצומח וצפיפותו בכל תא שטח נבחן. נתוני הלוויינים קובצו למהלך חודשי, עונתי ושנתי (שנה הידרולוגית) בכל אתרי המחקר ביער השגרירים. נתונים שגויים, בעלי איכות נמוכה או חריגים מוסכו לפני ניתוח סדרות הזמן בכל חלקת מחקר. בסך הכול צורפו מעל 2,400 תצפיות בכל אתרי העניין במהלך תקופת המחקר (2000–2020). בכל אתר נטעות ובחלקת הביקורת נבחרו שלושה פיקסלים של הלוויין MODIS, לאחר אימות קרקעי, המכסים שטח של 187.5 דונם של מדרונות שנבנו בהם מערכות שיחים. היקף השטח המנוטר בכל אתר נטעות, ביחס להיקף השטח הנטוע במדרונות, הוא 41.2%, 51.6% ו-38.3%, עבור האתרים "2005", "2009" ו-"2016", בהתאמה. בסיס הנתונים בכל אתר חולק למועד שלפני בניית מערכות השיחים ולאחריה.

כדי לבחון את מידת ההשפעה המיידית של בניית מערכות השיחים על כיסוי הצומח נבחנה החריגה של מדד NDVI הממוצע לעונה הידרולוגית נתונה (Dev_i), ביחס לממוצע הרב-שנתי בכל אתר נטעות באופן הבא:

$$Dev_i = \left(\frac{NDVI_i - \overline{NDVI}}{\overline{NDVI}} \right)$$

כאשר \overline{NDVI} מחושב בהתאם למשוואה:

$$\overline{NDVI} = \frac{\sum_{i=1}^n NDVI_i}{N}$$

ערך ה- $NDVI_i$ הוא הערך הממוצע בעונה הידרולוגית נתונה (i), ו-N הם מספר עונות הניטור. היחס בין מדד NDVI הממוצע בעונה הידרולוגית נתונה ובין כמות המשקעים העונתית מוגדר כמדד יעילות הגשם (Rain Use Efficiency – RUE), ומאפשר את הערכת התועלת של המשקעים על התפתחות צומח עונתי (Chang et al., 2018). המדד חושב באופן הבא:

$$RUE = \frac{NDVI_i}{P_i}$$

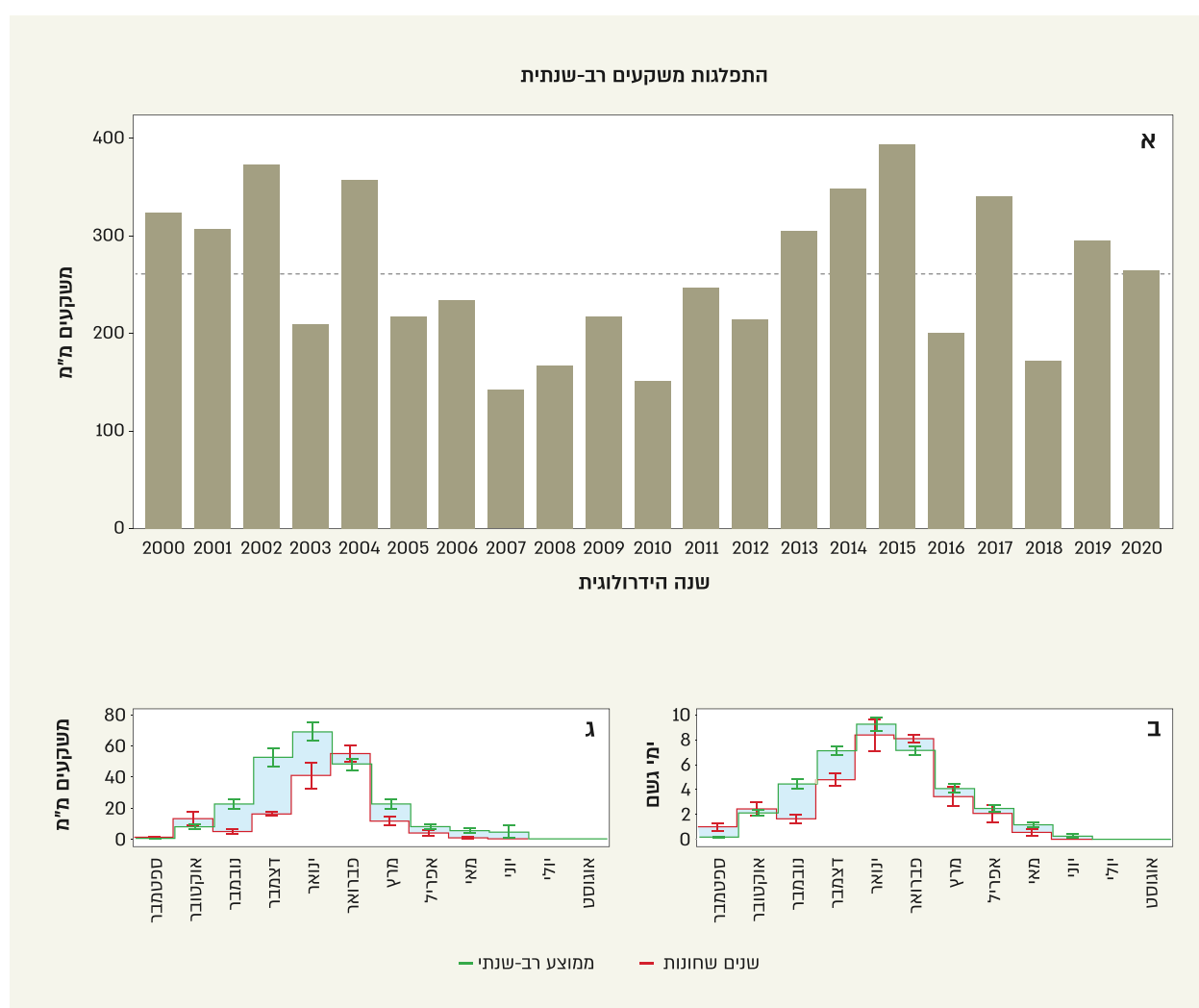
כאשר P_i מציין את כמות המשקעים בעונה נתונה (מ"מ). כמו כן, בוצע ניתוח Before-After-Control-Impact

גבוה בהשוואה למדרונות הביקורת בתקופה המקבילה (2000–2004) ללא מובהקות סטטיסטית ברורה. עם זאת, בין השנים 2005–2020, לאחר בניית השיחים, הערך הממוצע של מדד יעילות הגשם היה 0.684, גבוה בהשוואה למדרונות הביקורת (0.664), ללא הבדל מובהק. אף על פי שמגמת השינוי של מדד NDVI באתר "2005" לפני בניית השיחים ואחריה נמצאה זניחה, השינוי היחסי בערך הממוצע של מדד יעילות הגשם בין שתי התקופות היה 31%, גבוה באופן ניכר בהשוואה לאתרים האחרים, כולל מדרונות הביקורת.

הערך הממוצע של מדד יעילות הגשם באתר הנטיעות הצעיר ביותר, "2016", לאחר בניית השיחים היה 0.629, נמוך

לתקופה הקודמת (0.589). הערך הממוצע של מדד יעילות הגשם העונתי שנמדד באתר "2009" עד לשנה ההידרולוגית שמערכות השיחים באתר נבנו בה היה 0.573, נמוך מהערך הממוצע שנמדד בשנים העוקבות (איור 3). כמו כן, בין השנים ההידרולוגיות 2009–2008 (נקודת ההיפוך) ערכי מדד יעילות הגשם שנמדד באתר "2009" היו הנמוכים ביותר מבין כל אתרי הניטור, כולל מדרונות הביקורת (0.456 ו-0.569, בהתאמה). העלייה בערכו הממוצע של מדד יעילות הגשם לאחר בניית מערכות השיחים משקפת שיפור של 9% בהשוואה לתקופה הראשונה.

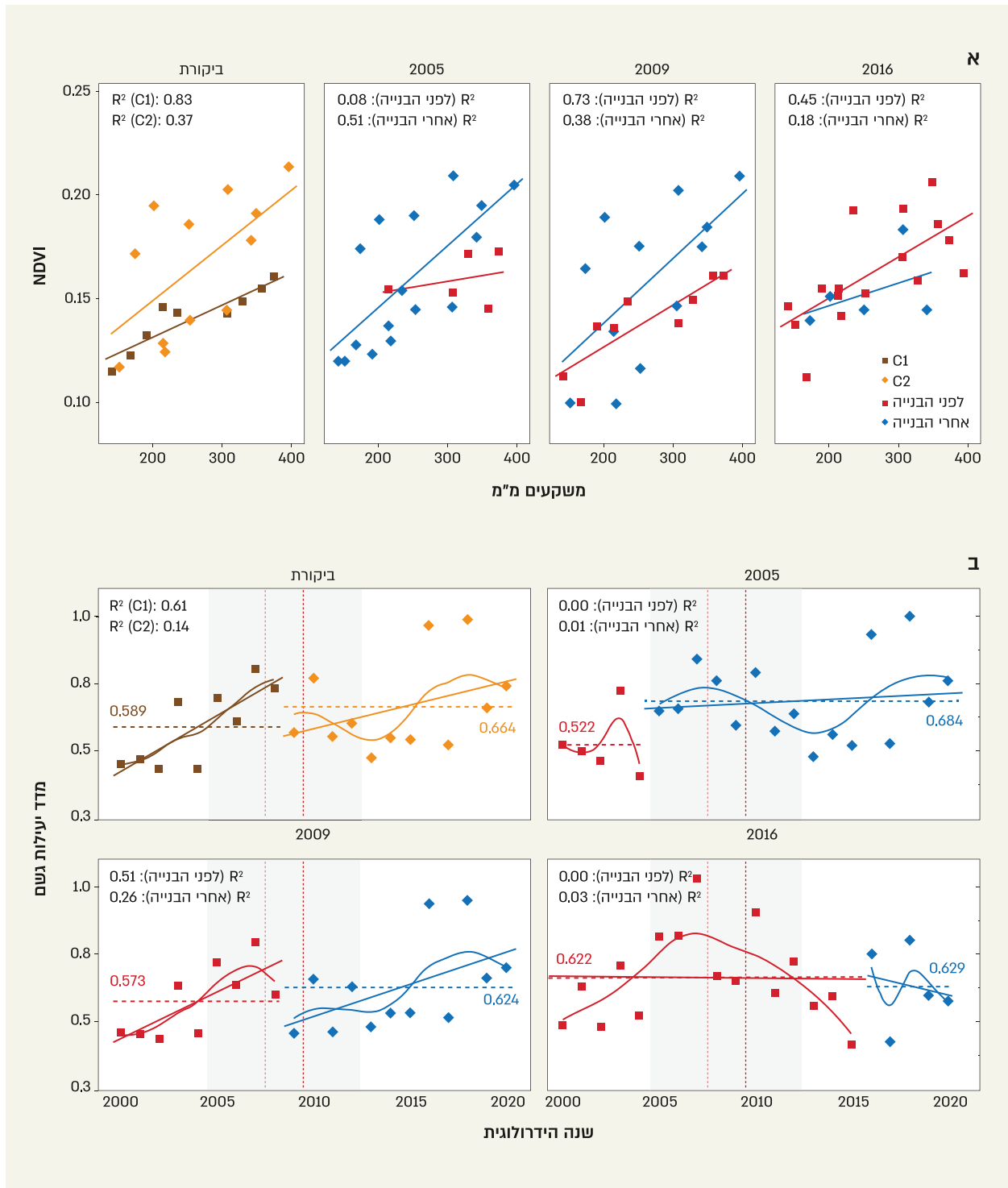
באתר הנטיעות הוותיק ביותר, "2005", הערך הממוצע של מדד יעילות הגשם לפני בניית מערכות השיחים היה 0.522,



איור 2

התפלגות משקעים עונתית וחודשית בתחומי יער השגרירים במהלך שנות הניטור (2000–2020)

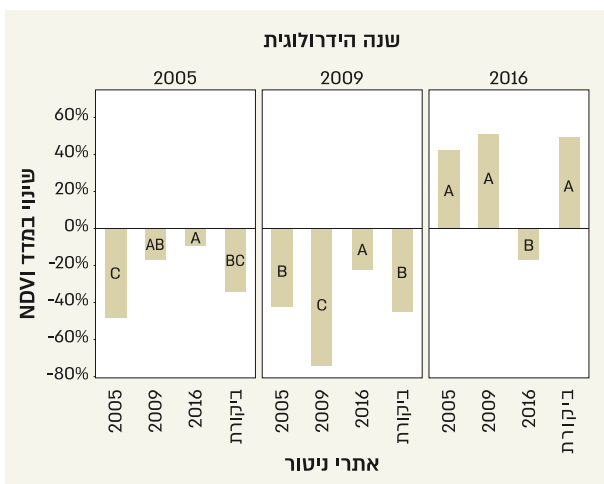
א. התפלגות המשקעים העונתית במהלך שנות הניטור. הקו המקווקו מציין את הממוצע הרב-שנתי במהלך עונות הניטור; ב. התפלגות מספר ימי הגשם החודשית במהלך עונת הגשמים. בירוק – התפלגות ימי הגשם ארוכת טווח באתר יער השגרירים (2000–2021); באדום – התפלגות ימי הגשם במהלך שנים שחונות; ג. התפלגות המשקעים החודשית במהלך שנות הניטור. בירוק – התפלגות כמות המשקעים החודשית ארוכת טווח (2000–2021) באתר יער השגרירים; באדום – התפלגות המשקעים החודשית במהלך השנים השחונות.



איור 3

השפעת כמות המשקעים ויעילות הגשם העונתי על מצב הצומח באתרי הניטור

א. המתאם בין משקעים עונתיים ובין מדד NDVI, לפני בניית מערכות השיחים ואחריה. קו רציף אדום מציין את השנים שלפני בניית מערכות השיחים. קו רציף כחול מציין את השנים שאחרי בניית מערכות השיחים. קווי המגמה בגוון החום והכתום בחלקת הביקורת מציינים את הקשר בין מדד NDVI לפני נקודת ההיפוך ואחריה (C1 ו-C2, בהתאמה), בין השנים ההידרולוגיות 2008-2009, בהתאמה; ב. מהלך עונתי ורב-שנתי של מדד יעילות הגשם (x1000) בתקופת שנות הניטור. העקום האדום מייצג בכל אתר את השנים שלפני בניית מערכות השיחים, והעקום הכחול מייצג את השנים שלאחר בניית מערכות השיחים. במדרונות הביקורת העקום החום מייצג את השנים לפני נקודת ההיפוך, והעקום הכתום מייצג את השנים אחריה. העקום המקווקו בגוונים אדום וכחול מייצג את הממוצע הרב-שנתי של מדד יעילות הגשם בין השנים שלפני בניית מערכות השיחים ואחריה. נקודת ההיפוך מסומנת בקו מקווקו אנכי בצבע אדום.



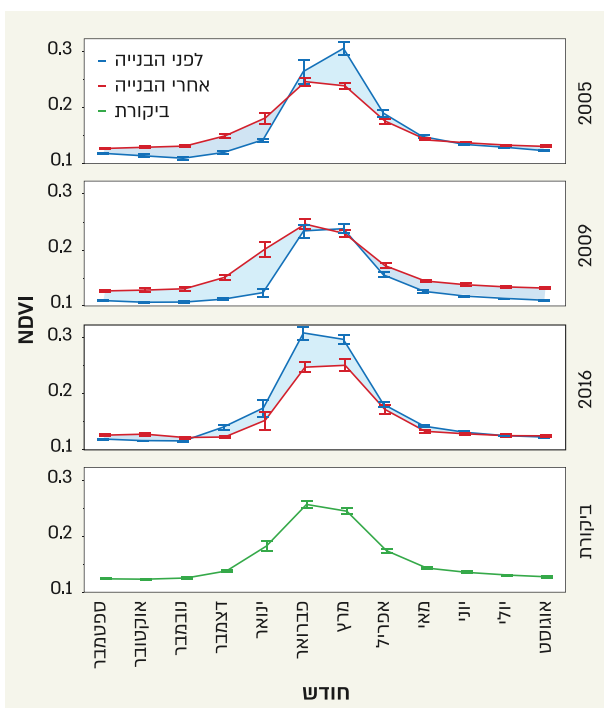
איור 4

התפלגות השינוי היחסי במדד NDVI ביחס לממוצע הרב-שנתי

העמודות מציגות את עונות הגשמים (2005, 2009, 2016) ותתי-העמודות מציגות את אתרי הניטור (2005, 2009, 2016 וביקורת) בשנים שמערכות השיחים נבנו בהן. ציר Y – גודל השינוי של מדד NDVI העונתי ביחס לממוצע הרב-שנתי; ציר X – אתרי הניטור. אותיות שונות מציגות הבדל מובהק בין העמודות ($p < 0.05$).

ב-5% בהשוואה לעונות ההידרולוגיות שלפני בניית מערכות השיחים. עם זאת לא נמצאה מגמה ברורה של שינוי במדד יעילות הגשם לאורך כל עונות הניטור.

איור 4 מציג את הסטייה היחסית באחוזים של מדד ה-NDVI הממוצע (בעונות שנבנו מערכות השיחים), עבור כל אתר ביחס לממוצע הרב-שנתי. בעונת 2005 הסטייה מהממוצע הרב-שנתי הייתה שלילית, בדומה ליתר האתרים. עם זאת, הפער בין המדרונות באתר נטיעות 2005 ליתר האתרים היה גדול באופן ניכר והגיע לכדי 47% כחות מהממוצע הרב-שנתי. באופן דומה, בעונת 2009 נמצא שגודל הסטייה מהממוצע הרב-שנתי בעונה זו (75% נמוך מהממוצע הרב-שנתי) נמוך באופן מובהק מהסטייה שנצפתה באתרים שלא נבנו בהם מערכות השיחים, כמו גם במדרונות באתר הנטיעות "2005", שבו נבנו מערכות השיחים ארבע שנים קודם לכן. בעונת 2016 הסטייה מהממוצע הרב-שנתי הייתה שלילית, בניגוד לאתר הביקורת ולאתרי הנטיעות הוותיקים, שהסטייה בהם הייתה גדולה מהממוצע הרב-שנתי (17.6% נמוך מהממוצע הרב-שנתי).



איור 5

ההתפלגות החודשית של מדד NDVI בכל אתר ניטור

העקום הכחול מתאר את ההתפלגות החודשית לפני בניית מערכות השיחים. העקום האדום מתאר את ההתפלגות החודשית אחרי בניית המערכות. העקום הירוק מתאר את ההתפלגות החודשית באתר הביקורת.

לאחר בניית מערכות השיחים ערכו הממוצע של מדד NDVI בכל אתרי הנטיעה הוותיקים היה גבוה באופן מובהק ($p < 0.0001$) במהלך חודשי הסתיו. באתר "2016" שניטע בשלב המאוחר ביותר, זוהתה מגמה דומה, אם כי ללא מובהקות ברורה. באתרים "2005" ו-"2009" היה הערך הממוצע לאחר בניית מערכות השיחים גבוה אף בהשוואה למדרונות הביקורת (0.128, 0.129 ו-0.123, בהתאמה). מגמה דומה נצפתה באתר "2016", אך הערך הממוצע לאחר בניית מערכות השיחים היה דומה למדרונות הביקורת (0.122). נטייה דומה נצפתה במהלך חודשי החורף והקיץ באתרים "2005" ו-"2009" לאחר בניית מערכות השיחים. באתרים האלה היה הערך הממוצע גבוה באופן מובהק ($p < 0.0001$), ואף גבוה מהממוצע בהשוואה למדרונות הביקורת. מנגד, ערך המדד הממוצע באתר "2016" היה נמוך בהשוואה לשנים שלפני בניית מערכות השיחים.

בחינת המהלך העונתי של המדד לפני בניית מערכות השיחים ואחריה בכל אחד מהאתרים מתוארת באיור 5. ניתן לראות בו את התפלגות הערך הממוצע של מדד NDVI לאורך עונת הגשמים. באתרים "2005" ו-"2009" נראה כי ערכי המדד בחודשי הסתיו וראשית החורף גדלו בהשוואה לתקופה שלפני בניית מערכות השיחים. בעוד שבאתר "2005" ניכרת מגמת ירידה במהלך חודש החורף ודמיון במהלך חודשי הקיץ, באתר "2009" ניכרת עלייה משמעותית בערך הממוצע של מדד NDVI במהלך החורף, למעט מרץ (שיא עונת הצימוח). באתר "2016" נראה שערכי NDVI במהלך חודשי החורף והאביב, לאחר בניית מערכות השיחים, נמוכים בהשוואה לתקופה שלפני בניית.

של המהלך העונתי של כיסוי הצומח (איור 5).

לנוכח הממצאים, סביר להניח שלעיתוי בניית מערכות השיחים יש חשיבות גדולה לקצב השיקום, מכיוון שהתבססות צומח עשבוני תלויה בכמות המשקעים, בתכרסות העונתית והרב-שנתית ובתכונות הקרקע. ייתכן שהשינוי הקטן שנמדד באתר "2009" לפני בניית השיחים ואחריה טמון בעובדה שנבנה לאחר רצף של ארבע שנים שחונות (איור 3ב, איור 4), בהשוואה לשינוי המשמעותי שנמדד באתר "2005" שנבנה לאחר שנה גשומה (358 מ"מ).

בעונת הגשמים 2016 כמות המשקעים העונתית הייתה נמוכה ב-30% מהממוצע הרב-שנתי (רק 201.9 מ"מ). כצפוי, באתר שניטע באותה שנה נמדדה ירידה במדד NDVI בהשוואה לממוצע הרב-שנתי. לעומת זאת, באתר הניטור הוותיקים יותר ("2005" ו-"2009") השינוי ב-NDVI היה חיובי למרות העונה השחונה (איור 4). עובדה זו מצביעה על ההשפעה החיובית ארוכת הטווח שיש לבניית השיחים ולהסדרת רעייה על הצומח העשבוני. מאידך גיסא, ייתכן כי העלייה בממוצע העונתי של מדד הצומח בכל יתר אתרי הניטור למרות העונה השחונה קשורה לעונת הגשמים השופעת ב-2015, שנמדדו בה 394.5 מ"מ (51% יותר מהממוצע הרב-שנתי) ושהובילה לשיפור במדדי הצומח גם בכל אתרי ניטור האחרים שהותרה בהם רעייה מבוקרת.

בשנים שלפני בניית מערכות השיחים, הערך הממוצע של מדד יעילות הגשם היה נמוך בהשוואה לשנים העוקבות, למעט אתר "2016" שנמדדה בו ירידה בערך הממוצע בהשוואה לשנים שלפני בניית השיחים. עם זאת, העובדה שהערך הממוצע של מדד יעילות הגשם באתר "2016" בתקופה שלפני בניית השיחים גבוה בהשוואה למדרונות הביקורת, נובעת, ככל הנראה, מהשנים הגשומות שנכללו בחישוב הממוצע עד לשנת הבנייה. סביר להניח שהעלייה הניכרת במדד יעילות הגשם באתר "2005" נובעת מאיגום מי הנגר לאורך המדרונות על ידי השיחים, שסייעו להגברת זמינות המים לצומח העשבוני ולמיתון דליפת נגר וסחיפה מהמדרון. נטייה זו לא נצפתה באתר הניטור הצעיר ביותר ("2016") לאחר בניית מערכות השיחים, אך לנוכח הממצאים אנו סבורים שמערכת השיחים במדרונות האלה תוביל למגמה דומה בשנים הקרובות.

מסקנות

במחקר זה נבחנו ההשפעות של נטיעת יער סוואנה הנתמך על ידי מערכות קציר נגר (שיחים) 4, 11, ו-15 שנים ממועד הנטיעה, באתר שהיה חשוף במשך שנים ארוכות לרעיית יתר בלתי מבוקרת. תקופת הניטור נפרסה על פני 21 עונות, החל מעונת

השפעת השנים השחונות בין 2005 ל-2012 ניכרת בכל האתרים, גם בממוצע הרב-שנתי של המשקעים במהלך תקופת הניטור, בהשוואה לממוצע הרב-שנתי באזור. ממוצע המשקעים העונתי בין השנים 2013-2020, לאחר רצף השנים השחונות, דומה לממוצע הרב-שנתי באזור (289, ו-287 מ"מ לשנה, בהתאמה). היעדר מגמה ברורה של שינוי בכמות המשקעים העונתית לאורך תקופת הניטור תואם את הממצאים שתועדו במחקרים אחרים באזור (Argaman et al., 2020). עם זאת, בניגוד למחקרים קודמים שדיווחו על קשר חיובי וברור בין כמות המשקעים העונתית ובין התבססות צומח עשבוני, נמצא קשר מובהק בין המשתנים הללו רק באתר "2009", בשנים שלפני בניית מערכות השיחים ובמדרונות הביקורת (איור 3א). ייתכן כי היעדר קשר זה באתרים האחרים נובע מלחץ הרעייה האינטנסיבי עד לבניית המערכות ונטיעת היער. לראיה, בכל האתרים שהרעייה בהם הופסקה, כולל מדרונות הביקורת, נמצא קשר חיובי וברור בין כמות המשקעים העונתית ובין מדד הצומח. חריג לכלל זה הוא אתר "2016", שמערכות השיחים נבנו בו לאחרונה.

באתרים "2005" ו-"2009" תרומת המשקעים לעלייה במדד הצומח לפני בניית מערכות השיחים הייתה נחותה בהשוואה לשנים העוקבות, שההשפעה של כמות המשקעים על מדד NDVI עלתה בהן באופן ניכר בהשוואה למדרונות הביקורת. מדד יעילות הגשם, המתאר את היחס בין מדד NDVI לכמות המשקעים העונתית, מראה כי בשני האתרים ניכרת עלייה ביעילות ההשקיה בהשוואה לתקופה שלפני בניית השיחים. באתר הוותיק ביותר, "2005", נמצא השיפור הגדול ביותר, שאף עולה על זה שנמדד במדרונות הביקורת. באופן דומה, באתר "2009" ניכר שיפור בערכי מדד יעילות הגשם לאחר בניית השיחים, אך השינוי היחסי נמוך בהשוואה למדרונות הביקורת (9% בהשוואה ל-13%, בהתאמה). הסבר ראשוני לממצא זה הוא ההשפעה השלילית של השנים הראשונות לאחר ההפרה על הממוצע הרב-שנתי, היות שהוכח כי השנים האלה היו נמוכות במיוחד בכל האתרים בשנת ההקמה (איור 4). באתר "2016" הערך הממוצע לאחר בניית השיחים נמוך בהשוואה לתקופה הקודמת וכן בהשוואה למדרונות הביקורת. ממצאים אלה מאששים ממצאי מחקרים אחרים (Stavi et al., 2015; Stavi and Argaman, 2016) שבחנו את השפעת מערכות קציר הנגר על תכונות הקרקע והצומח העשבוני במדרונות ביער השגרירים.

ניכר שבטווח הקצר בניית מערכות השיחים גורמת לירידה במדד הצומח בעונת הנטיעה (איור 4). עם זאת, השינוי החיובי במדד הצומח בטווח הארוך מעיד על התועלת ארוכת הטווח של בניית מערכות קציר הנגר, המסייעות להתבססות צומח עשבוני בהשוואה למדרונות ללא התערבות והסדרה

היחסי ביעילות ההשקיה נמצא נמוך ביחס למדרונות שלא הופרו, אך הוא נובע ככל הנראה מעיתוי הבנייה, שהתרחשה במהלך רצף שנים שחונות.

ממצאים אלה מאששים חלקית הנחות שנבחנו במחקרים קודמים, שהוערך בהם כי שיפור בתכונות הקרקע בעקבות בניית מערכות שיחים יוביל לשיפור במצב הצומח במדרונות כעשור לאחר בנייתם. עם זאת, נראה כי פרק הזמן הנדרש לשיקום ולשיפור של מצב הצומח במדרונות שנבנו בהם מערכות השיחים, גדול מעשור. יש לסייג ממצא זה נוכח העובדה שהמדרונות שנבחנו במחקר הופרו במהלך שנים שחונות.

מעבר לכך, ראוי לציין כי מידת ההשפעה על מגוון הצומח ויחסי הגומלין בין הקרקע במדרונות ושטחי האיגום בשיחים לא נבחנה במחקר זה. התהליכים האלה ייבחנו במסגרת המחקרים הקרובים המבוצעים בתחומי יער השגרירים.

תודות

המחברים מודים למעריכים האנונימיים על הערותיהם המועילות.

הגשמים 2000 ועד 2020, ואפשרה בחינה של השינויים לאורך השנים במדרונות המנוטרים וביניהם. במהלך תקופה זו תועד רצף של שמונה שנים שחונות – בין השנים 2005 ועד 2012 – שכמות המשקעים העונתית בהן הייתה נמוכה באופן מובהק מהמוצע הרב-שנתי. העונה הראשונה ברצף השנים השחונות (2005) הייתה העונה הראשונה שניטעו בה מדרונות בתחומי היער.

למרות ההשפעה המיידית של בניית השיחים, שבאה לידי ביטוי בדעיכה מיידית של מדד NDVI בהשוואה לממוצע הרב-שנתי, נמצא כי בטווח הארוך בניית מערכות שיחים מגבירה את הצימוח העשבוני במדרונות. נוסף על כך, נמצא כי חוזק הקשר בין המשקעים ובין מדד הצומח גדל לאחר בניית מערכות השיחים, ככל הנראה משילוב של שני גורמים עיקריים: א. מניעת רעייה בשנים הראשונות לאחר השינוי בשימוש הקרקע; ב. שיפור זמינות המים לצומח בעקבות שיפור בכושר איגום ואצירת מי הנגר במדרונות.

במקביל, בטווח הארוך, נמצא שתועלת ההשקיה (גשם + נגר) להתפתחות צומח עונתי במדרונות בהם שנבנו בהם שיחים לפני 15 שנים עולה על הערך הממוצע שנמדד במדרונות הביקורת. עם זאת, בניגוד להשערה שהוצגה במחקרים קודמים, במערכות שיחים שנבנו לפני כעשור השיפור

מקורות

- Chang J, Tian JX, Zhang ZX, Chen X, Chen YZ, Chen S, et al. 2018. Changes of grassland rain use efficiency and NDVI in Northwestern China from 1982 to 2013 and its response to climate change. *Water*, 10(11), 1689.
- Chevalier M, Russel JC, and Knape J. 2019. New measures for evaluation of environmental perturbations using Before-After-Control-Impact analyses. *Ecological Applications*, 29(2), e01838.
- Deitch MJ, Sapundjieff MJ, and Feirer ST. 2017. Characterizing precipitation variability and trends in the world's Mediterranean-climate areas. *Water*, 9(4), 259.
- 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(1–2), 15.
- Forster EJ, Healey JR, Dymond C, and Styles D. 2021. Commercial afforestation can deliver effective climate change mitigation under multiple decarbonization pathways. *Nature Communications*, 12(1), 3831.
- Golodets C, Sternberg M, Kigel J, Boeken B, Henkin Z, Seligman NAG, et al. 2015. Climate change scenarios of herbaceous production along an aridity gradient: Vulnerability increases with aridity. *Oecologia*, 177, 971–979.
- בורו נ, טיקוצקי ע וארגמן א. 2023. מחקר אקולוגי ארוך טווח (LTER) לחקר נטיעות בצפון הנגב בעיר השגרירים. דוח התקדמות למחקר 14-058-17-90.
- השירות המטאורולוגי הישראלי. 2023. אטלס אקלימי. <https://ims.gov.il/he/ClimateAtlas>
- יוסף י, בהר"ד ע, אוזן ל, אוסטינסקי-צדקי א, כרמונה י, חלפון נ ושות'. 2019. שינוי האקלים בישראל – מגמות עבר ומגמות חזויות במשטר הטמפרטורה והמשקעים. דו"ח מחקר מס' 0000075-2019-0804-4000, השירות המטאורולוגי הישראלי.
- Argaman E, Barth, R, Moshe Y, and Ben-Hur M. 2020. Long-term effects of climatic and hydrological variation on natural vegetation production and characteristics in a semiarid watershed: The northern Negev, Israel. *Science of the Total Environment*, 747, 141146.
- Brand D, Moshe I, Shaler M, and Zuk A. 2008. *Afforestation in Israel – reclaiming ecosystems and combating desertification*. Keren Kayemeth Lelsrael-Jewish National Fund. <https://www.kkl-jnf.org/research-and-development/forestry-and-ecology-research/professional-materials/combating-desertification-rehabilitating-ecosystems/>

- Rotem G, Bouskila A, and Rothschild A. 2014. *Ecological effects of afforestation in the Northern Negev*. Society for the Protection of Nature in Israel. 65pp
- Rouse JW, Haas RH, Schell JA, and Deering DW. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains. *Ert's. Nasa Special Publication*, 351, 309–317.
- Schwärzel K, Zhang L, Montanarella L, Wang Y, and Sun G. 2020. How afforestation affects the water cycle in drylands: A process-based comparative analysis. *Global Change Biology*, 26, 944–959.
- Shachak M, Sachs M, and Moshe I. 1998. Ecosystem management of desertified shrublands in Israel. *Ecosystems*, 1, 475–483.
- Stavi I and Argaman E. 2016. Soil quality and aggregation in runoff water harvesting forestry systems in the semi-arid Israeli Negev. *Catena*, 146, 88–93.
- Stavi I, Fizik E, and Argaman E. 2015. Contour bench terrace (shich/shikim) forestry systems in the semi-arid Israeli Negev: Effects on soil quality, geodiversity, and herbaceous vegetation. *Geomorphology*, 231, 376–382.
- Stavi I, Siad SM, Kyriazopoulos AP, and Halbac-Cotoara-Zamfir R. 2020. Water runoff harvesting systems for restoration of degraded rangelands: A review of challenges and opportunities. *Journal of Environmental Management*, 255, 109823.
- Stroosnijder L, Moore D, Alharbi A, Argaman E, Biazin B, and Van der Elsen E. 2012. Improving water use efficiency in drylands. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4, 497–506.
- Thiault L, Kernalguyen L, Osenberg CW, and Claudet J. 2017. Progressive-change BACIPS: A flexible approach for environmental impact assessment. *Methods in Ecology and Evolution*, 8, 288–296.
- USGS. 2023. MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250 m SIN Grid. <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13q1v006/>
- 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, 5022–5045.
- Grum B, Woldearegay K, Hessel R, Baartman JEM, Abdulkadir M, Yazew E, et al. 2017. Assessing the effect of water harvesting techniques on event-based hydrological responses and sediment yield at a catchment scale in northern Ethiopia using the Limburg Soil Erosion Model (LISEM). *Catena*, 159, 20–34.
- Helman D, Mussery A, Lensky IM, and Leu S. 2014. Detecting changes in biomass productivity in a different land management regimes in drylands using satellite-derived vegetation index. *Soil Use and Management*, 30, 32–39.
- LTER ISRAEL. 2023. Israeli Long-term Ecological Research Network. <http://lter-israel.org.il>
- Middelton N. 2019. Variability and trends in dust storm frequency on decadal timescales: Climatic drivers and human impacts. *Geosciences*, 9(6), 261.
- Moreno-Gutierrez C, Battipaglia G, Cherubini P, Delgado-Huertea A, and Querejeta JI. 2015. Pine afforestation decreases the long-term performance of understorey shrubs in a semi-arid Mediterranean ecosystem: A stable isotope approach. *Functional Ecology*, 29, 15–25.
- Mussery A, Helman D, Leu S, and Budovsky A. 2016. Modeling herbaceous productivity considering tree-grass interactions in drylands savannah: The case study of Yatir farm in the Negev drylands. *Journal of Arid Environments*, 124, 160–164.
- Nearing MA, Yin SQ, Borrelli P, and Polyakov VO. 2017. Rainfall erosivity: An historical review. *Catena*, 157, 357–362.
- Orenstein DE, Groner E, Argaman E, Boeken B, Preisler Y, Shachak M, et al. 2012. An ecosystem services inventory: Lessons from the Northern Negev long-term social ecological research (LTSER) platform. *Geography Research Forum*, 32, 96–118.
- Paz-Kagan T, Ohana-Levi N, Shachak M, Zaady E, and Karnieli A. 2017. Ecosystem effects of integrating human-made runoff-harvesting systems into natural dryland watersheds. *Journal of Arid Environments*, 147, 133–143.
- Ramón Vallejo V, Smanis A, Chirino E, Fuentes D, Valdecantos, and Vilagrosa A. 2012. Perspectives in dryland restoration: Approaches for climate change adaptation. *New Forests*, 43, 561–579.



עבודת שדה בחלקה "2009" ביער השגרירים, 2018
צילום: אלי ארגמן



לימן מוצף מים, 2021
צילום: אלי ארגמן