



המארג
התכנית הלאומית
להערכת מצב הטבע

נספח טכני

ניטור צומח

דו"ח מצב הטבע

ישראל 2023 | המגוון הביולוגי

תוכן עניינים

1.	ניטור צומח מעוצה בדגימה קרקעית.....	2
1.1.	עיבוד וסינון לפני ניתוח	2
1.2.	ניתוח	6
1.2.1.	ניתוח מדדי מגוון ביולוגי - עושר המינים, השפע הכולל, ושפע ממוצע למין.....	6
1.2.2.	ניתוח הרכב החברה.....	8
1.3.	מקורות	8
2.	ניטור צומח בחישה מרחוק.....	10
2.1.	כללי.....	10
2.2.	מיפוי מגמות בכיסוי הצומח.....	10
2.3.	מיפוי תצורות צומח עיקריות.....	14
2.4.	ניתוח.....	15
2.5.	מקורות.....	16

1. ניטור צומח מעוצה בדגימה קרקעית

1.1. עיבוד וסינון לפני ניתוח

כל שלבי העיבוד והסינון לפני הניתוח בוצעו בסביבת R. לכל יחידת ניטור נכתב קוד (script) ב-R המותאם עבורה, ובו בוצעו כל השלבים להלן:

החורש הים תיכוני - Maquis botanical analysis.R

היער המחטני הנטוע - Analyzing the planted forest.R

ספר המדבר - Analyzing botanical survey 2018 data from the semi desert.R

הר הנגב - Analyzing Negev Highlands.R

הדרום הצחיח - Arid south analysis script.R

1. **סינון הנתונים:** בחורש הים תיכוני נתוני שנת הפיילוט (2013) הוצאו מהניתוח. ביחידות החורש הים תיכוני והיער המחטני הנטוע, סוננו החוצה גם רשומות שלא תועד המרחק מתחילת החתך. בספר המדבר, נתוני מחזור הניטור השלישי (2018) הוצאו מהניתוח משום שפרוטוקול הניטור היה שונה אז מאשר ביתר מחזורי הניטור (חלקות הדיגום הוגדלו באופן משמעותי במחזור זה לעומת האחרים ונסרקו בסיוע רחפנים לעומת דיגום רגלי בלבד ביתר מחזורי הניטור).

2. **טיוב הנתונים:**

- א. במידת הצורך, הואחדו שמות האתרים והחלקות היכן שהיו הבדלי איות (לדוגמה, גבעת יערים איות לעתים Givat Yearim ולעתים Givat Yeaarim).
- ב. כמו כן, היות שהקואורדינטות המדויקות שתועדו בכל מחזור דיגום היו שונות מעט (פחות מאלפית המעלה, דהיינו, פחות מ-100 מ'), נלקח הערך הממוצע של קו הרוחב וקו האורך.
- ג. היכן שתועדו רק השמות המדעיים של מיני הצומח, הושלמו השמות העבריים התואמים. שגיאות איות בשמות המינים תוקנו.
- ד. ביחידות החורש הים תיכוני והיער המחטני הנטוע (שנדגמו בחתכים מצפון לדרום), שמות כיווני החתכים הואחדו (לדוגמה, "east-west" ו-"west-east").
3. **טקסונומיה:** שמות מדעיים ועבריים וכן הגדרת צורת החיים (חד שנתיים, גיאופיטים, המיקרופיטופיטים, בני שיח, שיחים או עצים) עודכנו על פי המגדיר המקוון של "צמחיית ישראל וסביבתה" (דנין וספיר, 2023), שהוער ותוקן ע"י צוות בוטנאי מכון דש"א (שמש, תקשורת אישית).
4. **"עושר המינים"** הוגדר כמספר המינים שהוגדרו בחלקה. צמחים שלא הוגדרו לרמת המין לא נכללו בעושר המינים, אלא אם לא היה חשש לכפילות מינים בחלקה. לדוגמה, הסוג אשל (*Tamarix*) לא הוגדר לרמת המין בהר הנגב, ולכן פרטים מסוג זה נכללו בניתוח עושר המינים כמין אחד.
5. **"שפע"** הצומח המעוצה הוגדר כאחוז הכיסוי של כל מין מכלל שטח החלקה, ולא כמספר הפרטים כמו עבור בעלי החיים. אחוז הכיסוי חושב בהתאם לפרוטוקול הניטור שיושם ביחידה. ביחידות החורש הים תיכוני והיער המחטני הנטוע, נפרשו שני חתכים (צפון-דרום ומזרח-מערב) בני 16 מ' כל אחד. לאורך כל חתך, הוגדרו כל מיני הצומח המעוצה מדי חצי מטר (כולל נקודה בתחילת החתך ונקודה בסופו): 33 נקודות בכל חתך ו-66 נקודות בסך הכל בדיגום בחלקה. על כן, אחוז הכיסוי של מין ביחידות אלה הוגדר כמספר הנקודות בהן הוא דווח חלקי 66 (מספר הנקודות הכולל בדיגום). לדוגמה, המין אלת המסטיק (*Pistacia lentiscus*) דווח מ-17 נקודות בחלקה בית אורן רחוק 7 בשנת 2013 (מחזור ניטור T0), ולכן אחוז הכיסוי שלו בחלקה זו הוא 17 חלקי 66 = 25.76%.
- ביחידות הדרומיות (ספר המדבר, הר הנגב והדרום הצחיח), יושם פרוטוקול ניטור שונה: הסוקרים תיעדו שני קטרים (צפון-דרום ומזרח-מערב) עבור כל צמח מעוצה בחלקה (שגודלה השתנה בין יחידות הניטור השונות). משני קטרים אלה חושב שטח הצמח על פי נוסחת שטח האליפסה:
- $$S = \pi \cdot a \cdot b$$
- כאשר a הוא הרדיוס הארוך, b הוא הרדיוס הקצר ו- S הוא שטח האליפסה. או במילים: פאי כפול מכפלת הרדיוסים. היות שאורך הקוטר הוא כפליים מאורך הרדיוס, נוסחה זו שקולה לנוסחה הבאה:

$$S = \frac{\pi \cdot d1 \cdot d2}{4}$$

כאשר 1d הוא קוטר הצמח לאורך הציר צפון-דרום ו-2d הוא קוטר הצמח לאורך הציר מזרח-מערב. או במילים, פאי כפול מכפלת הקטרים חלקי ארבע. אחוז הכיסוי של כל מין חושב בתור סכום השטחים של כל הפרטים מאותו מין חלקי שטח החלקה. לדוגמה, בהר הנגב גודל כל חלקה הוא 8 מ' על 8 מ', ולכן שטחה הוא 64 מ"ר. בחלקה ביסל"ח רחוק מדרון 8 בשנת 2013 תועדו שלושה צמחים של יפרוק המדבר: קטרי הראשון הם 30 ס"מ על 30 ס"מ, קטרי השני הם 40 ס"מ על 40 ס"מ, וקטרי השלישי הם 60 ס"מ על 60 ס"מ. לפי נוסחת שטח האליפסה יוצא ששטחי יפרוקי המדבר בחלקה הם 0.071, 0.126 ו-0.283 מ"ר בהתאמה, ובסך הכל 0.48 מ"ר. היות ששטח החלקה כאמור הוא 64 מ"ר, אחוז הכיסוי של יפרוק המדבר בחלקה זו הוא 0.75%.

6. **"השפע הכולל"** הוגדר כסך השפע מכל המינים שנמצאו בדגימה. היות שעבור הצומח המעוצה השפע הוגדר בתור אחוז כיסוי ולא בתור מספר הפרטים, השפע הכולל הוגדר אף הוא באחוזים. עם זאת, בחלק מהמקרים הוגדר שפע כולל בתור אחוז כיסוי גבוה מ-100%, משום שהצמחים חפו זה על זה - מצב שכיח בחלקות החורש הים תיכוני למשל, בהן בנקודות רבות תועדו מספר מיני צמחים.

7. **"השפע הממוצע למין"** הוגדר בתור הממוצע ההנדסי של שפע המינים (כפי שהוגדרו עבור עושר המינים - ראו לעיל) שתועדו בדגימה. מדד זה חושב בשני שלבים: ראשית, חושב סך השפע של כל מין בחלקה ע"י סכימת אחוזי הכיסוי של כל הפרטים השייכים לאותו מין; שנית, הממוצע ההנדסי של השפע של המינים חושב לפי הנוסחה הבאה:

$$GMA = e^{\frac{\sum (\ln(sp.abnd))}{n}}$$

כאשר GMA הוא השפע הממוצע ההנדסי למין (ר"ת של Geometric mean abundance), בעוד e הוא בסיס הלוגריתמים הטבעיים, sp.abnd הוא השפע של כל מין ו-n הוא מספר המינים בדגימה. הפונקציה ln היא לוגריתם טבעי. היות שהשפע של צומח מעוצה הוגדר כאחוז כיסוי (ראו לעיל), גם השפע הממוצע למין מבוטא כאחוז כיסוי. בעוד שנוסחה זו אינה מוגדרת כאשר לא נמצאו צמחים מעוצים כלל בדגימה (דהיינו, כאשר n = 0 ואז נדרש להציב אפס במכנה השורש בנוסחה לעיל), מצב זה לא התרחש בדגימות הצומח המעוצה. כאשר מצב זה התרחש בטקסונים אחרים (דוגמת הזוחלים), דגימות אלה הוצאו מניתוח מדד השפע הממוצע למין.

לדוגמה, ביחידת הדרום הצחיח בחלקה עין יהב קרוב 8 נמצאו בשנת 2016 (מחזור ניטור T0) כ-24 צמחים מעוצים: 16 צמחים שלא זוהו כלל, 5 יפרוקי מדבר ושלושה חמדי השיח. הצמחים הבלתי מזוהים הוצאו מהניתוח, ואילו השפע (אחוז הכיסוי) של יפרוקי המדבר היה בסך הכל 1.42% והשפע של חמדי השיח היה בסך הכל 1.97%. לכן, השפע הממוצע למין לדגימה זו היה:

$$GMA = e^{\frac{\sum (\ln(sp.abnd))}{n}} = e^{\frac{\ln(1.42\%) + \ln(1.97\%)}{2}} = e^{\frac{-4.25 - 3.93}{2}} = e^{\frac{-8.18}{2}} \\ = e^{-4.09} = 1.67\%$$

דהיינו, השפע הממוצע למין (המבוטא כזכור כאחוז כיסוי) לדגימה זו היה 1.67%.

שלושת מדדי החברה שנבחרו עבור דו"ח מצב הטבע מייצגים תכונות שונות של המגוון הביולוגי בדגימה. בעוד שעושר המינים מתייחס אך ורק למספר המינים ואינו משקלל את שפעם כלל, השפע הכולל מתייחס רק לשפע ואינו מתייחס למספר המינים; השפע הממוצע למין הוא מדד שמשקלל הן את מספר המינים ואת השפע שלהם, והוא עולה או יורד הן בתגובה לשינוי בשפע של כל אחד מהמינים והן בתגובה לשינוי במספר המינים. בניגוד לממוצע החשבוני, הממוצע ההנדסי גם נמוך יותר וגם רגיש פחות לערכים קיצוניים, הרחוקים מאוד ממרבית הערכים - כך שהשפע הממוצע למין הוא מדד שאינו רגיש לנוכחות מינים מאוד שכיחים. ניקח את הדוגמה שנתנו קודם, מעין יב קרוב 8 בשנת 2016: אילו היה נמצא בחלקה מין שלישי, שכיח ביותר, המכסה כ-70% משטח החלקה, השפע הממוצע למין היה עולה מ-1.67% ל-5.8% בלבד. לעומת זאת, אילו השפע הממוצע למין היה מחושב לפי הממוצע החשבוני ולא לפי הממוצע ההנדסי, השפע הממוצע למין היה גבוה יותר מפי ארבעה (24.5%) וזאת בשל רגישות הממוצע החשבוני לשפע הגבוה של המין השכיח. השפע הממוצע למין הוא מדד מקובל למגוון ביולוגי, למשל עבור Living Planet Index (Puurttinen et al., 2022) ונמצא כי הוא משקף נאמנה את כיוון ועוצמת המגמה שהוגדרו בתרחישי סימולציה של ירידה במגוון הביולוגי (Santini et al., 2017).

עם זאת, השפע הממוצע למין הוא מדד קשה יותר להבנה לעומת עושר המינים או השפע הכולל - כאשר עושר המינים יורד, פירוש הדבר שבדגימות מאוחרות יותר נמצאו פחות מינים לעומת דגימות מוקדמות יותר, וכאשר השפע הכולל גבוה יותר קרוב לחקלאות לעומת הרחק ממנה, פירוש הדבר שהצומח המעוצה כיסה שטח גדול יותר קרוב לחקלאות לעומת הרחק ממנה; אך כיצד עלינו להבין מגמות או הבדלים בשפע הממוצע למין? הדרך האינטואיטיבית ביותר להבין את המדד הזה היא לחשוב על הממוצע של קצב השינוי בשפע (במכפלות; למשל עליה או ירידה פי שלושה בשפע) של המינים השונים, ולא על השינוי במספרים מוחלטים. לדוגמה, נניח שבחלקת הניטור שלנו אנו עוקבים אחר השפע (אחוז הכיסוי) של שני מינים שונים, ושניהם השתנו פי עשרה לאורך תקופת הניטור: המין הראשון עלה פי 10, מ-1% ל-10%, בעוד המין השני ירד פי 10, מ-2% ל-0.2%. במצב כזה, מדד השפע הממוצע למין לא יראה שום שינוי לאורך תקופת הניטור: 1.41% הן בתחילת הניטור והן בסופו. גם עושר המינים לא יראה שום שינוי (היה ויותר שני מינים) בעוד שהשפע הכולל יצביע על עליה גדולה (מ-3% ל-10.2%). לעומת זאת, אם מין המין הראשון היה עולה רק פי 5 (מ-1% ל-5%), מדד השפע הממוצע למין היה יורד מ-1.4% בתחילת הניטור ל-1% בלבד בסופו (שכן קצב העליה של המין האחד נמוך מקצב הירידה של המין השני), על אף שמדד השפע הכולל היה דווקא עולה (מ-3% ל-5.2%).

בדוגמה נוספת, נניח שלאורך תקופת הניטור שני המינים הראשונים התפשטו בחלקה: הראשון עלה מ-1% ל-5%, השני עלה מ-2% ל-4%, וגם נוסף לחלקה מין שלישי, נדיר יותר, שמכסה רק 0.1% משטח החלקה. על פניו, מדובר בשיפור במגוון הביולוגי, ואינטואיטיבית היינו מצפים שמדדי החברה יעלו; ואמנם, במצב כזה, עושר המינים היה עולה משני מינים לשלושה, השפע הכולל היה עולה מ-3% ל-9.1% - אולם השפע הממוצע למין היה דווקא יורד מ-1.41% ל-1.26%. תוצאה מפתיעה זו במדד השפע הממוצע למין מצביעה על הצורך להתבונן בתמונה כוללת שמציגים מדדי החברה ולא להתמקד באחד מהם. שלושת מדדי החברה שבדו"ח מצב הטבע מספקים נקודות מבט שונות ומשלימות על מצב המגוון הביולוגי. [לפירוט ודוגמאות נוספות Puurtinen et al. (2022)]

8. המשתנים הסביבתיים של כל חלקה חושבו לפי מיקומה הגיאוגרפי בשכבות ממ"ג שריגיות (ראסטריות) של ממוצע הטמפרטורה הרב שנתי, של ממוצע המשקעים הרב שנתי (Fick & Hijmans, 2017) ושל סוג הקרקע (דן ורז, 1970 עבור ישראל ו-Aridic Soils of the United States and Israel, 2003 עבור רמת הגולן). המשתנים האקלימיים הרציפים תוקנו (standardized) ע"י הפחתת הערך הממוצע של כלל הדיגומים ביחידה (כך שערכים נמוכים מהממוצע יהיו שליליים ולהפך) וחלוקתם בסטיית התקן של כלל הדיגומים ביחידה (כך שהערכים יבוטאו במספר סטיות תקן מהממוצע ולא במעלות צלזיוס או במ"מ גשם בשנה). צעד זה בוצע כחלק מפרוטוקול שימוש במודלים לינאריים כלליים (Santon et al., 2023) ונועד למנוע בעיות התכנסות של מודלים וכן מוודא כי השפעת המשתנים האחרים (כגון מרחק מישוב או מחקלאות, או הבדלים בין ערוצי נחלים למדרונות) נבחנת עבור התנאים האקלימיים הממוצעים ביחידה.

1.2. ניתוח

1.2.1. ניתוח מדדי מגוון ביולוגי - עושר המינים, השפע הכולל, ושפע ממוצע למין

1. מדדי המגוון הביולוגי נותחו באמצעות מודלים לינאריים רגילים או מעורבים (Generalized Linear Mixed Models) מהחבילה glmmTMB בסביבת R. בשלב הראשון, נבחרה משפחת ההתפלגות של המודל:
 - א- עבור ניתוחי עושר המינים, הבחירה היתה בין התפלגות פואסונית לבין התפלגות בינומית שלילית, ובוצעה באמצעות בחינת מקדם הפיזור (dispersion parameter) של המודל בעל התפלגות בינומית שלילית בפרמטריזציה ריבועית (nbinom2). עבור פרמטריזציה זו, ככל שמקדם זה גבוה יותר, כך ההבדל בין הממוצע לשונות נמוך יותר ומצביע על התאמה של מודל פואסוני דווקא.
 - ב- עבור ניתוחי שפע כולל ושפע ממוצע למין, ההתפלגות שנבחרה הייתה התפלגות ביתא, המתאימה עבור ניתוחי אחוז כיסוי צומח (Damgaard and Irvine, 2019).

2. ראשית הותאם המודל המלא, שכולל את מדד המגוון הביולוגי שנבחן (עושר המינים, שפע כולל או שפע ממוצע למין) בתור המשתנה המגיב ואת כל המשתנים הסביבתיים הרלוונטיים ליחידת הניטור כמשתנים מסבירים. עבור כלל היחידות נבחנו ההשפעות של מספר השנים שחלפו מאז תחילת הניטור, ממוצע הטמפרטורה הרב שנתי, ממוצע המשקעים הרב שנתי וסוג הקרקע. ביחידות החורש הים תיכוני והיער המחטני הנטוע נבחנו גם תת היחידה (הגליל, הכרמל או הרי יהודה), בספר המדבר נבחנה גם הקרבה ליישובים, בהר הנגב ובדרום הצחיח נבחנו גם ההבדלים בין ערוצי נחלים לבין מדרונות. בדרום הצחיח נבחנה גם הקרבה לחקלאות תמרים. זהות החלקה נכללה אף היא כמשתנה מסביר אקראי. אינטראקציות נכללו בין המשתנים שייצגו את שאלות הניטור (כגון בין המגמה בזמן לקירבה ליישוב).
- המשתנים הסביבתיים שאינם מוקד שאלת הניטור (קרי, השפעות האקלים והקרקע) שוקללו בניתוחים במטרה להימנע ממסקנות שגויות בדבר השפעות המשתנים המנוטרים (קרבה ליישובים או לחקלאות, הבדלים בין תתי יחידות ומגמות עתיות). הדבר מהותי במיוחד כאשר מסד הנתונים אינו מאוזן; לדוגמה אם עושר המינים גבוה יותר באזורים גשומים יחסית ביחידת הניטור, אך בדיגומים בשנים מאוחרות לא נדגמו חלקות באזורים צחיחים יחסית של יחידת הניטור, הדבר יגרום ליצוג חסר של החלקות הללו במסד הנתונים ועלול לגרום למסקנה שגויה בדבר עליה בעושר המינים.
3. לאחר התאמת המודל המלא כאמור, נבחנה השפעת השמטת אחד המשתנים המסבירים על קריטריון המידע של Akaike (AIC). במידה והשמטה זו הפחיתה את מדד זה או העלתה אותו בלא יותר מאשר 2 נקודות בהשוואה למודל בעל מדד AIC הנמוך ביותר שהושג עד כה, השמטה זו התקבלה והושמט משתנה מסביר נוסף וחוזר חלילה, עד קבלת המודל הסופי, שכל השמטת משתנה מסביר נוסף ממנו רק תעלה את ערך AIC ב-2 נקודות או יותר.
4. טיב התאמת המודל הסופי לתצפיות נבחנה באמצעות מבחנים וגרפים דיאגנוסטיים הזמינים בחבילה DHARMA בסביבת R.
5. המובהקות הסטטיסטית (ערך p) של המקדמים של המשתנים המסבירים במודל הסופי נבחנה באמצעות מבחן Wald, כפי שמחושב באמצעות הפונקציה summary של המודל.
6. מבחני פוסט-הוק לטובת השוואה בין רמות של משתנים איכותיים (קטגוריים), השוואת ממוצעים שוליים (marginal means) עבור משתנים המצויים באינטראקציה ובדיקת מובהקות עבור מגמות עתיות במודלים בהם משתנה הזמן היה באינטראקציה עם משתנים מרחביים בוצעו באמצעות חבילת emmeans בסביבת R.

1.2.2. ניתוח הרכב החברה

1. הרכב החברה (השפע של כל מין) נותח באופן סימולטני עבור כל המינים באמצעות ריבוי מודלים לינאריים בעלי משתנים לטנטיים (Generalized Linear Latent Variable Model - GLLVM) עם התפלגות ביתא באמצעות החבילה gllvm בסביבת R. בשלב הראשון, נבחר מספר המשתנים הלטנטיים ע"י השוואת AIC של מודלים בעלי 0 עד 5 משתנים לטנטיים.
2. בשלב הבא, הותאם המודל המלא הכולל את כל המשתנים המסבירים (והאינטראקציות) הרלוונטיים, כמתואר לעיל עבור מדדי המגוון הביולוגי.
3. לאחר מכן, נבחנה השפעת השמטת אחד המשתנים המסבירים בזה אחר זה, עד בחירת המודל הסופי – באותו אופן כמו עבור המודלים של מדדי המגוון הביולוגי.
4. לאחר בחירת המודל הסופי, הוא הורץ מחדש עם שגיאות תקן, על מנת לחשב מובהקות סטטיסטית עבור כל אחד מהמינים. המובהקות הסטטיסטית חושבה באופן המומלץ ע"י יוצרי החבילה: קרי, ע"י חישוב הרווח בר סמך של המקדם באמצעות הוספת והחסרת מכפלת סטיית התקן של המקדם ב-1.96, ובדיקה האם הוא חופף לאפס (ואז המקדם אינו שונה במובהק מאפס) או לא.
5. באופן דומה, הותאמו מודלי GLLVMs עבור כל אחת מצורות החיים במקום עבור כל אחת מהמינים, ומתוכם נבחר המודל הסופי באותה שיטה.

1.3. מקורות

דן י, רז צ. (1970). [מפת חבורות הקרקע של ישראל](#). האגף לשימור קרקע, משרד החקלאות, והאגף לקרקע ומים, מכון וולקני לחקר החקלאות.

דנין א, פרגמן-ספיר א. (2016). [צמחיית ישראל וסביבתה](#).

Akaike H (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19 (6): 716–723. <https://doi:10.1109/TAC.1974.1100705>

Damgaard CF, Irvine KM (2019). Using the beta distribution to analyse plant cover data. *J Ecol.*107:2747–2759. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13200>

Fick SE, RJ Hijmans (2017). WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37 (12): 4302–4315.

Hartig F (2022). DHARMa: Residual Diagnostics for Hierarchical (Multi-Level / Mixed) Regression Models. R package version 0.4.6, <https://CRAN.R-project.org/package=DHARMa>

Lenth R (2023). emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. R package version 1.8.6, <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>

Brooks ME, Kristensen K, Van Benthem KJ, Magnusson A, Berg CW., Nielsen A, ... & Bolker BM (2017). glmmTMB balances speed and flexibility among packages for zero-inflated generalized linear mixed modeling. *The R journal*, 9(2): 378–400.
<https://doi.org/10.32614/RJ-2017-066>

Niku J, Brooks W, Herliansyah R, Hui FKC, Korhonen P, Taskinen S, van der Veen B, & Warton DI (2023). gllvm: Generalized Linear Latent Variable Models.R package version 1.4.3.

Niku J, Hui FKC, Taskinen S, Warton DI (2019). gllvm - Fast analysis of multivariate abundance data with generalized linear latent variable models in R. *Methods in Ecology and Evolution*, 10: 2173-2182.

Puurtinen M, Elo M, Kotiaho JS (2022). The Living Planet Index does not measure abundance. *Nature* 601, E14–E15. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03708-8>

Santini L, Belmaker J, Costello MJ, Pereira HM, Rossberg AG, Schipper AM, Ceașu S, Dornelas M, Hilbers JP, Hortal J, Huijbregts MAJ, Navarro LM, Schiffers KH, Visconti P, & Rondinini C (2017). Assessing the suitability of diversity metrics to detect biodiversity change, *Biological Conservation* 213, Part B: 341–350.
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.08.024>

Santon M, Korner-Nievergelt F, Michiels NK & Anthes N (2023). A versatile workflow for linear modelling in R. *Front. Ecology and Evolution* 11:1065273.
<https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1065273>

Soil Map and Satellite Image of Israel, Aridic Soils of the United States and Israel. Website. Last updated 13.8.2003.
<https://cales.arizona.edu/OALS/soils/israel/soilmap.html>

2. ניטור צומח בחישה מרחוק

2.1. כללי

- בדו"ח זה מוצגים שני תוצרים של מיפוי צומח באמצעות חישה מרחוק, המבוססים על נתוני לוויין ברזולוציה שנעה בין 10 מטר (תצורות צומח) ל-30 מ' (מגמות בכיסוי צומח) והם מהווים המשך ושיפור לתוצרים שהוצגו בדו"ח 2022 כמו גם בדו"חות קודמים של המארג. הניטור כולו מבוסס על מדד הצומח NDVI.
- גודל תא השטח המינימלי למיפוי (פיקסל אחד) הוא 30X30 מטר.

2.2. מיפוי מגמות בכיסוי הצומח

כדי לבחון את השינויים בכיסוי הצומח הקייצי לאורך השנים 1984–2022 נעשה שימוש במדד NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Rouse et al., 1974). מדד זה הוא ביטוי לפעילות הפוטוסינתטית של הצומח (Gesse & Melesse, 2019), כאשר עלייה ב-NDVI מסמנת עלייה בירוקיות (greenness) של הצמחייה, תוצאה של עלייה בצפיפות הצומח הירוק (עלייה במספר הענפים והעלים ו/או עלייה בכמות הפריטים בתא השטח הנבדק), בבריאות של הצמחייה (מצב פיזיולוגי טוב יותר) או בשניהם יחד (Dutta Gupta et al., 2021). ירידה ב-NDVI מצביעה על ירידה בצפיפות הצומח או על הרעה במצבו. כמו כן, נמצא כי קיים קשר למדדים פיזיקליים כגון ביומסה (Wu et al., 2016), Leaf Area Index (LAI) (Goswami et al., 2015) ואחרים.

משמעות סולם הערכים של מדד ה-NDVI:

מדד זה נע בין (-1)–1, כאשר ערכים שליליים מבטאים מים או קרקע רטובה. מבדיקות שערכנו על אזורים שונים בישראל נמצא כי ערכים נמוכים מ-0.15 מבטאים לרוב אזור חשוף מצמחייה או עם צמחייה יבשה ודלילה ביותר, משטחים של צומח יבש יקבלו ערכים גבוהים במעט מ-0.15 וככל שהצמחייה ירוקה וצפופה יותר כך הערך עולה. במצבים מסוימים המדד אף עשוי להגיע לרוויה (ערך של 1) אולם זהו מצב נדיר שלרוב לא מתרחש בישראל. טבלה 1 מציגה את משמעותם של ערכי NDVI בעונת הקיץ בישראל (בחורף ובאביב הצמחייה העשבונית הירוקה תגרום לעלייה משמעותית בערכים). איור 1 מציג כיצד ערכים אלה באים לידי ביטוי כאשר מסתכלים על השטח מצילום אוויר ברזולוציה גבוהה.

טבלה 1: משמעותם של ערכי NDVI בקיץ בישראל מתוך בחינה של נתוני לווייני Landsat 2-Sentinel-8 בישראל והשוואה עם תצלומי אוויר ברזולוציה גבוהה

ערך NDVI	
(-1)-(-0.1)	מים
0.10-(-0.1)	קרקע רטובה
0.15-0.10	קרקע חשופה
0.18-0.15	צומח עשבוני יבש
0.25-0.18	עשבוני יבש עם מעט עצים
0.40-0.25	יער פארק
0.65-0.40	חורש
1-0.65	חורש צפוף



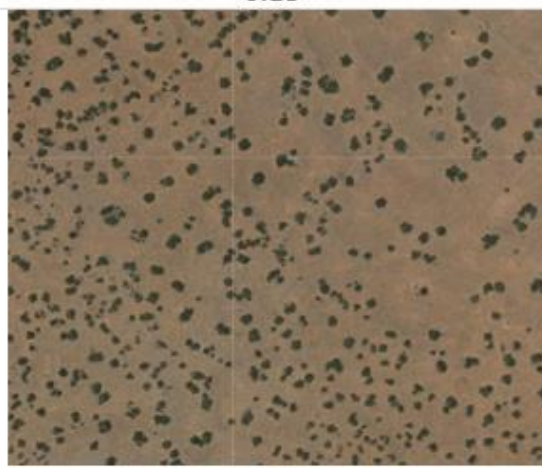
0.19



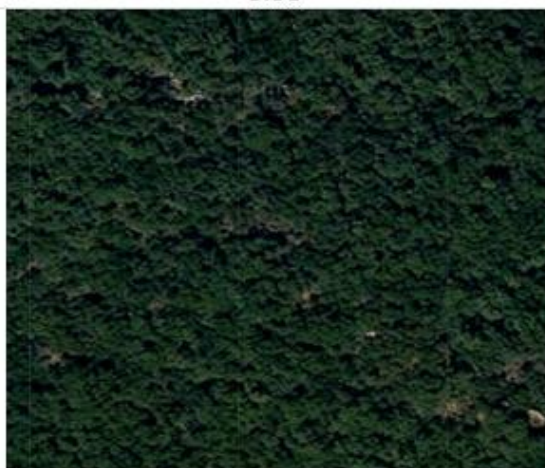
0.18



0.38



0.24



0.81



0.60

איור 1: ערכי NDVI ממוצעים בצפיפויות צומח שונות במהלך עונת הקיץ. הערך המובא בכל תמונה הוא הערך הממוצע על פני התמונה כולה. ניתן לדמות זאת לערך של פיקסל בודד אשר מייצג את הממוצע של מצב הצומח בתוך הפיקסל.

כדי למקד את הנתונים כך שניתן יהיה להבחין בשינויים במאפייני הצומח המעוצה, חושב ערך ה-NDVI לחודשים אוגוסט-ספטמבר, מאחר שבחודשים האלה גם הצמחייה העשבונית בת-החלוף וגם הקרקע יבשות. חישוב ה-NDVI בתקופה זו לאורך שנים מאפשר להתייחס לשינויים ארוכי-הטווח בצומח המעוצה, ללא השפעת המרכיב העונתי של הצומח העשבוני – שמבטא יותר את מאפייני המשקעים והטמפרטורות של אותה שנה, ופחות מגמות ארוכות-טווח.

לצד היתרונות שיש לשימוש בחישה מרחוק כדי לבחון את מגמות כיסוי הצומח בזמן ובמרחב והשימוש ב-NDVI, יש לה מספר מגבלות שיש לתת עליהן את הדעת:

המשמעות של עלייה או ירידה בערכי NDVI מתארת על פי רוב שינוי בצפיפות הצומח או בריאותו, אך לא ניתן להסיק מכך באופן ישיר על שינויים במבנה חברת הצומח והרכבה. למשל – עלייה בערכים בשטח יער שנשרף יכולה לבוע מהתחדשות ומכיסוי השטח שנשרף בשיחים ובבני-שיח, ולא בהכרח מהשתקמות עצי היער. באופן דומה לא ניתן לזהות באמצעות NDVI תהליכים שיש בהם החלפה של מינים, למשל כשמיין פולש, כמו שיטה כחלחלה (*Acacia saligna*), משתלט על שטחים שלפני כן היו מכוסים בצומח מקומי.

נתוני הלויין מתקבלים מחופת הצומח בלבד, ולכן המדד אינו יעיל בתיאור שינויים במורפולוגיה של הצומח הטבעי. לדוגמה, רעיית בקר גורמת לירידה בביומסה בחלקים התחתונים של העלווה, אך עשויה להיות מלווה בציפוף צמרות שבא לידי ביטוי בעלייה של ערכי NDVI.

ישנם מיני צמחים מעוצים שבחודשי הקיץ נמצאים בשלכת או עם עלוות קיץ שכמעט אינה מבצעת פוטוסינתזה, כמו קידה שעירה (*Calicotome villosa*) וסירה קוצנית (*Sarcopoterium spinosum*), או מינים עשבוניים בני-קיימא שהם ירוקים בקיץ, כמו קנה מצוי (*Phragmites australis*) וטיונית החולות (*Heterotheca subaxillaris*). לכן, התמונה שמתקבלת מהשימוש ב-NDVI בחודשי הקיץ היא של הצמחייה הירוקה בחודשים האלה, שכוללת רכיב משמעותי של הצמחייה המעוצה אך לא את כולה מחד גיסא, ומינים עשבוניים בני-קיימא מאידך גיסא.

בהמשך למפת מגמת השינוי ב-NDVI שפורסמה בדו"ח מצב הטבע 2022 (בן משה וליבנה, 2022), גם בדו"ח הנוכחי נעשה שימוש בנתוני הלויינים Landsat 5 ו-Landsat 8 ברזולוציה של 30 מטר לפיקסל. לויינים אלה פעלו ברצפי שנים שונים, ולאחר תהליך כיול ניתן היה לאחד את הנתונים לסט אחיד שמציג תקופת זמן ארוכה יותר וברזולוציה גבוהה יותר מזו שהוצגה בדו"ח של 2018. עם זאת, חשוב להדגיש כי סדרת מדידות מהחלל לאורך כמעט 40 שנה מלווה ברמה משתנה של "רעש" (Zhang & Roy, 2016). שלא תמיד ניתן לכימות או לתיקון (שנים מסוימת לא נכללו בנתונים המוצגים, בין השאר בגלל רעש מוגבר). על כן, ראוי להתמקד במגמות השינוי ארוכות הטווח ולא בשינויים השנתיים אשר עשויים לבוע גם מרעש כתוצאה מזוויות צילום משתנות, אירוסולים, בעיות במכשיר המדידה או אי דיוקים בתהליך הכיול במקור. בדו"ח זה אנו מרחיבים במעט את הסדרה העתית בהשוואה לדו"ח מצב הטבע 2022: התווספו אליה השנים 1984, 2021 ו-2022.

כדי לאפיין את מגמות השינוי בכיסוי הצומח המעוצה באזורים שונים בארץ בוצעה חלוקה מרחבית של הנתונים בהתאם ליחידות הניטור של המארג. משטח יחידות הניטור הושמטו שטחים בנויים, חקלאיים, ומיוערים כך שנבחנו רק השטחים הטבעיים בכל יחידה. כמו כן, הנתונים הם ממוצעים מרחביים על פני שטח כל היחידה והשינויים בשטח אינם אחידים ובאזורים שונים המגמה מציגה קצבים שונים. יש להדגיש כי גם ניתוח הנתונים ההיסטורי נעשה על השטחים הטבעיים בשנת 2020, שכן אין בידינו נתונים מספקים על היקף ומיקום השטחים הטבעיים לאורך עשרות השנים האחרונות ובכל מקרה אין משמעות מהבחנה הזו להוציא נתונים על פני שטחים טבעיים שנגרעו. בנוסף, כאשר עורכים השוואה בין הדו"ח הנוכחי לקודם יש לשים לב לשתי נקודות חשובות:

- בדו"ח הנוכחי גרענו מכל יחידה את שטחי עומדי היער של קק"ל אשר נכללו בה, דבר שלא נעשה בעבר.
- ביחידות הדרומיות – הר הנגב והדרום הצחיח, נתוני ה-NDVI מייצגים רק את שטחי הנחלים מסדר חמישי ומעלה (נחלים שהם איחוד של לפחות חמישה יובלים) על מנת להתמקד בצמחייה מעוצה. בתוך הנחלים הוצאנו נתונים רק מפיקסלים בהם ערך ה-NDVI היה שווה או גדול מ-0.1 בלפחות אחת מהשנים שנבחנו. החלטנו על שיטה זו כיוון ששטח הצמחייה ביחידות אלה הוא קטן ולמעשה כאשר בוחנים את כלל היחידה הרוב הגדול של הפיקסלים מייצג קרקע חשופה והשינויים בצומח, במידה וקיימים, נבלעים בתוך ה"רעש" של החיפוש.

ביחידת חולות מישור החוף מוצגים שני מיפויים נוספים מלבד השינוי הממוצע במדד הצומח (NDVI) בכלל היחידה, הממודל לאורך השנים:

1. מיפוי מרחבי השוואתי בין השנים 1985 ו-2022, כאשר כלל השטח הטבעי ביחידה חולק בכל אחת מהשנים לארבע קטגוריות NDVI אשר מייצגות צפיפות צומח שונה: גבוהה, בינונית, נמוכה ושטח חשוף ללא צומח. באופן זה ניתן להתרשם מהשינוי בהיקף השטח שנכלל בכל קטגוריה בכל אחת מהשנים 1985 ו-2022.
2. השוואה ויזואלית בשני אזורים נבחרים ביחידה בין השנים 1968 ו-2022. הנתונים מ-1968 הופקו מלויין [CORONA](#), לויין ריגול אמריקאי שהיה פעיל בתקופה זו ויצר דימות פנכרומטיות (גווני אפור) ברזולוציה גבוהה. הנתונים מ-2022 הם מצילום הרקע של [Google Earth](#) ומוצגים בגווני אפור לצורך נוחות ההשוואה הוויזואלית.

2.3. מיפוי תצורות צומח עיקריות

מיפוי תצורות הצומח מתבסס על היחס בין מצב הצמחייה הירוקה בתקופת שיא הצימוח בראשית האביב (אמצע פברואר-אמצע מרץ) לבין תקופת שפל הצימוח בסוף הקיץ (ספטמבר). באמצעות בחינה של נתוני

NDVI מלוויין MODIS ניתן לזהות את זמני שיא הצימוח השנתי. זמנים אלו אמנם משתנים במרחב, אך ברוב השנים הבדלים אלה אינם עולים על 20–30 יום ולצורך הפקת המפה ניתן להשתמש בזמן אחיד ממוצע לכל הארץ לאחר שהדבר נבחן על פני שנה מסוימת. המיפוי עצמו נערך על נתוני NDVI של לוויין סנטינל-2 (רזולוציה של 10 מ') שחולקו במפת ספי NDVI לצומח מעוצה כפי שהוגדרה על ידי (Drori et al., 2020). נתוני שיא הצימוח חושבו לממוצע טווח התאריכים 15.2–15.3 בשנים 2021 ו-2022, נתוני שפל הצימוח חושבו לממוצע טווח התאריכים 1–30.9 בשנת 2022. לאחר חישוב היחס בין שתי התקופות נערכה חלוקה גסה לשלוש קטגוריות: (1) ללא צומח כלל, (2) צומח ירוק באביב ויבש בקיץ (עשבונים עונתיים), (3) צומח ירוק בשתי התקופות (מעוצים או עשבונים ירוקי עד). עם זאת, המציאות בשטח היא רציפה ולא קטגוריאלית ועל כן אנו מציגים את הנתונים באופן רציף, כאשר על הסקאלה הרציפה ניתן למצוא למשל אזורים בהם יש צומח ירוק בחורף וצומח מעוצה יבש בקיץ שמייצגים משטחים של מעוצים בשלכת קיץ (סירה קוצנית, קידה שעירה) כמו גם אזורים בהם שיא הצימוח הוא דווקא בקיץ – נחלים איתנים ושטחים מוצפים בחורף.

2.4. ניתוח

ניתוח המגמות העתיות בצפיפות הצומח המעוצה נעשה בסביבת R (R Core Team 2023) גרסה 4.3.0. כל שלבי הניתוח מפורטים בקובץ הקוד (R script):

ndvi trends 2023.R

הגרפים שורטטו באמצעות החבילות ggplot2 (Wickham 2016) גרסה 3.4.4 ו-Cairo (Urbanek & Horner, 2022) גרסה 1.6-2.

- 1. מסד הנתונים** כלל ממוצעים מרחביים של ערכי NDVI מהתאריכים 15 באוגוסט עד 30 בספטמבר עבור כל יחידת ניטור מהשנים 1984–2022, כמתואר לעיל. ביחידות החורש הים תיכוני והיער המחטני הנטוע, חושבו ממוצעים מרחביים עבור חלקי היחידות שממוצע המשקעים הרב שנתי שלהן מעל או מתחת לסף של 550 מ"מ גשם בשנה (השירות המטאורולוגי הישראלי, 2024), ולא עבור היחידות השלמות. גם ביחידות הדרום הצחיח והר הנגב לא חושבו ממוצעים מרחביים עבור היחידות השלמות, אלא רק עבור תאים (פיקסלים) שמדד ה-NDVI שלהם היה לפחות 0.1 באחת השנים לפחות, ושהשתייכו לנחלים מסדר חמישי ומעלה.
- 2. ראשית, שורטטו גרפים המתארים כיצד מדד ה-NDVI משתנה עם השנים.** גרפים אלו נועדו כעזר חזותי לניתוח הנתונים על מנת להבין באילו יחידות צפויה להיראות מגמה עתית מובהקת סטטיסטית ולאיזה כיוון (עליה או ירידה), אך לא כתחליף לניתוח סטטיסטי (ראו להלן).
- 3. על מנת לבחון האם קיימת מגמה עתית מובהקת בצפיפות הצומח, הותאם מודל לינארי מוכלל מעורב (Generalized Linear Mixed Model),** בו מדד ה-NDVI שנבחן היה המשתנה המגיב

באמצעות החבילה glmmTMB (Brooks et al., 2017) גרסה 1.1.8 בסביבת R. המשתנים המסבירים של כל סדרת עתית היו מספר השנים שחלפו מאז שנת ראשית הניטור הלוויני (1984; להלן המגמה העתית), ועבור החורש הים תיכוני והיער המחטני הנטוע גם האזור האקלימי. סף המובהקות (אלפא) שנבחר היה 5%.

4. בשלב הראשון, נבחרה משפחת ההתפלגות של המודל: התפלגות גאסיאנית (נורמלית) או התפלגות גאמא, על פי מדד Akaike Information Criterion (AIC; Akaike, 1974). עבור החורש הים תיכוני והיער המחטני הנטוע, נבחנו גם מודלים הכוללים את האזור האקלימי ואת האינטראקציה שלו עם המגמה העתית. המודל הסופי נבחר לפי ערך ה-AIC הנמוך ביותר. כאשר הפרש ערכי ה-AIC בין המודלים היה קטן מ-2, הועדף המודל עם מספר המשתנים המסבירים והאינטראקציות הנמוך ביותר.
5. המובהקות הסטטיסטית (ערך p) של המקדמים של המשתנים המסבירים במודל הסופי נבחנו באמצעות מבחן Wald, כפי שמחושב באמצעות הפונקציה summary של המודל.
6. כאשר המודל הסופי כלל מגמה עתית מובהקת, כיוונה (עליה או ירידה) ומידת השינוי (באחוזים ובערכי NDVI מוחלטים) נקבעו ע"י השוואת תחזיות המודל הסופי לשנת התחלת הניטור (1984) ולשנת סיום הניטור (2022).

2.5. מקורות

- השירות המטאורולוגי הישראלי (2024). מאגרי נתונים מטאורולוגיים. ims.gov.il/he/data_gov
- Dutta Gupta V, Areendran G, Raj K, Ghosh S, Dutta S, & Sahana M (2021). Assessing habitat suitability of leopards (*Panthera pardus*) in unprotected scrublands of Bera, Rajasthan, India. In: Forest Resources Resilience and Conflicts. Elsevier, pp. 329–342. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822931-6.00026-5>
- Gessesse AA, & Melesse AM (2019). Temporal relationships between time series CHIRPS-rainfall estimation and eMODIS-NDVI satellite images in Amhara Region, Ethiopia. In: Extreme Hydrology and Climate Variability. Elsevier, pp. 81–92. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815998-9.00008-7>
- Goswami S, Gamon J, Vargas S, & Tweedie C. (2015). *Relationships of NDVI, Biomass, and Leaf Area Index (LAI) for six key plant species in Barrow, Alaska*. PeerJ PrePrints, No. e913v1.
- Rouse JW, Haas RH, Schell JA, & Deering DW (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. NASA Special Publication 351: 309.
- Wu Y, Li W, Wang Q, Liu Q, Yang D, Xing M, Pei Y, & Yan S (2016). Landslide susceptibility assessment using frequency ratio, statistical index and certainty factor models for the Gangu County, China. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(2): 84. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2112-0>

- Zhang HK, & Roy DP (2016). Landsat 5 Thematic Mapper reflectance and NDVI 27-year time series inconsistencies due to satellite orbit change. *Remote Sensing of Environment*, 186: 217–233. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.08.022>
- Akaike H (1974). A new look at the statistical model identification, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19 (6): 716–723 <https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705>
- Brooks ME, Kristensen K, Van Benthem KJ, Magnusson A, Berg CW, Nielsen A, ... & Bolker BM (2017). glmmTMB balances speed and flexibility among packages for zero-inflated generalized linear mixed modeling. *The R journal*, 9(2): 378-400. <https://doi.org/10.32614/RJ-2017-066>
- Hartig F (2022). DHARMA: Residual Diagnostics for Hierarchical (Multi-Level / Mixed) Regression Models. R package version 0.4.6, <https://CRAN.R-project.org/package=DHARMA>
- R Core Team (2023). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Urbanek S, Horner J (2022). Cairo: R Graphics Device using Cairo Graphics Library for Creating High-Quality Bitmap (PNG, JPEG, TIFF), Vector (PDF, SVG, PostScript) and Display (X11 and Win32) Output. R package version 1.6-0, <https://CRAN.R-project.org/package=Cairo>
- Wickham H (2016). ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York. <https://ggplot2.tidyverse.org/>