



תאריך שליחת הדו"ח: 20 יולי 2025

מספר מחקר: 1855

סיכום תוצאות

פרטים כלליים על המחקר

1. כותרת המחקר: תרומת היעור לאורך מפל המשקעים בישראל למיתון שינויי האקלים
2. מספר המחקר (בקק"ל): 1855
3. סוג הדו"ח: דו"ח מדעי מסכם
4. שם המוסד המוביל את המחקר: האוניברסיטה העברית בירושלים
5. רפרנט קק"ל: ד"ר דורון מרקל
6. שם החוקר הראשי ודוא"ל: פרופ' ז'וזפה גרינצוויג jose.gruenzweig@mail.huji.ac.il
7. שמות חוקרים נוספים ודוא"ל: ד"ר איתי הרמן ittai.herrmann@mail.huji.ac.il
8. מילות מפתח: יעור, מאגרי פחמן, חומר אורגני בקרקע, ביומסה, חישה מרחוק

תקציר מנהלים

המחקר בחן את מאגרי הפחמן האורגני בקרקע ובביומסה של צומח מעוצה לאורך מפל המשקעים בישראל, תוך השוואה בין חלקות יער נטועות לבין חלקות טבעיות. להלן מטרות:

במחקר אנחנו שאלנו מהי התרומה של היער הנטוע ללכידת פחמן בישראל וכיצד גורמים סביבתיים משפיעים על מאגרי הפחמן ביערות נטועים ובשטחים טבעיים שאינם נטועים? מטרות המחקר הממוקדות היו:

- א. הערכה כמותית של מאגרי הפחמן בצומח ובקרקע של יערות נטועים ומערכות אקולוגיות טבעיות לאורך מפל המשקעים בישראל.
- ב. הערכת התרומה של היער הנטוע ללכידת הפחמן לאורך המפל המשקעים של ישראל.
- ג. בירור השפעות אקלימיות וגורמי שטח וקרקע על הפחמן והחנקן ביערות נטועים ושטחים טבעיים.
- ד. הערכת ההשפעה של שינוי אקלים על תרומת היער הנטוע ללכידת פחמן.

הנחת העבודה המרכזית היתה שניתן להעריך את תרומת היער הנטוע ללכידת פחמן בעזרת השוואה בין מאגרי הפחמן ביער הנטוע למאגרי הפחמן במערכת האקולוגית הטבעית בקרבת היער.

ממצאי המחקר הראו כי אין הבדל במאגרי הפחמן האורגני בקרקע ביער נטוע באורן ירושלים לעומת שטח טבעי סמוך שאינו נטוע. מאגר הפחמן המירבי שנבדק כלל את שכבת הנשר וחצי המטר העליון של הקרקע המינרלית. לעומת זאת, בחלקות הנטועות בהשוואה לחלקות הטבעיות נמצא 67% יותר פחמן בביומסה המעוצה מעל הקרקע, על פי חישובים שבוצעו באמצעות משוואות אלומטריות. יחד עם זאת, רוב הפחמן האורגני מצוי בקרקע ולא בצומח שמעליה. כדי לעקוב אחר צבירת הפחמן הן ביער הנטוע והן בשטח הטבעי יש צורך בדיגום חוזר של הקרקעות והביומסה העל-קרקעית במרווחי זמן של כ- 10 שנים.

המחקר מצא שמאגרי הפחמן בביומסה ובקרקע גדלו עם העליה בכמות המשקעים. המאגרים אף פחתו עם הרום, מה שעשוי להצביע על קשר חיובי בין צבירת מאגרי פחמן לטמפרטורה. על אף הממצא הנ"ל והעליה

בטמפרטורה בעשורים האחרונים, עלולה הפחתת כמות משקעים במסגרת שינוי אקלים להביא לפגיעה באגירת פחמן בישראל לאורך זמן.

לא נמצאו הבדלים במדדים ספקטראליים (NDVI ו-REIP) בין סוגי שימוש הקרקע, ככל הנראה משום שהם מושפעים בעיקר מהעלווה ולא מהחומרים המעוצים. ההבדלים בין שיטות המדידה — משוואות אלומטריות לעומת חישה מרחוק — נובעים מכך שרק משוואות אלומטריות מחשבות את תרומת הגזעים והענפים, שאינם נכללים ברוב המדדים הספקטראליים. עד לכיול מדדים ספקטראליים מתאימים ניתן במידת מה להשתמש בקשרים שנמצאו במחקר הזה לחישוב פחמן בביומסה על-קרקעית מערכי NDVI. מעבר לכך, העבודה הנוכחית יכולה לשמש בסיס לפיתוח שיטה יעילה להערכת מאגרי הפחמן בישראל על ידי שילוב בין קידוחי קרקע ממוקדים יחד עם גישות אלומטריות וספקטראליות. יחד עם זאת יש להזכיר כי בשל היעדר משוואות אלומטריות מקומיות בישראל, נעשה במחקר הזה שימוש בנוסחאות שפותחו בחו"ל, לעיתים עבור מינים אחרים, מה שגורם לחוסר דיוק מסוים בהערכת הביומסה. לכן, קיים צורך דחוף בפיתוח נוסחאות מותאמות למינים ולתנאים המקומיים כדי לשפר את הדיוק ולאפשר את הכיול של מדדים ספקטראליים בעתיד.

בנוסף ללכידת הפחמן על ידי יערות נטועים, יש לשקול את ההשפעה האקלימית הרחבה יותר, כולל אפקט האלבדו. האפקט הנ"ל מפחית את החזר הקרינה הגלובלית לחלל ויחד עם הפחתה של שטף קרינה תרמית מנטרל את תרומת אגירת פחמן להתקררות האקלים. ממכלול תוצאות המחקר ניתן להסיק כי ייעור באורן ירושלים בדרום הארץ אינו יביא התקררות האקלים. באזור הצפון תיתכן תועלת מבחינת אגירת פחמן במקומות בהם מאגר הפחמן העל-קרקעי והאלבדו נמוכים יחסית.

Abstract

This study examined the organic carbon pools in the soil and biomass of forests and shrublands along the precipitation gradient in Israel, answering the following main research question: What is the contribution of afforestation to carbon sequestration in Israel, and how do environmental factors affect carbon pools in planted forests and nearby natural unplanted areas? The specific research objectives were as follows:

1. Quantification of carbon pools in vegetation and soil of planted forests and natural ecosystems along the precipitation gradient in Israel.
2. Identify the contribution of afforestation to carbon sequestration along Israel's precipitation gradient.
3. Assessing the impact of climate, topography and soil factors on carbon in the two land use types, planted forests and natural areas.
4. Assessing the impact of climate change on the contribution of afforestation to carbon sequestration.

The main working assumption was that the net contribution of afforestation to carbon sequestration could be estimated by comparing the carbon pools in planted forests with the those in nearby natural ecosystems.

The findings of the research showed that the planted plots contained 67% more carbon in their above-ground woody biomass compared to the natural plots based on estimates derived from allometric equations. However, there was no statistically significant difference in soil organic carbon (SOC) pools between forests planted in Aleppo pine and nearby natural unplanted areas. The SOC pool is the largest carbon pool in ecosystems in Israel, and in our study included the litter layer and the top half meter of the mineral soil.

We found that the carbon pools in the biomass and soil of both land use types increased with rising precipitation amounts along the climate gradient. In addition, the carbon pools decreased with increasing elevation, which may indicate a positive relationship between temperature and the accumulation of carbon. Despite the latter finding and the temperature rise in recent decades, climate change may lead to a decrease in carbon storage in Israel because of the projected decrease in precipitation and increase in aridity.

The aboveground biomass was also estimated by remote sensing tools. We found no differences in spectral indices (NDVI and REIP) between land use types, probably because they are mainly influenced by foliage and less by woody biomass. The differences between the measurement methods—allometric equations versus remote sensing indices—are due to the fact that only allometric equations calculate the contribution of trunks and branches, which are not included in most spectral indices. Nevertheless, the linear relationships found in this study can be used to estimate the size of carbon pools in the above-ground biomass from NDVI.

In addition to carbon sequestration by planted forests, the broader climate impact, including the albedo effect of afforestation, should be considered. The albedo effect reduces the return of global radiation to space and reduces the contribution of carbon storage to climate cooling. From the results of the study, it can be concluded that planting Aleppo pine in the south of the country will not lead to significant climate cooling. In the northern region, there may be benefits in terms of carbon storage in places where the natural above-ground carbon pool and albedo are relatively low.

The present work can serve as a basis for developing an effective method for estimating carbon pools in Israel by combining targeted soil coring with allometric and remote sensing approaches. In order to track carbon accumulation in both the planted forest and the natural area, it is necessary to re-sample the soils and the above-ground biomass at intervals of about 10 years. At the same time, it should be noted that due to the lack of local allometric equations in Israel, we had to use some equations that were developed in other countries for other species, which led to inaccuracies in the evaluation of biomass. Therefore, there is an urgent need to develop allometric equations adapted to local species and conditions to improve accuracy and enable the calibration of spectral indices in the future.

דו"ח מסכם

1. דו"ח שנתי המתאר את התקדמות המחקר בשנה השלישית/האחרונה

בנושא קרקע, השנה השלישית למחקר התמקדה בתוספת של שכבת קרקע עמוקה יותר (20-50 ס"מ), בחזרה על כל אנליזת הפחמן האורגני בקרקע כדי לוודא שהאנליזה לא תכלול גיר בתוך הפחמן האורגני, ובהמשך ניתוח תוצאות הקרקע. בנושא הצומח, השנה השלישית למחקר התמקדה בניתוח וחיבור התוצאות הקרקעיות (משוואות אלומטריות) לתוצאות החישה מרחוק. כל תוצאות השנה השלישית מתוארות למטה כחלק מהדוח הסופי.

2. פירוט המשימות עבור כל שנת מחקר בהתאם לתוכנית העבודה שהוגשה ואושרה בהצעת המחקר

משימות המחקר וההתקדמות מסוכמות בטבלה 2.1, על פי שנות המחקר.

טבלה 2.1. משימות והתקדמות המחקר.

שנה	משימה על פי תוכנית העבודה המקורית	התקדמות
1	קביעת אתרי המחקר	הושלם כמתוכנן
	פיתוח וכיול שיטה לחישה מרחוק	הושלם חלקית בשנה 1 והושלם בשנה 2
	ניתוח דימוי לוויין	התחלה כמתוכנן (המשך מתוכנן בשנה 2)
	דיגום צומח וקרקע	התחלה כמתוכנן (המשך מתוכנן בשנה 2)
	בדיקות מעבדה לפחמן	התחלה כמתוכנן (המשך מתוכנן בשנה 2)
2	המשך ניתוח דימוי לוויין	סיום כמתוכנן
	המשך דיגום צומח וקרקע	סיום כמתוכנן
	המשך בדיקות מעבדה לפחמן	סיום כמתוכנן, אך בשנה 3 התקיימה חזרה על כל בדיקות המעבדה כדי לשפר את ההפרדה בין פחמן אורגני לגיר בקרקע
	ניתוח תוצאות	התחלה כמתוכנן (המשך בשנה 3)
3	המשך ניתוח תוצאות	סיום כמתוכנן לפרק הקרקע, סיום מאוחר לפרק הצומח
	דוח לקק"ל ומאמר מדעי	הדוח הנוכחי מחובר באיחור; מאמר מדעי נמצא בהכנה

3. מערך הבדיקות והניסויים שבוצעו במהלך שנות המחקר ולבצע סינתזה של הנתונים שנאספו במהלך שנות המחקר.

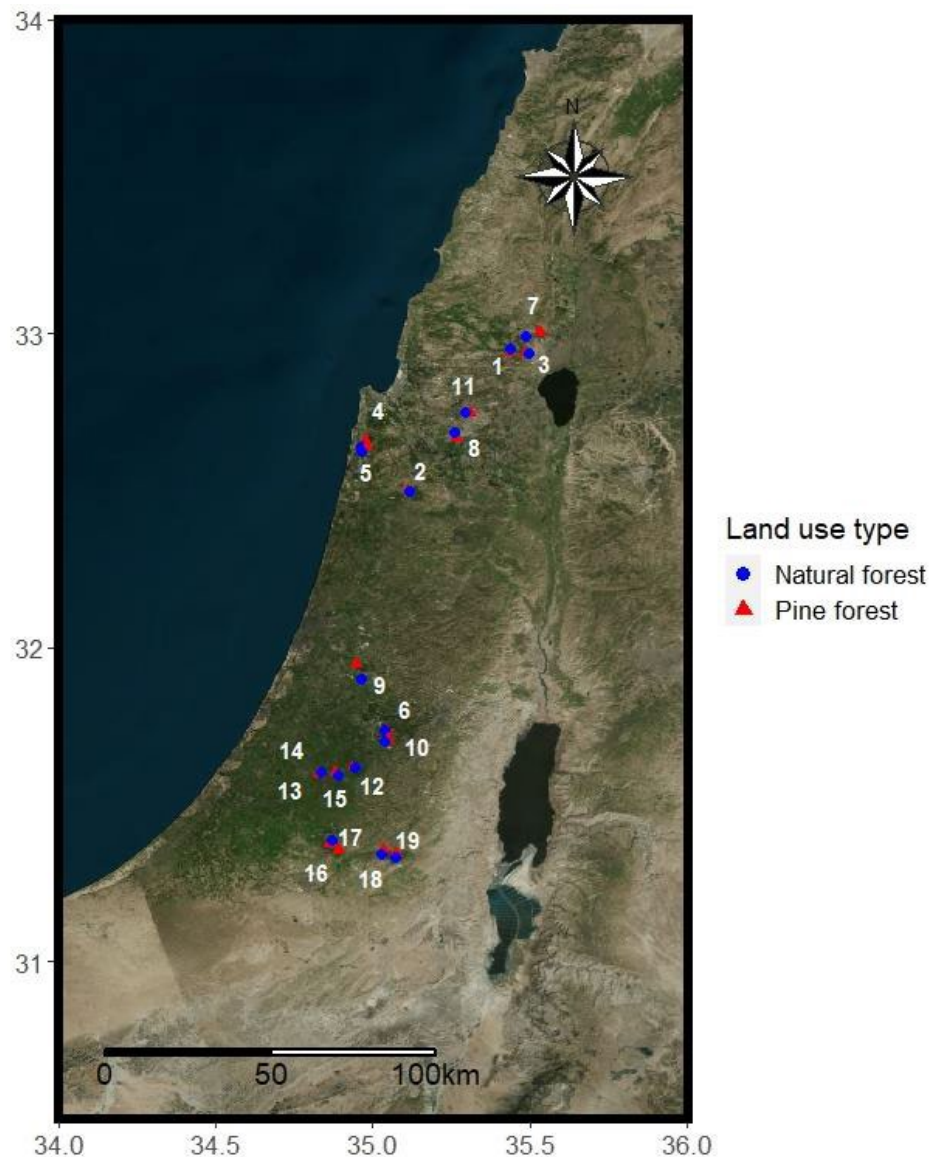
קרקע

למחקר בתחום הקרקע, נבחרו 19 אתרים, מבוסס על מערך חלקות ה-LTM (ניטור ארוך טווח) עם עצי אורן ירושלים שניטעו לפחות 50 שנה קודם לכן (איור 3.1). האתרים נבחרו לאורך מפל המשקעים בישראל, בטווח של 242-895 מ"מ לשנה (טבלה 3.1). לכל חלקת אורן תואמה חלקה טבעית שלא עברה נטיעה. לכן, אתר מחקר כולל חלקה נטועה וחלקה טבעית.

האתרים מוקמו ב- 16 יערות שונים, כאשר ב- 13 יערות נבחר אתר אחד (חלקת LTM וחלקה טבעית) וב- 3 יערות נבחרו 2 אתרים. בחוף הכרמל ויתיר נבחרו 2 חלקות LTM להן הוצמדו 2 חלקות טבעיות. בשחריה נבחרו 2 חלקות LTM וחלקה טבעית אחת שימשה להשוואה ל-2 חלקות ה-LTM. בכרמים לא נמצאה חלקה טבעית, לכן החלקה הנטועה הושוותה לחלקה הטבעית של להב (שני היערות סמוכים אחד לשני).

טבלה 3.1. אתרי מחקר ביערות קק"ל (חלקות LTM: Planted) ובסביבם (חלקות טבעיות: Natural) להערכת פחמן אורגני וחקן כללי בקרקע. נתוני המשקעים כוללים את השנים 1953-2004 והתקבלו מהשירות המטאורולוגי. עומק הקרקע הוא הממוצע של 10 הקדיחות בכל חלקה עד למקסימום של 50 ס"מ.

#	Forest/site	Land use (forest type)	Geographical coordinates	Precipitation (mm)	Soil depth (cm)
1	Shefer	Natural	32°57'08.2"N 35°26'13.8"E	895.3	28.5
		Planted	32°56'20.0"N 35°26'12.6"E	780.6	30.2
2	Mei Ami	Natural	32°29'51.0"N 35°07'02.7"E	682.2	23.6
		Planted	32°30'04.2"N 35°06'42.4"E	677.0	31.8
3	Limonim	Natural	32°56'04.6"N 35°29'41.4"E	657.5	46.6
		Planted	32°56'16.5"N 35°29'05.7"E	685.3	50.0
4	Hof Hacarmel north	Natural	32°38'29.9"N 34°57'57.3"E	610.6	35.2
		Planted	32°39'25.9"N 34°58'41.0"E	625.7	39.2
5	Hof Hacarmel south	Natural	32°37'39.5"N 34°57'52.8"E	609.2	35.6
		Planted	32°38'13.7"N 34°58'43.7"E	627.4	40.2
6	Bar Giora	Natural	31°44'22.0"N 35°02'09.0"E	566.9	32.6
		Planted	31°44'14.5"N 35°02'42.2"E	586.6	42.3
7	Birya	Natural	32°59'21.4"N 35°29'17.2"E	729.3	50.0
		Planted	33°00'21.3"N 35°31'55.5"E	643.5	41.2
8	Balfour	Natural	32°41'14.3"N 35°15'32.1"E	549.1	36.8
		Planted	32°40'07.9"N 35°15'54.4"E	523.3	33.7
9	Ben Shemen	Natural	31°53'58.6"N 34°57'42.1"E	513.0	35.0
		Planted	31°56'57.0"N 34°56'51.5"E	529.7	36.4
10	Mata	Natural	31°42'08.6"N 35°02'23.4"E	534.5	32.7
		Planted	31°42'22.4"N 35°02'56.1"E	539.6	31.3
11	Tsiptori	Natural	32°44'59.7"N 35°17'44.7"E	574.7	36.3
		Planted	32°44'52.1"N 35°18'38.9"E	566.8	37.5
12	Nehusha	Natural	31°37'12.9"N 34°56'45.0"E	413.2	32.3
		Planted	31°37'11.7"N 34°56'08.4"E	412.8	38.6
13	Shahariya 2	Planted	31°35'55.0"N 34°49'48.0"E	402.6	31.7
14	Shahariya 1	Natural	31°36'10.9"N 34°50'16.2"E	405.3	42.6
		Planted	31°36'02.3"N 34°49'36.4"E	402.4	39.1
15	Beit Guvrin	Natural	31°35'30.9"N 34°53'18.3"E	397.2	38.9
		Planted	31°36'09.8"N 34°52'52.3"E	402.2	31.4
16	Lahav	Natural	31°23'08.2"N 34°52'17.6"E	296.6	33.0
		Planted	31°22'35.9"N 34°51'43.6"E	288.8	40.9
17	Kramim	Planted	31°21'22.8"N 34°53'29.3"E	278.6	41.4
18	Yatir north	Natural	31°20'39.5"N 35°01'39.1"E	274.6	46.0
		Planted	31°21'31.4"N 35°02'00.9"E	286.6	38.5
19	Yatir east	Natural	31°20'00.8"N 35°04'24.9"E	242.3	40.5
		Planted	31°20'44.1"N 35°04'28.4"E	255.8	47.1

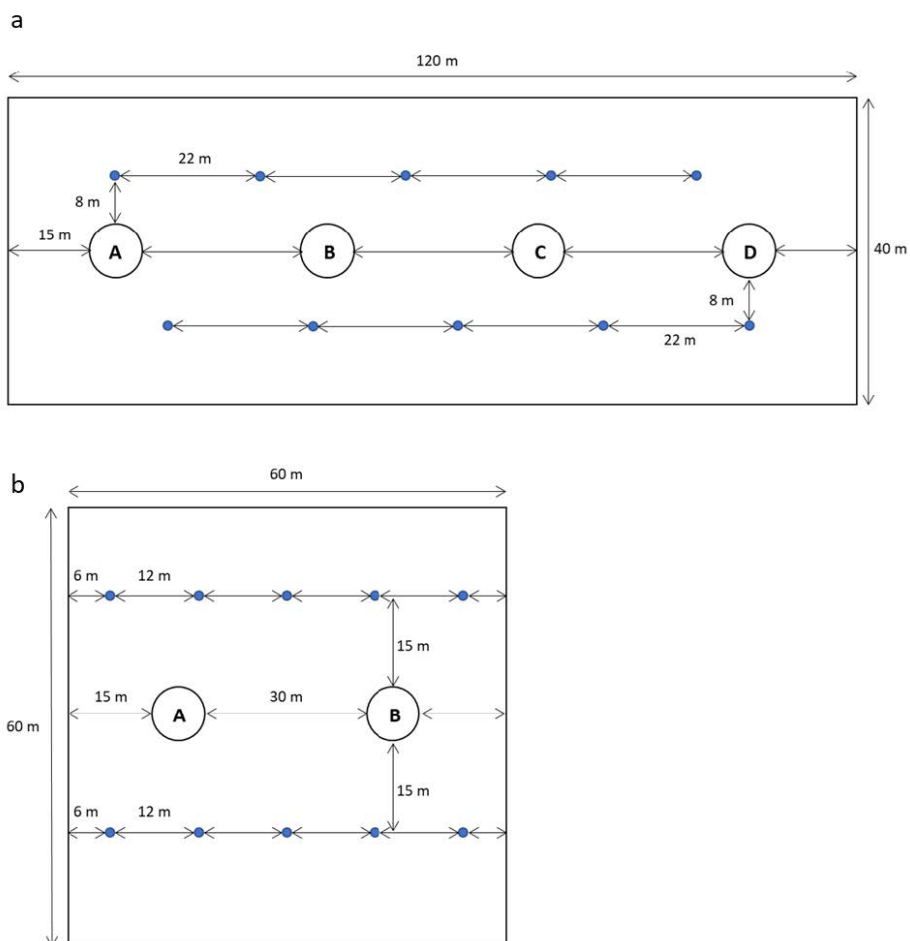


איור 3.1. אתרי וחלקות המחקר בפרק הקרקע. מספרי האתרים תואמים את המספרים בטבלה 3.1.

בכל חלקה נדגמו נשר וקרקע מינרלית ב- 10 נקודות דיגום במבנה קבוע, על פי המתואר באיור 3.2. הקריטריונים לדיגום כללו שטח לא מופר ועומק קרקע מינרלית של לפחות 20 ס"מ. אם הקריטריונים האלה לא מולאו, הוזזה נקודת הדיגום במטר אחד לכיוון הנקודה הבאה. לפני הקידוח בקרקע המינרלית, נאספה שכבת הנשר בריבוע של 25 X 25 סמ"ר שכלל נשר עלים ומחטים ונשר מעוצה דק. קידוחי הקרקע בוצעו על ידי מקדחים בקוטר 5 ס"מ בהם ניתן לאסוף קרקע בנפח ידוע. הקידוח בוצע בנפרד לעומק 0-10 ו-10-20 ס"מ. קרקע עמוקה יותר נדגמה עד 50 ס"מ או עד הסלע. במעבדה נוקה הנשר משאריות קרקע ולאחר מכן יובש ב-60 מ"צ. הקרקע הועברה בנפח 2 מ"מ כדי להסיר אבנים ויובשה ב- 105 מ"צ. לאחר מכן, עברו דגימות הנשר והקרקע טחינה במטחנת קפה. כדי להסיר את הגיר (פחמן אנאורגני) טופלה הקרקע מספר פעמים ב- 1M HCl. לאחר ניפוי בנפח 250 מיקרומטר, נקבע ריכוז הפחמן האורגני והחנקן הכללי של הנשר והקרקע ב- elemental analyzer (EA).

השפעת שימוש הקרקע (טבעי, מיוער) וגורמי הסביבה על הפחמן והחנקן בקרקע נותחו ב- mixed model ANOVA עם האתר (יער) כגורם אקראי. המודל המיטבי נבחר על פי BIC ו-AICc הנמוכים ביותר. החלקות הטבעיות של שחריה 1 ולהב שימשו גורם אקראי ליערות שחריה 2 וכרמים, בהתאמה. היערות לימונים, בירה

ובלפור הוצאו מהניתוחים הסטטיסטיים של פחמן, אך לא של חנקן, מחשש לשאריות פחמן אנאורגני (גיר) בדוגמאות שהועברו למדידה ב-EA. החשש נבע מיחס C/N וערכי $\delta^{13}\text{C}$ גבוהים (תוצאות לא מוצגים) שהתקבלו גם אחרי טיפול יסודי וחוזר בחומצה של כל דוגמאות הקרקע. נתוני החלקות הנטועות ביערות לימונים, ביריה ובלפור הוצגו באיורים ובניתוחי רגרסיה הנפרדים לשני שימושי הקרקע.



איור 3.2. דגמי איסוף הקרקע. (a) מבנה הדיגום בחלקות LTM בהם 4 עצי אורן ירושלים היו נוכחים בחלקה ומצבם היה טוב (עצי A עד D). גודל מקורי של חלקות LTM. (b) מבנה הדיגום בחלקות בהם לא כל 4 העצים המקוריים היו נוכחים או במצב טוב, אבל כן נמצאו 2 עצי אורן ירושלים (עצי A ו-B). העיגולים הכחולים מציגים את נקודות הדיגום.

צומח

גם לפרק הזה, נבחרו 19 אתרי מחקר מבוסס על חלקות ה-LTM עם אורן ירושלים (איור 3.3, טבלה 3.2). לכל חלקת אורן ירושלים הותאמה חלקה טבעית שלא עברה נטיעה. מפל המשקעים בפרק הזה היה בטווח של כ-250-700 מ"מ לשנה. מסיבות מעשיות, היו בפרק הזה יערות שלא הופיעו בפרק הקרקע (טבלה 1), כגון יערות ברעם, גלבוע ותורען, בעוד שיער שפר לא נדגם לפרק הצומח. לא נדגמו שתי חלקות באותו יער, כמו בפרק הקרקע (יערות חוף הכרמל, שחריה ויתיר).



איור 3.3. אתרי וחלקות המחקר בפרק הצומח. מספרי האתרים תואמים את המספרים בטבלה 3.2.

טבלה 3.2. אתרי מחקר ביערות קק"ל ומסביבם להערכת פחמן אורגני על-קרקעי של הצומח. לכל אתר (יער) חלקה נטועה וחלקה טבעית. נתוני המשקעים כוללים את השנים 2000-2014 והתקבלו מדור' דוד הלמן (Helman et al. 2017).

#	Forest	Land use (forest type)	Coordinates	Precipitation (mm)
1	Baram	Planted	35°25'50"E 33°2'39"N	725
		Natural	35°25'30"E 33°2'26"N	718
2	Mei Ami	Planted	35°6'41"E 32°30'4"N	620
		Natural	35°7'7"E 32°29'49"N	628
3	Limonim	Planted	35°29'9"E 32°56'17"N	611
		Natural	35°29'3"E 32°55'36"N	576
4	Hof Hacarmel	Planted	34°58'48"E 32°38'15"N	578
		Natural	34°57'59"E 32°37'35"N	577
5	Bar Giora	Planted	35°2'41"E 31°44'14"N	554
		Natural	35°2'12"E 31°44'20"N	542
6	Birya	Planted	35°31'54"E 33°0'21"N	529
		Natural	35°31'14"E 33°0'12"N	588
7	Balfour	Planted	35°18'49"E 32°44'32"N	523
		Natural	35°17'45"E 32°45'1"N	534
8	Ben Shemen	Planted	34°56'50"E 31°56'58"N	516
		Natural	34°57'42"E 31°53'49"N	505
9	Mata	Planted	35°23'E 32°47'42"N	513
		Natural	35°21'43"E 32°47'N	499
10	Turaan	Planted	35°2'53"E 31°42'23"N	512
		Natural	35°2'6"E 31°42'2"N	501
11	Tsipori	Planted	34°56'8"E 31°37'12"N	496
		Natural	34°56'50"E 31°37'18"N	499
12	Gilboa	Planted	35°15'53"E 32°40'9"N	435
		Natural	35°15'33"E 32°41'15"N	412
13	Nehusha	Planted	35°22'27"E 32°32'4"N	396
		Natural	35°22'40"E 32°30'45"N	403
14	Shaharia	Planted	34°49'37"E 31°36'2"N	378
		Natural	34°50'16"E 31°36'12"N	375
15	Beit Guvrin	Planted	34°52'54"E 31°36'10"N	378
		Natural	34°53'19"E 31°35'32"N	377
16	Amatzya	Planted	34°53'45"E 31°32'14"N	343
		Natural	34°53'34"E 31°31'59"N	344
17	Lahav	Planted	34°51'46"E 31°22'35"N	294
		Natural	34°52'19"E 31°23'8"N	297
18	Kramim	Planted	34°53'28"E 31°21'23"N	283
		Natural	34°53'54"E 31°22'4"N	283
19	Yatir	Planted	35°4'28"E 31°20'44"N	259
		Natural	35°5'42"E 31°20'15"N	247

בכל חלקה נמדד כל הצומח המעוצה בריבוע של 20 X 20 מ"ר. הריבוע הזה הוא חלק משטח ה-LTM ביער הנטוע וחלק מהחלקה הטבעית שנבחרה בקרבה לחלקת ה-LTM. המרחק בין חלקות הטבעיות והנטועות באותו אתר היה בממוצע 1660 מטר, כאשר המקסימום היה 6000 מטר ביער בן שמן. דיגום הצומח היה

בלתי הרסני על ידי קביעת ממדי הצמח, בעזרת למשל DBH, גובה, שטח הטל של שיחים ועצים. רשימת המעוצים, מלבד אורן ירושלים, כלל 13 מינים (טבלה 3.3). הדיגום נעשה בחודשים יולי עד נובמבר 2022. הביומסה של כל מין חושבה על ידי משוואה אלומטרית כאשר נעשה שימוש במשוואות מקומיות שפותחו למין עצמו, אם כזאת היתה בנמצא, למשל משוואה של אורן ירושלים באזור דרום (Grünzweig *et al.* 2007). במקרים בהם לא היתה משוואה מקומית, נבחרה משוואה של המין מאזור דומה, למשל משוואה מספרד לאורן ירושלים במרכז ובצפון (Ruiz-Peinado *et al.* 2011). אך היו גם מקרים בהם לא פותחה משוואה לאותו מין, למשל לאלון מצוי גבוה מ-3 מטר, לכן נבחרה משוואה של *Quercus ilex* מספרד (Ogaya *et al.* 2003). מאגר הפחמן האורגני של הצמח חושב על ידי הכפלת הביומסה בפקטור של 0.5, בהנחה שהפחמן מהווה 50% מהביומסה. מאגרי הפחמן של כל הצמחים המעוצים סוכמו למאגר הפחמן של החלקה.

טבלה 3.3. רשימת מיני המעוצים שנמדדו באתרי המחקר ושכיחותם (מספר החלקות בהן המין נמדד) בחלקות נטועות (Planted) וטבעיות (Natural).

Species	Land use (forest type)	Number of plots
<i>Arbutus andrachne</i>	Planted	0
	Natural	1
<i>Asparagus aphyllus</i>	Planted	7
	Natural	8
<i>Calicotome villosa</i>	Planted	8
	Natural	8
<i>Capparis</i> sp.	Planted	3
	Natural	5
<i>Ceratonia siliqua</i>	Planted	1
	Natural	2
<i>Cistus creticus</i>	Planted	4
	Natural	5
<i>Olea europaea</i>	Planted	1
	Natural	2
<i>Pinus halepensis</i>	Planted	19
	Natural	2
<i>Pistacia lentiscus</i>	Planted	8
	Natural	12
<i>Pistacia terebinthus</i>	Planted	4
	Natural	5
<i>Quercus calliprinos</i>	Planted	5
	Natural	7
<i>Rhamnus lycioides</i>	Planted	12
	Natural	15
<i>Sarcopoterium spinosum</i>	Planted	7
	Natural	12

כדי לחבר מרחבית בין נתוני הצומח שנאספו מהשטח למידע הספקטרלי הלווייני בחירת הריבוע של 20 X 20 מ"ר בוצעה לפי מיקום פיקסל של הלוויין סנטינל-2. היות והדימומים של סנטינל-2 אותם ניתן להוריד בחינם (<https://scihub.copernicus.eu>) מעובדים באופן כזה שבכל דימות מיקום פינות הפיקסלים זהה ניתן להתכונן לאיסוף נתוני שדה משטח הפיקסל. כדי לבצע זאת בוצעו מדידות עם GPS כדי להגיע ל 4 פינות הפיקסל. הדיוק של ה GPS היה ברמה של מטרים בודדים והוא שופר ע"י מיוצע מקבצים של מאות מדידות במשך מספר דקות כך שהטעות במיקום כל פינה היתה לא יותר מ- 2.5 מ'. המידע הספקטרלי שהתקבל מסנטינל-2

עבר עיבוד מקדים סטנדרטי כפי שמבוצע על ידי קופרניקוס. העיבוד כלל תיקון רדיומטרי, תיקון אטמוספרי ותיקון גיאומטרי. כך שהנתונים שהתקבלו בדימות הם בערכי החזרה ומדוייקי מיקום ככל האפשר. על בסיס ערכי ההחזרה בערוצי סנטינל-2 (טבלה 3.4). חושב האלבדו (Salvoldi *et al.* 2022) על בסיס 9 ערוצים עם גודל פיקסל של 10 X 10 מ' ו 20 X 20 מ' (נוסחא 1; טבלה 3.4). כמו כן, על בסיס על בסיס 4 ערוצים (מודגשים בטבלה 3.4) חושבו שני מדדי צמחיה מקובלים וידועים ה- NDVI ו- REIP (Herrmann *et al.* 2011) בנוסחאות 2 ו- 3, בהתאמה.

$$\alpha = \frac{\sum_{i=2}^{12} B_i b_i}{\sum_{i=2}^{12} b_i} \quad (1)$$

כאשר b_i / B_i הם ערכי החזרה בערכים יחסיים ורוחב הערוץ בננומטרים, בהתאמה.

$$(REIP = 704 + 36 \left\{ \frac{\frac{band4+band7}{2} - band5}{band6 - band5} \right\} = 704 + 36 \left\{ \frac{\frac{\rho_{665} + \rho_{783}}{2} - \rho_{704}}{\rho_{740} - \rho_{704}} \right\} \quad (2)$$

$$NDVI = \frac{band7 - band4}{band7 + band4} = \frac{\rho_{783} - \rho_{665}}{\rho_{783} + \rho_{665}} \quad (3)$$

בנוסחאות 2 ו- 3 המילה bands מתייחסת למספר הערוץ (טבלה 3.4) והאות היוונית ρ מתייחסת לערכי ההחזרה באורך הגל המוגדר בננומטרים.

טבלה 3.4. ערוצים ספקטריים בלוויין סנטינל-2. הערוצים המודגשים ששימשו לחישוב מדדי הצמחיה NDVI ו REIP. גודל הפיקסלים היה 20 מטר בשלושה מהערוצים ו 10 מטר בערות האדום. התוצר (של קופרניקוס) מופק ברזולוציה מרחבית של 20 מטר כמדובר על שילוב סטנדרטי של 4 פיקסלים של 10 X 10 מ' לצורך יצירת פיקסל 20 X 20 מ'. לא השתמשנו בערוצים עם גודל פיקסל של 60 X 60 מ' כדי לא לדרדר את הרזולוציה הספקטרלית שלנו מחוץ לחלקות שנבחרו.

Band Number	Centre Wavelength (nm)	Bandwidth (nm)	Pixel Size (m)
1 – Coastal aerosol	443	21	60
2 - Blue	492	66	10
3 – Green	560	36	10
4 – Red	665	31	10
5 – Vegetation red edge	704	15	20
6 – Vegetation red edge	740	15	20
7 – Vegetation red edge	783	20	20
8 – NIR	833	106	10
8a – Narrow NIR	865	21	20
9 – Water vapour	945	20	60
10 – SWIR – Cirrus	1373	31	60
11 – SWIR	1614	91	20
12 - SWIR	2202	175	20

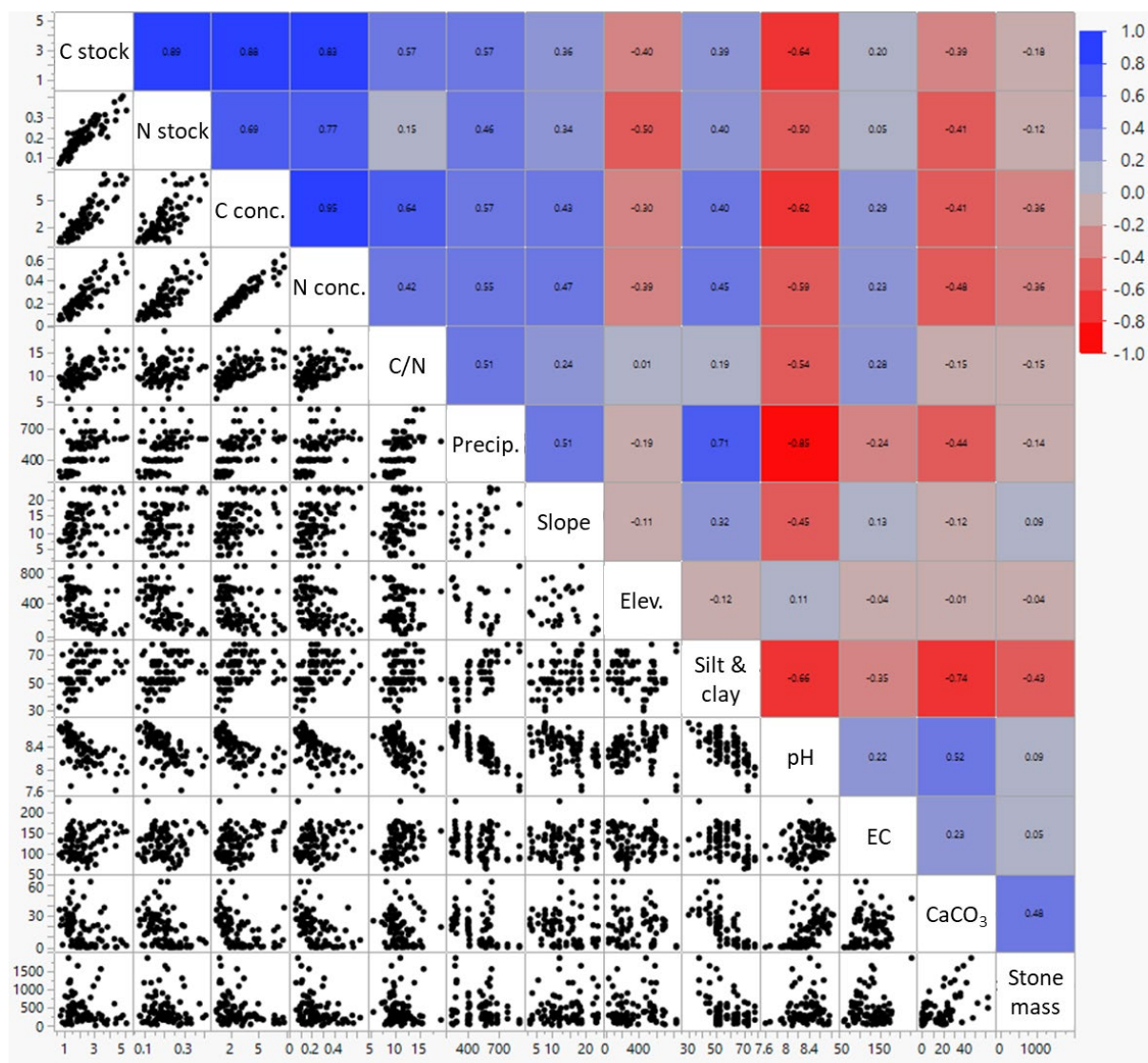
קרקע

ריכוז הפחמן האורגני בקרקע המינרלית נע בין 7.6-7.7% בשכבת הקרקע העליונה (0-10 ס"מ) של חוף הכרמל צפון לבין 0.5% בשכבה התחתונה (20-50 ס"מ) של יתיר מזרח (איור 4.1a). בנייתו של שלוש עומקי הקרקע יחד נמצא קשר חזק וחיובי בין ריכוזי הפחמן והחנקן בקרקע (איור 4.2). נמצא גם יחס חזק למדי וחיובי בין ריכוז הפחמן והחנקן לבין כמות משקעים ותכולת חרסית+סילט בקרקע, ויחס שלילי ל-pH. ברוב האתרים, ריכוז הפחמן האורגני בשכבת הקרקע העליונה (0-10 ס"מ) היה גבוה יותר בחלקה הנטועה מאשר בחלקה הטבעית (איור 4.1a), אבל לא בצורה מובהק סטטיסטית ($p=0.607$ ב-stepwise ANOVA).

ב-ANOVA של כל עומקי הקרקע יחד נמצא כי ריכוז הפחמן האורגני ירד עם העומק וה-pH ועלה עם המשקעים והמוליכות החשמלית בקרקע (טבלה 4.1). ריכוז החנקן בקרקע הושפע מגורמים רבים, בעיקר והיה גבוה יותר בחלקות הטבעיות מאשר בחלקות הנטועות, עלה עם השיפוע וירד עם העומק, הרום (גובה מעל פני הים), ה-pH והצפיפות הגושת. היחס של פחמן לחנקן בקרקע המינרלית נע בין 5.6 בשכבה העמוקה של החלקה הנטועה ביתיר מזרח ל-19.1 בשכבה העליונה של החלקה הנטועה בבר גיורא (איור 4.1b). היחס פחמן לחנקן עלה בצורה מובהקת עם המשקעים, והעליה הזאת הייתה תלויה יותר בחלקות הנטועות מאשר בחלקות הטבעיות (יחסי גומלין בין שימוש הקרקע למשקעים; טבלה 4.1). היחס פחמן לחנקן ירד עם ה-pH ועלה עם המוליכות החשמלית, אך לא הושפע באופן מובהק מעומק שכבת הקרקע. היחס פחמן לחנקן הינו מדד חשוב להבנה של יעילות השימוש בחנקן ביער ולמידת הפירוק של החומר האורגני בקרקע.



איור 4.1. ריכוז פחמן אורגני (a) ויחס פחמן לחנקן בקרקע (b) בשלושת העומקים (0-10, 10-20, 20-50 ס"מ) בחלקות טבעיות ונטועות. היערות מסודרות מרמת המשקעים הגבוהה (יער #1) ועד הנמוכה (יער #19). נתוני החלקות הטבעיות של לימונים, ביריה ובפלפור לא הוספו לאיור (ראה פרק 3 מערך הבדיקות והניסויים, תת פרק קרקע). ראה טבלה 3.1 עבור שמות ומאפייני היערות.



איור 4.2. מטריצת הקורלציות בין מדדים כמותיים שונים, בניתוח של שלושת עומקי הקרקע יחד. מובהקות סטטיסטית מעל $r=0.21$ ($n=90$) (האתרים לימונים, ביריה ובלפור לא הוכנסו לניתוח הזה).

מאגרי הפחמן והחנקן בקרקע סוכמו לשתי השכבות העליונות של הקרקע (0-20 ס"מ), מהן נלקחו 10 דגימות בכל חלקת מחקר, ולכל שכבות הקרקע (0-50 ס"מ) כולל שכבת הנשר [שכבת 20-50 ס"מ לא נדגמה במלואה ברוב האתרים בגלל נוכחות סלעים, לכן עומק הקרקע (טבלה 4.1) השפיע על מסת הקרקע ומאגרי הפחמן והחנקן בה]. מאגר הפחמן האורגני הכולל (נשר + 0-50 ס"מ) הגיע לשיא של 12.6 ק"ג פחמן למ"ר בשתי החלקות של חוף הכרמל צפון (איור 4.3b). מאגרי החנקן הגבוהים ביותר בסך 1.1 ק"ג חנקן למ"ר נמדדו בחלקות הטבעיות של חוף הכרמל צפון ודרום (איור 4.3d).

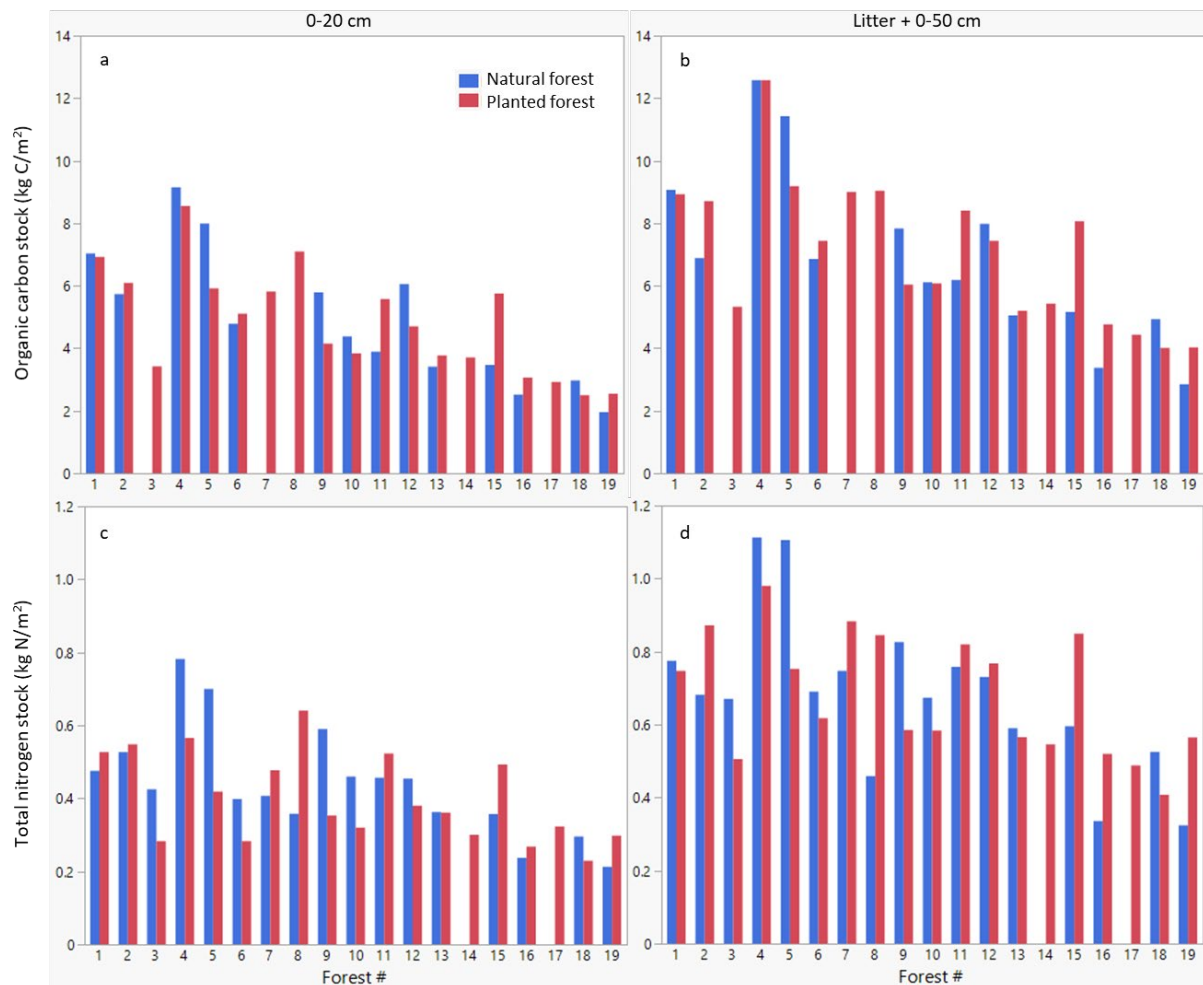
טבלה 4.1. סיכום הניתוחים הסטטיסטיים (mixed model ANOVA) של ריכוז ומאגרי פחמן וחנקן ושל היחס פחמן לחנקן בקרקע המינרלית ובשכבת הנשר. EC, מוליכות חשמלית; SBD, צפיפות גושית של הקרקע (גודל חלקיקים < 2 מ"מ). ערכי P מובהקות ($P \leq 0.05$) הוצגו בספרות מודגשות, ערכי P מובהקות גבולית ($0.1 \geq P > 0.05$) הודגשו בקו תחתון. נתוני החלקות הטבעיות של לימונים, בירה ובלפור לא נכללו בניתוחים של פחמן (ראה פרק 3 מערך הבדיקות והניסויים, תת פרק קרקע).

Variable	Land use type		Precipitation		Land use type * precipitation		Elevation		Precipitation * elevation		Depth		pH		EC or SBD		
	<i>F ratio</i>	<i>P value</i>	<i>F ratio</i>	<i>P value</i>	<i>F ratio</i>	<i>P value</i>	<i>F ratio</i>	<i>P value</i>	<i>F ratio</i>	<i>P value</i>	<i>F ratio</i>	<i>P value</i>	<i>F ratio</i>	<i>P value</i>	<i>F ratio</i>	<i>P value</i>	
Mineral soil (all depths)																	
C conc.			5.84	0.025			4.12	0.086	2.53	0.146	30.60	<.001	13.09	<.001	EC	7.89	0.007
N conc.	3.79	0.054	a				24.01	<.001			80.10	<.001	28.48	<.001	SBD	19.25	<.001
C/N ratio	20.68	<.001	0.65	0.438	18.24	<.001	0.95	0.362	5.55	0.033			6.47	0.013	EC	23.98	<.001
Litter layer																	
C stock	13.15	0.003	5.64	0.035													
N stock	10.6	0.004	3.78	0.070													
Mineral soil (0-20 cm)																	
C stock			24.55	<.001			5.30	0.036									
N stock			20.30	0.001			16.17	0.001									
Litter + mineral soil (0-50 cm)																	
C stock			17.54	0.001			6.15	0.025									
N stock			13.91	0.002			8.84	0.008									

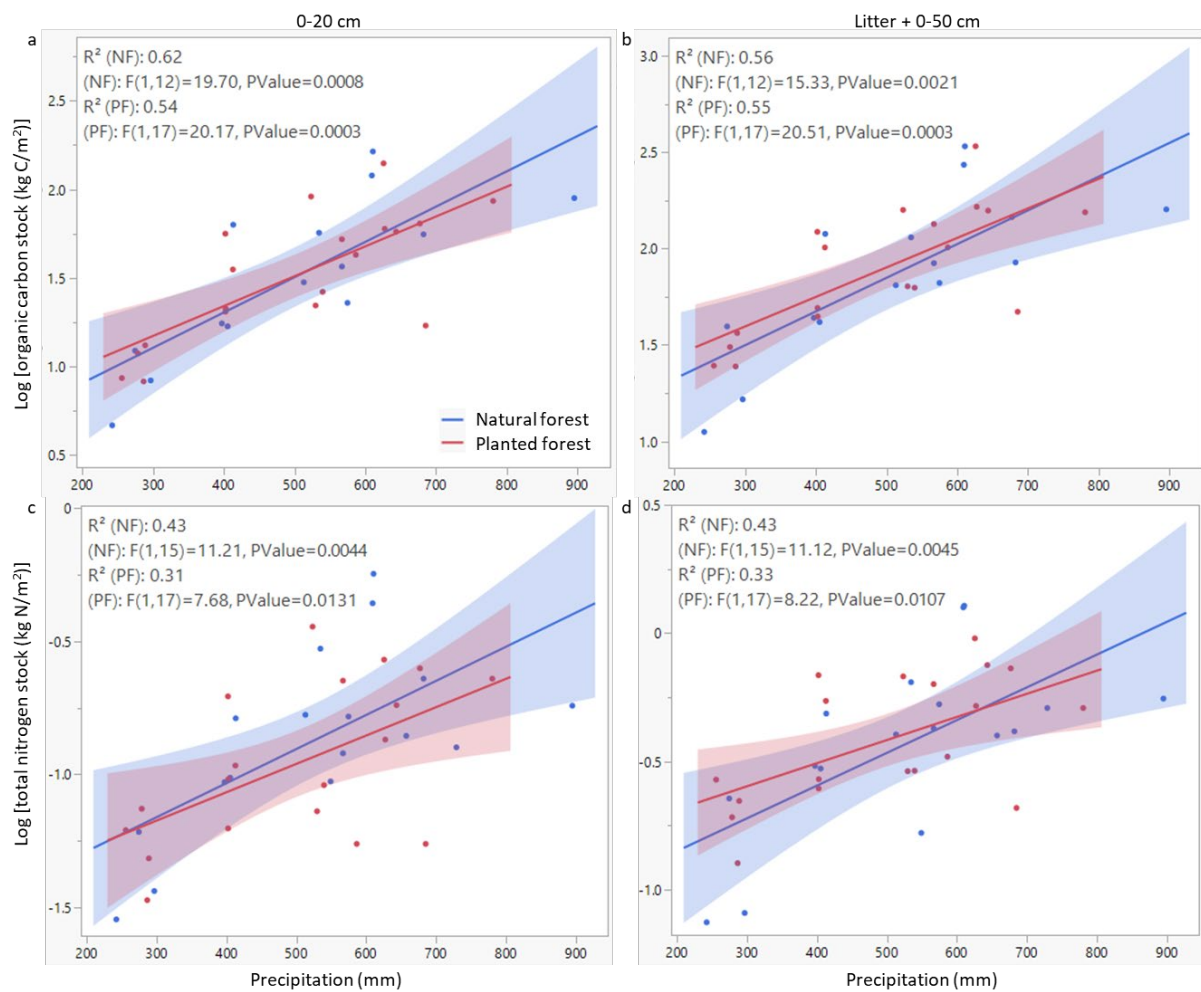
^a תוצאת הניתוח של ריכוז חנקן לכל העומקים של הקרקע המינרלית לא כללה את המשקעים, אך כן כללה גם את השיפוע כגורם מובהק ($F=5.27$, $P=0.026$).

הגורמים היחידים אשר השפיעו על מאגרי הפחמן בשתי השכבות העליונות ובכל שכבות הקרקע והנשר היו משקעים ורום, כאשר שני המאגרים עלו עם כמות המשקעים וירדו עם הרום (טבלה 4.1, איורים 4.4 ו-4.5). שני הגורמים האלה השפיעו באותו אופן גם על מאגרי החנקן כאשר בניתוחים האלה נעשה שימוש גם אתרים לימונים, ביריה ובלפור. שימוש בשיטת מסת קרקע שוות ערך (equivalent soil mass) בה השוותה באופן מתמטית מסת הקרקע המינרלית (מסת קרקע מינוס מסת חומר אורגני בעומקים 0-20 ס"מ) בין שתי החלקות בכל אתר לא שינה את תוצאות ניתוח השונויות (תוצאות לא הוצגו).

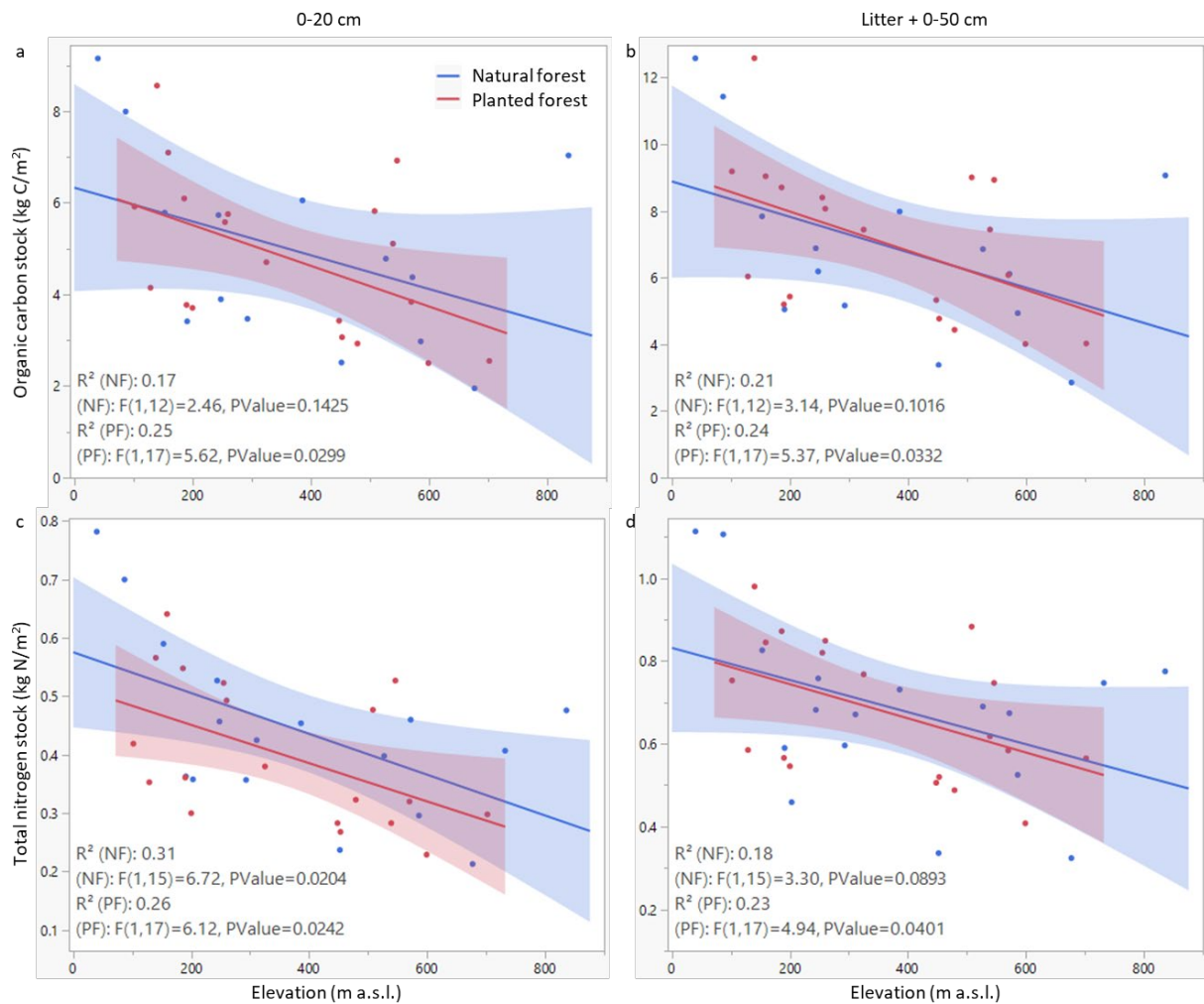
מאגר הפחמן בשכבת הנשר היה גבוה יותר בחלקות הנטועות מאשר בטבעיות, ועלה עם כמות המשקעים (טבלה 4.1). גם מאגר החנקן בנשר היה גבוה יותר בחלקות הנטועות ועלה עם המשקעים (מובהקות גבולית). תרומת מאגר הפחמן בשכבת הנשר לכלל הפחמן האורגני בקרקע הייתה גבוהה יותר בחלקות הנטועות (6.1%) מאשר בחלקות הטבעיות (3.9%; $p=0.0021$).



איור 4.3. מאגרי פחמן אורגני (a, b) וחנקן כללי בקרקע (c, d) בעומקים של 0-20 ס"מ (a, c) ושל שכבת נשר + 0-50 ס"מ (b, d) בחלקות טבעיות ונטועות. היערות מסודרות מרמת המשקעים הגבוהה (יער #1) ועד הנמוכה (יער #19). נתוני החלקות הטבעיות של לימונים, ביריה ובלפור לא הוספו לגרפים של פחמן (ראה פרק 3 מערך הבדיקות והניסויים, תת פרק קרקע). ראה טבלה 3.1 עבור שמות ומאפייני היערות.



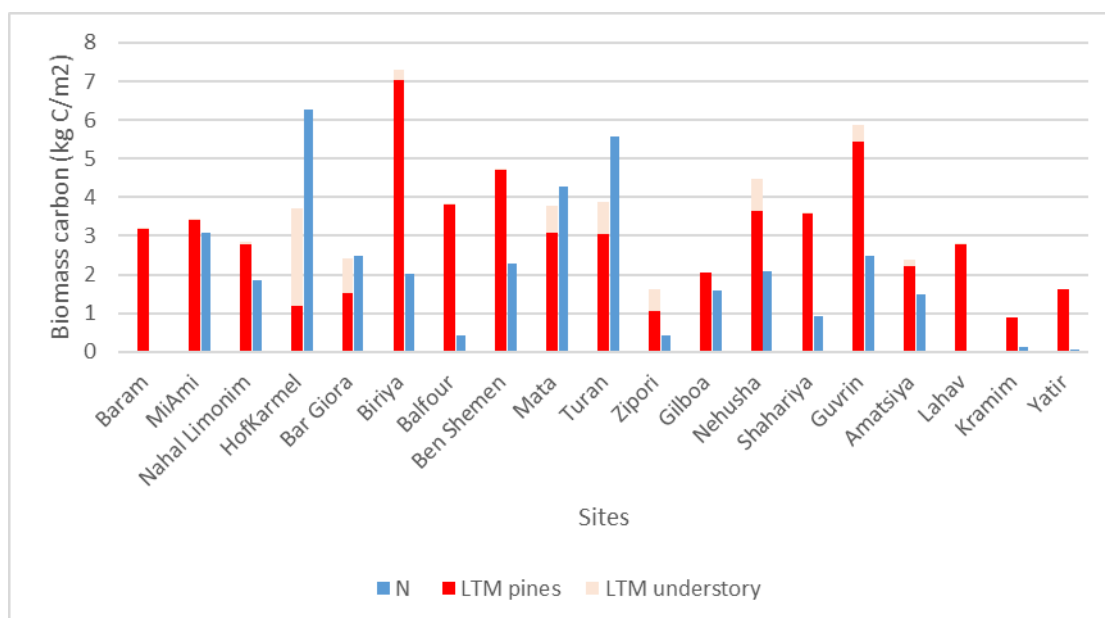
איור 4.4. הקשר בין משקעים לבין מאגרי פחמן אורגני (a, b) וחנקן כללי בקרקע (c, d) בעומקים של 0-20 ס"מ (a, c) ושל שכבת נשר + 0-50 ס"מ (b, d) בחלקות טבעיות ונטועות. הנתונים לציר ה-Y בכל הגרפים עברו טרנספורמציה לוגריתמית (טבעית). נתוני החלקות הטבעיות של לימונים, בירה ובלפור לא הוספו לגרפים של פחמן (ראה פרק 3 מערך הבדיקות והניסויים, תת פרק קרקע).



איור 4.5. הקשר בין רום לבין מאגרי פחמן אורגני (a, b) וחנקן כללי בקרקע (c, d) בעומקים של 0-20 ס"מ (a, c) ושל שכבת נשר + 0-50 ס"מ (b, d) בחלקות טבעיות ונטועות. ציר ה-Y שונה לכל גרף. נתוני החלקות הטבעיות של לימונים, בירה ובלפור לא הוספו של פחמן (ראה פרק 3 מערך הבדיקות והניסויים, תת פרק קרקע).

צומח

גודל מאגר הפחמן בביומסה העל-קרקעית כפי שנקבע בעזרת משוואות אלומטריות של המינים המעוצים נע בחלקות הנטועות בין כ-7 ק"ג פחמן למ"ר ביער בירה לבין פחות מ-1 ק"ג פחמן למ"ר ביער כרמים (איור 4.6). כל או מרבית המאגר נמצא בעצי האורן בחופת היער ומעט נמצא בתת היער, פרט ליער חוף הכרמל בו מרבית הפחמן נתרם על ידי תת היער. בחלקות הטבעיות, גודל מאגר הפחמן בביומסה העל-קרקעית של המינים המעוצים נע בין מעל 6 ק"ג פחמן למ"ר בחוף הכרמל ל-0 ביער להב (איור 4.6). מאגר הפחמן בחלקה הטבעית של יער ברעם לא הוצגה כי החלקה הזאת לא עומדת בהנחת היסוד של המחקר שקובעת כי מאגרי הפחמן העל-קרקעיים בשתי החלקות בכל אתר היו זהות טרם הנטיעות. זה ודאי לא היה המצב בברעם כי מאגר הפחמן בחלקה הטבעית עמד על 17.3 ק"ג פחמן למ"ר, כ-10 ק"ג למ"ר יותר מאשר המאגר הגבוה ביותר במערך המחקר. זאת חלקה שנשמרה מכריתה במהלך תקופה ארוכה מאוד. ברוב האתרים, מאגר הפחמן היה גבוה יותר בחלקה הנטועה מאשר בחלקה הטבעית, אך בחלק מהאתרים נמצא ההיפך.

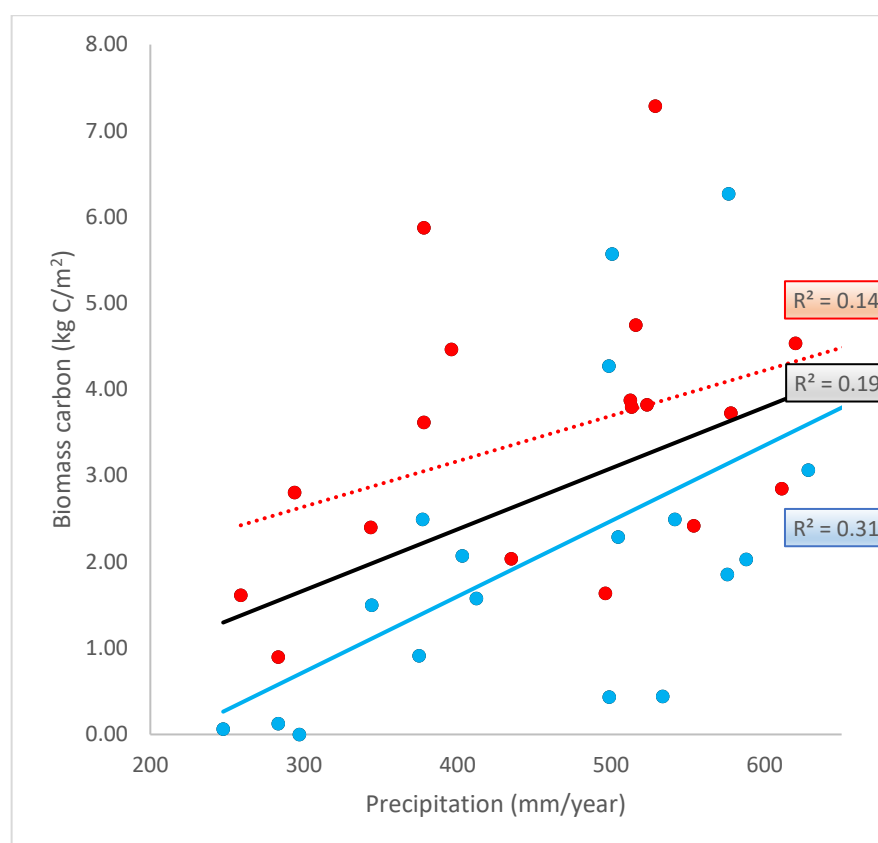


איור 4.6. מאגרי פחמן בביומסה העל-קרקעית של הצמחים המעוצים, כפי שחושבו בעזרת משוואות אלומטריות, בחלקות נטועות (LTM) וטבעיות (N). מאגר הפחמן בחלקות נטועות מחולק למאגר בעצי האורן ירושלים בחופה ולתת היער. החלקה הטבעית של ברעם לא הוצגה (ראה הסבר בטקסט). סדר האתרים הוא מהגשום ביותר (ברעם בצד שמאל) ועד היבש ביותר (יתיר בצד ימין).

גודל מאגר הפחמן בביומסה העל-קרקעית כפי שחושבה בעזרת משוואות אלומטריות מושפע בצורה מובהקת סטטיסטית משימוש הקרקע, כמות המשקעים השנתית והמפנה (טבלה 4.2). לפי כך, נמצאו מאגרי פחמן גדולים יותר בחלקות נטועות מאשר בחלקות טבעיות, ובמפנה צפוני מאשר במפנה דרומי. בנוסף, עלו מאגרי הפחמן עם העליה בכמות המשקעים השנתית לאורך מפל המשקעים בישראל. רגרסיה לינארית הראתה שהקשר בין מאגר הפחמן למשקעים היה מובהק סטטיסטית בחלקות הטבעיות, אך לא בחלקות הנטועות (איור 4.7). לא נמצאו יחסי גומלין מובהקים בין הגורמים. נמצאה גם נטייה במובהקות גבולית של ירידה של מאגרי הפחמן העל-קרקעיים עם העליה ברום (גובה מעל פני הים).

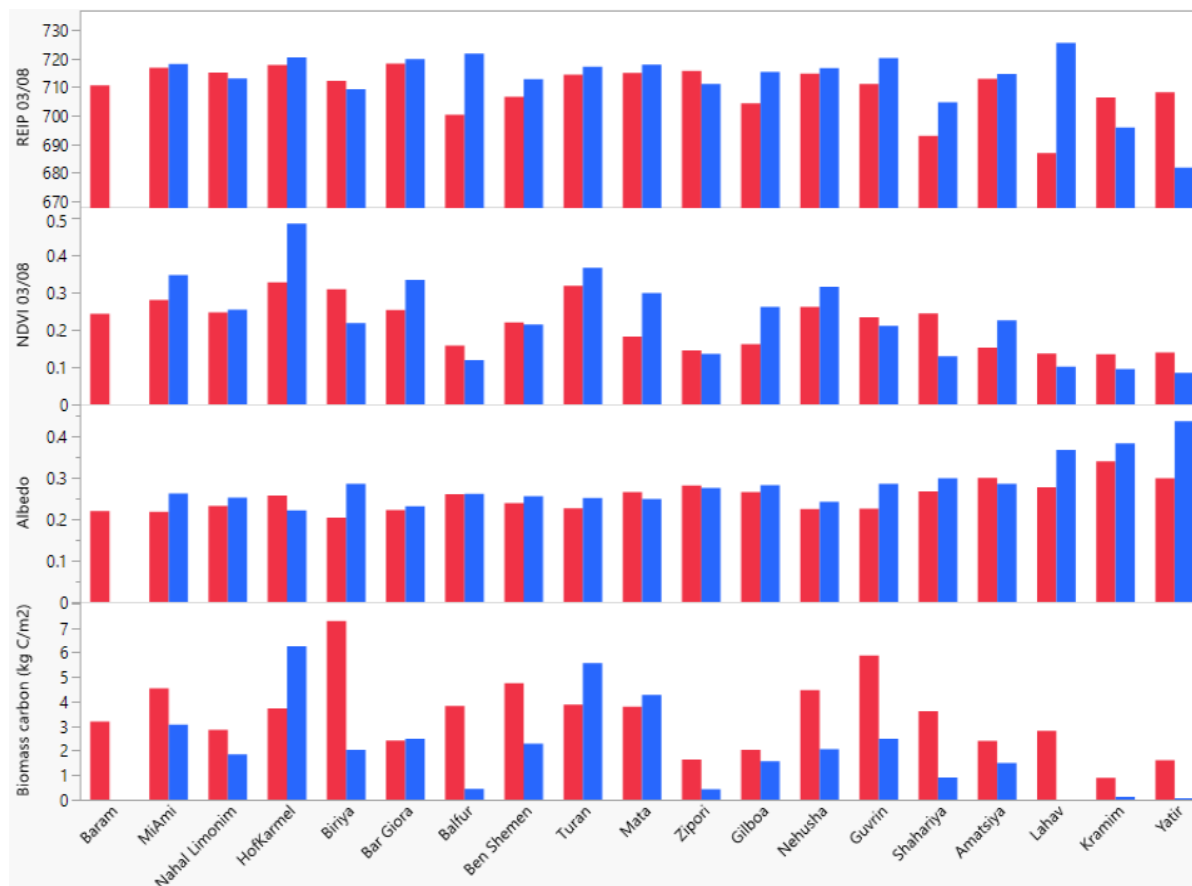
טבלה 4.2. סיכום ניתוח שונות של מאגרי הפחמן בביומסה העל-קרקעית של הצמחים המעוצים כפי שהושפעו משימוש הקרקע וגורמי הסביבה. ביומסה על קרקעית חושבה בעזרת משוואות אלומטריות. ערכי P מובהקים סטטיסטית ($P \leq 0.05$) הוצגו בספרות מודגשות, ערכי P במובהקות גבולית ($0.1 \geq P > 0.05$) הודגשו בקו תחתון.

Main factors	Aboveground biomass carbon stock	
	<i>F ratio</i>	<i>P value</i>
Land use type	8.2856	0.0071
Precipitation	10.9021	0.0024
Aspect	5.3745	0.0270
Elevation	4.820	<u>0.0794</u>



איור 4.7. השתנות מאגר הפחמן בביומסה העל-קרקעית עם ההשתנות בכמות המשקעים השנתית. מוצגת רגרסיה לינארית נפרדת לכל שימוש קרקע וכן רגרסיה משותפת לשניהם. בכחול, מאגרים וקו רגרסיה בחלקות טבעיות; באדום, מאגרים וקו רגרסיה בחלקות נטועות; בשחור, קו רגרסיה משותף לשני שימושי הקרקע. האתר בברעם לא מוצג. רמת המובהקות ו-RMSE של קווי הרגרסיה: טבעי – $P=0.0073$, $RMSE: 1.55$ (mm/year); נטוע – $P=0.016$, $RMSE: 1.52$ (mm/year); משותף – $P=0.1234$, $RMSE: 1.66$ (mm/year).

הדפוסים שהתקבלו ממדדי הצמחייה NDVI ו- REIP היו שונים מאלה שחושבו באמצעות משוואות אלומטריות. בעוד שלחלקות הנטועות היו ערכי ביומסה גבוהים יותר מאשר לחלקות הטבעיות (איור 4.6), ערכי NDVI נראו מעט גבוהים יותר בחלקות הטבעיות בהשוואה לחלקות הנטועות (איור 4.8). עם זאת, הבדלים אלו אינם מובהקים סטטיסטית. ערכי REIP גם הם אינם מבדילים באופן מובהק בין צמדי חלקות נטועות וטבעיות, למרות שהבדלים בביומסה שנצפו בין החלקות. בנוסף, התפלגות ערכי האלבדו יחסית אחידה בין חלקות נטועות וטבעיות (איור 4.8). נראה כי קיים קשר בין ירידה בכמות המשקעים לבין עלייה בערכי האלבדו, כאשר באתרים הדרומיים נמדדו ערכי האלבדו הגבוהים ביותר וערכי מדדי הצומח הנמוכים ביותר.

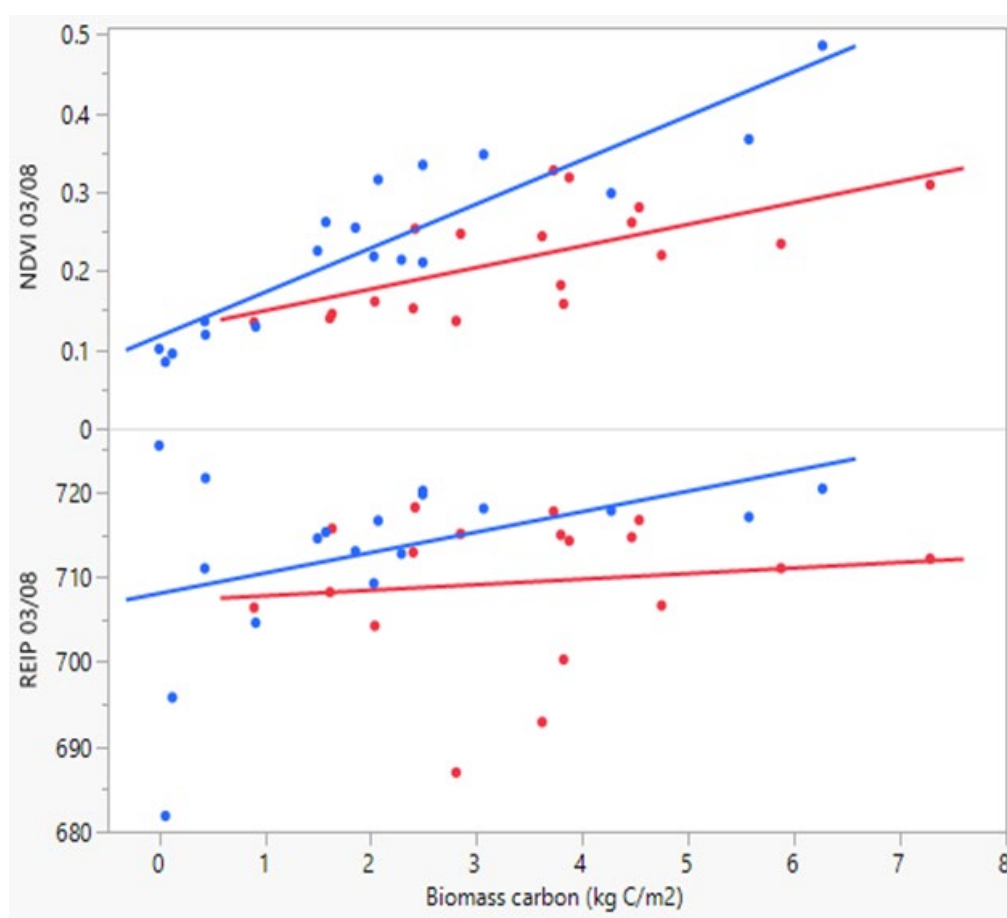


איור 4.8. התפלגות ערכי מדדי הצמחייה NDVI ו- REIP כמו גם האלבדו לכל אתרי המחקר בהשוואה לכלל מאגרי הפחמן העל-קרקעי שחושבו בעזרת משוואות אלומטריות. האתרים בציר האופקי מסודרים לפי גרדיאנט המשקעים, כאשר ברעם, בעל המשקעים הרבים ביותר, נמצא בצד שמאל ויתיר עם המשקעים המועטים ביותר, נמצא בצד ימין. העמודות האדומות מייצגות את החלקות הנטועות והעמודות הכחולות את החלקות הטבעיות.

ערכי ה- NDVI ו- REIP הושפעו באופן מובהק וחיובי מכמות המשקעים (טבלה 4.3) עם ערכי P של פחות מ- 0.0001 עבור NDVI ו- 0.0045 עבור REIP. כיוון המדרון השפיע באופן מובהק על NDVI (ערכים גבוהים יותר במדרונות צפוניים) אך לא על REIP. הרום היה באינטראקציה עם סוג שימוש הקרקע במדד REIP. אינטראקציה זו משקפת את ההבדלים בתגובת סוגי שימוש הקרקע לשינויים ברום: בעוד שבחלקות הטבעיות נמצא קשר שלילי חזק בין הגובה לערכי REIP, בחלקות הנטועות נצפתה מגמה חיובית חלשה מאוד (תוצאות לא הוצגו).

טבלה 4.3. סיכום ניתוח שונות של NDVI ו- REIP כפי שהושפעו משימוש הקרקע וגורמי סביבה. ערכי P מובהקים סטטיסטית ($P \leq 0.05$) הוצגו בספרות מודגשות.

Main factors	NDVI		REIP	
	F ratio	P value	F ratio	P value
Land use type	0.5481	0.4645	1.9560	0.1708
Precipitation	21.964	<0.0001	8.8207	0.0045
Aspect	5.5564	0.0245	0.9501	0.3375
Elevation	0.0068	0.9347	0.1772	0.9221
Land use type*elevation			4.4718	0.0426



איור 4.9. רגרסיות ליניאריות פשוטות של NDVI ו- REIP עם מאגר הפחמן בביומסה על-קרקעית בחלקות טבעיות (בכחול) ונטועות (באדום). מאגר הפחמן בביומסה חושב בעזרת משוואות אלומטריות. חלקת ברעם הטבעיות הוסרה. ביצועי המודלים עבור NDVI: טבעי – $R^2 = 0.83$, $RMSE = 0.05$, $P < 0.0001$; נטוע – $R^2 = 0.42$, $RMSE = 0.05$, $P = 0.0035$. ביצועי המודלים עבור REIP: טבעי – $R^2 = 0.18$, $RMSE = 9.69$; נטוע – $R^2 = 0.01$, $RMSE = 8.89$, $P = 0.6345$.

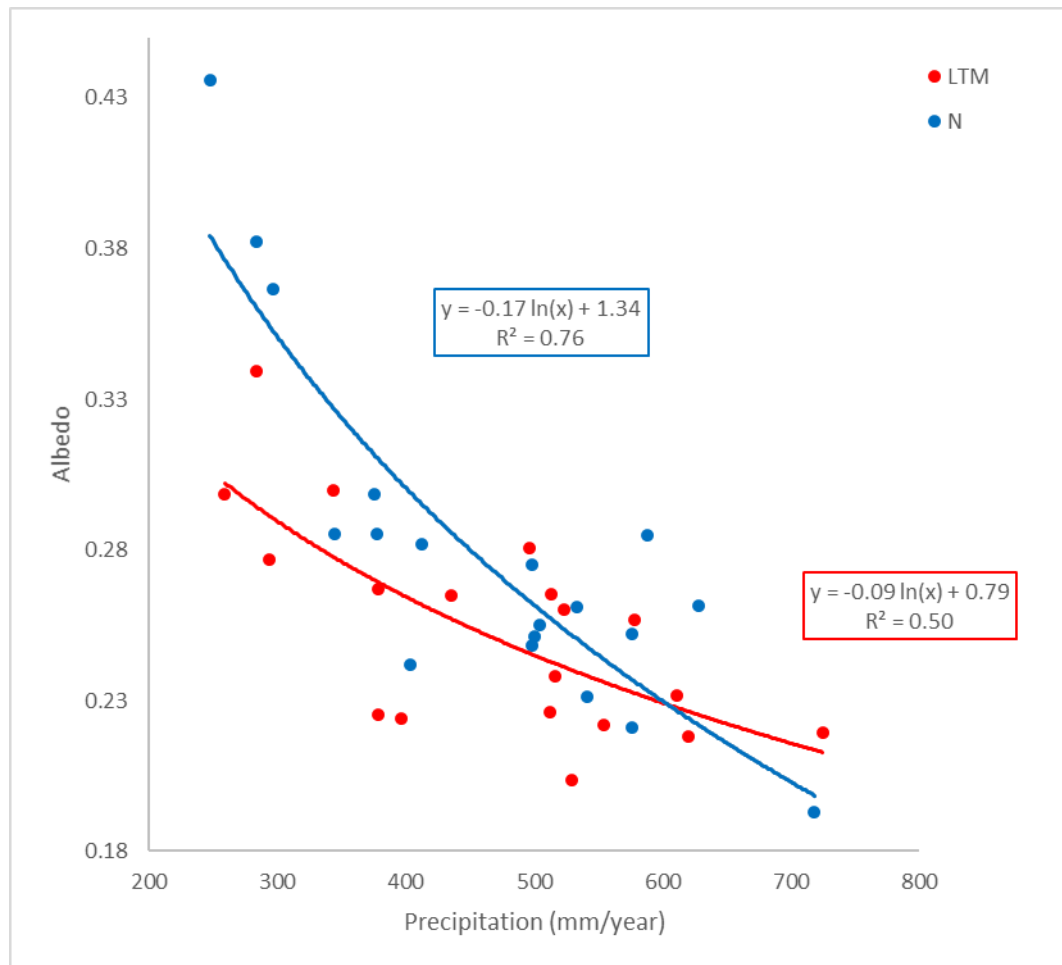
ערכי NDVI ו REIP-הראו ערכי P נמוכים יותר וערכי R^2 גבוהים יותר עם הביומסה בחלקות הטבעיות בהשוואה לחלקות הנטועות (איור 4.9). בניגוד לציפיות, REIP הציג קשר חלש בהרבה עם הביומסה בהשוואה ל-NDVI. חלקת ברעם הטבעית בלטה בערכי ביומסה משמעותית בהשוואה לשאר חלקות הטבעיות, ואף ביחס לחלקות הנטועות, מה שגרם להארכת קו הרגרסיה כלפי ערכי ביומסה גבוהים יותר. הסרת חלקה זו הגבירה את חוזק הרגרסיה בין NDVI לבין מאגר הפחמן בביומסה למ"ר בחלקות הטבעיות מ- $R^2=0.050$ ל- $R^2=0.83$.

אלבדו הושפע באופן מובהק ממספר גורמים. למשקעים הייתה השפעה שלילית חזקה על אלבדו, דבר המצביע על כך שסביבה יבשה יותר מקושרת לערכי אלבדו גבוהים יותר (טבלה 4.4, איור 4.10). קשר לוגריתמי זה בין משקעים לאלבדו היה בולט יותר בחלקות הטבעיות מאשר בחלקות הנטועות. ברוב האתרים נמצא אלבדו גבוה יותר בחלקות הטבעיות מאשר בחלקות הנטועות (איור 4.8), לכן לסוג שימוש הקרקע הייתה השפעה מובהקת על האלבדו (טבלה 4.4). בנוסף נמצאה אינטראקציה מובהקת של שימוש הקרקע עם הרום: חלקות טבעיות הראו תגובה חזקה יותר לשינויים ברום בהשוואה לחלקות נטועות כאשר הרום השפיע באופן מובהק על האלבדו בחלקות הטבעיות, אך לא בחלקות הנטועות (תוצאות לא הוצגו). גם המפנה (כיוון המדרון) השפיע באופן מובהק על האלבדו והראה אינטראקציה עם משקעים, כאשר המדרונות הפונים דרומה הציגו אינטראקציה חזקה ומובהקת עם משקעים, בעוד שהמדרונות הפונים צפונה לא הראו קשר מובהק (תוצאות לא הוצגו).

טבלה 4.4. סיכום ניתוח שונות של אלבדו כפי שהושפע משימוש הקרקע וגורמי סביבה. ערכי P מובהקים סטטיסטית ($P \leq 0.05$) הוצגו בספרות מודגשות.

Main factors	Albedo <i>F ratio</i>	<i>P value</i>
Land use type	10.59	0.0029
Precipitation	26.21	<0.0001
Aspect	4.36	0.0457
Elevation	0.0006	0.9801
Land use type*elevation	7.3	0.0114
Precipitation*aspect	4.7096	0.0383

מגוון מיני הצמחים המעוצים היה גבוה יותר בחלקות הטבעיות בהשוואה לחלקות הנטועות. לדוגמא, כל מין, פרט לאורן ירושלים כמובן, הופיע מספר רב יותר בחלקות הטבעיות (טבלה 3.3). עושר המינים (כולל בחלקה הטבעית בלהב בה לא נמצאו מינים מעוצים) היה בממוצע 5.7 בחלקות הטבעיות ו- 5.1 בחלקות הנטועות. עושר המינים עלה עם המשקעים בשני הסוגים של שימושי הקרקע (תוצאות לא הוצגו).



איור 4.10. הקשר בין אלבדו למשקעים בשני שימושי הקרקע. עבור החלקות הנטועות (LTM), ערכי המודל הם $RMSE = 0.03$, $P = 0.0012$. עבור החלקות הטבעיות (N), הערכים הם $RMSE = 0.03$, $P < 0.0001$. הנתונים כוללים את אתר ברעם.

5. דיון ומסקנות שיקללו המלצות ממשקיות ופערי ידע שעלו במהלך המחקר

הפרויקט הזה חקר את השפעת הייעור על מאגרי הפחמן האורגני בקרקע ובביומסה של הצומח המעוצה לאורך גרדיאנט המשקעים בישראל. לשם כך התבצעה השוואה בין המאגרים בזוגות של שני סוגים של שימושי קרקע: (1) חלקות מיוערות (חלקות LTM נטועות באורן ירושלים) ו- (2) חלקות לא מיוערות (טבעיות, באזור של אותם יערות בהם נדגמו חלקות ה-LTM). ממצאי המחקר מעידים על כך שאין הבדל בין שני סוגי שימושי הקרקע לגבי מאגרי הפחמן האורגני, כמו גם החנקן הכללי, בקרקע כאשר ההשוואה כללה את שכבת הנשר וחצי המטר העליון של הקרקע המינרלית. לגבי מאגר הפחמן בביומסה המעוצה העל-קרקעית נמצא כי לחלקות הנטועות באורן ירושלים היה 67% יותר פחמן מאשר לחלקות הטבעיות. הממצא הזה התקבל בעזרת משוואות אלומטריות בהן מחשבים ביומסה ממדידות קרקעיות בלתי הרסניות. יש לציין שרוב הפחמן האורגני נמצא בתוך ולא מעל הקרקע. מאגר הפחמן בנשר ובקרקע הסתכם במוצע של 6.9 ק"ג פחמן למ"ר בשני הסוגים של שימוש הקרקע, בעוד שמעל הקרקע היו 3.5 ו- 2.1 ק"ג פחמן למ"ר בחלקות נטועות וטבעיות, בהתאמה. למרות שלא נצפו הבדלים בסוגי היערות לגבי מאגרי הפחמן בקרקע, סביר שהן היערות הנטועות והן השטחים הטבעיים צברו במהלך השנים פחמן אורגני בקרקע, כפי שנמצא ביער יתיר 35 ו- 50 שנים אחרי הנטיעה (Grünzweig et al. 2007; Qubaja et al. 2020). כדי לעקוב אחר צבירת הפחמן יש צורך בדיגום חוזר של הקרקעות במרווחי זמן של כ- 10 שנים (Schrumpf et al. 2011).

מאגרי הפחמן בביומסה ובקרקע עלו עם כמות המשקעים לאורך המפל האקלימי בישראל, הן ביער הנטוע והן בשטח הטבעי. בניתוח הזה השתמשנו בכמות משקעים רב-שנתית היות וצבירת מאגרי פחמן מתבצעת לאורך עשורים רבים. החלפה בניתוח השונות של משקעים במדד הצחיחות (aridity index) הביאה לתוצאה דומה מאוד לזו שהוצגה כאן בגלל קשר ליניארי חזק מאוד בין כמות משקעים למדד הצחיחות (תוצאות לא הוצגו). מאגרי הפחמן בביומסה ובקרקע ירדו עם העליה בגובה מעל פני הים (רום). למרות שהקשר היה חלש יותר מאשר הקשר בין פחמן למשקעים, ירידת הפחמן עם העליה ברום יתכן ומצביעה על השפעה שלילית של ירידה בטמפרטורה, או השפעה חיובית של עליה בטמפרטורה, על יצרנות ואגירת פחמן. שינוי אקלים מביא לחוסר יובש רב יותר בארץ. סביר להניח כי לירידה במשקעים כתוצאה משינוי אקלים השפעה חזקה יותר על מאגרי הפחמן לטווח הארוך מאשר עליה בטמפרטורה.

לא התקבלו הבדלים בין סוגי שימוש הקרקע במדדים הספקטראליים (NDVI ו-REIP) שכנראה מושפעים בעיקר מהעלווה בחופות היער. יתכן וניתן לפרש את הסטייה בין התוצאות שהתקבלו בשיטות המחקר השונות (משוואות אלומטריות לעומת חישה מרחוק) בכך שעיקר ההבדל בין יערות נטועות וטבעיות נבע מהפחמן הנאגר בחומר המעוצה (גזעים וענפים). בעזרת משוואות אלומטריות ניתן לחשב את כל הביומסה, כולל גזעים וענפים, בעוד שהמדדים הספקטראליים, לפחות אלה במחקר הנוכחי, כנראה מושפעות פחות מחומר מעוצה בתוך החופה. סברה זו קיבלה חיזוק על ידי הקשרים בין תוצאות המשוואות אלומטריות לבין תוצאות המדדים הספקטראליים. קשרים אלה היו חזקים יותר ביערות הטבעיים מאשר ביערות הנטועות (איור 4.9). למרות חוסר הרגישות לכאורה של NDVI לחומרים מעוצים, הסתבר כי המדד הזה הצליח לשקף ביומסה של עצים ושיחים בצורה טובה יותר מאשר ה-REIP. עבור ביומסה של גידולים עשבוניים חד-שנתיים הדבר REIP היה עדיף בעניין הזה על NDVI (Herrmann *et al.* 2011). עם כך יתכן שימוש מסוים בקשרים באיור 4.9 לחישוב פחמן בביומסה על קרקעית מערכי NDVI עד לפיתוח שיטות עדיפות לכך (ראה גם דיון למטה לגבי חוסר הדיוק של המשוואות האלומטריות). לדוגמה, לוויין חדש של ה-European Space Agency נושא עליו חיישן חדש (P-band synthetic aperture radar) כדי לספק מידע על הביומסה של יערות, כולל גזעים וענפים (<https://earth.esa.int/eogateway/missions/biomass>).

המחקר הזה כימת את מאגרי הפחמן האורגני בביומסה העל-קרקעית, בשכבת הנשר ובחצי המטר העליון של הקרקע. הוא לא עסק בפחמן בשכבות קרקע עמוקות יותר שקשה מאוד לכמת בגלל נוכחות המסלע בכמעט כל היערות בארץ. הצומח העשבוני לא נכלל במחקר היות ורוב הביומסה העשבונית היא חד-שנתית והופכת בתחילתו של כל קיץ לחלק משכבת הנשר. נשר או חומר מעוצה גס (coarse woody debris; גזעים וענפים גדולים שלא חלק מהחומר הדק בשכבת הנשר) הוא מאגר שניתן לכמת, אך לא נכלל במחקר הזה. לנשר מעוצה גס עשוי להיות תרומה משמעותית למאגר הפחמן ביער (מלאת 2021), בו ניתן להתחשב במאזנים עולמיים להסרת פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה (Luo *et al.* 2025).

התוצאות במחקר הזה נתונות למידה מסוימת של חוסר דיוק, במיוחד בקשר למאגרים העל-קרקעיים. דיגום הקרקע נעשה בצורה קפדנית למדי כאשר נאספו 10 דגימות בכל חלקה, פי שניים מאשר במחקרים קודמים (Grünzweig *et al.* 2007; Qubaja *et al.* 2020). בנוסף, אנליזת הדגימות במעבדה נעשתה שלוש פעמים כדי להגיע לתוצאה הטובה ביותר. לגבי הביומסה העל-קרקעית, איסוף הנתונים בשטח, כלומר מדידות גובה העצים והשיחים ומדידות קוטר הגזע והחופה, נעשה בצורה שיטתית על ידי דוגם אחד. ובכל זאת, מדידות אלה הן סובייקטיביות במידת מה ויתכן ונעשו בצורה שונה מאשר המדידות שנעשו לפיתוח המשוואות האלומטריות. אך עיקר החסר ודאות לגבי חישוב הביומסה העל-קרקעית נובע מהמשוואות עצמן. בארץ קיימות מעט משוואות כאלה והן פותחו עבור טווח מסוים של גודל הצמחים ועבור אזורים ומצבים מסוימים, כגון אורן ירושלים ביער יתיר (Grünzweig *et al.* 2007), מספר שיחים ועצים באזורי חיץ של יערות מחטניים (אשכנזי 2016), ובר זית בינוני ואלת המסטיק בגריגה תחת רעיה (הר-אדום וגרינצוויג 2013). לא ניתן להשתמש במשוואות האלה למצבים אחרים. למשל עצי אורן ירושלים גבוהים יותר ביער צפוף יותר במרכז או צפון הארץ. לכן, לרוב המינים ברוב היערות בארץ נאלצנו להשתמש במשוואות שפותחו בחו"ל עבור מצבים דומים לאלה שנמצאים בארץ. לפעמים משוואות אלה פותחו למינים אחרים, למשל במקרה של אלון מצוי לגבי לא קיימת משוואה לעצים גבוהים מ-3 מ'. לכן, כדי לדייק בהערכת ביומסה ביערות וחורשים בישראל קיים צורך דחוף בפיתוח משוואות אלומטריות מקומיות. הערכות מדויקות יותר גם ישפרו את היכול של מדדים ספקטראליים מתאימים.

למרות המשמעות הרבה של לכידת פחמן על ידי יערות נטועים, יש להתחשב במכלול ההשלכות של נטיעת יערות, ביניהן ההשפעה על המגוון הביולוגי ואפקט האלבדו. למרות שהמחקר הזה לא התמקד במגוון הביולוגי, נמצא כי לחלקות הטבעיות עושר גבוה יותר במקצת מאשר לחלקות הנטועות. אפקט האלבדו מצמצם את השפעתה החיובית (איפחות, mitigation) של לכידת פחמן על האקלים. הגורמים לכך הם התחממות פני השטח המיוער על ידי הפחתה של החזרת קרינה גלובלית לחלל (ירידה באלבדו) וירידה בשטף הקרינה התרמית בעקבות ה- canopy convective effect (Rotenberg & Yakir 2010; Grünzweig *et al.* 2022). האפקט הזה בא לידי ביטוי בעיקר באזור הדרום (עד בערך 400-450 מ"מ גשם בשנה) בו החלפת שטח טבעי (או טבעי למחצה בהתחשב בעוצמת הרעיה באזור) מוריד בצורה משמעותית את האלבדו, כלומר את שטף הקרינה הגלובלית שמוחזרת לחלל (איור 4.10). אך גם באזורים לחים יותר קיימים שטחים טבעיים בעלי אלבדו גבוה יחסית, אותם לא כדאי ליער מבחינת ההשפעה הכוללת של הייעור על האקלים (לכידת פחמן לעומת אפקט האלבדו) (Rotenberg & Yakir 2011; Rohatyn *et al.* 2023).

הפרויקט התמקד באורן ירושלים כמין מרכזי ששימש לייעור לאורך רוב מפל המשקעים בארץ. עם זאת, קיים פער ידע משמעותי לגבי מיני עץ אחרים שמהווים נתח נכבד ביערות המקומיות, כגון מחטניים אחרים ורחבי עלים. העבודה הנוכחית יכולה לשמש בסיס לפיתוח שיטה יעילה להערכת מאגרי הפחמן ותרומת הייעור ללכידת פחמן בישראל על ידי שילוב בין גישות אלומטריות וספקטרליות, יחד עם קידוחי קרקע ממוקדים.

מתוצאות המחקר הזה, ולמרות שלא בוצע חישוב כולל של אילוצ קרינתי (Rohatyn *et al.* 2023), ניתן להסיק כי ייעור באורן ירושלים בדרום הארץ אינו יביא לאיפחות של שינוי אקלים. הסיבה העיקרית לכך היא ההפחתה המשמעותית באזור הזה של האלבדו בעקבות ייעור (איור 4.10). באזור הצפון תיתכן תועלת מבחינת אגירת פחמן במקומות בהם מאגר הפחמן העל-קרקעי והאלבדו נמוכים יחסית, כפי שנמצא במחקר הזה לגבי יער בלפור ויער ציפורי.

6. יישום והטמעה: במידה וניתן ציינו תוכנית ליישום/הטמעה והמשך שת"פ עם קק"ל

להלן נקודות לצמצום פערי ידע:

- פיתוח משוואות אלומטריות למינים המרכזיים, כגון אורן ירושלים במרכז ובצפון, אלון מצוי בכל הארץ, ועוד.
- דיגום חוזר של קרקעות וביומסה במרווחי זמן של כ- 10 שנים לשם מעקב ארוך טווח אחר צבירת הפחמן במערכות אקולוגיות בישראל.
- הרחבת הסקירה של מאגר פחמן בביומסה על-קרקעית על ידי קביעת NDVI בעונה היבשה וחישוב בעזרת הקשרים מהמחקר הזה, כאשר הדיוק רב יותר לצומח טבעי מאשר ליער נטוע.
- העבודה הנוכחית יכולה לשמש בסיס לפיתוח שיטה יעילה להערכת מאגרי הפחמן ותרומת הייעור ללכידת פחמן בישראל על ידי קידוחי קרקע ממוקדים יחד עם שילוב בין גישות אלומטריות וספקטרליות.
- הרחבת הסקירה של הבדלי אלבדו בין שטח מיוער ללא מיוער על ידי שימוש בחישה מרחוק.
- הרחבת ניטור הפחמן האורגני בקרקע ובביומסה ליערות בעלי גילאי עצים שונים ותחת מיני עץ נוספים.

7. פרסומים וכנסים

פרסומים:

מאמר מדעי הכולל את עיקר ממצאי המחקר נמצא בהכנה.

עבודות גמר (תזה למסטר):

וויליאם מלוולה. 2023. תרומת הייעור ללכידת פחמן אורגני בקרקע לאורך מפל האקלים הצחיח בישראל. מוסמך למדעי החקלאות, הפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה, האוניברסיטה העברית בירושלים.

יאיר בן ציון. 2024. מאגרי פחמן עילי בנטיעות אורן ירושלים ובחורש טבעי לאורך מדרג המשקעים בישראל. מוסמך למדעי החקלאות, הפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה, האוניברסיטה העברית בירושלים.

כנסים:

וויליאם מלוולה. 2023. Contribution of afforestation to soil organic carbon sequestration along an aridity gradient in Israel. הוועידה השנתית למדע וסביבה, תל אביב.

José Grünzweig. 2023. Soil carbon sequestration – ways of monitoring and implementation. The 14th Dahlia Greidinger International Symposium, Haifa.

ז'וזה גרינצוויג. 2024. Impact of climate and land use on soil biogeochemistry in dry forests and woodlands. קרקע ואקולוגיה, החוג לקרקע ומים, הפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה, האוניברסיטה העברית בירושלים, רחובות.

ז'וזה גרינצוויג. 2024. לכידת פחמן ביערות ישראל - הערכות ופערי ידע. חוקרים היום את המחר, יום עיון מחקרים ופיילוטים של קרן קיימת לישראל בתחום משבר האקלים, תל אביב.

ז'וזה גרינצוויג. 2024. הגורמים המשפיעים על לכידת ומאגרי פחמן אורגני בקרקעות יער וחורש ים תיכוניים. הוועידה השנתית למדע וסביבה, באר שבע.

José Grünzweig. 2024. Soil organic carbon and related fluxes in extreme environments (boreal, drylands) and how they are affected by human interventions. Forest ecology seminar, Faculty of Forestry and Wood Technology, Mendel University, Brno, Czech Republic.

José Grünzweig. 2024. Forest carbon sequestration and water use in drylands. International workshop on Greening based on water supply and development of forestry and grassland in water-limited areas, National Innovation Alliance of Forest-Water Management of Northern China, Yan'an, Shaanxi, China, July 2025

8. ספרות

אשכנזי, מ. (2016). אזורי חיץ לאש והשפעתם על מבנה הצומח ועל התנהגות אש ביערות מחט ים-תיכוניים. עבודת גמר (MSc). פקולטה לחקלאות, מזון וסביבה ע"ש רוברט ה. סמית, האוניברסיטה העברית בירושלים, רחובות.

הר-אדום, א., גרינצוויג ז'. (2013). משוואות אלומטריות עבור שיחי בר זית בינוני ואלת המסטיק ברמת הנדיב. דוח מסכם, רמת הנדיב.

מלאת, מ. 2021. עומס דלק, לחות והתנהגות אש חזויה ביער מחטני בהשפעת טיפולי דילול. עבודת גמר (MSc). פקולטה לחקלאות, מזון וסביבה ע"ש רוברט ה. סמית, האוניברסיטה העברית בירושלים, רחובות.

Grünzweig, J.M., de Boeck, H.J., Rey, A., Santos, M.J., Adam, O., Bahn, M. *et al.* (2022). Dryland mechanisms could widely control ecosystem functioning in a drier and warmer world. *Nature Ecology & Evolution*, 6, 1064-1076.

Grünzweig, J.M., Gelfand, I., Fried, Y. & Yakir, D. (2007). Biogeochemical factors contributing to enhanced carbon storage following afforestation of a semi-arid shrubland. *Biogeosciences*, 4, 891-904.

Helman, D., Osem, Y., Yakir, D. & Lensky, I.M. (2017). Relationships between climate, topography, water use and productivity in two key Mediterranean forest types with different water-use strategies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 232, 319-330.

- Herrmann, I., Pimstein, A., Karnieli, A., Cohen, Y., Alchanatis, V. & Bonfil, D.J. (2011). LAI assessment of wheat and potato crops by VENμS and Sentinel-2 bands. *Remote Sensing of Environment*, 115, 2141-2151.
- Luo, Y., Wei, N., Lu, X., Zhou, Y., Tao, F., Quan, Q. *et al.* (2025). Large CO₂ removal potential of woody debris preservation in managed forests. *Nature Geoscience*, 18, 675-681.
- Ogaya, R., Peñuelas, J., Martínez-Vilalta, J. & Mangirón, M. (2003). Effect of drought on diameter increment of *Quercus ilex*, *Phillyrea latifolia*, and *Arbutus unedo* in a holm oak forest of NE Spain. *Forest Ecology and Management*, 180, 175-184.
- Qubaja, R., Grünzweig, J.M., Rotenberg, E. & Yakir, D. (2020). Evidence for large carbon sink and long residence time in semi-arid forests based on 15-year flux and inventory records. *Global Change Biology*, 26, 1626-1637.
- Rohatyn, S., Rotenberg, E., Tatarinov, F., Carmel, Y. & Yakir, D. (2023). Large variations in afforestation-related climate cooling and warming effects across short distances. *Communications Earth & Environment*, 4.
- Rotenberg, E. & Yakir, D. (2010). Contribution of semi-arid forests to the climate system. *Science*, 327, 451-454.
- Rotenberg, E. & Yakir, D. (2011). Distinct patterns of changes in surface energy budget associated with forestation in the semiarid region. *Global Change Biology*, 17, 1536-1548.
- Ruiz-Peinado, R., del Rio, M. & Montero, g. (2011). New models for estimating the carbon sink capacity of Spanish softwood species. *Forest Systems*, 20, 176-188.
- Salvoldi, M., Tubul, Y., Karnieli, A. & Herrmann, I. (2022). VENμS-Derived NDVI and REIP at Different View Azimuth Angles. *Remote Sensing*, 14.
- Schrumpf, M., Schulze, E.D., Kaiser, K. & Schumacher, J. (2011). How accurately can soil organic carbon stocks and stock changes be quantified by soil inventories? *Biogeosciences*, 8, 1193-1212.