

תמר רביב

ראש אגף מגוון ביולוגי ושטחים פתוחים, המשרד להגנת הסביבה

דותן רותם

אקולוג שטחים פתוחים, חטיבת המדע והממשק, רשות הטבע והגנים

אסף זנזורי

רכז מדיניות תכנון ומנהל תחום שימור בתי גידול, אגף שימור סביבה וטבע, החברה להגנת הטבע

תמרה לוטנר לב

מנהלת מדיניות אקלים, אגף שימור סביבה וטבע, החברה להגנת הטבע

מאמר זה עבר שיפוט עמיתים

ציטוט מומלץ

רביב ת, רותם ד, זנזורי א ולוטנר לב ת. 2022. קיבוע ולכידה של פחמן אטמוספרי באמצעות המערכות האקולוגיות. *אקולוגיה וסביבה* 13(3): 6-14



מרבדי עשב הים הם בית גידול למגוון רחב של בעלי חיים ממערכות טקסונומיות שונות, כגון קיפודי ים, חשופיות, צלופחים, תמנונים, דיונונים, סרטנים, שושנות ים, סוסוני ים, בטאים, צבי ים, דולפינים ודגים ממינים רבים. צולם בחוף הצפוני של אילת, במהלך צלילת מחקר בהובלת ד"ר גדעון וינטרס | צילום: עמרי יוסף עומסי, רשות הטבע והגנים

קיבוע ולכידה של פחמן אטמוספרי באמצעות המערכות האקולוגיות

גיליון סתיו 2022 / כרך 13(3) / הפחתת פליטות גזי חממה 15 בנובמבר, 2022

[סקירות](#)

על קצה המזלג

- חיפוש דרכים טבעיות הנשענות על תהליכים אקולוגיים-ביולוגיים טבעיים למיתון עליית ריכוזי פחמן דו-חמצני באטמוספירה הוא נושא מרכזי במחקר ובדיו הציבורי בתחום.
- מאמר זה סוקר את תרומתן של מערכות אקולוגיות טבעיות לקיבוע ולכידה של פחמן, תוך הדגשת חלקן של המערכות האקולוגיות הטבעיות בישראל.
- לא רק ששיקום מערכות טבעיות ושמירה על המערכות הפעילות תורמים ללכידת פחמן, ישנה גם תועלת עצומה לאדם מעצם השמירה על המגוון הביולוגי המקומי ועל השירותים הנוספים של המערכת האקולוגית.
- יש לחזק את מודעות מקבלי ההחלטות לחשיבות המהותית והפוליטית של שמירת טבע ותרומתה להתמודדות עם שינוי האקלים, ובייחוד לתרומת המערכות הטבעיות של ישראל להפחתת כמות הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה, שמושגת בהשקעת משאבים מועטה יחסית.

המערכת

תקציר

לקיבוע וללכידה של פחמן אטמוספרי במערכות אקולוגיות, בתהליכים טבעיים, יכולה להיות תרומה רבה להאטת ההתחממות הגלובלית. רבים מכירים בהקשר זה את תפקידם של היערות הטרופיים, אך פחות מוכרת בהקשר זה תרומתן של מערכות אקולוגיות אחרות שיכולות ללכוד כמויות גדולות מאוד של פחמן ויחד עם שירותי מערכת אקולוגיים נוספים לסייע לצמצום השפעות שינוי האקלים. חלק גדול מהמערכות האקולוגיות הללו, כגון בתי גידול לחים, כרי עשב ים ובתות עשבוניות ויערות, מאוימות בשל פעילות האדם הגורמת להרס ולאובדן של בתי גידול ולהכחדת מינים.

מאמר זה סוקר מחקרים המתמקדים בחשיבותן של מערכות אקולוגיות מגוונות מתפקדות לתהליכי קיבוע ולכידה של פחמן תוך הדגשת חלקן של מערכות אקולוגיות טבעיות (לעומת מערכות אקולוגיות מהונדסות ומנוהלות, כגון שטחים חקלאיים) המתקיימות בישראל. המאמר משרטט תמונה שלפיה גם למערכות אקולוגיות שהבינוססה שלהן מעל פני הקרקע קטנה יחסית, כמו בתות עשבוניות ובתות שיחניות באזורים ים תיכוניים, יש תרומה לקיבוע פחמן וללכידתו. התרומה היא גם בטווח הקצר בגין מחזורי צמיחה מהירים וגם בטווח הארוך בגין גידול בית השורשים וקיבועו בתת-הקרקע.

עד כה ההתמודדות של ישראל בנושא שינוי אקלים היא במציאת פתרונות טכנולוגיים להפחתת פליטות גזי חממה, אך הם אינם יכולים לתת מענה שלם והולם לאתגר זה. לעומת זאת, הקישור בין חשיבות שמירת טבע להתמודדות עם שינוי האקלים, שמוכר במרבית העולם המערבי, מוכר פחות בישראל ובוודאי בתהליכי קבלת החלטות. מטרת המאמר היא להעלות למודעות הציבור ומקבלי ההחלטות בישראל את תרומתן של המערכות האקולוגיות לקיבוע פחמן גם בהקשר המקומי. מהמאמר ניתן להבין כי בהשקעת משאבים מועטה יחסית, שיופנו לשמירה על מערכות טבעיות, לשיקום שלהן, לממשק ולמיזמים של התפארות (rewilding), כמו גם לתכנון יעיל של שטחים פתוחים, אנחנו מרוויחים גם שמירה על המגוון הביולוגי וגם תועלת רחבה ומגוונת, כגון לכידת פחמן ושירותי ויסות אחרים. הבנה ומודעות לכך שגם התרומה של המערכות הטבעיות של ישראל היא בעלת ערך, הן בהיבט המהותי הן בהיבט המוסרי ומבחינת מחויבות ישראל לאמנות הבין-לאומיות שהיא חתומה עליהן, עשויות לקדם מדיניות שמירה ושיקום של מערכות אקולוגיות טבעיות בישראל.

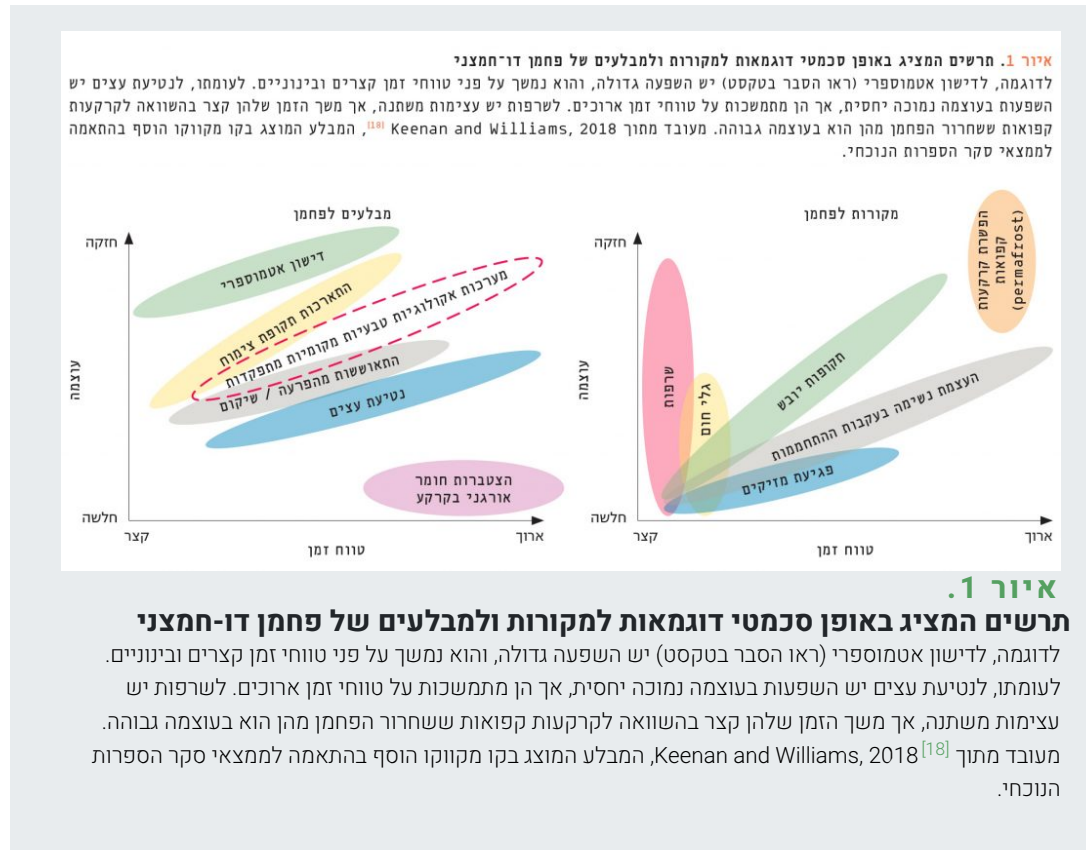
קשר בין משבר האקלים ומשבר המגוון הביולוגי

משבר האקלים ומשבר המגוון הביולוגי הם שניים מהמשברים הגדולים של האנושות בימינו, ויש קשר הדוק ביניהם, גם בהקשר של פליטות וקיבוע גזי חממה. הפעילות האנושית פולטת כמות הולכת וגוברת של גזי חממה. התחבורה, התעשייה ושרפות יזומות ביערות העד של האמזונס מייצרות יחד כ-12 ג'יגה-טונות פחמן בשנה [29], וכמות פליטות הפחמן הגלובליות מהתעשייה בלבד עלתה ב-6% בשנת 2021 והגיעה ל-36.3 טריליון טונות, שהוא שיא בכל הזמנים [23]. הפשרת קרקעות קפואות (permafrost) או שרפות יער הנגרמות מגלי חום ומהתחממות אזורית, גורמות לשחרור נוסף של פחמן ומתאן לאטמוספירה. המערכות הטבעיות קולטות כמויות עצומות של פחמן דו-חמצני בתהליכי הפוטוסינתזה והנשימה התאית, הופכות את הפחמן למולקולות אורגניות (fixation), ולכדו חלק גדול מהן בקרקע ובביומסה [22]. אחת הדרכים שמחברות את האקלים והטבע היא מחזור הפחמן (carbon cycle), ויחד הם יוצרים את התנאים האקלימיים לחיים על פני כדור הארץ. עם זאת, קיבוע הפחמן אינו שירות מערכת אקולוגית יחיד, ולמגוון הביולוגי במערכות אקולוגיות תפקידים ותפקודים שיכולים למתן אירועי קיצון הנגרמים בעקבות שינוי האקלים – שיטפונות, בצורות, גלי חום וקור ועוד. ככל שמשבר המגוון הביולוגי מתעצם, נפגע חוסן של המערכות האקולוגיות. במצב "עסקים כרגיל" הצפי הוא לקריסת מערכות אקולוגיות ולהכחדת מינים המונית, שעלולה להוביל גם לפגיעה אנושה בנפש ובתשתיות.

מחזור הפחמן בטבע ויעילותן של מערכות אקולוגיות בלכידת הפחמן

מחזור הפחמן בטבע כולל תהליכים קצרי-טווח וארוכי-טווח; לדוגמה, בהקשר של מגוון ביולוגי, תהליכים של פוטוסינתזה

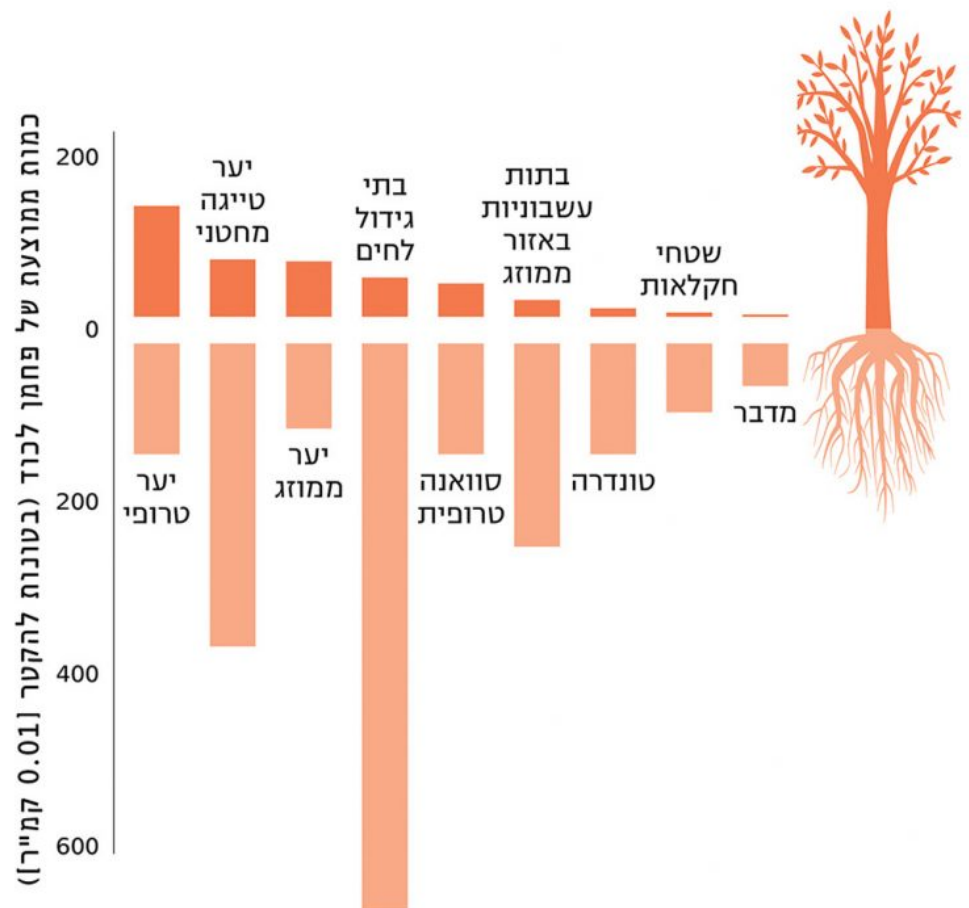
ונשימה או קציר ורעייה הם תהליכים שבהם פחמן דו-חמצני עובר דרך מהירה של עיבוד, אך למעשה נותר בתהליכים ובמחזוריים אטמוספריים. לעומת זאת, תהליכי פוטוסינתזה, שתוצריהם נותרים בצמח לצורך הגדלת נפח השורשים או הרחבת היקף הגזע, או לחלופין נעשים חומר רקב בקרקעית אגם, הם תהליכים שבסופם פחמן מוחזק במבלע (sink) ומסולק מהאטמוספירה [18]. למעשה, רוב הלכידה לטווח הארוך מתרחשת בקרקע או מתחת לפני הקרקע, כפי שניתן לראות באיור 1 ובאיור 2. ניתן לראות שהתהליכים ארוכי-הטווח ובעוצמה הגבוהה ביותר הם הצטברות חומר אורגני בקרקע, והם נכונים גם לקרקעות קפואות המצויות באיור 1 כמקור פוטנציאלי.



וספת פחמן דו-חמצני לאטמוספירה גרמה להורקה של העולם במשך כמה עשורים [44]. העלייה בריכוזי פחמן דו-חמצני, שזכתה גם לכינוי "דישון אטמוספרי" בפחמן דו-חמצני [7], גרמה לצמצום ניכר ביכולת איבוד המים של צמחים (עקב קיצור זמן פתיחת הפיוניות) ולפיכך לשימוש מיטבי במשאבי הפחמן העומד לרשותם [7]. תופעה דומה נצפתה גם בישראל, אם כי העלייה בכיסוי הצומח יחסית לתהליכים אחרים, וייתכן שבחינה מחודשת יכולה להוסיף על ההסברים שניתנו שם [5, 1]. עם זאת, מחקרים מהשנים האחרונות מצביעים על האטה במנגנונים הללו, בעיקר עקב זמינות מוגבלת של חנקן וזרחן ובאזורים יובשניים גם בגלל בעיית זמינות של מים. לפיכך, נראתה פגיעה מתמשכת ביכולתן של מערכות אקולוגיות יבשתיות להמשיך וללכוד פחמן למשך תקופות זמן ארוכות [40], נוסף על הפגיעה המתמשכת במערכות האקולוגיות הימיות והיבשתיות, כפי שעולה מדו"ח מצב הטבע הגלובלי של האו"ם [10]. על פי דו"ח זה, כ-75% מהמערכות האקולוגיות הטבעיות עברו התמרה ומאיומות משינויים בשימושי הקרקע, דבר המשפיע על יכולתן לקבוע וללכוד את הפחמן. בעוד שכ-50% מכמות פליטות הפחמן נותרים באטמוספירה, את המחצית השנייה המערכות הטבעיות יכולות לקבוע וללכוד במאגרי פחמן טבעיים – בקרקע, בים ובצומח. המערכות הטבעיות יכולות לתרום ברמה הגלובלית מעל 37% מיעדי המיטיגציה (אפחות) עד 2030 ועוד 20% עד 2050 [14] ובמחיר זול מפתרונות טכנולוגיים. בישראל ההערכה היא כי המערכות האקולוגיות יכולות להפחית כ-5% מפליטות הפחמן השנתיות [2] (ראו פירוט בהמשך). מעבר לקיבוע פחמן וללכידתו, המערכות האקולוגיות מספקות מגוון שירותי מערכת המסייעים לצמצום השפעות שינוי האקלים. גם בישראל מופתה בהקשר זה תועלת משירותי המערכות האקולוגיות המצמצמת את השפעות שינוי האקלים, כגון מיתון טמפרטורה ולחות האוויר, הצללה, שימור קרקע, מיתון סופות חול ואבק, מיתון אירועי קיצון (כגון שרפות, שיטפונות והצפות) ועוד [3].

איור 2. השוואה של הכמות הממוצעת של פחמן הלכוד במערכות אקולוגיות שונות, מטר אחד מעל הקרקע לעומת מטר אחד בתוך הקרקע

הנתונים על הקיבוע מעל פני האדמה לוקים כנראה בהערכת יתר, בעוד הנתונים על הקיבוע מתחת לאדמה לוקים בהערכת חסר. מעובד מתוך Penke, 2021 [29].



איור 2.

השוואה של הכמות הממוצעת של פחמן הלכוד במערכות אקולוגיות שונות, מטר אחד מעל הקרקע לעומת מטר אחד בתוך הקרקע

הנתונים על הקיבוע מעל פני האדמה לוקים כנראה בהערכת יתר, בעוד הנתונים על הקיבוע מתחת לאדמה לוקים בהערכת חסר. מעובד מתוך Penke, 2021 [29].

רבים מכירים בתפקידם של יערות טרופיים כמערכת אקולוגית שלוכדת פחמן דו-חמצני, אך מערכות אקולוגיות נוספות ביבשה, ובראשן בתי גידול לחים [42] אך גם הטונדרה, יערות ובתות, ובים – יערות מנגרובים וכרי עשב ים – לוכדות כמויות גדולות של פחמן דו-חמצני באופן יעיל, ותורמות בכך למיתון השפעות שינוי האקלים. למשל, בתי גידול לחים ברחבי העולם לוכדים כ-30% מהפחמן האורגני שנאגר במשקעים בתנאים אנאירוביים, כ-7,000 טונות פחמן דו-חמצני לדונם, אף על פי שהם מהווים רק כ-8% מהשטח היבשתי של כדור הארץ. ביערות טרופיים, לעומת זאת, נלכדות כ-1,450 טונות פחמן דו-חמצני לדונם, אף על פי ששטחם היבשתי כ-12% [36]. באיור 2 ניתן לראות את ההבדלים בין מערכות אקולוגיות שונות ולהבין, למשל, את

תרומתן של בתות לעומת יערות.

יבוע פחמן במערכות אקולוגיות יובשניות וים תיכוניות

מערכות אקולוגיות טבעיות באזורים יובשניים תורמות לקיבוע וללכידה של פחמן, אך תרומה זו מוגבלת בהיקפה בגלל גורמים מגבילים כמו זמינות מים ונוטריינטים [18]. אלא שאזורי האקלים היובשניים מכסים כ-41% משטח היבשות בכדור הארץ [33], ולכן גם אם תרומתם ליחידת שטח קטנה, יחסית ליערות באזורים הממוזגים, למשל, מדובר על תרומה לא מבוטלת.

באזור הים תיכוני קיים מנעד אפשרויות של קיבוע ולכידה של פחמן, שמשתנה כתלות באופי השטחים – שטחים טבעיים ושטחי יער נטוע, אך ניתן להגדיר כמה כללים: ככל שהצומח מעוצה יותר, המערכת יכולה לקבוע וללכוד יותר פחמן מעל פני הקרקע לאורך זמן, וככל שהצומח בוגר יותר, אגירת הפחמן תהיה ממושכת יותר [26, 18]. מחקר אחר הצביע על השונות הגדולה של קיבוע פחמן באזורים יובשניים למחצה כתגובה לשנים גשומות המאפשרות צימוח מהיר ולכידת פחמן בצומח מעוצה [30]. מחקר זה גם הצביע על הבעיה שעלולה להיווצר משרפות יער בתקופות היבשות יותר, שבעטיין משוחררת כמות פחמן גדולה לאטמוספירה. ככלל, מספר המחקרים שנערכו על קיבוע פחמן ביערות גדול מאוד ביחס למערכות יבשתיות אחרות, ויש עדיין פערי ידע לגבי מערכות אקולוגיות רבות. בשל שינוי האקלים יערות רבים בעולם בכלל, ובאזור הים תיכוני בפרט, חווים בשנים האחרונות גלי חום ויובש, המגדילים את רגישות העצים למחלות ולשרפות [19, 9]. לכן, ההסתמכות על יערות באזורים האלה כלוכדי פחמן מעל הקרקע בעייתית. מסקירת הספרות עולה כי למערכות האקולוגיות הטבעיות באזורים שונים שנבדקו יש יתרונות בקיבוע פחמן ובלכידתו על פני מערכות טבעיות 'מהונדסות' ומטופלות [27]. למערכות האקולוגיות האלה עמידות גבוהה יותר לשינוי האקלים וכן יתרון בקיבוע פחמן ובלכידתו לעומת מערכות אקולוגיות מעשה ידי אדם. ביערות ממשקיים או ביערות חד-מיניים נטועים המגוון הביולוגי נמוך יותר, ולפיכך קיבוע הפחמן נמוך יותר [27, 9]. יתרה מכך, מחקרים שנערכו בשנים האחרונות באזורים ים תיכוניים בעולם, מצביעים על כך שלבתות עשבוניות ולבתות שיחניות יש תרומה מכרעת לקיבוע פחמן וללכידתו גם בטווח הקצר בגין מחזורי צימוח מהירים, אך גם בטווח הארוך בגין גידול בית השורשים ומעבר פחמן לקרקע לטווח הארוך [38, 41]. התופעה נמצאה גם בבתות עשבוניות באקלים ממוזג [6] (איור 2).



אבנונית מרתיעה (*nimicus filamentosus*) בתוך מרבד של עשב ים, אילת / צילום: עומרי יוסף עומסי, רשות הטבע והגנים
עושר ומגוון מינים גדול גורמים לא רק ליציבות המערכת האקולוגית ולתפקוד טוב יותר, אלא גם לעלייה ביכולת לכידת הפחמן של המערכת האקולוגית בטווח ארוך. מבחינה זו, תצורות צומח טבעיות מקומיות, כמו חורשים, בתות עשבוניות ובתות שיחניות, עדיפות על פני מערכות טבעיות 'מהונדסות' ומטופלות כמערכות לוכדות פחמן בתת-הקרקע [6,9,27]. מחקר שנערך בישראל

הצביע על כך שלמיני עצי חורש ועצים אחרים המשמשים בנטיעות יש 'שיטות' שונות להתמודדות עם ריכוזי פחמן דו-חמצני גבוהים. ניכר כי לאלון המצוי יתרונות ברורים [11]. לעומת השטחים הטבעיים, שטחי חקלאות נחשבים לשטחים עם לכידת הפחמן הדלה ביותר עקב הפעולות המכניות המלוות את הגידול החקלאי, כמו פליחת קרקע, דישון, כיסוח ועוד [18].

לכידת פחמן במערכות אקולוגיות של יערות וחורשים ירוקי-עד באגן הים התיכון עומדת על 380 ק"ג פחמן לדונם לשנה [21]. במערכות האקולוגיות של בתות שיחניות בישראל, במפל משקעים של 80 עד 270 מ"מ גשם, נמצא כי מאגר הפחמן האורגני בשכבת הקרקע העליונה, עד 10 ס"מ מתחת לשיחים, יורד ליניארית מ-2.7 טונות פחמן לדונם באזורים הים תיכוניים הלחים, ל-0.7 טונות לדונם באזורים הצחיחים [37]. יש לשים לב כי המחקר ערך מניפולציה מבוקרת וסיפק מידע על מאגרים של פחמן ולא על שטפים של לכידת פחמן ברמת המערכת האקולוגית. עם זאת, ניתן להקיש מכך כי ישנה ירידה בלכידת הפחמן בין האזורים הים תיכוניים למדבריים. באופן כללי, התרומה של כל היערות והחורשים בישראל נמוכה מאוד, והוערכה ב-0.1 מיליון טונות פחמן לשנה, ונכון לשנת 2014, המערכות הטבעיות היבשתיות מסוגלות לקלוט כ-2.4% מכלל פליטות הפחמן בישראל [3]. המערכות האקולוגיות של הים התיכון ומפרץ אילת בתחומי המים הכלכליים קולטות 15.7 ק"ג ו-100 ק"ג פחמן לדונם בשנה בהתאמה, ויחד עם המערכות היבשתיות נקלטים בהן כ-5% מסך הפליטות [3]. מאחר שהשטח הפתוח בישראל בעיקר באזור הים תיכוני נתון ללחצים אנתרופוגניים גבוהים, והתחזית של שינוי האקלים צופה התרחבות של האזורים היבשניים, ניתן לומר שתורמתה של ישראל לכלל מערך קיבוע הפחמן האזורי והעולמי במצב הנוכחי, נמוכה ביותר. עם זאת, ההסתכלות צריכה להיות על פני מרחבים גדולים יותר, מאחר שהמערכות האקולוגיות מתפרסות על פני מרחבים גדולים יותר מגבולות מדיניים, ובחלק מהמקרים ההפרעות האנתרופוגניות מעבר לגבולות המדינה מתונות יותר.

שיטות שונות למיטיגציה (אֶפְחוּת) מכוונות לפתרונות מבוססי טבע, למשל נטיעת עצים או שיקום מקווי מים, כפי שיתואר בהמשך, ופתרונות רבים נוספים [35]. להבנתנו, יש להשתמש בשיטות האלה באופן מושכל, ולהתאימן לשינוי האקלים הצפוי באזורנו. למשל, נטיעת יערות בצפיפות גבוהה ועם מינים לא מתאימים תסייע בקיבוע פחמן ובלכידתו בטווח הקצר אך עלולה לשחרר את הפחמן שנאגר עקב הרגישות הגוברת לשרפות. גם באירופה יש מודעות גוברת והולכת לכך שיש לבצע נטיעות במקומות שפעולות ההכנה לנטיעה והתחזוקה העתידית של היער לא ישחררו פחמן שכבר נלכד בקרקע [24]. נוסף על כך, נטיעת יערות באזורים יובשניים עלולה ליצור מבלעי חום בגלל שינוי האלבוד, ולמעשה כמעט לבטל את תרומתם לקיבוע הפחמן [32]. במחקר שהגיע למסקנה זו לא נכללה, למשל, ההסתברות לשרפות בתקופת הזמן שהמודל הופעל [32], ולכן ייתכן שתורמת קיבוע הפחמן שולית לחלוטין. כמו כן, מחקרים נוספים הצביעו על אובדן המגוון הביולוגי במערכות אקולוגיות של בתות עקב פעולות ייעור, שחלק מהן נועדו למטרות קיבוע פחמן [39]. לכן, בראש ובראשונה יש לשמר מערכות טבעיות התואמות את תנאי האקלים שהן התפתחו בהם. גם שיקום של מערכות אקולוגיות צריך להיות מכוון לאזורים שהן התקיימו בהם בעבר הקרוב, ויש לשקמן כך שיהיו בנוח-קיימא ולא יחייבו תחזוקה שבעצמה גוררת פליטת פחמן.

קיבוע פחמן במערכות אקולוגיות ימיות

הסביבה הימית יכולה לתת מענה טוב לקיבוע וללכידה של פחמן. למעשה, בים נאגרים עד 93% מהפחמן הדו-חמצני, ובאופן ספציפי, המערכת האקולוגית היעילה ביותר ללכידת פחמן דו-חמצני היא כרי עשב הים [18, 13]. עשבי ים ומנגרובים נחשבים למערכות אקולוגיות שיכולות לתרום למיתון האקלים הודות ליכולתן ללכוד פחמן בכמות גדולה, בין 31–82 מיליון טונות פחמן לשנה בעולם, בהשוואה למשל ליערות של אצות (kelp) או לשוניות אלמוגים, שהלכידה בהן נמוכה בסדרי גודל, ובנסיבות מסוימות הם אף תורמים לפליטת פחמן [15]. בחרנו להתמקד בעשבי הים מאחר שזו מערכת אקולוגית המצויה בחופי ישראל ויכולה לספק פתרונות מבוססי טבע גם לקיבוע פחמן. בעוד שבמפרץ אילת המערכת האקולוגית משתקמת לאחר הסרת גורמים מגבילים שונים, בים התיכון מצב עשב הים בעבר אינו ברור לחלוטין, אך ניכר כי גם שם ישנה התאוששות מסוימת. עשבי הים יוצרים מרבדים ירוקים בעומקים רדודים המאפשרים פוטוסינתזה, והפחמן נלכד ונאגר בשורשים או בקרקעית הים. ישנם כ-60 מינים של עשבי ים, המתקיימים ברצועות החוף באזורים רבים בעולם, כולל בים סוף ובים התיכון, אך כיום במקומות רבים הם מאוימים בגלל שינוי האקלים ופעילות האדם. ההכרה בחשיבותם של עשבי הים בעולם עלתה מאוד בשנים האחרונות והובילה לתוכניות ניטור חובקות עולם [34], להכרה בהם כמיני מפתח של בתי גידול חופיים בדיקטיבה האירופית למים [12] ולשימוש נרחב בהם כביואינדיקטורים לאיכות המים ולביולוגיה של הסביבה הימית. נוסף על כך, נעשים מאמצים רבים למיפוי עשבי ים, למשל ביצירת מגדירים לצוללים וכחומר חינוכי למורים.

בשנים האחרונות פיתחו מדענים שיטות לשיקום כרי עשב ים באמצעות שתילה, ובים התיכון כמו גם בימים אחרים, נערכים ניסיונות כבר עשרות שנים לשיקום ולהשבה של מרבדי עשב ים. הצלחת המאמצים מוגבלת, כנראה עקב שינוי דרסטי באזורי התפוצה ושינוי בתנאים הפיזיקליים של מי הים [28]. בחופי איטליה דווח על הצלחה באתרים מקומיים בשנים האחרונות [31], אך בראייה רחבה יותר, גם כאן מוצב סימן שאלה על שרידותן ומידת גמישותן של מערכות אקולוגיות אלה לאורך זמן עקב עלייה בטמפרטורת מי הים ואיטרופיקציה (העשרה בחומרי הזנה) [25]. בעוד שבאיטליה ישנה התאוששות של מרבדי עשב הים [43], הרי שבמזרח הים התיכון הפוטנציאל להתאוששות אינו ברור, ותצפיות עבר לא בהכרח מצביעות על פריסה רחבה של מרבדים כמו באזורים אחרים בים התיכון [20]. לכן, פעולה להשבה של מרבדי עשב ים בים התיכון צריכה להיבחן בתרחישים שונים של תהליכים פיזיקליים, ביוטיים ואחרים [8].



מערכת אקולוגית של בתה עשבונית. עיקר לכידת הפחמן לטווח הארוך מתרחש בשורשים | צילום: דותן רותם, רשות הטבע והגנים

נכון השטחים הפתוחים בעידן של שינוי אקלים

מדינת ישראל מתאפיינת במצוקת קרקע חמורה הנובעת ממגבלות שטח, מגידול מהיר של האוכלוסייה ומתהליכי פיתוח מואצים. על פי דו"ח מצב הטבע של ישראל לשנת 2022, באזור הים תיכוני התמרת השטחים הטבעיים נמשכת ביתר שאת^[1]. מערכות טבעיות רבות שמקבעות ולוכדות פחמן, ובייחוד בתי גידול לחים, שהיו בתפוצה נרחבת יותר בהשוואה להיום, כגון ביצות, נחלי איתן, מלחות חופיות ושפכי נחלים, יובשו והותמרו זה מכבר לטובת בנייה, תשתיות, הקמת יערות נטע-אדם וחקלאות.

מתוך סקירה זו מתחזקת ההבנה שלשטחים הטבעיים, אם ישוקמו בצורה הנכונה, יש יכולת לתרום גם בישראל להפחתת פליטות גזי חממה. הדו"ח השישי של ה-IPCC התייחס לפוטנציאל קיבוע הפחמן של מערכות אקולוגיות מגוונות ולשינויים הנדרשים בשימושי קרקע ובשיקום כדי לאפשר את תפקודן^[16]. להיבטים האלה משמעויות רבות גם מבחינת היכולת של ישראל לעמוד במחויבויותיה הבין-לאומיות להפחתת פליטות גזי חממה ובמטרות שהציבה לעצמה במסגרת החלטת הממשלה משנת 2018 להיערכות ישראל להסתגלות לשינוי האקלים, שכוללת גם נקיטת אמצעים להגדלת העמידות של המערכות הטבעיות^[4]. למערכת התכנון הישראלית יש תפקיד מפתח בהקשר זה, והיא נדרשת כבר היום להיענות לאתגרים התכנוניים בישראל בעידן של שינוי האקלים. השלב הראשון הוא שינוי התפיסה, שלפיה השטחים הפתוחים הם אך ורק פוטנציאל ומושא לבינוי ולפיתוח. בעידן שינוי האקלים התמרת השטחים הטבעיים לשימושי קרקע אחרים אינה יכולה להיות חלופה מתקבלת על הדעת. ההגנה על השטחים הפתוחים והטבעיים ושיקום בתי גידול צריכים להוות פתרון רב מערכתי ורב תפקודי כדי לספק מגוון שירותי מערכת, ובכללם – הפחתת פליטות גזי חממה והיערכות לשינוי האקלים.

סנונית ראשונה בישראל – התפראות (rewilding) של בתי גידול לחים

אחד הפרויקטים הראשונים של התפראות (ביור, rewilding) לשיקום מערכת אקולוגית של בתי גידול לחים בישראל נערך כיום בעמק בית שאן, במה שהיה בעבר בריכות דגים שננטשו. בבסיס הפרויקט עמדה השאיפה לשחזר בית גידול באופן שיתמוך במגוון הביולוגי, כתחנת עצירה ושיחור מזון לעופות נודדים, ושיאפשר מגוון שירותי מערכת אקולוגית לצד חינוך, פנאי ונופש. כעת מתווספת לכל אלה אפשרות לתועלת אקלימית: מדידות ראשוניות מהפרויקט מעריכות כי קצב קיבוע הפחמן בפרויקט ההתפראות בבריכות הנטושות בכפר רופין יעמוד על מעל 30 טונות פחמן להקטר (10 דונם) בממוצע חמש שנתי. ההערכות

האלה מבוססות על מדידות ראשונות של חברת Terra, שבוצעו בשיטות המוכרות על-ידי ה-IPCC והוגשו לצורך אישור לארגון התקינה המוכר "Verra". עדיין נדרש המשך ניטור ומדידה של תשטיפי גזי החממה כדי להשלים את ההבנה ביחס לתועלת האקלימית מהפרויקט, אולם ככל שיקודמו פרויקטים נוספים של שיקום בהיקף של אלפי דונמים, עשויה התועלת האקלימית להתווסף לשאר סוגי התועלת המוכחים זה מכבר של פרויקטים מסוג זה.

לצד סוגים מגוונים של תועלת לשמירת טבע ולאדם, יש למערכות אקולוגיות טבעיות תועלת לא מבוטלת בעצם יכולתן ללכוד פחמן אטמוספרי ובכך להוות כלי נוסף בארגז הכלים למיתון השפעות שינוי האקלים. לצד כלים מעשיים ותכנוניים מגוונים, התרומה של השיקום האקולוגי מתקבלת בהשקעה כספית מעטה יחסית, היא מבטיחה תועלת מסוגים שונים, והיא למעשה השיטה הזולה ביותר הקיימת כיום שמאפשרת ללכוד פחמן אטמוספרי למשך טווחי זמן ארוכים יחסית.

הידע שלנו על המערכת האקולוגית, על תפקודה ועל יחסי הגומלין בין אורגניזמים שונים קטן עשרות מונים כאשר מדובר על הקשר לשינוי האקלים. החוקים והעקרונות הקיימים לרוב אינם ישימים, ולכן עלינו לפתח אסטרטגיות ייחודיות. בניגוד לתרחיש עסקים כרגיל, שבו אנו באים לעזרת הטבע רק כאשר הוא בחזקת נפגע, נדרש כאן שינוי פרדיגמה משמעותי המתייחס למניעה של הרס ופגיעה סביבתיים עוד בטרם התרחשו ואף להחזרת עטרה ליושנה.

יתן ליצור כלים תכנוניים מועילים וחיוניים, שהשטחים הפתוחים במרכזם, בדרכים שונות:

- חיזוק המגוון הביולוגי על-ידי הגברת מידת ייצוגן של היחידות האקולוגיות בשטחים המוגנים ב-30% לפחות עד 2030.
- שיקום בתי גידול מופרים, בדגש על בתי גידול לחים ועל מערכות אקולוגיות בתת-ייצוג ומתוך מחויבות ל"עשור השיקום האקולוגי" שהוכרז על-ידי האו"ם בשנת 2020.
- בנייה רוויה במוקדי הפיתוח הקיימים ו"תכנון מודע אקלים" של תוכניות המתאר באופן שהמדריך הסביבתי ופליטת הפחמן בעטיו של הפיתוח יהיו נמוכים.
- עיגון מסדרונות אקולוגיים ארציים בתוכניות סטטוטוריות בכל הארץ לחיזוק המגוון הביולוגי.
- תכנון פעולות ממשק המאפשרות קליטת פחמן במערכות אקולוגיות טבעיות למשך טווחי זמן ארוכים.



שיקום בריכות הדגים של כפר רופין / צילום: אסף זנזורי, החברה להגנת הטבע

סיכום

מאמר זה מאיר פן נוסף בחשיבותן של מערכות אקולוגיות טבעיות ומתפקדות – הפוטנציאל הטמון בהן לקיבוע וללכידה של פחמן, בקנה מידה עולמי ומקומי, כאחד משירותי המערכת האקולוגית שבמרכז תשומת הלב העולמית. המערכות האקולוגיות יכולות לספק פתרון יעיל וזול לקיבוע פחמן. הדגש הוא על מערכות מתפקדות ובריאות, המאופיינות במגוון ביולוגי שטבעי לאזור שהוא מתקיים בו, מאחר שהוא מותאם לתנאי הסביבה ועמיד לשינויים המתרחשים בה.

בישראל יש מגוון מערכות אקולוגיות יבשתיות – כגון בתי גידול לחים, חורשי ים תיכוני ובתה עשבונית, כמו גם מערכות אקולוגיות ימיות – הלוכדות פחמן באופן טבעי. במקרים מסוימים נדרש שיקום כדי לייצל או להחזיר את יכולת קיבוע הפחמן, ויש לעשות כן מבלי לפגוע בסוגי תועלת אחרים של המערכת האקולוגית. יש צורך לכוון לשינוי התפיסה שלפיה השטחים הפתוחים הם פוטנציאל לפיתוח ולבינוי, להגן על המערכות האקולוגיות הטבעיות הקיימות באמצעות הרחבת השטחים המוגנים, ולשקם את המערכות האקולוגיות שנפגעו, ששטחן הצטמצם או שנכחדו לחלוטין. יש להעלות את מודעות הציבור ומקבלי ההחלטות לחשיבותן ולתרומתן של המערכות האקולוגיות הטבעיות בישראל לפעולות מיטיגציה שאינן מבוססות טכנולוגיה וכן לצמצם את פערי הידע בנושא באמצעות מחקר.

הלכה למעשה

מגי ברטן, מנהלת תחום שטחים פתוחים, האגף לתכנון מרחבי, מנהל התכנון:

מנהל התכנון מכיר בתועלת הרבה של המערכות האקולוגיות הטבעיות. בין יתר תפקידיו אחראי מנהל התכנון על אישור תוכניות לשמורות טבע, גנים לאומיים ויערות, והתוכניות הללו מחזקות את המגוון הביולוגי ומגדילות את היקף השטחים המוגנים בישראל. חלק מהשטחים המדוברים מקודמים על-ידי מנהל התכנון להכרזה על פי חוק שמורות טבע וגנים לאומיים.

באשר להמלצת הכותבים, הנוגעת לבנייה רוויה במוקדי הפיתוח הקיימים, יש לציין כי המועצה הארצית אישרה את תמ"א 4/35 – צפיפות מגורים, וכי מוסדות התכנון ומשרדי ממשלה רבים שמים לנגד עיניהם את חשיבות ההתחדשות העירונית כמנוע צמיחה ראשי לקידום ערים תוססות ואיכותיות בישראל. בכל הנוגע ל"תכנון מודע אקלים", ניתן לומר כי קיימת כיום מודעות ראשונית לנושא, אולם יש מקום להעמיק את הידע ולפתחו, כך שיחלחל לרמת תוכניות המתאר המקומיות ואף לרמת התוכניות לביצוע. ניתן לזהות ניצנים ראשונים של תכנון מודע אקלים בהחלטת המועצה הארצית לקדם את הבנייה הירוקה כתקנה מחייבת כלל-ארצית. כמו כן, חשוב לציין את מסמך המדיניות לניהול הנגר בשטחים העירוניים ואת שינוי מספר 7 לתמ"א 1, שמקודמים בימים אלה ומתמקדים בחשיבות מיתון השיטפונות ובקידום פתרונות לניהול נגר בראייה האגנית.

המלצות נוספות של הכותבים הן שיקום בתי גידול מופרים ותכנון פעולות ממשק המאפשרות קליטת פחמן במערכות אקולוגיות. המלצות הללו נכונות, ומחייבות שיתוף פעולה בין כלל מנהלי השטחים הפתוחים בישראל וכלל בעלי העניין. לטובת הצלחת קידומן, מעבר להיבטים התכנוניים, נדרשים כלים משלימים – תקציבים, אסדרה וכדומה. יישום של כל ההמלצות יוביל לקידום מהלך כולל ושלם לשמירה על השטחים הפתוחים.

מקורות

1. בן-משה נ, חן ר, ליבנה ע ואחרים. 2022. שימושי קרקע (תכסית) בישראל. בתוך: בן-משה נ ורנן א

1. (עורכים). [דו"ח מצב הטבע 2022 – כרך מגמות ואיומים](#). המארג – התוכנית הלאומית להערכת מצב הטבע. מוזיאון הטבע ע"ש שטיינהרדט, אוניברסיטת תל אביב.
2. גרינצוויג ז' וארגמן א. 2019. פרק שירותי ויסות. בתוך: לוטן א, גרוסברד ש, ספריאל א ופייטלסון ע. (עורכים). [המערכות אקולוגיות ורווחת האדם – הערכה לאומית – דו"ח ממציא מפתח \(2019\)](#). המארג – התוכנית הלאומית להערכת מצב הטבע, מוזיאון הטבע ע"ש שטיינהרדט, אוניברסיטת תל אביב.
3. כהן-שחם ע וגרוסברד ש (כתיבה ועריכה). 2021. [שירותי מערכות אקולוגיות בישראל – מבט-על](#). תל-אביב: המארג – התוכנית הלאומית להערכת מצב הטבע, מוזיאון הטבע ע"ש שטיינהרדט, אוניברסיטת תל אביב.
4. משרד ראש הממשלה. 2018. [היערכות ישראל להסתגלות לשינויי אקלים: יישום ההמלצות לממשלה לאסטרטגיה ותכנית פעולה לאומית](#). החלטה מספר 4079.
5. שורק מ ופרבולוצקי א. 2016. [דו"ח מצב הטבע ישראל 2016](#). המארג – התוכנית הלאומית להערכת מצב הטבע.
6. Bai Y and Cotrufo MF. 2022. Grassland soil carbon sequestration: Current understanding, challenges, and solutions. *Science* **377**(6606): 603–608.
7. Ballantyne AA, Alden CA, Miller JA, et al. 2012. Increase in observed net carbon dioxide uptake by land and oceans during the past 50 years. *Nature* **488**(7409): 70–72.
8. Boudouresque CF, Blanfuné A, Pergent G, and Thibaut T. 2021. Restoration of seagrass meadows in the Mediterranean Sea: A critical review of effectiveness and ethical issues. *Water* **13**(8): 1034.
9. Dass P, Houlton BZ, Wang Y, and Warlind D. 2018. Grasslands may be more reliable carbon sinks than forests in California. *Environmental Research Letters* **13**(7): 074027.
10. Diaz S, Settele J, Brondizio ES, et al. 2019. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services.
11. Dror D and Klein T. 2022. The effect of elevated CO₂ on aboveground and belowground carbon allocation and eco-physiology of four species of angiosperm and gymnosperm forest trees. *Tree Physiology* **42**(4): 831–847.
12. European Environment Agency. 2020. [Water Framework Directive \(WFD\) 2000/60/EC](#).
13. Gattuso JP, Magnan AK, Bopp L, et al. 2018. Ocean solutions to address climate change and its effects on marine ecosystems. *Frontiers in Marine Science* **5**: 337.
14. Griscom BW, Adams J, Ellis PW, et al. 2017. Natural climate solutions. *PNAS* **114**(44): 11645–11650.
15. Howard J, Sutton-Grier A, Herr D, et al. S. 2017. Clarifying the role of coastal and marine systems in climate mitigation. *Frontiers in Ecology and the Environment* **15**(1): 42–50.
16. IPCC. 2022. [Climate Change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability](#).

- Keenan TF, Hollinger DY, Bohrer G, et al. 2013. Increase in forest water-use efficiency .17
as atmospheric carbon dioxide concentrations rise. *Nature* **499**(7458): 324–327
- Keenan TF and Williams CA. 2018. The terrestrial carbon sink. *Annual Review of* .18
Environment and Resources **43**(1): 219–243
- Klein T, Cahanovitch R, Sprintsin M, et al. 2019. A nation-wide analysis of tree mortality .19
under climate change: Forest loss and its causes in Israel 1948–2017. *Forest Ecology
and Management* **432**: 840–849
- Lipkin Y, Beer S, and Zakai D. 2003. The seagrasses of the eastern Mediterranean and .20
the Red Sea. In: Short FT and Green EP (Eds). *World atlas of seagrasses*. Berkeley
(CA): University of California Press
- Luysaert S, Inglima I, Jung M, et al. 2007. CO₂ balance of boreal, temperate, and .21
tropical forests derived from a global database. *Global Change Biology* **13**(12): 2509–
2537
- Midgley GF, Bond WJ, Kapos V, et al. 2010. Terrestrial carbon stocks and biodiversity: .22
Key knowledge gaps and some policy implications. *Current Opinion in Environmental
Sustainability* **2**(4): 264–270
- Mullen J and Viscusi G. 2021 Assessing the effects of economic recoveries on global .23
energy demand and CO₂ emissions in 2021. *Global Energy Review 2021*, International
Energy Agency
- Muller N and King N. 2022. [Climate change: When does planting trees make sense?](#) .24
(DW). July 26
- Nguyen HM, Ralph PJ, Marín-Guirao L, et al. 2021. Seagrasses in an era of ocean .25
warming: A review. *Biological Reviews* **96**(5): 2009–2030
- Nolè A, Collalti A, Borghetti M, et al. 2015. The role of managed forest ecosystems: A .26
modeling based approach. In: Valentini R and Miglietta F (Eds). *The greenhouse gas
balance of Italy*. Berlin and Heidelberg: Springer
27. Osuri AM, Gopal A, Raman TS, et al. 2020. Greater stability of carbon capture in
species-rich natural forests compared to species-poor plantations. *Environmental
Research Letters* **5**(3): 034011.
- Paling EI, Fonseca M, van Katwijk MM, and van Keulen M. 2009. Seagrass .28
restoration. In: Perillo G, Wolanski E, Cahoon, and Brinson M (Eds). *Coastal wetlands:
An integrated ecosystems approach*. Elsevier
- Penke M. 2021. [Carbon sinks: How nature helps fight climate change](#). Deutsche Welle .29
(DW). November 25
- Poulter B, Frank D, Ciais P, et al. 2014. Contribution of semi-arid ecosystems to .30
interannual variability of the global carbon cycle. *Nature* **509**(7502): 600–603
- Rende SF, Bosman A, Menna F, et al. 2022. Assessing seagrass restoration actions .31
through a micro-bathymetry survey approach (Italy, Mediterranean Sea). *Water* **14**(8):

.1285

Rohatyn S, Yakir D, Rotenberg E, and Carmel Y. 2022. Limited climate change mitigation potential through forestation of the vast dryland regions. *Science* **377**: 1436–1439 .32

Safriel U, Adeel Z, Niemeijer D, et al. 2005. Dryland systems. In: Hassan R, Scholes RJ, and Ash N (Eds). *Ecosystems and human well-being: Current state and trends: Findings of the Condition and Trends Working Group. Millennium Ecosystem Assessment Series*. Washington (DC): Island Press .33

. [Seagrass-Watch](#) – Global Seagrass Observing Network .34

Seddon N, Smith A, Smith P, et al. 2021. Getting the message right on nature-based solutions to climate change. *Global Change Biology* **27**(8): 1518–1546 .35

Svennevig B. 2018. Top 5 most efficient ecosystems for carbon storage. Southern Denmark University .36

Talmon Y, Sternberg M, and Gruenzweig JM. 2011. Impact of rainfall manipulations and biotic controls on soil respiration in Mediterranean and desert ecosystems along an aridity gradient. *Global Change Biology* **17**(2): 1108–1118 .37

Thompson ID, Ferreira J, Gardner T, et al. 2012. Forest biodiversity, carbon and other ecosystem services: Relationships and impacts of deforestation and forest degradation. In: Parotta J, Wildburger C, and Mansourian S (Eds). *Understanding relationships between biodiversity, carbon, forests and people: The key to achieving REDD + objectives. A global assessment reports. Prepared by the Global Forest Expert Panel on Biodiversity, Forest Management, and REDD+. Vienna (Austria): IUFRO World Series* **31** .38

Veldman JW, Overbeck GE, Negreiros D, et al. 2015. Where tree planting and forest expansion are bad for biodiversity and ecosystem services. *BioScience* **65**(10): 1011–1018 .39

Wang S, Zhang Y, Ju W, et al. 2020. Recent global decline of CO₂ fertilization effects on vegetation photosynthesis. *Science* **370**(6522): 1295–1300 .40

Wei J, Cheng J, Li W, and Liu W. 2012. Comparing the effect of naturally restored forest and grassland on carbon sequestration and its vertical distribution in the Chinese Loess Plateau. *PLoS One* **7**(7): e40123 .41

Were D, Kansime F, Fetahi T, et al. 2019. Carbon sequestration by wetlands: A critical review of enhancement measures for climate change mitigation. *Earth Systems and Environment* **3**(2): 327–340 .42

Winters G, Edelist D, Shem-Tov R, et al. 2017. A low cost field-survey method for mapping seagrasses and their potential threats: An example from the northern Gulf of Aqaba, Red Sea. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* **27**(2): 324–339 .43

Zhu Z, Piao S, Myneni RB, et al. 2016. Greening of the Earth and its drivers. *Nature* .44

.Climate Change 6(8): 791–795

קריאה נוספת

פרויקט המעריך את המגוון הביולוגי ואת המערכות האקולוגיות של ישראל, ומנתח מהי התועלת שלהם לאדם ולחברה. רלוונטי במיוחד הוא פרק "שירותי ויסות", המסכם את המידע הקיים לגבי אספקת שירותים אלה על-ידי המערכות האקולוגיות של ישראל, חשיבותם לאדם, וכן הגורמים המשפיעים על אספקתם.

לוטן א, גרוסברד ש, ספריאל א ופייטלסון ע (עורכים). 2019. מערכות אקולוגיות ורווחת האדם – הערכה לאומית – דו"ח ממצאי מפתח. המארג – התוכנית הלאומית להערכת מצב הטבע, מוזיאון הטבע ע"ש שטיינהרדט, אוניברסיטת תל אביב.

דו"חות מצב הטבע מציגים מידע מרחבי ותקופתי על איומים למערכות האקולוגיות ועל תהליכים משמעותיים המשפיעים עליהן ועל המגוון הביולוגי. פרסום זה מציג את המצב הקיים ואת השינויים שחלו בעשורים האחרונים במספר תחומים נבחרים בנושא השפעת האדם על הטבע בישראל. הדו"ח כולל פרק על השפעות שינוי האקלים על המגוון הביולוגי.

בן-משה נ ורנן א (עורכים). דו"ח מצב הטבע – ישראל 2022: מגמות ואיומים. המארג – התוכנית הלאומית להערכת מצב הטבע. מוזיאון הטבע ע"ש שטיינהרדט, אוניברסיטת תל אביב.

מחקר הבוחן השפעת יערות באזורים יובשניים על ריכוז גזי החממה ועל מיתון קצב ההתחממות העולמית. בניגוד לדעה הרווחת, במחקר זה נמצא כי אף על פי שלשטחים יבשים יש פוטנציאל ניכר ללכידת פחמן, הפחתת האלבדו הנגרמת על-ידי ייעור מנטרלת את רוב ההשפעה הזו. בנטיעת עצים יש תועלת מגוונת, ולמרות זאת באזורים יובשניים תרומת הנטיעה להפחתת פליטות זניחה, ובאזורים מסוימים היא עשויה אף להחמיר את המצב.

Rohatyn S, Yakir D, Rotenberg E, and Carmel Y. 2022. Limited climate change mitigation potential through forestation of the vast dryland regions. *Science* 377: 1436–1439