

שיטות לסילוק פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה והערכת הפוטנציאל ליישומן בישראל

ועדת ההיגוי של האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים להתמודדות עם שינויי האקלים

אפריל 2026 | ניסן תשפ"ו

חברי הוועדה: פרופ' דן יקיר (יושב ראש), פרופ' צבי בן-אברהם, פרופ' נעמה גורן-ענבר, פרופ' נדב דוידוביץ', פרופ' יואב יאיר, פרופ' יוסי לוי, פרופ' שלומית פז, פרופ' מליה פישר, פרופ' דניאל רוזנפלד, פרופ' דני רבינוביץ, פרופ' איתן ששינסקי. מרכזת הוועדה: ד"ר נירית טופול.
המסמך הוכן בעזרתו של ד"ר אבנר גרוס¹, המחלקה למדעי הסביבה, גאו-אינפורמטיקה ותכנון ערים באוניברסיטת בן-גוריון².

1 ד"ר גרוס עומד בראש הפורום האקדמי לקיבוע פחמן.

2 תודתנו גם לשגריר גדעון בכר, לחמר זנדברג, לד"ר גיזש שטיינברג, לנחי ברודט ולד"ר ברכה חלף על עצותיהם.

כדי להתמודד עם שינויי האקלים יש להפחית במידה ניכרת את פליטות גזי החממה, ובראש ובראשונה את פליטות הפחמן הדו-חמצני (מיטיגציה). עם זאת כיום ברור כי הפחתת הפליטות לא תספיק כדי להחזיר את ריכוזי הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה לרמות הנדרשות כדי שהטמפרטורה העולמית הממוצעת לא תעלה ביותר מ-1.5-2 מעלות צלזיוס עד סוף המאה הנוכחית, בהשוואה לעידן הקדם-התעשייתי. לפיכך נעשה מאמץ עולמי לפתח וליישם שיטות לסילוק פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה (Carbon Dioxide Removal – CDR) ולאחסונו בקרקע או באוקיינוסים לפרקי זמן ארוכים, ועל ישראל למלא בו תפקיד מוביל.

מאחר שתחום סילוק הפחמן מהאטמוספירה מתפתח במהירות ומשתנה ללא הרף, תמונת המצב שנציג עדכנית למועד פרסום הדוח. עם זאת יש להדגיש כי המאמצים בתחום אינם באים במקום הצורך המרכזי בצמצום פליטות באמצעים אחרים, שאינם נידונים בפרק זה, ובהם מעבר לאנרגיות מתחדשות, לחקלאות בת-קיימה ולהתייעלות אנרגטית, לצד השימוש בשיטות לסילוק פליטות פחמן ולאחסונו (Carbon Capture and Storage – CCS).

למסמך זה שתי מטרות עיקריות: לתת רקע להבנת העקרונות המדעיים והיישומיים של שיטות לסילוק פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה (CDR); ולהציע הנחיות ועקרונות שימשו בסיס למדיניות המקדמת טכנולוגיות בעלות פוטנציאל יישומי ב-קיימה לסילוק פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה בישראל ומחוצה לה. נציג מקרה בוחן של שיטת הביו-צ'אר (Biochar) ונבחן את התאמתה לישראל ואת השפעותיה על שיטות אחרות שאפשר לאמץ בטווחי זמן קצרים. לבסוף נציע כיוונים לשיתופי פעולה עם מדינות שכנות לצורך קידום דיפלומטיה של הסרת פחמן.

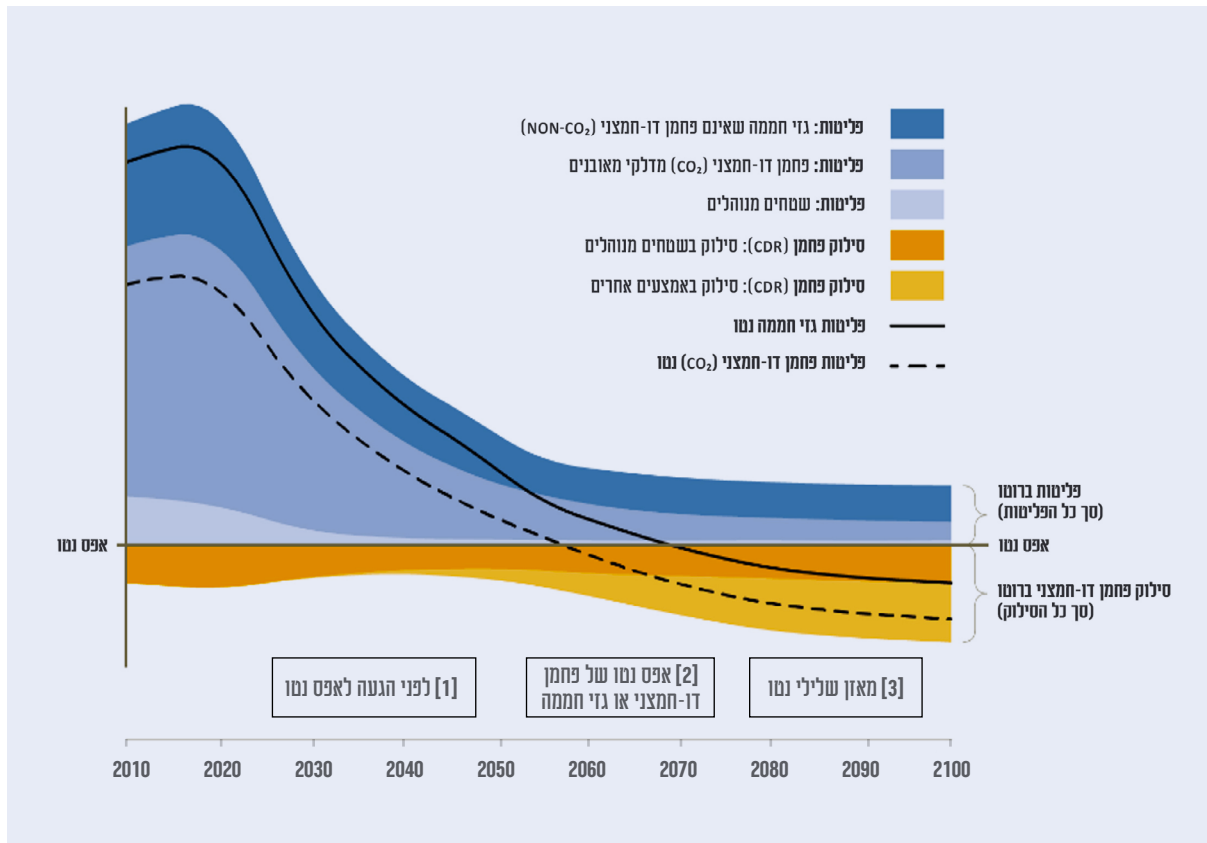
רקע מדעי

ריכוז הפחמן הדו-חמצני עומד כיום על יותר מ-425 חלקים למיליון, לעומת 280 חלקים למיליון בעידן הקדם-התעשייתי. קצב הגידול הנוכחי מהיר פי 10 מזה שנמדד ב-50 אלף השנים האחרונות. שינויי האקלים הנוכחי הוא בעיקרו תוצאה של עלייה בריכוז הן של פחמן דו-חמצני באטמוספירה הן של גזי חממה אחרים, הנפלטים ממקורות אנושיים כמו שרפת דלקי מאובנים, שינויי ייעודי קרקע וכריתת יערות. מאז שנת 2020 סך הפליטות האנושיות של פחמן דו-חמצני עומד במוצק (כולל הפחתה זמנית בעת משבר הקורונה) על יותר מ-40 ג'יגה טונה בשנה, כלומר 40 מיליארד טונה שהאנושות פולטת. חלקם נספגים באוקיינוסים ובצמחייה והשאר מצטבר באטמוספירה. בהסכם פריז, שנחתם ב-2015, התחייבו המדינות החתומות להפחית את פליטות גזי החממה על מנת להגיע איפוס פליטות גלובאלי (net zero emission) בשנת 2050, איפוס פליטות גלובאלי מושג כאשר פליטות גזי החממה וסילוקם (קיצוץ) כתוצאה מפעילות אנושית נמצאים באיזון (נטו אפס). מטרת ההתחייבות הייתה שהטמפרטורה העולמית הממוצעת לא תעלה ביותר מ-1.5 מעלות צלזיוס עד סוף המאה הנוכחית, בהשוואה למוצק למוצק לפני תחילת המהפכה התעשייתית.

אולם, לפי תרחישי הפליטות השונים של הפאנל הבין-ממשלתי לשינויי אקלים (IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change) עמידה ביעד זה תחייב, בנוסף להפחתת הפליטות (החלק הארי מ-40 ג'יגה טון המוזכרים לעיל), גם סילוק ואחסון לזמן ארוך של 7-9 ג'יגה טון פחמן דו-חמצני בשנה ישירות מהאטמוספירה עד שנת 2050, כמהלך משלים למעבר לכלכלה דלת פחמן (IPCC, 2022).

כדי להשיג את המטרה יש לתת את הדעת על עניינים אלה:

- צמצום פליטות (מיטיגציה) מונע מפחמן דו-חמצני ומגזי חממה אחרים להגיע לאטמוספירה מלכתחילה. עם זאת צפוי שתישארנה פליטות שיוריות שהן תוצאה של פעילות שלא נוכל לוותר עליה, כגון תנועה אווירית, תעשיות כבדות - ובכללן פלדה, אלומיניום ומלט - ופליטות מהקרקע ומבעלי חיים בחקלאות
- CDR נועד להסיר מהאטמוספירה ישירות פחמן דו-חמצני שכבר קיים בה. בכך הוא יסייע בהפחתה של ריכוז גזי החממה בכלל ובהתגברות על הפליטות השיוריות בפרט, וימתן את התחממות כדור הארץ ואת הסיכונים שבמשבר האקלים.
- אחסון של פחמן דו-חמצני מבוסס על סילוקו מהאטמוספירה ועל אחסונו לטווח ארוך במערכות יבשתיות או ימיות, בתצורות גאולוגיות שונות או במוצרים בעלי חשיבות כלכלית. כיום הפחמן הדו-חמצני המסולק בשיטות חדשניות מוערך בכמות זעירה של 0.002 ג'יגה טונה בלבד בשנה. נדרשת אפוא האצה מסיבית בשימוש בשיטות CDR חדשניות. שיטות אלו נמצאות בשלבי מחקר ופיתוח ראשוניים, וטרם הבשילו לכדי שימוש נרחב.
- התקדמות בפיתוח השיטות החדשניות אל מעבר לתקופת ההבשלה - שאינה אטרקטיבית מבחינה כלכלית - מחייבת תמיכה ממשלתית.
- לפי תרחישים של הפאנל הבין-ממשלתי לשינויי אקלים (IPCC), על השימוש העולמי בשיטות CDR חדשניות לגדול בממוצע פי 30 לפחות עד 2030, ופי 1,300 לפחות עד 2050. אולם למרות הצורך הבווער, שום מדינה עדיין לא הציבה את הגדלת סילוק הפחמן הדו-חמצני מהאטמוספירה בשיטות חדשניות כיעד להפחתת פליטות גזי חממה בעשור הבא, ומדינות מעטות בלבד פרסמו את תוכניתם להגדיל את הסרת הפחמן בשיטות חדשניות עד 2050.
- יישום רחב היקף של CDR דורש פיתוח של אנרגיה מתחדשת (אין הגיון בשימוש בשריפת דלקי מאובנים במקרה זה) להפעלת התהליך של סילוק הפחמן ואחסונו, לא פעם בשטחי אדמה גדולים. יש משמעות גם למיקום הפעילות של CDR, כדי לחסוך בשינוע התוצרים או בהשפעות סביבתיות של תוצרי התהליכים המעורבים.
- סילוק פחמן יכול להאיץ את קצב הפחתת ריכוז הפחמן באטמוספירה ולמתן את השפעות שינויי האקלים שאנו מרגישים כיום, אך לעולם לא יהיה תחליף להפחתת פליטות.



איור 1. תפקידי CDR באסטרטגיות הפחתה גלובליות או לאומיות

מסלולים אפשריים המציגים משימות של CDR בשלבים שונים של הפחתה שאפתנית של פליטות גזים - גזי חממה כולל CO₂ וגזי חממה אחרים (גזונים שונים של כחול) עד שנת 2100:

במווח המסומן (1) - תרומה להפחתה נוספת של רמות פליטות CO₂ או גזי חממה נטו במווח הקרוב;

במווח המסומן (2) - איזון פליטות שזירות שלא ניתן יהיה להפחית לחלוטין, כדי לסייע בהגעה לנטו אפס פליטות של CO₂ או גזי חממה במווח הבינוני ע"י CDR;

במווח המסומן (3) - העגה של "Net negative" כאשר CDR מאפשר הסרת CO₂ וגזי חממה אחרים מעבר לכמות הפליטות השאריתית (מקור: IPCC, 2022).

עקרונות מנחים

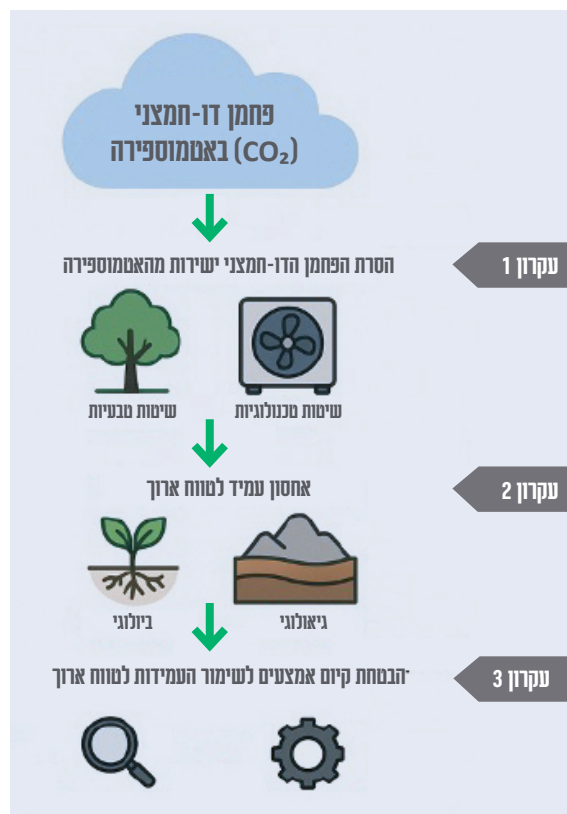
דרישות יסוד

כדי ששיטה לסילוק פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה (CDR) תמלא את ייעודה (ראו איור 2) נדרשים שלושה תנאי יסוד:

- לסלק פחמן דו-חמצני ישירות מהאטמוספירה (עיקרון 1)
- לאחסן פחמן דו-חמצני לטווח ארוך (עיקרון 2)
- להבטיח קיום אמצעים לשימור האחסון לטווח ארוך (עיקרון 3)

יש להבחין בין CDR לבין שיטות שאינן עונות על כל דרישות היסוד לעיל. סילוק פליטות פחמן (Carbon Capture and Storage – CCS) ממקור נקודתי כגון ארובות מפעלים או תחנות כוח, למשל, לא עונה על עיקרון 1. חלק מהשיטות מציעות דרכים לשימוש תעשייתי בפחמן הנלכד. שיטות אלה נקראות CCUS (האות הראשונה של המילה Utilization מתווספת לראשי התיבות), ואינן נחשבות CDR מאחר שהפחמן הדו-חמצני אינו מוסר מהאטמוספירה, אלא מהמקור הפולט אותו, אם כי יש להן תפקיד חשוב במניעת פליטות.³ בדוח זה לא נעסוק ב-CCS על מופעיו השונים.

יש להתייחס ל-CDR כאל גישה שחייבת לכלול הן את הטכנולוגיה של סילוק הפחמן הדו-חמצני מהאטמוספירה הן את מחזור החיים של התהליך כולו, ובכלל זה שקלול כלל פליטות הפחמן הדו-חמצני השיוריות בתהליך ההפקה של חומרים, בשימוש באנרגיה או בתהליכי השינוע ובאחסון.



איור 2. דרישות יסוד להגדרת CDR

3 בדרך כלל מִמֶס כימי או חומר מוצק נקבובי משמשים להפרדת הפחמן הדו-חמצני ממרכיבים אחרים של זרם הפליטה של המפעל. בתהליך המשך משתחרר הפחמן הדו-חמצני מהחומר המשמש ללכידתו, ומאוחסן. שני מתקני CCS בפעולה מורית מסוגלים להסיר 85%-90% מהפחמן הדו-חמצני שנפלט, אם כי מבחינה טכנית ייתכנו גם שיעורי לכידה גבוהים יותר.

היעילות והפוטנציאל של סילוק הפחמן הדו-חמצני מהאטמוספירה בשיטות השונות צריכים להיבחן על פי כמה קטגוריות, ובראשן: טווח הזמן של אחסון הפחמן שמסולק מהאטמוספירה (עשורים רבים עד אלפי שנים); פיתוח אמצעי מעקב הן אחר ביצוע סילוק הפחמן והן על קיום זמן האחסון המובטח; יכולת ההתרחבות (סקיילביליות) של השיטה לקיבוע כמויות רלוונטיות ברמה העולמית (ג'יגה טונות). עיקרון זה חיוני לנוכח הצורך הן בסילוק כמויות אדירות של פחמן דו-חמצני הן בקיבולת אחסון של מיליארדי טונות בשטח נרחב.

טכנולוגיות CDR עלולות אפוא להיות מוגבלות מכמה בחינות: מבחינת טכנולוגית או ביופיזיקלית; מבחינת רמת הבשלות המדעית; מבחינת מידת הסיכון הסביבתי; ומבחינת העלות הכלכלית והיכולת לאמת ולנטר את כמות הפחמן המאוחסן ולדווח עליה.

אמינות ואמון

כדי להבטיח אמינות מבחינת הסיכונים הסביבתיים, אמון ציבורי, והשגת יתרונות אקלימיים של ממש, יש להקים מערכות קפדניות לניטור, לדיווח, ואימות (Monitoring, Reporting, and Verification; MRV) ולרגולציה. כל מיזם לסילוק פחמן מהאטמוספירה חייב להבטיח, נוסף על עקרונות היסוד שהוזכרו, גם דיווח אמין, מדידה של שיעור סילוק הפחמן וניטורו לאחר האחסון ומניעה של השפעות סביבתיות שליליות.

נדרשת אפוא סטנדרטיזציה לאומית ובין-לאומית, מסגרת שתגדיר קריטריונים לאישור פרויקטים, לניטור סיכונים ולהבטחת ההתאמה לסביבה. כך, למשל, שוק הפחמן העולמי נידון בוועידת האקלים הבין-לאומית של האו"ם, שהתקיימה ב-2024, והוסכם בה, במסגרת סעיף 6.4 של הסכם פריז, על סטנדרטים מתודולוגיים מרכזיים למנגנון זיכוי פחמן עולמי הנוגעים לסילוק פליטות תוספתי, לשיקוף ולאימות. כמו כן הכרחי לקיים ניטור ודיווח הדוקים כדי להפחית סיכונים של היפוך או דליפה ולהבטיח את איכות הנתונים.

הנציבות האירופית מפתחת מנגנון הסמכה רשמי עבור סילוק פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה. לדוגמה, היוזמה לגיבוש סטנדרטים לסילוק פחמן (CRSI) היא יוזמה ללא מטרת רווח הנתמכת על ידי Breakthrough Energy Ventures של ביל גייטס. CRSI מובילה את פיתוחם של סטנדרטים איתנים ומבוססי מדע עבור CDR ומתמקדת בכימות אמין, בהימנעות מהטיה בתעשייה ובחזוק אמון הציבור. עדיין לא קיימת מסגרת אחידה ומחייבת בעניין זה, אם כי סביר שתוגדר מסגרת כזו בשנים הקרובות.

שיטות לסילוק פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה

אפשר לסווג את השיטות לסילוק פחמן דו-חמצני מאטמוספירה (CDR) לשיטות (או פתרונות) המתבססות על מערכות ועל תהליכים טבעיים (nature-based solutions) ועל שיטות המתבססות על טכנולוגיות מלאכותיות, שאינן טבעיות (technology-based solutions).

שיטות המתבססות על מערכות ועל תהליכים טבעיים הן:

- **ייעור ושיפור ניהול יערות** - נטיעת עצים בשטחים חדשים (ייעור) או שיקום יערות שנכרתו (ייעור מחדש), לצד ניהול משופר של יערות קיימים למניעת כריתה ושרפות, מאפשרים לעצים לספוג פחמן מהאטמוספירה ולאחסן אותו בגזעים, בשורשים ובקרקע לטווח ארוך, עשרות עד מאות שנים.
- **דישון אוקיינוסים** - אצות ימיות מקבעות פחמן דו-חמצני באטמוספירה כביומסה בתהליך הפוטוסינתזה הימית. דישון האוקיינוסים בברזל באזורים ימיים עשירים בנוטרופיטים אך עניים בכלורופיל יאיצו את קצב גדילת האצות, וכך את כמות הפחמן הנלכדת בביומסה הימית.
- **אגירת פחמן בקרקע** - פחמן מאוחסן בקרקעות בעיקר כחומר אורגני שמקורו בפירוק צמחים. לעיתים הפחמן האורגני עובר טרנספורמציות והופך לפחמן מינרלי. שימור הפחמן בקרקע לטווח ארוך דורש שיפור בשיטות החקלאיות המסורתיות.

- **שימור ושיקום בתי גידול לחים ומערכות חופיות** - הגנה על ביצות ושדות עשב ימיים ושיקומם מאפשרים למערכות אלו לאגור כמויות גדולות של פחמן בצמחייה ובקרקע הרוויה במים, שבהן התנאים האנאירוביים (ללא חמצן) מאיטים את פירוק החומר האורגני ומאפשרים אחסון למאות אלפי שנים.
 - **אחסון פחמן בביומסה חקלאית** - אחסון כזה יכול להתבצע במגוון דרכים ובהן: קבורה בתת-קרקע - פיתוח מערכות לאיסוף ביומסה מייעור, מחקלאות ומגידולים ייעודיים ולאחסונה בקרקעות; ביוצ'אר (ביו-פחם) - המרת פסולת צמחית בפחם יציב בתהליך של פירוליזה (פירוק חומר אורגני על ידי חימום לטמפרטורה גבוהה ללא נוכחות חמצן) ופיזור הפחם באדמות חקלאיות בעת עיבודן. אחסון פחמן בביומסה הוא גישה היברידית שיש לה גם יישומים טכנולוגיים (ראו להלן).
- הפוטנציאל בשיטות אלה הוא אחסון של כ-5-20 ג'יגה טונה לשנה במשך עשורים. יישום חלק מהשיטות האלה, למשל, ייעור, יכול להיות מיידי.

שיטות המתבססות על טכנולוגיות מלאכותיות הן:

- **לנידת פחמן ישירה מהאוויר (DAC)** - בתהליך זה כמה שלבים: תחילה מאווררים גדולים מושכים אוויר סביבתי לתוך מערכת DAC, והאוויר עובר מעל חומרים כימיים שנועדו להגיב כימית עם מולקולות פחמן דו-חמצני ולהיקשר אליהן. כך מופרד הפחמן הדו-חמצני. לאחר מכן הפחמן הדו-חמצני משוחרר מהסופג או מהממס בתהליך של חימום או בתהליכים אחרים, כשהוא מרוכז ומטוהר לשימושו המיועד.
- **קבורת פחמן** - אפשר לאחסן את הפחמן הדו-חמצני המרוכז, בשיטות כגון DAC או איסוף ביומסה (חקלאית או פסולת), לטווח ארוך בתת-הקרקע או בתצורות גאולוגיות עמוקות. לחלופין אפשר להשתמש בו ביישומים שונים כמו ייצור דלקים (BioEnergy with Carbon Capture and Storage – BECCS), כימיקלים או חומרי בניין.
- **הגברת הרמות האלקטרוניות של מי הים** - תהליך הנדסי זה נועד להגביר את יכולתם של האוקיינוסים לספוג פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה, על ידי הוספת חומרים בסיסיים כמו סלעי גיר כתושים, סיד, או מינרלים אחרים למי הים והורדת החומציות. תהליך זה מסייע להתמודד עם עליית החומציות של האוקיינוסים הנובעת מפעילות אנושית, ומאפשר קליטה רבה יותר של פחמן דו-חמצני. שיטה זו משפיעה גם על תהליכים ביולוגיים בים.
- **לנידת פחמן מהים באמצעות מפעלי התפלה** - ניצול כמויות המים הגדולות ותהליכי הפילטרציה במפעלים התפלה כדי להוציא פחמן דו-חמצני מהמים (בכלים כמו אלקטרוכימיה, או ספיחה) ולאחסנו. גישה זו חשובה משום שהכמות הכוללת של פחמן דו-חמצני מומס באוקיינוסים היא פי 50 לערך מזו שבאטמוספירה.
- **בליית מינרלים מואצת ביבשה** - תהליך שמטרתו להאיץ את קצב בליית המינרלים הטבעית על ידי פיזור סלע סיליקטי טחון דק, כגון בזלת, על קרקעות חקלאיות או ביערות, כדי להאיץ תגובות כימיות בין מינרלי הסלע, המים והפחמן הדו-חמצני באטמוספירה. פיזור מינרלי סיליקט טחונים בקרקעות חקלאיות מגביר את פוריותן ומשפר את היבול (ולכן שיטה זו כוללת גם תהליך טבעי המבוסס על חקלאות).

חלק מהטכנולוגיות רלוונטיות לישראל ויוכלו להיות מיושמות בהיקף נרחב. הפוטנציאל בשיטות אלה דומה לזה שבשיטות המתבססות על תהליכים טבעיים, 5-20 ג'יגה טונה לשנה, אך טווח האחסון גדול לאין שיעור - סדר גודל של אלפי שנים. יש לתת את הדעת על מידת הבשלות של השיטות, ולכך שמרבית השיטות הטכנולוגיות עוד לא הבשילו דיין. סיווג של שיטות מרכזיות המבוססות על טכנולוגיה מובא בטבלה 1 (להרחבה בדבר השיטות ראו נספח א).

ייעור ושיפור ניהול יער	אגירת פחמן בקרקעות	שימור ושיקום בתי גידול לחים ומערכות חופיות	הסרה ואחסון פחמן בביומסה			בליית מינרלים מואצת	דישון האוקיינוסים	לכידת פחמן ישירה ממי הים	לכידת פחמן ישירה מהאוויר	שיטת הסרת פחמן דו-חמצני אטמוספרי
			בין-פחם	ביואנרגיה עם לכידת פחמן	השקעת ביומסה					
4-12	2-6.6	0.16 (יערות אצות בחוף) 0.4 - (מנגרונים, ביצות מליחות, עשב ים)	1.3-3.7	2.7-4.9	5-15	ביבשה: 1-5 בים: 3-30	3-18	לא ידוע	5 (טווח של 1-15)	פוטנציאל הסרת פחמן אטמוספרי גלובלי ($Gt CO_2 eq y^{-1}$)
עשורים עד מאות	עשורים עד מאות	עשורים עד מאות	עשורים עד מאות	מאות עד אלפים	אלפים עד עשרות אלפים	עשרות אלפים	עשורים עד מאות	עשרות אלפים	עשרות אלפים	זמן אחסון פחמן משוער (בשנים)
גבוהה	גבוהה	גבוהה	גבוהה	בינונית	נמוכה	נמוכה	נמוכה	נמוכה	בינונית	בשלוח מדעית

טבלה 1. סיווג של שיטות מרכזיות המבוססות על טכנולוגיה. גישות המבוססות על טכנולוגיה להסרת הפחמן הדו-חמצני מהאטמוספירה הן הבולטות ביותר בספרות המדעית של השנים האחרונות. פוטנציאל ההסרה הגלובלי משקף את ההבנה הנוכחית בדבר פוטנציאל הסרת הפחמן על בסיס הערכות המספרות המדעית. זמן אחסון פחמן משוער מתייחס לטווח הזמן לפני שצפוי שחרורו חזרה לאטמוספירה, בשלוח מדעית מעריך את הקרבה ליישום בקנה מידה גדול. (מבוסס על הדוח השישי של IPCC).

השוק והרגולציה

מאחר שסילוק פחמן צריך להיעשות בסדר גודל תעשייתי ולפיכך לערב גורמים ממשלתיים, מוניטריים וכלכליים, יש לפתח מנגנוני שוק ורגולציה מתאימים ולהתקדם במחקר ובפיתוח. בדצמבר 2021 פרסמה נציבות האיחוד האירופי את ההנחיה למחזור בר-קיימה של פחמן (Sustainable Carbon Cycle). בהנחיה מתוארת תוכנית של האיחוד האירופי לסילוק ולאחסון של פחמן דו-חמצני ממקורות שונים כדי להגיע לניטרליות של פליטת פחמן, היינו לאיזון בין פליטות פחמן וסילוק פחמן מהאטמוספירה, עד 2050.

מרכיבי הליבה של התוכנית הם: פיתוח הנחיות מדויקות לשימוש בפחמן תעשייתי; קביעת יעד למציאת פתרונות טכנולוגיים ולסילוקו של פחמן מהאטמוספירה; חיזוק של חקלאות פחמן, שיטה שנועדה לקבע פחמן דו-חמצני בקרקעות ולתרום בכך להשגת יעד ההסרה נטו במגזר הקרקעות (310 מיליון טונה עד 2030). לשם כך הגדיר האיחוד האירופי את מסגרת הרישוי לסילוק פחמן ([Framework Certification Removal Carbon EU](#)), שנועדה ליישם תקנים ונוהלי הסמכה, לקדם פתרונות לסילוק פחמן וגישות של חקלאות פחמן ולמנוע טיוח ירוק (יצירת תדמית סביבתית חיובית שנועדה להסתיר היבטים שליליים ומזהמים).

המטרה היא להבטיח את יכולתו של האיחוד האירופי למדוד, לנטר ולאמת סילוק פחמן בעזרת השגת מימון ממקורות ציבוריים ופרטיים. מסגרת ההסמכה תתבסס על קריטריונים ועל מתודולוגיות הסמכה שתפתח נציבות האיחוד האירופי. ב-20 לפברואר 2024 הושג **הסכם זמני** (provisional), והוגדרה בו המסגרת הוולונטרית האירופית הראשונה למתן רישוי לסילוק ולאחסון של פחמן, לחקלאות פחמן ולאחסון של פחמן במוצרים המופקים ברחבי האיחוד. נקבעו תהליכי בקרת איכות, דיווח וניטור, כדי לעודד השקעה בפתרונות טכנולוגיים ובפתרונות המבוססים על תהליכים טבעיים.

עלויות משוערות

לפי סוכנות האנרגיה הבינלאומית, העלות של לכידת טונה של פחמן דו-חמצני ישירות מהאטמוספירה בלכידתו מהאוויר (DAC) היא 135-345 דולר, לעומת 15-120 דולר עבור סילוק של פחמן בתעשייה (CCS). לפי מחקר מעודכן של ETH Zurich (המכון הטכנולוגי הפדרלי של שווייץ), טווח העלויות הצפוי גבוה יותר, ועומד על 230-540 דולר לטונה (Sievert et al., 2024).

מחיר היעד המקובל בעולם לסילוק טונה של פחמן מהאטמוספירה בשיטות השונות שפורטו לעיל הוא כיום 100 דולר לטונה. כלומר ברוב השיטות החדשניות הוא עדיין גבוה במידה ניכרת ממחיר היעד, אך יורד עם הזמן. לפי הערכות חברת מקינזי (McKinsey & Company, 2023) שווייה של תעשיית CDR בסדר גודל של מיליארדי טונות בשנה (אשר תקרב אותנו ליעדי הסכם פריז) יגיע ל-1.2 טריליון דולר בשנת 2050. תעשייה כזו תדרוש שילוב של גורמים שונים, ובהם משקיעים, רגולטורים, מוסדות אקדמיים ומתווכים, קונים ומוכרים. כרגע רוב הסילוק נעשה בשוק הוולונטרי בידי תאגידי ענק כמו אמזון, מיקרוסופט וגוגל. כדי שהשוק יוכל לצמוח ולעמוד ביעדי הקיבוע, יהיה צורך במעורבות של גופים מדינתיים ושל ממשלות.

לסיכום, השיטות המבוססות על תהליכים טבעיים כמו ייעור מחדש, ניהול קרקעות ושיקום מערכות אקולוגיות ימיות, זולות יותר כיום (לעיתים פחות מ-50 דולר לטונה פחמן דו-חמצני), אך הן עלולות להתייקר בשל חזרת פחמן עקב שרפות, כריתת עצים או שינויי אקלים. שיטות אלה גם קשות יותר למדידה ולאומות. לעומת זאת שיטות טכנולוגיות כמו קיבוע פחמן בביומסה (Terrestrial Storage of Biomass – TSB) או לכידת פחמן מהאוויר (DAC) אמינות יותר מבחינת קיבוע האגירה, אך עלותן גבוהה (בין מאות דולרים לטונה ועד פי כמה וכמה ממחיר היעד הבינלאומי).

עלויות ושיקולים נוספים בשיטות המבוססות על תהליכים טבעיים:

- **ייעור מחדש (reforestation) וייעור חדש (afforestation):** העלויות מוערכות ב-5-50 דולר לטונה פחמן דו-חמצני, תלוי בזמינות הקרקע, בתנאי אקלים ובתפעול. זוהי שיטה זולה יחסית אך ייתכנו בה החזרות פחמן (reversal) עקב שרפות, כריתה או שינויי אקלים.
- **אגירת פחמן בקרקע באמצעות חקלאות משקמת ושימור קרקעות:** טכניקות כגון עיבוד מופחת, גידולי כיסוי ושילוב ביו-צ'אר יכולות להגיע ל-20-100 דולר לטונה. היתרון הוא ביצירה של ערך נוסף כמו פוריות קרקע וביטחון מזון. החיסרון - אי-ודאות רבה באשר לשימור הפחמן במאגרים לאורך זמן.
- **שימור ושיקום של בתי גידול לחים ומערכות אקולוגיות חופיות ימיות:** קיבוע פחמן, המכונה "פחמן כחול", באצות, במנגרובים ובעשבי ים. עלויות נמוכות של 10-100 דולר לטונה, תלוי בגודל שטחי השיקום ובתפעול, אך הפוטנציאל מוגבל יחסית מבחינת היקף השטחים האפשרי.

עלויות ושיקולים נוספים בשיטות טכנולוגיות:

- **קיבוע פחמן בביומסה יבשתית (TSB):** שילוב של הפקת אנרגיה מביומסה, לכידת פחמן והזרקתו לאחסון גאולוגי. העלויות מוערכות ב-100-200 דולר לטונה. היתרון הוא בייצור של אנרגיה. החיסרון - נדרשים שטחי קרקע עצומים, שיגרעו מהשטחים הנדרשים לייצור מזון.
- **בניית מינרלים מואצת:** העלויות הן 50-200 דולר לטונה, אך עשויות לרדת. היתרון הוא באגירה קבועה מאוד ובשיפור תכונות הקרקע. החיסרון - נדרשים היקפים נרחבים של כרייה והובלה ושטח גדול.

מגמות ותהליכים בפיתוח וביישום של שיטות CDR:

- שיפור בשיטות לקיבוע פחמן בביומסה יבשתית ולנכידת פחמן מהאוויר - שיפור בשיטות הכרייה (כגון הקמת מפעלים בעלי יכולת לספוח כמויות עצומות של פחמן דו-חמצני מהאוויר ולמרות העובדה שריכוז הפחמן הדו-חמצני באוויר נמוך) צפוי להוזיל את העלויות ככל שהטכנולוגיות ייושמו בקנה מידה נרחב יותר, בדומה לאנרגיה סולארית.
- הבדלים במחיר היעד - השיטות הטבעיות כבר קרובות למחיר היעד של 100 דולר לטונה או פחות, אך אינן אמינות דיין בכל הנוגע לקיבוע יציב וארוך טווח של פחמן. השיטות הטכנולוגיות אמינות יותר לטווח ארוך אך יקרות יותר, ויידרשו סבסוד ומתן תמריצים כדי ליישמן בהיקף נרחב.
- השוק הוולונטרי לעומת רגולציה - כיום בעיקר חברות טכנולוגיה מובילות סוחרות בזכויות לפליטת גזי חממה, אך כדי להגיע להיקפים של מיליארדי טונות של הסרה, ממשלות חייבות להגביר את הרגולציה ולתמחר פחמן.

שיטה	עלות משוערת (דולר/טון CO ₂)	מקור עיקרי	יתרונות	חסרונות	רמת קביעות
ייעור מחדש / ייעור חדש	50-5	IPCC AR6 (2022); Griscom et al. 2017	עלות נמוכה, ערכים אקולוגיים נוספים	סיכון לתחלופה, מגבלת שטח	נמוכה-בינונית
ניהול קרקעות / חקלאות משקמת	100-20	Smith et al. 2020; Woolf et al. 2021	שיפור קרקע, ביטחון מזון	אי-ודאות במדידה, החזרות אפשרויות	נמוכה-בינונית
שיקום מערכות אקולוגיות ימיות (מגדונים, עשבי ים, ביצות)	100-10	IPCC AR6 (2022)	קביעות טובה יחסית, ערכים נוספים	מגבלת שטח, עלויות מקומיות גבוהות	בינונית
Biochar (ביו-צ'אר)	120-30	Woolf et al. 2021	יחסית זול, משפר קרקע	מגבלות סקייל, יעילות משתנה	בינונית
BECCS (אנרגיה מביומסה עם נכידה ואחסון)	200-100	IPCC AR6 (2022); Royal Society 2018	מייצר גם אנרגיה, קביעות גבוהה	תחרות על קרקע ומים, עלויות גבוהה	גבוהה
Enhanced Weathering / Mineralization (האצת בליית מינרלים)	200-50	NASEM 2019; Fuss et al. 2018	קביעות גבוהה מאד, פוטנציאל רחב	עלויות כרייה והובלה גבוהות	גבוהה
DAC (נכידה ישירה מהאוויר)	345-135 (IEA 2021); 540-230 (ETH 2022)	IEA (2021); ETH Zurich (2022)	דיוק גבוה, קביעות גבוהה, גמישות גיאוגרפית	עלות גבוהה מאוד כיום, צריכת אנרגיה רבה	גבוהה מאוד
CCS תעשייתי (לצורך השוואה)	120-15	IEA (2020)	טכנולוגיה בשלה, קיים ניסיון תעשייתי	אינו CDR אלא מניעת פליטות חדשות	גבוהה

טבלה 2. עלויות משוערות של שיטות CDR

* הטבלה מתייחסת לפסולת חקלאית, וכמות זו עשויה לגדול באמצעות הוספת פסולת עירונית ותעשייתית.

לסיכום, על המדיניות הלאומית לשקלל בין שני סוגי השיטות: מצד אחד לעודד שימוש נרחב בשיטות המבוססות על תהליכים טבעיים, משום שעלותן נמוכה ויש להם ערכים גלויים - שיפור הקרקע, הסביבה הימית והמגוון ביולוגי; מצד שני לתמוך במחקר, בפיתוח וביישום של שיטות טכנולוגיות יקרות יותר, כדי להבטיח קיבוע יציב וארוך טווח של פחמן. שילוב זה עשוי לצמצם את הפער בין העלות הנוכחית הגבוהה של טכנולוגיות חדשניות לבין מחיר היעד, ולהניח תשתית לתעשייה שתפעל בהיקפים של מיליארדי טונות של קיבוע פחמן דו-חמצני עד אמצע המאה (ראו גם סעיף 8 להלן).

מחקר ופעילות באקדמיה

רוב השיטות הטכנולוגיות הנזכרות עדיין לא הבשילו מבחינה מדעית, ולכן אינן מוכנות לשימוש בקנה מידה נרחב. כמו קיים מחסור חמור בידע באשר להשפעותיהן האקולוגיות של השיטות, בפרט באשר ליכולת לנטר לאורך זמן את תהליך האחסון. למחקר האקדמי הבסיסי בתחום זה יש חשיבות מכרעת, ועליו להיות השלב ראשון בפיתוח טכנולוגיות ישימות שיסייעו להגיע ליעדים הגלובליים של סילוק הפחמן מהאטמוספירה. מרבית הטכנולוגיות בתחום נשענות על ידע אקדמי בתחומים כגון גאוכימיה, גאולוגיה, מדעי הקרקע והצמח, מדעי הים והנדסה.

מחקר עדכני מצביע על כך שהתחום מתפתח במהירות. בסקירה שפורסמה בכתב העת Nature (Lück et al., 2025) נמצאו כ-29 אלף מאמרים בנושא CDR, פי 3-4 מהערכות קודמות. עם זאת המחקר מתרכז בתחומים מסוימים (כמו ביו-צ'אר, מחצית הפרסומים הם בנושא זה), מתבסס בעיקר על ניסוי מעבדה או על ניסויי שדה מוגבלים, ונעשה ברובו באזורים גאוגרפיים מסוימים (למשל בסין).

גם בישראל ניכרת עלייה בהיקף המחקר, אך יש גורמים המאיטים את קצב ההתפתחות:

- **אינטרדיסציפלינריות** - זהו תחום המחייב שיתופי פעולה בין דיסציפלינות כמו מדעי הטבע, הנדסה, כלכלה ומדעי החברה. בפועל שיתופי פעולה כאלה הם נדירים למדי.
- **מימון מוגבל** - סילוק פחמן אינו בראש סדרי העדיפויות של קרנות מימון בישראל, והיקף התמיכה הממשלתית בו כמעט אפסי.
- **קשרי אקדמיה-תעשייה חלשים** - הידע נשאר בעיקר במעבדות ואינו מתורגם לחדשנות יישומית. בניגוד לתחומים כמו ביוטכנולוגיה או הנדסה, בתחום זה אין היסטוריה ענפה של שיתופי פעולה עסקיים.
- **תשתיות אקדמיות מוגבלות** - חברות היישום באוניברסיטאות אינן מתמחות בתחומי האקלים והפחמן, ולכן מעטים הם הכנסים, היוזמות והמסגרות המקדמות CDR.

המלצות לחיזוק תפקיד האקדמיה בישראל:

- הקמת מרכזי מחקר רב-תחומיים ייעודיים ל-CDR, שיחברו בין חוקרי מדעי הטבע, החברה והכלכלה.
- גיבוש תוכניות מימון ייעודיות למחקרים בסיסיים ויישומיים בתחום, בתמיכת משרדי ממשלה וקרנות פילנתרופיות.
- חיזוק הקשרים בין האקדמיה לתעשייה באמצעות חממות, תוכניות האצה (accelerators) ושיתופי פעולה עם חברות אנרגיה, חקלאות וטכנולוגיה.
- פיתוח מסגרות לשיתוף ידע באמצעות כנסים, רשתות מחקר בין-לאומיות ותוכניות לחילופי חוקרים.

פוטנציאל ליישום שיטות לסילוק פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה (CDR) בישראל

ישראל כמקד מחקר ופיתוח בתחום ה-CDR

לישראל יכולת לייצא ידע ופתרונות בקנה מידה בין-לאומי הודות לשני נדבכים מרכזיים: אקדמיה פעילה, ובה מאות חוקרות וחוקרים העוסקים במחזור הפחמן ובשיטות חדשניות של CDR; ותעשיית הזנק מתפתחת, ובה יותר מ-20 חברות הזנק שקמו ברובן בשנים האחרונות ומתמקדות בטכנולוגיות לסילוק פחמן.

מלבד ייצוא של ידע וטכנולוגיה, קיים פוטנציאל ליישום מקומי של שיטות CDR בים וביבשה. ישראל יכולה, למשל, לנצל את היכולות הייחודיות שלה בתחום ההתפלה לשם פיתוח שיטות ללכידת פחמן מהים. עם זאת אין די ידע בנוגע ליעילות, לעלות וליכולת ליישם את היכולות בהיקף נרחב בהקשר המקומי. נדרשת אפוא הערכה שיטתית של הפוטנציאל, שתכלול מיפוי גאוגרפי של האפשרויות לסילוק פחמן בישראל: הערכת השטח הפנוי; יכולת האחסון בתת-הקרקע ובים; ההשפעות אקולוגיות; התועלת הנוגעת לחקלאות ולמערכות אקולוגיות; הדרישות הנוגעות לתשתית; ועלותן הכלכלית של החלופות.

בדוח של משרד האנרגיה (ברוקוביץ' ואח', 2024) צוין כי תת-הקרקע בישראל עשויה להתאים לאחסון כמויות גדולות של פחמן דו-חמצני, אך תידרש השקעה ניכרת בהקמה של תשתיות הובלה, בסקרי סביבה ובבדיקות בטיחות. בשל מגבלות השטח הפנוי ספק אם ישראל תוכל להגיע ליעדים של מגה או ג'יגה טונה פחמן דו-חמצני, ולכן עיקר התרומה של ישראל עשויה להיות בפיתוח ובייצוא של ידע, של טכנולוגיות ושל מודלים עסקיים חדשניים.

השלב הראשון לקידום CDR בישראל חייב לכלול מחקר בסיסי ויישומי בשיתוף פעולה הדוק בין האקדמיה לתעשייה, לצורך בחירה ותיעודף של השיטות המתאימות ביותר לנסיבות המקומיות. לאחר מכן יידרשו תכנון ארוך טווח, השקעות רחבות היקף, מעורבות ממשלתית, שיתוף פעולה של המגזר הפרטי וגופי תכנון והסרת חסמים רגולטוריים כדי לאפשר עריכה של פיילוט בקנה מידה גדול מחוץ למעבדה. בשנת 2023 הוקם הפורום האקדמי הישראלי לקיבוע פחמן. הפורום, המאגד כ-300 חוקרות וחוקרים מכלל המוסדות האקדמיים בישראל, שואף לחזק שיתופי פעולה בין-תחומיים ובין-מוסדיים, להאיץ את המעבר ממחקר בסיסי ליישומי וליצור תשתית לשיתופי פעולה עם התעשייה.

יישום אסטרטגיית היתדות לסילוק פחמן דו-חמצני בישראל

פאקלה וסוקולוב (Pacala & Socolow, 2004) הציגו את אסטרטגיית היתדות (wedges) לייצוב פליטות גזי חממה, והראו כיצד מגוון צעדים בני-קיימה יכולים להצטבר ולמנוע את ההשפעות החמורות של שינויי האקלים. הם הדגישו שאין פתרון קסם יחיד, אלא יש לשלב כמה פעולות. רק כך יהיה אפשר להגיע ליעד הכולל.

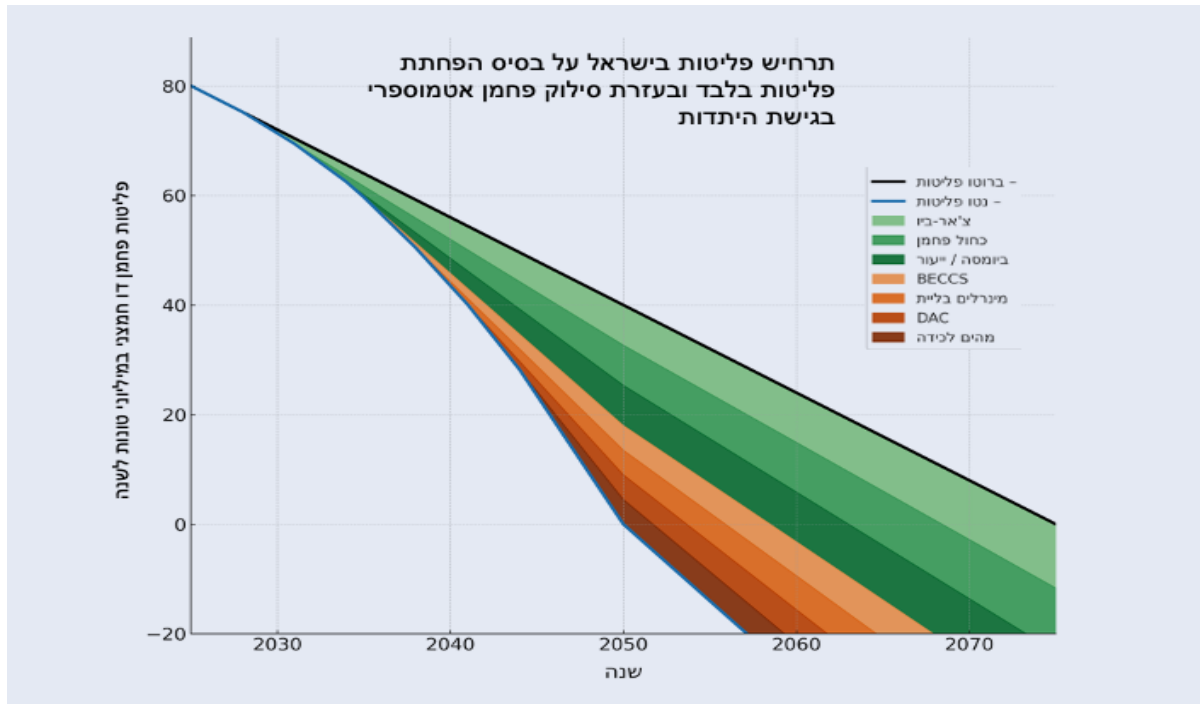
כפי שעולה ממסמך זה, יישום שיטת היתדות לסילוק פחמן דו-חמצני הוא כיום טבעי והכרחי. לנוכח הצורך להסיר מיליארדי טונות של פחמן מהאטמוספירה בעשורים הקרובים, אין מענה יחיד לאתגר. נדרש שילוב של גישות משלימות. כל שיטה תתרום להצלחת המאמץ. בישראל אסטרטגיית היתדות מתאימה במיוחד בשל המגבלות הגאוגרפיות, האקלים המקומי וחוזקות בתחומי החדשנות והחקלאות.

השיטות בעלות הפוטנציאל בישראל

- **ייצור ביו-צ'אר ושימוש בו** - שימוש בשאריות חקלאיות ויערניות לייצור ביו-צ'אר כדי לייצב ולקבע פחמן בקרקע למשך מאות שנים ולשפר את פוריות הקרקע.
- **הגברת אגירה של פחמן בקרקעות** - יישום שיטות חקלאיות מתקדמות כגון עיבוד מינימלי, גידולי כיסוי והעשרה אורגנית לשיפור מאגרי הפחמן בקרקע גם באזורים צחיחים.
- **קבורת ביומסה ביבשה** - פיתוח מערכות לאיסוף ביומסה מייעור, מחקלאות ומגידולים ייעודיים, ואחסונה בתנאים המונעים התפרקות.
- **קבורת ביומסה באוקיינוסים** - בישראל הכוונה בעיקר לקיבוע ביומסה בחופים ובאזורים לחים, או בהגנה על מערכות של "פחמן כחול" (מערכות לקיבוע פחמן בעשבי ים, בביצות מלוחות ובמנגרובים).
- **האצת בליית מינרלים** - שימוש באבקת מינרלי סיליקט בשדות חקלאיים כדי להאיץ מינרליזציה טבעית של פחמן דו-חמצני.
- **לכידת פחמן ישירות מהאוויר** - קידום טכנולוגיות ללכידת פחמן ישירות מהאטמוספירה, אחסונו בתת-הקרקע ושימוש באנרגיה מתחדשת.

חלק מהגישות מתחרות על אותו משאב קרקע, אך כל אחת תורמת את תרומתה הייחודית לסל הפתרונות, וחיונית לסילוק מצטבר ואמין של הפחמן. לשיטות שונות אלה, המבוססות על תהליכים טבעיים, יש יתרונות נלווים ובהם שיקום מערכות אקולוגיות, לחקלאות ולפיתוח אזורי. מכיוון שהשיטות מתחרות לא פעם על אותו תא שטח או משאב ביולוגי, היכולת לשלבן תלויה בהקשר המקומי.

באיור 3 מוצגים מרכיבים חשובים בקידום סילוק הפחמן הדו-חמצני מהאטמוספירה בישראל, ואפשר לראות את העלייה החדה בתרומת הסילוק ככל שמתקדמת מדיניות הפחתת הפליטות הלאומית. למשל, תרומה של סילוק פחמן שוות ערך ל-10% מהפליטות בישראל כיום, תהיה שוות ערך למחצית מהפליטות (50%) לאחר שנפחית את סך פליטות הפחמן הדו-חמצני ב-80% כמתוכנן.



איור 3. תחזית אפשרית להורדת הפליטות בישראל (קו שחור) ולהאצה בעקבות שילוב של טכנולוגיות הסילוק השונות (אסטרטגיית היתדות), ובכללן שיטות טבעיות (ירוק) ושיטות טכנולוגיות (חום). ללא סילוק קשה לצפות לאיפוס פליטות עד 2075, ואילו בעזרת הסרת פחמן מהאטמוספירה אפשר יהיה להגיע לאיפוס לפני 2060. חלקו של הסילוק גדל עם הזמן הן הודות להתפתחות הטכנולוגית בתחום הן כחלק היחסי מסך הפליטות ככל שמתקדמת הפחתת הפליטות הלאומית.

הערכה כמותית ליישום שיטת CDR - ביו־צ'אר בישראל כמקרה בוחן

ביו־צ'אר (biochar) נחשב לאחת הטכנולוגיות הטבעיות המבטיחות לסילוק פחמן דו־חמצני מהאטמוספירה. ביו־צ'אר עשוי לקבע פחמן לטווח ארוך, יש לו יתרונות נלווים נוספים שיפור מבנה הקרקע, הגדלת פוריותה, שימור מים ושיפור התפוקות החקלאיות. עם זאת יישום רחב היקף של השיטה בישראל מחייב בחינה מקיפה של חומרי גלם, שטחים זמינים, מתקני פירוליזה, מקורות אנרגיה ותמיכה ממשלתית וחקלאית. בטבלה 3 מוצגים התנאים העיקריים ליישום הטכנולוגיה בישראל. בטבלה 4 מוצגת דוגמה כמותית להפחתת 10% מסך פליטות הפחמן של המדינה באמצעות ביו־צ'אר ואת האתגרים הכרוכים בכך.

קטגוריה

שדות חקלאיים, שטחי שיקום/נטושים, יערות ומדבר (נדרשת בדיקה)	שטחי אדמה
פסולת חקלאית (גזם, שאריות יבול), פסולת עירונית אורגנית, פסולת תעשייתית (עץ), גזם יערות	חומרי גלם
חימום ביומסה ל-300°C-700°C; מתקן עירוני ~5,000 טון/שנה; דרושים ~600 מפעלים ל-3 מיליון טון/שנה; מתקנים קטנים-בינוניים לחוות	מתקני פירוליזה
מערכי איסוף ושינוע, מתקני אחסון לביו־צ'אר מוגמר	אחסון ולוגיסטיקה
~4 ג' לטון (~10% מקיבוע); שימוש באנרגיה מתחדשת; אפשר לנצל חום עודף ולייצר גז/שמן לשימוש חוזר	דרישות אנרגיה
מחקר התאמה לקרקעות שונות; בדיקות ארוכות טווח; הדרכת חקלאים (שיטות, מינויים, שילוב עם קומפוסט)	תמיכה חקלאית ומחקרית
סבסוד מתקני פירוליזה; תמיכה ממשלתית בפרויקטי שיקום; מס פחמן כתמריץ לניצול פסולת	רגולציות ומדיניות

טבלה 3. שימוש בביו־צ'אר בישראל

הערכת התנאים הדרושים ליישום טכנולוגית הביוצ'אר בישראל

יעד שאפתני לעומת פוטנציאל בר-השגה כיום		
פריט	יעד שאפתני: להפחית ~10% מהפליטות (לפי נתוני פסולת חקלאית) (פוטנציאל אפשרי כיום)	יעד שאפתני: להפחית ~10% מהפליטות (לפי נתוני פסולת חקלאית)
פליטות יעד להפחתה	~7,000,000 טון CO ₂ /שנה	~502,410 טון CO ₂ /שנה נמו
ביו-צ'אר דרוש	~3,000,000 טון/שנה (1 טון ביו-צ'אר סופח ~2.5 טון CO ₂)	~390,000 טון/שנה מתקבל מ-~1.3 מיליון טון פסולת חקלאית
ביומסה דרושה	~12,000,000 טון/שנה (יחס 1:4 ביומסה:ביו-צ'אר)	~1,300,000 טון/שנה (פסולת חקלאית צמחית אורגנית קיימת)
שטחי יישום	~1,000,000 דונם (5 טון/דונם כל 5 שנים → ממוצע 1 טון/דונם/שנה)	~390,000 דונם/שנה (על בסיס 390 אלף טון ביו-צ'אר/שנה)
מספר מתקנים	~600 מתקנים (= 5,000 טון ביו-צ'אר/שנה למתקן)	~78 מתקנים בקירוב
אנרגיה/פליטות תהליך	צריכת אנרגיה ~10% מקיבוע (ניתן לקיזוז ע"י גז/שמן/חום תהליך)	פליטות נלוות ~500,500 טון CO ₂ /שנה; קיבוע גולמי ~1,002,910 → נמו ~502,410
חלק מסך פליטות ישראל	~0.8% ~10% (מתוך ~61 MtCO ₂ /שנה)	חלק ממגזר החקלאות—~8% (אם המגזר ~10% מהסך הלאומי)

טבלה 4. הערכה נמוחית של שימוש בביוצ'אר - יעד שאפתני לעומת פוטנציאל בר-השגה

מהנתונים לעיל עולה כי כדי לקלוט 10% מהפליטות בישראל נדרשים כ-3 מיליון טונה ביו-צ'אר לשנה, כלומר כ-12 מיליון טונה ביומסה, כמיליון דונם אדמה מתאימה וכ-600 מתקני פיורוליזה ברחבי הארץ. מאחר שאי אפשר ליישם ביו-צ'אר באותן חלקות מדי שנה בשנה, אלא רק אחת לחמש שנים, ומאחר שהפסולת האורגנית הקיימת מספיקה רק למחצית מהביקוש, תידרש הרחבה לאזורי מדבר וייצור ייעודי של ביומסה. לנוכח הדיון לעיל חשוב לציין שהעלות הכלכלית במקרה זה אינה יכולה להחליף את העלות הכלכלית של שיטות מיטיגציה אחרות (כגון אנרגיה סולארית או מימן ירוק), אלא מתחייבת כתוספת תקציבית.

מבחינה טכנולוגית וחקלאית היישום ברי-ביצוע, אך מחייב השקעה נרחבת בתשתיות, התאמת שטחים ועריכת מחקר ארוך טווח לניטור אמין של קיבוע הפחמן. היישום הנדרש אפשרי עקרונית בישראל, אך מותנה בתכנון מערכת, במדיניות תומכת ובחדשנות מתמשכת.

בתנאים הקיימים הפיכת הכמות המוערכת של הפסולת החקלאית בישראל (1.3 מיליון טונה בשנה) לביוצ'אר, תסלק כ-500 אלף טונה פחמן דו-חמצני, שהם 0.8% מהפליטות השנתיות של ישראל. לשם השוואה, במדינה חקלאית כמו מצרים, שבה מוערכת כמות הפסולת החקלאית בכ-30 מיליון טונה בשנה, הפוטנציאל גבוה לאין שיעור, כ-23.1 מיליון טונה פחמן דו-חמצני ברוטו, וכ-11.55 מיליון טונה נטו לאחר הפחתת הפליטות שמתרחשות בתהליך, שהם כ-4.6% מסך הפליטות הלאומיות של מצרים.

בשיטות אחרות של קבורת ביומסה, למשל קבורה ישירה של שאריות צמחים בתנאים של היעדר חמצן, כמו בקרקעית האוקיינוס או במאגרים תת-קרקעיים אטומים, כמות הפחמן הנלכד גבוהה יותר מאחר שכל הפחמן בביומסה נשמר, ללא פליטות בתהליך השרפה. במקרה כזה קבורת 1.3 מיליון טונה ביומסה בישראל הייתה לוכדת כ-2.15 מיליון טונה פחמן דו-חמצני, פי ארבעה מהלכידה נטו שמתקבלת מביוצ'אר. עם זאת יישומן של שיטות אלו מורכב יותר מבחינה לוגיסטית ורגולטורית, ואין להן תועלת חקלאית נלווית כמו לביוצ'אר.

דיפלומטיית פחמן

המונח דיפלומטיית פחמן (carbon diplomacy) מתייחס למאמצים דיפלומטיים, משא ומתן ויוזמות שיתופיות בין מדינות שמטרתם להפחית את פליטות גזי החממה, לעבור לכלכלות דלות פחמן ולנהל ניהול מושכל ומוסכם את התגובה הגלובלית לשינויי האקלים.

מלבד ההסכמים הבין-לאומיים והדיונים במסגרות השונות של ועידת האקלים הבין-לאומית של האו"ם (COP), דיפלומטיית פחמן עולה בקנה אחד עם יוזמות כמו מיסי פחמן, תוכניות סחר או מנגנוני התאמת גבולות. כל אלה כרוכים בתיאום ובמשא ומתן בין-לאומיים כדי להבטיח יישום הוגן ויעיל של ההסכמים הנוגעים להפחתת פליטות, ועמידה ביעדים המוצהרים. דיפלומטיה בין-לאומית זו עוסקת גם בסוגיות של ריבונות, תחרותיות סחר ואסטרטגיה גאופוליטית. למשל, מנגנון התאמת פחמן בגבול ([Carbon Border Adjustment Mechanism](#)) של האיחוד האירופי משתמש בדיפלומטיה רגולטורית לעיצוב מדיניות פחמן.

תחום חדש ומתפתח יותר הוא דיפלומטיה של קיבוע פחמן, הכולל שיתוף פעולה בין-לאומי באשר לטכנולוגיות ולאסטרטגיות של סילוק פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה, לרבות עם גופי ממשל, ובנוגע לשוויון בפרישה הגיאוגרפית של הטכנולוגיה, שליטה במשאבים ותחרות גאופוליטית, מימון וסיכוני שוק ומיפוי של השפעות סביבתיות וחברתיות פוטנציאליות. בשונה מדיפלומטיית פחמן, תחום זה עוסק בשאלות כיצד מאמצים דיפלומטיים ישפיעו על יוזמות לסילוק פחמן, אם הם יתרמו לביטחון העולמי או יעמיקו את המתח הגאופוליטי, למשל על רקע התנגדות לחדשנות של מדינות עתירות דלקי מאובנים המעוניינות להמשיך להשתמש בו.

לישראל - מדינה מתקדמת מבחינה מדעית-טכנולוגית, אך מוגבלת מאוד בשטחה - עומדת האפשרות לשתף פעולה עם מדינות שכנות (כגון ירדן, מצרים וקפריסין) בכל הנוגע ליישום של פתרונות CDR, למשל ביוצ'אר, שתוארו לעיל.

עם זאת בשל יכולות מדעיות, טכנולוגיות ויישומיות מתקדמות ישראל יכולה למלא תפקיד חשוב כמוקד ידע אזורי. היא יכולה להעביר שיטות ופתרונות למדינות שכנות בעלות שטח חקלאי נרחב יותר, למשל מצרים, ולהשפיע בכך על האקלים בכל האזור.

המלצות ומסקנות

- אין די בהפחתת פליטות גזי חממה כדי לעמוד ביעדי הסכם פריז להפחתת פליטות. נדרשת גם תשתית מחקרית, מדעית וטכנולוגית.
- יש לדרג ולתעדף טכנולוגיות CDR לפי קריטריונים של בשלות מדעית, עלות, פוטנציאל קיבוע ויתרונות נלווים המבוססים על מחקר אקדמי, ובכך להביא לניהול מושכל של משאבים ולשילוב מיטבי של מגוון גישות טבעיות וטכנולוגיות.
- יתרונה המדעי-טכנולוגי ישראל מאפשר לה לשמש מוקד ידע אזורי, לפתח יכולות חדשניות ולייצא פתרונות בקנה מידה נרחב, ובכך להתגבר על מגבלות השטח והמשאבים.
- שילוב בין מחקר אקדמי, תעשייה ותמיכה ממשלתית הכרחי לבניית יכולת טכנולוגית ותשתית ידע שיסייעו בעתיד בפיתוח נרחב יותר. כדי לקדם את המחקר בתחום יש לבנות תוכניות מימון ייעודיות ולהקים מרכזי מחקר רב-תחומיים שיחברו בין חוקרי מדעי הטבע, החברה והכלכלה. לצד אלה מוצע להקים חממות טכנולוגיות ותוכניות האצה שיסייעו ליצירת שיתופי פעולה עם חברות אנרגיה, חקלאות וטכנולוגיה.
- ניתוח שוק ורגולציה מתקדמת, לרבות בחינת תמריצים כלכליים, כללי דיווח וסקיפות, חיוניים להבטחת אמינות, הוגנות והימנעות מתופעות של טיוח ירוק. כך תגבר יכולתה של ישראל להשתלב בשוקי פחמן בין-לאומיים.
- חיזוק שיתופי פעולה בין-לאומיים ואזוריים יתרום להגדלת המשאבים הזמינים, לבחינת פתרונות מתאימים ולמיצוב ישראל כשותפה אסטרטגית במאמץ העולמי.
- השקעה בחינוך, בהכשרה ובהסברה תסייע בהעמקת ההבנה הציבורית והמקצועית באשר לחשיבות תחום ה-CDR, ותגדיל את ההון האנושי הדרוש לפיתוחו.

רשימת המקורות

ברוקוביץ, ע', בדל, ד', גנור, א', גולן, א', גנות, ש', גרדוש, מ', זלטיקין, א', טפליצקי, א', נסים, א', ארואץ, ח"ן וברנד-קליבנסקי, ש' (יוני 2024). [שימוש בתח הקרקע לאיפוס פליטות גזי החממה](#), מסמך רקע למדיניות, משרד האנרגיה.

Babiker, M., Berndes, G., Blok, K., Cohen, B., Cowie, A., Geden, O., Ginzburg, V., Leip, A., Smith, P., Sugiyama, M., & Yamba, F. (2022). *Cross-sectoral perspectives (Chapter 12)*. In: *IPCC 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Eds. Shukla, A.R., Skea, J., Slade, R., Al Khourdajie, A., van Diemen, R., McCollum, D., Pathak, M., Some, S., et al., pp. 1245-1354 Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press. [10.1017/9781009157926.005](https://doi.org/10.1017/9781009157926.005)

Bashmakov, I. A., Nilsson, L. J., Acquaye, A., Bataille, C., Cullen, J. M., Fishedick, M., ... & Tanaka, K. (2022). Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, chapter 11.

Brack, D. and King, R. (2021), Managing Land-based CDR: BECCS, Forests and Carbon Sequestration. *Glob Policy*, 12: 45-56. <https://doi.org/10.1111/1758-5899.12827>

Carbon Dioxide Removal Mission Team (2022). *Carbon dioxide removal technology road map: Innovation gaps and landscape analysis*. Published by Mission Innovation, retrieved from: <https://mission-innovation.net/wp-content/uploads/2022/09/Attachment-1-CDR-Mission-Roadmap-Sept-22.pdf>

Edwards, M.R , Z.H. Thomas, G.F. Nemet, S. Rathod, J. Greene, K. Surana, K.M. Kennedy, J. Fuhrman, & H.C. McJeon, (2024). Modeling direct air carbon capture and storage in a 1.5 °C climate future using historical analogs, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 121 (20) e2215679121, <https://doi.org/10.1073/pnas.2215679121>.

IPCC 2022. *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

Karan, S. K., Woolf, D., Azzi, E. S., Sundberg, C., & Wood, S. A. (2023). Potential for biochar carbon sequestration from crop residues: A global spatially explicit assessment. *GCB Bioenergy*, 15, 1424–1436. <https://doi.org/10.1111/gcbb.13102>

- Lamb, W.F., Gasser, T., Roman-Cuesta, R.M. et al. Current national proposals are off track to meet carbon dioxide removal needs. *Nat. Clim. Chang.* *14*, 555–556 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41558-024-01993-5>.
- Lück, S., Callaghan, M., Borchers, M., Lejeune, Q., Lu, Y., Mengel, M., Nauels, A., Raitzer, I., Schleussner, C.-F., & Minx, J. C. (2025). Scientific literature on carbon dioxide removal revealed as much larger through AI-enhanced systematic mapping. *Nature Communications*, *16*, Article 6632.
- McKinsey & Company. (2023, December 4). Carbon removals: How to scale a new gigaton industry. P. Mannion, E. Parry, M. Patel, E. Ringvold, and J. Scott, McKinsey Sustainability and McKinsey's Global Energy and Materials Practices.
- Pacala, S., & Socolow, R. (2004). [Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies](#). *Science*, *305*(5686), 968–972.
- Powis, C. M., S. M. Smith, J. C. Minx and T. Gasser (2023). Quantifying global carbon dioxide removal deployment. *Environmental Research Letters*, *18*(2), 024022, doi: 10.1088/1748-9326/acb450
- Sievert, K., Schmidt, T. S., & Steffen, B. (2024). Considering technology characteristics to project future costs of direct air capture. *Joule*, *8*(4), 979–999.
- Smith, S. M., et al. (Eds.). (2024). The state of carbon dioxide removal: a global, independent scientific assessment of carbon dioxide removal. Technical Report. University of Oxford. pp 222.
- K.A. Wendt, C. Nehrbass-Ahles, K. Niezgodá, D. Noone, M. Kalk, L. Menviel, J. Gottschalk, J.W.B. Rae, J. Schmitt, H. Fischer, T.F. Stocker, J. Muglia, D. Ferreira, S.A. Marcott, E. Brook, & C. Buizert, (2024). Southern Ocean drives multidecadal atmospheric CO₂ rise during Heinrich Stadials, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* *121* (21) e2319652121, <https://doi.org/10.1073/pnas.2319652121>.

נספח א | פירוט שיטות להסרת פחמן מהאטמוספירה ואחסונו במערכות שונות

בנספח זה נסקור בקצרה את הטכנולוגיות העיקריות להסרת פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה בהתבסס על הקטגוריות שהוזכרו. אפשר לסווג את הגישות השונות לכאלו המתבססות על מערכות ועל תהליכים טבעיים (nature-based removals) ולשיטות מלאכותיות (technology-based removals). היכן שיש מידע מהימן, סיפקנו הערכות באשר לפוטנציאל ההסרה הגלובלי על פי תחזיות מהספרות המדעית הנוכחית. חלק מהטכנולוגיות רלוונטיות למדינת ישראל ואפשר יהיה ליישמן בהצלחה ובקנה מידה נרחב בארץ.

ייעור ושיפור ניהול יערות: נטיעת עצים בשטחים חדשים (ייעור) או שיקום יערות שנכרתו (ייעור מחדש) לצד ניהול משופר של יערות קיימים למניעת כריתה ושרפות מאפשרים לעצים לספוג פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה בתהליך הפוטוסינתזה ולאחסן אותו בגזעים, בשורשים ובקרקע במשך עשרות עד מאות שנים. על פי רוב גישות אלו הן זולות, יעילות, ובשלול מבחינה מדעית. אפשר ליישם אותן בקנה מידה נרחב, והשפעותיהן האקולוגיות מזעריות (ועל פי רוב אף מיטיבות). הסרת הפחמן בגישות אלו קל יחסית לניטור ולמעקב. אולם זמן האחסון של הפחמן המקובע ביערות עלול להיות קצר טווח בשל כריתת יערות, תמותת עצים או שרפות. כמו כן נדרש שטח נרחב להסרת פחמן בקנה מידה נרחב. פוטנציאל ההסרה השנתי הגלובלי מוערך ב-4-12 ג'יגה טונה.⁴

אגירת פחמן בקרקע: פחמן מאוחסן בקרקעות בעיקר כחומר אורגני שמקורו בפירוק צמחים. לעיתים הפחמן האורגני עובר טרנספורמציות והופך לפחמן מינרלי. כדי לשמר את הפחמן בקרקע לטווח ארוך, יש לשפר את השיטות החקלאיות המסורתיות, שמגבירות את שימור החומר האורגני בקרקע ומאיטות את פירוקו או להשתמש בסוגי גידולים חקלאיים בעלי שורשים עמוקים. לשיטות אלו יש רווחים משניים גדולים לחקלאות ולמערכות אקולוגיות יבשתיות, אך יישומן דורש הרחבה של הפיתוח המדעי, מעורבות ממשלתית ושיתוף פעולה בין שחקנים שונים. פוטנציאל ההסרה השנתי הגלובלי מוערך ב-2-6.6 ג'יגה טונה.

שימור ושיקום בתי גידול לחים ומערכות חופיות: פחמן מקובע בבתי גידול לחים כמו ביצות או מערכות חופיות בעקבות הצטברות של פחמן אורגני בסדימנט (משקע, חומר מלוכד המצטבר על פני היבשה ועל קרקעית מקווי מים) או בקרקע המוצפת. האדמה המוצפת נמצאת בתנאים אנאירוביים המאיטים את פירוק החומר האורגני ובכך מונעים את יציאת הפחמן הדו-חמצני בחזרה לאוויר. טווח האחסון הפוטנציאלי נחשב ארוך יחסית, עד כדי מאות שנים. אולם פליטות מתאן, הנוצר בתנאים האנאירוביים, עלולות במקרים רבים לקזז את ההשפעה האקלימית של הפחמן המקובע בבתי גידול לחים. פוטנציאל ההסרה השנתי הגלובלי במערכות חופיות (יערות מנגרובים, עשב ים וביצות מליחות) מוערך ב-0.4 ג'יגה טונה, וביערות של אצות בסביבת החוף (seaweed forests) ב-0.16 ג'יגה טונה.

קיבוע פחמן בביומסה יבשתית (TSB): צמחים מקבעים פחמן בביומסה באופן טבעי בתהליך הפוטוסינתזה. אולם הקיבוע הוא קצר טווח מאחר שבתהליך פירוק הביומסה חוזר הפחמן לאטמוספירה. לפיכך כדי לאחסן את הפחמן יש לשמור על הביומסה בתנאים שבהם הפירוק יהיה איטי, או להפוך את הביומסה לחומר אורגני שקשה לפרקו.

4 יש לשים לב שאנחנו משתמשים במונח ג'יגה טונה לפחמן דו-חמצני כדי לפשט את המסקנה בעוד שההתייחסות בדוחות המדעיים נגון IPCC הכוונה היא ל GtCO₂eq/yr שנוכל בתוכו את ההשפעות של גזי חממה נוספים.

שיטה זו היא היברידיית באופייה ומשלבת כמה שיטות שונות לאחסון פחמן בביומסה לטווח ארוך, הכוללים השקעה של ביומסה חקלאית או צמחית אחרת בעומק הים, קבורתו בתת-הקרקע או האצת תהליך הקומפוסטציה של הביומסה על ידי הבערת החומר בתנאים מוגדרים של טמפרטורה גבוהה וחמצן נמוך, כדי ליצור חומר חדש - למשל ביו-פחם אשר מיטיב עם פוריות הקרקע ובעל רווח משני בחקלאות, או ביו-דלק - אשר יכול לשמש מקור אנרגיה או שאפשר להחדירו ולאחסנו בתת-הקרקע בקלות יחסית.

מאחר ששאריות גדולות של ביומסה מיוצרות באופן טבעי בחקלאות ובמערכות טבעיות, הסרת פחמן מהאטמוספירה בשיטה זו יכול להיעשות בקנה מידה נרחב ובעלות זולה יחסית, עם פוטנציאל אחסון ארוך טווח, כתלות בשיטת האחסון. פוטנציאל ההסרה השנתי הגלובלי בביומסה יבשתית מוערך ב-2-5 ג'יגה טונה ובביוצ'אר ב-3.4-6.3 ג'יגה טונה. פוטנציאל לכידת הפחמן בשיטות BECCS (bioenergy with carbon capture and storage), אשר מבוססות על הפקת אנרגיה מגידולים חקלאיים וחלקה מבוסס על לכידת הפחמן (כאשר שלב הלכידה חורג מהגדרת ה-CDR) נע בין 0.4-16.1 ג'יגה טונה.

דישון האוקיינוסים והשקעת ביומסה ימית: אצות ימיות מקבעות פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה כביומסה בתהליך הפוטוסינתזה הימית. דישון האוקיינוסים בברזל באזורים ימיים עשירים בנוטרופיטים אך עניים בכלורופיל יאצו במידה ניכרת את קצב גדילת האצות ובכך את כמות הפחמן הנלכדת בביומסה הימית. מאחר שאורך החיים של אצות הוא קצר, יש צורך להשקיע את הביומסה בעומק הים כדי לצמצם את פירוק החומר האורגני.

האחסון של פחמן בביומסה ימית השוקעת לעומק של יותר מ-500 מטר מפני-הים הוא לטווח ארוך מאוד, מאות ואף אלפי שנים. זוהי שיטה זולה שאפשר ליישמה בקנה מידה נרחב. מחקרים מדווחים על פוטנציאל קיבוע של יותר מג'יגה טונה בקנה מידה גלובלית. אולם תהליך הניטור והמעקב אחרי שקיעת פחמן בעומק הים הוא מורכב. לצד זאת לשיטה זו עלולות להיות השלכות אקולוגיות שליליות נרחבות על המערכת הימית. גישות נוספות מתמקדות בצימוח ובהשקעה של ביומסה ימית צמחית גדולה יותר כמו יער אצות (kelp forest), אך היכולת שלהן להסיר פחמן מהאטמוספירה נמוכה. פוטנציאל ההסרה השנתי הגלובלי מוערך ב-3-18 ג'יגה טונה.

בליית מינרלים מואצת ביבשה: זהו תהליך שמטרתו להאיץ את קצב בליית המינרלים הטבעית על ידי פיזור סלע סיליקטי טחון דק, כגון בזלת, על קרקעות חקלאיות או ביערות כדי להאיץ תגובות כימיות בין מינרלי סלע, מים ופחמן דו-חמצני מהאטמוספירה. בתהליך, הפחמן הדו-חמצני מגיב עם מינרלים סיליקטיים (ובשכיחות נמוכה יותר עם מינרלי קרבונט) ליצירת משקע קשה תָּמָס (הנמס בנוזל בקושי או באופן חלקי) של קלציום קרבונט או יון הביקרבונט (קרבונט הוא תרכובת של פחמן וחמצן). בסוף התהליך יוני הקרבונט נשטפים עם הגשם או עם ההשקיה למי הים ומעלים את האלקליניות הימית ובכך את אחסון הפחמן מהאטמוספירה במערכת הימית.

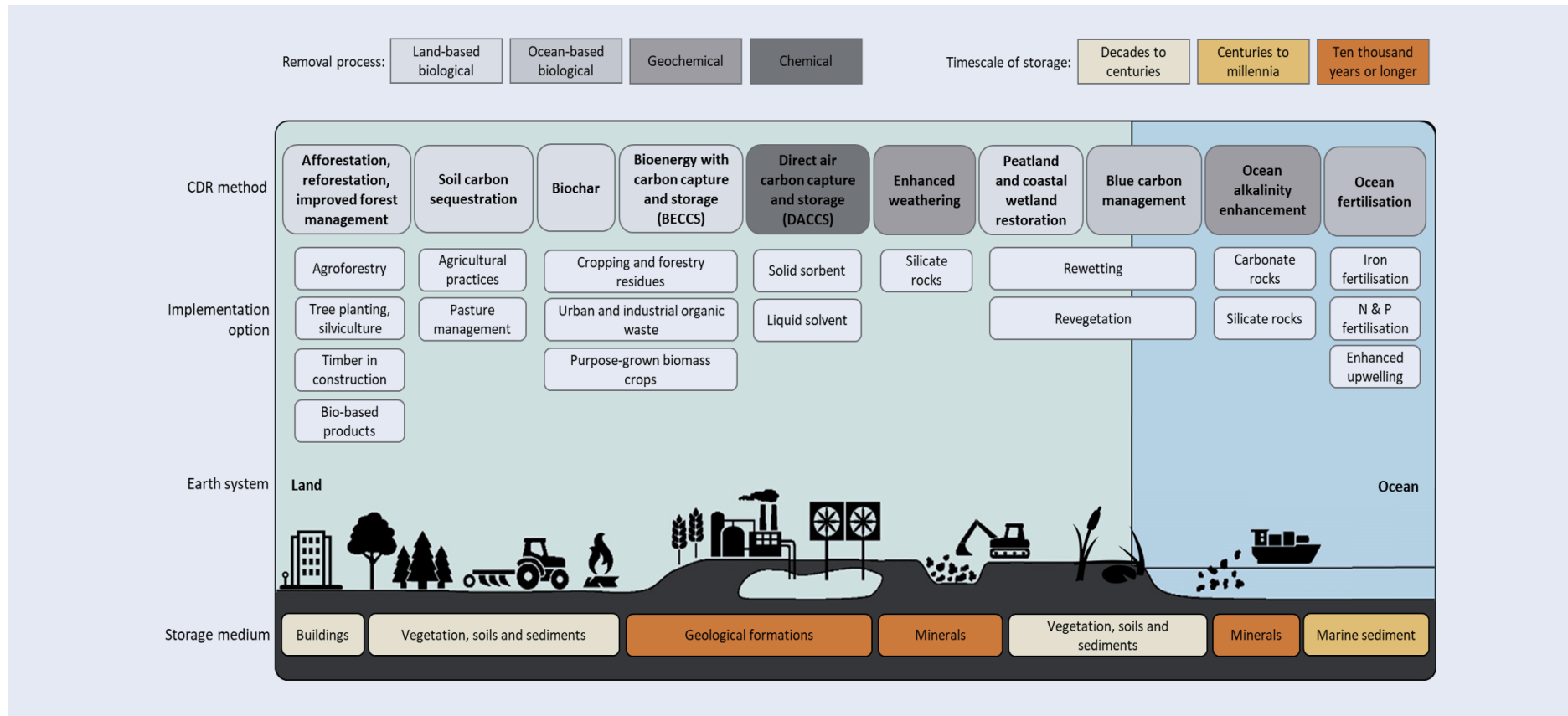
אחסון הפחמן בתהליך זה הוא של עשרות עד מאות אלפי שנים ויש לו פוטנציאל הסרת פחמן מהאטמוספירה בקנה מידה גדול ברמה העולמית. לפיזור מינרלי סיליקט טחונים בקרקעות חקלאיות יש רווח משני לפוריות הקרקע ושיפור היבול. אולם, עלות התהליך עדיין גבוהה והבשלות המדעית עודנה נמוכה, בעיקר עקב אתגרים בניטור ומעקב אחרי גורל הפחמן המקובע. בנוסף, ההשפעות האקולוגיות עדיין אינן ידועות. גישה נוספת היא פיזור חלקיקי הסלע הטחון ישירות במי האוקיינוס כדי להאיץ את האלקליניות במי הים ובכך את יצירת יוני הקרבונט ואת הסרת הפחמן הדו-חמצני מהאטמוספירה במי הים. פוטנציאל ההסרה בשיטות אלה מוערך בכ-3 ג'יגה טונה.

לכידת פחמן ישירה מהאוויר (DAC): לכידת פחמן ישירות מהאוויר היא השיטה המלאכותית הנפוצה ביותר כיום מבין השיטות החדשניות להסרת הפחמן מהאטמוספירה. התהליך מבוצע כשאוויר בא במגע עם מדיה כימית מוצקה או נוזלית שסופחת באופן סלקטיבי את הפחמן הדו־חמצני מהאוויר ומרכזת אותו. זרם הפחמן מוסע לאחר מכן לקיבוע בתצורות גאולוגיות בתת־הקרקע או הים או נלקח לשימוש תעשייתי. לפיכך מפעל DAC חייב להיות סמוך לאתר אחסון פחמן תת־קרקעי או תת־ימי או מחובר לתשתית הולכה לאתר כזה. התהליך צורך כמויות גדולות של אנרגיה, ולכן עלותו כיום גבוהה ויעילותו עודנה נמוכה, מה שמונע הסרת פחמן מהאטמוספירה בקנה מידה נרחב. לצד זאת, בניגוד לגישות מבוססות טבע, DAC איננה דורשת שטחים גדולים וההשפעה האקולוגית שלה זניחה.

כיום קיימים מפעלי DAC מעטים בלבד, במדינות כמו איסלנד וארצות הברית, אך מתוכננים לקום עוד כ־130 מפעלים בשנים הקרובות במקומות שונים בעולם. פיתוח קטליזטורים סופחי פחמן יעילים יותר יכול להוריד במידה ניכרת את העלות האנרגטית של התהליך ולהאיץ את יישום הטכנולוגיה. תהליך הניטור בשיטה זו קל יחסית מאחר שאפשר לעקוב ולדווח על כמות הפחמן שנלכד או אוחסן.

לכידת פחמן ישירה ממי הים: בדומה ללכידת פחמן ישירות מהאוויר, בתהליך זה פחמן דו־חמצני מוצא מהמים בשיטות כימיות או אלקטרוליטיות שונות כמו שיקועו בתאים ייעודיים כקלציום קרבונט והמסתו מחדש לאחר הוצאתו מהמים. היתרון הגדול הוא שריכוז הפחמן הדו־חמצני במי הים גבוה לאין שיעור מריכוזו באוויר, מה שתאורטית יכול להקל את שלב לכידת הפחמן. גם במקרה זה הפחמן שנלכד צריך להיות מועבר לאתר אחסון, ולכן דרושה הקמה של תשתית הולכה פיזית של פחמן דו־חמצני לאתרי אחסון גאולוגיים או לשימוש בתעשיות שונות. גם בשיטה זו תהליך הניטור והמעקב אחר הפחמן שקובע איננו מורכב. ההשפעות האקולוגיות של תהליכים אלו עדיין אינן ברורות.

נספח ב | שיטות להסרת פחמן דו-חמצני



ההשוואה נעשתה בין 19 שיטות שונות להסרת פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה, המחולקות לשיטות טבעיות (משמאל) ולשיטות טכנולוגיות (מימין). האיור משווה בין השיטות לפי שלושה מרכיבים: משך אחסון הפחמן (הנע בין עשורים לבין עשרות אלפי שנים); רמת הבשלות להתרחבות; ופוטנציאל האחסון לנוכח מגבלות פיזיקליות, ביולוגיות וטכנולוגיות (קטן עד גדול) וללא התחשבות בשיקולים כלכליים, חברתיים או פוליטיים. למשל, לייעור יש פוטנציאל רב כי יש שטחי קרקע נרחבים שאפשר לייער, ואילו לדישון אוקיינוסים יש פוטנציאל מועט יותר בשל מגבלות ביולוגיות של המערכת הימית (מקור: IPCC, 2022).