

שיטות לסילוק פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה והערכת הפוטנציאל ליישומן בישראל

ההתמודדות עם שינויי האקלים מחייבת שילוב של שני מאמצים משלימים:
 הפחתת פליטות גזי חממה וסילוק פחמן דו-חמצני שכבר הצטבר באטמוספירה

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 לזיה, פרופ' שלומית פז, פרופ' מליה פישור, פרופ' דניאל רוזנפלד, פרופ' דני רבינוביץ, פרופ' איתן ששינסקי. רכזת הוועדה: ד"ר נירית טופול.

רקע



ריכוז הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה עומד כיום על יותר מ-425 חלקים למיליון, לעומת כ-280 חלקים למיליון לפני תחילת העידן התעשייתי. האנושות פולטת כיום מעל 40 מיליארד טונות פחמן דו-חמצני בשנה. חלק מן הפליטות נספג באוקיינוסים ובצמחייה, אך השאר מצטבר באטמוספירה ותורם להתחממות כדור הארץ. לפי הערכות הפאנל הבין-משלתי לשינויי אקלים (IPCC), כדי לעמוד ביעדי הסכם פריז ולהגביל את ההתחממות העולמית ל-1.5-2 מעלות צלזיוס, יהיה צורך - נוסף על הפחתת הפליטות - להסיר מן האטמוספירה כמה מיליארדי טונות של פחמן דו-חמצני מדי שנה עד אמצע המאה.

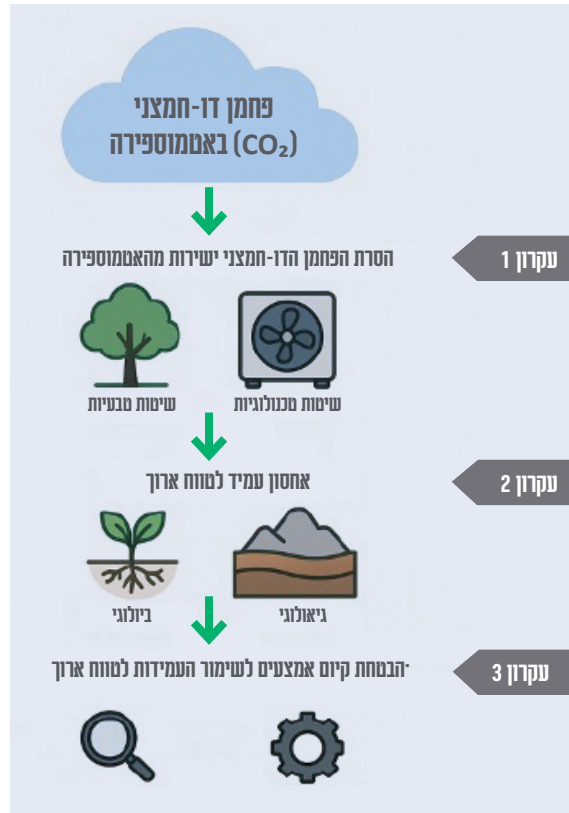
סילוק פחמן (CDR) אינו תחליף להפחתת פליטות, אלא כלי משלים. הוא נחוץ כדי לאזן פליטות מפעילויות ומתעשיות נחוצות, כגון תעשיות כבדות, תחבורה אווירית וחקלאות בשיעור של 7-9 מיליארדי טונה של פחמן דו-חמצני בשנה עד 2050. יש להבחין בין סילוק פחמן מהאטמוספירה, שבה עוסק נייר זה, לבין לכידת פחמן שנפלט ממקורות נקודתיים כגון תחנות כוח או מפעלים (CCS). בעוד CCS מונע פליטות חדשות, שיטות CDR מסירות פחמן שכבר נמצא באטמוספירה.

המסמך המלא באתר באקדמיה.

מהו סילוק פחמן דו-חמצני?



סילוק פחמן מבוסס על שלושה עקרונות מרכזיים: הסרה ישירה של פחמן מן האטמוספירה; אחסון יציב של הפחמן לטווח ארוך - עשרות, מאות ואף אלפי שנים; והבטחת קיום אמצעים לשימור האחסון לטווח ארוך. לשם כך נדרשות מערכות אמינות של ניטור, דיווח ואימות (MRV) המאפשרות למדוד את כמות הפחמן שנלכדה ואת משך אחסונה.



שיטות מרכזיות לסילוק פחמן



השיטות לסילוק פחמן מתחלקות לשיטות המבוססות על תהליכים טבעיים ושיטות המבוססות על טכנולוגיות. השיטות הטבעיות נשענות על תהליכים ביולוגיים המתרחשים במערכות אקולוגיות. לשם דוגמה, נטיעת יערות ושיקום יערות מסייעים לעצים לקלוט פחמן דו-חמצני מן האטמוספירה ולאחסן אותו בגזעים, בשורשים ובקרקע. שיטות חקלאיות מתקדמות יכולות להגביר את אגירת הפחמן בקרקע, ולהגדיל את כמות החומר האורגני בה. גם מערכות אקולוגיות ימיות, כגון ביצות חופיות ושדות עשב ים, מסוגלות לאגור פחמן בתנאים המאיימים את פירוק החומר האורגני. גישה טבעית נוספת מבוססת על שימוש בביומסה צמחית. שאריות חקלאיות או יערניות יכולות להפוך לביו-צ'אר - פחם ביולוגי יציב - בתהליך תרמי, ולאחר מכן להיטמן בקרקע. שיטה זו מאפשרת קיבוע פחמן לטווח ארוך, ובד בבד עשויה לשפר את פוריות הקרקע ואת היכולת לאגור בה מים.

לצד השיטות הטבעיות מתפתחות גם שיטות טכנולוגיות. אחת הבולטות שבהן היא לכידת פחמן ישירה מהאוויר (DAC). בשיטה זו מערכות תעשייתיות שואבות אוויר ומפרידות ממנו פחמן דו-חמצני באמצעות חומרים כימיים. הפחמן המרוכז מועבר לאחר מכן לאחסון בתצורות גאולוגיות עמוקות. שיטות נוספות הן לכידת פחמן ממי הים באמצעים כימיים או אלקטרוכימיים, וכן האצת בליית מינרלים - תהליך שבו מפזרים אבקת סלעים סיליקטיים על קרקעות כדי להאיץ תגובות כימיות הלוכדות פחמן מן האטמוספירה. לשיטות הטכנולוגיות פוטנציאל לאחסון פחמן למשך אלפי שנים, אך רבות מהן עדיין בשלבי פיתוח ועלותן גבוהה יחסית.



עלות הסרת הפחמן תלויה בשיטה שנוקטים. שיטות טבעיות הן בדרך כלל זולות יותר, אך קשה יותר להבטיח בהן אחסון יציב לאורך זמן. לעומת זאת שיטות טכנולוגיות אמינות יותר מבחינת קיבוע ארוך טווח, אך עלותן כיום גבוהה (300-500 דולר לכל טונה, לעומת מחיר מטרה של פחות ממאה דולר לטונה). שוק סילוק הפחמן נמצא כיום בשלבי התפתחות מוקדמים, ורוב הפעילות מתרחשת בשוק וולונטרי שבו חברות גדולות רוכשות שירותי סילוק פחמן כדי לעמוד בהתחייבויות האקלים שלהן.

כדי להגיע להיקפים של מיליארדי טונות של סילוק פחמן בשנה נדרשת מעורבות ממשלתית רחבה, הכוללת רגולציה, תקני דיווח ותמריצים כלכליים. בכל מקרה, דומה שאין פתרון יחיד שיוכל להתמודד לבדו עם אתגר סילוק הפחמן. גישה חיונית שהוצעה במחקר ובמדיניות האקלים היא "אסטרטגיית היתדות", שלפיה שילוב של כמה פתרונות משלימים - טבעיים וטכנולוגיים - זו הדרך היעילה ביותר. כל שיטה תורמת את חלקה למאמץ הכולל, ורק שילובן מאפשר להגיע להיקפים נרחבים של סילוק פחמן. **רבות מן הטכנולוגיות בתחום זה עדיין אינן בשלות ליישום בקנה מידה גדול, ואין בידינו די ידע בנוגע ליעילותן ולהשפעותיהן הסביבתיות. לכן למחקר האקדמי תפקיד מרכזי בפיתוח התחום.**

מחקר ופיתוח הפוטנציאל ליישום בישראל



לישראל יתרונות ייחודיים בפיתוח פתרונות בתחום זה. הקהילה המדעית הפעילה, תעשיית החדשנות המפותחת והחקלאות המתקדמת מאפשרות פיתוח טכנולוגיות חדשות ויישום של פתרונות מקומיים. תשתיות ההתפלה הנרחבות בישראל עשויות לתרום לפיתוח שיטות להסרת פחמן ממי הים. הפעילות המחקרית בתחום סילוק הפחמן מתרחבת גם בישראל, אך קצב הפיתוח מוגבל בשל מחסור במימון, שיתופי פעולה בין תחומיים מצומצמים וקשרים מוגבלים בין האקדמיה לתעשייה. חיזוק התחום מחייב הקמת מרכזי מחקר ייעודיים, גיבוש תוכניות מימון מתאימות ופיתוח מסגרות לשיתוף פעולה בין מוסדות אקדמיים, תעשייה וגופי ממשל.

האפשרויות בעלות הפוטנציאל ליישום בישראל הן: ייצור ביו-צ'אר משאריות חקלאיות, הגדלת אגירת הפחמן בקרקעות חקלאיות, האצת בליית מינרלים בשיטות מכניות, פיתוח טכנולוגיות ללכידת פחמן ממי הים ולכידת פחמן ישירה מהאוויר ואחסונו בתת-הקרקע. מקרה הבוחן של ביו-צ'אר מדגים הן את הפוטנציאל הטמון בפתרונות מסוג זה הן את מגבלותיהם: גם אם כל הפסולת החקלאית בישראל תהפוך לביו-צ'אר, כמות הפחמן שתוסר תהיה קטנה יחסית לכלל הפליטות במדינה (0.8% בלבד). מכאן החשיבות שבשילוב כמה שיטות בד בבד.

תחום מתפתח נוסף הוא **דיפלומטיית פחמן** - שיתוף פעולה בין מדינות בפיתוח וביישום של פתרונות להפחתת פליטות ולסילוק פחמן. ישראל, מדינה בעלת יכולות מדעיות וטכנולוגיות מתקדמות אך שטח מוגבל, עשויה לשמש מוקד ידע אזורי ולשתף פעולה עם מדינות שכנות בעלות שטחים חקלאיים נרחבים יותר.

ההתמודדות עם משבר האקלים מחייבת שילוב של הפחתת פליטות עם פיתוח שיטות לסילוק פחמן מן האטמוספירה. לישראל פוטנציאל רב לתרום לפיתוח ידע וטכנולוגיות בתחום זה, אך מימוש הפוטנציאל מחייב השקעה במחקר ובפיתוח, הקמת מרכזי מחקר בין-תחומיים, פיתוח רגולציה ותמריצים כלכליים וחיזוק שיתופי פעולה. שילוב צעדים אלה יסייע לישראל להשתלב במאמץ הבין-לאומי להתמודדות עם שינויי האקלים ולפתח תחום מדעי וטכנולוגי בעל חשיבות סביבתית וכלכלית.