

תפיסה, שימוש והטמנת פחמן דו-חמצני ככלי לאיפוס פליטות

שרית ברנד-קליבנסקי¹

תפיסת CO₂ במערכות טבעיות ויישום של טכנולוגיות תפיסה, שימוש והטמנת CO₂ מסתמנות כטכנולוגיות הכרחיות במסגרת האסטרטגיה הכוללת לאיפוס פליטות CO₂ ועמידה ביעדי האקלים כמו גם הגברת תהליכים טבעיים הקולטים CO₂. תפיסת ה-CO₂ נעשית ממקורות נקודתיים או מן האוויר הפתוח והוא עובר הטמנה גיאולוגית או נשלח לשימוש בתעשייה המשתמשת בו ליצור חומרים אחרים.

מבוא

בגלל תהליכי נשימה ופירוק, שבסופו וכתלות בתנאים, ה-CO₂ עלול לשוב לאטמוספירה. רמה זו איננה מספיקה לאיפוס הפליטות הנדרש לעמידה ביעדי האקלים, ועל-כן מתחייבות פעולות אקטיביות לתפיסת CO₂.

את הפעולות להסרת CO₂ ניתן לסווג לשתי קבוצות עיקריות (איור 1): (1) הגברה מלאכותית של התהליכים הטבעיים ו-(2) שימוש בתהליכים תעשייתיים לתפיסת CO₂ והרחקתו מהאטמוספירה.

הגברה מלאכותית של תהליכים טבעיים להסרת CO₂ מהאטמוספירה

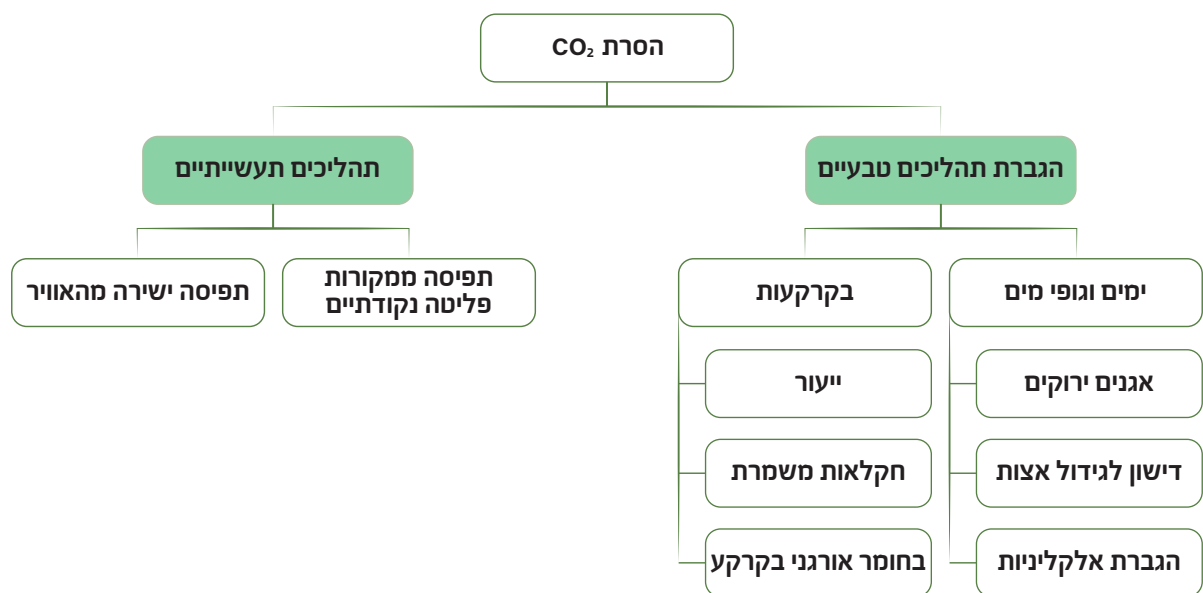
בשנים האחרונות נבחנות שיטות להגברה מלאכותית של התהליכים הטבעיים המסירים CO₂ מהאטמוספירה^{1,4}.

1. שימור יערות ונטיעת יערות חדשים.
2. שיטות חקלאיות משמרות, שמשפרות את קיבוע הפחמן ביבול ובקרקע. פיתוח צמחים מהונדסים גנטית לצריכה מוגברת של CO₂ בתהליך הפוטוסינתזה⁵, הפחתת שיעורי נשימה בצמחים והגברת יעילות המרת ה-CO₂ בצמחים.
3. שימור ויצירת אגנים ירוקים בהם פחמן עובר קיבוע בצמחייה ובחומר האורגני השוקע באגן.
4. קיבוע בים על-ידי דישון לצורך הגברת גידול אצות או על-ידי העלאת האלקליניות להגברת המסת CO₂.

עמידה ביעדי האקלים של הסכם פריז להגבלת ההתחממות הגלובלית אל מתחת 1.5°C עד 2050, מחייבת איפוס פליטות הפחמן עד למחצית המאה. כלומר, את כמות הפחמן הנפלטת לאטמוספירה יש לקזז על-ידי כמות זהה של פחמן שיוסר מהאטמוספירה. התייעלות אנרגטית ומעבר גובר לאנרגיות מתחדשות מביאים להפחתה משמעותית בפליטות CO₂ (גז החממה הדומיננטי ביותר).¹ אולם, ריכוזי ה-CO₂ באטמוספירה עדיין גבוהים: בתחילת 2022 עמדו על 420 מ"ג/ליטר, ובכדי לעמוד ביעדי האקלים יש להפחית את ריכוז ה-CO₂ ל-350 מ"ג/ליטר. יתרה מכך, לפי התחזיות, השימוש בדלקי מאובנים להפקת אנרגיה יוותר משמעותי לפחות בחמישים השנים הבאות², ועל-כן מתחייב טיפול בפליטות. מקור משמעותי נוסף של CO₂ הינו פליטות מתהליכים בתעשיות, שמיצו את כל אפשרויות הפחתת הפליטות שלהן בייעול תהליכי הייצור וייעול הצריכה האנרגטית שלהן, כגון תעשיית המלט, הפלדה והברזל. ייצור מימן מגז טבעי וייצור ביו-דלקים הם מקור משמעותי נוסף של CO₂. מכאן, שלצד המעבר הגובר לאנרגיות מתחדשות, נדרשות פעולות מיידיות ומשמעותיות נוספות להפחתת פליטות CO₂.

פחמן דו-חמצני מוסר מן האטמוספירה על-ידי מערכות טבעיות, המשמשות מְבָלְעִים ל-CO₂, כגון יערות, קרקעות וגופי מים. אולם, רק 30% מה-CO₂ הנפלט מקובע על-ידי המערכות הטבעיות³. יתרה מכך, קיבוע ה-CO₂ על-ידי מערכות אלו הינו לזמן מוגבל

1. ד"ר שרית ברנד-קליבנסקי, יחידת המדען הראשי, משרד האנרגיה והתשתיות

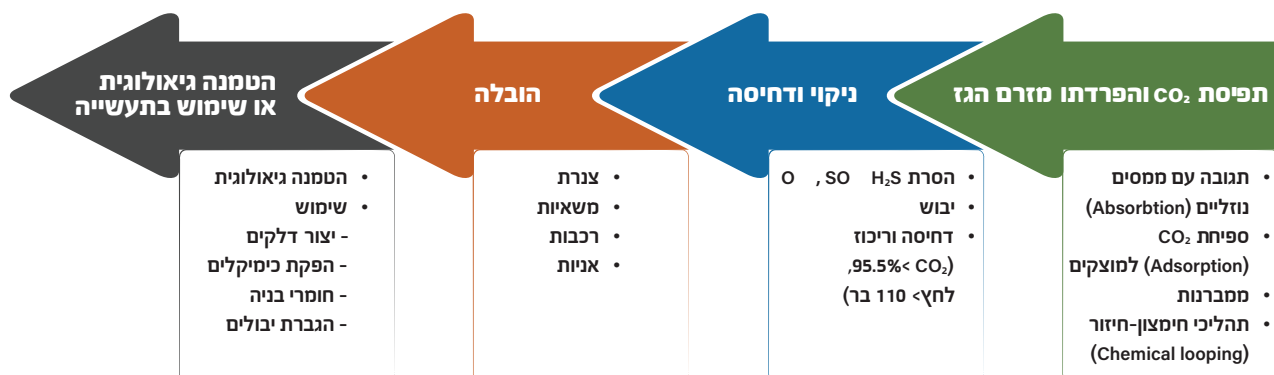


איור 1: התהליכים המרכזיים להסרת CO₂ מהאטמוספירה

תהליכים תעשייתיים להסרת CO₂ מהאטמוספירה

התהליך התעשייתי להסרת CO₂ מהאטמוספירה כולל טכנולוגיות לתפיסת CO₂ הנפלט מהתעשייה ממקורות פליטה תעשייתיים נקודתיים (כגון, מפעלים, תחנות כח ובתי זיקוק) וסילוקו מהאטמוספירה לצמיתות. התהליך כולל מספר שלבים הכרחיים, המוצגים באיור 2. בשלב ראשון ה-CO₂ מזרם הגז הנפלט מהמקור מופרד ונתפס באמצעות טכנולוגיות ייעודיות. לאחר ניקוי ודחיסת זרם ה-CO₂ (שלב 2), מובל ה-CO₂ (שלב 3) אל אתר הטמנה גיאולוגי או למפעל המשתמש בו כחומר גלם לייצור מגוון מוצרים בעלי ערך (שלב 4).

על אף היתרון הגדול שבשימוש בתהליכים טבעיים להסרת פחמן מהאטמוספירה, להגברת תהליכים אלו מספר חסרונות שחשוב לתת עליהם את הדעת. ראשית, הפחמן במערכות הטבעיות אגור לזמן מוגבל, בסופו וכתלות בתנאים הוא עלול להשתחרר חזרה לאטמוספירה. שנית, מרבית השיטות נדרשות לשטח רב, בפרט כשרוצים להבטיח קיבוע כמויות משמעותיות של פחמן. לבסוף, שימוש גובר בשיטות אלו מחייב בחינה מעמיקה של ההשפעות האקולוגיות הצפויות מההתערבות בתהליכים הטבעיים. למשל, סביר ששינוי מאזן הנוטריינטים בים, זמינות הפחמן והאלקליניות ישפיעו על המערכת האקולוגית הימית.



איור 2: השלבים המרכזיים בהסרה תעשייתית של CO₂ מהאטמוספירה



טכנולוגיות תפיסת CO₂ ממקורות נקודתיים

טכנולוגיות תעשייתיות לתפיסת CO₂ ישירות מזרם הגז הנפלט מתהליכי שריפה וייצור תעשייתיים (מקורות נקודתיים) כוללות תגובות כימיות או פיסיקליות, שמסירות את ה-CO₂ מזרם הגז הנפלט במקום פליטתו (למשל אחבה) לקבלת זרם נקי של CO₂. הן כוללות ארבע קטגוריות מרכזיות^{7,6}

1. **תגובה עם ממסים נוזליים (absorbption):** תפיסת ה-CO₂ מתבצעת על-ידי הגבת זרם הגז הנפלט עם ממסים נוזליים, בעיקר תרכובות אמיניות. התהליך מבוסס על הזרמת הגז הנפלט דרך עמודה המכילה ממס, שמגיב עם ה-CO₂ ליצירת קומפלקס כימי של CO₂ עם הממס. כאשר הממס בעמודה רווי ב-CO₂, מועבר הקומפלקס דרך עמודה נוספת בה חימום לטמפרטורה של 100-120°C מביא לשבירת הקשר בין ה-CO₂ והממס ולקבלת זרם נקי של CO₂. תגובה עם ממסים נוזליים היא הטכנולוגיה הבשלה ביותר, שפועלת כיום באופן מסחרי, ומאפשרת תפיסת כמויות גדולות של CO₂ גם בלחץ חלקי נמוך של CO₂. אולם, לתהליך זה נדרשות כמויות גדולות של ממס והשקעה של אנרגיה רבה בשל הטמפרטורה הגבוהה הנדרשת לשבירת הקשר הכימי בין ה-CO₂ והממס. על-כן, מדובר בטכנולוגיה, שעל אף בשלותה, היא עדיין יקרה למדי. המחקר והפיתוח מתמקד כיום בפיתוח ממסים יעילים, זולים ובעלי קיבולת גבוהה ל-CO₂ במקביל ליעול הצריכה האנרגטית של התהליכים. חלק מן הממסים מוחזרים לתהליך וחלקם מטופלים באופן מבוקר כפסולת כימית.

2. **ספיחת CO₂ (adsorption):** למוצקים: בתהליך זה ה-CO₂ מזרם הגז נספח אל פני השטח של מוצקים, כגון תחמוצות נתרן ואשלגן, [זאוליט](#), קרבונטים או תרכובות מתכתיות ואורגניות. בשימוש בסופחים מוצקים האנרגיה הנדרשת נמוכה יותר בהשוואה לאנרגיה הנדרשת בתהליכים המשתמשים בממסים נוזליים. המחקר כיום מתמקד בפיתוח סופחים זולים, עמידים, בעלי סלקטיביות גבוהה, קיבולת ספיחת CO₂ גבוהה ויכולת לעבור פחזורי השבה מרובים. פיתוח השימוש בסופח המוצק עם ה-CO₂ למשל כחומר בניה נמצא בראשיתו.

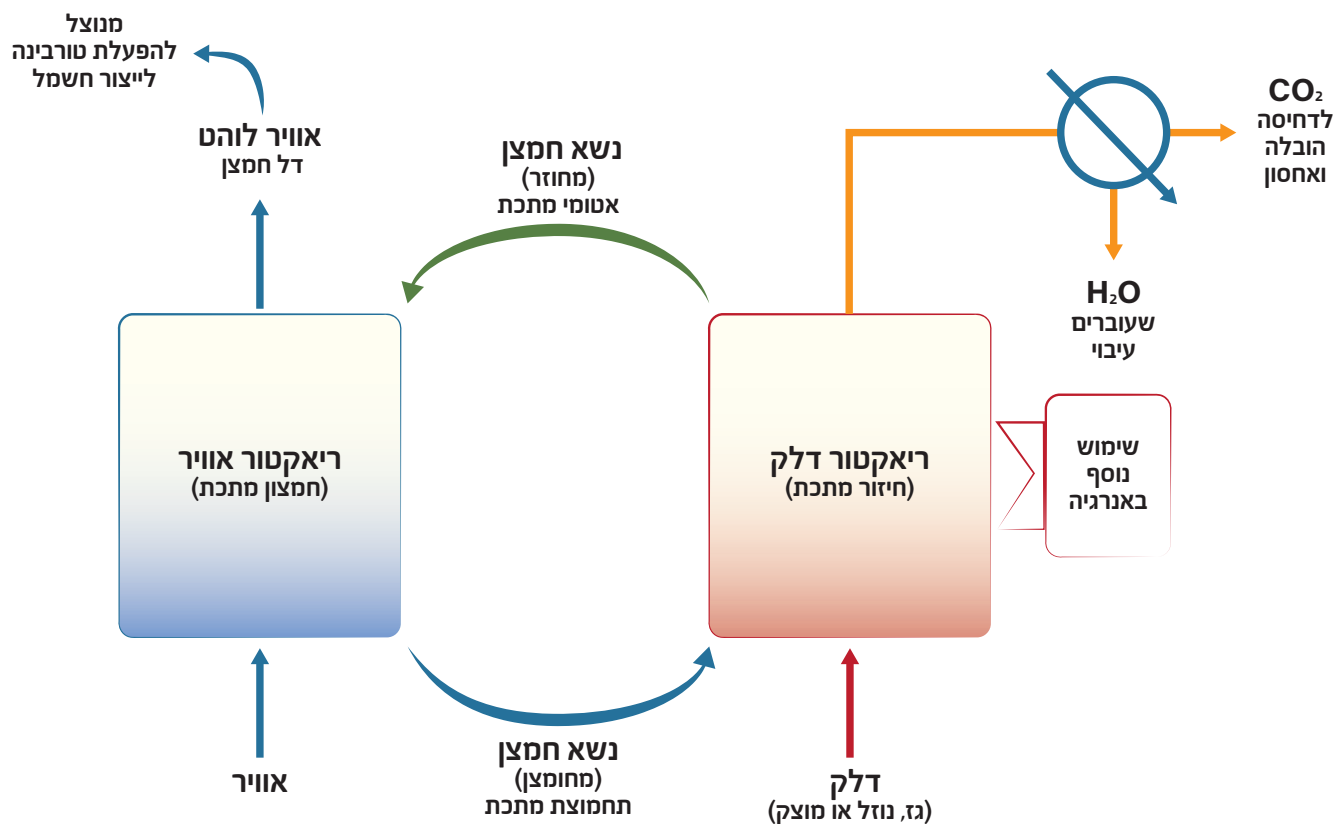
3. **ממברנות:** תפיסת CO₂ מתבצעת באמצעות ממברנה חדירה או חדירה למחצה, תוך הפעלת כוח מניע, כגון הפרשי לחצים, הפרשי טמפרטורות או פוטנציאל חשמלי, משני צדי

הממברנה, שמביא להפרדת ה-CO₂ מזרם הגז הנפלט, כך שגז אחד חודר את הממברנה מהר יותר מהאחר. הממברנות הנפוצות כיום הן אורגניות, והן מגוונות ביותר במבנה הפיסיקלי שלהן ובחומרים מהם הן עשויות.⁸ בממברנות הקיימות כיום הסלקטיביות ל-CO₂ עדיין איננה יעילה מספיק, ונחוץ מחקר נרחב להפיכתן לטכנולוגיה שימושית וכלכלית לתפיסת CO₂.

4. **תהליכי חימצון-חיזור (Chemical looping):** שיטה זו משמשת להפקת אנרגיה על-ידי שריפת דלק בנוכחות חמצן נקי במקום אוויר, המביאה לפליטת זרם מרוכז ונקי של CO₂ (95%) ומים שעוברים עיבוי. חמצן מוכנס למערכת באמצעות מעגלי חיזור-חימצון של נפשא חמצן שהוא תחמוצת מתכת שעוברת בין שני ראקטורים: ראקטור אחד מכיל אוויר (Oxidiser), והשני מכיל את הדלק (reducer). נשא החמצן מעביר חמצן מראקטור האוויר לראקטור הדלק שם הוא עובר חיזור וחוזר לראקטור האוויר למעגל נוסף. למשל, עבור שריפת מתאן (Me מסמל מתכת) $CH_4 + 4MeO \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 4Me$ בשיטה זו ניתן גם להגיב את ה-CO₂ עם CaO ליצירת סינן פחמתי, CaCO₃, אותו ניתן להפריד בקלות מזרם הגז. הסינן הפחמתי יכול לשמש בתעשיית חומרי הבנייה, או למחזר אותו על-ידי הגבתו עם חמצן בראקטור בטמפרטורות גבוהות (מעל 800°C), וכך לאפשר תפיסת CO₂ נוסף.⁵ (איור 3)

הטכנולוגיות, שפורטו לעיל, משמשות לתפיסת CO₂ מזרם גז הנפלט ממקורות פליטה נקודתיים. בשנים האחרונות שוקדות מספר חברות על התאמת טכנולוגיות אלו לתפיסת CO₂ ישירות מהאוויר הפתוח ללא תלות במקור ובזמן פליטת ה-CO₂. תפיסת ה-CO₂ מתבצעת ישירות מהאטמוספירה על-ידי סחרור אוויר דרך פילטרים תוך שימוש בכימיקלים או מוצקים הקושרים אליהם את ה-CO₂ (למשל תגובה עם ממסים או ספיחה פיסיקלית למוצקים)^{9,7}, אולם, ריכוזי ה-CO₂ באוויר הפתוח נמוכים (פחות מ-1%), ולכן מחייבים השקעת אנרגיה רבה ושימוש בכמויות גדולות של מים, אשר מייקרים מאוד את תהליך התפיסה.^{9,4}

זרם ה-CO₂, שמתקבל באחת מהטכנולוגיות לעיל, עובר ניקוי, ייבוש ודחיסה למצב נוזלי, המאפשר הובלתו אל אתרי הטמנה



איור 3: תיאור תהליך לכידת CO₂ בטכנולוגיית Chemical Looping (תהליכי חימצון חיזור)

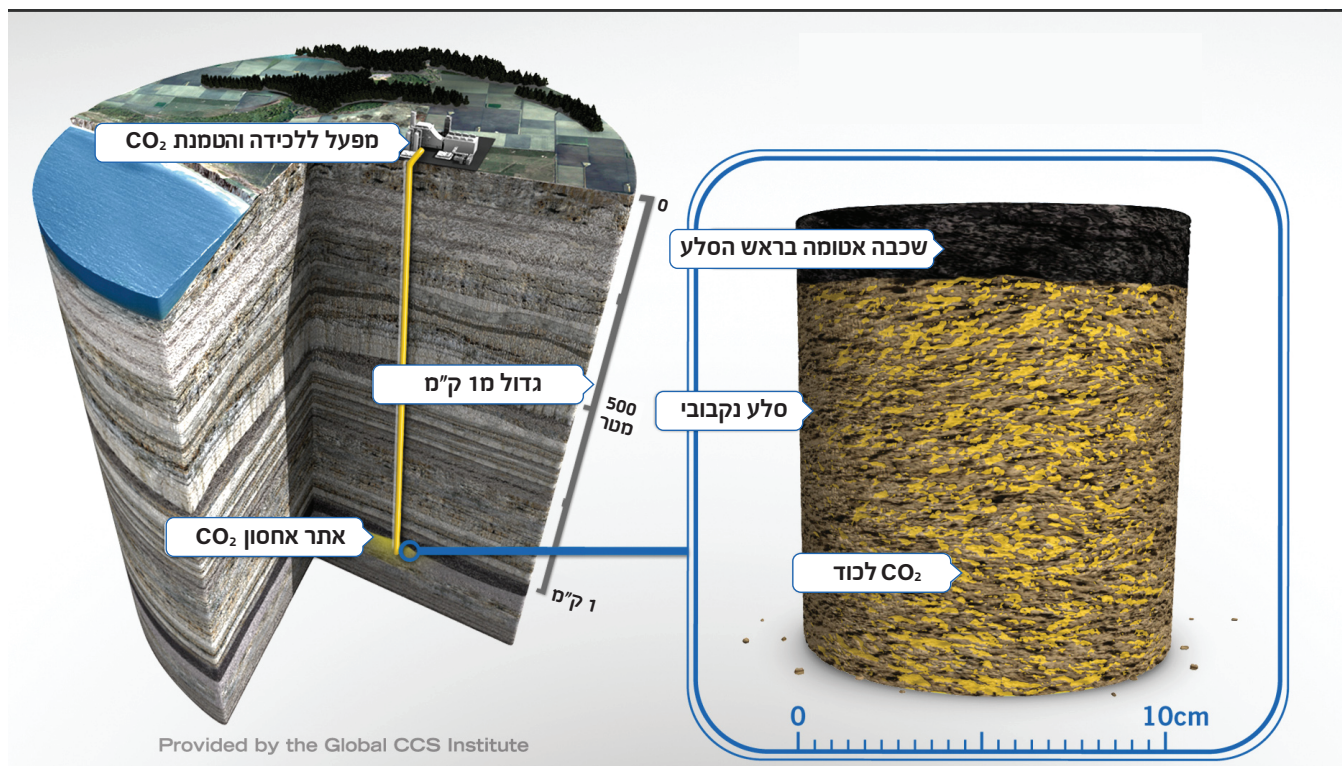
האתר לא נפגעים, יש צורך בניטור מתמיד של ה-CO₂ ושל המאפיינים הגיאולוגיים של אתר ההטמנה.⁷ (איור 4)

עד היום, הוטמנו בהצלחה ברחבי העולם כ-200 מיליון טון CO₂. החדרת CO₂ למאגרי גז ונפט מרוקנים מתבצעת מתחילת שנות השבעים של המאה הקודמת לצורך הגברת כמות הנפט המופקת מהמאגר. על פי הערכות, קיימים בעולם מעל 12,000 מיליארד טון של מאגרי הטמנה פוטנציאליים ל-CO₂, אשר יכולים לענות על דרישות תפיסת והטמנת ה-CO₂ הנחוצות לעמידה ביעדי האקלים, מרביתם (98%) באקוויפרים מלוחים.⁹ על פי ההערכות של הפאנל הבינלאומי לשינויי אקלים מ-2018, בכדי לעמוד ביעדי האקלים נדרש להטמין עד שנת 2100 1200 Gt CO₂.

גיאולוגיים או למפעלים בהם הוא משמש חומר גלם לייצור מוצרים. ההובלה מתבצעת באמצעות צנרת, משאיות או אניות, כתלות במרחק הנסיעה מהאתר בו נתפס ה-CO₂ אל אתר ההטמנה או המפעל.

הטמנה גיאולוגית של CO₂

הטמנה גיאולוגית של CO₂ מהווה מרכיב הכרחי בהרחקתו מן האטמוספירה לצמיתות אתרים פוטנציאליים להטמנה גיאולוגית של CO₂ נמצאים באקוויפרים עמוקים (מעל 800 מ'), בעלי נקבוביות וחדירות מתאימים, ללא סדקים או העתקים המבטיחים שה-CO₂ יישאר במצבו הדחוס, ומעל שכבת סלע או שכבה אוטמת למניעת בריחת ה-CO₂ מתת-הקרקע אל האטמוספירה.⁹ בכדי לוודא שה-CO₂ אינו דולף מאתר ההטמנה וששלמות ומבנה



איור 4: המחשה של אתר הטמנה גיאולוגית של CO₂

שעשויה להגיע עד 50% ממסת הפולימר. למשל, פולימר המכיל 20% CO₂ משקלית מביא להפחתת של 15% בפליטות CO₂ בהשוואה לתהליך הייצור הקונבנציונלי. בנוסף, ייצור פולימרים מ-CO₂ יכול להיות תחרותי בשל האנרגיה הנמוכה יחסית הנחוצה לייצורו וערך השוק הגבוה של הפולימרים.

3. **חומרי בנייה מ-CO₂**: CO₂ יכול לשמש כחלופה למים המשמשים בייצור המלט או ליצירת קרבונט שמרכיב את המלט (על-ידי הגבת ה-CO₂ עם סידן או מגנזיום). טכנולוגיות אלו בשלות ומבטיחות חומרים אלה מהווים מְבָלַע משמעותי ל-CO₂ היות והם מיוצרים מכמויות גדולות של CO₂ שמקובע למשך זמן רב. אולם, ייצורם עדיין יקר באופן משמעותי בהשוואה לייצור הקונבנציונלי (מסלעים או מחול).¹⁰ יתר-על-כן, רגולציות ותקנים של מוצרי בנייה המיוצרים מ-CO₂ מעכבים את היישום, היות ועדכון התקנים עשוי לקחת זמן רב, ונדרשים ניסויים רבי שנים בכדי להוכיח ביצועים בטוחים וידידותיים לסביבה.¹⁰

טכנולוגיות שימוש ב-CO₂

כחלופה להטמנה גיאולוגית של CO₂ בתת הקרקע, ניתן להשתמש ב-CO₂ כחומר גלם לייצור מגוון רחב של מוצרים, אשר ימשיכו להזדקק לפחמן:

1. **ייצור דלקים**: הפחמן ב-CO₂ בשילוב מימן יכול לשמש לייצור פחממנים המשמשים לייצור דלקים, כגון מתאן, מתנול, בנזין ודלק מטוסים. דלקים מבוססי CO₂ חשובים במיוחד עבור יישומים בהם השימוש במקורות אנרגיה דלי פחמן אחרים (כגון חשמל או מימן) הוא מאתגר מאוד (כגון דלקי מטוסים). עם זאת, דלקים מבוססי CO₂ מהווים אמצעי הפתחה זמניים בלבד, ועלויות הייצור שלהם גבוהות בהשוואה לדלקים.¹⁰
2. **כימיקלים**: הפחמן ב-CO₂ יכול לשמש כחלופה לדלקי-מאובנים בייצור כימיקלים, פולימרים, קרבונטים, פלסטיק וגומי. למשל, את המתנול המיוצר מה-CO₂ ניתן להמיר לכימיקלים, כגון **אלקנים** שמשמשים לייצור פלסטיק, או לחומרים ארומטיים, המשמשים בתעשיית ההגיינה ובייצור ועיבוד מזון. בייצור פולימרים ניתן להטמיע CO₂ בכמות



יותר וכלכליים יותר ל- CO_2 הדבר יניע ויצדיק כלכלית יישום נרחב יותר של טכנולוגיות תפיסת CO_2 . העניין הגלובלי הרב בשימוש ב- CO_2 לייצור דלקים, כימיקלים וחומרי בניה משתקף בהעלאת התמיכה של מדינות, תעשייה ומשקיעים המתבטאת בהשקעת הון פרטי בסטרטאפים המשתמשים ב- CO_2 בסך של 1 מילארד דולר בקירוב במהלך העשור האחרון.¹⁰

לסיכום

טכנולוגיות תפיסה, שימוש והטמנת CO_2 מסתמנות כטכנולוגיות הכרחיות במסגרת האסטרטגיה המכללת לאיפוס פליטות CO_2 ועמידה ביעדי האקלים. תפקידן המרכזי הוא בקיצוץ חריגות מיעדי ההפחתה שנקבעו, בפרט בתעשיות עבורן אין פתרונות אחרים. טכנולוגיות תפיסת פחמן קיימות עשורים כחלק מובנה מתהליכי ייצור תעשייתיים, שמחייבים הפרדה והסרה של ה- CO_2 (כגון עיבוד גז טבעי וייצור דשני אוריה). אולם, על אף ההתקדמות הרבה בפיתוח טכנולוגיות תפיסת ה- CO_2 , יישום נרחב יותר שלהן עדיין מוגבל בשל העלויות הגבוהות. ההתקדמות במאמצי תפיסת ה- CO_2 והאופטימיזציה של הטכנולוגיות באמצעות לימוד וניסיון צפויים להוביל להוזלת העלויות, וכפועל יוצא מכך להרחיב את יישום טכנולוגיות התפיסה. אולם, בכדי להרחיב את היישום נחוצים גם תמריצים פיננסיים משמעותיים, רווחים ממכירת ה- CO_2 לשימושים תעשייתיים ומדיניות שתצדיק השקעות אלו (כגון, קביעת יעדי פליטת CO_2 ומס פחמן).

4. **הגברת יבולים:** CO_2 משמש לייצור דשנים, כגון אוריה. בנוסף, ניתן להשתמש ב- CO_2 לצורך הגברת תהליכים ביולוגיים, כגון גידול אצות או יבולים בחממות. לשימוש ב- CO_2 בחממות תעשייתיות יתרון רב בהעלאת היבולים (ב-25%-30%). נוסף על כך, האצות או הצמחייה עשויה לשמש להפקת אנרגיה או ייצור דלקים ביולוגיים, ובכך להוות מקור אנרגיה חלופי לדלקי-מאובנים, ובלבד שהתהליכים משולבים עם תפיסת הפחמן.

כיום, הצריכה השנתית הגלובלית של CO_2 קטנה יחסית, והיא עומדת על כ-230 מיליון טון CO_2 בשנה. הצרכן הגדול ביותר כיום של CO_2 הוא תעשיית הדשנים, שבה CO_2 130 Mt משמשים לייצור אוריה.^{7,10} על פי ההערכות, עד שנת 2060 השימוש ב- CO_2 צפוי לעלות ל-250 Mt CO_2 לשנה.¹⁰ מכאן, שנכון לעכשיו, השימוש ב- CO_2 אינו יכול לשמש לבדו כאמצעי להפחתת הפליטות המשמעותיות של ה- CO_2 , אלא מהווה השלמה להטמנת CO_2 . בפרט במקומות בהם הטמנת ה- CO_2 מוגבלת. עם זאת, ניתן לפתח את השוק העתידי ל- CO_2 כחומר גלם במיוחד לייצור דלקים בשל השוק הגדול שלהם, ולחומרי בניה בשל דרישות האנרגיה הנמוכות והקיבוע לתמיד של ה- CO_2 במוצר.⁰¹

בטווח הארוך, שימוש גובר ב- CO_2 יכול למלא תפקיד מרכזי בקיום כלכלה מעגלית ומאופסת פליטות - ככל שימצאו שימושים רבים

מקורות

- 1 IPCC, (2021): [Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change](#). Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:[10.1017/9781009157896](#).
- 2 IEA (2021), [World Energy Outlook 2021](#), IEA, Paris, License: CC BY 4.0.
- 3 Keenam, T.F. and C. A. Williams, (2018). The Terrestrial Carbon Sink. *Annual Review of Environment and Resources*. 43, 219-243.



- 4 IPCC, (2018): *Global Warming of 1.5°C. An IPCC - [Special Report](#)* on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 616 pp.
- 5 Adamu, A., f. Russo-Abegao and K. Boodhoo. (2020). Process intensification technologies for CO₂ capture and conversion – a review. *BMC Chemical Engineering*. 2, 2.
- 6 Garcia, J.A., M, Villen-Guzman, J. M. Rodriguez-Maroto, and J. M. Paz-Garcia. (2022). Technical analysis of CO₂ capture pathways and technologies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 10, 1-17.
- 7 NARUC (National Association of Regulatory Utility Commissioners). (2018). Carbon Capture, Utilization, and Storage: Technology and Policy Status and Opportunities. 92 p.
- 8 Dziejarski, B., R. Krzyzyska, and K. Andersson. (2023). Current status of carbon capture, utilization, and storage technology in the global economy: A survey of technical assessment. *Fuel*. 342, 1-37.
- 9 Global CCS Institute, (2020). [Global Status of CCS: 2020. Australia](#).
- 10 IEA (International Energy Agency), (2019). [Putting CO₂ to use: Creating value from emissions](#).



מן המאמר אל שדה ההוראה

המאמר עוסק בחשיבות ההפחתה של פליטת CO_2 , לרבות הדרכים והטכנולוגיות שבאמצעותן אפשר ללכוד את הגז ולהפחית את ריכוזו באטמוספירה. אפחות זה יסייע בהאטת תהליכי ההתחממות כחלק מהמאמץ לאפס את הפליטה ולעצור את ההתחממות.

יש כמה הזדמנויות לטפל בתהליכי ספיחה וקליטה של CO_2 :

- א. בכל שכבות הגיל, בעת העיסוק בבתי הספר בנושא שינוי האקלים.
- ב. בשילוב נושאי הלימוד הבאים בשיעורי מדע וטכנולוגיה:
 - כיתה ז' - הרכב האוויר ותכונות הגזים המרכזיים שבו (במסגרת נושא "חומרים"), מאפייני חיים וצרכים חיוניים של יצורים חיים (בנושא הביולוגיה).
 - כיתה ח' - יחסי גומלין בין יצורים חיים (ביולוגיה).
 - כיתה ט' - תהליכים כימיים המלווים בשינוי אנרגיה (כימיה), תהליכים בתא והזנה בצמחים (ביולוגיה).

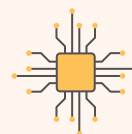
אבחון מוקדם של ידע הלומדים

התלמידים מגיעים לכיתה לאחר ששמעו על שינוי האקלים בלימודים קודמים, בבית ובתקשורת. לפיכך חשוב תחילה לבדוק את המודעות של התלמידים לקשר שבין ריכוז הגז CO_2 באטמוספירה לבין תופעת ההתחממות הגלובלית ושינוי האקלים, ולבצע אבחון מוקדם של היקף הידע של הלומדים.

אפשר לעשות זאת באמצעות לוח שיתופי, כמו פדלט, שבו אפשר:

1. לקיים סיעור מוחות סביב שם הגז. למיין את המילים או הרעיונות שיעלו בסיעור המוחות ולקבץ אותם לפי קטגוריות. אחר כך, לבקש מהתלמידים לנסח שאלות שהתשובות להן אינן ידועות להם ביחס לכל אחת מן הקטגוריות ולצאת לחקירה כדי לענות יחד או בקבוצות על השאלות.
2. לחשוף ידע באמצעות מענה למספר שאלות בנושאים רלבנטיים, כמו: התהליכים שבהם נפלט CO_2 לאטמוספירה; המקורות המרכזיים לפליטת CO_2 ; תהליכים שבהם נקלט CO_2 מן האטמוספירה; הגורמים הקולטים או הסופחים CO_2 מהאטמוספירה; הקשר בין CO_2 להתחממות כדור הארץ; השינויים שקורים והסכנות הצפויות מהתחממות האטמוספירה; דרכי הפעולה לעצירת ההתחממות ועוד.

את האבחון המוקדם אפשר לבצע גם באמצעות טופס שיתופי או בעזרת הפעילות "[מושג בפינה](#)".





למידה אודות איפוס פליטות נטו של CO₂

1. דיון בשאלה "למה הכוונה באיפוס הפליטות נטו של CO₂ כדי לפעול לעצירת ההתחממות הגלובלית"; הבהרת ה"משוואה":

$$\text{כמות ה- CO}_2 \text{ שנפלטת} = \text{כמות ה- CO}_2 \text{ שנקלטת}$$

תפיסה שגויה של תלמידים היא כי אפשר לעצור לחלוטין את פליטת ה-CO₂. לפיכך חשוב להבהיר שיש מערכות בתעשייה שתמשכנה לפעול באמצעות שריפת דלקים ושישנם תהליכים טבעיים, כמו נשימה תאית, תהליכי פירוק של חומר אורגני על ידי מיקרואורגניזמים, שריפות והרי געש שפולטים גז זה.

2. דרכים להפחתת פליטת ה-CO₂ לאטמוספירה

א. הציפו עם התלמידים את הדרכים להפחתת פליטת ה-CO₂. באמצעות [הסרטון](#) של המשרד להגנת הסביבה וכן נתונים ומידע מתוך מאמריהם של [ד"ר חיים חביב](#) ו-[ד"ר ליאורה ביאלר](#) בגיליון 36-37 של "קריאת ביניים".

ב. בררו עם התלמידים אילו הרגלי התנהגות הם יכולים לאמץ כדי להפחית את תרומתם האישית בחיי היומיום לפליטת CO₂, ועודדו אותם לפתח תוכנית לאימוץ התנהגויות אלו. תוכלו להיעזר בתרשים שבמאמר "דברו איתי במספרים" בגיליון זה. כדאי להיעזר בעקרונות שינוי התנהגות של הפסיכולוגיה הקוגניטיבית ההתנהגותית, ולפעול לפי השלבים הבאים:



מאמץ משותף במקביל של תלמידים לשינוי התנהגות מוסיף ממד תחרותי ומשפר את סיכויי ההתמדה

3. תהליכים הקולטים CO₂ מהאטמוספירה

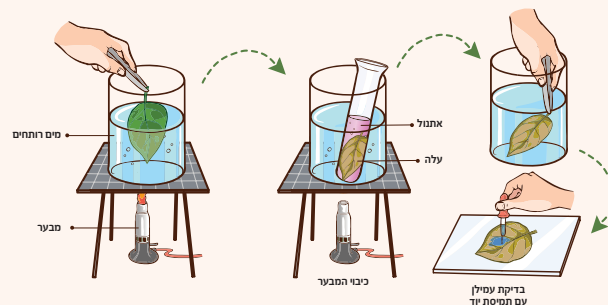
לצורך לימוד תהליכים טבעיים לקליטת CO₂ - היעזרו באיור 1 במאמר זה.

חשיבות תהליך הפוטוסינתזה לקליטת ה-CO₂

תלמידים שמעו פעמים רבות על הקשר שבין תהליך הפוטוסינתזה לבין קליטת ה-CO₂. ביצוע מספר ניסויים בנושא הפוטוסינתזה בעת לימוד נושא "ההזנה" בכיתה ט' יסייע לבסס הבנה זו:

א. הורידו [עותק](#) של הנחיות למעבדה ובחרו בחלק שבו בודקים את השפעת היעדר ה-CO₂ על הצטברות עמילן בעלה.

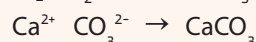
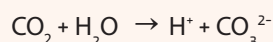




ב. בצעו יחד עם התלמידים בדיקה של ריכוז CO_2 באמצעות חיישן CO_2 במכל אטום שבו גדל צמח. יש להקפיד על איטום טוב ועל תאורה מתמדת.

תהליכים כימיים וביוגניים של קיבוע פחמן בים ובסלעי משקע

תלמידים פחות מכירים תהליכים אלה, ואפשר ללמד אותם על יצירת שלד גירני CaCO_3 ופירוקו ושיקועם של יצורים אלה לקרקעית ליצירת סלע גיר כסוג של תגובה כימית:



אפשר להדגים תופעה זו על ידי תגובה בין מי סיד צלולים ל- CO_2 נשוף והבחנה בעכירות.

חשוב לדון עם התלמידים בשאלות הבאות:

- אם ישנם תהליכים טבעיים המסלקים CO_2 מהאטמוספירה, מדוע ריכוז הגז באטמוספירה ממשיך לעלות?
- מה אפשר לעשות כדי להגביר את קליטת ה- CO_2 בתהליכים טבעיים?
- אילו פרויקטים של פירוא (Rewilding), שיקום הטבע במקומות שבהם הוא נפגע בעקבות פיתוח, חקלאות או זיהום) מפותחים בישראל?

תהליכים טכנולוגיים

חלק גדול מן המאמץ עוסק בתהליכים הטכנולוגיים לסילוק CO_2 ממקומות פליטתו או מן האוויר החופשי. היעזרו באיור 2 כדי להכיר את השלבים המרכזיים בתהליך זה.

היעזרו בסרטונים הבאים (באנגלית) כדי להכיר את תהליך לכידת הפחמן ואחסונו:

1. [פליטת גזי חממה](#) (התרגום לעברית באדיבות מכון דוידסון לחינוך מדעי)
2. [Carbon Capture Technology Explained](#) - ביל גייטס
3. [How does Carbon Capture & Storage work?](#)
4. [Carbon Capture Technology Explained](#) - בקולומביה הבריטית
5. [Carbon capture- How does it work?](#) - חברת HumberZero
6. מידע נוסף תמצאו במאמר בעיתון [אזוריקה](#).

