



לכידה ושימוש חוזר בפחמן דו-חמצני

Caleb M. Woodall^{1*}, Isabella Piccione¹, Michela Benazzi¹, Jennifer Wilcox²

¹המחלקה להנדסה כימית, מכון פוליטכני וורצ'סטר, וורצ'סטר, מסצ'וסטס, ארצות הברית
²המחלקה להנדסה כימית וביו-מולקולרית, בית הספר להנדסה ולמדע יישומי, אוניברסיטת פנסילבניה, פילדלפיה, פנסילבניה, ארצות הברית

סוקרת צעירה

MARTA
גיל: 14



בתוך פני השטח של כדור הארץ ישנם מיליארדי טונות של סלעים המכילים מינרלים שמגיבים עם פחמן דו-חמצני (CO₂) – גז חממה בעל השלכות מזיקות על אקלים כדור הארץ. המינרלים האלה מגיבים עם פחמן דו-חמצני באוויר במהלך אלפי שנים, ובכך ממירים את הגז למינרלים פחמתיים חדשים המאוחסנים באופן קבוע כמוצקים. כיום, כשהאנושות מפתחת פתרונות במטרה להילחם בהשפעות המזיקות של עודף פחמן דו-חמצני באטמוספירה, התהליכים שמתרחשים על ידי המינרלים הריאקטיביים האלה יכולים לייצר הזדמנות יקרת-ערך. אחד האתגרים הוא האצת התגובות כך שיתרחשו בתוך ימים (או שבועות), במקום במשך אלפי שנים. פתרונות אקלים כאלה הם עדיין חדשים, ונדרשים מוחות צעירים ונלהבים נוספים כדי לקדםם, כך שהאקלים שלנו יתאים גם עבור הדורות הבאים!

מדוע פחמן דו-חמצני מזיק, ומה ניתן לעשות בעניין?

מאז שנות ה-80 המאוחרות של המאה ה-19, השתמשנו בדלקי מאובנים כמקור האנרגיה העיקרי שלנו. דלקי מאובנים כוללים פחם, נפט וגז טבעי. אומנם דלקים אלה מספקים

לנו הרבה אנרגיה, אך בד בבד כמותם מוגבלת, והם פולטים פחמן דו-חמצני כשאנו שורפים אותם. שחרור פחמן דו-חמצני לאטמוספירה גורם לשינויים בלתי רצויים באקלים כדור הארץ.

ישנן כמה דרכים להפחית את כמות הפחמן הדו-חמצני שנפלטת לאטמוספירה של כדור הארץ. גישה אחת היא החלפת אנרגיה של דלקי מאובנים באנרגיה מתחדשת, כמו אנרגיית שמש ואנרגיית רוח, אשר אינן פולטות פחמן דו-חמצני. גישה אחרת היא להשתמש בטכנולוגיות יעילות אנרגטית שדורשות פחות אנרגיה, כמו למשל רכבים חשמליים ונורות לד. אולם, חלק מפליטות הפחמן הדו-חמצני הן בלתי נמנעות וזכו לכינוי "פליטות שקשה להימנע מהן". הן שכיחות בתהליכים תעשייתיים, כמו אלה שמייצרים מלט, ברזל ופלדה. מאחר שמוצרים אלה הכרחיים לבניית כבישים, גשרים ובניינים, חשוב למצוא דרכים להימנע מהפליטות שנגרמות עקב ייצורם. זה המקום שבו **לכידת פחמן** נכנסת לתמונה!

לכידת פחמן פועלת בדיוק כפי שהיא נשמעת: טכנולוגיות ש"לוכדות" פחמן דו-חמצני ממקורות פליטה. ישנן מגוון דרכים שבהן ניתן ללכוד פחמן דו-חמצני. גישה אחת נקראת מינרליזציה של פחמן, שבה פחמן דו חמצני מגיב עם מינרלים מסוימים כדי ליצור מינרלים חדשים, שנקראים **פחמתיים**.

מהם מינרלים פחמתיים?

ככל הנראה כבר ראיתם מינרלים רבים מסוג זה, מאחר שהם אבני הבניין של דברים כמו צדפות, גיר ובטון. שלוש הדוגמאות האלה מכילות סידן פחמתי (CaCO_3), שנקרא גם אבן סיד. הרעיון של מינרליזציה של פחמן מבוסס על תהליך טבעי שנקרא **בליית מינרלים**, שבו מינרלים מסוימים מגיבים עם פחמן דו-חמצני באוויר, ויוצרים מינרלים פחמתיים לבנים כמו אלה שנמצאים בצוקים הלבנים של עיר הנמל דוֹבֵר באנגליה (איור 1). התהליך הזה מתרחש על פני אלפי שנים, אולם אם היה ניתן להאיץ אותו כך שיתרחש במשך שעות או ימים, יכלנו להשתמש בגישה זו כדי ללכוד פחמן דו-חמצני ולאחסן אותו!

כיצד פועלת מינרליזציה של פחמן?

הרעיון של גז שמשנתנה למוצק עשוי להיראות מוזר, אך הוא מתרחש במגוון דרכים שאנו נתקלים בהן מדי יום. החלודה הכתומה שמופיעה על פריטים מתכתיים כמו מכוניות ואופניים נוצרת כאשר ברזל נרטב ומגיב עם חמצן באוויר. הכפוף שאנו רואים על החלון בחורף הוא תוצר של מים באוויר חם ולח, שנוגעים בפני השטח של הזכוכית הקרה. במקרה של מינרליזציה של פחמן, כאשר מינרלים ריאקטיביים מסוימים נרטבים ובאים במגע עם פחמן דו-חמצני, הם מגיבים ויוצרים חומרים פחמתיים שמאחסנים באופן קבוע פחמן דו-חמצני, ושומרים אותו מחוץ לאטמוספירה במשך אלפי שנים.

המינרלים הריאקטיביים שמשמשים למינרליזציה של פחמן צריכים להכיל כמויות גדולות של סידן או מגנזיום. ניתן למצוא אותם באופן טבעי **בבסלעים אולטרה-מאפיים**, שנמצאים בכדור הארץ בקנה מידה של עד מאות מיליארדי טונות. מינרלים ריאקטיביים ניתן למצוא גם בפסולת מהתעשייה וכתוצר של תהליכי כרייה. כאשר חומרים חשופים מיוצרים – כמו

אנרגיה מתחדשת

(Renewable Energy)

אנרגיה שמגיעה ממקור שהשפע שלו כל כך גדול, שאי אפשר לכלותו, כמו למשל אנרגיית רוח ואנרגיה סולרית.

לכידת פחמן

(Carbon Capture)

טכנולוגיה שלוכדת פחמן דו-חמצני ממקורות פליטה (או ישירות מהאוויר) במטרה למנוע מפחמן דו-חמצני לגרום לשינויים באקלים כדור הארץ.

פחמתיים

(Carbonates)

מינרלים מוצקים שנוצרים באינטראקציות עם פחמן דו-חמצני ומים.

בליית מינרלים

(Mineral Weathering)

תהליך טבעי שבו סלעים ומינרלים נשברים ליצירת סלעים ומינרלים חדשים. בלייה יכולה לערב תגובות עם פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה, מה שמוביל ליצירת חומר פחמתי.

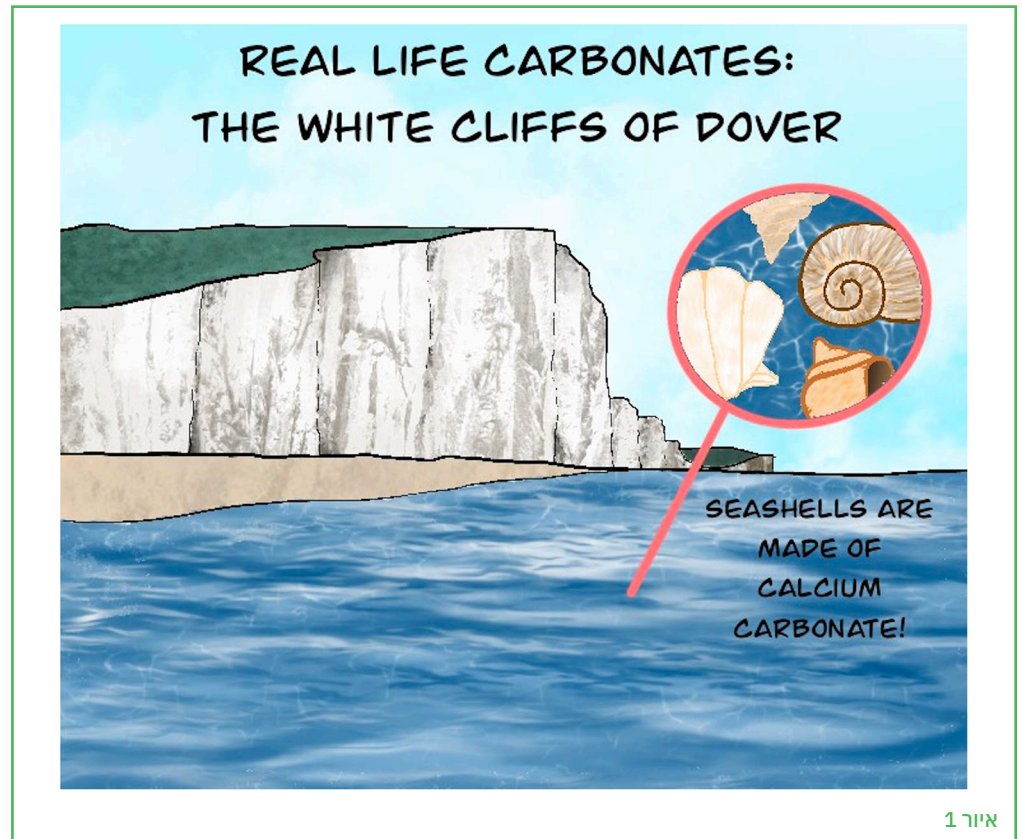
סלע אולטרה-מאפי

(Ultramafic Rock)

סלעים עם כמויות גדולות יחסית של מגנזיום, מה שהופך אותם אידיאליים עבור מינרליזציה של פחמן.

איור 1

מינרלים פחמתיים. ייתכן שכבר ראיתם מינרלים פחמתיים בלי שידעתם זאת. סידן פחמתי מרכיב צדפות, גיר ואפילו את הצוקים הלבנים של דובר שמוצגים באיור. חומרים פחמתיים יכולים להיווצר במגוון דרכים, שכולן מקרבות אינטראקציות עם סידן ופחמן דו-חמצני שמוס בתוך המים.



איור 1

ברזל, פלדה או מלט; או נְכָרִים – כמו יהלומים, ניקל, או נחושת, מיוצרת אשפה שממוקמת בערמות ליד מתקן הייצור. מרבית הפסולת הזו עשירה בסידן או במגנזיום.

פחמן דו-חמצני אף הוא גז פסולת באטמוספירה. גז לוכד-חום זה שוחרר לאוויר בתור תוצר פסולת של בעירה מאז שהתקיימה האנושית החלה להשתמש בדלקי מאובנים. באמצעות מינרליזציה של פחמן, סלעים אולטרה-מאפיים ופסולת מתעשייה או מכרייה יכולים להגיב עם פסולת הפחמן הדו-חמצני שנמצאת באוויר. תגובה זו מייצרת מינרלים פחמתיים, שמסייעים להסיר פחמן דו-חמצני מהאוויר ולמנוע ממנו להצטבר בכמויות עודפות. תהליך זה של ניהול פסולת מודגם באיור 2.

מה ניתן לעשות עם התוצרים הפחמתיים?

התהליך של שימוש במוצרים שיוצרו ממינרליזציה של פחמן ידוע בתור **ניצול פחמן דו-חמצני**. מינרליזציה של פחמן יכולה להיות יקרה, ולכן על ידי מכירה של מוצרים פחמתיים ניתן להרוויח כסף כך שהתהליך יהיה נגיש יותר כלכלית. כמו כן, אם אפשר יהיה לנתב את המוצרים הפחמתיים לחומרי בניין כמו מלט, חומרי הבניין החדשים האלה יוכלו להחליף את חומרי הבניין הנוכחיים, שפולטים פחמן דו-חמצני בעת ייצורם, כך שניצול פחמן דו-חמצני יוכל באופן פוטנציאלי למנוע טונות של פליטות פחמן דו-חמצני!

בואו נסתכל על בטון כדוגמה. בטון נוצר משילוב של מלט, **אגרגטים** ומים (איור 3).

ניצול פחמן דו-חמצני (CO₂ Utilization)

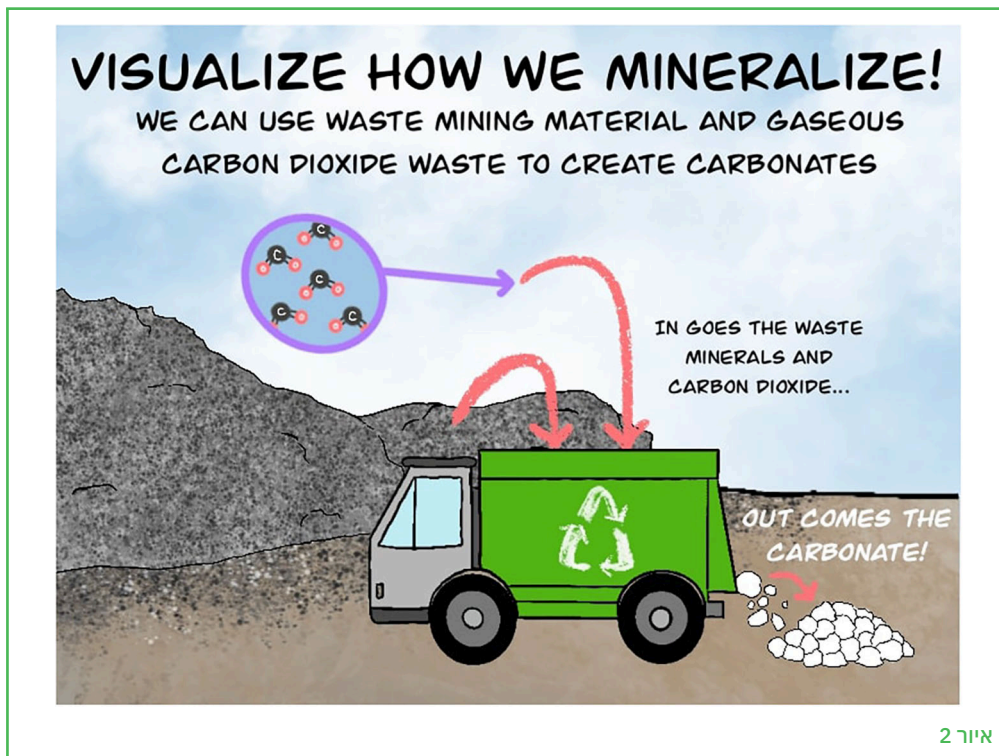
התהליך של שינוי פחמן דו-חמצני לצורה חדשה, ושימוש בו כתוצר בעל ערך.

אגרגטים (Aggregates)

חומרים בלתי ריאקטיביים שמספקים לבטון נפח ויציבות, מחלקיקי חול קטנים ועד חלקיקי חצץ.

איור 2

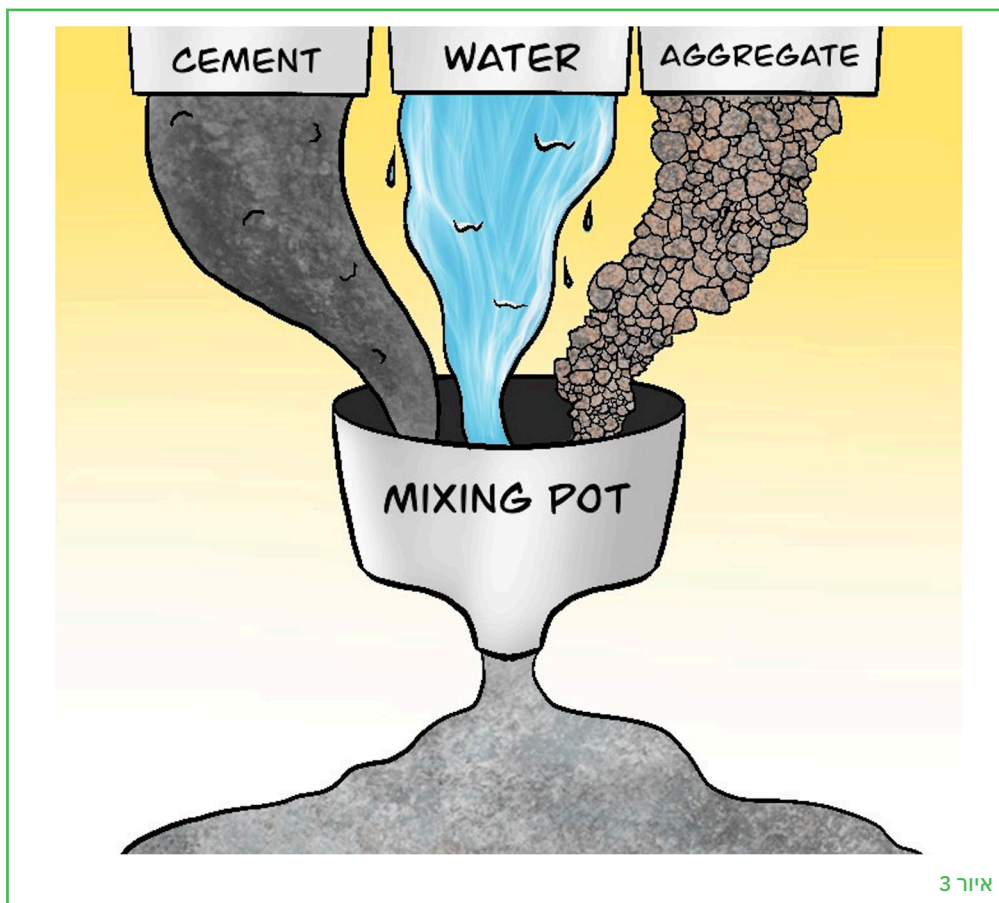
מינרליזציה של פחמן משלבת שתי צורות פסולת ליצירת חומרים פחמתיים חדשים. כאשר מיוצרים חומרים יקרי-ערך כמו ברזל, פלדה ומלט, או נכרים, כמו יהלומים, ניקל ונחושת, מיוצרת פסולת מוצקה שלעיתים קרובות עשירה בסיידן או במגנזיום. אותם תהליכים שבמסגרתם מייצרים את החומרים יקרי-הערך האלה או נכרים אותם, לעיתים קרובות מייצרים גם פחמן דו-חמצני בתור פסולת שנפלטת לאטמוספירה. כפי שמוצג באיור הזה, ניתן לשלב את פסולת הפחמן הדו-חמצני עם פסולת מוצקה כדי לייצר חומרים פחמתיים חדשים.



איור 2

איור 3

תהליך יצירת בטון. בטון מיוצר ממלט, מים ואגרנטים. אגרנטים הם חלקיקים בגדלים שונים, כמו חצץ או חול, המספקים לבטון נפח ויציבות. מלט מתפקד בתור דבק שקושר את האגרנטים יחד. מים מוסיפים כדי לאפשר לבטון להתערבב היטב לפני שהוא מתקשה.



איור 3

ייצור מלט מייצר הרבה פחמן דו-חמצני – הוא אחראי ל-8% מכל פליטות הפחמן הדו-חמצני של האנושות! חוקרים מנסים למצוא דרכים להפחית פליטות שקשורות למלט

על ידי הפחתת כמות המלט שמשמשת בבטון, או על ידי שינוי האופן שבו מלט מיוצר. שינויים מוצלחים בתעשיית המלט יכולים להשפיע לטובה על כמות הפחמן הדו-חמצני שנפלטת לאטמוספירה שלנו! חלק מהתכונות משתמשות במינרלים פחמתיים במטרה ליצור אגרגטים עבור בטון, שהם שימושיים יותר מאגרגטים רגילים. חלקן מצאו דרך להזריק פחמן דו-חמצני ישירות לבטון רטוב, שם הוא מגיב וגורם לבטון להפוך חזק עוד יותר ברגע שהוא מתייבש. חברות אחרות מפגינות יצירתיות על ידי שימוש במקורות שונים של סידן (כמו פסולת תעשייתית) בתור מלט חדש בבטון שלהן.

ישנן חברות ברחבי העולם שכבר משתמשות במינרליזציה של פחמן כדי ליצור מוצרי בניין חדשים, אך הן מתמודדות עם אתגר קשה. מרבית חומרי הבניין כיום הם זולים וקלים יחסית לשימוש, כך שהתקלפותם דורשת יצירתיות מסוימת. אין זה בלתי אפשרי להחליף מוצר שימושי וזול במוצר חדש; קחו טלפונים כדוגמה. לפני שפותחו מכשירי אייפון, השתמשו במכשירי טלפון נייד בסיסיים שהיו פשוטים, תפקודיים וזולים. האיפון נעשה פופולרי לא מאחר שהוא זול יותר מטלפון נייד פשוט, אלא מאחר שהוא מוצר טוב יותר. לכן, חומרי בניין פחמתיים חדשים צריכים להציע מאפיינים טובים יותר מחומרים שזמינים כיום, ולשחרר פחות פחמן דו-חמצני במהלך ייצורם ביחס למוצרים הנוכחיים.

עד כמה הטכנולוגיה הזו מפותחת?

לחומרי בניין שמיצרים ממינרלים פחמתיים יש פוטנציאל גדול בהפחתת פליטות פחמן דו-חמצני בתעשיית המלט. אך כדי שהטכנולוגיה תהפוך פופולרית, צריכה עדיין להיעשות התקדמות בכמה תחומים:

- **מחקר:** התהליך של יצירת חומרים פחמתיים באמצעות פחמן דו-חמצני הוא עדיין יקר ומורכב, ומצריך שיפור. נדרש גם מחקר נוסף במטרה להוכיח שהמלט והבטון החדשים טובים יותר מאלה שיש לנו כיום.
- **תמריצי פחמן:** לממשלה ישנן דרכים לשלם לאנשים שמאחסנים פחמן דו-חמצני ובכך למנוע מגז זה לחדור לאוויר, וכן לתמרץ אחסון פחמן דו-חמצני ושימוש בו. צעדים אלה יסייעו להגניש מינרליזציה של פחמן.
- **רגולציות:** ישנן רגולציות מוקפדות שקובעות אילו חומרים יכולים לשמש ליצירת בטון עבור כבישים ובניינים. חלק מהרגולציות ישנות וניתן לעדכן אותן במטרה לעודד שימוש בחומרים פחמתיים חדשים. זה יהיה תלוי בשאלה אם החומרים החדשים יוכחו כיעילים.

מינרליזציה של פחמן באוקיינוס

כשם שפחמן דו-חמצני צף באוויר שלנו, כך הוא גם מומס באוקיינוסים שלנו. זה דומה לאופן שבו פחמן דו-חמצני מומס במשקאות המוגזים שאנו שותים. גז הפחמן הדו-חמצני אוהב להיות בשיווי משקל בין האוויר למים. מאחר שבמשקה סודה יש יותר פחמן דו-חמצני מאשר באוויר סביב, כשאנו פותחים בקבוק סודה, הפחמן הדו-חמצני עוזב במהירות את הבקבוק ונכנס לאוויר, כך שיוכל להגיע לשיווי משקל.

שיווי משקל (Equilibrium)

איזון בין כוחות מנוגדים.

האוקיינוסים שלנו אינם מייצרים בועות כמו סודה מאחר שהפחמן הדו-חמצני כבר מצוי בשיווי משקל בין האוקיינוס לבין האוויר. על ידי הוספת סידן ומגנזיום לאוקיינוס, הפחמן הדו-חמצני שמומס באוקיינוס יכול לעבור מינרליזציה וליצור מינרלים פחמתיים, אשר מפחיתים את הפחמן הדו-חמצני במים ומפריעים לשיווי המשקל. זה יגרום ליותר פחמן דו-חמצני לעזוב את האוויר ולהיכנס לאוקיינוס. מדענים חוקרים דרכים בטוחות להוסיף סידן ומגנזיום לאוקיינוסים כך שנוכל להשתמש במי האוקיינוסים על מנת להסיר פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה! [1].

כיצד תוכלו להיות מעורבים?

מינרליזציה של פחמן היא רק אחד מהפתרונות הרבים שנדרשים כדי למתן את שינויי האקלים בכדור הארץ. כל הפתרונות ידרשו סיוע מסוגי חשיבה שונים. לדוגמה, בעוד שמדענים ומהנדסים יכולים לסייע בפיתוח מינרליזציה של פחמן ושל טכנולוגיות אחרות, פוליטיקאים ועורכי דין יכולים לסייע בגיבוש מדיניות ממשלתיות שמעודדות פתרונות אקלים, ועיתונאים יכולים לתקשר את הטכנולוגיות החדשות לציבור. נוסף על כך אנו יכולים לנסות להפחית את פליטות הפחמן על ידי שינוי הרגלי היומיום שלנו, למשל באמצעות שימוש בפחות חשמל או מעבר לנסיעות שיתופיות. שינויי אקלים צפויים להוות בעיה גדולה במשך שנים רבות קדימה, אך אם כולם יבצעו את הצעדים הנדרשים מהם במטרה לסייע במאבק, הבעיה תוכל להיפתר!

מקור

1. Renforth, P., and Henderson, G. 2017. Assessing ocean alkalinity for carbon sequestration. *Rev. Geophys.* 55:636–74. doi: 10.1002/2016RG000533

פורסם אונליין: 13 במרץ 2023

עורכת: Kerry Brent

מנחה מדעית: Cristiana Ariotti

ציטוט: Woodall CM, Piccione I, Benazzi M and Wilcox J (2023) לכידה ושימוש חוזר בפחמן דו-חמצני Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2020.592018-he

תורגם והותאם מ: Woodall CM, Piccione I, Benazzi M and Wilcox J (2021) Capturing and Reusing CO₂ by Converting It To Rocks. *Front. Young Minds* 8:592018. doi: 10.3389/frym.2020.592018

הצהרת ניגוד אינטרסים: המחברים מצהירים כי המחקר נערך בהעדר כל קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

Woodall, Piccione, Benazzi and Wilcox 2023 © 2021 © COPYRIGHT. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחבר(ים) המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה. השימוש, ההפצה או ההעתקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

סוקרת צעירה

MARTA, גיל: 14

קוראים לי מרטה, אני בת 14, גרה באיטליה. אני משחקת כדורעף, ובזמני הפנוי אוהבת לפגוש חברים ולקרוא. הספר האהוב עליי הוא הארי פוטר. אני גם אוהבת להאזין למוזיקה.



הכותבים

CALEB M. WOODALL

אני מועמד לדוקטורט בהנדסה כימית במכון הפוליטכני וורצ'סטר (WPI). המחקר שלי פועל לקידום מינרליזציה של פחמן מכמה זוויות. במעבדה, התהליך כולל פיתוח ואופטימיזציה של תהליכים במטרה לגרום לפחמן דו-חמצני להגיב עם שיירים ממכרות; ניתוח הכלכלה של תהליכי מינרליזציה והערכת ההשפעה של ניצול תוצרים פחמתיים. אני גם מתעניין במיוחד בהשפעה התקשורתית הרחבה יותר של טכנולוגיות מינרליזציה, שמתבצעת על ידי הנגשת המדע לנוער, ועובד כחבר רגולציה ב-Clear Path-[*cmwoodall@wpi.edu](mailto:cmwoodall@wpi.edu).



ISABELLA PICCIONE

אני סטודנטית חוקרת בשנה השלישית לתואר ראשון בהנדסה כימית במכון הפוליטכני וורצ'סטר. יש לי תשוקה ליצירת תכני חינוך מלהיבים ומייצרי מעורבות במקצועות מדע, טכנולוגיה, הנדסה ומתמטיקה (STEM) לתלמידים צעירים. קיבלתי השראה לעסוק במקצועות STEM מהמורים שלי, שהפכו את הנושאים המורכבים האלה למהנים וישירים, ואני שואפת לעורר השראה דומה בדור חדש של מדענים. בזמני הפנוי, אני אוהבת לעצב תכשיטים וללכת לחוף הים!



MICHELA BENAZZI

אני סטודנטית חוקרת שלומדת לתואר ראשון בהנדסה כימית במכון הפוליטכני וורצ'סטר. עבודתי מתמקדת בעיקר בטכנולוגיות למזעור שינויי אקלים, ובפליטים על רקע שינויי אקלים. כיום אני מפתחת במעבדה תוכן שמקבל השראה מההערכה הסביבתית של קיבלינה, אלסקה, ומשיטות למזעור שינויי אקלים על ידי מינרליזציה של פחמן, חקלאות ימית רגנרטיבית ועלים מלאכותיים וביוניים. בעבר, קיבלתי את פרס Outstanding Performance בסימפוזיון הבינלאומי בנושא חינוך STEM - מקצועות מדע, טכנולוגיה, הנדסה ומתמטיקה (אוניברסיטת הונג קונג, 2018).



**JENNIFER WILCOX**

אני פרופסורית להנדסה כימית ומדיניות אנרגיה באוניברסיטת פנסילבניה, וחקרתי בכירה במכון המשאבים העולמי. המחקר שלי עוסק בתחום של אנרגיה וסביבה, ובפיתוח אסטרטגיות מניעה והסתגלות במטרה למזער השפעות של שינויי אקלים הקשורות לתלות של החברה בדלקי מאובנים.

מוזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس
Bloomfield Science Museum Jerusalem



הוצאת פרונטירז מדע לצעירים ישראל
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK