

הגנה על האקלים שלנו על ידי הפיכת פחמן דו-חמצני לאבן

Sandra Ó. Snæbjörnsdóttir*, Katrín Steinþórsdóttir, Selja Ósk Snorradóttir, Kári Helgason

Carbfix, ריקיאוויק, איסלנד

סוקרים צעירים

FDR-HB_PERU
IGEM TEAM

גיל: 14-17



גזי חממה

(Greenhouse gases)

גזים באטמוספירה שכולאים חום. עלייה בריכוז של גזי חממה באטמוספירה גורמת לעלייה בטמפרטורות, שמובילה לשינויי אקלים.

דלקי מאובנים

(Fossil fuels)

נוצרו לפני מיליוני שנים מחומר אורגני, כמו למשל צמחים וחיות שנקברו. דלקי מאובנים כוללים פחם, גז טבעי ושמן, אך שרפתם משחררת פחמן דו-חמצני רב. דלקי מאובנים הם התורם הגדול ביותר לשינויי אקלים.

המשימה הגדולה ביותר של המאה הנוכחית היא הפחתת הפליטות של פחמן דו-חמצני (CO₂) לאטמוספירה, במטרה להאט את שינויי האקלים. אחת מטכנולוגיות המפתח לכך היא כליאת הפחמן הדו-חמצני שנפלט מתחנות כוח ומפעלים, כדי למנוע ממנו להשפיע על האקלים. אך, כיצד אנו יכולים לאחסן את הפחמן הדו-חמצני הכלוא הזה באופן בטוח וקבוע? במאמר זה, נתאר שיטה שהודגמה באיסלנד, שבמסגרתה פחמן דו-חמצני מוזרק עמוק לאדמה והופך לאבן – דרך טבעית להתמודדות עם פליטות פחמן דו-חמצני!

פחמן דו-חמצני: גז חממה שמשנה אקלים

הפחתת פליטות גזי חממה היא אחד האתגרים הגדולים של המאה ה-21. במשך 50-100 השנים האחרונות, ממוצע הטמפרטורות בכדור הארץ עלה בקצב מהיר. חמש השנים שקדמו לשנת 2020 (מועד כתיבת המאמר) היו החמות ביותר במאות השנים האחרונות [1]. ההתחממות המהירה הזו נגרמת בעיקר כתוצאה מפעילויות אנושיות, לרבות שִׁרְפָה של דלקי מאובנים עבור תחנות כוח, מכוניות ומטוסים. שִׁרְפָת דלקי מאובנים משחררת

אפקט החממה (Greenhouse effect)

ההשפעה שיש לגזי חממה על האטמוספירה על ידי כליאת חום וחימום פני השטח של כדור הארץ.

התחממות גלובלית (Global warming)

ההתחממות שאנו חווים כתוצאה מאפקט החממה המוגבר.

שינויי אקלים (Climate change)

השינויים באקלים כדור הארץ כתוצאה מאפקט החממה המוגבר, שגורם להתחממות פני השטח של כדור הארץ.

סלעים געשיים (Volcanic rocks)

סלעים שנוצרו מלִבָּה שהתפרצה מהר געש, או ממִגְמָה שברחה מהשורשים של הרי געש, אך אינה מגיעה לפני השטח ומתחממת.

גזי חממה, בעיקר פחמן דו-חמצני, שבתורם מעצימים את אפקט החממה ומובילים לעלייה בטמפרטורות.

עליית הטמפרטורות, שידועה בתור **התחממות גלובלית**, מעלה את כמות השרפות, מאיצה המסות של קרחונים וגורמת לעלייה במפלס פני הים. נוסף על כך ההתחממות הגלובלית מובילה ליותר אירועי מזג אוויר חריגים, כמו למשל תקופות בצורת, סופות ומטחי גשם כבדים. הפליטות המתמשכות של גזי חממה יגרמו להתחממות נוספת של האטמוספירה ושל האוקיינוסים, מה שיוביל לשינויים קבועים באקלים כדור הארץ. אלה יגבירו את הסבירות להשלכות חמורות על אנשים ועל מערכות אקולוגיות.

המשימה העיקרית של המאה הזו היא להפחית פליטות פחמן דו-חמצני לאטמוספירה, במטרה לסייע בהאטת ההתחממות הגלובלית. המשמעות היא מְעַבֵּר מדלקי מאובנים למקורות אנרגיה מתחדשת. כמו כן, עלינו לְשַׁמֵּר את המשאבים שלנו על כדור הארץ; לשתול עצים ולשחזר אדמה שניזוקה מפעילויות אנושיות. אולם, מְחַלֵּק מפליטות הפחמן הדו-חמצני קשה יותר להיפטר, כמו למשל מאלה המשתחררות ממפעלי בטון ופלדה. ישנם גם מקומות שבהם אנרגיה מתחדשת אינה אפשרות, ועדיין צריך לשרוף דלקי מאובנים. כיצד ניתן למזער פליטות פחמן דו-חמצני כאלה?

דרכו של הטבע להפחית פליטות

טכנולוגיית מפתח להפחתת פליטות היא כליאת הפחמן הדו-חמצני שמיוצר על ידי תחנות כוח ומפעלים. תהליך זה מונע מפחמן דו-חמצני להשתחרר לאטמוספירה, ומגביל את ההשפעות של שינויי האקלים. אולם, היכן אנו יכולים לאחסן פחמן דו-חמצני כזו? כיצד ניתן להרחיק אותו בדרך בטוחה וקבועה?

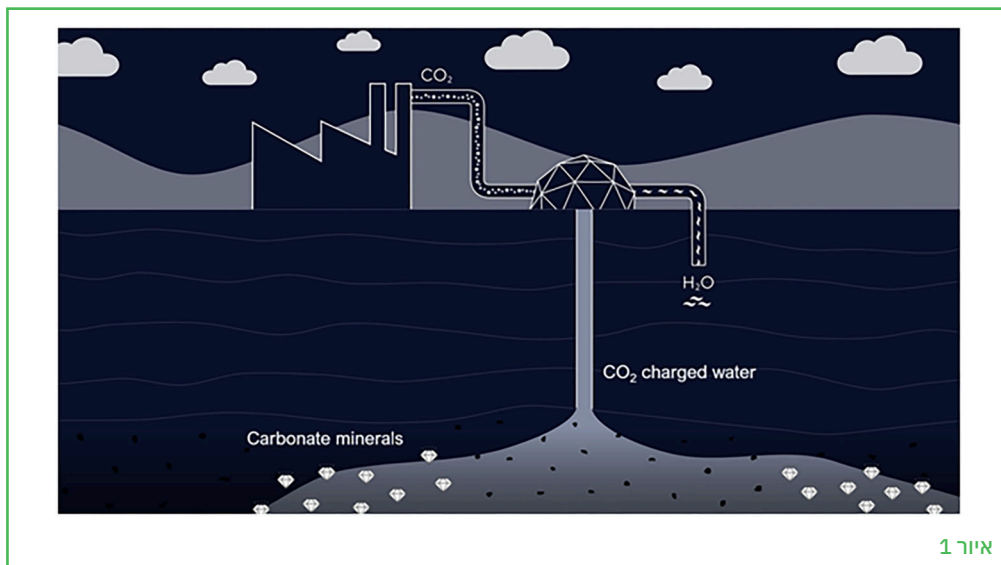
באיסלנד, פותחה שיטה שלוקחת את הפחמן הדו-חמצני הכלוא והופכת אותו לאבן, עמוק בתוך האדמה. זה עשוי להישמע כמו קסם, אך זו דרכו של כדור הארץ להיפטר מעודפי פחמן דו-חמצני באטמוספירה: הטבע הופך פחמן דו-חמצני לאבן באמצעות מתכות שנמצאות בסלעים מסוימים [2]. הסלעים המיטביים לתהליך האמור הם **סלעים געשיים**, כמו למשל בזלת ופְּרִידוּטִיט, אשר מכילים מתכות רבות שנדרשות לתגובה הזו. אולם בטבע, זהו תהליך איטי – איטי מדי מכדי למנוע את ההתחממות הגלובלית שמשפיעה כיום על כדור הארץ.

פרויקט איסלנדי שנקרא Carbfix מאיץ את התהליך הטבעי הזה. הפחמן הדו-חמצני מומס במים, באותו האופן שבו מכונת סודה מייצרת מים תוססים (איור 1). המים עם הפחמן הדו-חמצני המומס מוזרמים עמוק לתוך האדמה. אם המים התוססים האלה מוזרקים לתוך סוגי הסלעים הנכונים, הסלעים משחררים מתכות שמתערבבות עם הפחמן הדו-חמצני במים, והופכות אותו לאבן. תהליך זה מסיר פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה בבטחה ובאופן קבוע, מאחר שסלעים אינם יכולים לדלוף מהאדמה.

טכנולוגיה זו נמצאת בשימוש בתחנת כוח גיאותרמית בהליִשְׁיִידי, איסלנד. תחנות כוח גיאותרמיות משתמשות באנרגיה משדות גיאותרמיים אשר מכילים שבריר של פחמן דו-חמצני, ובתהליך של יצירת חשמל הפחמן הדו-חמצני הזה משוחרר. הפחמן הדו-חמצני

איור 1

התהליך של Carbfix. פחמן דו-חמצני נכלא ממקור פליטה, כמו למשל תחנת כוח או מפעל. לאחר מכן הפחמן הדו-חמצני מומס במים, ממש כמו במכונת סודה. המים התוססים האלה מוזרקים עמוק לתוך האדמה, שם הם הופכים לאבן בתהליך טבעי שנקרא מתכות המצויות בסוגים מסוימים של סלעים.



שנפלט מתחנת הכוח מומס במים במבנה שנקרא מגדל קרצוף (scrubbing tower). המים שטעונים בפחמן דו-חמצני מוזרקים לתוך האדמה באמצעות מתקן שנקרא זרקת הבזלת בעומק הזה מושלמת עבור השיטה הזו, מאחר שהיא מכילה מתכות שנדרשות להפיכת פחמן דו-חמצני לאבן. נכון לשנת 2020, כ-12,000 טונות של פחמן דו-חמצני הופכים לאבן מדי שנה במפעל הגיאותרמי בהלישיידי, במקום שישוחררו לאטמוספירה. כמות זו שוות-ערך לכמות הפליטות השנתית מכ-6,700 מכוניות [3].

בשנת 2020, תחנת הכוח בהלישיידי הייתה המתקן היחיד שבו הודגמה הטכנולוגיה הזו. מאז תחילת התהליך בשנת 2014 ועד 2020, הוזרקו והפכו לאבן באמצעותו כ-70,000 טונות של פחמן דו-חמצני. במסגרת תוכניות להרחבת השימוש בטכנולוגיה, התכנן לשנת 2021 היה שתהליך ה-Carbfix ייושם בתחנת כוח גיאותרמית נוספת באיסלנד. לצד זאת ישנן תוכניות רבות אחרות, ואפילו חדשניות יותר, להפיכת פחמן דו-חמצני לאבן בקרוב.

הקצרת פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה

מדעני אקלים חזו כי עצירת פליטות חדשות של פחמן דו-חמצני לא תספיק עבור ההתמודדות עם שינויי האקלים. בעתיד, נצטרך להסיר את הפחמן הדו-חמצני שכבר נפלט לאטמוספירה [4]. ישנן כמה דרכים להקצרת פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה, לרבות שתילת עצים ושחזור בריאותן של אדמות שזוהמו, או שנעשה בהן שימוש יקר במסגרת חקלאות. מאחר שאנו נדרשים להסיר הרבה פחמן דו-חמצני במהירות האפשרית, נצטרך גם להסתמך על טכנולוגיה שלוכדת פחמן דו-חמצני ישירות מהאטמוספירה. הטכנולוגיה הזו נקראת **כליאת אוויר ישירה**, והיא מפותחת בכמה מקומות ברחבי העולם.

הדוגמה הראשונה לטכנולוגיית כליאת אוויר ישירה, שמשולבת עם טכנולוגיית Carbfix, מצויה בשימוש באיסלנד מאז 2017. החברה Climeworks פיתחה מתקן שמסיר פחמן דו-חמצני ישירות מהאטמוספירה. המתקן שואב אוויר ומסנן החוצה פחמן דו-חמצני, שאז

כליאת אוויר ישירה (Direct air capture, DAC)

כליאת פחמן דו-חמצני שכבר נפלט לאטמוספירה.

מומס במים, מוזרק לכדור הארץ, ונהפך לאבן [5]. מתקן זה יכול להסיר כ-50 טונות של פחמן דו-חמצני מדי שנה – כמות שהיא כמעט נשקולה לכמות המוסרת על ידי כ-2,000 עצים.

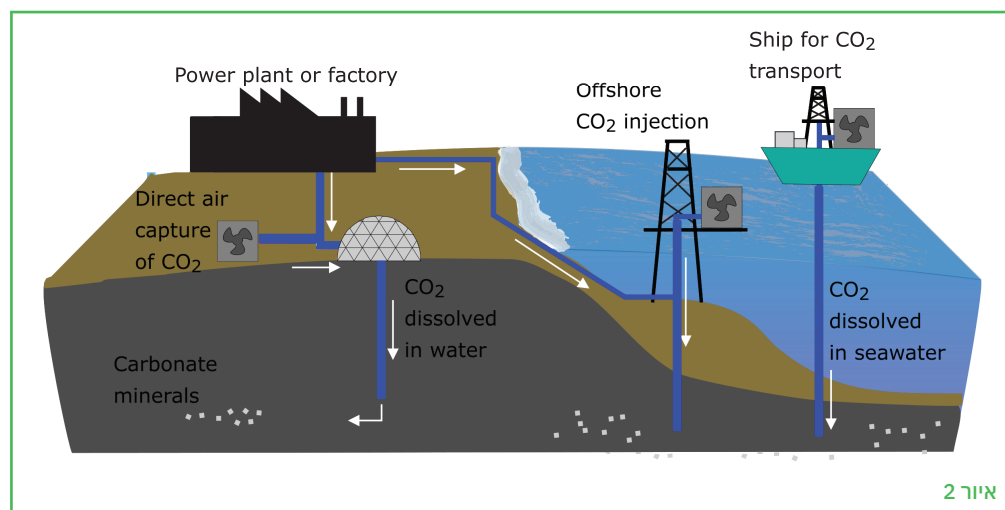
ניסוי זה צריך להיערך בקנה מידה רחב יותר בעתיד. באיסלנד מתוכננת בשנים הקרובות הרחבה של מתקן כליאת אוויר ישירה, מה שיסייע להגדיל את כמות הפחמן הדו-חמצני שנכלא בתוך האבן מתחת לאדמה.

עמיד הסרת פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה

קצת אתם יודעים כי הרכיבים להפיכת פחמן דו-חמצני לאבן כוללים מקור של פחמן דו-חמצני, סלעים געשיים ומים. בחלק מהמקרים, נצטרך לשנע פחמן דו-חמצני דרך צינורות או ספינות למיקום שבו נוכל להזריק אותו לסוגי הסלעים הנכונים (איור 2). סלעים געשיים, כמו בזלת ופרידוטיט, הם שכחים מאוד. בזלת היא סוג הסלע השכיח ביותר על פני כדור הארץ, ומכסה את מרבית קרקעית האוקיינוס וכ-5% מהיבשות (איור 3). פוטנציאל האחסון הגלובלי של כל הבזלת על פני כדור הארץ גדול יותר מפליטות הפחמן הדו-חמצני שיכלו להיות מיוצרות על ידי שרפת כל דלקי המאובנים על פני כדור הארץ [2]. משמעות הדבר היא שיש לנו מספיק סלעי בזלת כדי להצליח לאחסן פחמן דו-חמצני במינרלים, שאחרת היה משפיע על האטמוספירה שלנו. אזורים מסוימים עשויים להכיל מעט מים, לכן מדענים חוקרים קצת דרכים לאספקת המים הרצויים ישירות ממאגרים תת-קרקעיים או באמצעות מים.

איור 2

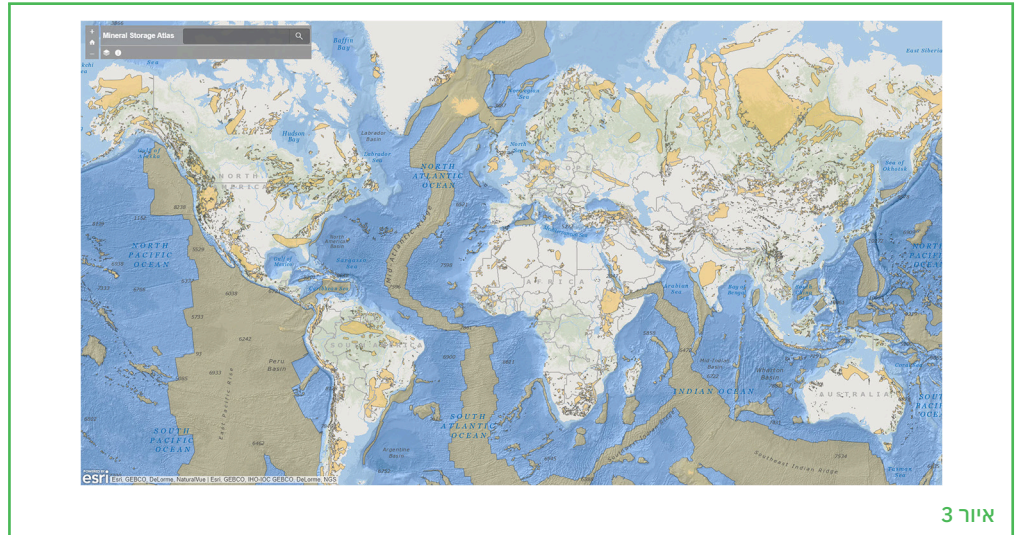
שימוש עתידי ב-Carbfix.
בעתיד, התהליך של Carbfix עשוי להיות בשימוש נרחב לכליאת פחמן דו-חמצני מתחנות כוח ומפעלים, או ישירות מהאטמוספירה, והזרקתו לתוך האדמה – הן על היבשה הן מחוץ ליבשה.
איור: Chiara Marieni.



משימה גדולה ניצבת לפנינו במונחים של כליאת פחמן דו-חמצני ואחסונו. בשנים הבאות, במטרה להגן על כדור הארץ ועל חיי אדם, עלינו לכלוא פחמן דו-חמצני ולאחסן אותו בקנה מידה נרחב הרבה יותר. יש לכלוא פחמן דו-חמצני מפליטות של מפעלים, תחנות כוח וישירות מהאטמוספירה. השאלה שנתרת היא כמה פחמן דו-חמצני נוכל להפוך לאבן, ואם הכמות הזו תספיק כדי לתרום להגנה על כדור הארץ ועל תושביו מפני ההשפעות המסוכנות של החרפת שינויי האקלים.

איור 3

מיקומים שבהם ניתן למצוא סלעים שמתאימים להפיכת פחמן דו-חמצני לאבן. צבע חום בהיר מצביע על האזורים הצעירים ביותר ברכסי האוקיינוס, ועל אזורים עם סלעים געשיים שמתאימים להפיכת פחמן דו-חמצני לאבן (לקוח מ: carbfix.com/atlas).



איור 3

מאמר המקור

Snæbjörnsdóttir, S. Ó., Sigfússon, B., Marieni, C., Goldberg, D., Gislason, S. R., and Oelkers, E. H. 2020. Carbon dioxide storage through mineral carbonation. *Nat. Rev. Earth Environ.* 1:90–102. doi: 10.1038/s43017-019-0011-8

מקורות

1. NOAA National Centers for Environmental Information. 2020. *State of the Climate: Global Climate Report for April 2020*. Retrieved from: <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/202004> (accessed June 25, 2020).
2. Snæbjörnsdóttir, S. Ó., Sigfússon, B., Marieni, C., Goldberg, D., Gislason, S. R., and Oelkers, E. H. 2020. Carbon dioxide storage through mineral carbonation. *Nat. Rev. Earth Environ.* 1:90–102. doi: 10.1038/s43017-019-0011-8
3. Todts, W. 2018. *CO₂ Emissions From Cars: The Facts*. Brussels: European Federation for Transport and Environment AISBL.
4. Rogelj, J., Shindell, D., Jiang, K., Fifita, S., Forster, P., Ginzburg, V., et al. 2018. *Global Warming of 1.5°C. Chapter 2*. Geneva: IPCC.
5. Gutenecht, V., Snæbjörnsdóttir, S. O., Sigfússon, B., Aradóttir, E. S., and Charles, L. 2018. Creating a carbon dioxide removal solution by combining rapid mineralization of CO₂ with direct air capture. *Energy Proc.* 146:129–34. doi: 10.1016/j.egypro.2018.07.017

פורסם אונליין: 28 באפריל 2023

נערך על ידי: Leonardo F. Fraceto

מנחה מדעית: Nina Markham

(2023) Snæbjörnsdóttir SÓ, Steinþórsdóttir K, Snorradóttir SÓ and Helgason K: **ציטוט:** הגנה על האקלים שלנו על ידי הפיכת פחמן דו-חמצני לאבן. Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2021.579895-he

Snæbjörnsdóttir SÓ, Steinþórsdóttir K, Snorradóttir SÓ and Helgason K: **תורגם והתאם מ:** (2021) Protecting Our Climate by Turning CO₂ Into Stone. Front. Young Minds 9:579895. doi: 10.3389/frym.2021.579895

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

Snæbjörnsdóttir, Steinþórsdóttir, Snorradóttir 2023 © 2021 © **COPYRIGHT** and Helgason. 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.

סוקרים צעירים

FDR-HB_PERU IGEM TEAM, גיל: 14–17

אנו צוות של ביולוגיה סינתטית במסגרת ארגון (iGEM) international Genetically Engineered Machine בִּלְיִמָּה, פֶּרוּ. אנו צוות התיכון היחיד באמריקה הלטינית, גאים בעבודתנו ביצירת חיישן לקדמיום באמצעות חיידקים. מרביתנו לומדים שפה שנייה, וטווח הגילים בקבוצתנו הוא 14-17 שנים. אנחנו אוהבים אורגניזמים שעברו שינוי גנטי (GMOs)!

הכותבים

SANDRA Ó. SNÆBJÖRNSDÓTTIR

מאז היותי ילדה שטיילה ברחבי איסלנד עם הסבים שלי, הייתי מרותקת מסלעים על כל צורותיהם. הסתקרנתי מההרים במגוון צורותיהם, ומאוחר יותר מהאבנים שקבורות עמוק, אשר ביכולתנו להביא אל פני השטח באמצעות קדיחת בארות באדמה. בשנים האחרונות, חקרתי את האופן שבו הטבע מאחסן פחמן דו-חמצני – כיצד פחמן דו-חמצני מגיב עם סלעים בדרכו להפוך לאבן. אני מקווה שהתהליך הזה יהיה מפתח לחלק מהפתרונות שאנו זקוקים להם כדי להתמודד עם משבר האקלים. *sandraos@carbfix.com

KATRÍN STEINÞÓRSDÓTTIR

העניין שלי בסלעים החל כשהייתי ילדה, כשבמגרש המשחקים של שכונתי היו אבנים שחורות וחלקות שנקראות בזלת. מאוחר יותר, חקרתי הרי געש שיוצרים את האבנים האלה. כעת, אני חוקרת סוג אבן אחר דומה, שנוצר מתחת לקרום כדור הארץ ונקרא פרידוטיט. שני הסלעים האלה יכולים לשמש לאחסון פחמן דו-חמצני ולסייע בהתמודדות עם שינויי האקלים. אני מתעניינת היכן אנו יכולים למצוא אותם, ובאילו חלקים מהם ביכולתנו להשתמש.





SELJA ÓSK SNORRADÓTTIR

העניין שאני מגלה בשימור הסביבה הטבעית מפני השפעות שינויי האקלים הצית בשלב מוקדם את העניין שלי בחדשנות ובקיימות. באוניברסיטה למדתי עסקים ומדעי קיימות. כיום אני עובדת כיועצת בחברת תוכנה סביבתית, שמסייעת לערים, לחברות ולארגונים למדוד את טביעת הרגל הפחמנית שלהם עם נתונים בזמן אמת, ולקבוע מטרות המתמקדות בדרכים למזער אותה.

KÁRI HELGASON

תשוקתי למדעי הטבע הוצתה על ידי העושר של היקום. קריירה מוקדמת באסטרופיזיקה עוררה אצלי עניין רב לגבי כוכבי לכת רבים שהתגלו מחוץ למערכת השמש שלנו. כעת העברתי את תשומת ליבי לכדור הארץ – עד כה, זהו העולם המיושב היחיד שאנו מכירים – ואני מקדיש את מרצתי לשמירה על פחמן מחוץ לאטמוספירת כדור הארץ באמצעות הפיכת הפחמן לאבן.

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