

## كيف يمكن تحويل ثاني أكسيد الكربون إلى حجارة؟

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

كاريفيكس، ريكيافيك، آيسلندا

### المراجعون الصغار

FDR-HB\_PERU  
IGEM TEAM

العمر: 14-17



### الغازات الدفيئة (GREENHOUSE GASES)

هي تلك الغازات الموجودة في الغلاف الجوي والتي تتسبب في احتباس الحرارة. ومن شأن زيادة تركيز هذه الغازات الدفيئة المسببة للاحتباس الحراري في غلافنا الجوي أن تؤدي إلى ارتفاع درجة الحرارة، وهو ما يؤدي بدوره إلى حدوث التغير المناخي.

إن الهدف الأعظم والأسمى للبشرية في هذا القرن هو الحد من انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي من أجل تقليل وتيرة التغير المناخي. وإحدى التقنيات المستخدمة في هذا الصدد هي استخلاص ثاني أكسيد الكربون المنبعث من مصانع الطاقة لمنع من التأثير على المناخ. ولكن السؤال الآن: كيف يمكننا تخزين غاز ثاني أكسيد الكربون المستخلص بطريقة آمنة ودائمة؟ يسلط هذا المقال الضوء على إحدى الطرق التي ظهرت في آيسلندا، والتي يتم من خلالها ضخ غاز ثاني أكسيد الكربون في أعماق الأرض وتحويله إلى حجارة؛ فهي طريقة طبيعية للتعامل مع انبعاثات ثاني أكسيد الكربون!

### ثاني أكسيد الكربون: غاز دفيء يسبب تغير المناخ

يمثل الحد من انبعاثات الغازات الدفيئة المسببة للاحتباس الحراري في الغلاف الجوي أحد أكبر التحديات التي تواجه البشر في هذا القرن. وعلى مدار الخمسين عامًا إلى المائة

عام الماضية، أخذ متوسط معدلات الحرارة على سطح الأرض يرتفع بوتيرة متسارعة. وفي واقع الأمر، فإن السنوات الخمس الماضية كانت هي الأكثر احترارًا منذ قرونٍ عديدة [1]. وتعتبر الأنشطة البشرية، مثل حرق الوقود الأحفوري المستخدم في محطات الطاقة والسيارات والطائرات، أحد الأسباب الرئيسية التي تسببت في حدوث هذا الاحترار على وجه الأرض بهذه الوتيرة المتسارعة.

يؤدي حرق الأنواع المختلفة من **الوقود الأحفوري** إلى انبعاث الغازات الدفيئة المسببة للاحتباس الحراري، والذي يشكل غاز ثاني أكسيد الكربون معظمها، وهو ما يؤدي بدوره إلى زيادة **تأثير البيت الزجاجي** ومن ثم ارتفاع درجات الحرارة على كوكب الأرض.

ويزيد هذا الارتفاع في درجات الحرارة، والذي يعرف **بالاحتباس الحراري**، من أعداد الحرائق، ويُسرع وتيرة ذوبان الكتل الجليدية، ومن ثم ارتفاع مستويات سطح البحر. وبالإضافة إلى ذلك، يسبب الاحتباس الحراري حدوث ظواهر جوية شديدة القسوة؛ مثل الجفاف والعواصف والأمطار الغزيرة. وستسبب الانبعاثات المستمرة من الغازات الدفيئة المزيد من الاحترار في الغلاف الجوي ومياه المحيطات، وهو ما سيؤدي بدوره إلى إحداث تغييرات دائمة في مناخ الأرض، مما سيؤثر على البشر والأنظمة البيئية تأثيرًا خطيرًا.

إن المهمة العظمى لهذا القرن هي الحد من انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي من أجل المساعدة في تقليل وتيرة التغير المناخي، وهو ما يعني التحول من استخدام الوقود الأحفوري إلى مصادر الطاقة المتجددة. وبالإضافة إلى ذلك، فإننا بحاجة إلى أن نحافظ على مواردنا على الأرض، وأن نزرع الأشجار، وأن نستصلح الأراضي التي دمرتها الأنشطة البشرية. ومع ذلك، فإنه يصعب التخلص من بعض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، مثل تلك المنبعثة من مصانع الأسمنت والحديد. كما أن هناك أيضًا بعض الأماكن التي لا يتاح فيها استخدام مصادر الطاقة المتجددة، حيث لا تزال في حاجة إلى حرق الوقود الأحفوري. كيف يمكننا إذن الحد من انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون هذه؟

## طريقة الطبيعة في الحد من الانبعاثات

تتمثل إحدى التقنيات الرئيسية المستخدمة في الحد من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في استخلاص هذا الغاز المنبعث من محطات الطاقة والمصانع، وهو ما يؤدي بدوره إلى منع ثاني أكسيد الكربون من الانبعاث إلى الغلاف الجوي، ومن ثم الحد من التأثيرات الناجمة عن **تغير المناخ**. ولكن السؤال الآن: أين يمكننا تخزين غاز ثاني أكسيد الكربون المستخلص؟ وكيف يمكن الإبقاء عليه في مكان آمن وبطريقة دائمة؟

ابتكرت دولة أيسلندا طريقة يمكن من خلالها أخذ هذه الكمية المستخلصة من غاز ثاني أكسيد الكربون وتحويلها إلى حجارة تُخزن في أعماق الأرض. وعلى الرغم من أن هذا الأمر قد يبدو مثل السحر، فإنه يمثل في واقع الأمر الطريقة التي تستخدمها الأرض

### الوقود الأحفوري (FOSSIL FUELS)

تكوّن الوقود الأحفوري عبر ملايين السنين من مواد عضوية مثل النباتات والحيوانات المدفونة في باطن الأرض. وتشمل قائمة الوقود الأحفوري كلاً من الفحم والغاز الطبيعي والنفط، علمًا بأن احتراق هذه الأنواع من الوقود يؤدي إلى انبعاث كميات كبيرة من ثاني أكسيد الكربون. ومن ثم، يمكن القول إن الأنواع المختلفة من الوقود الأحفوري هي المسؤول الأول عن حدوث التغير المناخي.

### تأثير البيت الزجاجي (GREENHOUSE EFFECT)

هو الأثر الذي تحدثه الغازات الدفيئة المسببة للاحتباس الحراري على الغلاف الجوي من خلال حبس الحرارة وزيادة احتراق سطح الأرض.

### الاحتباس الحراري (GLOBAL WARMING)

هو الاحترار الذي نشعر به بسبب التأثير المتزايد للاحتباس الحراري.

### تغير المناخ (CLIMATE CHANGE)

هو التغير الذي يطرأ على مناخ الكرة الأرضية جراء التأثير المتزايد للاحتباس الحراري، والذي يتسبب بدوره في احترار سطح الأرض.

## الصخور البركانية (VOLCANIC ROCKS)

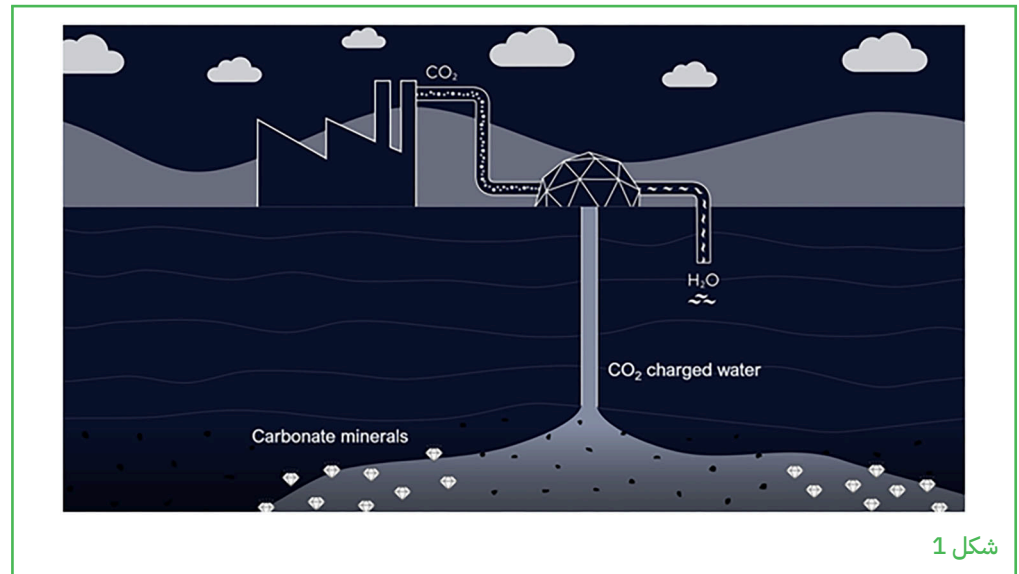
صخور تكونت من الحمم البركانية المنبعثة من البراكين أو من الصهارة (الحمم البركانية المنصهرة) والتي يُقذف بها من أعماق البركان ولكنها مع ذلك (الصهارة) لا تخرج إلى سطح البركان حيث تتجمد في جوف الأرض.

للتخلص من الكميات الزائدة من هذا الغاز في الغلاف الجوي: حيث تحول الطبيعة ثاني أكسيد الكربون إلى حجارة باستخدام المعادن الموجودة في أنواع معينة من الصخور [2]. إن أفضل الصخور للقيام بهذه العملية هي **الصخور البركانية**، مثل البازلت (الحجر البركاني الأسود) والبيريدوتيت، واللذان يحتويان على الكثير من المعادن اللازمة لحدوث هذه العملية. وعلى الرغم من أن ما تقوم به الطبيعة يعد تقدمًا، فإنه يحدث بوتيرة بطيئة، بطيئة جدًا، بحيث لا يمكنها (الطبيعة) منع الاحتباس الحراري الذي يؤثر سلبيًا على الأرض في هذه الآونة.

وفي هذا الصدد، نجح مشروع في آيسلندا يعرف باسم "كاربيكس" (Carbfix) في تسريع وتيرة هذه العملية الطبيعية. ففي إطار هذا المشروع، تتم إذابة ثاني أكسيد الكربون في الماء بنفس الطريقة التي تصنع بها ماكينة الصودا المياه الغازية (الشكل 1)، ثم يضخ الماء المذاب فيه ثاني أكسيد الكربون بعيدًا في أعماق الأرض. وإذا صُخ هذا الماء المحمل بالغاز في النوع الصحيح من الصخور، فإنها تطلق معادن (فلزات) تختلط بثاني أكسيد الكربون في الماء، ومن ثم تحوله إلى حجارة. وتعمل هذه الطريقة على إزالة ثاني أكسيد الكربون بشكل آمن ودائم من الغلاف الجوي، حيث لا يمكن للصخور أن تتسرب من الأرض منطلقًا إلى الغلاف الجوي مجددًا.

### شكل 1

عملية كاربيكس. يجري استخلاص غاز ثاني أكسيد الكربون من المصدر، مثل محطات الطاقة والمصانع، ثم يُذاب بعد ذلك في الماء، تمامًا مثل ماكينة الصودا. ثم يضخ هذا الماء المحمل بالغاز بعد ذلك عميقًا في قاع الأرض، حيث يتحول إلى حجارة من خلال العمليات الطبيعية التي تشارك فيها المعادن الموجودة في أنواع معينة من الصخور.



وتُستخدم هذه التقنية الآن في مصنع الطاقة الحرارية الجوفية في هيليشيدي في آيسلندا. وتستخدم محطات الطاقة الحرارية البخار المتولد من مجالات الطاقة الحرارية، والذي يحتوي على نسبة من ثاني أكسيد الكربون، ثم ينبعث هذا الغاز خلال عملية توليد الكهرباء. ويُذاب ثاني أكسيد الكربون المنبعث من محطة توليد الكهرباء في المياه بطريقة تعرف باسم "برج استخلاص الغاز". ثم يضخ الماء المحمل بثاني أكسيد الكربون بعد ذلك في أعماق الأرض باستخدام جهاز يعرف باسم "بئر الحقن"، والذي يصل عمقه إلى ما يزيد على 2000 متر تحت سطح الأرض. ويعد حجر البازلت القابع في هذا العمق مثاليًا لهذه العملية، حيث يحتوي على المعادن اللازمة لتحويل ثاني

أكسيد الكربون إلى حجارة. وفي الوقت الحاضر، تحول محطة هيليشيدي للطاقة الحرارية الجوفية قرابة 12 ألف طن من ثاني أكسيد الكربون إلى حجارة سنويًا، بدلًا من إطلاقها في الغلاف الجوي. وتعادل هذه الكمية الانبعاثات سنوية المنطلقة من 6700 سيارة [3].

وتعد محطة هيليشيدي للطاقة حاليًا المنشأة الوحيدة التي تطبق فيها هذه التقنية. ومنذ بداية المشروع في عام 2014، تم ضخ نحو 70 ألف طن من ثاني أكسيد الكربون في جوف الأرض، ومن ثم تحويله إلى حجارة. وتشير بعض الخطط إلى التوسع في استخدام هذه التقنية على نطاقٍ أوسع، كما أن مشروع "كاريفيكس" كان من المقرر أن يُطبق في عام 2021 في محطة طاقة حرارية جوفية في آيسلندا. وعلاوة على ذلك، فإن هناك العديد من الخطط الأخرى الأكثر إبداعًا حول تحويل ثاني أكسيد الكربون إلى حجارة، والتي من المتوقع أن تخرج للنور قريبًا.

## التخلص من ثاني أكسيد الكربون الموجود في الغلاف الجوي

يتوقع علماء المناخ أن وقف الانبعاثات الجديدة من ثاني أكسيد الكربون لن يكون إجراءً كافيًا لمعالجة التغير المناخي. وفي المستقبل، سنكون بحاجة إلى البدء في التخلص من ثاني أكسيد الكربون الذي تسببنا في انبعاثه بالفعل والموجود في الغلاف الجوي [4]. وهناك العديد من الطرق التي يمكن من خلالها إزالة ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي والتخلص منه، مثل زراعة الأشجار وتطهير التربة الملوثة لتعود كما كانت، أو معالجة التربة التي أفرط البشر في استخدامها في الزراعة. وحيث إننا بحاجة إلى التخلص من الكثير من ثاني أكسيد الكربون بأقصى سرعة ممكنة، فإننا سنحتاج أيضًا إلى الاعتماد على التقنية التي من شأنها استخلاص ثاني أكسيد الكربون مباشرة من الغلاف الجوي. تعرف هذه التقنية باسم الاستخلاص المباشر من الهواء (DAC)، وتستخدم في أماكن عديدة حول العالم.

وقد بدأ استخدام تقنية "الاستخلاص المباشر من الهواء" مع تقنية "كاريفيكس" لأول مرة في آيسلندا في عام 2017، وهي مستمرة إلى الآن، حيث طورت شركة Climeworks منشأة تعمل على إزالة ثاني أكسيد الكربون مباشرة من الغلاف الجوي. وتعمل هذه المنشأة على سحب الهواء وترشيح ثاني أكسيد الكربون منه، والذي تتم إذابته لاحقًا في المياه وضخه إلى أعماق الأرض، ومن ثم تحويله إلى حجارة [5]. وبمقدور هذه المنشأة إزالة 50 طنًا تقريبًا من ثاني أكسيد الكربون كل عام، وهذه الكمية تعادل الكمية التي تتخلص منها 2000 شجرة تقريبًا.

ويجب أن تطبق هذه التجربة على نطاقٍ أوسع من ذلك بكثير في المستقبل. وتخطط آيسلندا في السنوات القادمة للتوسع في تشييد منشآت "الاستخلاص المباشر من الهواء"، وهو ما من شأنه المساعدة في زيادة كمية ثاني أكسيد الكربون المستخلصة داخل الصخور في باطن الأرض، إلا إن هذه المهمة ليست بالأمر اليسير.

### الاستخلاص المباشر من الهواء (DIRECT AIR CAPTURE)

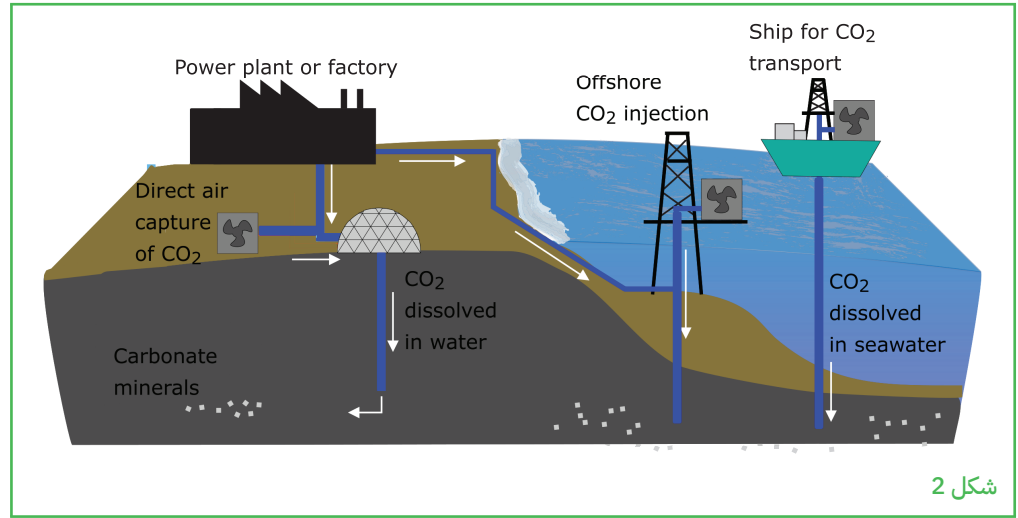
استخلاص ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي.

## مستقبل التخلص من ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي

علمت الآن أن العناصر اللازمة لتحويل ثاني أكسيد الكربون إلى حجارة تشمل وجود مصدر للغاز، والصخور البركانية والمياه. وقد نحتاج في بعض الحالات إلى نقل الغاز عبر الأنابيب أو السفن إلى موقع يمكن من خلاله ضخ الغاز في النوع الصحيح والمناسب من الصخور (الشكل 2). توجد الصخور البركانية، مثل البازلت والبيريدوتيت، بوفرة في الأرض. وفي الحقيقة، فإن البازلت يعتبر أكثر أنواع الصخور انتشارًا وشيوعًا على سطح الأرض، حيث يغطي معظم مساحة قيعان المحيطات وقرابة 5% من مساحة القارات (الشكل 3). ومن ثم، فإن المخزون العالي من جميع أنواع البازلت على الأرض أكبر من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون التي تنتج عن حرق جميع أنواع الوقود الأحفوري عليها [2]، وهو ما يعني أن لدينا وفرة من الأنواع المناسبة من الصخور اللازمة للتخزين الناجح لثاني أكسيد الكربون في المواد المعدنية؛ وإلا فإنها ستؤثر سلبيًا على غلافنا الجوي. وحيث إن بعض المناطق قد تعاني من ندرة المياه، فإن العلماء يستكشفون الآن طرقًا لتوفير المياه اللازمة مباشرة من الخزانات الجوفية الطبيعية أو من خلال استخدام مياه البحر.

### شكل 2

ربما تُستخدم عملية "كربنكس" في المستقبل على نطاق واسع لاستخلاص ثاني أكسيد الكربون من محطات الطاقة والمصانع، أو من الغلاف الجوي مباشرة، وضخه في جوف الأرض على الشاطئ أو في عرض مياه البحر. الشكل Chiara Marieni



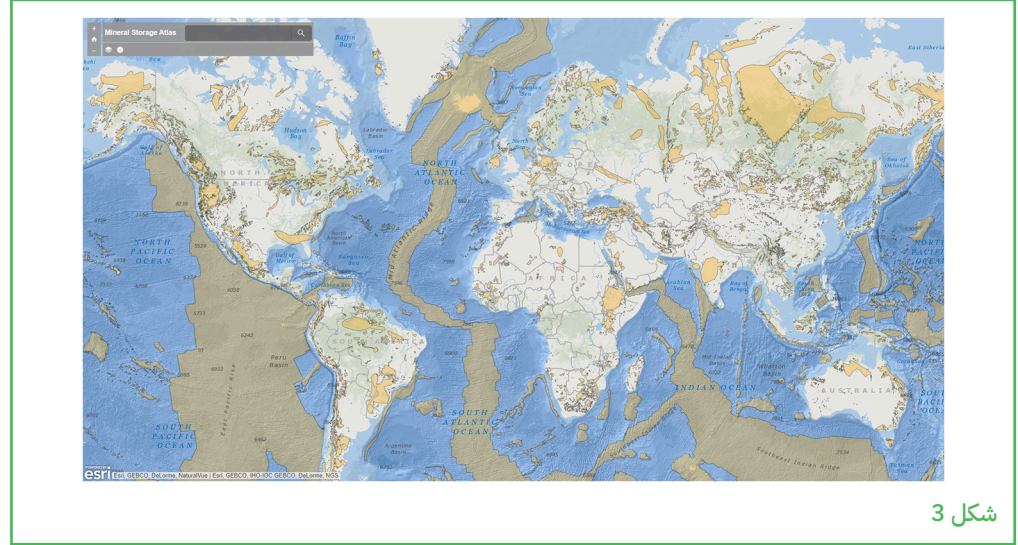
شكل 2

إن مهمة استخلاص ثاني أكسيد الكربون وتخزينه ليست بالأمر اليسير. فإذا أردنا أن نحمي الأرض وحياتنا البشرية في السنوات القادمة، فعلينا استخلاص ثاني أكسيد الكربون وتخزينه على نطاق واسع من ذلك بكثير. يجب استخلاص ثاني أكسيد الكربون من انبعاثات المصانع ومحطات الطاقة، فضلًا عن استخلاصه مباشرةً من الغلاف الجوي. ولكن السؤال الذي لا يزال مطروحًا هو: "ما كمية ثاني أكسيد الكربون التي سنتمكن من تحويلها إلى حجارة؟ وهل ستكون هذه الكمية كافية لحماية الأرض وسكانها من التأثيرات الخطرة الناجمة عن التغير المناخي؟".



## شكل 3

المواقع التي يمكن فيها العثور على الصخور المناسبة لتحويل ثاني أكسيد الكربون إلى حجارة. حيث يشير اللون البني الفاتح إلى الأجزاء الحديثة من الارتفاعات المتطاولة المحيطية والمناطق التي يوجد بها صخور بركانية مناسبة لتحويل ثاني أكسيد الكربون إلى حجارة (من [carbfix.com/atlas](http://carbfix.com/atlas)).



شكل 3

## مقال المصدر الأصلي

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

## المراجع

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. *CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> with direct air capture. *Energy Proc.* 146:129–34. doi: 10.1016/j.egypro.2018.07.017

نُشر على الإنترنت بتاريخ: 09 يناير 2023

المحرر: Leonardo Fraceto

'مرشدو العلوم': Nina Markham

الاقتباس: Snæbjörnsdóttir SÓ, Steinþórsdóttir K, Snorradóttir SÓ and Helgason K (2023) كيف يمكن تحويل ثاني أكسيد الكربون إلى حجارة؟ Front. Young Minds doi: 10.3389/frym.2021.579895-ar

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

إقرار تضارب المصالح: يعلن المؤلفون أن البحث قد أُجري في غياب أي علاقات تجارية أو مالية يمكن تفسيرها على أنها تضارب محتمل في المصالح.

Snæbjörnsdóttir, Steinþórsdóttir, 2023 © 2021 © COPYRIGHT Snorradóttir and Helgason. هذا مقال مفتوح الوصول يتم توزيعه بموجب شروط ترخيص المشاركة الإبداعية (Creative Commons Attribution License (CC BY)). يُسمح باستخدام أو التوزيع أو الاستنساخ في منتديات أخرى، شريطة أن يكون المؤلف (المؤلفون) الأصلي أو مالك (مالكو) حقوق النشر مقيّدًا وأن يتم الرجوع إلى المنشور الأصلي في هذه المجلة وفقًا للممارسات الأكاديمية المقبولة. لا يُسمح بأي استخدام أو توزيع أو إعادة إنتاج لا يتوافق مع هذه الشروط.

## المراجعون الصغار

**FDR-HB\_PERU IGEM، العمر: 14-17**

نحن فريق أحياء تخليقية نعمل في المصنع العالي للهندسة الوراثية (iGEM) في ليما، بيرو. نحن الفريق الوحيد في المدارس الثانوية في أمريكا اللاتينية المتخصص في هذا الأمر، ونحن فخورون بعملنا الذي يُعني بتصنيع كاشف عن الكاديوم باستخدام البكتيريا. ويتحدث معظمنا لغة ثانية، ويتراوح معدل الأعمار في مجموعتنا بين 14-17 عامًا. نحن نحب روح الفريق!

## المؤلفون

**SANDRA Ó. SNÆBJÖRNSDÓTTIR**

أنا منبهرة بجميع أنواع الصخور منذ طفولتي، حيث كنت أسافر مع أجدادي في جميع أنحاء أيسلندا. كما أنني مفتونة بالجبال على مختلف أشكالها، ثم بدأت أهتم مؤخرًا بالصخور المدفونة عميقًا والتي يمكننا إخراجها إلى سطح الأرض عن طريق حفر آبار فيها. وعلى مدار العامين الماضيين، درست الطريقة الطبيعية لتخزين ثاني أكسيد الكربون وكيفية تفاعله مع الصخور خلال رحلة تحويله إلى حجارة. وآمل أن تكون هذه العملية بمثابة المفتاح لبعض الحلول التي نحتاجها لحل أزمة المناخ. \*[sandraos@carbfix.com](mailto:sandraos@carbfix.com)

**KATRÍN STEINÞÓRSDÓTTIR**

بدء اهتمامي بالصخور منذ طفولتي، حيث كانت هذه الصخور السوداء الناعمة المعروفة بالبازلت توجد في ملعب الحي الذي أسكن فيه. ثم درست مؤخرًا البراكين التي تشكل هذه الصخور. وأنا أعمل الآن على نوع آخر مشابه من الصخور التي تتكون تحت القشرة الأرضية والتي تعرف باسم "البيريديوتيت". ويمكن استخدام هذين النوعين من الصخور في تخزين



ثاني أكسيد الكربون والمساعدة في مواجهة التغير المناخي - وأنا مهتمة بنوعية الأجزاء التي يمكن استخدامها من هذه الصخور ومكان العثور عليها.



### SELJA ÓSK SNORRADÓTTIR

حفيظتي وهمتي نحو الابتكار والاستدامة في وقت مبكر من حياتي هما ما أثارا اهتمامي حول المحافظة على البيئة الطبيعية وحمايتها من تأثير التغير المناخي. أدرس كلاً من العلوم التجارية وعلوم الاستدامة في الجامعة. وأعمل الآن كمستشارة في شركة برمجيات بيئية، والتي تعمل على مساعدة المدن والشركات والمنظمات على قياس البصمة الكربونية باستخدام البيانات الآنية وتحديد الأهداف حول كيفية الحد من البصمة الكربونية لها.



### KÁRI HELGASON

أثار الثراء الكوني الذي يتمتع به العالم اهتمامي وشغفي بالعلوم الطبيعية. وقد ساعدت الوظيفة التي حصلت عليها في سن مبكرة في مجال الفيزياء الفلكية على جعلني مهتمًا وشغوفًا بالعديد من الكواكب التي يتم اكتشافها خارج النظام الشمسي. وقد تحول اهتمامي الآن إلى كوكب الأرض، وأنا ملتزم بإزالة غاز ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي والتخلص منه عن طريق تحويله إلى حجارة، حيث إنه الكوكب الوحيد المأهول بالسكان الذي نعرفه حتى الآن.

جامعة الملك عبدالله  
للعلوم والتقنية  
King Abdullah University of  
Science and Technology



النسخة العربية مقدمة من  
Arabic version provided by