

נקודות מפנה: הפתעות אקלימיות

Sofia Palazzo Corner^{1*}, Chris D. Jones^{2†}

¹המרכז למדיניות סביבתית, אימפריאל קולג' לונדון, לונדון, בריטניה

²Met Office Hadley Centre, אֶקְסְטֶר, בריטניה

אחד הממצאים המדעיים הידועים הוא כי ככל שיותר גזי חממה משוחררים, כך העולם מתחמם יותר. אולם, האם בנקודה מסוימת, כמות קטנה של גזי חממה נוספים יכולה לגרום לשינוי גדול מאוד באקלים? והאם השינוי הזה עלול להיות בלתי הפיך? כאשר שינוי קטן מחולל השפעה נרחבת וארוכת-טווח, אנו מכנים זאת נקודת מפנה. מדענים מנסים להבין אם ישנן נקודות מפנה במערכת האקלים של כדור הארץ, ואם כן, מהן ההשפעות האפשריות שלהן.

מהי נקודת מפנה?

כאשר שינוי קטן מאוד יוצר השפעה גדולה, ארוכת-טווח, אנו מכנים זאת **נקודת מפנה**. בשפה מדעית, אנו אומרים שמערכת עוברת מ"מצב" אחד לאחר. כדי להבין את ההגדרה הזו, נבחן דוגמה של נקודת מפנה מחיי היומיום שלנו. דמיינו שאתם רוכבים על אופניים לאורך פסגה של גבעה (איור 1). בכל פעם שאתם דוחפים את הדוושות, אתם נעים מעט יותר קדימה, עד שדחיפה אחת שולחת אתכם סנטימטר מכריע אחד לכיוון הקצה. לפתע אתם נעים מטה לאורך המדרון באופן בלתי הפיך, כל הדרך עד לתחתית. בכך שביצעתם את הדחיפה האחרונה הזו

סוקר צעיר

DAVID

גיל: 11

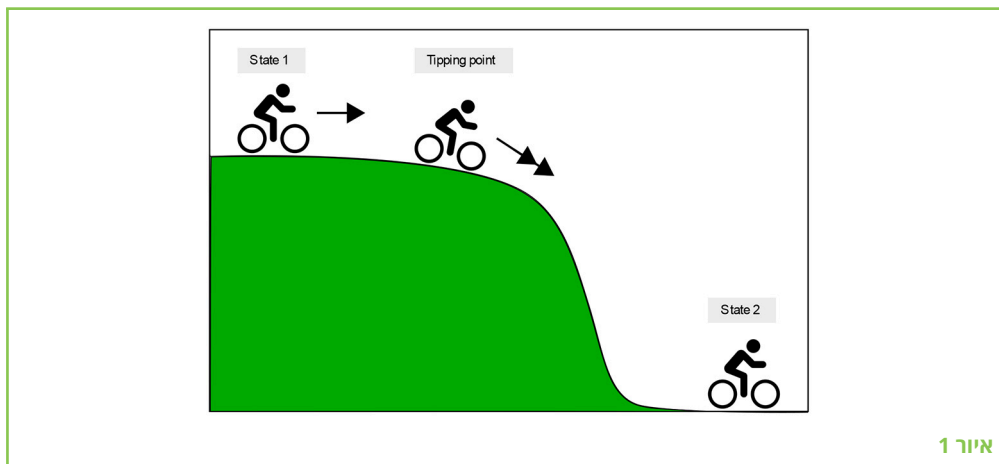


נקודת מפנה (Tipping Point)

סף במערכת שכאשר עוברים אותו גורם לשינויים גדולים. קצה של גבעה הוא דוגמה לנקודת מפנה – מעבר הקצה מוביל מהפסגה לתחתית.

איור 1

המחשת המושג 'נקודת מפנה' באמצעות דוגמת האופניים. כשאתם רוכבים על אופניים לאורך פסגה של גבעה, הדחיפה האחרונה בדוושות לוקחת אתכם אל מעבר לנקודת המפנה. אז, אותה דחיפה שולחת אתכם באופן בלתי הפיך כל הדרך למטה לתחתית.



איור 1

סף

(Threshold)

הערך שצריך לעבור כדי שמערכת תנוע ממצב אחד לאחר.

בדוושות, אתם עוברים את ה**סף** שלוקח אתכם ממצב אחד – היותכם בפסגת הגבעה, למצב אחר – היותכם בתחתית.

מדענים עמלים במטרה להבין אם ישנן נקודות מפנה במערכת האקלים של כדור הארץ, ואם כן, אילו סוגים של השפעות גלובליות יכולים להיות לנקודות המפנה האלה בעתיד. נתאר כעת את האזורים במערכת האקלים של כדור הארץ שבהם נראה הכי סביר שהתנהגות סף זו תתרחש.

נקודת מפנה של יריעות קרח

לכדור הארץ יש שתי יריעות קרח גדולות: יריעת הקרח בגרינלנד בצפון, ויריעת הקרח באנטרקטיקה בדרום. נבחן את יריעת הקרח בגרינלנד כדוגמה.

יריעת קרח זו היא שריד מעידן הקרח הקודם – כלומר לא נוצרה באקלים שלנו כיום, אלא היא שארית מהתקופה שבה האקלים היה הרבה יותר קר. יריעת הקרח בגרינלנד כל כך עבה שהיא מגיעה לגובה של יותר מ-2 קילומטרים מעל גובה פני הים. בגובה זה, האוויר הרבה יותר קר מאשר בגובה פני הים, מה שמסייע לקרח להישאר קפוא. בעבר, האוויר היה מספיק קר כדי לעצור המסת מהירה מדי של הקרח. זה אֶפְשָׁר לשלג שנחת על פני השטח של יריעת הקרח להחליף את הקרח שנמס ואבד לאוקיינוס. אולם ככל שחום רב יותר נכלא בכדור הארץ על ידי גזי החממה באטמוספירה, האוויר מתחמם. במצב זה, יריעת הקרח נמסה מהר יותר מהמהירות שבה היא יכולה להיות מוחלפת על ידי השלג היורד.

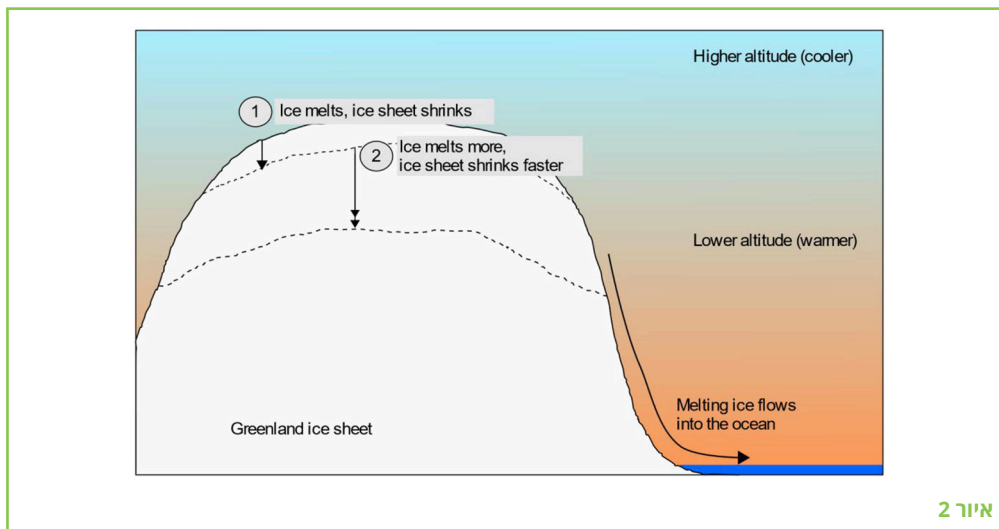
כאשר הקרח נמס, יריעת הקרח מתכווצת – היא נעשית קטנה יותר ונמוכה יותר. בגבהים הנמוכים האלה, יריעת הקרח חשופה לאוויר חם יותר. ככל שיותר קרח נמס, כך יריעת הקרח מתקצרת. זה גורם ליותר קרח להימס, מקטין עוד יותר את יריעת הקרח, דבר שגורם להתחממות נוספת, וכך הלאה (איור 2) [1]. תופעה זו ידועה בתור **לולאת היזון חוזר מחזקת** – ככל שהיא מתרחשת יותר, כך היא מחריפה. בנקודה קריטית, מדענים סבורים שיריעת הקרח תעבור סף שבו היא תנוע באופן בלתי הפיך ממצב של קרח קבוע למצב ללא קרח קבוע – יריעת הקרח תעבור נקודת מפנה, שאחריה היא תיעלם לחלוטין באופן בלתי נמנע [2].

לולאת היזון חוזר מחזקת (Self-Reinforcing Feedback Loop)

תהליך אשר מתחזק ככל שהוא מתרחש יותר. ההימסות של יריעת הקרח בגרינלנד והתכווצותה הן דוגמה ללולאת היזון חוזר מחזקת.

איור 2

**ההימסות של יריעת הקרח
בגרינלנד היא דוגמה
ללולאת היזון חוזר מחזקת.**
כאשר האקלים מתחמם,
יריעת הקרח נמסה ומתקצרת.
בגבהים נמוכים יותר, האוויר
חם יותר, ולכן היריעה
מתכווצת עוד יותר. נקודת
המפנה תהיה בסף שבו הקרח
ימשיך להימס באופן בלתי
הפיך עד שייעלם לגמרי.



נקודת מפנה של הקרקע

יער הגשם באמזונס הוא אחת מהמערכות האקולוגיות הגדולות ביותר בכדור הארץ. יער זה סופג כל כך הרבה פחמן דו-חמצני עד שלעיתים הוא מְכַנֶּה 'הריאות של כדור הארץ'. ללא יער האמזונס, כמות גדולה הרבה יותר של פחמן דו-חמצני הייתה תקועה באטמוספירה. כפי שאולי ניחשתם משמו, יער הגשם דורש כמות רבה של גשם. יער האמזונס גדול כל כך עד שהוא יוצר עד כחציית מהגשם שלו רק מהמים שמתאדים מהצמחים ומהאדמה [3]. בלי מספיק גשם, יער הגשם נעשה חשוף לשינויים גדולים.

כאשר האקלים מתחמם, תבניות של גשם משתנות גם הן. מודלים של אקלים חוזים הפחתה בגשם מעל האמזונס עם עליית הטמפרטורות הגלובלית. דבר נוסף שמחריף את המצב הוא העובדה שיער האמזונס גם מתכווץ כתוצאה מִבְּרוּא (כריתת עצים על ידי בני אדם), אשר בתורו מפחית את כמות הגשם שיער הגשם יכול לייצר מהאיזוי העצמי שלו. אם אין מספיק גשם ויער האמזונס מתייבש יותר מדי, הדבר עלול לגרום לתופעה שנקראת דעיכה (dieback), שמשמעותה היא שהעצים ימותו ולא יצמחו מחדש. במקום זאת, יער הגשם יוחלף על ידי אזורים של דשא וערבות (איור 3) [4, 5].

תופעת **דעיכת האמזונס** תסיר **סופג פחמן** גדול ממערכת האקלים של כדור הארץ. המשמעות היא שיותר גזי חממה יישארו באטמוספירה וימשיכו לחמם את כדור הארץ במהירות גוברת. הנקודה שבה אין מספיק עצים באמזונס, או שאין מספיק גשם, היא דוגמה לנקודת מפנה אפשרית על גבי הקרקע.

נקודת מפנה של האוקיינוס

באוקיינוס, ישנו אוסף של זרמי מים גדולים שנקרא **זרימת התהפכות מרידיאלית אטלנטית**. הזרמים האלה נושאים מים מאזורים טרופיים (ליד קו המשווה) צפונה לכיוון אוקיינוס הקרח הצפוני (האוקיינוס הארקטי). שם המים מתקררים, שוקעים, ואז נעים חזרה לאזורים הטרופיים. הזרימה המחזורית הזו מניעה את עצמה – ככל שיותר מים שוקעים בצפון, כך יותר מים מובאים

דעיכת האמזונס

(Amazon Dieback)

אובדן של ביומסה כתוצאה משינויי אקלים, כמו למשל שינויים בתבניות יערות גשם ועלייה בכמות השרפות.

סופג פחמן

(Carbon Sink)

משהו שסופג יותר פחמן ממה שהוא משחרר, ולכן מסיר פחמן מהאטמוספירה. יערות גשם הם דוגמה לסופגי פחמן.

זרימת התהפכות

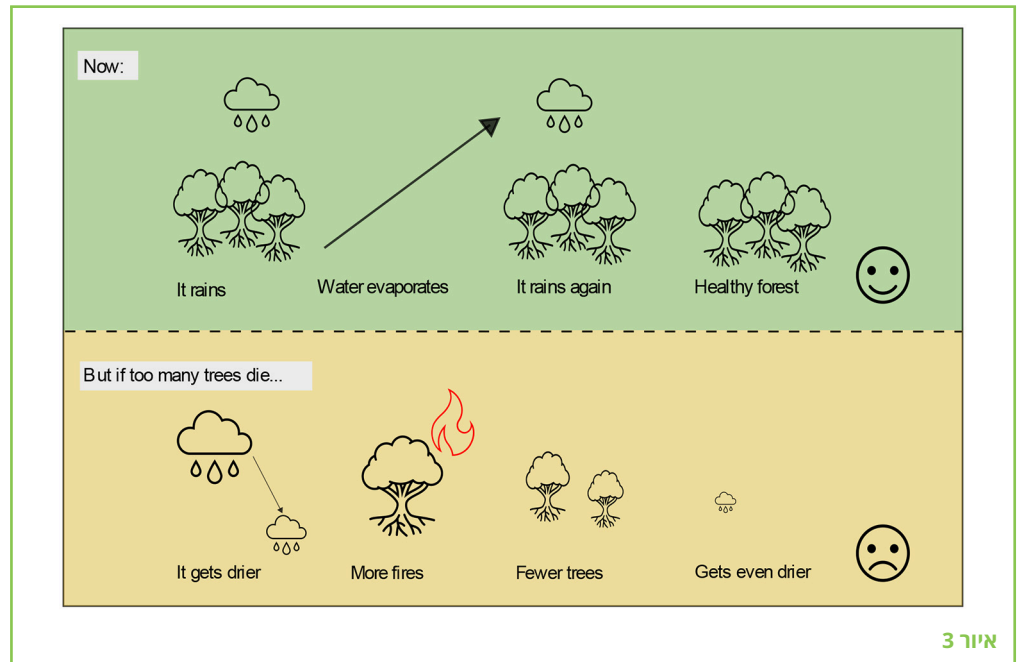
מרידיאלית אטלנטית

[Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC)]

מערכת של זרמים באוקיינוס האטלנטי, שמניעה מים באופן מחזורי מהאזורים הטרופיים לצפון האוקיינוס האטלנטי.

איור 3

**תבניות גשם משתנות
ובירוא עלולים להוביל
לנקודת מפנה עבור יער
הגשם באמזונס.** כאשר כמות
העצים ביער האמזונס
פוחתת, יורד באזור זה גם
פחות גשם. בסופו של דבר, זה
עלול להוביל לדעיכת האמזונס
- מצב שבו העצים מוחלפים
על ידי אזורי דשא. מאחר
שהאמזונס הוא סופג פחמן
חשוב, תופעת דעיכת
האמזונס עלולה להפריע
למערכת האקלים של
כדור הארץ.



איור 3

מעלה מהאזורים הטרופיים לכיוון הצפון, שם, בתורם, הם שוקעים שוב. אולם כאשר יריעת הקרח בגרינלנד נמסה וכמות הגשם גדלה, כך נפח גדול יותר של מים מתוקים וקרים זורם לחלק הצפוני של האוקיינוס האטלנטי [6]. המים המתוקים האלה מתערבבים עם המים המלוחים, מה שגורם להם להיות קלים יותר ובעלי סיכויים נמוכים יותר לשקוע. דבר זה מחליש את זרימת המים, וגורם לזרימת ההתהפכות המרידיאלית האטלנטית להאט.

מדעני אקלים ואוקיינוגרפים מנסים להבין אם ההאטה הזו תוכל אי פעם להפוך לעצירה מוחלטת, כלומר זרימת ההתהפכות תיפסק לחלוטין. זרימת ההתהפכות מרידיאלית אטלנטית אחראית על האקלים המתון במערב אירופה - בלעדיה, הטמפרטורות והגשמים שם יהיו די שונים. זרימות המים העצומות האלה חשובות גם לספיגת חום ופחמן. מדענים חוקרים במטרה להבין אם ישנה נקודה קריטית - סף - שבו ההאטה של זרימת ההתהפכות המרידיאלית האטלנטית תוכל להפוך לעצירה בלתי הפיכה שלה [1]. זוהי דוגמה לנקודת מפנה אפשרית באוקיינוס.

מדוע עלינו להיות מודאגים מנקודות מפנה?

אם ישנן נקודות מפנה במערכת האקלים של כדור הארץ, האם נקודת מפנה אחת יכולה להניע את השאר, כמו מפולת של אבני דומיננו? זוהי אפשרות מדאיגה ביותר. אלמנטים שמגיעים לנקודות מפנה יכולים לגרום לשינויים פתאומיים או איטיים, אך בכל מקרה מעבר של סף גורם למערכת לנוע באופן בלתי נמנע לעבר מצב חדש. הגעה לנקודת מפנה באזור אחד במערכת האקלים של כדור הארץ עשויה להגביר את ההסתברות שנגיע לסף של נקודת מפנה באזור אחר. ההשפעה של נקודת מפנה אחת שגורמת לאחרת נקראת **קסקדת נקודת מפנה** [7] (קסקדה מוגדרת כרצף תגובות כימיות או פיזיקליות שאחת מובילה לבאה אחריה).

**קסקדת נקודת מפנה
(Tipping Point
Cascades)**

מצב שבו הגעה לנקודת מפנה אחת גורמת לשינויים באקלים אשר גורמים לנקודת מפנה נוספת, וכן הלאה.

האם כדור הארץ יגיע לנקודות מפנה בקרוב? מערכת האקלים של כדור הארץ מורכבת מאוד. מדענים משתמשים בהרבה פיסות רַאִיִּוֹת שונות כדי להבין מה יקרה בעתיד. הם בונים מודלים אקלימיים ועורכים תצפיות של שינויים במקומות מסוימים, כמו למשל באוקיינוס. בשלב זה, אנו יודעים שכמות גדולה יותר של גזי חממה משמעותה התחממות נוספת. אולם, איננו יודעים בדיוק כמה גזי חממה נדרשים כדי לגרום לנקודת מפנה עבור יריעות הקרח, או לדעיכה של העצים ביער הגשם באמזונס. המשמעות היא שעדיין יש חוסר ודאות רב לגבי נקודות מפנה, מתי הן יכולות להתרחש ומהן השלכותיהן האפשריות [8].

אולם עצם הידיעה שנקודות מפנה עשויות להתרחש יכולה להספיק כדי להשפיע על מה שאנו עושים היום. מאחר שההשלכות של נקודות המפנה שתיארנו הן חמורות כל כך, אפילו ההסתברות הקטנה של הגעה לנקודת מפנה עשויה להיות סיכון שאיננו מוכנים לקחת [9]. זוהי אחת הסיבות העיקריות לכך שכל הממשלות בעולם מנסות להגביל את שינויי האקלים כך שנפחית את הסיכונים של ההשפעות החמורות האלה.

מדענים ימשיכו לעבוד במטרה להבין אם ישנן נקודות מפנה במערכת האקלים של כדור הארץ, ואם כן, מתי הן עשויות להתרחש ומה עשוי לקרות בעקבות ההגעה אליהן. ככל שנלמד עוד על נקודות מפנה, כך נוכל לתכנן דרכים להימנע מהן בצורה טובה יותר, או לכל הפחות לתכנן כיצד להתמודד איתן אם אכן יתרחשו. האפשרות של הגעה לנקודות מפנה ולהתרחשות קסקדת נקודות מפנה, היא סיבה מצוינת עבורנו לבצע הרבה פעולות חיוביות היום במטרה להפחית את פליטות גזי החממה שלנו.

מקורות

1. Good, P., Bamber, J., Halladay, K., Harper, A. B., Jackson, L. C., Kay, G., et al. 2018. Recent progress in understanding climate thresholds: Ice sheets, the Atlantic meridional overturning circulation, tropical forests and responses to ocean acidification. *Progr Phys Geogr.* 42:24–60. doi: 10.1177/0309133317751843
2. Robinson, A., Calov, R., and Ganopolski, A. 2012. Multistability and critical thresholds of the Greenland ice sheet. *Nat Clim Change.* 2:429–32. doi: 10.1038/nclimate1449
3. van der Ent, R. J., Savenije, H. H. G., Schaefli, B., and Steele-Dunne, S. C. 2010. Origin and fate of atmospheric moisture over continents. *Water Resour Res.* 46, W09525. doi: 10.1029/2010WR009127
4. Lovejoy, T. E., and Nobre, C. 2018. Amazon tipping point. *Sci Adv.* 4:eaat2340. doi: 10.1126/sciadv.aat2340
5. Staal, A., Fetzer, I., Wang-Erlandsson, L., Bosmans, J. H. C., Dekker, S. C., van Nes, E. H., et al. 2020. Hysteresis of tropical forests in the 21st century. *Nat Commun.* 11:4978. doi: 10.1038/s41467-020-18728-7
6. Lohmann, J., and Ditlevsen, P. D. 2021. Risk of tipping the overturning circulation due to increasing rates of ice melt. *Proc Natl Acad Sci USA.* 118:e2017989118. doi: 10.1073/pnas.2017989118
7. Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T. M., Folke, C., Liverman, D., et al. 2018. Trajectories of the earth system in the anthropocene. *Proc Natl Acad Sci USA.* 115:8252–9. doi: 10.1073/pnas.1810141115

8. Wang, S., and Hausfather, Z. 2020. ESD reviews: mechanisms, evidence, and impacts of climate tipping elements. *Earth Syst. Dynam. Disc.* 1–93. doi: 10.5194/esd-2020-16
9. Lenton, T. M., Rockstrom, J., Gaffney, O., Rahmstorf, S., Richardson, K., Steffen, W., et al. 2019. Climate tipping points - too risk to bet against. *Nature*. 575:592–5. doi: 10.1038/d41586-019-03595-0

פורסם אונליין: 26 באפריל 2022

נערך על ידי: Dominik K. Großkinsky

מנחה מדעי: Melissa Mageroy

ציטוט: Palazzo Corner S and Jones CD (2022) נקודות מפנה: הפתעות אקלימיות. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2021.703610-he

תורגם והותאם: Palazzo Corner S and Jones CD (2021) Tipping Points: Climate Surprises. *Front. Young Minds* 9:703610 doi: 10.3389/frym.2021.703610

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

COPYRIGHT © 2021 © Palazzo Corner and Jones 2022. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון Creative Commons Attribution License (CC BY). השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחברים (המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה). השימוש, ההפצה או ההעתקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

סוקר צעיר

DAVID, גיל: 11

אני אוהב לדוג ולבלות בחוץ. המזון האהוב עליי הוא שפמנון מטוגן ברוטב טרטור. הצבע האהוב עליי הוא ירוק עמוק מתכתי. הסרט האהוב עליי הוא הארי פוטר והאסיר מאזקבן.



הכותבים

SOFIA PALAZZO CORNER

סופיה פלאזו קורנר היא דוקטורנטית באימפריאל קולג' לונדון. היא חוקרת תהליכים בעלי הסתברות נמוכה והשפעה חזקה על מערכת האקלים של כדור הארץ. חלק מתהליכים אלה כוללים נקודות מפנה. אחד המנחים של סופיה הוא דוקטור כריס ד. ג'ונס. לסופיה יש תואר ראשון בפיזיקה ותואר שני במתמטיקה יישומית. היא רוכבת אופניים מצוינת, ויודעת הכול על רכיבה מהירה מדי במדרונות של גבעות. *s.palazzo-corner19@imperial.ac.uk



**CHRIS D. JONES**

דוקטור כריס ד. ג'ונס הוא חוקר אקלים ב-Met Office Hadley Centre בבריטניה. בעל ניסיון של יותר מ-25 שנים בכתיבת תוכנות מחשב שממְדלות את האופן שבו האקלים משפיע על המערכות האקולוגיות הטבעיות שלנו, ואת האופן שבו מחזור הפחמן מסייע להפחית את כמות זיהום הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה. ד"ר ג'ונס מוביל תוכנית מחקר עם שותפים בברזיל, וביקר באתרי מחקר ביער הגשם באמזונס. התמונה שכאן צולמה על פסגת הר הגעש מאונה לואה בהוואי, שם מודדים את הפחמן הדו-חמצני.
[†]orcid.org/0000-0002-7141-9285

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