

יואב יאיר

בית הספר לקיימות, אוניברסיטת רייכמן

ציטוט מומלץ

יאיר י, 2022. הנדסת אקלים – ההבטחה, הסכנות והמוצא האחרון. אקולוגיה וסביבה 13(3): 49-42.



משלחת מחקר לבחינת השפעת האקלים על המערכות האקולוגיות והכימיה של סביבת אוקיינוס הקרח הצפוני והאוקיינוס השקט, ליד אלסקה. עדויות על השפעות נרחבות של האקלים על הסביבה והצפי להתעצמותן הם המוטיבציה המרכזית לבחינת אפשרויות להתערבות מכוונת במערכות האקלים בקנה מידה נרחב | באדיבות: נאס"א

הנדסת אקלים – ההבטחה, הסכנות והמוצא האחרון

גיליון סתיו 2022 / כרך 13(3) / הפחתת פליטות גזי חממה / 15 בנובמבר, 2022

סקירות

על קצה המזלג

- שינוי האקלים הוא תוצאה של פעילות אנושית – פיתוחים מדעיים וטכנולוגיים חסרי תקדים העושים שימוש נרחב במשאבי כדור הארץ, לרווחת האדם.
- לנוכח המשבר שהאנושות ניצבת בפניו, נראה שכולנו צריכים לשנות את אורחות חיינו ולפעול להפחת פליטות. יש המקווים שעוד ניתן להימנע מצעדים דרסטיים כאלה, ויש החוששים שיתגלה בשנים הקרובות שבני האדם לא יצליחו לעמוד באתגר. הנדסת האקלים יכולה לעזור גם לאלה וגם לאלה, ולרתום את הידע המדעי-טכנולוגי לטובת פיתוח שיטות להתערבות אנושית בתנאים האטמוספריים שיוצרים את אפקט החממה.
- הנדסת אקלים כוללת שתי משפחות עיקריות של שיטות התערבות: כאלה המתמקדות בהפחתת ריכוז הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה, וכאלה שנועדו להפחית את כמות קרינת השמש החודרת את האטמוספירה ומגיעה לכדור הארץ.
- הנדסת אקלים מגלמת תקווה גדולה המוטמעת בתרבות של אופטימיות טכנולוגית, אך מעוררת דילמות אתיות כבדות משקל וחששות כבדים מפני השפעתה על מערכות של משובים אטמוספריים מורכבים וקשים לחיזוי.

תקציר

הנדסת אקלים היא מונח שמתאר ניסיון להשפיע על האקלים של כדור הארץ בצורה כוללת, עולמית ויזומה תוך שימוש בטכנולוגיות שונות. היות ששינוי האקלים מציב איומים משמעותיים למדינות רבות בעולם, העניין בהנדסת אקלים נובע מחיפוש אחר פתרונות לשינוי האקלים, ומציאתם היא אחד האתגרים המרכזיים העומדים בפני האנושות בעשורים הראשונים של המאה ה-21. שינוי האקלים והמשבר שהוא מחולל נובעים מהעלייה הברורה בריכוז גזי החממה באטמוספירה מאז המהפכה התעשייתית באמצע המאה ה-19, ובפרט העלייה בריכוז הפחמן הדו-חמצני מ-280 ל-420 חלקים למיליון.

יש אינדיקציות רבות לכך שמערכת האקלים יצאה מהיציבות היחסית שאפיינה אותה לאחר תום עידן הקרח האחרון לפני כ-20 אלף שנה: עלייה בטמפרטורה העולמית, שינויים משמעותיים בשטח כיפות הקרח ובעוביין, עלייה הדרגתית במפלס האוקיינוסים תוך שינוי בדרגת החומציות שלהם, התגברות השכיחות של אסונות טבע כגון בצורות, יובש, גלי חום ובמקביל התחזקות של סופות טרופיות ועימן שיטפונות ומשקעים קיצוניים. הפעילות הדיפלומטית הבין-לאומית הביאה להסכמה נדירה בהסכם פריז שנחתם ב-2015, ובו הצהירו מדינות רבות על כוונתן להפחית את פליטת גזי החממה לאטמוספירה באופן שימתן את ההתחממות לסף נסבל של 1.5 מעלות צלזיוס עד סוף המאה. עם זאת, דומה שאירועים גאופוליטיים וחוסר רצון כלכלי להתגייסות אמיתית לצעדים אלה מטילים צל כבד על האפשרות שהפחתה בלבד תביא אותנו לחוף המבטחים (היחסי) הזה. בשנים האחרונות פתרונות "המוצא האחרון", של הנדסת אקלים יזומה בקנה מידה פלנטרי, הולכים ותופסים אחיזה בשיח הציבורי ועומדים לבחינה מדעית והנדסית מדוקדקת. מטרת הסקירה להלן היא להציג את הטכנולוגיות העיקריות המעורבות בפתרונות אלה, ולדון במשמעויות הנלוות ליישום אפשרי של הנדסת אקלים בעשורים הבאים. אסייג ואומר שבמסגרת המאמר לא אדון בכל הפתרונות האפשריים, אלא רק בבולטים והמתקדמים שבהם.

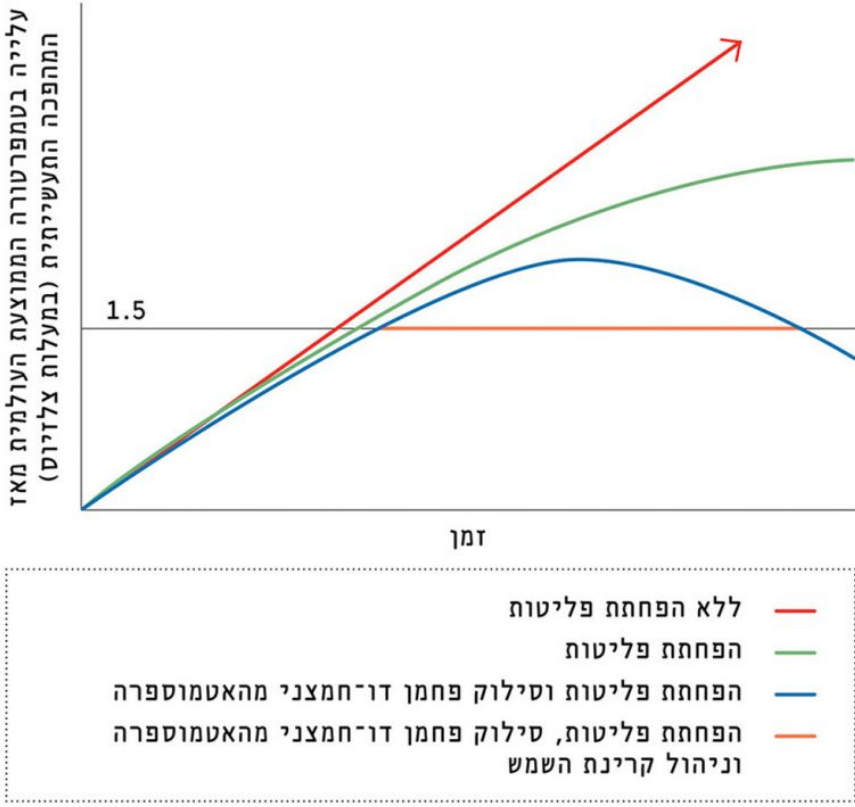
רקע

אחת הסוגיות המעניינות שתופסת מקום הולך וגדל בשיח הציבורי סביב משבר האקלים היא השאלה אם יש לבצע התערבות מכוונת בקנה מידה נרחב במערכת האקלים כדי להקטין או אף לנטרל לחלוטין את המגמות החזיות של שינוי אקלים קיצוני וכנראה בלתי הפיך בעשורים הבאים. הטיעון הבסיסי של תומכי "הנדסת אקלים" (Geoengineering) קובע שלא ניתן לעבור לכלכלה דלת-פחמן או לאפס פליטות גזי חממה במהירות וביעילות מספקת, ומשום כך לא ניתן יהיה להגיע ליעדים המוצהרים בהסכם פריז מ-2015 ולמנוע את העלייה בריכוז גזי החממה באטמוספירה ואת שינוי האקלים הצפוי בעקבותיה. מכאן, שיש לנקוט פעולה יזומה בקנה מידה עולמי במקביל לניסיונות ההפחתה, או לכל הפחות לבחון את ההיתכנות של פתרונות ממשפחה זו. הנדסת האקלים הפכה בעשור האחרון מתחום איזוטרי ותאורטי בלבד, לכזה שזוכה להתייחסות רצינית של מדענים ומקבלי החלטות, וגם מקבל תקציבי מחקר. הוא גם מעורר מחלוקת עזה ושפע של מידע מסלף באשר לסיכויים ולסכנות הטמונות בו. למשל, יש הטוענים שחלק מהקביעות המופיעות בשיח התקשורת לגבי הנדסת אקלים עלולות להתקבע ולהפוך ל-"עובדות", ולכן הם ממפים את הדיוק של האמירות לגבי פתרונות כאלה ומפריכים תפיסות שגויות [14].

מה הם אותם פתרונות שמציעה הנדסת האקלים? בחלוקה עקרונית ניתן להגדיר שתי משפחות של פתרונות: האחת עוסקת בסילוק עודפי הפחמן הדו-חמצני מהאטמוספירה באמצעים שונים, והשנייה בהשגת שליטה וניהול של כמות קרינת השמש הנכנסת למערכת האקלים. השיטות השונות בכל אחת מהקטגוריות נבחנות בספרות המחקרית באופן תאורטי, וחלק מהן גם באופן מעשי בקנה מידה קטן יחסית. עד עתה, יש לומר, לא ננקטה פעולה נחרצת בהיקף עולמי באף אחד מסוגי הפתרונות, ועיקר העיסוק הנוכחי בהם הוא ברמה העקרונית – החל מסוגיות מדעיות-הנדסיות וכלה בהיבטים כלכליים, משפטיים ופוליטיים. [איור 1](#) מתאר בצורה סכמטית את הטמפרטורה העולמית החזויה אם נסתפק רק באפחות (הפחתת פליטות, mitigation) לעומת אסטרטגיה משולבת של הפחתה והנדסת אקלים משני הסוגים.

איור 1. מהלך סכמטי של הטמפרטורה העולמית כפונקציה של הזמן כתלות באופני התנהלות שונים לגבי הפחתת פליטת גזי חממה ושימוש באסטרטגיות של הנדסת אקלים

ראוי לציין שהערך של 1.5 מעלות צלזיוס מתייחס להגדרת היעד של הסכם פריז, ומשמש באיור כקו ייחוס, אבל אינו מייצג בהכרח מספר מדויק בהקשר של האסטרטגיות השונות. האיור מבוסס על Jones et al., 2018.^[7]



איור 1. מהלך סכמטי של הטמפרטורה העולמית כפונקציה של הזמן כתלות באופני התנהלות שונים לגבי הפחתת פליטת גזי חממה ושימוש באסטרטגיות של הנדסת אקלים

ראוי לציין שהערך של 1.5 מעלות צלזיוס מתייחס להגדרת היעד של הסכם פריז, ומשמש באיור כקו ייחוס, אבל אינו מייצג בהכרח מספר מדויק בהקשר של האסטרטגיות השונות. האיור מבוסס על Jones et al., 2018.^[7]

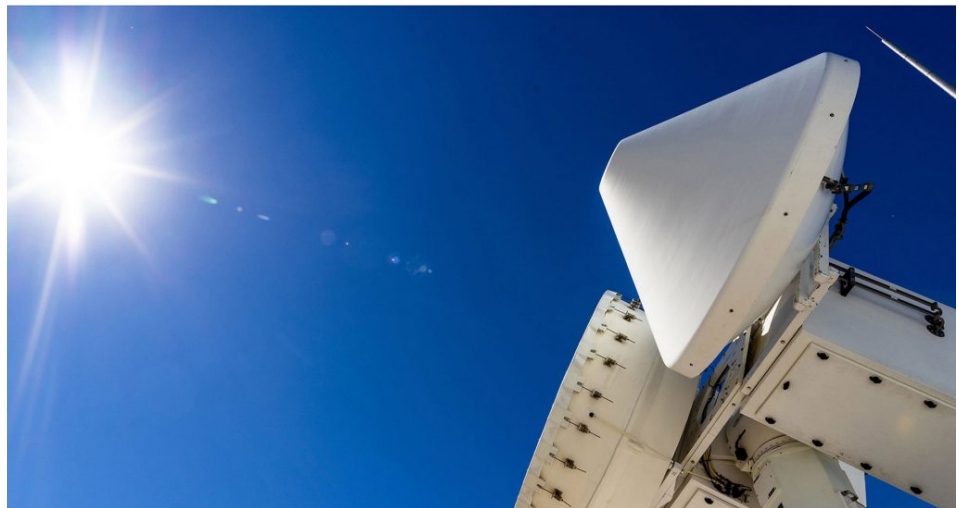
ניהול קרינת השמש (SRM – Solar Radiation Management)

ניהול קרינת השמש המגיעה אל פני כדור הארץ כרוך בשינויים באלבדו של כוכב הלכת שלנו, או במילים אחרות, בהשפעה יזומה על קביעת האחוז של קרינת השמש הנכנסת שמוחזר ישירות אל החלל מבלי להיבלע בפני השטח. אלבדו הוא מספר בין 0 ל-1, שככל שערכו נמוך יותר, משמעותו היא שחלק יחסי גדול יותר מהקרינה לא מוחזר לחלל, אלא נבלע בפני השטח. למשטחים בהירים – כיפות הקרח או עננים – יש אלבדו גבוה והם פועלים כמעט כמראות, המחזירות יותר מ-80% מהקרינה הנכנסת. משטחים כהים, לעומת זאת, הם בעלי אלבדו נמוך של 0.2, הווה אומר רק 20% מהקרינה הפוגעת בהם יוחזרו אל החלל, והיתר ייבלע בפני השטח. הקרינה שנבלעת בפני השטח של כדור הארץ מחממת אותם, ומומרת לקרינה תת-אדומה שנפלטת ונבלעת בגזי החממה באטמוספירה, ובכך תורמת להתחממות. פתרונות ממשפחת ניהול קרינת השמש ישאפו להעלות אך במעט את האלבדו הפלנטרי, שעומד כיום על ערך ממוצע של 0.3. שינוי כזה יבטיח את מניעת ההתחממות המבוקשת.

הכנסת חלקיקים לסטרטוספירה

חלק משיטות ה-SRM המוצעות מתבססות על תצפיות בתופעות טבע, כמו למשל חיקוי של ההשפעה של התפרצויות געשיות חזקות על מאזן האנרגיה והטמפרטורה העולמית. קירור של 1 מעלה צלזיוס ואף יותר יכול להתקבל אם ההתפרצות הגעשית עזה מספיק כדי להעיף אל תוך הסטרטוספירה (השכבה שמתחילה בגובה 12 ק"מ) כמויות גדולות מאוד של חלקיקי אפר געשי. בשל יציבותה של הסטרטוספירה החלקיקים שוהים בה תקופות ארוכות – חודשים ואף שנים – ויוצרים מעין צפיף שמסך שמונע מחלק מקרינת השמש להגיע לפני השטח. ידועה במיוחד ההתפרצות של הר הגעש טמבורה (Tambora) באינדונזיה בשנת 1815, שגרמה להתקררות משמעותית של כדור הארץ, עד כדי כך ששנת 1816 נקראת "השנה ללא קיץ", משום שבמדינות רבות בחצי הכדור הצפוני היה קר וגשום במשך חודשים ארוכים [9]. תופעה דומה נצפתה גם לאחר התפרצות הר הגעש פינאטובו בפיליפינים ביוני 1991, שהביאה לקירור ניכר של האטמוספירה והתבטאה בשינויים נרחבים במחזור ההידרולוגי ברחבי העולם. למשל, נרשמו ירידה חדה בכמות המשקעים בדרום-מזרח אסיה, באירופה ובאפריקה, ולעומת זאת חורף גשום במיוחד בשנה העוקבת בישראל (עונת החורף של 1991/1992 נחשבה לשובת שיאים בישראל, עם כמויות משקעים כמעט כפולות מהמוצט). זריעה יזומה – על-ידי רקטות או צי של מטוסים – של כמויות גדולות של חלקיקים גופריתיים בסטרטוספירה (SAI – Stratospheric Aerosol Injection), תשיג הגדלה זמנית של האלבדו, ועשויה לכן להקטין את כמות קרינת השמש הנכנסת ולצנן את פני השטח. האתגר ההנדסי הוא כיצד לנהל בצורה רציפה את כמויות האבק בסטרטוספירה, שהרי הללו שוקעות לאחר מספר שנים בחזרה אל פני כדור הארץ, ולכן תידרש זריעה מחדשת בחלקיקים מדי כמה חודשים. חישוב ההיתכנות הכלכלית של זריעה ממטוסים מלמד שהעלות הצפויה היא 2.25 מיליארד דולר לשנה במשך 15 שנים ראשונות, בהנחה שיצאו 4,000 טיסות ממספר בסיסים ברחבי כדור הארץ [19]. מחקרים במודלים מתמטיים של האטמוספירה וחישובים של תגובות כימיות בסטרטוספירה מראים שחלקיקים גופריתיים יפגעו בשכבת האוזון, ולכן ממליצים על מינרלים אחרים או על אבקת יהלומים [5], ומכאן ברור שהנושא דורש בדיקה זהירה מאוד.

מאמר שהתפרסם לאחרונה מציע זריעה ממוקדת של חלקיקים בחלק התחתון של הסטרטוספירה, שתבוצע על-ידי צי של מטוסים בגובה 14 ק"מ לערך, שיטוסו באזור קווי הרוחב הגבוהים בלבד (מעל 60° צפון ודרום). החלקיקים יזרעו בעונות האביב והקיץ וייסחפו בהדרגה לאזורים שנמצאים מעל לקטבים. הפחתת הקרינה תביא לקירור במידה מספקת למנוע את המשך ההפשרה המואצת של הקרח המתרחשת כעת [18]. החוקרים ביצעו ניתוח עלות-תועלת וקבעו שניתן לבצע זאת באמצעים קיימים תוך סיכון נמוך מאוד לתושבי האזורים האלה, עם סיכויי הצלחה גבוהים בקירור המבוקש.



מערכת לאיסוף נתונים על התפתחות ענני קונבקציה. ניתן להשפיע על קרינת השמש המגיעה לכדור הארץ על-ידי שינוי תכונות של עננים | צילום: Ben Corda U.S. Department of Energy, ARM User Facility, Flickr, CC BY-NC-SA 2.0

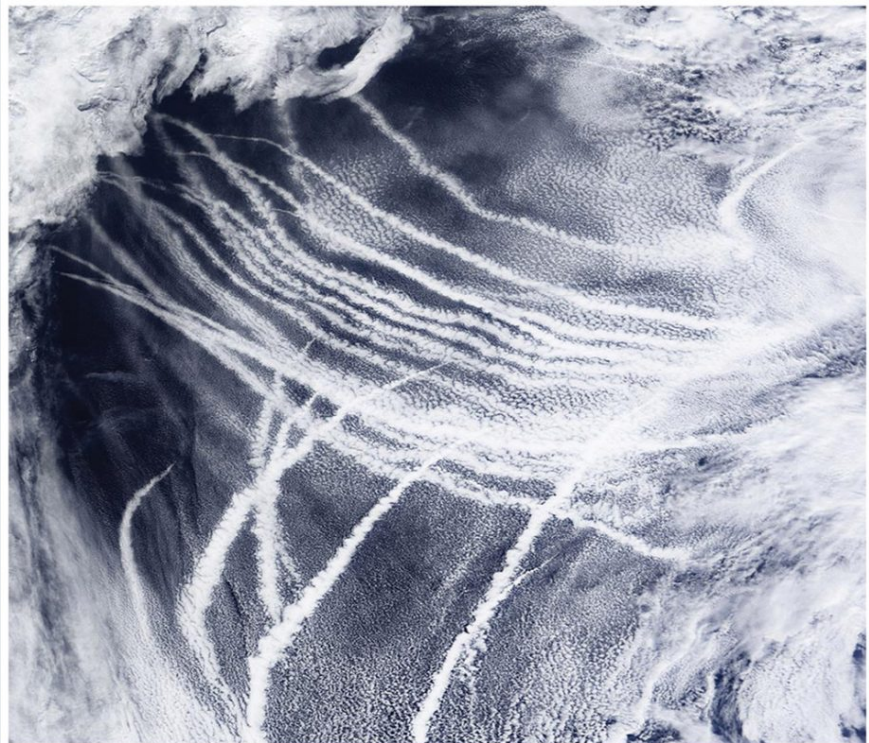
שינוי אלבדו של עננים נמוכים

חלופה ריאליית יותר ממשפחת פתרונות ה-SRM גורסת שאפשר להגדיל את האלבדו של כדור הארץ על-ידי שינוי התכונות המיקרופיזיקליות של עננים, למשל על-ידי זריעה מכוונת של עננים מסוג סטרטוקומולוס (marine stratocumulus) בחלקיקים גדולים. עננים אלה שוכנים שעות ארוכות בעיקר מעל האוקיינוסים, ותצפיות גילו תופעה מעניינת – הם נעשים בהירים יותר באזורים ששטות בהם ספינות הפולטות זיהום אוויר לתוכם. החלקיקים יוצרים "פסי ספינות" (Ship Tracks) המתארים את נתיב הספינות שמתחת לענני

הסטרטוקומולוס (איור 2). פסים אלה בהירים יותר, כלומר בעלי אלבדו גדול יותר, ולכן מחזירים יותר קרינת שמש לחלל, ויכולים באופן עקרוני להוריד את הטמפרטורה. בעוד שאפקט פסי הספינות הוא בלתי מכוון ומתרחש ספונטנית, אפשר לחקות אותו בצורה יזומה, למשל על-ידי השטת דוברות גדולות ברחבי האוקיינוס, שיפלטו רסס דקיק של טיפונות מי ים לתוך בסיס הענן, ובכך ישיגו את אפקט ההתבהרות הרצוי. גם כאן, כמו בסוגיה של זריעה סטרטוספירית, מדובר בהקמת מערך עצום שאמור לטפל בשטחים ענקיים של האוקיינוסים, תוך יצירת תגובות בקני מידה מקומיים ואזוריים בביוספירה הימית לנוכחות של כלי שיט עצומים כאלה ולצורך שלהם באנרגיה, ומנגנוני משוב שונים עשויים להיכנס לפעולה (למשל, הקטנת כמויות משקעים).

איור 2. פסי ספינות

השינוי באלבדו ביחס למשטחי העננות הטבעית ניכר לעין בצילום זה שנעשה בצפון-מזרח האוקיינוס השקט, דרומית לאלסקה. הצילום נעשה בגלאי MODIS בלוויין TERRA של נאס"א, 4 במרץ, 2009.



איור 2.

פסי ספינות

השינוי באלבדו ביחס למשטחי העננות הטבעית ניכר לעין בצילום זה שנעשה בצפון-מזרח האוקיינוס השקט, דרומית לאלסקה.

הצילום נעשה בגלאי MODIS בלוויין TERRA של נאס"א, 4 במרץ, 2009.

התערבות במיקרופיזיקה של ענני צירוס

התערבות מסוג אחר בעננים גורסת "דילול" או "הרזיה" של ענני צירוס (CCT – Cirrus Cloud Thinning) – המוכרים לנו בשם ענני נוצה. בהיותם שוכני קבע באטמוספירה הגבוהה הם מונעים בריחת חום מכדור הארץ אל החלל. עננים אלה עשויים מגבישי קרח ונמצאים בגובה של 7–18 ק"מ (תלוי בקו הרוחב ובעונת השנה), והרעיון הוא להוריד את צפיפות הגבישים בתוכם באמצעות פיזור נבטי קיפאון (ice nuclei). הנבטים יגרמו להקפאה של אדי המים המעטים הנמצאים בגבהים אלה, ויביאו ליצירת גבישים מעטים וגדולים יותר, שידללו את העננים ויאפשרו לקרינה התת-אדומה לעבור דרכם אל החלל. גישה זאת נבחנה במודלים מתמטיים של אקלים ונמצאה כבלתי יעילה [11]. יש גם לזכור שבמשך עשרות שנים נערכו ניסיונות להשפיע באופן מלאכותי על ענני ערמה (בגובה נמוך) כדי להגביר את כמויות הגשם מהם ("זריעת עננים"), אך התוצאות לא היו חד-משמעיות, מה שמוריד את הביטחון ביכולת שלנו להשפיע במדויק על תכונותיהם של עננים בכלל וענני צירוס בפרט.

מראות בחלל

פתרון רדיקלי, מורכב ויקר לביצוע גורס שאין להתערב במתרחש בסטרטוספירה, אלא "לטפל" בקרינה הנכנסת עוד בחלל, כלומר לפני שהיא חוזרת לאטמוספירה. חסידי פתרונות ממשפחה זו מציעים מערך של לווייני מראה (Space mirrors) שיימצאו במסלול הקפה סביב כדור הארץ המסונכרן לצד היום של כוכב הלכת, באופן שיאפשר שליטה על כמות הקרינה הנכנסת. למעשה הלוויינים יתפקדו כמו סוכך, או תריס ונציאני, שהזווית שלו תפוקח על-ידי תוכנת מחשב להשגת תוצאה מיטבית. המראות יגדילו את האלבדו הפלנטרי, וכך תושג, לכאורה, שליטה בכמות האנרגיה המגיעה לפני השטח, ובעקפיין – על הטמפרטורה של כדור הארץ.

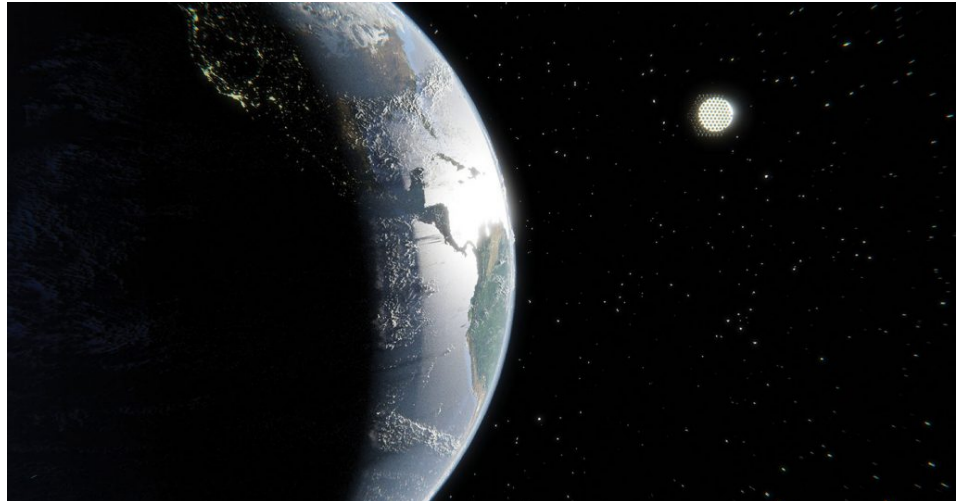
קבוצת חוקרים מאוניברסיטת MIT הציעה לאחרונה פתרון שנקרא "בועות חלל" (Space Bubbles) הגורס שניתן לפזר בחלל מיליארדי בועות שיחזירו 1.8% מקרינת השמש הנכנסת. הבועות אמורות לתפוס שטח השקול לזה של ברזיל (בערך 8.5 מיליון קמ"ר) והן ייווצרו בחלל על-ידי "ניפוח" של חומרים שישוגרו בחללית מכדור הארץ^[10]. הפיזור ייעשה בנקודה שנמצאת במרחק של מיליון ק"מ מכדור הארץ בכיוון השמש (המכונה, הנקודה הלאגרנז'ית הראשונה – L1), מאחר ששם מתאזנים כוחות המשיכה של השמש ושל כדור הארץ, כך שהשקעת האנרגיה בייצוב המסלול של עצמים היא אפסית. החוקרים חישובו שדי בהפחתת קרינה זו כדי להפוך את מגמת ההתחממות החזויה ולעצור את תהליכי שינוי האקלים.

גידול מחדש של הקרח בקטבים

אחד התהליכים המדאיגים ביותר את חוקרי האקלים הוא המנגנון של משוב הקרח-אלבדו (The ice-albedo feedback). הפשרה של שטחים גדלים והולכים של קרח בקטבים בגרינלנד ממירה משטחים לבנים ומחזירי קרינה באזורים כהים בולעי קרינה, וכך למעשה מאיצה את התהליך וגורמת להפשרה של שטחים נוספים ולהמשך ההתחממות. כדי לעצור ואולי אף להפוך את המגמה הזו הוצעו מספר פתרונות להגנה על כיפות הקרח, למשל על-ידי פיזור מיליארדי טונות של שלג מלאכותי באנטארקטיקה^[6] או על-ידי גידול קרח באמצעות הקפאת מי ים והצמדת הקרחונים לכיפה הצפונית. גישה זו טרם נוסתה באופן מעשי, וספק אם ניתן יהיה לבצע אותה בצורה נשלטת ובהתאם לתכנון.

סילוק פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה (CDR – Carbon Dioxide Removal)

האנושות ממשיכה בקצב פליטה גובר והולך של פחמן דו-חמצני וגזי חממה אחרים לאטמוספירה, ואפילו הסגרים הממושכים וההאטה בכלכלה העולמית עקב מגפת הקורונה בשנים 2020–2021 לא גרמו להיפוך מגמה. הפקת אנרגיה, תחבורה, חקלאות ותעשייה יחדיו פולטות יותר מ-34 מיליארד טונות פחמן דו-חמצני בשנה^[15]. כל עוד מאמצי האפחות (הפחתת הפליטות) אינם נושאים פרי במהירות הדרושה, טוענים תומכי הנדסת אקלים, יש מקום להתערב באופן יזום בסילוק הגזים האלה מהאטמוספירה. ואכן, כבר עתה מבוצעים מספר סוגים של ניסיונות כאלה, ויש לצפות להפיכתם לשכיחים יותר בעשורים הקרובים. במסגרת הניסיונות לסילוק פחמן דו-חמצני (CDR) מהאטמוספירה לטווחים של אלפי שנים פותחה משפחה של טכנולוגיות ללכידה ולאגירה של פחמן – פחמן – (CCS – Carbon Capture and Storage). טכנולוגיות אלה מנסות להתמודד עם הפליטה עצמה, וזוכות לאחרונה לעדנה מחודשת ולהשקעה ניכרת של תקציבים, בין היתר משום שהמגזר העסקי יידרש לחשבונאות פחמן, והרבה חברות ומפעלים מבקשים לסלק את הפחמן הדו-חמצני שנפלט בעת תהליכי הייצור שלהם.



תמונת המחשה של "בועות החלל" | באדיבות MIT

ייעור מחדש

הטיעון בעד גישת CDR באמצעות לכידה ישירה הוא שהקצב שלה מהיר הרבה יותר מאשר ייעור מחדש (Afforestation) שנקבע כאמצעי יעיל לסילוק עודפי פחמן דו-חמצני באמצעות פוטוסינתזה שמבוצעת ביערות, וזאת במסגרת החיפוש לפתרונות מבוססי טבע (Nature-based Solutions). נטיעה של טריליוני עצים אמורה להיות אמצעי יעיל לבלימת העלייה בריכוז הפחמן הדו-חמצני ותאפשר גם השגת יעדים סביבתיים נוספים, כגון שימור המגוון הביולוגי, הצללה של אזורים עירוניים, הגנה על קרקעות מפני סחף ובליה ועוד. עם זאת, הדמיות של ייעור מחדש מלמדות שיש לנקוט משנה זהירות במאמצים אלה, שהרי יערות מעצם טבעם כהים יותר ובעלי אלבדו נמוך יותר מאשר השטחים שהם אמורים להחליף (בעיקר שטחי מרעה), ולכן עשויים דווקא לתרום להתחממות בשל בליעה מוגברת של קרינת שמש. ניתן להשיג קירור של 0.25 עד 0.45 מעלות עד סוף המאה הנוכחית על-ידי ייעור מחדש שיעשה בצורה מושכלת לאורך תקופה של 50 שנה, כאשר היערות יינטעו במקום אדמות חקלאיות [1]. הקריאה ל-"טריליון עצים" נשמעה אפילו בפורום הכלכלי בדאבוס בשנת 2020 [12], אם כי טרם הפכה לתוכנית פעולה מוסכמת.

דישון האוקיינוסים

גישה אחרת של CDR מופנית לעבר האוקיינוסים, ולא אל היערות, וקוראת לדישון מי האוקיינוסים (Ocean Fertilization) במינרלים של ברזל כדי להאיץ את היצרנות הראשונית של פטופלנקטון ולקבע פחמן בקרקעית האוקיינוס למשך תקופות ארוכות ביותר. הרעיון הוא שפיטופלנקטון מנצל פחמן דו-חמצני מומס לבניית שלד, ולאחר המוות הוא שוקע לקרקעית האוקיינוסים, ובכך מסולק הפחמן הדו-חמצני לפרקי זמן ארוכים מאוד. היות שהאוקיינוסים תופסים כמעט 70% משטח פני כדור הארץ, מדובר על מנוף השפעה עצום פי כמה מזה של הייעור מחדש, שמוגבל לאזורים ספציפיים בלבד. בדו"ח ה-IPPC נקבע שלמרות היתרונות האפשריים הטמונים בשימוש באוקיינוסים לסילוק יזום של פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה, טרם בוצעה בדיקה מעמיקה של המשמעויות ארוכות-הטווח של התוצאות האפשריות של השקעה מכוונת של הגז לעומק האוקיינוסים [4].

האצת תהליכי בליה של סלעים (Enhanced Weathering)

באופן טבעי, פחמן דו-חמצני מסולק מן האטמוספירה בתהליכים איטיים של תגובה כימית עם סלעים שונים, שמביאים ליצירת סלעי משקע פחמתיים שמסלקים את הפחמן הדו-חמצני מהאוויר למשך מאות מיליוני שנים. תהליכים אלה מסלקים כ-0.1 ג'יגה-טונות פחמן דו-חמצני לשנה מן האטמוספירה, שהם בערך 1/400 מהכמות שנפלטת בעקבות פעילות אנושית. בדיקה של טכנולוגיות של בליה מואצת מראה שעל-ידי כרייה וריסוק של סלעים צורניים (למשל, כאלה המכילים את המינרל אוליבין) לאבקה דקה ופיזור בקרקעות חקלאיות, ניתן להאיץ את קצב הקיבוע של הפחמן הדו-חמצני בקרקע [17]. היתרון של שיטה זו הוא קלות הביצוע והעלות הנמוכה, אך היא נבדקה רק במעבדה וטרם בוצעה הוכחת היתכנות בקנה מידה נרחב.

לכידת אוויר ישירה (DAC – Direct Air Capture)

בשנים האחרונות המגזר העסקי מגלה עניין הולך וגובר בפתרונות ממשפחת CDR, בעיקר בשל העובדה שכבר בוצעה בדיקת היתכנות טכנולוגית, והחברה השווייצרית Climeworks גייסה 650 מיליון דולר והקימה מתקן ראשון באיסלנד. המתקן פועל באנרגיה גאותרמית ומסוגל לסלק פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה לצמיתות ולהפוך אותו למינרל הנקבר בקרקע, בעלות של מאות דולרים בודדים לטונה. גישה זו מכונה לכידת אוויר ישירה (DAC – Direct Air Capture), והעלויות הנוכחיות של סילוק פחמן דו-חמצני בשיטה זו או בשיטות דומות לה צפויות לרדת ב-90% עד 95% כבר בעשורים הקרובים (כלומר לעשרות דולרים לטונה בלבד) [13], דבר שיהפוך את הטכנולוגיה לאפקטיבית לאימוץ בקנה מידה נרחב. חברת Charm Industrial מקליפורניה גייסה כ-25 מיליון דולר ופיתחה שיטה שממירה את הפחמן שנמצא בפסולת אורגנית לנוזל שמנוני המוחדר אל הקרקע. עלות התהליך היא כ-600 דולר לטונה, והחברה הצהירה שקברה בשנה שעברה כ-5,000 טונות פחמן עבור לקוחות שהיו מעוניינים לאזן את פליטת הפחמן שלהם ולהגיע לניטרליות פחמנית (Carbon Neutral / Net Zero). אומנם הכמויות כרגע זניחות ביחס לעשרות מיליארדי הטונות הנפלטות כל שנה, אך יש לצפות שמגמה זו תלך ותגבר, שכן חברות כמו מיקרוסופט, גוגל ואמזון כבר הכריזו על כוונתן להגיע לאיפוס פליטות. האתגר המרכזי בטכנולוגיות אלה הוא מקור האנרגיה הדרושה לביצוע התהליכים הכימיים שמקבעים את הגז בתרכובות מינרלים מוצקות. האנרגיה אמורה להגיע ממקורות מתחדשים ולא מדלקי מחצבים, שהרי אין טעם בסילוק פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה על-ידי פליטה נוספת של פחמן. חברות טכנולוגיה וקרנות השקעה גדולות מחפשות טכנולוגיות חדשות ל-DAC כדי למצוא פתרון בטוחי זמן מהירים יחסית, לפני שנגיע לנקודת אל-חזור אקלימית, שאחריה כל התערבות כבר תהיה חסרת תועלת.



באופן טבעי, בקיץ ישנה פריחת עצומת ממדים של פיטופלנקטון, המשתרעת על פני מאות ואף אלפי ק"מ באגנים הצפוניים של אוקיינוס הקרח הצפוני והאוקיינוס השקט. דישון אוקיינוסים הוא גישה הבוחנת האצה של היצרנות הראשונית של פיטופלנקטון לטובת קיבוע פחמן ולכידתו בקרקעית האוקיינוסים | באדיבות NASA

סיכום

בספרה Under A White Sky סוקרת אליזבת קולברט [8] ניסיונות רבים של מעורבות אנושית במערכות טבעיות, שבמרבית המקרים הביאה לתוצאה אחרת מהמצופה, ובעצם יצרה בעיות חדשות שהמתכננים כלל לא צפו. קולברט טוענת שניסיונות לניהול קרינת השמש בקנה מידה עולמי יביאו לתוצאות הרסניות, ולא ישיגו את התועלת הרצויה.

האפשרות שהנדסת אקלים סולארית תצא לדרך כפתרון "המוצא האחרון" מעוררת סוגיות רבות של משילות ובקרה, שנדונו ביסודיות בדו"ח של האגודה המלכותית כבר ב-2009 [16]. אחת ההמלצות בנושאי הממשל של פתרונות מסוג זה, מעבר לקביעת מנגנוני בקרה ומגבלות על משך הביצוע שלהם, היא שוועדת האו"ם לפיתוח בר-קיימא תבצע מחקר מעמיק של כל אחת מהשיטות ותגדיר כלי מדיניות ליישומן. המלצות אלה של האגודה המלכותית תקפות אף ביתר שאת בימינו אלה, כשעוצמתו של שינוי האקלים בעשורים הקרובים של המאה ה-21 מתחילה להתחורר במלוא חומרתה. מעבר לשאלות המבצעיות-תפעוליות של תפעול פתרונות ניהול קרינת שמש מהחלל – בין אם לווייני מראות או בוטות – ישנה כאן סוגיה ברמה העקרונית – מי שולט במשטר הקרינה של כדור הארץ ומנהל אותו? האם הטכנו-אופטימיזם (אמונה שאפשר לפתור כל בעיה בעזרת טכנולוגיה) הזה יהיה נחלתם של מיליארדרים, של מדינות בעלות יכולות טכנולוגיות מתקדמות, או שמא הניהול אמור לעבור דרך מנגנונים בין-לאומיים מוסכמים, כדוגמת האו"ם? גם כאן, שאלת משך התפעול של הפתרון קריטית ושנויה במחלוקת [2].

בה בעת, הארגון solarageonegeering.org קורא לחתימה על אמנה בין-לאומית שתאסור איסור מוחלט של שימוש כלשהו בטכנולוגיות ניהול קרינת השמש, מתוך חשש לנוק בלתי הפיך למערכות כדור הארץ. בינואר 2022 חתמו 60 מדעני אקלים על מכתב פתוח של Non-Use Agreement, בתקווה שהמדינות החברות באו"ם

אכן יצטרפו לאמנה זו [3]. ארגון המדענים המודאגים (Union of Concerned Scientists) שהוא גוף לא-ממשלתי המאגד מאות מדענים בתחומי מדעי הסביבה, מנסח את עמדתו בצורה ברורה וצלולה: "ארגון המדענים המודאגים מתנגד לפריסה של פתרונות ניהול קרינת שמש בשל הסיכונים הגאופוליטיים, הסביבתיים והחברתיים הבלתי מתקבלים על הדעת (שהם גורמים)".

לסיכום, הנדסת אקלים יזומה נמצאת בשיח המדעי, הפוליטי, העסקי והציבורי, והיא עתידה לקבל משקל גדל והולך ככל שהסכנה לכישלון אפשרי של אסטרטגיות האפחות תגבר. בעוד שמנגנונים לסילוק פחמן מהאטמוספירה נראים קבילים ופחות שנויים במחלוקת, ההצעות הקשורות לניהול אנרגיית השמש שנויות במחלוקת עזה. האם נשכיל להתגבר על היוזמה האנושית ולהימנע מהנדסת אקלים? ימים יגידו.

הלכה למעשה

ד"ר בן אחראי, סמנכ"ל טכנולוגיה, חברת ההזנק RepAir

כמתואר במאמר, פיתוח טכנולוגיות לכידת אוויר ישירה (DAC) החל לפני יותר מעשור על-ידי החברות החלוציות Carbon Engineering ו-Climeworks. החברות משתמשות במאווררים להזרמת אוויר אל תוך אלמנט לכידת פחמן דו-חמצני, הסופג אותו בממס או סופח אותו במסנן. בשלב הבא האלמנט מחומם כדי לשחרר את הפחמן הדו-חמצני שהופרד מהאוויר להמשך תהליך ההטמנה.

לשיטות החלוציות יש מספר מגבלות, כגון: צריכת אנרגיה גבוהה של תהליך הפרדת מולקולות הפחמן הדו-חמצני מהאוויר (בשל ריכוז הנמוך של פחמן דו-חמצני באוויר, כ-0.04%), שימוש באנרגיה רבה לחימום, שימוש בכמויות מים גדולות, תפיסת שטח קרקע גדול ועוד. לאחרונה צצו מספר חברות (רובן חברות הזנק) שמפתחות טכנולוגיות המבוססות על חומרים מתקדמים, וכן פיתוחים הנדסיים ואלקטרוכימיים, שמטרתם להתמודד עם המגבלות הללו.

אחת מהחברות הללו, שיוסדה לפני כשנתיים בישראל, נקראת ריפאיר (RepAir). החברה פועלת לפתור את הבעיה הטכנולוגית הטמונה בהפרדת פחמן דו-חמצני מהאוויר. החברה מפתחת טכנולוגיה המבוססת על מנגנון אלקטרוכימי חדשני, המשלב בתוכו מנגנוני פעולה של תאי דלק וסוללות. התא האלקטרוכימי פועל כך שעל-ידי אספקת זרם חשמלי והזרמת אוויר אל תוך התא, מולקולות הפחמן הדו-חמצני, ורק הן, נתפסות ומופרדות להמשך הטמנה, והאוויר המטופל נטול הפחמן דו-חמצני נפלט מהמערכת חזרה לאטמוספירה. לשימוש בעקרונות האלקטרוכימיים של ריפאיר ללכידת פחמן דו-חמצני מהאוויר מספר יתרונות, כגון: צריכת אנרגיה נמוכה משמעותית בשל היעדר צורך בחימום אלמנט לכידה, שימוש בכמות זעומה של מים, שימוש בחומרים זמינים (ולא במתכות יקרות הנדרשות בשיטות אחרות), ומבנה מודולרי המאפשר את גמלון (scale-up) הטכנולוגיה לקנה מידה של מיליארדי טונות פחמן דו-חמצני בשנה. עד עתה גייסה ריפאיר מספר מיליוני דולרים, וכך יתאפשרו האצת פעילות הפיתוח של הטכנולוגיה והבשלתה לקראת פיילוט, שמיועד לפעול תוך כשנתיים וידיגם הפרדת מאות טונות בשנה. עלות המטרה להפרדת טונה אחת של פחמן דו-חמצני מוערכת ב-50–75 דולר.

מקורות

- Arora V and Montenegro A. 2011. [Small temperature benefits provided by realistic afforestation efforts](#). *Nature Geoscience* **4**: 514–518
- Baum CM, Low S, and Sovacool BJ. 2022, Between the sun and us: Expert perceptions on the innovation, policy and deep uncertainties of space-based solar geoengineering. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **158**: 112179
- Biermann F, Oomen J, Gupta A, et al. 2022. [Solar geoengineering: The case for an](#)

- [.international non-use agreement](#). *WIREs Climate Change* **13**(3): e754
- Caldeira K and Akai M. 2005. Ocean Storage. In: Metz B, Davidson O, de Coninck H, et al. (Eds). IPCC Special report on carbon dioxide capture and storage. Cambridge (UK): Cambridge University Press .4
- Extance A. 2015. Climate scientists ponder spraying diamond dust in the sky to cool planet. *Nature* .5
- Feldman J, Levermann A, and Mengel M. 2019. [Stabilizing the west Antarctic ice sheet by surface mass deposition](#). *Science Advances* **5**(7): eaaw413 .6
- Jones AC, Hawcroft MK, Haywood JM, et al. 2018. [Regional climate impacts of stabilizing global warming at 1.5 K using solar geoengineering](#). *Earth's Future* **6**: 230–251 .7
- Kolbert E. 2021. Under a white sky – The nature of the future. New York (NY): Penguin, Random House .8
- Luterbacher J and Pfister C. 2015. [The year without a summer](#). *Nature Geoscience* **8**: 246–248 .9
- .MIT Senseable City Laboratory. Space Bubbles .10
- Penner JE, Zhou C and Liu X. 2015. [Can cirrus cloud seeding be used for geoengineering?](#) *Geophysical Research Letters* **42**(20): 8775–8782 .11
- Pomeroy R. 2020. One trillion trees – World Economic Forum launches plan to help nature and the climate. World Economic Forum .12
- Ramkumar A and Ballard E. 2022. Carbon-removal industry draws billions to fight climate change. *The Wall Street Journal* 8.6.2022 .13
- Reynolds JL, Parker A, and Irvine P. 2016. [Five solar geoengineering tropes that have outstayed their welcome](#). *Earth's Future* **4**: 562–568 .14
- Ritchie H, Roser M, and Rosado P. 2020. [CO₂ and greenhouse gas emissions](#). Our World In Data .15
- The Royal Society. 2009. Geoengineering the climate: Science, governance and uncertainty. RS Policy document 10/09 .16
- Schilling RD and Krijgsman P. 2006. [Enhanced Weathering: An effective and cheap tool to sequester CO₂](#). *Climatic Change* **74**: 349–354 .17
- Smith W, Bhattarai U, MacMartin DG, et al. 2022. [A subpolar-focused stratospheric aerosol injection deployment scenario](#). *Environmental Research Communications* **4**(9): 095009 .18
- Smith W and Wagner G. 2018. Stratospheric aerosol injection tactics and costs in the first 15 years of deployment. *Environmental Research Letters* **13**: 124001 .19

התמקדות בהיבטים כלכליים וחברתיים, ולא רק טכנולוגיים.

Sovacool B. 2021. Reckless or righteous? Reviewing the sociotechnical benefits and risks of climate change geoengineering. *Energy Strategy Reviews* **35**: 100656

מאמר העוסק בצדדים הממשליים של מיזמי הנדסת אקלים לניהול קרינת שמש, בין היתר על ידי שחקנים מסחריים ולא רק על ידי ממשלות או מדינות. המאמר עוסק בהיבטים החוקיים וכן בנושא של פיצויים למקרים של נזקים משניים לא-מכוונים.

Reynolds JL. 2019. [Solar geoengineering to reduce climate change: A review of governance proposals](#). *Proceeding of the Royal Society A* **475**: 20190255

ספר הדן בהרחבה בכל השאלות והלבטים של הנדסת אקלים, שנכתב על ידי חוקרים, מדענים, פילוסופים ומשפטנים. מעניין במיוחד פרק 4 העוסק במחלוקות סביב הנושא בדו"חות ה-IPCC.

Blackstock JJ and Low S. 2018. [Geoengineering our climate? Ethics, politics and governance](#). 1st Edition. London: Routledge