

הפתרון הכוזב למשבר האקלים

לינדה שניידר

תחום הנדסת האקלים מציע להתמודד עם משבר שינויי האקלים באמצעות התערבויות טכנולוגיות מסיביות במערכת האקולוגית, למשל שאיבת פחמן דו-חמצני בהיקף אדיר מהאטמוספירה. לינדה שניידר טוענת במאמרה כי חסידי השיטות הלא מוכחות הללו מתעלמים מהסיכונים הגדולים הכרוכים בהפעלתן, אינם מתמודדים עם גורמי היסוד של שינויי האקלים ואף תורמים לשימור הסטטוס-הקוו הכלכלי שתתמוך להיווצרותם. במאמר תגובה נלווה טוען מדען האקלים דני רוזנפלד כי למרות הבעייתיות של הטכנולוגיות האלה יש להשקיע בפיתוחן, שמא יידרשו כאשר נגיע למצב חירום אקלימי

מאי 2019

תחום הנדסת האקלים (הידוע גם כגאו-הנדסה, geoengineering) מוצג כיום כפתרון אפשרי למשבר החברתי, הפוליטי והאקולוגי המקופל בשינויי האקלים. פתרון זה כולל שורה של פרויקטים טכנולוגיים רחבי ממדים שתכליתם לשנות את המאפיינים ואת הדינמיקות של האוקיינוסים, היבשות, המערכות האקולוגיות והאטמוספירה.

במשך עשרות שנים נחבא תחום הנדסת האקלים בין הצללים של מחקרים צבאיים עלומים, אך לאחרונה הוא חדר לתוך הזרם המרכזי של מדיניות האקלים הבינלאומית. קבוצה קטנה של מדענים, יועצי מדיניות ונציגי תעשייה ממדינות מזהמות מאוד בצפון הגלובלי תומכים יותר ויותר בשימוש בהנדסת אקלים לשיכוך או למיתון של כמה מן התסמינים של שינויי האקלים.

יש שתי גישות בסיסיות לסוגיית הנדסת האקלים. האחת היא ניהול קרינה סולרית (Solar Radiation Management) - מערך של טכנולוגיות שמטרתן לצמצם את כמות קרינת השמש הנכנסת לאטמוספירה כדי לקרר את האקלים באופן מלאכותי. הפתרונות המוצעים כאן הם למשל לרסס אל הסטרטוספירה חלקיקים זעירים שיחזירו את קרינת השמש אל החלל, או להגביר את מידת החזרת האור של עננים או אוקיינוסים. טכנולוגיות של ניהול קרינה סולרית נמצאות כיום בשלב הסימולציה הממוחשבת, אבל הן עשויות לצאת מן המעבדה כבר השנה.

גישה שנייה היא סילוק פחמן דו-חמצני (Carbon Dioxide Removal). בגישה זו מבקשים לשאוב פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה ולקבור אותו מתחת לאדמה. כבר כיום קיימים מתקנים יבשתיים ניסיוניים שיכולים לסנן פחמן דו-חמצני מן האוויר החופשי, אבל עד כה לא הצליחו לסלק לצמיתות פחמן דו-חמצני מן האטמוספירה. הפחמן הדו-חמצני חוזר לאטמוספירה במוקדם או במאוחר, כאשר המוצרים שמכילים אותו - למשל דלקים, משקאות מוגזים או פלסטיק - נשרפים, נצרכים או מתכלים בדרכים אחרות.

תוכניות לסילוק פחמן דו-חמצני אינן מוגבלות ליבשה. אחד הכלים הטכנולוגיים הבולטים להנדסת אקלים ימית הוא "דישון" שטחי אוקיינוס נרחבים בברזל או בחומרי הזנה אחרים במטרה לעודד צמיחה של אצות פיטופלנקטון, שסופגות פחמן דו-חמצני מן האטמוספירה. אצות הפיטופלנקטון שוקעות בסופו של דבר לקרקעית האוקיינוס ומתות שם, ואמורות לקחת עמן את הפחמן הדו-חמצני שספחו. עם זאת, אף שהרעיון נבחן פעמים רבות הוא הניב תוצאות מאכזבות למדי מבחינת יעילות הטכנולוגיה (חלק גדול מן הפחמן הדו-חמצני שנספג השתחרר מחדש בשרשרת המזון הימית), ולמעשה הזיק לסביבה הימית שבה נוסה.

התרחישים הקיימים לשיפור מצב האקלים מדברים על סילוק של כמה מאות גיגהטון, ואפילו יותר מ-1,000 גיגהטון, של פחמן דו-חמצני מן האטמוספירה במהלך המאה העשרים ואחת, ואחסונו מתחת לאדמה או באוקיינוסים. לשם השוואה, בשנת 2017 סך הפליטות של פחמן דו-חמצני היה כ-40 גיגהטון. פירוש הדבר הוא שעל פי התוכניות נצטרך לשאוב מן האטמוספירה כמות אדירה שגדולה פי 10-25 מן הפליטה העולמית השנתית. אבל השימוש בטכנולוגיות לסילוק פחמן דו-חמצני גורם בעצמו לפליטות נוספות - כתוצאה מכרייה בהיקף תעשייתי, עיבוד חומרים, שינוע והפצה; ועובדה זו מעמידה בסימן שאלה את יכולתן של הטכנולוגיות הללו לסלק אי פעם ביעילות פחמן דו-חמצני מן האטמוספירה.

אם כן, אפשר לומר שכיום רוב הטכנולוגיות של הנדסת האקלים היפותטיות במידה רבה, ואפילו ספקולטיביות. אולם אף על פי כן, ולמרות שהטכנולוגיות האלה אמורות להיות מיושמות במערכות אקולוגיות בקנה מידה עולמי חסר תקדים, אימצו להם חסידי הנדסת האקלים את התפיסה ש"הטכנולוגיה תפתור הכול". רבים מהם מתעלמים באופן שיטתי מהסיכונים, מההשפעות השליליות ומתוצאות הלוואי הבלתי צפויות שעלולים לנבוע מהפעלתן של הטכנולוגיות האלה, שטרם הוכיחו את עצמן. נקודת המבט הדומיננטית בחקר הנדסת האקלים היא זו של המדעים המדויקים וההנדסה, והיא מעודדת התעלמות מהשלכות סביבתיות, חברתיות ופוליטיות. העלמת העין הזאת טיפוסית לגישה שעוסקת בסימפטומים מבלי להתמודד עם התנאים העומדים ביסוד הבעיה.

חלק מן ההשלכות הסביבתיות ברורות למדי. המערכת הטכנולוגית המכונה BECCS (Bio-Energy with Carbon Capture and Storage), שנחשבת מבטיחה, מבקשת לקשור בין הפקת אנרגיה מביו-מסה ובין טכנולוגיות שלוכדות וקוברות פחמן דו-חמצני מתחת לפני הקרקע. אבל מערכת כזאת, אם תופעל בקנה מידה רלוונטי מבחינה אקלימית, תוביל לתחרות קשה על אדמה ומשאבים, להשתלטות נרחבת על קרקעות, לעקירת אוכלוסיות ולגידול חד במחירי מזון.

לאור הממדים וההיקפים האדירים שבהם נצטרך להפעיל את יוזמות הנדסת האקלים כדי שתהיה להן השפעה אקלימית משמעותית, ברור גם שיישומן יצרוך כמויות אדירות של אנרגיה, קרקע, מים, מינרלים ומשאבים טבעיים אחרים. מערכת ה-BECCS למשל דורשת גידול, קציר ושינוע של ביו-מסה מהירת צימוח, שלרוב נזקקת להרבה מאוד מים ודשן; שריפת הביו-מסה במפעלים מתאימים; אצירת הפחמן הדו-חמצני שמיוצר בתהליך השריפה; ושינועו לאתרי סילוק. במילים אחרות, יישום של BECCS דורש פיתוח של תשתיות, מפעלי עיבוד, צנרת, כבישים, מסילות רכבת ומתקני אחסון בקנה מידה תעשייתי בכל רחבי העולם. כל זה תלוי בהקמה של

תעשיות הפקה רב-לאומיות בקנה מידה רחב. ומי כשיר יותר להקמה ולתחזוקה של תשתיות תעשייה כאלה יותר מאשר חברות רב-לאומיות קיימות שעוסקות כיום בכרייה, בשינוע, בהפקה של דלק מאובנים ובחקלאות קונבנציונלית?

סימולציות ממוחשבות חזו כמה מן ההשפעות האפשריות של תוכניות הנדסת האקלים על העולם. התזת תרסיסים לסטרטוספירה, לדוגמה, עלולה להביא לעצירת גשמים ולשיבוש דפוסי מונסון. אבל מאחר שמערכות ותהליכים טבעיים הם מורכבים, לא ליניאריים ובמידה מסוימת כאוטיים ובלתי ניתנים לחיזוי, הרוב העצום של השפעות הגומלין ברחבי המערכות האקולוגיות העולמיות עלול להתחוויר רק אחרי שהטכנולוגיות תיושמה בפועל.



מציאת קיצורי דרך טכנולוגיים שיפתרו את בעיית שינוי האקלים היא מעניינם של מי שנושאים באחריות לחלק גדול מן הבעיה שאנו ניצבים בפניה. אילו טיפלה הקהילה הבינלאומית בגורמי היסוד להרס הסביבתי, המזהמים הגדולים הם שהיו משלמים את המחיר הפוליטי והכלכלי.

השינויים והתמורות שנחוצים בדחיפות לכלכלות ולחברות שלנו טומנים בחובם הפסדים גדולים לתעשיות דלק המאובנים. מערכת ייצור שלמה - מזהמת ונצלנית הן כלפי האדם הן כלפי הסביבה הטבעית - איבדה לגמרי את הצדקתה לנוכח שינויי האקלים ולנוכח האי-צדק החברתי העולמי, המונצחים על ידי הרס הסביבה. מאחר שהנדסת האקלים מבקשת לטפל בחלק מן הסימפטומים של שינויי האקלים מבלי להתמודד עם גורמי היסוד שלהם, אפשר לראות בה ניסיון נואש לשמר סטטוס-קוו כלכלי כושל. לפיכך אין פלא שתעשיית דלק המאובנים נסמכת תכופות על הנדסת האקלים כחלק מן ה"פתרון" לשינויי האקלים. אם אפשר יהיה לנקות את הזיהום בדיעבד, ואם אפשר יהיה לרתום את ההתחממות הגלובלית ואת הטכנולוגיה לטובת שיכונם של סימפטומים אחרים של שינויי האקלים, כי אז התעשיות האחראיות למשבר הסביבתי יוכלו להמשיך במדיניות של עסקים כרגיל.

תמיכה הפומבית של תאגידים בטכנולוגיות של הנדסת אקלים אינה כרוכה עוד בנזק תדמיתי כבעבר; וכעת האינטרסים של התאגידים הולכים ונחשפים. טייקונים מתעשיית הנפט ונציגיהם, כמו הארון קשגי (Khashgi) מתאגיד אקסון-מוביל, עומדים בחזית הפיתוח של טכנולוגיות להנדסת אקלים, בפרט לצורך סילוק פחמן דו-חמצני מן האטמוספירה. במקרים רבים האינטרסים של תעשיית הנפט תואמים לפרויקטים של הנדסת אקלים המשווקים כפתרונות אקלימיים. טכנולוגיית לכידה ואחסון של פחמן, למשל, שהיא טכנולוגיה חשובה בגישת הסילוק של פחמן דו-חמצני, פותחה במקור בתעשיית הנפט כשיטה להשבת נפט משופרת - EOR (Enhanced Oil Recovery), שיטה שנועדה לחלץ את טיפות הנפט האחרונות מבארות ומאגרים שקרובים להתרוקן. עד היום, טכנולוגיית לכידה ואחסון של פחמן יכולה להשתלם כלכלית רק בהפקת נפט באמצעות EOR, כלומר רק בדרך שמייצרת פליטות פחמן נוספות.



פרט לאינטרסים תעשייתיים הכרוכים בהנדסת אקלים, לשימוש בה יש גם השלכות פוליטיות וביטחוניות לא פשוטות.

הסימולציות הממוחשבות של ניהול קרינה סולרית מניחות תנאי הפעלה אידיאליים. אבל אפילו בתנאים אידיאליים, ההשפעות ותוצאות הלוואי של הנדסת האקלים - צמצום המשקעים, בצורות אזוריות, הוריקנים ושיטפונות - לא יתפזרו באופן שווה ברחבי העולם. לכך יש השלכות משמעותיות על השלום ועל הביטחון. בעלי התשתיות התעשייתיות לסילוק פחמן דו-חמצני יעמידו תביעות מופרזות בתחום המים, האנרגיה, המינרלים הטבעיים ומשאבים אחרים, ומתוך כך ייווצרו בהכרח לחצים חברתיים ופוליטיים שעלולים להצית סכסוכים חדשים על אותם משאבים בדיוק.

מכיוון שהנדסת אקלים עלולה להביא להשפעות מזיקות ולתוצאות לוואי שליליות באזורים מסוימים ובאוכלוסיות מסוימות, קשה לשער שיתגבש קונצנזוס סביב הפעלתה. מי יקבל עליו מרצונו את הפוטנציאל ההרסני של טכנולוגיות כאלה? צאתה של הנדסת האקלים מתחומי המעבדה והמודלים הממוחשבים אל העולם האמיתי עלולה לגרום להחמרתם של סכסוכים פוליטיים כתוצאה מהטיה שיטתית לטובתן של האומות החזקות, שמעמדן מאפשר להן לפתח ולהפעיל הנדסת אקלים לטובתן.

אי-יכולתם המתמשכת של מנהיגים עולמיים להסכים על פעולות משמעותיות ומחייבות בתחום האקלים מחריפה את הבעיה עוד יותר. כאשר אי-אפשר לצפות לשיתוף פעולה שקוף בין המדינות, אין לקהילה הבינלאומית מנגנונים שיאפשרו לה לתבוע דין וחשבון על נזקים שעלולים להיגרם בעקבות התערבויות בתחום הנדסת האקלים. מעצם מהותה של הנדסת האקלים, אי אפשר לשלוט בה במישור הבינלאומי באופן דמוקרטי.

דייויד קית' (Keith), אחד התומכים הבולטים בהנדסת אקלים, ושותפיו לכתיבת מאמר שהתפרסם לאחרונה, מתייחסים בכנות מפתיעה לפוטנציאל הצבאי של כמה מטכנולוגיות הנדסת האקלים. לטענתם, הפעלה חד-צדדית (או הפעלה משותפת של כמה מדינות) של מערכות לניהול קרינה סולרית עלולה להציב איומים ביטחוניים גלובליים, ואלה מחייבים פיתוח של אמצעי נגד או "הנדסת אקלים מסכלת" כאמצעי טקטי שירתיע מדינות אחרות וימנע מהן להשתמש בטכנולוגיות באופן חד-צדדי לטובתן בלבד. אין פלא שבארצות הברית הנדסת האקלים נתמכת בידי אישים ומכוני מחקר שקשורים לצבא.

כאשר ארצות הברית תומכת רשמית במחקרים בתחום הנדסת האקלים, ובד בבד פורשת מהסכם פריז, התוצאה עלולה להיות העצמה אסטרטגית של מחקרי הנדסת אקלים במקומות אחרים - למשל של תוכניות מחקר ממשלתיות בסין וברוסיה. לא רק לעצם השימוש בטכנולוגיות הנדסת אקלים יש השלכות ביטחוניות וגאו-פוליטיות משמעותיות, אלא גם למאמץ המושקע בימים אלה בפיתוח טכנולוגי אסטרטגי.



אף שתוכניות הנדסת האקלים מנסות להציג חזות ניטרלית, הן כלל אינן פתרון סביבתי זמני וא-פוליטי המשמש כמוצא אחרון. לא זו בלבד שהנדסת האקלים איננה פתרון למשבר המרחף מעלינו - בטווח הארוך היא אף צפויה להחמיר את הבעיות הסביבתיות.

הנדסת האקלים מנוגדת בעליל לאינטרסים של הציבור הרחב. היא מציבה סיכונים לקהילות ולמערכות אקולוגיות ואפשר בקלות לנצל לרעה לשירות אינטרסים תעשייתיים וצבאיים. מפני שהנדסת האקלים אינה עוסקת באקלים בלבד: היא מנסה לקיים סטטוס-קוו כושל של הפקת אנרגיה מדלק מאובנים ולבצר את כוחה של התעשייה הזאת.

העולם אינו זקוק עוד לפתרונות קסם טכנולוגיים. כדי להתמודד עם המשברים של המאה ה-21 נחוץ "ריאליזם רדיקלי": הפסקה מדורגת אך מהירה של השימוש בפחם, בנפט ובגז ופירוק מהיר של תשתיות ההפקה של דלק מאובנים. יש לעבור להפקה ולאספקה מבוזרת של אנרגיה מתחדשת בלבד, משמש ומרוח. לסטטוס-קוו הקיים יש חלופות מלהיבות ובנות קיימא, למשל מעבר גלובלי למערכת מזון אגרו-אקולוגית שהשפעתה הסביבתית מועטה, כמות הפליטות שהיא מייצרת נמוכה משמעותית בהשוואה לחקלאות תעשייתית קונבנציונלית, ואשר יכולה לסלול את הדרך לעצמאות מזון.

את סך האנרגיה והמשאבים הנצרכים בכלכלה הגלובלית נוכל לצמצם אם נאמץ מודל אגרו-כלכלי שאינו תלוי בצמיחה אינסופית. עלינו לחלק מחדש את העושר וההכנסה הגלובליים, הן בין מדינות והן בתוכן, להפחית את האי-שוויון החברתי-כלכלי ולחזק את העמידות בפני שינויי האקלים. הפתרונות שנציע למשבר האקלים, שהלכה למעשה הוא משבר חברתי-אקולוגי, חייבים להיות צודקים. הבעיה שעומדת לפנינו מתמודדים איננה בעיה הנדסית – היא בעיה של כוח ושל אינטרסים של תעשיות גלובליות, הפועלים במשולב כדי למנוע צדק סביבתי של ממש.

לינדה שניידר היא עמיתה בכירה בתוכנית למדיניות אקלים בינלאומית במטה הראשי של מכון היינריך בלברלין. מאמר זה הוא גרסה מקוצרת למאמר שפורסם לראשונה בקיץ 2018 במגזין המקוון *Science for the People*.
תרגום: יניב פרקש.

מאמר תגובה \ תוכנית מגירה בעייתית אך הכרחית למצב חירום אקלימי דני רוזנפלד

הנדסת אקלים היא פעולה שאנחנו מבצעים כבר זמן רב, שלא בטובתנו, באמצעות זיהום אוויר – הן זיהום אוויר חלקיקי, הן גזי החממה הפועלים לחימום מערכת האקלים. התיקון המתבקש למצב זה הוא צמצום זיהום האוויר ומניעתו מלכתחילה, בד בבד עם הוצאת גזי החממה מן האטמוספירה. את שתי הפעולות הללו אפשר לראות כפעולות מתקנות, אשר ברור כי הן ראויות ונחוצות וכי אין להן תופעות לוואי אקלימיות מזיקות. מטרתן להחזיר את האקלים למצב שכבר היינו בו בעבר, כאשר האטמוספירה הייתה מזוהמת פחות. המגבלות העיקריות ביישומן הוא העלות הגבוהה וההתחרות על משאבים המיועדים למטרות חיוניות אחרות.

לפיכך יש להבחין בין פעולות לתיקון הגורם הראשוני לשינויי האקלים, כלומר הפחתת גזי החממה באטמוספירה – פתרון שיש לקדמו במידת האפשר – ובין פעולות אחרות כגון ניהול קרינה סולרית, אשר מטרתן לקרר את מערכת האקלים מבלי להתמודד עם הבעיה מן השורש.

המוטיבציה לעקיפת הפתרון מן השורש נובעת מעלותו הגבוהה. לשם המחשה, האנרגיה הדרושה להפרדת פחמן דו-חמצני מתוצרי השרפה של תחנת כוח והטמנתו בקידוחים או בעומק הים צורכת כשליש מתפוקת תחנת הכוח. הדבר עלול להכפיל את עלות ייצור החשמל, ובאופן פרדוקסלי גם להגדיל לפחות בשליש את מידת השימוש בדלקים מאובנים. מחיר כזה החברה אינה מוכנה לשלם כיום.

פתרון זול הרבה יותר הוא ניהול קרינת שמש. טכניקה כזאת אפשר ליישם בדרכים רבות, אבל הפתרון המעשי והזול ביותר הוא זריעת עננים ימיים באמצעות תרסיס מי ים בטיפונות שקטנות מאלפית המילימטר. חלקיקים קטנים אלו מהווים גרעין להתעבות טיפות ענן. העננים חדשים שאמורים להיווצר בתהליך זה יחזירו לחלל את קרינת השמש שתפגע בהם, במקום שזו תיקלט בפני השטח ותחמם את כדור הארץ. את התהליך הזה ניתן לראות כבר כיום בהשפעת עשן הספינות על עננים בלב ים. תצלומי לוויין שנעשו מעל לאוקיינוס השקט ממערב לארה"ב, כאשר כיסוי העננים הטבעי היה קטן, מראים שעשן הספינות יצר כיסוי עננים נרחב על פני שטח של כאלף קמ"ר. שטח עננים כה גדול שנוצר כתוצאה ממעשה ידי אדם מחזיר כמות גדולה של חום שמש לחלל ומקזז חלק מן ההתחממות שהייתה יכולה להיות רבה עוד יותר ללא זיהום האוויר החלקיקי.

מאמר מאת כותב שורות אלה, שהתפרסם לאחרונה בכתב העת *Science*, מראה שריסוס מי ים יכול לקרר את האקלים במידה רבה אף מן הדרוש לקיזוז ההתחממות העולמית. כל מה שדרוש הוא כמה מאות ספינות קטנות המשיטות באזורים נבחרים באוקיינוסים ומרססות כמויות גדולות של מי ים, והטיפות הזעירות יוצרות חלקיקי מלח שזורעים את העננים.

אבל כאן מתעוררות בעיות אתיות, אשר מובילות להסכמה רחבה בקרב החוקרים כי אין ליישם קירור באמצעות ניהול קרינת שמש ללא הסכמה בינלאומית רחבה. קירור של האוקיינוסים יגרום לכך שפחות מים יתאדו מהם, ולכן תפחת כמות הגשם באזורים שונים בעולם. הגשם חיוני לקיומן של מדינות רבות, והסיכוי כי אלה יסכימו לקירור האוקיינוסים קטן מאוד. ובמקרה שאכן יוסכם לקרר את האוקיינוסים, נהיה תלויים בשיטה זו במידה גדלה והולכת, כי אם הקירור יימשך כמה עשרות שנים ואז ייפסק מסיבה כלשהי, ההתחממות שהייתה צריך להתרחש במשך תקופה זו תתרחש בבת אחת וללא יכולת התאמה של הסביבה לשינוי הפתאומי, ולכן תוצאותיה יהיו הרסניות הרבה יותר.

עם זאת, מוסכם כי יש להשקיע בבניית הידע של הנדסת האקלים, כדי שכאשר נגיע למצב חירום אקלימי ונזדקק לה – נוכל למנוע אסונות גדולים יותר. מצב חירום אקלימי יכול להיות, למשל, התמוטטות מהירה של קרחוני גרינלנד או אנטארקטיקה, שתגרום להתרוממות מי הים ולהצפות של ערי חוף בכל העולם.

את הנדסת האקלים באמצעות ניהול קרינת שמש אפשר להשוות למתן גלולה להורדת חום לאדם חולה, במקום לטפל ביסוד הבעיה שגרמה לעליית החום מלכתחילה. ברור שאי אפשר להתמיד בטיפול כזה ולהימנע מריפוי של ממש; תפקידה של הגלולה הוא

לתת ארכה עד שהטיפול היסודי ייתן את אותותיו. למקרה הצורך, כדאי שנצטייד בתרופה להורדת חום באמצעות בניית ידע של הנדסת אקלים, למשל ידע בניהול קרינת שמש. אבל אם נצטרך להשתמש בידע הזה, תהיה זו עדות מובהקת לכך שכשלנו בטיפול השורש לצמצום גזי החממה, ואז כבר נשלם מחיר כלכלי גבוה הרבה יותר בדמות אסונות טבע.

*

דני רוזנפלד הוא פרופסור במכון למדעי כדור הארץ באוניברסיטה העברית בירושלים.