

ועכשיו לתחזית / פרופ' קולין פרייס

הכתובת על הקיר, ומי שרוצה להשאיר את המשקפיים הוורודים ולהמשיך להריץ 4X4 בכבישים מסכן את כולנו. מכל צד מצטברות עדויות חדשות על תוצאות ההתחממות הגלובלית. בראשן מרחפת העננה הגדולה והבלתי נראית של גזי חממה שיצרנו במו ידינו. פרופ' קולין פרייס מציג את הנתונים, התמונות והעובדות

"תארו לעצמכם שאתם נוהגים במכוניתכם, ומדי שלושה קילומטרים אתם משליכים קילוגרם אשפה מבעד לחלון, וכל מי שנוסע לצדכם במכונית או במשאית עושה בדיוק אותו דבר – רק שאלה הנוסעים בהאמרים זורקים שתי שקיות בכל פעם".
([טום פרידמן](#) מצטט את הכימאי נייט לואיס, מתוך "[Hot, Flat and Crowded](#)")

כדור הארץ חולה, וכמו בשפעת – האיתות הראשון שאנו מקבלים לכך הוא עליית החום. מאז המצאת המדחום, לפני כמה מאות שנים, מדידות טמפרטורת האוויר על פני כדור הארץ מלמדות על התחממות ממוצעת של קרוב למעלת צלזיוס אחת. העלייה הזאת אולי אינה נראית משמעותית, אבל כדאי להשוות אותה לשינוי בטמפרטורת הגוף כשמתרחשת מחלה. עלייה של מעלה או שתיים בטמפרטורת הגוף הממוצעת גורמת לנו להרגיש חלשים, חולים ועצבניים. עלייה של שלוש-ארבע מעלות בטמפרטורת הגוף עלולה להרוג אותנו.

הטמפרטורה הממוצעת על פני כדור הארץ היא בסביבות 14 מעלות; עליית הטמפרטורה הזאת אף במעלה אחת עלולה לגרום לכדור הארץ להתנהג בצורה מוזרה ולשנות את מזג האוויר ואת דפוסי האקלים. לפי מודלים ממוחשבים הבעיה שעומדת לפנינו היא התחממות צפויה של כשלוש מעלות נוספות עד סוף המאה. אין כל ביטחון או סימן שההתחממות תעצור ברמה זו.

האם המדידות האלה מייצגות באמת מגמה היסטורית של התחממות גלובלית? נתוני המדידות של טמפרטורת האוויר על פני כדור הארץ מקיפים רק כמה מאות שנים. המדידות האלה נערכו בעיקר על פני האזורים היבשתיים (30% משטח כדור הארץ), וחלקן נעשה בתוך האזורים המאוכלסים של הגלובוס. מסיבות היסטוריות הרבה תחנות מטאורולוגיות נמצאות בערים שצמחו במרוצת הזמן, והצמיחה חוללה אפקט של "איי חום", שאולי השפיעו על תוצאות המדידות ועל מגמת ההתחממות. איי החום האורבניים מחוללים התחממות מוגברת של ערים במהלך התרחבותן, ולכן קשה יותר לקבוע אם המגמות שנמדדו הן באמת גלובליות בהיקפן, ועד כמה השינוי הוא יוצא דופן. מדעני האקלים שמנתחים את המגמות ההיסטוריות של הטמפרטורות מביאים בחשבון את הסייגים האלה, וכמעט כולם מסכימים שהתרחשה התחממות גלובלית של כמעלה אחת במהלך 150 השנים האחרונות.

מי שמבקש להתבונן בטמפרטורות הגלובליות בתקופות מוקדמות יותר, ולהבין אם המגמה כיום שונה מבעבר, זקוק לכלים שמאפשרים לקבוע מה הייתה טמפרטורת כדור הארץ לפני אלפי ומיליוני שנים. מדידות אלו נעשות באמצעות איזוטופים של חמצן, שיכולים ללמד על שינויים בטמפרטורה של כדור הארץ שהתרחשו בעבר. האיזוטופים האלה מצויים בטבעות של גזעי עצים, באלמוגים, במשקעים, בקרקעית הים והאוקיינוסים ובליבות קרח. שימוש בסמנים רבים כאלה מאפשר לאמוד את טמפרטורת כדור הארץ.

אומדני הטמפרטורה של כדור הארץ ב-1,000 השנים האחרונות מצביעים על מגמת התקררות שהתחוללה בתקופה זו בעבר, ועל שינוי דרמטי שהתרחש לפני כמאה שנים. מאז ועד היום אנו רואים התחממות של כמעלה צלזיוס, שאנו מכנים אותה "התחממות גלובלית". הטמפרטורה הממוצעת הגלובלית כיום היא בבירור הגבוהה ביותר ב-1,000 השנים האחרונות, אם לא לאורך תקופה ארוכה הרבה יותר.

אלה שאינם סומכים על נתוני המדחום או על פענוח הסימנים כפי שנאספו ממדידות איזוטופ החמצן מוזמנים לעיין בראיות נוספות להתחממות גלובלית, שמקורן בקרחונים הרריים מסביב לכדור הארץ. הרוב הגדול של הקרחונים הולך ונסוג במהלך המאה האחרונה. הפשרה מסיווית של קרחונים מתרחשת היום בצורה מואצת ביותר. נוסף על היותה ראייה להתחממות גלובלית, יש להפשרת הקרחונים ויריעות הקרח (אלו שנמצאות על פני היבשות בניגוד לקרח הימי) השפעה ישירה על מפלס פני הים. הקרח העלול להפשריר בגרינלנד גדול די הצורך כדי להעלות את המפלס הממוצע של פני הים אפילו בשבעה מטרים. יש יסוד להניח שגרינלנד לא תפשריר לחלוטין במאות השנים הבאות, אבל גם עלייה של מטר אחד במפלס הגלובלי של פני הים תגרום להרס משמעותי, במיוחד בערי חוף. מרבית האוכלוסייה האנושית מתגוררת לאורך קווי החוף של ימים. בבנגלדש לבדה, עלייה של מטר אחד במפלס פני הים תחייב פינוי של 17 מיליון בני אדם מבתיהם!

יריעות הקרח היבשתיות, כמו גם הקרח הימי באוקיינוס הארקטי, משפיעים על טמפרטורת כדור הארץ. צבע הקרח הלבן מהווה גורם חשוב בהחזרת חלק מאנרגיית השמש שמגיעה לכדור הארץ אל החלל. יש לכך השפעה מקררת, שמווסתת ומאזנת את אקלים כדור הארץ. כיום כ-30% מהקרינה שמגיעה לכדור הארץ מוחזרים לחלל ממשטחים בהירים של עננים, שלג וקרח. כשהקרח מפשריר על פני היבשה או על פני הים נחשפים המשטחים הכהים שמתחתיו לקרני השמש. משטחים כהים אלה בולעים כמות גדולה יותר של אנרגיה סולרית, שמחממת אותם עוד יותר, גורמת להפשרת קרח נוסף, וכן הלאה. לתופעה זו, שאנו מכנים "משב חיובי", יש השפעות מצטברות הולכות וגדלות. שינויים קטנים בכמות הקרח עלולים

להאיץ את ההתחממות הגלובלית, ומרגע שהקרח נעלם נדרשות עשרות אלפי שנים כדי לחדש אותו, בתנאי כמובן שנצליח לקרר את האקלים מחדש.

מעשי ידי אדם?

האם יכול להיות ששינויי הטמפרטורה במאות השנים האחרונות מבטאים רק תהליך טבעי? או שאולי התרחש אירוע נוסף במהלך אלף השנים האחרונות, משהו שקשור בנו, ואשר יכול להשפיע על האטמוספירה ועל אקלים כדור הארץ?

לשמחתנו אנו מסוגלים לחקור את האטמוספירה של כדור הארץ בעבר הרחוק באמצעות טכניקות מתוחכמות של אנליזה בליבות קרח. קרח צף על פני המים בגלל בועות האוויר הלכודות בתוך המבנה הגבישי שלו. הבועות האלה מכילות מולקולות אוויר יחד עם כל המזהמים שהיו באוויר בזמן היווצרותו של הקרח. לכן, אם מדובר בקרח שנוצר לפני 5,000 שנה, בועות האוויר שכלואות בו מייצגות את הרכב האטמוספירה לפני 5,000 שנה.

בקיודחים לעומק הקרחונים בגרינלנד ובאנטארקטיקה אנו יכולים אפוא לחזור לאחור בזמן. התברר שהריכוזים של כל גזי החממה באטמוספירה היו יציבים למדי עד שנת 1,800 בקירוב. ואז, לפני כ-200 שנה, התחילו לעלות בשיעור דרמטי, והם מוסיפים לעלות גם היום. יש מתאם טוב בין העלייה הדרמטית בריכוזים של גזי החממה ובין העלייה בטמפרטורות הממוצעות הגלובליות.

לפי הנתונים שעומדים לרשותנו היום עלייה דרמטית ומהירה כזאת בריכוזים של גזי החממה לא נראתה במיליון השנים האחרונות. הדעת נותנת שעלייה בשיעור כזה לא התחוללה מעולם עלי אדמות. מה, אם כך, חולל את העלייה המהירה הזאת? אם בוחנים את התאריך שבו החל השינוי אפשר לזהות מיד שהוא התחולל במקביל למהפכה התעשייתית. השינוי בכמות גזי החממה החל להתרחש כאשר בני האדם החלו לפתח מכונות, מנועי קיטור, חשמל, מכונות, חקלאות בקנה מידה גדול, ייצור תרופות וכדומה. כל הטכנולוגיות התעשייתיות אפשרו לנו להעלות את רמת החיים שלנו, לשפר את הבריאות שלנו, את ייצור המזון, את דרכי התחבורה, את רמת הדיור – ובעצם יצרנו באמצעות אנרגיה זולה כל דבר שאפשר לנו לחיות טוב יותר. בני האדם חיים שנים רבות יותר, מאכילים פיות רבים יותר, ואוכלוסיית העולם התרחבה בשיעורים שלא הכרנו מעולם. ב-200 השנים האחרונות גדלה אוכלוסיית העולם מפחות ממיליארד אחד ליותר משישה מיליארד. עצירת הגידול הזה אינה נראית באופק.

הגידול באוכלוסיית העולם בשילוב עם עליית רמת החיים מצריך שימוש באנרגיה ובקרקע; בלעדיהן אי-אפשר לשרוד ולשגשג. אבל אמצעי ייצור אלה תורמים לעלייה עקבית בריכוז של גזי החממה באטמוספירה. CO_2 נפלט בכמויות כאשר נשרפים דלקים פוסיליים (גז, פחם, נפט) בתחנות הכוח שלנו, במכוניות שלנו ובתעשייה. CH_4 ו- N_2O נפליטים ממזבלות, משדות אורז, מחיות משק, מדשנים וכו', ויש מתאם גבוה בין הפליטות האלה לגידול באוכלוסיית העולם. גם שטחי היערות, קולטי הפחמן הדו-חמצני, הולכים ומתמעטים. לכן ברור כי ככל שהאוכלוסייה הגלובלית הולכת וגדלה, כך הולכים וגדלים הריכוזים של גזי החממה – אם לא ייעשה דבר להגביל את פליטתם. התוצאה הברורה היא שאנו, בני האדם, גורמים במעשי ידינו להתהליך ההתחממות הגלובלית או לפחות לחלק מכריע מתהליך זה.

התחזית

מה צפוי לנו בעתיד? התשובה על השאלה הזאת תלויה במה שנעשה, בתרחיש שיבחרו אומות העולם לאמץ ובתוכנית שיחליטו לבצע. האם נמשיך בעסקים כרגיל או ננסה להקטין את הפליטות?

יש מחקרים שמלמדים על התחממות של עד שש מעלות בפחות ממאה שנה. כדי לקבל פרספקטיווה נאותה, בתקופת הקרח האחרונה לפני 20,000 שנה, כשהיה השטח הנוכחי של ניו יורק מכוסה בשכבת קרח שעומקה כשני ק"מ, הטמפרטורות הגלובליות היו נמוכות רק בחמש מעלות מאלו של היום. עברו עשרות אלפי שנים עד שכדור הארץ התקרר במידה שאפשרה חיים בניו יורק. עכשיו אנו מדברים על שינוי בסדר גודל דומה (בכיוון ההפוך) בתוך מאה שנה בלבד!

מה יכולות להיות התוצאות של התחממות כזאת? איננו יודעים. אנו יכולים להשתמש במודלים ספרתיים ממוחשבים, בניסיון לחקות את מה שיכול לקרות. מודלים אלה של האקלים הגלובלי מסובכים להפליא, ורק המחשבים החזקים ביותר יכולים להריץ את התרחישים והתחזיות שלהם. כל המודלים חוזים עלייה בטמפרטורות, שינויים בדפוסי הגשמים והתרוממות של מפלס פני הים. אף שהפרטים ועוצמת השינוי משתנים ממודל למודל, מכל המודלים עולה בדרך כלל המסקנה שתהיה התעצמות של המחזור ההידרולוגי. במילים אחרות, המקומות השחונים ייעשו שחונים יותר, ואילו אזורים גשומים יהיו גשומים יותר. ייתכן מאוד שמזג האוויר ייעשה קיצוני יותר. באזורים מסוימים תהיה עלייה בתדירות של גלי חום ושל בצורת. באזורים אחרים יתחוללו שיטפונות בתדירות גבוהה יותר. גם הסערות צפויות להתעצם בעולם חם יותר.

אקלים מוגדר כמזג האוויר הממוצע. כאשר האקלים משתנה, גם הנתונים הסטטיסטיים של מזג האוויר משתנים. אפשר להגדיר את הטמפרטורה, המשקעים וכל פרמטר אחר של מזג האוויר באמצעות התפלגות של ערכים המוגדרת על ידי הממוצע וסטיית התקן. קיץ 2003 מספק לנו דוגמה מהזמן האחרון, שמלמדת איך שינויים קטנים עלולים להשפיע על חיי היומיום שלנו. גל החום שפקד אז את אירופה העלה את טמפרטורת הקיץ הממוצעת מ-17 ל-22 מעלות (שינוי של חמש מעלות בטמפרטורה הממוצעת). שינויים בערכים הקיצוניים (בעיקר לילות חמים מאוד) גרמו למותם של כ-70,000 איש במהלך גל חום זה. שינוי אקלימי בעתיד לא יסתכם כנראה ב"סוף עולם" אפוקליפטי. אבל המצב ייעשה, בלשון המעטה, לא נעים עד מאוד. הערים והמדינות שלנו בנויות על תשתיות שמבוססות על האקלים הנוכחי. בין שמדובר בגידולים חקלאיים ובין שמדובר במשאבי המים, בבריאות או בשימוש באנרגיה, נבצר מהחברות שלנו להסתגל בקלות ובמהירות לשינויי אקלים גדולים. בצורת בקנדה עלולה להיות הרסנית אף על פי שאין בה מחסור במים, זאת משום שרוב החקלאות בקנדה מסתמכת אך ורק על גשמים שיורדים בכל שנה, ובשפע. אם הגשמים ייעצרו או ירדו לסירוגין, לא תהיה תשתית מוכנה להתמודדות עם מצב כזה.

אם ההוריקנים יתעצמו, או יתחוללו בתדירות גדולה יותר, יחוו 80 מיליון התושבים לאורך קו החוף האטלנטי של ארה"ב סופות קתרינה רבות יותר, והממשלה תצטרך להוציא הרבה יותר כסף לפינוי הריסות ולבנייה מחדש בכל פעם שתתחולל סערה. בסופו של דבר ידרש משלם המיסים לפרוע את החשבון.

אם השינויים בטמפרטורה ובירידת הגשמים יגרמו להתפשטות של מלריה ומחלות אחרות, תגדל התפוצה של מגפות מקומיות ואזוריות פי כמה. אם משאבי המים יצטמצמו מאוד, התוצאה יכולה להיות סכסוכים רבים יותר בין מדינות צמאות למים. אם שינויי אקלים ולחץ על אוכלוסיות עולם שלישי יגרמו להגירות אוכלוסין גדולות, תגבר המתיחות הבין-גזעית והלאומית. יש תרחישים אפשריים רבים שראוי לתת עליהם את הדעת ולהיערך לקראתם.

האם מדובר בגזרת גורל או שהמעשים שעשינו במו ידינו ניתנים לתיקון? האם ניתן למנוע שינוי אקלימי קיצוני? התשובה הקצרה היא כן. אפשר להתמודד עם בעיה זו ולהפוך על פיהן את המגמות של ריכוזי גזי החממה, ואחר כך את המגמות של הטמפרטורות הגלובליות. אבל פעולה כזו דורשת פעילות גלובלית אמיתית ונחושה ושיתוף פעולה בינלאומי בין מדינות מפותחות ומתפתחות.

יש שני לוחות זמנים שצריך להתייחס אליהם. בטווח הארוך עלינו להימנע משימוש בדלקים פוסיליים. הפקת אנרגיה מדלקים פוסיליים (נפט, פחם וגז טבעי) גורמת לפליטת CO₂ לתוך

האטמוספירה. עם עליית הביקוש לאנרגיה והגידול באוכלוסייה לא נוכל לפתור את בעיית השינוי האקלימי בלי לטפל באופן ייצור האנרגיה. על השולחן מונחות אופציות רבות, שכמעט כולן אינן מעשיות כיום. יש לקדם מקורות אנרגיה נקיים כמו חשמל סולרי, אנרגיית רוח, אנרגיה גאותרמית, אנרגיה הידרואלקטרית, דלק ביולוגי ואפילו אנרגיה גרעינית. יש צורך בהשקעה מסיווית במחקר ובפיתוח של אנרגיה מתחדשת.

ישראל יכולה לתרום בתחום זה באופן שיקנה לה בכורה בקנה מידה גלובלי, ולהפיק תועלת כלכלית מהמשבר העולמי. אנרגיה גרעינית נחשבת בחוגים רבים לביטוי מגונה ופסול, ובכל זאת צרפת מפיקה יותר מ-90% מאספקת החשמל שלה מכורי כוח גרעיניים. נותרה עדיין השאלה מה לעשות בפסולת הגרעינית, אבל יש פתרונות גם לבעיה זו. הציבור אכן מוסיף לחשוש מתאונות גרעיניות כמו זו שהתרחשה בשנת 1986 בצ'רנוביל. אבל כאשר שוקלים את התוצאות של שינוי אקלימי לעומת הסכנה של תאונה גרעינית, ייתכן מאוד שהאופציה הגרעינית תימצא עדיפה בהרבה. תאי דלק ותאי מימן יוכלו להקטין את התלות שלנו בנפט ולפתור את בעיית התחבורה בעתיד. זה יהיה גם מהלך חכם מבחינה פוליטית, משום שהוא יקטין את התלות של העולם במדינות אופ"ק. לשינוי כזה בסדר העדיפויות יהיו גם תוצאות פוליטיות ואסטרטגיות ביחס לאזורים כמו המזרח התיכון.

בעודנו פועלים כדי לפתור את הבעיה ארוכת הטווח של הדלקים הפוסיליים ושל התחליפים שלהם, עלינו למצוא גם פתרון קצר טווח להתחממות גלובלית בניסיון להאט את העלייה בריכוזים של גזי חממה. לשם כך יש להגדיל את היעילות האנרגטית בכל המגזרים, מתחנות כוח יעילות יותר, למכוניות שעושות שימוש יעיל יותר בדלק, ועד לערים ובתים שמנצלים אנרגיה זולה ממקורות טבעיים. שיטות עיבוד חקלאי יעילות יותר וצמצום הפליטות בתעשייה יאטו את קצב העלייה בריכוזים של גזי החממה ויספקו לנו מעט מרווח נשימה למציאת פתרונות לטווח ארוך.

כאן נועד תפקיד חשוב לאמנת קיוטו. יסודה היתה בכוונות טובות, אבל לא היה בה כדי להביא להפחתה אמיתית של פליטות גזי החממה לאטמוספירה. עכשיו מנסחים בקופנהגן הסכם בינלאומי חדש, שיחליף בשנת 2012 את פרוטוקול קיוטו. הסכם בינלאומי כזה, עם כל חשיבותו בטווח הקצר, רק דוחה את ההתמודדות האמיתית ואינו מספק פתרון אולטימטיווי לבעיה. שעתו של הפתרון האולטימטיווי תבוא רק כשנמצא דרך טובה להקטין את הסתמכותנו על דלקים פוסיליים.

לאור האפשרות שכל המאמצים האמורים ייכשלו, מתחילים כעת מדענים לדבר על גאוו-הנדסה. מדובר בהתערבות מכוונת במערכת האקלים כדי לקרר את כדור הארץ באופן

מלאכותי. פרויקטים כאלה כוללים הזרקת חלקיקים מיקרוסקופיים לתוך האטמוספירה העליונה (כחיקוי של התפרצות וולקנית), כדי להחזיר לחלל משהו מקרינת השמש לחלל. החזרה כזאת תקרר את האקלים באופן מבוקר, עם מעט תוצאות לטווח ארוך, אבל אפשר שיהיו לכך גם תוצאות לטווח קצר כמו גשם חומצי, שינויים בדפוסי הגשמים וכן הלאה. רעיונות גאו-הנדסיים אחרים כוללים הבהרת עננים נמוכים כך שגם הם יחזירו יותר אור שמש לחלל ויקררו את הפלנטה. לאחרונה דובר על פיתוח עצים מלאכותיים המסוגלים לספוג כמויות גדולות של פחמן דו-חמצני. יש גם מי שמציעים לדשן את האוקיינוסים בברזל כדי להגביר את הפעילות הביולוגית שתשאב CO₂ מהאטמוספירה באמצעות פוטוסינתזה. להלכה, כל הרעיונות האלה עשויים לפעול, אבל מן הסתם מחכות לנו כמה הפתעות לא צפויות, כפי שקורה לא פעם כשמתחילים לשחק עם אימא אדמה. כדור הארץ חולה, יש לו חום, ואם לא נפעל מהר – הוא יזדקק בקרוב לטיפול נמרץ. את מחיר האשפוז ישלמו בעיקר ילדינו ונכדינו.

פרופ' קולין פרייס הוא ראש החוג לגאופיזיקה ולמדעים פלנטריים באוניברסיטת תל אביב, ומומחה למדעי אטמוספירה ואקלים

המאמר פורסם לראשונה במגזין [אודיסאה](#)