

# כמה מלים על משבר האקלים.

## נדב שנרב

משבר האקלים הפך, בעשרים השנים האחרונות, מבעיה שהטרידה כמה משוגעים לדבר לנושא פוליטי בוער בכל מדינות העולם המערבי. מאמר זה נכתב על מנת להבהיר מדוע יש לי גישה חשדנית לנושא, אך לפני שאעבור להביע את דעתי, חשוב להבהיר את סוג הידע עליו אני מסתמך.

ובכן, אני פסיקאי מקצועי, אך מימי לא עסקתי בתיאוריה או בפרקטיקה הנוגעת בדבר (מודלים של מזג אוויר). יכול להיות שיש לי היכולת, בהשקעת מאמץ של שנה שנתיים, להגיע לדרגת מומחיות ראויה בנושאים אלו, אבל אין לי את החשק ואת הזמן לעשות כך. מבחינה זו, כל מי שירצה לטעון שאני מפריח דברי הבל מוזמן בכבוד ולהיפך – מי שירצה להסתמך על דברי כעדות מהשטח של מומחה לנושא הספציפי מתבקש להימנע מכך.

מה יש לי להציע, אם כך? הייתי מגדיר זאת, במקרה הטוב, כ common sense על בסיס ידע היקפי, ובפרט ניסיון בתיאוריה ובפרקטיקה של ניתוח מערכות מורכבות. אקלים, כפי שאסביר מיד, הוא אכן מערכת מורכבת, ובכמה פרטים ניתן לגזור איזו גזירה שווה בין חיזוי ארוך טווח של אקלים לתחומים אחרים של הפיסיקה. מעבר לכך יש לי גם ידע מסוים על הסיכונים של קרינה מייננת ועל פעילות המסד המדעי בתחומים משיקים (ההקשר של נושאים אלו יתברר בהמשך). מטרתי במאמר הזה איננה להפוך את הקורא לאדם הדוחה מכל וכל את הפעילות בנושא האקלים – גם אם זו הרגשתי, אינני יכול לשכנע בה – אלא להעלות כמה סימני שאלה שחשוב, לדעתי, להתחשב בהם. מעבר לכך, נדמה לי שגם מי שיסיים את קריאת המאמר בלי להסכים אתי יכיר על הדרך כמה סיפורים מעניינים.

מוכנים? קדימה:

## מרומא תפתח הרעה

"מועדון רומא" (club of rome) הוא מכון מחקר שהוקם על ידי קרן המדע האיטלקית הלאומית בשנת 1968, והוא מאגד פוליטיקאים, מדענים, כלכלנים ואנשי או"ם הנדרשים לבעיות הבסיסיות של המין האנושי ולנסיגות לפתור אותם. בשנת 1972, במלאת ארבע שנים להווסדו, הוציאה קבוצת המחקר של המועדון - שבעה עשר מדענים מאוניברסיטת MIT רבת היוקרה - את הספר "גבולות לצמיחה" (limits to growth), ספר העוסק בכילוי משאבי כדור הארץ עקב ההתפתחות הכלכלית המואצת. הספר שבר שיאי עניין ותהודה, ומהדורתו המקורית נמכרה ביותר משלשים מליון עותקים. כל המחברים פיתחו קריירות אקדמיות מרשימות וזכו בעשרות פרסים על פעולתם למען האנושות.

מה היתה אותה פעולה? אני מניח שכבר ניחשתם. הספר, כמתחייב משמו, התריע כי אם האנושות תמשיך להתפתח מבחינה כלכלית יהיה אסון נורא ואיום, קריסה, רעב ומוות של מיליארדים. בפרט, המחברים חזו כי בשנת 2003 לא יהיו בעולם מספיק קרקעות הניתנות לעיבוד על מנת לספק את צרכי המזון של הבריות. עתודות הזהב של כדור הארץ יכלו ב 1981, הכסף ב 1983, הנחושת והעופרת ב 1993, הנפט ב 1992, הגז הטבעי ב 1994. התפוקה התעשייתית תצנח בראשית המאה ה 21 ואילו האוכלוסיה תמשיך לגדול והלכלוך ימשיך להצטבר עד לקטסטרופה ולקריסה המוחלטת של המין האנושי.

הכל היה כמובן מדעי ומוסמך. כותבי הדו"ח השתמשו בסימולציות מחשב, משהו שהיה אז חידוש מדעי מרעיש והעניק לדבריהם חזות אמינה ביותר. כפי שניתן לצפות, הם גם טרחו להוסיף אותיות קטנות האומרות שכל התחזיות

שלהם יהיו נכונות רק אם הדינמיקה של העולם (קצב העליה בתיעוש, קצב גידול האוכלוסיה, קצב גילוי שדות נפט חדשים וכדומה) תציית להנחות שאותן הפיקו מנתוני עבר, אבל את ההערות האלו ניתן להניח שאיש לא קרא<sup>1</sup>.

בכל אופן, אנשי רומא לא היססו להסיק את המסקנות המתבקשות: בדברי הסיכום שלהם הם מסבירים שאין שום ברירה, שזו משימה דחופה, כזו המוטלת על הדור שלנו ואי אפשר להעביר אותה לדורות הבאים כי אז יהיה מאוחר מדי (ע' 193). מהי המשימה? הפיכתה של החברה האנושית שלנו, המתקדמת כל הזמן מבחינה אנושית ותעשייתית, לחברה שהיא "במצב שיווי משקל" עם הסביבה, או במלים פשוטות – עצירה מידית של כל התקדמות תעשייתית. שוו בנפשכם – אין טלפונים סלולריים, אין תנורי מיקרוגל, אין מחשבים ביתיים, אין אינטרנט, אין CT, אין MRI, תוחלת החיים היא ששים.

המחברים היו ערים להשלכות הפוליטיות של המלצותיהם. הם יודעים שמדובר בתהליך "חד ורדיקלי" שיהיה גם "כואב" ושהוא ידרוש "רפורמה רדיקלית של המוסדות והתהליכים הפוליטיים בכל הרמות, כולל הגבוהות ביותר". בעצם מדובר בקריאה להקמתה של ממשלת מתכננים עולמית, כזו שתעצור את הקדמה התעשייתית במדינות המפותחות ואף תסיג אותן לאחור כדי שלא ליצור פער מן המדינות המתפתחות. מי יהיו אותם שליטים חדשים שיקבלו את המשימה לתכנן את העולם כולו, מעל ראשיהן של ממשלות ועמים? קשה שלא לקבל את ההתרשמות שמחברי הדו"ח ראו מדי פעם, בעיקר כאשר התבוננו במראה, כמה מועמדים לא רעים לתפקיד.

כאשר קוראים את הדו"ח לאחר כמעט חמשים שנה, מתקשים להבין מה גרם לכשלון הקולוסאלי הזה. אנשי MIT עמדו על שתי נקודות פשוטות ששתיהן נראות אמיתיות. הראשונה היא שתחזיות צריכות להיות מבוססות על קצב הגידול ולא על המצב הנוכחי: אם היום צורכים מיליארד חביות נפט ליום ועתודות הנפט הן מאה מיליארד, אי אפשר לומר שיש מספיק נפט למאה שנה, מפני שקצב השימוש בנפט הולך וגובר (לפני עשור צרכו חצי מיליארד ובעוד עשור יצרכו שני מיליארד) ואת הגידול הזה יש לקחת בחשבון. הנקודה השניה היא שיש לבחון את המצב באופן "הוליסטי" – לא צריך להתמקד בצריכת הנפט לבדה, כי זו תלויה בגודל האוכלוסיה, שמצדה תלויה בכמות המזון שניתן לספק, ואילו כמות המזון נקבעת על ידי קצב פיתוח התעשייה והחקלאות שחלק ממנו תלוי, שוב, בזמינותם של מקורות אנרגיה כמו נפט. זו היתה הבעיה שניסו המדענים לפתור באמצעות סימולצית המחשב שלהם אשר היתה מסוגלת להביא בחשבון את כל התלויות ההדדיות ומעגלי המשוב הללו.

ובכן, אם הכל כל כך טוב, מדוע התוצאה היתה כה רעה? מדוע, במבט לאחור, הדו"ח של מועדון רומא נראה כמפעל משותף של כנופית פסיכופטים שונאי אדם? כדי להבין זאת יש להכיר כמה מושגים בסיסיים הקשורים לדינמיקה של מערכות מורכבות, ובתור דוגמה נוכל לבחור במשהו הנוגע ממש לענייננו: חיזוי מזג אוויר.

## ריצ'ארדסון בערימת שחת

לואיס פריי ריצ'ארדסון הוא מן הסתם אחד המדענים הדגולים ביותר שאת שמעם לא שמעתם מעולם. האיש היה גאון בטירוף, ותרם תרומות חשובות כמעט לכל ענפי המדע, ממתמטיקה עד פסיכולוגיה, מסטטיסטיקה של מלחמות עד איתור קרחונים על ידי ספינות. אין כאן המקום לתאר את תולדות חייו המרתקים, נסתפק באספקט אחד שלהם: תרומתו למדע המטראולוגיה.

ריצ'ארדסון היה הראשון שהבין, בראשית המאה העשרים, כי על בסיס נתונים כמו טמפרטורה, לחץ ברומטרי, כמות האדים באוויר ניתן לחזות את מזג האוויר בעתיד, ובכך ייסד את מדע המטאורולוגיה המודרני. על פניו עמדו לרשותו כל הכלים הדרושים כדי להיות מסוגל לנבא את מזג האוויר בעתיד על סמך המצב בהווה, אלא שהיה קוץ באליה. בדיוק כמו בחשבונותיהם של אנשי מועדון רומא, גם כאן יש תלויות הדדיות ומעגלי משוב בין הגורמים השונים: הטמפרטורה משפיעה על הלחות, הלחץ הברומטרי על הטמפרטורה וכן הלאה, כך שלא ניתן לחשב כל גודל בנפרד.

<sup>1</sup>הערות אלו נתנו להם ביטוח נאה – הן בעצם אומרות שהטעות היחידה עליה ניתן לבקר אותם בלי שהם יוכלו להתחמק היא תפעול לא נכון של תכנית המחשב אותה כתבו. קראתי כאלו שטענו גם את זה: שהיו להם שגיאות עיגול בגלל החומרה בה השתמשו – אבל אינני חושב שהדבר שווה בדיקה.

ריצ'ארדסון גילה שכדי להשיג חיזוי אמיתי של מזג אוויר עליו לפתור שבע משוואות דיפרנציאליות מהסוג הנקרא משוואות **מצומדות**: המשוואה עבור לחץ האוויר לוקחת כפרמטר את הטמפרטורה, משוואת הטמפרטורה לוקחת כפרמטר את לחץ האדים שהוא בעצמו תלוי במהירות הרוח שקשורה ללחץ וכן הלאה. כל אחת מהמשוואות היתה גם קשה כשלעצמה (לא לינארית) וגם תלויה בתוצאה שהניבו כל המשוואות האחרות.

גם היום אין לאיש מושג כיצד ניתן לפתור את סט המשוואות הזה. כדי להשיג תחזית מזג אוויר משתמשים היום במחשב מהיר, ומה שעושה אותו מחשב הוא לפתור את המשוואות באופן המכונה "נומרי": מניחים כי בפרק זמן מספיק קצר, נגיד שעה, כל הפרמטרים משתנים רק מעט. מה שאעשה הוא לקחת את מהירות הרוח והלחץ בתחילת השעה ולחשב את השינוי בטמפרטורה תוך כדי אותה שעה **בהנחה** שהמהירות והלחץ קבועים. לאחר מכן אפתור עבור הלחץ בהנחה שהטמפרטורה והמהירות קבועות וכן הלאה וכן הלאה. התוצאה תהיה הערכה לגדלי המהירות, הטמפרטורה וכדומה לאחר שעה, ואז אציב אותם כפרמטרים במשוואה עבור השעה הבאה וחוזר חלילה. בתנאים מסוימים ניתן להראות שהטכניקה הזו עובדת יפה מאד.

נשארה רק בעיה קטנה. בתקופת מלחמת העולם הראשונה, בה ניסה ריצ'ארדסון לבצע את החישובים, המחשב היה צפון עדיין בערפילי העתיד. אך לא איש כמוהו יבהל מבעיה פעוטה שכזו. באותה תקופה הוא שרת כנהג אמבולנס בחזית המערב<sup>2</sup>, ובשעות הפנאי שלו השתרע על ערימת שחת בתוך מחסן קפוא בו התגורר והפך את עצמו למחשב אנושי: בעזרת כמות גדולה של גליונות נייר וכמה עפרונות הוא ביצע את החישוב הנומרי בעצמו במשך כמה חדשים.

לאחר שנסתיימה המלחמה פרסם ריצ'ארדסון הנלהב את חישוביו ורעיונותיו בספרו "חיזוי מזג אוויר בעזרת תהליכים נומריים" – אחד מדלי המכר של כל הזמנים. באותה תקופה לא נראו רעיונותיו בני ביצוע, מאחר שהם דרשו חישובים ארוכים ומסובכים. יש לציין שריצ'ארדסון עצמו הציע לבצע את החישוב בעזרת "מחשבים" (computers), אבל הוא לא העלה בדעתו מתקנים מבוססי סיליקון אלא מחשבי בשר ודם: הוא חלם על אולם ענק מלא במתמטיקאים כשרוניים שכל אחד מהם פותר משוואה אחת בכל רגע נתון ואז מעביר את תוצאותיו לאיזה מרכז עבודה היושב במרכז, סוכם את התשובות החלקיות ומעביר לכל משתתף את המשוואות הבאות שצריך לפתור.

רעיונות אלו נשארו על הנייר עד שנסתיימה מלחמת העולם השנייה והופיעו המחשב, הנשק הגרעיני, המלחמה הקרה והאיש שבדמותו התאחדו כל הגורמים האלו – המתמטיקאי ג'והן פון נוימן. אם ריצ'ארדסון היה פציפיסט קנאי, פון נוימן היה ההיפך הגמור, אם כי לזכותו ייאמר שהאנשים שהוא שנא היו רשעים, בעיקר קומוניסטים. בשנות השלשים התעניין פון נוימן בהידרודינמיקה והתוודע לרעיונותיו של ריצ'ארדסון. לאחר שהכיר בערכו של המחשב כאמצעי לפיתוח פצצת האטום, הוא הבין גם שניתן להשתמש בו, לפי חזונו של ריצ'ארדסון, לחיזוי מזג אוויר. את הפרוייקט הזה הוא מכר לממשל האמריקני כאמצעי ל"לוחמה אקלימית" – לפי חזונו של פון נוימן, פעולות מכוונות שישנו את האקלים, כמו פיזור שכבות מיקרוסקופיות של צבע שחור על אזורים מושלגים, יוכלו לשמש לשינוי מזג האוויר, לגרום לבצורות שישימו את היבולים בארץ הסובייטים או לסופות נוראות שיגרמו נזק רב יותר מפצצות גרעיניות. הממשל בווישינגטון השתכנע, כמובן, והעמיד את הממון הנדרש לפרוייקט המיחשוב של תהליך החיזוי.

יזמתו של פון נוימן ועבודתם של ממשיכי דרכו העמידו את הבסיס האיתן לחיזוי מזג האוויר בעולמנו, אבל למרבית השמחה או הצער, לוחמת אקלים לא הפכה לשיטת פעולה מעשית ומטוסי B52 לא פיזרו אבקת פחם על כיפת הקוטב כדי שמוסקבה תימחק בסופת טורנדו אדירה. מה שגילו החזאים החלוצים הללו, לדאבון לבם, הוא שהמודל של ריצ'ארדסון סובל מאיזושהי תופעה של אי יציבות: הוא מספק חיזוי נכון לשעות ואפילו לימים מספר, אך ככל שמריצים את המחשב יותר ויותר קדימה, כאשר מנסים לספק תחזית לשבוע או לחודש או לשנה, המחשב משתגע ומוציא מספרים הזויים שאין להם קשר למציאות. דור שלם של מטראולוגים נאבק בתופעה הזו, ניסה לשפץ את תכנית המחשב פה ושם – לשווא. את ההסבר לתופעה אי היציבות גילה עמיתם מ MIT, אדוארד לורנץ שמו, והוא מתקשר למה שידוע כיום בתור **דינמיקה כאוטית**.

כאשר אנו יורים פגז למרחק של עשרה קילומטרים, או מכוונים טיל שיגיע לירח, אנו מחשבים (על הנייר, או בעזרת מחשב) את נקודת הפגיעה. בחישוב הזה אנחנו לוקחים כנתון את מיקום התותח ואת מהירות הפגז: ברור שאם

<sup>2</sup>ריצ'ארדסון השתייך לכת נוצרית, הקווייקרים, שדוגלת בפציזם, ולכן סרב לשאת נשק. הצבא האנגלי אפשר לו לשרת בתפקיד של נהג אמבולנס, אבל במחיר זה הוא היה מנוע מלקבל משרה אקדמית לכל ימי חייו.

הפגז יצא את הלוע במהירות גדולה יותר, הוא יפגע רחוק יותר, לכן יש להקפיד על אחידות בכמות חומר הנפץ ההודף שיש בפגז – כדי שלכל הפגזים תהיה מהירות לוע אחידה.

אבל כמה ניתן להקפיד על כך? גם אם ננסה לדייק מאד, גרגיר חומר נפץ אחד, או הפרשי טמפרטורה קטנים, יגרמו לפגז אחד לצאת במהירות של אלף מטר לשניה ולפגז שני לעזוב את הלוע במהירות של 999 מטר לשניה וכדומה. תמיד יהיו הפרשים קטנים. מקצוע התותחנות מבוסס על ההנחה שהפרשים קטנים כאלו יגרמו לשינויים קטנים בתוצאה: הפגז המהיר יותר יפול אולי שני מטר לפני זה האיטי, אבל עצמת הפיצוץ היא מספיקה כדי שהאויב האכזר לא ישרוד גם אם הוא עומד במרחק שני מטר מנקודת הפגיעה.

במערכות דינמיות כאוטיות לא זה המצב. שינוי זעיר בתנאי ההתחלה מתפתח במהירות לשינוי עצום בסוף המסלול. אילו היתה תנועת הפגזים כאוטית, היה ניתן לירות אותם בבטחה רק למרחק של כמה מטרים, ואילו פגז שהיה מכוון מרמת הגולן לדמשק היה עלול לנחות בצפת. תנועת פגזים איננה כאוטית, אבל ללורנץ התברר שהדינמיקה של מזג האוויר היא אכן כזו: שינויים זעירים כרצונך ברגע מסוים יגרמו לתוצאות שונות בתכלית לאחר כמה ימים. לורנץ נתן לתופעה את השם "אפקט הפרפר" – משק כנפיו של פרפר בברזיל יכול לחולל לאחר שבוע הוריקן מעל האוקיינוס האטלנטי.

תובנותיו של לורנץ שינו לחלוטין את הצורה בה מסתכלים על חיזוי מזג אויר. מאז עבודתו ברור לכל שחיזוי מזג אויר אמין חייב להיות פעולה לטווח קצר. ככל שגדלות יכולותיהם של המחשבים, הם אינם יכולים לגרד אפילו את רמת הדיוק שתאפשר להם לחזות אם יירד גשם ביום חורף מסוים בעוד חודש.

## המודלים נגד הפרפרים

בשלב הזה של הדיון אני מניח שהקורא תוהה מעט. אם אי אפשר לנבא אם ירד גשם בעוד שבועיים, אם פרפר אחד יכול לגרום לסופה בלתי צפויה, איך יכול להיות שאנשי האקלים מנבאים לנו עליה של שתי מעלות צלזיוס במאה שנה? האם הם כבר סיכמו עם כל הפרפרים בעולם על אופן נפנוף הכנפיים שלהם למאה השנים הקרובות?

האמת היא שהבעיה היא עוד יותר גרועה, וזאת משתי סיבות.

ראשית, בחיזוי אקלים לזמן ארוך לא מספיק לפתור את המשוואות המקוריות של ריצ'ארדסון (שגם בהן ניתן להשתמש באופן מעשי רק לתחזית לכמה ימים), צריך לקחת בחשבון עוד גורמים רבים. אם תהיה התחממות יתאדו יותר מים ויהיו יותר עננים, לא? ואז אותם עננים יגרמו לירידה בכמות אור וחום השמש שמגיעה לכדור הארץ, נכון? ובכיוון אחר: צמחים, כזכור, משתמשים בדו תחמוצת הפחמן לתהליך הפוטוסינתזה ופולטים חמצן, לכן עליה בכמות דו-תחמוצת הפחמן באויר תגרום לשגשוג של הצמחיה ש"תבלע" את עודפי הייצור<sup>3</sup>. ועוד לא דיברנו על הרי געש: התפוצצות הר הגעש טמבורה ב 1815 הורידה את טמפרטורת כדור הארץ בחצי מעלה למשך שנה. בקיצור, לא מדובר כאן על מערכת כאוטית אחת אלא על הרבה מערכות, שכל אחת מהן מסובכת ובלתי צפויה בדרכה שלה, שכולן יחדיו משפיעות זו על זו בדרכים שלא את כולם אנו מבינים.

שנית, הרי אנו יודעים שגם בלי שום פעילות אנושית, מזג האויר על כדור הארץ אינו יציב ויש בו שינויים על סקלות זמן של מאות ואלפי שנים. לפני עשרת אלפים שנה היתה תקופת קרח בה קנדה, מחצית ארה"ב, פולין וגרמניה כוסו לגמרי בקרחונים. האנשים הראשונים שהגיעו לאיים הבריטיים הגיעו כנראה ברגל, בצעדה מעל תעלת למנש הקפואה. "עידן הקרח הקטן" – מסוף ימי הביניים עד המאה ה 19 – התאפיין, לפחות בחצי הכדור הצפוני, בחורפים קרים בהרבה מאלו שהיו לפניו. כדור הארץ או לפחות חציו הצפוני היה קר יותר מהיום במעלה בערך. מדענים רבים מאמינים שלפני 650 מיליון שנה היתה תקופת קרח שבה כל כדור הארץ, עד קו המשווה, התכסה בקרחונים. ומה

---

<sup>3</sup> גם כאן הצגתי רק חלק קטן מהסיבוך: אם מדובר על עצים, דו תחמוצת הפחמן שהם יבלעו תחזור יום אחד לאויר שהרי סוף עץ לשריפה, לכן צריך להפריד בין פוטוסינתזה של עצים וצמחיה יבשתית לפוטוסינתזה שנעשית על ידי הפלנקטון בים, שאינו נשרף אלא נאכל על ידי דגים.

שחשוב: אין קונסנסוס מדעי בקשר לגורמים שהובילו לתקופות קרח או ליציאה מהן. יש כל מיני הסברים מתחרים, שקיומם משקף את העובדה שאיננו מבינים לגמרי מה הולך.

לסיכום, הגורם המרכזי בו מתעניינים אנשי האקלים, טמפרטורת כדור הארץ, הוא פרמטר המושפע ממנגנונים רבים התלויים זה בזה, שלכל אחד מהם דינמיקה סבוכה ובמקרים רבים כאוטית. אולי יכול לקרות נס ושילוב של כל המנגנונים האלו ייתן פרמטר ששומר על ערכו לאורך זמן אך זה אינו המצב: הטמפרטורה מתנהגת בצורה פרועה לחלוטין עם קפיצות שלא ניתן להסביר למשכי זמן אותם לא ניתן לחזות.

אז מה לעזאזל חושבים לעצמם האנשים שמתריעים מפני התחממות גלובלית? האם מדובר בכנופיה של שוטים גמורים שהשתלטה על ענף אקדמי חשוב?

כעת עלי לסגת צעד אחד לאחור. לא שמישהו זקוק למחמאות ממני אבל למיטב הכרתי, מדעני האקלים הם אנשים רציניים. הם מודעים לגמרי לכל הבעיות שהעליתי, הם עושים מאמצים כנים להעריך כמה דו תחמוצת הפחמן בולעת צמחיית האמזונס וכיצד משפיעים העננים על הטמפרטורה וכולי וכולי, הם גם מבינים היטב את השאלות שהעליתי כאן ואת המגבלות של יכולת הניבוי לטווח ארוך על בסיס המשוואות הבסיסיות שמתארות את המערכת.

אם תשאלו את מדעני האקלים שאלות מהסוג שהצגתי כאן, הם יענו לכם בדוגמה נאה. נכון, אני לא יכול לנבא אם יהיה גשם בעוד חודש או סופת חול בעוד חצי שנה. אבל אני יכול לנבא בבטחון רב שבאוגוסט 2050 מזג האוויר בתל אביב יהיה חם, הביל ומגעיל, או שבינואר של אותה שנה לא יהיו חמסינים נוראים. **גם במערכות מאד מאד מאד מסובכות ניתן לזהות מדי פעם תבניות סדורות. לטענת אנשי האקלים, עלית הטמפרטורה כתוצאה מאפקט החממה, נאמר, היא תבנית סדורה מן הסוג הזה.**

רוצים עוד דוגמה? אנטיביוטיקה. גוף האדם גם הוא מנגנון מסובך מאד, עם המון מערכות שמשפיעות זו על זו. אף אחד לא היה מתפלל אם שימוש באנטיביוטיקה היה גורם לאחר חצי שנה לצניחת עפעפיים או לתפיחת האזניים – לך תדע מה קורה כאשר אתה משבש את פעולת הגוף באופן כלשהו? אבל מתברר ששימוש באנטיביוטיקה מביא לתופעות לוואי קטנות ביחס, כך שניתן להשתמש בו בבטחה כדי להפטר מחיידקים מחוללי מחלות. שוב: יש מערכת מסובכת מאד, אבל אפשר לזהות בה תבנית סדורה ומועילה – חלית? קח אנטיביוטיקה והיא תשנה פרמטר אחד (כמות החיידקים הפעילים) בלי להפריע יותר מדי לכל יתר המערכת.

זה מה שעושים בפועל אנשי האקלים, כאשר הם מנסים לנבא את מזג האוויר בשנה או במאה השנים הבאות. הם לא מנסים לפתור את המשוואות של ריצ'ארדסון לתקופת הזמן הארוכה הזו, כי הם יודעים שהפתרונות יהיו חסרי משמעות. במקום זה הם משתמשים במודלים. אם לתאר זאת בפשטנות מסיימת, אני יכול לאסוף המון נתונים (לחץ ברומטרי, טמפרטורה, רוח, משקעים, עצמת קרינת השמש למטר מרובע ועוד ועוד) מהרבה מקומות על כדור הארץ, ואז לכתוב – על בסיס היכרותי עם המערכת וההגיון הפיסיקלי - איזה אלגוריתם שינבא את העתיד, משהו בנוסח "הטמפרטורה בעוד חודש ביוון תהיה הממוצע העונתי ועוד חצי מהלחץ הברומטרי של החודש שעבר במרוקו פחות כמות הגשם בחזקת שלש ורבע"<sup>4</sup>.

כעת אני ניגש "לאמן" את המודל הזה: אני משתמש במאגר הנתונים העצום שיש, מזין למודל את השנים 1950-1970 ומתחיל להוציא ממנו ניבויים לגבי השנים 1971-1980. מכיוון שמזג האוויר באותן שנים גם הוא ידוע לי, ניתן לגלות שהמודל לא חזה אותו נכון, ואז מתחילים להזיז פרמטרים: לא חצי מהלחץ הברומטרי אלא שלישי, לא הגשם בחזקת שלש ורבע אלא בחזקת שתיים וחצי וכן הלאה וכן הלאה, עד שאני מקבל מודל שחזה נכון את שנות השבעים. סיימתי? נהדר. כעת אני לוקח כנתון את שנות השבעים ומנסה לנבא את שנות השמונים, שוב אני מגלה שהמודל לא מושלם, שוב משחקים עם הפרמטרים (כמובן שכל התהליך ממוחשב, וכמובן שאחרי ששיחקת עם הפרמטרים עבור שנות השמונים צריך לחזור ולבדוק שלא הרסת את התחזית לשנות השבעים) וחוזר חלילה. כשהתהליך מסתיים, אנשי האקלים מאמינים שהם גילו את התבניות הסדורות הנסתרות בלי צורך לגזור אותן מהמשוואות האלמנטריות. אני לא יודע איך בדיוק עובד המנגנון שגורם לכך, אבל גיליתי שכשיש חורף קשה בברזיל תמיד לאחר שנתיים יהיו סופות ביפן – משהו בסגנון הזה.

<sup>4</sup>לא הקפדתי על יחידות. אני יודע. זו סתם דוגמה.

## האנשים שאתם משלמים להם סתם

הנה, סוף סוף, הגעתי לנקודה בה אסביר מדוע אני ספקן אקלים. ה"מודלים הגדולים" שעליהם דיברתי כעת משמשים לא רק באקלים. אנשים עושים את אותם התרגילים ברפואה (ניתוח של המון נתונים על פעימות לב ולחץ דם ו EEG ונסיון למצוא קשרים ביניהם), באקולוגיה (נתונים על שכיחויות של כל מיני מיני ציפורים, נגיד, לאורך זמן), בכלכלה – איפה לא. התחומים שונים אבל הפרקטיקה זהה: יש לך המון נתונים שאתה לא מצליח לזהות ביניהם קשרים ברורים, לכן אתה שופך אותם לתוך איזה מודל ענק ומשחק עם המון פרמטרים עד שהמודל מצליח למצוא קשרים כאלו. חשוב להבין שבעצם מדובר כאן על מציאת "חוקי טבע" – אילו היה העולם בנוי כך שתמיד חודש אחרי ירידת גשם ביוון יהיה חמסין בערב הסעודית, היינו שמים לב לכך בעצמנו, החוקים שמזהה המודל הם הרבה יותר מסובכים ואדם אינו מסוגל להרגיש בהם כאשר הוא מסתכל בנתונים, וזה בדיוק אמור להיות היתרון של עבודה עם המודל.

בשיטה הזו יש איזה קסם. איך כתב קאנט במאמרו הידוע "מהי נאורות"? "אם ספר לי ששכל לו במקום שכלי, אם כומר לי שמצפון לו במקום מצפוני ... אין עלי להתאמץ ולחשוב, אחרים יעשו מלאכה מאוסה זו במקומי". גישת המודלים בעלי פרמטרים רבים שעושים להם training על נתוני עבר היא המקבילה בעולם המדע: אם תכנית מחשב ענקית לי שאליה אני יכול לשפוך טונות של נתונים והיא תזהה לי את חוקי התנועה של המערכת ותביא לי פרסומים ומענקי מחקר, למה לא?

כעת, אינני מבין מאומה במודלי מזג אויר אבל אני יכול לומר משהו על השיטה הזו – עד כמה שיצא לי להיתקל בה, היא כמעט אף פעם לא עובדת. אני לא בטוח שיש לי הסבר מקיף לכך<sup>5</sup>, אבל מעולם לא ראיתי שמדיניות המודלים הזו מביאה תועלת כאשר מדובר בנתונים רועשים וכאוסיים מהסוג אותו מנתחים במודלי מזג אויר. בכל המקרים שפגשתי עד היום השתכנעתי שבסופו של יום אלו מכונות GIGO: Garbage in, garbage out.

הנה דוגמה פשוטה. כולכם ודאי יודעים שעל כל מדען אקלים שיושב במשרדו ומנסה להעריך כמה שלג ירד בשנה הבאה באנדים, יש כמה אלפי אנליסטים שיושבים ומנסים לגלות אם המניות של נטפליקס יירדו או יעלו בחודש הקרוב. השלג בהרי האנדים מעניין לרובנו את הסבתא, אבל אם מישהו מסוגל לגלות חוקיות בפסיכולוגיה של המשקיעים או בדינמיקה של הכלכלה, לדעת מתי הבורסה או מניה ספציפית תעלה או תרד ואיזה קשרים יש בין מחירה למחירי עבר שלה או של מניות אחרות, הוא יכול תוך שנה שנתיים להיות גזליונר עולמי שישים בצל את ביל גייטס ומארק צוקרברג.

מה עושים, לדעתכם, האנליסטים הללו? בדיוק אותו דבר. הם לוקחים ערמות ערמות של נתונים (שער של כל מניה בבורסה במשך שנים ועשורים, ברזולוציות זמן שיכולה להגיע לעשר שניות), שופכים אותם לתוך מודלים מתוחכמים כאלו ואחרים ומנסים, דרך התאמה של פרמטרים, למצוא קשרים חבויים בין מניה לערכה ההיסטורי, בין מניה למניה אחרת או בין מחירי מניות מסוג מסוים להתפתחויות כלכליות שמחוץ לבורסה<sup>6</sup>.

במקרה הזה, לפחות, אין שום ספק: השיטה לא עובדת והניבויים שווים לזבל. איך אני יודע זאת? פשוט מאד. אני שואל את עצמי ממה חיים האנליסטים. קל להבין שמקור המשכורת הראשי שלהם הוא דמי הניהול שאני ואתם

---

<sup>5</sup> זה המקום לצטט את אמרתו של ג'ון פון נוימן: עם ארבעה פרמטרים אני עושה fit לפיל, עם חמשה פרמטרים הוא גם ינדנד את החדק שלו. ישנן כמה בעיות ידועות (overfitting, alternative steady states) שגורמות לכך שהנסיון להתאים מודל לנתונים, כאשר המודל מכיל פרמטרים רבים, הוא בעייתי מאד. פון נוימן רצה להביע את אי אמונו בהתאמות (fit) כאלו, בטענה שהן מאפשרות להתאים כל דבר לכל דבר.

<sup>6</sup> צמד חוקרים פקחים, דיויד לייובר ודייב קרידר, רצו פעם להדגים את חוסר התוחלת בחיפוש אחר קשרים כאלו ובדקו את הקורלציה (מתאם) בין שער מדד המניות המוביל בארה"ב, S&P500, לשורה ארוכה של מדדים (תל"ג, בורסות אחרות ועוד) ושל מחירי סחורות. התברר שהמתאם הגבוה ביותר התקבל בין S&P500 לבין מחירי החמאה בבנגלדש. הם פרסמו את התוצאה, בתקוה שהיא תשכנע אנשים לרדת מחיפוש אחר מתאמים כאלו. לשווא: החוקרים המסכנים מקבלים עד היום טלפונים באמצע הלילה מברוקרים מודאגים שרוצים לברר מה לעזאזל מחיר החמאה בבנגלדש.

משלמים עבור החסכונות והפנסיה שלנו. חברות הפנסיה מנהלות כספים בהיקפים ענקיים, והן משתמשות בדמי הניהול שהן מנכות מחשבוננו מדי שנה כדי לשלם את שכרו של צבא האנליסטים שהן מעסיקות, אלו שאומרים להן, על בסיס המודלים, למכור היום אגרות חוב ארגנטינאיות ולקנות אופציות put על הבורסה התאילנדית או להיפך. ברור כשמש שאילו המודלים היו עובדים באמת אף אנליסט לא היה נשאר שכיר של חברת ביטוח או של קרן פנסיה. במקום לשחק בכסף שלכם ושלי ולגלח דמי ניהול קבועים, הוא היה משחק בכסף של עצמו, משיג מאה אחוז מהרווחים והופך וורן באפט הבא.

אדגיש שוב: במודלי מזג אויר איני מבין. יכול להיות שיש איזה טריק הרלוונטי באופן ספציפי לתחום הזה והופך את המודלים ליותר אמינים, אבל לאור נסיוני אני מרשה לעצמי לפקפק בכך.

## עקרונות שונים של הערכת סיכונים

אנשים רציניים רבים רואים את "מכחישי האקלים" בעין רעה. הם סוברים שאם "כל המדענים"<sup>7</sup> אומרים שאנו מתקדמים לקראת קטסטרופה, מדובר בעובדות יצוקות בסלע שמי שמטיף להתעלם מהן חייב להיות או שוטה גמור או מאמין באיזושהי תורת קונספירציה, משהו מהסוג של מתנגדי חיסונים.

יש מן הסתם ממש בטענה הזו, חלק ממתנגדי האקלימיסטים הם אכן בורים או טפשים, אבל לדעתי היא לא ממצה את הנקודה. אקדים ואומר שאיני בא לזלזל במדעני האקלים. אין לי ספק שיש ביניהם מספיק אנשים ראויים שמודעים לכל הבעיות שהעליתי ולבעיות אחרות ומנסים להביא אותן בחשבון את להתגבר עליהן בדרכים שונות. אני לא חושב שהם מונעים מאינטרס או שמפתחי התאים הסולריים שיחדו אותם, ואיני מחבב תורות קונספירציה באופן כללי. קיימים, כמובן (לפחות בארצנו הקדושה), כמה מפיצי היסטריה מטורללים ועיתונאי "מדע וסביבה" או "מעורבות וחברה" שנותנים להם במה, אבל אלו היוצאים מן הכלל שאינם מעידים על הכלל.

אך בשורה התחתונה, הרעיון לפיו בגלל מודלים מורכבים מהסוג הזה נשבית את השימוש בדלקים מאובנים (נפט, פחם, גז טבעי) כדי למנוע מכדור הארץ להתחמם במעלה או שתיים תוך מאה שנה<sup>8</sup> נראה לי הזוי. הפסקת השימוש בדלקים מאובנים או הנסיון להמיר אותם במה שמכונה אנרגיות מתחדשות (אדבר על כך קצת בהמשך), אם תיעשה בצורה בה תובעים הקיצונים שבמוחי האקלים, שקולה פחות או יותר למה שתבעו אנשי מועדון רומא: עצירה כמעט מוחלטת של הקידמה הטכנולוגית והכפפת תושבי העולם לאיזו קבוצה ביורוקרטית של מתכננים מרכזיים. קשה לי לדמיין שסיטואציה כזו לא תעלה בחייהם של עשרות מיליונים (לא באופן ישיר, אלא בגלל שלא יפותחו תרופות או מכשירים או טכנולוגיות, והכנסות המדינות ממסים יירדו או יתקעו במקום ולא יאפשרו הכנסת שיפורים כמו הנגשת טיפול רפואי וכדומה) וברווחתם של מיליארדים.

---

<sup>7</sup> כשבוע לפני כתיבתן של שורות אלו התפרסמה עצומה עליה חתמו "11000 מדענים", עצומה המזהירה במלים בוטות מפני "מצב חירום אקלימי" וכיוצא בזה. מבדיקה מדגמית שערכתי אני מוכן לומר שבתוך כל הקבוצה הזו יש במקרה הטוב מאד מאה מדעני אקלים אמיתיים (כלומר אנשים שמכירים את המשוואות של ריצ'ארדסון, או שיודעים איך לתפעל מודל חיזוי). כמעט כל היתר הם אקולוגים או אנשי סביבה אחרים שאולי יכולים להתנבא באשר לנזק שתביא התחממות גלובלית לבעלי חיים או למערכות אקולוגיות שלמות, אבל אינם ברי סמכא לחוות דעתם על החיזוי עצמו. זה לא מנע כמובן מאמצעי התקשורת להשתמש בעצומה הזו כדי לפמפם את המסר.

[איני בא לטעון, אגב, שדלות החתימה של מדעני אקלים אומרת שדעתם הפוכה. ההרכב המוזר של חותמי המנשר משקף את הצורה האווילית בה נאספו החתימות – דרך אתר אינטרנט של עתון מדעי העוסק באקולוגיה וסביבה, שהחותמים משקפים בעיקר את קהל הקוראים שלי].

<sup>8</sup> על פניו אני מניח שאיש מאתנו, לו היה ללא ידע מוקדם, לא היה מתפעל או מת מפחד מהאפשרות שכדור הארץ יתחמם במעלה או שתיים. אנו מפקחים מכך רק בגלל שמספרים לנו שזה יגרום להמסת קרחונים ולהצפת ערים ולהשמדת מינים וכיוצא בזה אסונות, אבל צריך לזכור שהתחזיות האלו עצמן מסתמכות על מודלים מורכבים אחרים (כלומר בנוסף למודלי מזג האויר, מרכיבים כעת מודל שיחזה את השפעת ההתחממות על הצמחיה או הדגה וכיוצא). את כמה מהמודלים האלו יצא לי להכיר בעבודתי המקצועית, ולהבדיל ממודלי מזג האויר כאן אני מוכן לספק עדות מיד ראשונה: מדובר בזבל חובבני.

הערכת סיכונים רצינולית קשורה לאיזושהי מכפלה של וודאות, גודל הסיכון והקרבה שלו בזמן. אם אדם חולה בדלקת ריאות קשה וצריך לתת לו אנטיביוטיקה, שווה להשקיע לשם כך מאמצים גדולים או לבזבז הרבה כסף, אבל כאשר הרופא אומר לך שאתה סובל מלחץ דם גבוה, סבבה לקחת כדור כל ערב אבל לא לגיוני לרוץ לשם כך כל יום עשרה קילומטרים. למה? לא בגלל שהרופאים שקרנים או משוחדים על ידי חברות התרופות, אלא מפני שההבנה שלהם באנטיביוטיקה ומחלות זיהומיות גדולה לאין שיעור מהבנתם בהשפעות ארוכות הטווח של לחץ דם גבוה. הם מוציאים המלצות שנראות להם אופטימליות על בסיס ראיות, ובהחלט כדאי לנהוג לפיהן, אבל לא כאשר ההמלצות הללו יהרסו לנו את איכות החיים. ההרגשה שלי לגבי משבר האקלים היא דומה. אילו היה אפשר לעצור את העליה בריכוז דו תחמוצת הפחמן באטמוספירה על ידי המנעות מאכילת מסטיקים הייתי הולך על זה בלי בעיה, אבל לא זה המצב – אנו נתבעים לשינוי דרמטי לרעה במצב החברה האנושית, בעיני זה בהחלט יותר מדי.

גם גורם הזמן הוא פקטור חשוב. מה אנו יודעים על מה שיהיה בעוד מאה שנה? שוו בנפשכם איך היינו מסתכלים על אבותינו הקדמונים אילו היו הללו חוסכים מפתם הדלה כדי "לדאוג לדורות הבאים" ולוודא שישאר לנו מספיק מאיזה משאב מתכלה שבעיניהם נראה אוצר טבע חשוב מאין כמוהו, כמו צבאי מושק שמאיזו בלוטה שלהם מייצרים בושם או אבנים נדירות שמפיקים מהן צבע כחול מדהים או ליתנים שמהם ניתן להפיק שמן. מצד אחד היינו מתפעלים מטוב לבם ומנדיבותם, אבל מצד שני היינו מצטערים על כל דבר תועלת שהם חסכו מעצמם, שהרי הטכנולוגיה מתפתחת, מקורות חדשים מתגלים, והיום אין לנו שום צורך במתנות עלובות כאלו מן הדורות הקודמים. בדיוק כך יסתכלו בנינו, בעוד 70 שנה כאשר, נניח, כולם יעבדו מהבית ולא יהיה שום צורך במכוניות, על המאמץ הנורא שנעשה אנחנו כדי להפסיק או אפילו להקטין את השימוש ברכב.

## הפתרון הגרעיני

עוד סיבה שגורמת לי לחשוך בסיפורי האקלימיסטים קשורה לחוסר הרצון שלהם לנצל את מה שנראה כפתרון הטבעי לחלק גדול, לפחות, מן הבעיה, והוא מעבר לשימוש באנרגיה גרעינית.

אנשים מפחדים מתהליכים גרעיניים, לא תמיד בצדק. בעשרות שנות המלחמה הקרה היה חשש ממשי שאיזה מנהיג לא יציב ילחץ על הכפתור האדום וישמיד מאות מיליונים<sup>9</sup>. עקב כך התגייסו אנשים רבים, מתוך כוונות טהורות מאד, לנסיון ליצור היסטריה של פחד מפני השימוש בנשק גרעיני. התעמולה הזו אכן לא נכשלה במטרתה הראשית: מנהיגי המעצמות לא פתחו במלחמה אטומית והעולם ניצל מהחורבן הכרוך בכך. אבל לאחר שהמלחמה הקרה הסתיימה, ההיסטריה נשארה וכעת היא ממלאת תפקיד שלילי למדי.

לפצצות גרעיניות, בפרט פצצות היתוך (מימן) יש רדיוס חורבן והרג שניע בין קילומטרים ועשרות קילומטרים, בלי ספק נשק איום ונורא. אבל רוב האנשים מדמים שיש לחשיפה לקרינה גרעינית (קרינת גמא, או קרינת רנטגן בתדרים גבוהים) גם אספקטים בריאותיים מרחיקי לכת ושחשיפה כזו גורמת לסרטן, למומים מולדים וכדומה. חשיפה לקרינה מייננת יכולה להגיע לא רק מפצצות גרעיניות אלא גם מנשורת שנשארת זמן רב ומקיפה שטחים גדולים, או מגזים וחלקיקי אבק קורנים שמשחררים מכור גרעיני במקרה שיש בו תקלה כלשהי, כפי שקרה בצ'רנוביל שבאוקראינה (אז ברית המועצות) או בפוקושימה שביפן. הפחד ממאורע כזה גורם לאנשים להסתייג מהקמתם של כורים גרעיניים.

האמת היא שמדובר בפחד שרובו ככולו לשווא. קרינה מייננת אכן יכולה לגרום לשינויים גנטיים שמצידם יכולים להתניע מוטציות סרטניות או לגרום למומים בילודים<sup>10</sup>, אבל מדובר בתופעה נדירה ביותר. ניצולי הירושימה ונגסאקי לא סבלו ממגפת סרטן ולא הולידו מפלצות עם שלשה ראשים. לפי הסטטיסטיקות המקיפות ביותר שערכה הממשלה היפנית לאורך שנים רבות, בקבוצה ה"גרועה" ביותר של הניצולים (אלו שהיו בגיל של פחות מעשר כשנפלה הפצצה, וכל החיים היו לפניהם לפתח סרטן) היתה עליה של שני אחוז בלבד בתמותה מסרטן, כלומר אם בציבור הכללי

<sup>9</sup> על פי הספר "ברלין 1961" העוסק במשבר חלוקתה של ברלין שכמעט הוביל למלחמת עולם, התכנית האופרטיבית שהיתה מונחת בפני הנשיא קנדי באותם ימים דיברה על מכה מקדימה על ברית המועצות שתהרוג 110 מיליוני אנשים, מתוך אוכלוסיה כוללת של כמאה וחמשים מיליון.

<sup>10</sup> למען האמת הרמן מולר זכה בפרס נובל לשנת 1946 על כך שהראה כי חשיפה לקרינה גורמת למוטציות בזבובים.



40% מהאנשים מתים מסרטן, אצלם מתו 42% - שינוי קטן מאד, אולי מאתיים או מאה חמישים מקרי סרטן "נטו" שניתן לזקוף לחובתן של שתי הפצצות. במקרה של צ'רנוביל, ועדה של האו"ם שחקרה את הנושא לעומקו טענה שהיתה עליה בתחלואת ילדים בסרטן בלוטת התריס שגרמה לחמשה עשר מקרי מוות, הא ותו לא<sup>11</sup>. אין עד היום שום עדות למומים מולדים בעוברי אדם בגלל חשיפה לקרינה מייננת, לא בהירושימה נגסקי צ'רנוביל ופוקושימה ולא בשום מקום אחר<sup>12</sup>.

ישנן גם ראיות אנקדוטליות. מרי קירי, חלוצת הרדיואקטיביות, הסתובבה כל ימיה עם חתיכות רדיום בכיסים. לא רק מחברות המעבדה שלה אלא אף ספרי הבישול מביתה שמורים עד היום בכספות מעופרת יצוקה. היא אכן מתה מאנמיה אפלסטית, אבל זו קשורה למחלת קרינה (ראה הערה 12) ולא לסרטן, וגם זה קרה לה לאחר יותר משלשים שנה, בגיל 66, יותר מתוחלת החיים הממוצעת דאז. בין אנשי פרוייקט מנהטן, שאכלו ועישנו אורניום בלי חשבון, לא נרשמה תחלואת סרטן גדולה מהממוצע.

הסיפור המדהים ביותר, בעיני, אירע בשנות הארבעים העליזות, כאשר קבוצת רופאים אמריקאים ערכה ניסויים בהזרקת פלוטוניום לבני אדם. הם התענינו לדעת כיצד מגיב הגוף האנושי לחומר הקורן (והרעיל) הזה, ולשם כך הם לכדו אנשים שפנו בתמימות לבית החולים באוק-רידג' בגלל כל מיני בעיות והזריקו להם (לא ברור אם בהסכמה ובידיעה, ואפילו אם היתה כזו, באותם ימים לא היה ברור לפציינטים האלו במה מדובר) מנות נכבדות של פלוטוניום. לאחר מכן הם ניטרו את הפרשת החומר בשתן ובצואה ואת ריכוזו בדם וכדומה, וסיפרו לחולים שזה חלק מהבדיקות שהם עוברים בגלל הבעיה שבגללה הגיעו לבית החולים – תאונת דרכים או התקף לב וכדומה. אצל איש מהחולים לא התפתח סרטן. חלק מהם היו ממילא במצב גסיסה ומתו לאחר ימים או שבועות (אולי לכן הם נבחרו מלכתחילה), אבל אדם אחד לפחות חי לאחר ההזרקה 21 שנה כאשר בכל יום הפלוטוניום שבגופו פלט כמות קרינה השווה בערכה לצילום CT אחד. כמו כולנו הוא מת לבסוף – מהתקף לב.

ובכן: אולי הגיע הזמן שבו אבירי איכות הסביבה ומודאגי האקלים ישנסו מתנים ויפתחו במסע תעמולה מקיף להרגעת הציבור ולהפצת השימוש בכורי כח גרעיניים?

צריך להבין. יתרונם של כורי כח גרעיניים אינו רק בכך שהם אינם שורפים דלקים מאובנים ואינם פולטים פחמן דו חמצני, הם גם עדיפים, והמלה עדיפים היא לשון המעטה כאן, על כל אלטרנטיבה אחרת.

כדי להסביר מדוע, אנו צריכים להכיר מושג חדש: EROI או יחס אנרגיה מושקעת למתקבלת. נניח לצורך העניין שמחבית נפט אחת אנחנו יכולים להפיק אנרגיה בכמות של מיליון קילוווט שעה. לרוע המזל חבית הנפט לא נבראה כצורתה בששת ימי בראשית והועמדה בפתח תחנת הכח. כדי להשיג את החבית הזו יש לקדוח במעמקי האדמה, וכאשר הנפט פורץ יש להסיע אותו ממקום למקום במיכלים או בספינות וכדומה – כל הדברים הללו גם הם צורכים אנרגיה. בדומה, גם תא סולרי איננו יורד משמיים ומשתכן על הגג שלנו, הוא מיוצר במפעל בו מזקקים סיליקון וממיסים אותו וכן הלאה – פעולות שגם הן צורכות אנרגיה. היחס EROI הוא היחס בין כמות האנרגיה שתתקבל מחבית הנפט או מהתא הסולרי במהלך חייו (התאים האלו מתקלקלים מתישהו) לבין כמות האנרגיה אותה השקעת בייצור התא או בחפירת הנפט.

<sup>11</sup> גם נתון זה מפוקפק. בתקופה הנידונה היתה עליה חדה בסרטן בלוטת התריס גם במדינות אחרות, ככל הנראה בגלל שינוי גידול שפיר שנראה בדיוק כמו סרטן בלוטת התריס (והעליה משקפת פשוט עליה באבחון השגוי של הגידול הזה כמקרה אמיתי).

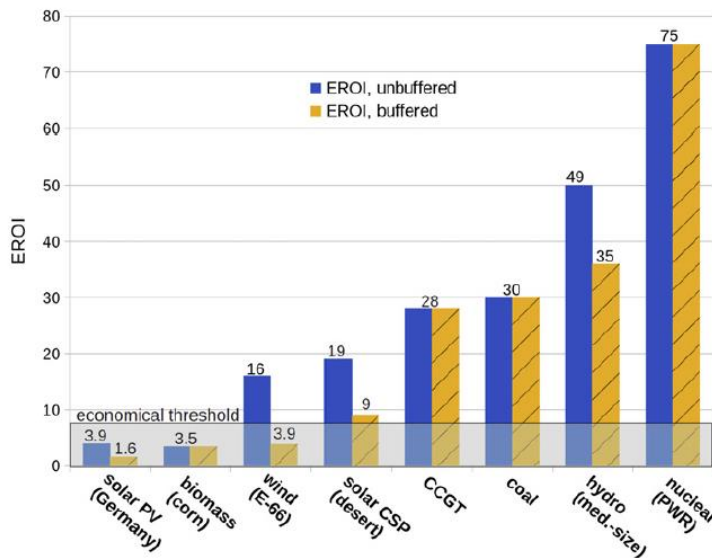
<sup>12</sup> כדאי להוסיף כמה מלות הסבר. ישנו דבר הנקרא **מחלת קרינה**. מחלה זו פוגעת באדם שנחשף לרמות גבוהות מאד של קרינה ועלולה להרוג אותו תוך ימים או שבועות ספורים. למחלת קרינה אין קשר לסרטן (סרטן לא מתפתח מספיק מהר בכדי להשפיע בפרקי זמן כאלו). מדובר פשוט בסוג של בישול: גם אם תשימו את החתול שלכם במיקרוגל פועל לכמה דקות הוא ימות, ובדומה רמות גבוהות של קרינה יכולות "לבשל" את הבנאדם או את חלק מהתאים שלו (נפגעים ראשונים בעיקר תאי עצב ותאי מח עצם) ולגרום למותו. בין ניצולי הירושימה היו כאלו שמתו ממחלת קרינה תוך ימים מספר, וכנ"ל בין הכבאים והטייסים שנכנסו לתוך, או רחפו מעל, הכור הבוער בצ'רנוביל. קשה לדמות סיטואציה בה החשיפה של הציבור הרחב לקרינה כתוצאה מכשל במתקן גרעיני תהיה ברמות שיגרמו לתופעה המונית של מחלת קרינה.

כעת, ברור שאם ה EROI של מקור אנרגיה כלשהו קטן מאחד, הוא לא מקור אנרגיה אלא בזבז אנרגיה. אם אני צריך לשרוף שתי חביות נפט כדי להוציא מהאדמה חבית אחת (EROI של חצי), עדיף שאסגור בבהלה את חברת הנפט הקטנה שלי. אבל אפילו כאשר ה EROI גדול מאחד, לא תמיד מדובר במשהו שיש לו התכונות כלכליות.

כדי להבין את הנקודה השניה, חישובו על ארצות הברית לדוגמה. התל"ג האמריקאי הכולל בשנת 2011 היה 15 טריליון (מליון מליון) דולר, צריכת האנרגיה הכוללת של האמריקאים היתה 20 טריליון קילוואט-שעה ומחירו של קילוואט שעה היה 10 סנט. זה אומר שמחיר האנרגיה הכוללת שנצרכה אותה שנה הוא 2 טריליון דולר, ומכאן שכלכלת ארה"ב בנויה על יחס של פחות או יותר 1:7 בין אנרגיה לתוצר. אפשר להבין זאת כמו היחס בין המשכורת לעלות הנסיעה לעבודה. בלי לנסוע לעבודה תהיה לי משכורת אפס, אבל כאשר אני עובד עלי להפריש חלק מהכנסתי למימון הנסיעה. בלי שימוש באנרגיה יהיה לארה"ב תל"ג אפס (כולם ימותו מקור) ולכן יש להפריש חלק מהתל"ג למימון האנרגיה, והחלק הזה הוא שביעית מהתל"ג.

אם נשתמש במקור אנרגיה עבורו EROI=2, זה אומר שחצי מהתל"ג יצטרך להתבזבז על הפקת האנרגיה שמשמשת ליצר אותו, כלומר מצבה של ארה"ב יהיה דומה למצבו של אדם שהנסיעות לעבודה מבזבזות לו חצי משכורת. זה הזוי, והדבר יוביל למשבר כלכלי נורא כי לא ישאר כסף כמעט לשום דבר אחר: לא למזון, לא לבריאות, לא לבטחון.

והנה התמונה שלה ציפיתם, גזרה ממאמר שהתפרסם ב 2013<sup>13</sup>. העמודות הצהובות הן EROI (הכחולות הן מדד



שונה במקצת). האזור הכהה שבתחתית מציין את אזור אי ההתכונות הכלכלית EROI - מתחת ל 1:7. העמודה הימנית ביותר מתאימה לכורי כח, ואחריה תחנות הידרואלקטריות, פחם, טורבינות גז, תחנות כח סולריות (שבהן מרכזים חום בעזרת מראות ומפיקים חשמל, יש תחנה כזו בארץ, באשלים) שחייבות להמצא במדבר, טורבינות רוח, דיזל שמופק מתירס ולבסוף תאים סולריים במדינה כמו גרמניה שבה אין יותר מדי שמש.

שני דברים בולטים כאן: הראשון הוא היתרון העצום של אנרגיה גרעינית על כל צורת הפקת אנרגיה אחרת, והשני הוא הטירוף הגמור שיש בניסיון ללכת על כל צורת אנרגיה מתחדשת (למעט תחנות כח הידרואלקטריות למי שיש נהרות מתאימים). מעבר של כל העולם

לאנרגיה מתאים סולריים, או לדיזל מתירס (שגם פולט CO2) או לטורבינות רוח, יגרום לפשיטת רגל של הכלכלה העולמית: הפקת האנרגיה תינק את כל המשאבים מהמשק ותשאיר רק פרוטות לכל צורך אחר.

## משהו על רוח הזמן

ישנו איזה פער, אולי הכרחי, בין ההופעה של רעיון (אמיתי ככל שיהיה) במהלך ההתקדמות המדעית לבין ה"ספיגה" שלו על ידי הציבור הרחב. המדען, מדרך הטבע, מציע איזו אבחנה ספציפית שיש לה תוקף בתחום מסוים ובמגבלות מסוימות, אבל כאשר העניין נעשה פופולרי אנשים נוטים להרחיב אותו, וגם מרשים לפעמים לנטיות לבם להשפיע

<sup>13</sup> WEIßBACH, Daniel, et al. Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants. *Energy*, 2013, 52: 210-221.

על כיוון ההרחבה הזו. דוגמה פשוטה וידועה היא היחס בין תורת האבולוציה של דארווין לתורת הגזע שהופיעה בעקבותיה.

אותן נטיות לב של אנשים מתנהלות באיזה תהליך קולקטיבי מסתורי שיש המכנים אותו (בעקבות הגל) צייטיגיסט, רוח הזמן. לפני מאה שנה החוגים ה"מתקדמים" שרו שירי הלל לתיעוש, לאורבניזציה, לחישמול, לגדלות האדם ונצחוננו על הטבע. באיטליה פעלה התנועה הפוטוריסטית שמייסדיה רצו להחריב את הקפלה הסיסטינית ולבנות במקומה בית חרושת לנניקיות, ברוסיה הוציאו המשוררים צוים להפיכת כל הכנסיות וכל המוזיאונים למחסנים, מאו צה-דונג חלם על היום בו במקום העיר האסורה בביג'ינג יראו רק עשן של מפעלי תעשייה כבדה. היום הכיוון הוא הפוך: הסנטימנט של אותם חוגים חברתיים עשה סיבוב של מאה ושמונים מעלות<sup>14</sup>, והם שבויים בדימויי הפרא האציל של רוסו, חולמים על חיים אנושיים בהרמוניה עם הטבע, על פסטורליה של רועים המחללים לכבשיהם. הקידמה והטכנולוגיה (שכמובן כולם משתמשים בהן ונהנים מפרותיהן) נתפסות כמין פציעה של ההרמוניה הזו, וניתן לשמוע במובלע אפילו ביקורת על עצם קיומו של המין האנושי ההורס ברגל גסה איזו שלמות נפלאה שהיתה בעולם לפניו, או שעדיין קיימת במקומות שהאדם לא נוכח בהם. בעיני כל זה הוא קשקוש סנטימנטלי מגוחך שאינו ראוי להתייחסות, אבל מי אני שאשפוט.

למיטב הבנתי, התנועה הציבורית שאנו חוזים בה היום מיצגת איזשהו שילוב של העבודה הרצינית שנעשית אצל חוקרי האקלים (גם אם יש לי ביקורת עליה) לבין אותה רוח זמן אנטי הומנית וטכנופובית<sup>15</sup>. בלי התובנה הזו קשה לי מאד לבאר לעצמי מדוע המפגינים העצבניים מול כינוסי מנהיגי המדינות המתועשות לא צועקים במגפונים "בנו כורים גרעיניים". עם התובנה הזו העניין נעשה ברור כשמש. ברמה מסוימת של הדין הציבורי, התובנות המדעיות הופכות לאיזו רציונליזציה זולה שמטילים אותה על מערכת מסובכת מאד כדי לקבל מסקנות פשוטות שמתאימות למה שהציבור מחפש ממילא, ואז מקבלים את תורת הגזע, את המרקסיזם, את הפסיכואנליזה, וגם את הסרטים המפחידים של אל גור והנאומים ההזויים של גרטה טונברג.

בעיני (אולי כמו כל בעל אומנות שרואה את העולם דרך המשקפיים שלה) הבנת המורכבות של מערכות היא צעד משמעותי ביכולת להיגמל מהלכי נפש שכאלו. ההבנה כי תופעות מנטליות, או תופעות אנושיות וחברתיות, הן סבוכות מכדי לפתור אותן בעזרת עקרונות גסים כמו תסביך אדיפוס או עודף הערך או הניגוד בין שמים לארץ, קודמת באיזשהו מקום לעצם הניתוח של כל מערכת ולויכוח על כל עיקרון.

דורנו הוא עידן המודלים הגדולים: ההתקדמות ביכולות החישוביות מאפשרת לנתח בקלות יחסית מסדי ענק של נתונים ולהוציא מהם מתאמים (קורלציות) שאינם ניתנים לזיהוי בעין אנושית. אולי יום אחד תחליף פעילות מסוג

---

<sup>14</sup>במובן חשוב אחד דומים מוחי האקלים של דורנו לאותם "חוגים מתקדמים" מלפני מאה שנה: הדרישות שלהם שקולות, בפועל, לחיסול השוק החפשי והעברת השליטה בפועל לידי קבוצה ביוורקרטית קטנה של מתכננים מרכזיים. הנימוק הוא הגרסה המודרנית של טענת חז"ל "לא תחתי אני קודח" [תני ר' שמעון בן יוחי: משל לבני אדם שהיו נתונים בספינה ונטל אחד מהן מקדח והתחיל קודח תחתיו. אמרו לו חבריו: למה את עושה כן, אמר להן: מה איכפת לכם, לא תחתי אני קודח. אמרו לו: מפני שאתה מציף עלינו את הספינה], כלומר הרחבת מה שמכנים הכלכלנים "השפעות חיצוניות" כמעט לכל פעולה שהיא. אם אני נוסע עם המשפחה לבקר את הורי, המכונית שלי פולטת CO2 שיגרום להוריקנים שיציפו שוב את ניו אורלינס, כך שבעצם כל פעולה אנושית וכל שכן כל עסקת שוק צריכה להיות מאושרת על ידי איזה מתכנן בבריסל שישקול את התועלת בביקור משפחתי מול הצורך לגדל כרוב בזימבבואה.

על הכשל שבנסיון להסדיר את החברה באופן הזה עמד כבר פרידריך האייק בספרו "הדרך לצמיחות". ציטוט אחד מתוך הספר הזה ראוי להיזכר: "אנו היינו הראשונים להבין כי ככל שהציביליזציה שלנו הופכת מורכבת יותר, כך צריך להצטמצם חופש הפעולה של הפרטים" – כך אמר בניטו מוסוליני. אם תרצו, ספרו של האייק הוא הגנה על התזה הפוכה, לפיה דווקא המורכבות של החברה האנושית מחייבת סדר שיצמח באופן ספונטני (emergence) ממעשיהם החפשיים של הפרטים.

<sup>15</sup>חשוב לא ליפול בכשל המזהה את רוח הזמן עם קונספירציה. אנשים שאינם אוהבים את מה שנאמר בתקשורת או את מה שחושבים הצעירים או המשכילים עלולים להסחף לאמונה שמדובר באיזה קשר של שמאלנים עגולי משקפיים שמתכננים בבית קפה בתל-אביב או בברלין והעולם רוקד לצלילי חלילים (שהרי איך יכול להיות שכל כך הרבה אנשים יאימו בכאלו שטויות). בדרך כלל רוח הזמן שקולה יותר לאיזשהו "מצב רוח" של הקולקטיב האנושי. כמובן שלאחר שהתנועה קמה יש לה את נושאי דברה, נביאה וכהניה, אבל לא הם אלו שהפכו את הדבר, שלא היה דבר הנשמע בדור הקודם, לרעיון פופולרי בדור הזה.

זה את המדע ה"ישן", המבוסס על הפעלת השכל האנושי מול הנתונים – אינני מספיק רומנטיקן של רוח האדם כדי להכחיש אפשרות זו – אבל בינתיים קשה לומר שזהו המצב. טכניקות ההיסק עדיין רחוקות מהבשלה, ודומני שאוסף המודלים הקשורים לבעיית ההתחממות – לא רק מודלי האקלים, אלא גם אלו החוזים את השפעתו ההרסנית על הסביבה - אינם יוצאים מן הכלל.