

מורכבות וחירות: דינמיקה ניטרלית, אשלית התכנון וטפשות החכמים.

נדב שגרב

"וראיתי אני שיש יתרון לחכמה מן הסכלות
כיתרון האור מן החשך. החכם עיניו בראשו
והכסיל בחושך הולך, וידעתי גם אני שמקרה
אחד יקרה את כלם. ואמרתי אני בלבי כמקרה
הכסיל גם אני יקרני ולמה חכמתי אני אז יותר?
ודיברתי בלבי שגם זה הבל" (קהלת ב' יג-טו).

חוקיו של גלילאו, מזלו של מקיאבלי

גלילאו גליליי, שחי בסוף המאה ה-16, זכה לתהילת עולם על תרומותיו למדע. מעבר לתרומותיו
הספציפיות ביחס לעקרונות המכניקה והאסטרונומיה, הוא נתפס כמי שסייע להנחלת מה שמכונה
היום השיטה המדעית: הצמדות לתצפיות אמפיריות, חוסר התחשבות בדעות קדומות, התעלמות
(במידת האפשר) מן הדוגמות של הכנסיה וניתוח קפדני של תוצאות נסיוניות.

חמשים שנה לפני גלילאו חי בפירנצה הוגה אשר בפירוש הקדים אותו בכל הנקודות האלו. ניקולא
מקיאבלי היה דיפלומט ומדינאי בשירות עירו, פירנצה, בתקופה בה גווע הרנסנס האיטלקי כתוצאה
ממלחמות פנימיות ופלישות חיצוניות. מקיאבלי גדל באיטליה המחולקת ליחידות מדיניות שונות:
נסיכויות, רפובליקות ומדינות כנסיה. עוד בצעירותו החלה מלחמת הכל בכל בין הישויות המדיניות
הללו, מלחמה שבה נטלו חלק גם הכחות האדירים של ספרד וצרפת. התוצאה היתה פקעת סבוכה
של מאות משאים ומתנים, בריתות שנתקיימו ושהופרו וקרבות שנסתיימו כך או אחרת – מכרה זהב
עבור מדען המבקש לגלות את החוקים הקובעים את המציאות באמצעות ניתוח נתונים אמפיריים.
מקיאבלי פעל משך תקופה ארוכה כנציג של פירנצה בחצרות מלכים ובארמונות נסיכים, וככזה היו
בידו מידע והתרשמות מיד ראשונה. ספרו, "הנסיך"¹ כולל מבחר עקרונות פוליטיים שהסיק
מתצפיותיו.

מקובל לראות בחיבורו "הנסיך" את אחת מאבני הפינה של החשיבה הפוליטית המודרנית.
מקיאבלי דחה בספרו את המסורות הגדולות, דתיות ופילוסופיות כאחד, שכולן ראו במדינה ובסדר
הפוליטי שלה מכשיר שתכליתו מתן הזדמנות לאדם המעולה להגיע אל דרך האמת, תהא זו אשר
תהא. לאור העובדות שנגלו לעיניו הסיק מקיאבלי כי מסורות אלו מסתמכות על הנחות שגויות ביחס
לטבע האנושי. האדם הטיפוסי הוא יותר אגואיסטי וחסר כנות ממה שסברו הקדמונים, חשוב מכך:
הנסיין לשנות מצב זה באופן מהותי לא יצליח. ארגון החברה האנושית, הבין מקיאבלי, חייב להיות
בנוי על ניצול של היסודות השליליים הללו. בכך הונחה התשתית למסורת פוליטית גדולה הקשורה
בשמותיהם של הובס, לוק וחבריהם, אשר הרחיבו את רעיונותיו של מקיאבלי מרמה של עצות לנסיך
לאירגון החברה בכלל והעמידו את הבסיס הרעיוני לקפיטליזם המבוקר המודרני.

¹ ניקולא מקיאולוי, "הנסיך", הוצאת שלם.

בכל זאת, כולנו מבינים שיש הבדל בין גלילאו ומקיאבלי. מעטים יחשבו על האחרון בתור "מדען", ולעצות הספציפיות אותן נתן לנסיכים אין מייחסים את אותו התוקף שיש לעקרונות תנועת המטוטלת או למסילות ירחי הצדק אותם גילה גלילאו. מדוע?

כאן אנו מגיעים לאחת התכונות הבסיסיות המבדילות בין מדעי הטבע למדעי החברה: משקלה של האקראיות, או מה שקוראים המהנדסים "יחס אות לרעש" (signal to noise ratio, SNR).

שוו בנפשכם מהנדס המנסה לתכנן טיל שיפגע במטרה מסוימת. הוא מביא בחשבון את חוקי המכניקה, את כח הכובד, את השפעת התנגדות האוויר, ומתוך כך הוא בונה משוואה המתארת את מיקומו ומהירותו של הטיל ביחס לאתר השיגור שלו. בעזרת המשוואה הזו הוא חוזר היכן יפגע הטיל.

כל האלמנטים אותם תיארנו עד עתה: גרביטציה, חיכוך ודומיהם – קיימים באופן קבוע וניתן להציגם במשוואות מוגדרות היטב. גורמים אלו נקראים דטרמיניסטיים. אבל ישנם עוד גורמים המשפיעים על תנועת הטיל: מערבולות באוויר, הסיכוי שהטיל יפגע במהלך מעופו בציפור ויוסט ממסלולו, אי סדיריות בזרימת הדלק למנוע וכדומה: אלו הם הגורמים האקראיים, או הסטוכסטיים, המשפיעים על התנועה. בהיעדר מידע מדויק על כיוון הרוח בכל נקודה במהלך המעוף, או על מסלולי הציפורים, האירועים האקראיים הללו מפחיתים את יכולת המהנדס לנבא נכונה את מקום נפילתו של הקליע.

מובן מאליו, אם כן, כי שאלת השאלות בתכנון הנדסי היא היחס הכמותי בין הגורמים הדטרמיניסטיים והאקראיים. לקליע שנורה למרחק מאה מטר יש סיכוי קטן, יחסית, לפגוש במשב רוח חזק בדרכו אל היעד, לכן תחזיתו של המהנדס תהינה מדויקת יחסית. הניסוח המקובל הוא שהקליע יפגע בנקודה מסוימת "פלוס מינוס חצי מטר" - חצי המטר הוא חלקה של התחזית התלויה בגורמים האקראיים. כאשר יורים טיל למרחקים גדולים השפעת הגורמים האקראיים גדולה בהרבה, והמהנדס יתן השערה למקום הנפילה "פלוס מינוס עשרה קילומטרים"². אם ננסה לתת דוגמה קיצונית, שוו בנפשכם דף נייר קטן הנזרק מגגו של בניין גבוה ביום סוער. גם בהנחת ידע מוקדם מלא על חוקי המכניקה ועל כח הגרביטציה אין שום אפשרות לנבא היכן יפול הנייר, אפילו בקירוב טוב. במקרה כזה נאמר כי התוצאה נשלטת **לגמרי** (או כמעט כמעט לגמרי, בהמשך נדון בכך) על ידי אקראיות³. הניבוי על פי החוקים הופך לחסר ערך.

היחס בין הגורמים הדטרמיניסטיים והאקראיים, או בין ה"חוק" ל"רעש", הוא המאפיין המרכזי של ההבדל בין מדעי הטבע למדעי החברה. אין זה עניין מהותי: בעולם אחר מערבולות הרוח הן אולי כה מהירות וכה חזקות, שמדען שינסה למצוא את חוקי הנפילה החפשית באמצעות סדרת ניסויים לא ישיג דבר. בעולם אחר יהיה טבע התגובה האנושי יותר צפוי ביחס לגרוי כך שניתן יהיה לנסח בקלות את חוקי ההתנהגות של יחידים ושל חברות. אבל בעולם שלנו זהו המצב: מדעי הטבע מטפלים בדרך כלל בבעיות שבהן משקל האקראיות הוא יחסית נמוך, בעוד תצפיות על החברה מגלות לנו השפעה חזקה של גורמים בלתי צפויים.

למרבת ההפתעה, מקיאבלי, כבר בזמנו בשלהי ימי הביניים, היה מתוחכם מספיק על מנת להבין את האפקט הזה. בפרק הלפני אחרון של ספרו, זה הנושא את השם "מהי יכולתה של פורטונה בענייני

² כקוריוז היסטורי יש לציין כי המוטיבציה לפיתוחה של פצצת המימן היתה חוסר הדיוק הזה בטילים הבין יבשתיים של שנות החמישים. המעוף הארוך של הטיל חשף אותו להשפעות אקראיות שהביאו לסטיות של מספר קילומטרים מהמטרה. פצצת המימן פותחה כדי להשיג כח נפץ גדול מספיק כך שהמטרה תושמד גם אם הטיל יפגע מספר קילומטרים ממנה.

³ אין בכונתי לעסוק, במסגרתו של מאמר זה, בשאלה העמוקה של ההבדל בין תנועה אקראית לתנועה דטרמיניסטית. יכול הטוען לטעון כי מערבולות אוויר אינן אלא תנועה מסוג מסוים של מולקולות חמצן וחנקן שאת מסלולה של כל אחת מהן ניתן לנתח, בדיוק כמו את אופי תנועת הפגז. לענייננו אין אנו זקוקים אלא לאבחנה האומרת כי אין אפשרות פרקטית לקבל מספיק נתונים שיאפשרו ניתוח של תנועת מערבולות האוויר, ולפיכך המתכנן אינו יכול לחזותן מראש אלא רק להתייחס אליהן כאל אי ודאות מובנית בפרמטרים הקובעים את התנועה.

אנוש, ובאיזה אופן ניתן להתנגד לה?" הוא דן בדיוק בנקודה הזו: במשקלה של האקראיות, ובתקופן של העצות אותן הציג לאורך כל הספר בהנתן השפעות בלתי צפויות.

מקיאבלי אינו מכחיש שמדי פעם "אפשר לראות שני אנשים זהירים, שאחד מגשים את תכניתו והאחר אינו מגשים..". וכי לעתים "שנים הפועלים בדרכים נבדלות משיגים אותה תוצאה". הוא מביא את דעתם של "רבים" כי "ענייני העולם נשלטים על ידי פורטונה ... לכן .. אין להזיע הרבה על הדברים אלא להניח לגורל לשלוט בך". הוא עצמו, עם זאת, טוען כי "יש אמת בכך שפורטונה שולטת במחצית מפעולותינו, אבל גם שהיא משאירה בידינו את השליטה במחצית האחרת, כך בקירוב". אנו רואים כאן ראייה נוספת לגאונותו של האיש: דומני שהוא היה האדם הראשון שהבין את חשיבות ההערכה של היחס בין האות לרעש במדע המודרני. למרבית הצער, הוא בחר לטפל בתחומי מחקר שבהם השפעת הרעש גדולה מכדי לאפשר ניסוח חוקים ברורים על סמך תצפיות.

טיעונו של מקיאבלי המניח השפעה של האקראיות בשיעור של חמישים אחוז ניצב, בפרספקטיבה של ההווה, בין שתי אסכולות גדולות של חשיבה פוליטית. בלז פאסקל אשר ציין בספרו כי "לו היה אפה של קליאופטרה קצר יותר היתה ההיסטוריה של העולם נראית אחרת" יכול להבחר כמייצגה הסמלי של הגישה הפטליסטית, ומי שסובר כך יאמר כי השפעת האקראיות בענייני אנוש היא כה גדולה עד שאין טעם כלל במחקר חברתי יישומי. מדרך הטבע לא נמצא בין מדעני החברה רבים המקבלים את דעתו של פאסקל, שהרי זה היה שומט את השטיח מתחת לתחום עיסוקם. דעה נפוצה בין כלכלנים, אנשי מדע המדינה, ואפילו היסטוריונים, היא שמשקלה של האקראיות בענייני האדם אינו גדול, וכי ניתן לנסח בעניינים אלו חוקים על בסיס תצפיות. קרל פופר כינה את הטיעון הזה היסטוריצזם, וטען כי זהו כשל בסיסי שיש לו השלכות פוליטיות מרחיקות לכת. בשורות הבאות אנסה להבהיר כמה מן האספקטים הטכניים שביסוד הויכוח, ולהסביר מדוע יש לפיסיקאים העוסקים במערכות מורכבות מה לאמר בנושא.

בין פאסקאל למרכס: דטרמיניזם חברתי ודמוקרטיה

דטרמיניזם היסטורי, או חברתי, הוא שם כולל לאוסף התיאוריות המניחות כי משקלה של האקראיות בהיסטוריה או בקביעת כיוון ההתפתחות של החברה הוא קטן, וכי ניתן לגלות חוקים המאפשרים לנבא את מצבה של החברה בעתיד על פי מצבה בהווה, ממש כשם שהמהנדס מנבא את מיקומו של הטיל. הצלחתם של מדעי הטבע המכאניים, ובעיקר של הפיסיקה, נתנה דחיפה גדולה לסוג כזה של תיאוריות. מרכס, בהקדמתו ל"קפיטל", הוא נציג מובהק של אופן החשיבה הזו, באמרו כי "מטרתה האולטימטיבית של עבודה זו היא לחשוף את החוק הקובע את תנועתה של החברה". בלי קשר ליומרתו של מרכס ולשאלה האם אכן גילה חוק כזה או שמא שגה, חשוב להבין שהוא הניח במובלע דטרמיניזם, כלומר הוא הניח כי משקלה של האקראיות בקביעת הדינמיקה של החברה הוא זניח. אילו היה מרכס מניח כי הדינמיקה החברתית זהה לזו של פיסת ניר הנזרק מגג ביום סוער, היה מבין כי לא ברור שיש איזה שהוא ערך מעשי ב"גילוי" חוק התנועה החברתית, כפי שחוקי הגרביטציה הופכים ל(כמעט) חסרי ערך בניתוח תנועתה של פיסת הנייר במערבולות הסופה.

חשוב להבין את ההשלכות שיש לדילמה זו על התיאוריה של הדמוקרטיה. אבי הסוציולוגיה, אוגוסט קומט, אדם אשר ניסה להעמיד מדע שכל כולו מוקדש לגילוי החוקים הקובעים את התפתחות החברה, הציג את השאלה באופן בוטה. "אם אין אנו מרשים חשיבה חפשית בכימיה או בביולוגיה", שאל קומט, "מדוע נתיר אותה בתחום המוסר או בפוליטיקה"? שאלה זו מהדהדת בכל התיאוריות המכילות דטרמיניזם חברתי, ולמעשה מחזירה אותנו לרעיון "המלך הפילוסוף" של אפלטון. כיצד ניתן לבסס שיטת ממשל על דעתם של המונים, בשעה שהמומחים מציעים רעיונות אחרים?

יש כאן ארגומנט רב עוצמה כנגד החירות שראוי להבהירו. הטיעון, בקווים כללים, הוא כי ישנה רמה מסוימת של מומחיות הדרושה כדי לחוות דעה. אם אנו רוצים לבנות גשר לא נעמיד את השאלה "בכמה בטון יש להשתמש על מנת שהגשר לא יתמוטט" להצבעת רוב בין בני העיר. כולם יסכימו כי הצעד הנחוץ הוא לפנות למומחה – במקרה זה, מהנדס גשרים – ולקבל ממנו חוות דעת מקצועית. לאחר חוות הדעת הזו מתברר כי מחירי הגשר הוא כך וכך. כעת נפנה למומחה אחר שיאמר לנו מה תהיה השפעת הגשר על התנועה בעיר, כמה הוא יקל על פקקי התנועה וכדומה. בשלב האחרון נתונים לנו מחירי הגשר ומידת התועלת שהוא יביא, וכעת נדרשים בני העיר להצביע האם כדאי לבנות את הגשר או לא.

מה שטוען קומט הוא שצעד זה האחרון הוא מטופש. אם קראנו למהנדס גשרים ולמהנדס תנועה כדי להבין את המציאות, כעת אנו צריכים לקרוא למהנדס חברתי כדי לקבל החלטה. מהנדס חברתי כזה הוא אדם המבין את הדינמיקה של החברה, והוא יוכל ללמדנו, לדוגמה, כיצד הפחתת זמן העמידה בפקקים תביא את המורים רעננים יותר לכתות ובכך תתרום לשיפור רמת ההוראה, ולשקול את התועלת הזו מול הנזק האסתטי שיגרם לציבור מכתובות הגרפיטי שבודאי יציירו על הגשר וכיוצא בזה. אם הסכמנו לוותר על חירותנו כדי להשיג את התועלת של השמוש בידע ההנדסי ברמת התכנון, מדוע בשלב הסופי אנו מוותרים על התועלת מן הייעוץ של המהנדס החברתי לטובת חירות ההצבעה שלנו?

ישנן שתי תשובות מקובלות לטענתו של קומט. האחת היא טענת השליט המושחת: מה שקומט מציע בסופו של יום הוא להפוך את המהנדס החברתי לדיקטטור. אבל מי יבטיח לנו שהמהנדס ימשיך לתת לנו עצות טובות? אולי, למען טובות הנאה לעצמו או למשפחתו, הוא יתחיל לחלק הוראות שגויות שיפגעו בציבור? המהנדס, או המלך הפילוסוף, הוא אולי האיש הכשיר ביותר לענות תשובות לשאלות, אבל גם הוא בן אדם, וכמאמרו של לורד אקטון, כוח מוחלט משחית לחלוטין. הדמוקרטיה, אם כן, היא הערובה שלנו כנגד שחיתות השליטים, ואנו מוכנים לשלם את מחיר חוסר היעילות הנובע מויתור על ממשלת מומחים.

הטיעון המקובל השני מסתמך על רוח החופש. ההנחה היא שבני אדם רוצים לחוש שהם מחזיקים את גורלם בידיהם ושהם קובעים לעצמם את דרכם בחיים. אינני מעוניין באח גדול וחכם שיגיד לי מה לעשות, אפילו אם הוא באמת יותר חכם ממני. אני מעדיף לעשות שגיאות ולשלם עליהן מחיר על היותי נשלט בידי אדם אחר. תחושת האוטונומיה של יחידים ושל ציבורים היא צורך פסיכולוגי שחשוב, כך נראה, למלאו, ושוב אנו מוכנים לשלם את מחיר הויתור על המומחים כדי להרויח סיפוק נפשי.

אבל לשני הטיעונים האלו יש תוקף מוגבל מול הדרישה לממשלת מומחים. הרי אדם שלא ימלא אחר הוראות הרופא בעניין קריטי כדי "להרגיש בן חורין" לא יראה בעינינו שפוי מדי. גם את החשש שלנו משחיתות של רופאים – נניח, מכך שהם יבצעו טיפולים לא נחוצים כדי להגדיל את התשלום – אנו משככים על ידי מנגנוני איזון ופיקוח בתוך הקליקה הרפואית, ולא על ידי העמדת הטיפול הרפואי להצבעת רוב. הגנה על הדמוקרטיה מול הטיעון של ממשלת מומחים, או באופן כללי סופוקרטיה, מכילה באופן מובלע כי בתחום החברתי לא קיימת "מומחיות" מן הסוג שנמצא במדעי הטבע; זאת מפני שאיש לא מצא עדיין את חוק התנועה של החברה, או, וזו הנקודה החשובה, מפני שגורם האקראיות בחברה הוא כה חזק שגם מציאת "חוקי ניוטון" של הפוליטיקה לא תביא תועלת⁴.

יש אנלוגיה מעניינת לתובנה הזו בתחום הכלכלה וההשקעות. בעולם בו אנו חיים, למען האמת, ניתן לתרגם כמעט כל תובנה חברתית לרווח כלכלי. אם אני חוזה את עליית החברה החרדית אזי אשקיע במפעל לכובעים, אם לדעתי המדינה צועדת לקראת גל פטריוטיזם אתחיל לייצר דגלים, ואם אני

⁴ ספרו של פרידריך האייק, "הדרך לצמיחות" מעלה בחריפות את הנקודה הזו. כמה מקי הטיעון המרכזיים שהוא מפתח עוסקים בחוסר האפשרות של תכנון ממשלתי בקנה מידה גדול וממליצים על סדר חברתי הנוצר "מלמטה למעלה" באמצעות פעילותו של שוק חפשי. מאמר זה מנסה להעלות מספר אספקטים מתמטיים של האבחנות האלו.

מאמין שאנשים יהפכו לצמחוניים אמשוך את השקעותי ממפעלי הבשר. החיזוי הכלכלי, במקרים רבים, אינו אלא חיזוי חברתי ברמת המיקרו. סוחרים יכולים לבחון את תנודות הבורסה כדי לנסות ולהסיק את המצב הפסיכולוגי של ציבור המשקיעים ולמכור או לקנות מניות על בסיס זה (מה שנקרא ניתוח טכני); הם יכולים גם לבחון את תפקוד החברה ואת השוק בו היא פועלת "לעומק" כדי להבין אם הניהול שלה תקין ומה מצב מתחריה בשוק – את זה מכנים ניתוח פונדומנטלי. בשני המקרים מתבצע חיזוי המכיל לפחות בחלקו טענות על הדינמיקה החברתית העתידית.

ובכן, ישנם אנשים העוסקים בהצלחה בהשקעות כאלו. המיליארדר וורן באפט, לדוגמה, התפרסם כאשר הניתוח הפונדומנטלי, כאדם הבודק חברות לעומק, קונה את המשתלמות שבהן ומרוויח הון רב. כל אחד מאתנו מוסר את כספי הפנסיה והחסכונות שלו לניהולם של מנהלי כספים ויועצי השקעות כאלו ואחרים, שאולי אינם כשרוניים כמו באפט, אולי הם צודקים בפחות מקרים, אבל אנו מאמינים שמשתלם לנו לעבוד איתם ומוכנים לשלם להם עמלות נכבדות מכספנו. ובכן – האם אלו הם המהנדסים החברתיים האמיתיים? האם עלינו להאמין במומחים המנבאים את חוק התנועה של החברה, ולהחליף את קרל מרכס בוורן באפט?

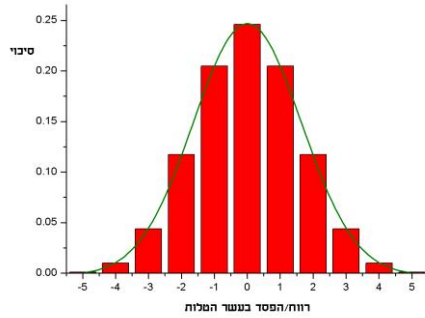
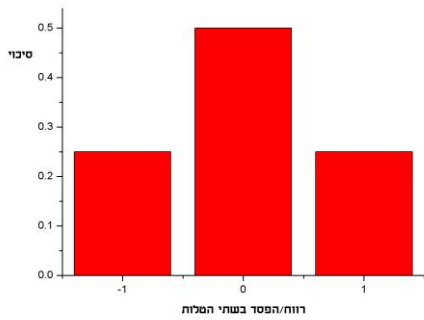
לא ולא, טוען הפרופסור ברטון מלכיאל מאוניברסיטת פרינסטון בספרו "הילוך אקראי בוול סטריט". איש אינו יודע לחזות את מהלכיה העתידיים של הבורסה או את מחירי הקפה בעוד שנתיים. גורם האקראיות גדול מדי. כלכלן יכול להשקיע זמן ומאמצים, לקרוא מאזנים של חברה ולהבין שהיא מנהלת ברשלנות, שמתחריה מכים אותה ושאינו לה סיכוי. אבל מה יקרה אם מחר יתברר שמשרדי החברה יושבים באזור מתפתח של העיר ומחירים נוסק? מה יקרה לחברת ביטוח מבוססת אם הוריקן אדיר יכה בניו יורק או בפילדלפיה?⁵ מלכיאל וחבריו בדקו את התשואה שהשיגו מנהלי קרנות ושאר אשפי פיננסים מול עליות המדד הממוצע בבורסה, וגילו עובדה פשוטה: איש אינו מצליח "להכות" את המדד לאורך זמן. בסופו של יום, הרווח שאנו מפיקים מהשקעות מתוחכמות זהה, לטווח הארוך, לרווח שנפיק מקנית אגרת חוב הצמודה למדד הכללי של שוק המניות. אלפי השקלים שאנו משלמים מדי שנה כעמלה למנהלי קרן הפנסיה שלנו הם בזבז כסף, נקודה.

אבל ... מה עם וורן באפט? האם ניתן להכחיש כי האיש הפך למיליארדר בזכות השקעותיו? האם יכול להיות שאין הבדל מהותי בינו לבין אדם חסר נסיון שמשחק לו בבורסה? התשובה לשאלה זו בקצרה היא שאכן, אין הבדל. אבל כדי להבין את התשובה יש להסביר משהו על המתמטיקה של האקראיות.

טענותיו של פארטו

הפעולה האקראית הפשוטה ביותר שאנו יכולים לחשוב עליה היא הטלת מטבע. בהטלה כזו, ובהנחה שהמטבע מאוזן, יש סיכוי חצי לקבל "עץ" וסיכוי חצי לקבל "פלי". לצורך הדיון נניח כי מדובר כאן בהימור: אם המטבע נופל על "פלי" אני מרויח שקל, אם הוא נופל על עץ אני משלם שקל. אם אבצע את ההימור פעמיים ארויח שני שקלים בסיכוי רבע (זה הסיכוי שהמטבע נפל שתי פעמים על פלי), אפסיד שני שקלים בסיכוי רבע, ובסיכוי חצי (המתאים לתוצאות עץ-פלי או פלי-עץ) לא ארויח ולא אפסיד.

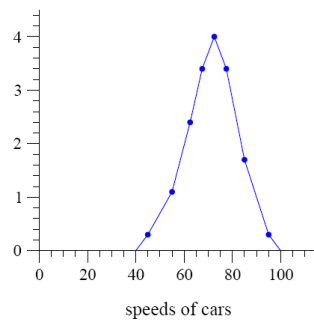
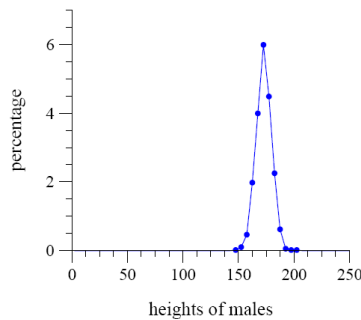
⁵ כדאי לדעת שחברות הביטוח אכן מתמחרות את הסיכוי הזה. אחוז מסוים מכל פרמית ביטוח הולך לכיסו הסיכון של מגה רעידת אדמה או הוריקן שלא נראה כמוהו. אבל כדי שחברת הביטוח תרויח היא זקוקה להערכה אקטוארית של הסיכוי להתרחשות מעין זו. מתברר, כמובן, שכאשר יש קונים מופיעים גם המוכרים. בכנס מדעי פגשתי פעם נציגה של משרד לונדוני שמנפיק לחברות הביטוח מספרים אשר אמורים לבטא את הסיכוי להוריקנים מפלצתיים. בהרצאתה היא גם פרטה את השיטות המגוחכות בעזרתן הם מגיעים למספרים אלו; בלי להכנס לפרטים אני מוכן להבטיח לכם שהתיעצות עם קוראת בקפה רציונלית (וזולה) הרבה יותר.



ומה יהיה אם אשחק מאה סיבובים? במקרה הטוב ביותר – המטבע נחת מאה פעמים על פלי – ארויח מאה שקלים, אבל ברור לכולנו שזה מקרה נדיר ביותר, כמו גם המקרה ההפוך בו אפסיד מאה שקלים. בציור משמאל אנו יכולים לראות מהו הסיכוי לתוצאה מסוימת, מול התוצאה, עבור שתי הטלות מטבע ועבור עשר. אנו רואים כי ככל שמספר ההטלות גדל מתקבלת עקומת פעמון אפיינית. שיא העקומה, כלומר התוצאה בעלת הסיכוי הגבוה ביותר, נמצא בערך הזכיה הממוצע שהוא כמובן, במשחק שלנו, אפס (בכל הטלה הסיכוי לרווח ולהפסד זהה). ככל שמתרחקים מן הערך הממוצע הסיכוי לקבל את התוצאה קטן, ורוב התוצאות נמצאות באזור הממוצע. עקומת פעמון זו (המודגמת בקו הירוק הנמצא בציור עבור עשר הטלות) נקראת גאוסיאן, על שמו של פרידריך גאוס, המתמטיקאי שהפך את השימוש בה לפופולרי.

המשפט החשוב ביותר בתורת ההסתברות נקרא **משפט הגבול המרכזי** ואומר בערך כך: אם מצב כלשהו נקבע כסכום של הרבה מאורעות אקראיים "קטנים" - כמו במקרה שלנו, הרווח/הפסד הכולל הוא סכום התוצאות של הרבה הטלות מטבע שכל אחת מהן אקראית – אזי **תמיד** התפלגות ההסתברויות למצב זה תהיה בצורה של עקומת הפעמון. לא משנה אם נזרוק מטבע, נשחק ברולטה, נטיל קוביה או נגדיל מספרים אקראיים במחשב, כלומר איננו צריכים להתעניין באפיים של התהליכים ה"מיקרוסקופיים" הקובעים את התוצאה. די לנו לדעת שיש הרבה גורמים אקראיים המצטרפים זה לזה כדי להבטיח שהתוצאה תהיה גאוסיאן.

באיור שממשאל אנו רואים את התפלגות הגובה עבור גברים אמריקניים. גובהו של אדם נקבע, בימינו המשופעים בתזונה, בעיקר לפי גורמים תורשתיים. להבדיל מצבע עיניים, לדוגמה, הנקבע על ידי גן יחיד, גובה נקבע על ידי מספר רב של גנים; בסיכוי מסוים האדם מקבל כל אחד מן הגנים הללו מהוריו. מי ש"זכה" בהרבה גנים שתורמים לקומה גבוהה יוצא גבוה באופן מיוחד, מי שקיבל מעט גנים כאלו יוצא נמוך. כעת, חשוב להבין שאין לנו מושג כיום על זהותם של הגנים האלו, על תפוצתו של כל אחד מהם באוכלוסיה, או על מנגנוני הפעולה שלהם. בכל זאת אנו יכולים לטעון כי, מכיוון שהגובה



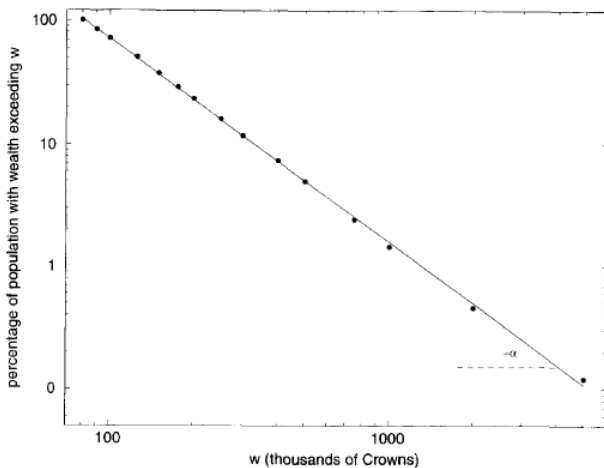
הסופי הוא נקבע כסכום של תהליכים אקראיים, התוצאה חייבת, לפי משפט הגבול המרכזי, להיות עקומת פעמון סביב הממוצע, כפי שאנו רואים אכן בפועל. באיור נוסף אנו רואים היסטוגרמה המתארת את הסיכוי למצוא מכונית במהירות של כך וכך קילומטרים לשעה. כאן התהליך הוא יותר סבוך, והמהירות מושפעת לא רק מגחמותיו האקראיות של הנהג אלא גם מחוקי התנועה, תנאי הדרך והתנהגותם של נהגים אחרים. עדיין העקומה נראית די דומה לפעמון.

מדיאגרמת הגבהים נוכל גם לקבל מושג מה לגבי ה"רוחב" של עקומת הפעמון. כפי שאנו רואים רובה המוחץ של האוכלוסיה נמצא פחות או יותר בתחום של 15 ס"מ מממוצע הגובה; את הגודל הזה מכנים סטית התקן, σ . בסטטיסטיקה גאוסית, הסיכוי לקבל תוצאה שסוטה מן הממוצע ארבע-חמש

סטיות תקן (נאמר, אנשים בוגרים בגובה שמעל שני מטר ארבעים, או מתחת מטר עשרים) הוא קטן הפליא, ולכל צורך אפשרי ניתן להניח כי לא נמצא לעולם אדם שגבהו מעל 4 מטרים (כ 15 סטיות תקן מהמוצע).

התוצאה הזו – יישום של משפט הגבול המרכזי – מלמדת אותנו כי עלינו לעדן את הטיעון שכתבנו קודם. הצגנו את המתח בין אנשים המחפשים חוקים חברתיים כמו מרכס, לבין אלו שסוברים כי הכל אקראי, כמו פאסקל. כעת הבנו כי גם אלו הסוברים שהכל אקראי מציעים בעצם חוק: הם מציעים שהחברה נשלטת ביד רמה בידי המתמטיקה של האקראיות, וכי אם נבחן תופעות חברתיות או אנושיות הנוצרות מהצטברות של החלטות "קטנות", או של אנשים רבים, נגלה גם כן את עקומת הפעמון עבור התוצאה הכוללת. זה אכן מה שקורה: בדיאגרמה מעל אנו רואים את התפלגות המהירות של כלי רכב על הכביש המהיר, התפלגות המושפעת, שוב, מהרבה גורמים "קטנים": הרגלי הנהיגה של הפרט, מצפיפות התנועה ועוד. התוצאה אכן דומה למדי לגאוסיאן.

האיש שהבין לראשונה כי יש לבחון את השערת האקראיות ביחס לחברה האנושית מול נתונים היה לכלן איטלקי נודע ביותר, וילפרדו פאראטו. הגודל שאותו בחן פאראטו הוא המדד הבסיסי לרווחה אנושית: העושר, או כמות הממון שיש לאדם. אם אכן צודקים אנשי האקראיות, אם אכן הצלחה או כשלון בעסק או בהשקעה הם בלתי צפויים ובלתי ניתנים לחיזוי, ניתן להניח שסך עושרו של האדם, סכום שהצטבר כתוצאה מסדרה ארוכה של הצלחות וכשלונות "קטנים" ואקראיים, יהיה מפולג בצורה של עקומת פעמון. ובכן, מהי האמת?



הנתונים שאסף פאראטו מכמה וכמה חברות אנושיות ומתקופות היסטוריות שונות גילו לו תמונה מדהימה, שדוגמה לה היא הציר שמשמאל. ציור זה אינו לקוח מפאראטו אלא ממחקר מודרני של לוי וסולומון, והוא מציג את התפלגות העושר באוכלוסית נורווגיה: ציר ה-Y מציג את הסיכוי להיות בעל נכסים של מעל X אלפי קרונות (זה היה המטבע הנורווגי בזמן עריכת הסקר), מול ציר X המציג את העושר (סך הנכסים) בקרונות. (שימו לב שמדובר בגרף לוגריתמי) מתברר כי התפלגות העושר אינה דומה אפילו במעט לעקומת הפעמון. היא מאד מאד רחבה:

לשמונים אחוז מן האנשים יש נכסים באזור מאתיים אלף קרונות, לעשרה אחוזים יש נכסים שמעל חצי מליון, ולאחוז אחד יש יותר מארבעה מליון!

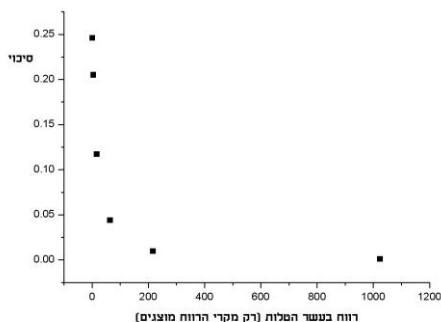
בעצם, לא היינו צריכים את הניסוי של פאראטו. מבט קצר סביבנו יבהיר לנו כי אם השכר הממוצע במשק הוא כעשרת אלפים שקל, לא נדיר למצוא אדם שמשתכר 25 אלף שקלים. זה אומר ש"רוחב" ההתפלגות הוא בערך 15 אלף שקל. אילו הייתה זו עקומת פעמון, כפי שהסברנו לעיל, הסיכוי למצוא אדם שמשתכר מאה ועשרים אלף שקל לחודש היה כמו הסיכוי למצוא אדם שגבהו 2.90 מטר - כלומר אפס לכל צורך שהוא. אבל הרי ישנם אנשים כאלו! ברור, אם כן, שפילוג העושר או ההכנסה באוכלוסיה איננו מציינת לחוקי הברזל של המאורעות האקראיים.

פילוג העושר וההכנסות שמצא פאראטו מכונה היום חוק חזקה, וגילוייו שכנעו את הכלכלן האיטלקי כי לא יתכן שחוקי האקראיות שולטים על צבירת העושר. פאראטו סבר שהתמונה שהתגלתה היא עגומה מאד. בצד שמאל של העקומה שגילה נמצאים הרבים המרוויחים מעט מאד וחיים חיי עוני. בצד ימין אנו רואים את המעטים, העשירים והחזקים. מה הביא אותם למצבם העדיף? אם אין זה אוסף של

מאורעות אקראיים, אלו חייבים להיות הבדלי יכולת אנושית: העשירים הם חכמים או מוכשרים או נוצלים או בעלי מרפקים יותר משאר האוכלוסיה, וזה מה שנותן להם את מיקומם העדיף. פארטו סבר כי גרף העושר שהציג אינו אלא תגלית מחרידה: כי הדמוקרטיה היא הונאה, והחברה נשלטת בידי מנגנוני כח נסתרים, בקונספירציה של יד רוחצת יד, שמאפשרת למעטים החזקים להדביר תחתיהם את החלשים הרבים. התצפית הזו הביאה את פארטו לתמיכה במשטר אחר, משטר לא דמוקרטי שבו, הוא קיווה, הממשלה תהיה חזקה מספיק כדי לשחרר את הסקטור הפרטי מכבלי הקונספירציה של המעטים החזקים. הוא הפך לאחד מן האישים הבולטים ביותר שתמכו בפשיזם האיטלקי, ומערכת התעמולה של מוסוליני עשתה שימוש רב בשמו ובתורתו. [פארטו מת כשנה לאחר עליית הפשיסטים לשלטון, כך שקשה מה היה אומר על הסדר החברתי שנוצר באיטליה של מוסוליני].

אבל פארטו טעה. במונחים טכניים הוא גילה כי התפלגות העושר "רחבה מדי" מכדי להיות מוסברת על ידי משפט הגבול המרכזי, והוא הסיק מכך שהיא איננה יכולה להיות תוצאה של תהליך אקראי. הוא לא הביא בחשבון, עם זאת, סוג אחר, חשוב, של אקראיות: **תהליך אקראי כפלי**.

מהו תהליך כפלי? אם נזכר במשחק הטלות המטבע שהגדרנו קודם, הנחנו כי הסיכוי לזכות או להפסיד בכל הטלה בודדת הוא חמשים אחוז, וכי אני מקבל שקל אם אני מרויח ומפסיד שקל אם אני מפסיד. השקעה בבורסה איננה מתאימה למודל ההימור הזה. בבורסה אני מקבל, או מפסיד, לא סכום מסוים אלא אחוז מסוים מכלל השקעתי. כמודל פשטני נוכל להניח מקרה בו כל מניה, באופן אקראי, מכפילה את ערכה או מפסידה חצי מערכה מדי שנה. גם זהו תהליך "סימטרי" – הסיכוי להרויח ולהפסיד זהה, ולכן הסיכוי לשש הצלחות מתוך עשר, או לכל תוצאה אחרת, זהה במשחק המקורי ובמשחק ההשקעה בבורסה. אבל כיצד מתפלגות התשואות?



אחה. במשחק ההימור המקורי, אם ניצחתי עשר פעמים רצוף קיבלתי עשרה שקלים. במשחק הבורסה אם ניצחתי עשר פעמים **הכפלתי** את השקעתי ההתחלתית פי $2^{10} = 1024$. עשרים נצחונות רצופים יכפילו את הונוי בערך פי מליון, ואילו עשרים הפסדים רצופים יצמצמו את ההשקעה שלי למליונית מערכה ההתלתי. כפי שניתן לראות בציור שמשמאל, ההתפלגות היא עתה מאד מאד רחבה – בעוד שהתפלגות גאוסית נתנה כמעט סיכוי אפס לרווח של חמש, כאן יש עדיין סיכוי לא רע לרווח של מאתיים, ובאופן כללי ישנו סיכוי (אמנם קטן) לקבל מספרי ענק.

זוהי בעצם טענתם של הכלכלנים המודרניים (ברטון מלכיאל ויותר ממנו נסים טאלב בספרו רב המכר "תעוועי האקראיות") כנגד וורן באפט ודומיו. אם נסתכל על פעילותו של משקיע בודד ונניח, למען הפשטות, מודל שבו בכל שנה הוא מכפיל את הונו או מפסיד חצי ממנו, הרי שאחד מכל שני משקיעים יזכה בשנה מסוימת להכפיל את הונו, אבל מחציתם יפסידו את כל מה שהרויחו בשנה שלאחריה. רבע מן המשקיעים, בני המזל, יגלו שהשקעתם צמחה פי ארבעה במשך שנתיים. אם נמשיך את המשחק הזה, נגלה שאחד ממליון משקיעים, בערך, יזכה בעשרים שנים טובות רצופות וכפיל את הונו פי מליון. אם הוא השקיע בתחילה סכום צנוע של אלף דולר, הוא יגמור כמיליארדר. **מכיוון שיש מליוני משקיעים, הסטטיסטיקה צופה שהאדם הזה אכן קיים**. לאיש הזה, אומר הפרופסור נסים טאלב, קוראים, אולי, וורן באפט. הוא לא בהכרח חכם או כשרוני או פיננסיסט מוכשר יותר מכל אחד מהשחקנים האחרים בשוק, כולל הלוזרים שהפסידו שם את מכנסיהם. הוא פשוט בר מזל.

הערכת איכות בתנאי אקראיות: האם מר ג'ונס פורה במיוחד?

סיפורה של התגלית שתיארנו בפסקאות הקודמות, ולפיה בתהליך אקראי כפלי ניתן לקבל התפלגות רחבה מאד של תוצאות בתהליך "ניטרלי" לחלוטין (כלומר במצב בו לכל השחקנים אותם כישורים) מעלה שאלה בסיסית ועמוקה שהשלכותיה הרבה מעבר לפוליטיקה ולכלכלה. כולנו נוטים להעריך איכות בהתאם לתוצאות: אם נקנה עשרה זוגות מכנסיים שונים ונשתמש בהם באופן שווה פחות או יותר, נסיק, ובצדק, כי זוגות המכנסיים שהתבלו ונשחקו לאחר זמן קצר עשויים מבד גרוע יחסית, וכי אלו שמשמשים אותנו שנים רבות ועדיין נראים כחדשים נתפרו מחומר עמיד במיוחד. המשוואה פשוטה: אנו מזהים "הצלחה" (במקרה של מכנסיים – שרידות) עם "טיב", כלומר אנו מניחים כי אם אדם או חפץ או בעל חיים "מצליח" – חי הרבה זמן, מתרבה, מגיע לשלטון, מנצח במלחמה – הרי זה סימן לכך שיש לו איזו סגולה מסוימת, שנכנה אותה "כשירות", ההופכת אותו ליותר כשיר לאותה משימה בה הצליח. אורח החשיבה הזה נראה לנו כמעט כמושכל ראשון: נפוליון ניצח בהרבה קרבות – זו אינדיקציה לכך שהיה מפקד צבאי מחונן. יוליוס קיסר עלה לשלטון – זו ראייה לכך שהיה איש מדינה גאוני. נמצאו מאובנים של ג'וקים בני 300 מיליון שנה – הרי זו ראייה לעמידות יוצאת הדופן של המין הזה. מאמריו של פלוני מצוטטים ללא הרף בספרות המדעית – מכאן שהוא מדען דגול. לא?

ובכן, לא בהכרח. נדגים את ההבדל באבחנה שבין כוסות למכנסיים. בקטע הקודם הסכמנו שמכנסיים ששורדות הרבה זמן עשויות מחומר טוב יותר. מה לגבי כוסות זכוכית? כוס אינה מתנפצת בגלל ש"צברה" שחיקה במהלך חייה, אלא כתוצאה של אירוע חד פעמי אקראי: בדרך כלל אנו שומטים אותה מידנו במהלך שטיפת הכלים, או מפילים אותה בטעות מהשלחן. אם קנינו עשר כוסות ולאחר חצי שנה נשאר לנו חמש, תהיה זו שטות ליחס לחמש האלו עמידות מיוחדת. המכנסיים השורדים הם המכנסיים הכשירים. הכוסות ששורדות הן בנות המזל. ניתן להציג זאת גם בצורה אחרת: "תוחלת החיים" של מכנסיים בנות שנה קצרה מזו של מכנסיים שנקנו זה עתה; לעומת זאת, לכוס ששרדה שנה במטבח וכזו שהגיעה כרגע מהחנות יש אותה תוחלת חיים, מפני שלא השחיקה הורגת את הכוס אלא מאורע אקראי כלשהו.

במקרה של מכנסיים, אם כך, נוכל לדבר במונחים דארוויניסטיים על "שרידת הכשירים", בעוד שלגבי כוסות אנו חושבים על "שרידת בני המזל". כשבודקים את העניין מתמטית רואים שיש הבדל אפייני בין שתי הסיטואציות. לא נתפלא כלל לראות הבדלים של פי עשר או פי מאה בתוחלת החיים של מכנסיים מבד גרוע מול מכנסי ג'ונס חזקים. בכוסות, לעומת זאת, הטבע האקראי של ה"מוות" מבטיח כי הסיכוי למצוא כוס ששורדת פי חמש מהממוצע הוא אכן קטן מאד (כמה כוסות נשאר לכם מהסט שקניתם לאחר החתונה? אם אתם נשואים יותר מכמה ששנים התשובה תהיה בדרך כלל אפס). האם ההבדל הזה בין מכנסיים לכוסות לא מאפשר לנו להבחין בין הכשירים לממוזלים? האם לא נוכל, על סמך סטטיסטיקה של הרבה אנשים/מינים/חפצים לזהות מתי הצלחה מעידה על כשירות?

זוהי חזרה על הארגומנט שהולך לטעותו של פארטו. נדמה לנו שהסטטיסטיקה נותנת לנו מבחן המאפשר לנו להבחין בין כשירות למזל לפי התפלגות התוצאות: אם ההתפלגות צרה (התוצאות לא שונות בהרבה זו מזו) – מדובר אולי במזל, אבל אם יש תוצאות שונות מאד מאד, הבדלים של פי מאה ופי אלף, מדובר ודאי בהבדלי איכות אמיתיים. וכמו במקרה של פארטו – גם כאן מדובר בארגומנט שגוי, בגלל קיומם של תהליכים כפליים.

דוגמה? הנה דוגמה נפלאה: הסטטיסטיקה של שמות משפחה. על פי תוצאות מפקד האוכלוסין האחרון בארצות הברית יותר מאחוז מאוכלוסית ארצות הברית, כשלושה מליוני בני אדם, נושאים בגאון את השם "סמית". מספרים דומים מאפיינים את תפוצתם של שמות המשפחה ה"גדולים" האחרים: מיליונים נקראים דיוויס, ג'והנסון, וויליאמס וכדומה. לעומת זאת, ישנם בארצות הברית ארבעה מיליון שמות משפחה השייכים לאדם אחד בלבד! מתוך ששה מליוני שמות משפחה שונים, רק

150000 שייכים למשפחות המונות יותר ממאה פרטים. אנו רואים כאן סטטיסטיקה הדומה מאד לזו שמצא פארטו לגבי עושר ונכסים: מעט "שבטים" ענקיים, המון המון קבוצות זעירות, עם הבדלים של ששה סדרי גודל (פי מליון) בין הקטן לגדול. שם המשפחה של כותב המאמר הזה, שנרב, היה שייך לפני כעשרים שנה לשני בתי אב בישראל בלבד (מאז אנחנו מתאוששים...) אילו היינו מאמצים את הגישה של פארטו היינו צריכים להניח ששמות המשפחה השכיחים הם כאלו מפני שלנושאים ישנה כשירות או איכות גבוהה, לצורך העניין היינו צריכים להניח שהסמיתים והג'והנסונים מולידים יותר ילדים מאשר השנרבים ושאר בעלי השמות הנדירים, אבל איש מאתנו אינו סבור כך ברצינות. מהו, אם כן, ההסבר להבדלי השכיחות האדירים בין שמות משפחה שונים?

לבעיה הזו יש היסטוריה ארוכה, שתחילתה באחד מאבות הסטטיסטיקה המודרנית, סיר פרנסיס גאלטון. לצורך העניין אנו צריכים רק לשכנע את עצמנו בדבר אחד: שמדובר בתהליך אקראי כפלי. זה בעצם די פשוט: אם כל אדם השייך למשפחה מסוימת מוליד מספר בנים אקראי (אנו מניחים חברות מסורתיות שבהן הבן יורש את שם המשפחה של האב ומעביר אותו לבניו הזכרים), אזי המספר הכולל של ילדים משם משפחה מסוים פרופורציונלי לגודל המשפחה, וכך גם הגידול או ההקטנה. במשפחה של אלף פרטים יהיו בדור הבא, נאמר, בין 900 ל 1100, ואילו במשפחה של מליון פרטים הדור הבא ימנה בין תשע מאות אלף למליון ומאה אלף. גודל ה"קפיצות" מדור לדור פרופורציוני לגודל המשפחה, ומשפחות גדולות קופצות יותר "חזק" מקטנות. זהו המאפיין של תהליך כפלי, וכפי שהסברנו לעיל בתהליכים כאלו יש אכן פילוג רחב מאד של התוצאות.

קיומם של תהליכים כפליים במערכת הופך את שיפוט האיכות על פי התוצאות למשימה קשה ביותר. הבדלי ענק בשורה התחתונה יכולים להוצר בין אנשים ושבטים שכישוריהם או איכותם זהים. אבל תהליכים כפליים מן הסוג הזה סובבים אותנו מכל עבר. ניתן דוגמאות:

1. **מכירת ספרים:** אנו נוטים ליחס איכות כלשהי לספר ההופך לרב מכר (גם אם בעלי טעם ספרותי מעודן נוטים לעקם את חטמם, הם לפחות צריכים להודות שמחבר הספר קלע לטעם ההמון, כלומר את האיכות הזו יש לו). אבל ספרים בדרך כלל אינם הופכים לרבי מכר כתוצאה מפרסומת; השמועה על ספר טוב עוברת מפה לאוזן, כאשר אנשים שנהנו ממנו מספרים עליו למכריהם. ובכן, אם הגל הראשון של קוראי הספר הכיל אלף איש (שאוילי התלהבו מהכריכה או מהשם וקנו אותו בחנות), ונניח כי כל אחד ממליץ על ספר שמצא חן עיניו לאדם אחד **בממוצע** (אבל לפעמים הוא פוגש שני אנשים ומפטפט אתם על הספר, ולפעמים הוא קורא את הספר כשהוא חולה ועד שהוא מבריא הספר נשכח) – זהו תהליך ממש זהה לזה של שמות המשפחה, כאשר כל קורא נחשב ל"אב" וכל מי שקיבל המלצה הוא ה"בן". במהלך "דורות" רבים של קוראים-ממליצים-קוראים יכולים באותה מידה להיווצר הבדלי ענק בין ספרים שאיכותם זהה, רק בגלל אופיו של התהליך האקראי הכפלי. דבר זה נכון לא רק לספרים אלא לכל תהליך שעובד בשיטת "מפה לאוזן" או בשיטת "חבר מביא חבר" [חשבו על הבדלי הענק שיש במידת הפופולריות של אתרי אינטרנט שונים באותו נושא – אתרי חיפוש או אתרי משחקים – למרות שהאתרים עצמם אינם שונים בהרבה זה מזה).

2. **תהילת עולם:** מי אינו מעוניין לזכות בתהילה? ישנם כאלו שרכשו את תהילתם במעשה בודד: ניל ארמסטרונג היה האדם הראשון על הירח, אלפרד נובל ייסד קרן הנותנת פרסים יוקרתיים וכדומה. אבל ברוב המקרים התהילה באה כתוצאה מרצף של הצלחות: זכיה בתחרויות עבור ספורטאים, נצחונות בקרבות עבור מצביאים, התקדמות מדרגה לדרגה עבור פוליטיקאים ומדינאים. במקרים אלו, התהילה בדרך כלל גדלה בצורה חדה עם מספר ההישגים. הרבה אנשים זוכרים את מרק ספיץ, שזכה בשבע מדליות זהב במינכן 1972. מי זוכר את קריסטין אוטו, שזכתה בשש מדליות 16 שנים אחריו? ומי את קורנליה אנדר, שזכתה בארבע מדליות באותן שנים? הכל יודעים על יוליוס קיסר, אבל כמה אנשים שמעו

על מתחריו הגדולים פומפיוס וקראסוס? מי זוכר את שמו של סגן הנשיא של לינקולן? [קראו לו חניבעל המליון, אם אתם מתעקשים].

נראה כי תהילה, כמו השקעה בבורסה, אינה גדלה בכמות קבועה פר "ניצחון" אלא ביחוס קבוע, נאמר, כל ניצחון מגביר את התהילה פי שתיים או פי עשר. שוב זהו מאפיין מובהק של תהליכים כפליים שבהם האקראיות יכולה ליצור הבדלי ענק בין אנשים שכשרונותיהם שווים.

ברירה טבעית או סתם מזל?

אחת ההשלכות המעניינות ביותר של הבנתנו את העוקץ של תהליכים אקראיים כפליים נוגעת לתורת הברירה הטבעית של צ'רלס דארווין. חשוב להבחין בין שני אספקטים של רעיון האבולוציה. הטיעון הבסיסי, ולפיו מינים ביולוגיים מתפתחים, מופיעים ולפעמים גם נעלמים, אינו קשור לדארווין כלל. עוד לפני דארווין גילו הגיאולוגים מאובנים רבים של צורות חיים עתיקות שאינן קיימות כיום; הם הסיקו מכך שישנה התפתחות והכחדה של מינים ביולוגיים בסקלת זמן של מיליוני שנים. הגיאולוגיה איפשרה לתארך את המאובן לפי סוג שכבת הסלע בו נמצא, וזה איפשר לקבוע כי כיוון ההתפתחות הוא מן היצורים הפשוטים למסובכים ואת סדר הופעתם של מינים שונים. השאלה לא היתה על עצם קיומו של התהליך האבולוציוני הזה, אלא על הכח המניע שמאחוריו. מדוע מינים נוצרים ונעלמים? מדוע מינים מסוימים שורדים? זוהי השאלה אותה פתר דארווין בהציעו את התיאוריה של הברירה הטבעית.

תמונת העולם שנתן לנו דארווין בנויה על מושג ה"כשירות". אם ישנם שני אריות שהם זהים לחלוטין בכל תכונה שהיא פרט לכך שאחד מהם רץ יותר מהר, הרי שהסיכויים של האריה המהיר להשיג טרף יהיו גדולים יותר. בהנחה שכמות הטרף מוגבלת ומספיקה רק לאריה אחד, סביר להניח שהאריה האיטי ימות; בכל מקרה האריה המהיר יהיה בריא יותר חזק יותר ושבע יותר, לכן הוא ינצח את האריה האיטי והרעב במרוץ להשגת בת זוג. השורה התחתונה היא שלאריה המהיר יהיו בממוצע יותר צאצאים, ומכיון שתכונות כמו מהירות עוברות בתורשה (המהירות קשורה לשרירי הרגל, נאמר) הרי שישנו סיכוי יותר גדול שבדור הבא האריות יירשו את תכונת המהירות. במרוצת הדורות, אמר דארווין, יעלמו האריות האיטיים וישארו רק המהירים. בינתיים יכולה להופיע מוטציה חדשה: יכול להיות שנולד אריה עם בעיות בלב, או אריה עם צבע שונה שמאפשר לו להסתוות היטב בסוואנה. מוטציות גרועות (כמו בעיות בלב) נעלמות, מוטציות טובות (כמו הסוואה) מקנות לבעליהן יכולת השרדות ולכן הן יישארו ויתפשטו באוכלוסייה. זה, אמר דארווין, המנגנון המניע את האבולוציה: **שרידת הכשירים**. בכל אוכלוסייה נולדים צאצאים בעלי מגוון תכונות, הטובים נשארים, הגרועים נעלמים, ולכן מגוון התכונות "זורם" לאורך הדורות.

מזכיר קצת את הדטרמיניזם החברתי של מרכס וקונט? אכן כן. גם לדארווין היה ברור שלא כל מוטציה חיובית שורדת ולא כל מוטציה שלילית נכחדת. הוא הבין שיתכן שהאריה שרץ מהר יחליק על קליפת בננה וישבור את הראש, ואז דוקא האריה האיטי ישרוד, אבל הניח, במונחים שלנו, שהשפעת ה"רעש" הזה קטנה, כלומר שתוחלת מספר הצאצאים של אריה "כשיר" היא גדולה יותר באופן מובהק מזו של אריה "לא כשיר". במובן הזה מה שדארווין הציע הוא המקבילה הביולוגית לדטרמיניזם חברתי: גם מרכס היה מודע לכך שיתכן שהמצביא יחטוף כאב בטן לפני הקרב המכריע, אבל הוא סבר שהשפעתם של אירועים קטנים כאלו זניחה ביחס לכוחות האדירים המניעים את ההיסטוריה.

נקודה קריטית בכל הלך המחשבה הזו היא שניתן לקשר בין שכיחות של מין ביולוגי לבין הכשירות שלו. אם אני רואה שיש בישראל חתולי זבל ואילו בארצות הברית ישנם סנאים, אניח שהחתולים אינם כשירים לתנאי ארצות הברית (נאמר, אינם עמידים לקור שיש שם) והסנאים אינם מתאימים לתנאי החיים בישראל. באותה מידה נוכל להניח שאם ביער הטרופי נמצא מין אחד של עצים שהוא נפוץ מאד, והרבה מינים עם תפוצה קטנה, נוכל להניח שהמין הנפוץ כשיר יותר ושהמינים הקטנים כשירים פחות. זו פחות או יותר התפיסה האקולוגית שנקראת היום "תורת הנישה".

בעשרות השנים האחרונות נחשפה תורת הברירה הטבעית לביקורת מכמה כיוונים. הוצע, לדוגמה, כי הכחדת הדינוזאורים לפני 60 מיליון שנה קרתה בגלל מטאור ענק שפגע בכדור הארץ, מטאור שיצר זעזוע אקולוגי אדיר ושינה את האקלים למשך זמן, כך שהדינוזאורים לא יכלו להסתגל למצב החדש ונכחדו. אם אכן זו האמת מתברר שניתוח הכשירויות על בסיס נתוני עבר אינו שווה כלום. אורח שהיה מגיע לכדור הארץ לפני 65 מיליון שנה היה רואה עולם מלא בדינוזאורי ענק שבין רגליהם מסתובבים כל מיני יונקים פצפונים בגודל ארנבת המשמשים לדינוזאורים כפיצוחים. הוא היה מסיק באופן חד משמעי שהדינוזאורים הם הכשירים יותר. מתברר, אם כן, שמינים נכחדים לא בגלל חוסר כשירות אלא בגלל חוסר מזל. השמדות המוניות, טען דיויד ראופ, אינן נובעות מגנים רעים אלא פשוט ממזל רע. אי אפשר היה להסיק מן ההיסטוריה של הדינוזאורים את הכחדתם העתידית, כשם שלא ניתן לנבא באמצעות ההיסטוריה הפיננסית את הסיכוי לקריסתו של בנק גדול בגלל מעילת ענק של פקיד בודד.

יתר על כן, בשנים האחרונות נערכו סקרים רחבי טווח על אוכלוסיות העצים ביער הטרופי, סקרים שכללו מאות אלפי עצים באזור גדול בג'ונגל. כל עץ נבדק, קוטלג, ומיקומו סומן. מתברר כי ישנם מספר מועט של מינים שכל אחד מהם מהווה אחוז עד חמשה אחוז מעצי היער, והמון המון מינים "קטנים" שכל אחד מהם מופיע ביער בכמה עצים בודדים. מזכיר משהו? אכן – בדיוק אותה תופעה שראינו לגבי שמות משפחה. פרופסור סטיב האבל מן המכון הסמיתסוני לחקר הטבע ניסה, לפני כעשר שנים, להתאים את הביטוי המתמטי שמתאר את סטטיסטיקת שמות המשפחה להתפלגות שכיחויות המינים בצמחיה וראה זה פלא – ההתפלגות מתאימה להפליא!

האבל טוען, אם כך, שאין שום צורך במושג הכשירות של דארווין בכדי להסביר מדוע מין מסוים של עצים הוא מאד שכיח והאחר נדיר. מבחינתנו ניתן וצריך להניח כי לכל המינים ביער הטרופי אותה כשירות בדיוק; כל מין מתרבה לאורך הדורות בתהליך אקראי כפלי, בדיוק כמו שמות המשפחה, והתוצאה היא סטטיסטיקה זהה. הטיעון הפרובוקטיבי הזה גרם זעזוע עמוק בקהילת האקולוגים, והיכוח הזועם סביב הנושא ממלא את דפי העיתונים המדעיים היוקרתיים ביותר גם בשעה ששורות אלו נכתבות.

שוב אנו חוזרים לבעיה הבסיסית. דארווין הניח כי ישנו קשר ישיר בין כשירות לשכיחות. הוא אפילו אמר זאת בפירוש בספרו: "כאשר אנו מביטים בצמחים ובשיחים המכסים את שפת הנהר, אנו מתפתים לייחס את מספרם וסוגיהם למה שאנו קוראים מזל, אך איזו טעות היא זו!". אני מניח שדארווין הסתמך באופן אינטואיטיבי על הטיעון שעתידי היה לנסח פארטו, כי הבדלי שכיחות ענקיים מרמזים על מנגנון דטרמיניסטי, על הבדלי איכות, בניגוד למזל ולאקראיות. זו, כפי שראינו בדוגמת שמות המשפחה, טעות, אם המזל מושפע מתהליכים כפליים.

הדיון הפוליטי הרציונלי ואויביו:

הדמוקרטיה המודרנית מבוססת על העקרון שהציע פריקלס בנאום ההספד המפורסם שלו, ולפיו, "אף שרק מעטים עשויים להיות אבות למדינות, כולנו מוכשרים לדון אותה". קרל פופר הציג את המשפט הזה בפתח ספרו "החברה הפתוחה ואויביה", תוך שהוא מנגיד אותו לחזון האפלטוני של ממשלת הפילוסופים. אבל, למיטב הכרתי, פופר אינו מציג את דבריו של פריקלס כטיעון הזוקק

הנמקה, אלא כתנאי לקיומם של מוסדות חברתיים המונעים רודנות (מה שקראנו לעיל טענת השליט המושחת) או למצער כדרישה מוסרית, שהיא בצורה זו או אחרת וריאציה על עקרון רוח החופש שתואר לעיל.

אך מעבר לכך, האם משפטו של פריקלס נכון? מדוע מסוגלים השוטים, הבורים והממוקדים בעצמם להיות שופטים של מדיניות? מדוע לא ניתן את הפריבילגיה של ניהול החברה למומחים או ליודעים את הנסתר מאחרי הקלעים? אריאל שרון הסביר את התפנית הפוליטית שעשה כראש ממשלה בצטטו את מלות השיר "דברים שרואים משם לא רואים מכאן" – ובכך אמר לנו מפורשות שהוא חולק על הטיעון של פריקלס, שאנו האנשים הפשוטים איננו מסוגלים לדון את מדיניותו. מה נוכל לומר באופן עקרוני כנגד עמדה זו?

יש כאן אכן, שאלה לא פשוטה. ניתן לדמיין ציבור ברמה נמוכה כל כך עד שדמוקרטיה לא תבא בחשבון (יכול להיות שמשטר כזה יכל לצמוח רק בחברות שבהן אחוז יודעי קרוא וכתוב מספיק גדול כך שניתן לקיים דיון פומבי בצורה סבירה)⁶. יסודו של המשטר המודרני הוא באבחנה ולפיה הרציונליות היא גורם משותף לכל הבריות, ועל כן הדיון הרציונלי והטיעון הרציונלי הם העוברים לסוחר ברשות הרבים. אבל דומה כי אותה הרציונליות עצמה אומרת לנו שכדאי לנו למסור את עניינינו לידי המומחים, כשם שאנו עושים זאת בענייני רפואה או בנייה.

כפי שראינו לארכה של מסה זו, אחת התובנות הבסיסיות בנושא היא כי, לפחות כרגע, מומחיותם של המהנדסים החברתיים אינה מניבה תוצאות מרשימות במיוחד. גורם האקראיות בחיי החברה והכלכלה האנושיים (ואולי אפילו הביולוגיים) הוא כה גדול, שאם בכלל ניתן להאמין באיזה אדריכל של מדיניות לטווח ארוך ניתן לתחזיתו בין חמשים לששים אחוז להתגשם. מי שטוען שהוא חוזה בוודאות מהלכים חברתיים ומדיניים לטווח ארוך הוא שרלטן בסיכוי גבוה מאד. אנו, כאנשים החיים בחברה פתוחה ודמוקרטית, חייבים לפתח מודעות יותר רצינית למשקלה של האקראיות בחיינו וזאת בכמה תחומים:

א. **"תכנית אסטרטגית":** יש במקומותינו הרבה דיבורים על החוסר ב"מנהיג עם חזון" מין אדם כזה שיכול לראות כמה צעדים מראש במשחק המדיני או הפוליטי או החברתי, שחקן שח גאוני שכזה המנחש את חמשת מהלכיו הבאים של היריב/האויב ומכין איזו מכה מדהימה לשלב האחרון. צריך להפנים את העובדה שאין חיה כזו. המציאות היא כה מסובכת וכה בלתי צפויה עד שהנסיון לקרוא אותה מראש הוא מסוכן. האמונה שלנו במציאותם של חוזים חברתיים כאלו בנויה על שיפוטם בדיעבד.

ב. **שיפוטם בדיעבד:** אנו נוטים לראות את המהמרים המצליחים של ההיסטוריה, הפוליטיקה והכלכלה, ולייחס להם תכונות פלא (תכניות אסטרטגיות) בעוד מהמרים פרועים לא פחות שהפסידו (ואלו הרוב המוחץ) פשוט נשכחים. ספרי ההיסטוריה מלאים בכשלים כאלו: מלך חכם פלוני השקיע בצבאו ולכן ניצח, מלך טיפש אלמוני בנה צבא גדול ובכך הקים בסיס כח למרידה שחיסלה אותו. בעמוד אחד אנו קוראים על השליט ההוא שגרש מיעוטים מארצו ויצר אחידות דתית שחזקה את העם, שני עמודים אחר כך נלמד על השליט השני שגרש מיעוטים מארצו והפסיד בעלי מלאכה וסוחרים וכך החלה ממלכתו לשקוע. האמת היא שבתנאי אי ודאות רק סדרה ארוכה מאד של הצלחות (גם אם היא מלווה במעט כשלונות) יכולה להעיד על איכות אמיתית. סביר להניח שנפוליאון היה אכן אסטרטג צבאי מוכשר, שהבין יותר מיריביו באותה עת את שדה הקרב החדש שהתפתח לאחר הנהגת הגיוס

⁶ קשה להגדיר מהי התשתית הנדרשת לקיומה של דמוקרטיה שתתפקד באופן סביר, אבל כדאי לזכור שהניסוי הדמוקרטי נערך פעמים רבות בהיסטוריה לפני התקופה המודרנית: באתונה, ברפובליקה הרומית, בשווייץ ועוד, ובדרך כלל לא היה נראה לבריות כבעל יתרונות בולטים ביחס לשיטות ממשל אחרות. די ברור שרמה מסוימת של ידע לגבי המציאות (כמו זה שיוצרת תקשורת וביקורת חופשית) ויכולת שיפוט סבירה של הבריות הם תנאים הכרחיים להצלחה.

הכללי. אבל אין שום הצדקה לחשוב את יוליוס קיסר, או את ג'ינג'יס חאן ודומיהם ליותר מאשר נוטלי סיכונים מטורפים שבמקרה הצליחו בסדרה ארוכה של הימורים.

ג. **השוואה בין הריאלי לדמיוני:** כמה פעמים בחייכם שמעתם את הטענה כי "אם בעל סמכות X היה/לא היה עושה צעד Y, הכל היה נפלא". משפט זה משווה בין המציאות הקונקרטי שלנו לבין המציאות שאנו חושבים שהיתה "אילו". אנשים משווים תמיד את ההיסטוריה הריאלית, זו שקרתה בפועל, עם ההנחות שלהם לגבי מה שהיה במציאות האלטרנטיבית שלא התרחשה. בזה הם מניחים במובלע את יכולתם לחזות את מהלכה של ההיסטוריה בהנתן נקודת זמן היפותטית בעבר. למיטב הבנתי אין אפשרות לחיזוי כזה, בודאי שלא רטרואקטיבית.

ד. **לחיות מהיום למחר:** מה אנו אמורים לדרוש, או לצפות, מן המנהיגות הפוליטית והמדינית שלנו? התשובה מורכבת משני אלמנטים. הראשון הוא איזה שהוא חזון, אבל לא במשמעות של תכנית אסטרטגית ארוכת טווח אלא במובן של הצבת מטרות על מנהיגות צריכה להתבונן במצב הנתון מתוך תפיסה הכוללת של מטרות – שלום או שוויון או רווחה או חינוך או כל הרכבה של אלמנטים אלו ואחרים – ולשקול את האפשרות להגיב למצב העניינים הנתון לאור המטרות הללו. בלא תפיסה כזו לא תיתכן התקדמות. השאלה מהן המטרות הבסיסיות שלנו ומה סדר הקדימויות ביניהן היא השאלה הפוליטית המרכזית שסביבה אמור להתנהל הדיון הציבורי.

הדבר החשוב הוא התנהלות בצעדים קטנים, שמעורבות בהם כמה שפחות ספקולציות על מצבים עתידיים. כפי שראינו בדוגמת הטיל שפתחנו בה, השפעות האקראיות מצטברות עם הזמן. תחזית לזמן קצר מדויקת לאין שיעור מצפיה ארוכת טווח: זוהי הסיבה שבגללה מטראולוג ישמח לתת לנו תחזית מזג אוויר לארבעה ימים קדימה, מקסימום לשבוע, אבל בשום פנים ואופן לא יסכים לנבא את הסיכוי לרוח חזקה בעוד חודש.

ה. **הערכת סיכונים רציונלית:** חברת הביטוח מוכרת לנו מוצרים כמו ביטוח חיים, דירה או רכב. תמורת סכום מסוים מבטיחה לנו החברה פיצוי כספי בשווי רכבנו אם הוא ייגנב. כיצד יודעת החברה לתמחר את ההתחייבות הזו? היא עושה הערכת סיכונים על סמך נתוני עבר. למבטח יש סטטיסטיקה האומרת, נאמר, כי אחת מכל מאה מכוניות סובארו נגנבת כל שנה. בהנחה שזה יהיה המצב גם בעתיד מציעה החברה לבטח רכב סובארו בפרמיה שהיא, נאמר, שני אחוז מערך הרכב. אם ייגנב אחד ממאה רכבים מבוטחים יישאר לחברה מחיר של מכונית שלמה לאחר שתפצה את הנהג הנפגע.

שימו לב למשפט הקריטי: החברה עושה הערכה על סמך נתוני עבר. אין לה שום אפשרות ריאלית לחזות משבר כלכלי שישלח אלפי עניים מיואשים להתמחות בגניבת מכוניות, או לחזות הוריקן בעצמה 8 שיפגע בעיר גדולה בחוף המזרחי ויהרוס אותה כליל, או רעידת אדמה שתשגר את לוס אנג'לס לתוך האוקינוס השקט. כל אלו דברים שיכולים לקרות אבל אין איש עלי אדמות שיכול לאמוד את הסבירות שלהם, ולכן התימחור של אירועים כאלו לתוך הפוליסה הוא למען האמת חסר בסיס. באיזה משרד יושב פקיד שזרק איזה מספר. אם באמת יקרה האירוע הקיצוני, המבטח יפשוט את הרגל וחסל.

דבר דומה צריך שיעמוד לנגד עינינו כל פעם שאנו הולכים לקלפי. הסיכוי של המנהיג שנבחר לחזות נכונה אירועים מדיניים או פוליטיים שהם המקבילה של הוריקן בעצמה 8 הוא אפסי. האיש שאת ידו אנו רוצים להניח על כפתורי השליטה צריך להיות לא חוזה אלא מישהו שלא יאבד את עשתנותיו גם כשקורה הבלתי צפוי, כשנוצר משבר שאינו יכול להפתר מכחם של עקרונות כלליים.

כשהמורכב הופך פשוט: מגרעין האטום עד ממלכת החיות.

הפיסיקה של מערכות מורכבות צברה תאוצה רבה בשנים האחרונות. פיסיקאים מצאו עצמם מעורבים בניתוח ההתפשטות של מחלות מידבקות, הדינמיקה רשת האינטרנט, התהוותן של מערכות חברתיות בבני אדם ובבעלי חיים, תבניות צמחיה, ארגון וארגון עצמי בתהליכים אקולוגיים ואבולוציוניים, ניתוח וחיזוי של שוק המניות ועוד ועוד. הערך המוסף שמביאים עמם פיסיקאים לנושאים כאלו בא משני כיוונים: האחד הוא הניתוח של מערכות לא לינאריות שיש בהן מידה רבה של אקראיות, ניתוח שבו התמחו פיסיקאים הנמצאים ב"צומת" שבין המכניקה הסטטיסטית לדינמיקה לא לינארית. הערך השני, אולי היותר עמוק, הוא הנסיון לבצע כימות של המערכת על בסיס מספר מצמצם של הנחות יסוד פשוטות.

לפני יותר מחמשים שנה היו מיטב פיסיקאי העולם עסוקים בניתוח חידה קשה: כיצד ניתן להסביר את ספקטרום הקרינה האלקטרומגנטית שפולטים גרעיני האטומים. גרעינו של אטום הוא איזור קטן מאד בו קיימות אינטרקציות חזקות בין הנוקליאונים (הפרוטונים והנייטרונים) שהם מרכיביו הבסיסיים (כך לפחות חשבו אז). האם ניתן להבין את הכחות הללו ברמה מספיק טובה שתאפשר לנו לנבא מה יהיו תדרי האור שהוא פולט? זוהי משימה קשה מאד שלא הושלמה עד היום בגלל סיבה זו ממש: האינטרקציות הן גם חזקות מאד וגם סבוכות, כלומר החוק הכללי של משיכה/דחיה בין שני נוקליאונים, אינו ניתן לביטוי מתמטי פשוט. כאשר פיסיקאי הגרעין התיאשו מן הנסיון לפתור את המשוואות הנחוצות, הגה יוג'ין ויגנר רעיון מבריק: להפוך את הקערה על פיה ולקבל פשוטות מקסימלית דווקא במצב של סיבוך מקסימלי.

טענתו של ויגנר הלכה בערך כך: מכיוון שבין הנוקליאונים שוררים כחות חזקים ומסובכים, אולי ניתן לתאר את התוצאה הסופית כמערכת בה פועלים כחות אקראיים לגמרי. חשבו על פיסת הניר שהצגנו קודם, זו הנזרקת מגג ביום סוער. בכל חלקיק שניה משבי האויר מפעילים עליה כחות חזקים יחסית, אך מכיוון שכיוונם של משבי האויר משתנה כה מהר בזמן ובמרחב, התוצאה הסופית היא תנועה אקראית כמעט לחלוטין. לצורך ניתוח בסיסי של תנועת הנייר עדיף לשכוח ממהירות הרוח בנקודה X ובזמן t, ולחשוב במקום זה על חלקיק שבכל צעד זמן קופץ באופן אקראי ימינה או שמאלה, למעלה או למטה. על בסיס שיקול זה פיתח ויגנר את **תורת המטריצות האקראיות**, והצליח להראות כי הספקטרום של אטומים נותן תוצאות השקולות, ברמה לא רעה, לאלו שנצפה לראות במערכת חלקיקים אשר ביניהם פועלים כחות אקראיים לחלוטין.

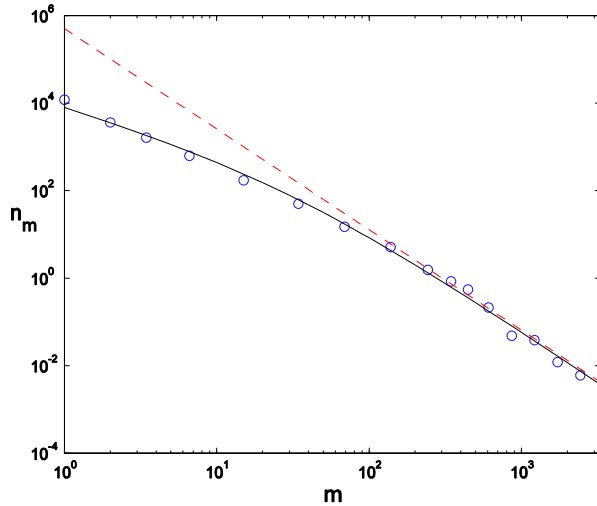
פיסיקאים של מערכות מורכבות מיישמים את הלך החשיבה הזה בתחומים שונים ומשונים. אם ניקח מערכות אקולוגיות, לדוגמה, איש אינו חושב שיש בהן אינטרקציות חלשות. לכל ברור כי מערכת אקולוגית מאופיינת על ידי מלחמת הכל בכל ותחרות בין כל שני פרטים על משאבים ואפשרות להתרבות. האם ניתן בכל זאת לאפיין את המערכת על ידי מספר קטן של פרמטרים ודינמיקה פשוטה? אם הלך החשיבה של ויגנר נכון גם כאן, התשובה יכולה להיות כן, והדוגמה הפשוטה ביותר היא אותה דינמיקה אקראית-ניטרלית שתיארנו לעיל.

אחד מאותם "משקפי פלא" שמרכיבים פיסיקאים כדי להפוך את המורכב לפשוט הוא חוקי החזקה עליהם דיברנו קודם. הסברנו כי תהליך אקראי כפלי נותן חוק חזקה, וכי מערכות טבע רבות מאופיינות בהופעת התפלגות סטטיסטית המתוארת על ידי חוק חזקה. אבל ישנן בעיות טכניות ביישום החוק הזה. בפרט, ברוב המערכות שנבדקו חוק החזקה תקף רק ל"זנב" ההתפלגות, כלומר לאנשים העשירים ביותר או למינים הביולוגיים הנפוצים ביותר. מכיוון שהנתונים על הזנב הזה באים ממעט פרטים (יש מעט מיליארדרים ומעט שמות עם תפוצה כזו של סמית, ג'והנסון או צ'אנג) קשה לקבל סטטיסטיקה אמינה שלהם.

יוסי מרובקה, דיויד קסלר ואנוכי פיתחנו לאחרונה מכשיר מתמטי חדש הפותר את הבעיה, תוך שאנו מרחיבים עבודה קודמת של סוזנה מנרוביה ודמיאן זנאט. אם נדבר בשפת שמות המשפחה, אנו

מרחיבים את המודל המקורי של גלטון ווטסון: כל אדם מוריש את שם משפחתו למספר אקראי של צאצאים, אך כל אחד מאותם צאצאים יכול למאוס בשם המשפחה ולשנות אותו לשם חדש. בנוסף לכך גודל האוכלוסיה אינו קבוע: מספר הצאצאים הממוצע של אדם גדול (או קטן) מאחד, כך שהאוכלוסיה הולכת וגדלה או קטנה (כמובן המקרה של אוכלוסיה קבועה הוא מקרה פרטי של התיאוריה שלנו).

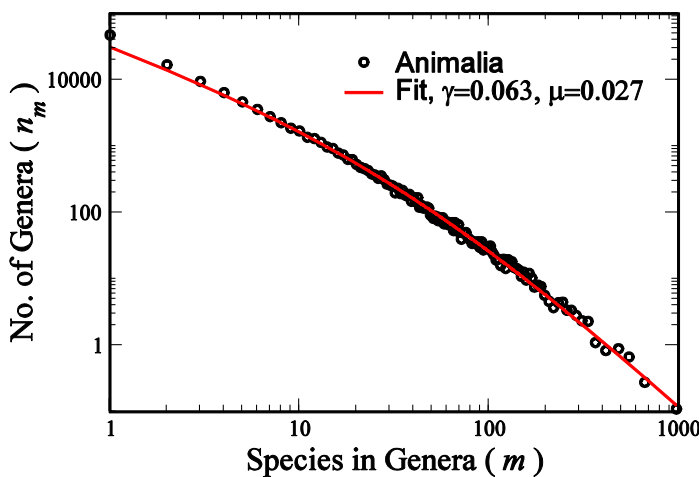
מתברר שיש לנו בסופו של דבר שני פרמטרים: קצב הגידול של האוכלוסיה והסיכוי שפרט ישנה את שם משפחתו. בעזרת שני פרמטרים אלו ניתן לקבל ביטוי מתמטי עבור מספר המשפחות n שגודלן m (אם יש 1000 אנשים בעלי שם משפחה ייחודי אזי $n(1) = 1000$. אם יש 20 שמות משפחה שכל אחד מהם משותף ל 50 משפחות אז $n(50) = 20$ וכן הלאה).



כמה זה עובד? זאת ניתן לראות בציור משמאל, המתאר את התפלגות שמות המשפחה כפי שתועדה במפקד האוכלוסין של שנת 1790 בארצות

הברית. לקחנו תוצאות של מפקד כה ישן משתי סיבות: ראשית, באותו זמן היתה האוכלוסיה בארה"ב ממקור אנגלי בעיקרו וגלי ההגירה הגדולים עוד לא הכניסו שמות משפחה זרים בכמות גדולה. שנית: קצב גידול האוכלוסיה גדל באופן חד (כמעט פי 7!) סביב שנת 1800. נתוני 1790 הם כאלו המיציגים אוכלוסיה הומוגנית יחסית עם קצב גידול קבוע. ניתן לראות את ההתאמה היפה של המודל (קו שחור רציף) לתוצאות האמפיריות (עיגולים כחולים). התאמה זו טובה הרבה יותר מחוק חזקה פשוט (קו אדום מקוקו) שמצליח לתאר רק את הזנב הימני. לא זו בלבד: מתוך ההתאמה אנו יכולים להסיק את קצב גידול האוכלוסיה, ומכיון שמדובר באוכלוסיה שהיגרה מאנגליה, שבה היו מפקדי אוכלוסין מאז ימי ויליאם הכובש בסוף המאה ה-11, ניתן להשוות ולראות שאכן השיטה מזהה את קצב הגידול הנכון.

טוב ויפה, אבל עם כל הכבוד למי, לעזאזל, אכפת מהסטטיסטיקה של שמות משפחה? אהה. כאן אנו חוזרים לנקודה שהדגשנו קודם. לשמות המשפחה יש דינמיקה ניטרלית: הסיכוי להעמיד כך וכך צאצאים, כמו הסיכוי שצאצא ישנה את שמו, כמעט שאינם תלויים בשם המשפחה. האם אפשר להחיל את ההנחות המפשטות הללו גם במקרים אחרים?



נביא דוגמה לכך. כידוע גם לכל מין ביולוגי יש "שם פרטי" ו"שם משפחה", הנובעים משיטת המיון הסיסטמטית של לינאוס. האדם המודרני, לפי מיון זה, הוא Homo Sapiens: Sapiens הוא שם המין ("ייחודי לאדם המודרני) ואילו Homo הוא שם הסוג (genus) שאליו משתיכים גם מינים אחרים בסוג Homo כמו Homo Habilis. ובכן, ישנם סוגים (genera) בהם מינים רבים (אלו הם הסמית'ים והג'ונסונים של עולם החי) וסוגים רבים הרבה יותר שבהם יש מעט מינים, אולי אפילו רק מין אחד. איך נראה

הגרף המתאר את מספר הסוגים n שבהם m מינים?

שימו לב לציור משמאל. כאן הנקודות הן שוב הנתונים האמפיריים עבור כל ממלכת החי, והקו האדום הוא תיאורית שמות המשפחה שלנו (הפרמטר γ הוא קצב גידול האוכלוסיה, כלומר הקצב בו נוצרים מינים חדשים פחות קצב ההיכחדות של מינים ישנים, ואילו μ הוא הסיכוי לשינוי שם המשפחה, כלומר הסיכוי שמין חדש יהיה כה שונה מהמין שממנו נוצר עד שישווגו אותו כסוג לעצמו).

מתברר כי אותה תיאוריה שפותחה עבור שמות משפחה מתארת בצורה מצוינת גם את התפלגות המינים בתוך סוגים. לא זו בלבד, אלא שהיא מאפשרת לנו לאחזר את הפרמטרים הבסיסיים של המאקרואבולוציה: קצב יצירת והכחדות המינים וקצב יצירת הסוגים. במאמר חדש אנו מראים התאמה מצוינת של אותה תיאוריה פשטנית גם לסטטיסטיקה של קבוצות גנטיות, קישוריות באינטרנט, משפחות של חלבוניים, שכיחות הופעה של מלים בטקסט, מספרי מועסקים בחברות ועוד ועוד.

הכל הבל?

לתוצאות המוצגות כאן יכולה להיות השפעה מייאשת קצת. הכל ניטרלי, הכל תלוי במזל, אין יתרון לחכם או למוכשר ביחס לכסיל או לחדל האישים, הכל הבל. האמנם?

כיוון המחקר שאנו מנסים לפתח כיום מוביל, אולי, לתשובה קצת יותר מורכבת על השאלה הזו. נחזור רגע בדמיוננו, שוב, לאותה פיסת נייר המושלכת מגג ביום סוער. על אף שתנועתה נראית אקראית לגמרי על סקלות זמן קצרות, ניתן לומר די בוודאות כי לאחר זמן ארוך מספיק יתברר לנו שהיא הגיעה לרצפה. אולי זה ייקח שעות, אולי ימים או שבועות, אך בסופו של דבר השפעת כח הגרביטציה נותנת את אותותיה במערכת. מושג דומה הופיע בגנטיקה לפני שנים ומכונה סלקציה חלשה: יש, אם כך, הבדלי איכות בין מינים ביולוגיים, שיטות חברתיות או מנהיגים פוליטיים, אבל לא מדובר כאן בנצחון בנוק-אאוט של החזק על החלש אלא בסחף איטי מאד בכיוון מסוים, עם הרבה שינויי כיוון ומערבולות לאורך הדרך. את הסחף האיטי הזה קשה מאד לזהות על בסיס נתונים סטטיסטיים, מכיון שהוא "טובע" ברעש הנוצר מהמאורעות האקראיים. פיתוח שיטות המאפשרות למצוא את המחט הדטרמיניסטית בערימת השחת הסטוכסטית – זוהי אחת המשימות שאנו מנסים למלא, וכמה תוצאות ראשוניות מרמזות כי יש סיכוי להצליח בדרך זו.