



# המושכים בחלטים

מגפות קטלניות, מתקפות סייבר, קריסת תשתיות שמשתקת מדינות שלמות - אנשי המרכז לחקר רשתות משוכנעים שאת כל הקטסטרופות האלה אפשר למנוע בעזרת כמה כלים מתמטיים. במעבדה באוניברסיטת בראילן הם מפצחים את הכללים שאליהם מצייתת כל רשת בעולמנו, מצמחייה בג'ונגל ועד טוויטר ופייסבוק, ומגלים כיצד אפשר להציל או למוטט אותה. בימים אלה משלימים החוקרים פרויקט למניעת כשלים במערכות החשמל - שמתברר, דומות להפליא למערכות הקשרים בין שחקנים בהוליווד

יעל (פרוינד) אברהם  
צילום: אריק סולטן

קווין בייקון



להתעלות מעל הפרטים הקטנים ולהסתכל איך המערכת מתנהגת. רשת כבישים

”שש דרגות של הפרדה (קיימות) בינינו ובין כל אדם אחר על פני הכדור – נשיא ארה"ב, ג'ורג'לווייד בוזניצה, יליד ביערות הגשם, תושב טיידה דלי פואגו, אסקימואי. אני קשורה אל כל אחר על פני כדור הארץ באמצעות שרשרת של שישה אנשים בלבד. זו מחשבה מעמיקה מאוד, איך כל אדם הוא דלת חרשה שנפתחת אל עולמות אחרים” (מתוך *המזהה "שש דרגות הפרדה", ג'ון גווייר*)

טנלי מילגרם, פרופסור יהודי מאוניברסיטת הרווארד, רצה לדעת איך אפשר לקשר בין כל שני אנשים ודים. היו אלה שלחי שנות השישים, ממצאי סדרת הניסויים המפורסמת שלו שבתנה ציית לסמכות טרם פורסמו, אבל מילגרם, אחד מאבות הפסיכולוגיה החברתית, כבר חשב על הירכ הבא. כמי שחשעניין בחיבורים המתקיימים בתוך החברה האנושית המורכבת, הוא הגה ניסוי שמטרתו לבדוק כמה קשרי חיבורת רדושים כדי להגיע מאמריקני אקראי אחד לאמריקני אקראי אחר. מילגרם פנה בכתב לתושבים המתגוררים במקומות שונים בנברסקה, הסביר להם שנבחרו להשתתף במחקר תברתי, וביקש מהם לשלוח את החומרי המרודד לאישה מסוימת בעיר שרון שבמדינת מסצ'וסטס או לחילופין לגבר מטוים בבוסטון. הימים היו כמובן ימי טרום האינטרנט, המייל והפייסבוק, שאפשרים בלחיצת מקש להגיע כמעט לכל מי שרק נרצה. למשתתפים נאמר שאם הם לא מכירים את הנמען באופן אישי, הם מתבקשים להעביר את המכתב למכר שלהם שיש סיכוי גדול יותר שיכיר אותו.

הניסוי יצא לדרך, והפתעה נעימה ביותר חיכתה למילגרם אחרי ימים ספורים, כשמכתב אחד הגיע ליעדו בעזרת שני "מתווכים" בלבד. מצידה השני של הסקאלה היו מכתבים שנדרשו לתוריי בולים כדי להגיע ליעדם. כנספו של דבר התברר כי החציון עמד על 5.5 העברות בדורא. ובמילים אחרות: נדרשו פחות מעושה אנשים כדי לקשר בין אדם במערב התיכון של ארה"ב ליעד אנושי אקראי במזרח. תוצאות הניסוי של מילגרם הפתיעו מאוד את החוקרים. היתכן כי שש "לחיצות ידיים" מספיקות כדי לחבר בין כל שני אנשים באוכלוסייה המונה 200 מיליון נפשות? בפסיכולוגיה כמו בפסיכולוגיה,

## ב־1994 הגו שלושה סטודנטים מפנסילבניה משחק שמטרתו לחבר בין השחקן קווין בייקון לכל שחקן מתוכניות הטלוויזיה הפופולריות דאז. שני סטודנטים אחרים שצפו בתוכנית פצחו בפרויקט ממוחשב שמוצא את החיבור בין כל שני שחקנים בתעשייה. אגב, אתר הפרויקט שלהם עדיין פעיל, כך שאם תהיתם – המרחק בין גל גדות לקווין בייקון הוא שני צעדים

צילום: אי.איי.פי



נאה דרש ונאה קיים. פרופ' אלברט לטלו ברבאשי

יוכל לחבר שוב את כל החלקים? אספר לכם טורד שלא הגיע לכותרות: אנחנו פירקנו את היקום, ואין לנו מושג כיצד לחזור ולהרכיב אותו", כתב אלברט לטלו ברבאשי, פרופסור לפיזיקה, בהקדמה לספרו "קישורים – המדע החדש של הרשתות". "עכשיו אנחנו יודעים כמעט כל מה שאפשר לדעת על החלקים, אבל אנחנו רחוקים יותר מאי פעם מהבנת הטבע בשלמותו. מתברר שההרכבה מחדש סבוכה הרבה יותר משיערו...") מרבית האירועים והתופעות קשורים, נגרמים על ידי ופועלים הידית עם מספר ענק של חלקים אחרים בתצוף אונִיברסי

מורכב. התחלנו להבין שאנחנו חיים בעולם קטן שבו כל הדברים קשורים אלה באלה. אנו עדים להתהוותה של מהפכה כשמדענים מכל הדיסציפלינות מגלים שלמורכבות יש מנחה ברור. התחלנו לקלות את חשיבותן הרבה של רשתות". נאה דרש ברבאשי בספרו ונאה קיים כשייסד באוניברסיטאות נוטרדאם ונורת'איסטרן מרכזים לחקר רשתות. כמה שנים אחר כך נחת במערכתו ד"ר ברוך ברזל, פיזיקאי מהאוניברסיטה העברית שהגיע אליו במסגרת פוסט־דוקטורט. היום הוא מקבל את פניי כחבר הפקולטה למתמטיקה באוניברסיטת בראילן, שאליה הצטרף לפני חמש פחות מחמישה "צעדים". אבל לזה עוד נגיע. פועלם של מילגרם ויתר המתמטיקאים, הפיזיקאים, הביולוגים ושאר חוקרים שעסקו בסוגיה, היה הקרימין למדע חדש כשנחמ במאה ה־21 והביא למהפכה גדולה: מדע הרשתות. אם מה שחניע את המחקר המדעי במאה הקודמת היה הרצון לפענח את רכיבי העולם – אטומים, מולקולות, גנים בודדים – היום מבינים המדענים כי השלם גדול מסך חלקיו. "ראיתם פעם ילד מפרק צעצוע אובי? ראיתם איך הרכיב בוכה אחרי שהבין שלא

המרכז תחום התמחות משלו: ד"ר עמיעל אילני, חוקר רשתות חברתיות של בעלי חיים וביניהן של שפני סלע; ד"ר אמיר בשן מתמחה ברשת החיידקים בתוך הגוף שלנו; ד"ר אמיר לישם עוסק בהתפשטות רעיונות ברשת החברתית; וד"ר ברזל אמןן על התנהגות של רשתות. וכדי להבין איך כל זה קשור למתמטיקה צריך לחזור להתחלה, אל רכיבי הצעצוע המפורק.

"אני בהשכלתי פיזיקאי, היום מתמטיקאי שימושי", מסביר לי ברזל. "אני לעולם לא אתמורד מול בילוג על הבנה של גנים, לא אתמורד מול מהנרס על הבנה של מערכות חשמל, ולא אתמורד מול סוציולוג על הבנת בני אדם. המומחיות שלנו במרכז לחקר רשתות היא להגיד – בואו נתעלה מעל הפרטים הקטנים, ונסתכל איך המערכת מתנהגת. אפשר להיות מומחה גדול לגנים, אבל הדרך שבה האדם פועל היא לא רק רשימת הגנים שיש לו; היא נובעת מרופסי ההיקשרות ביניהם, איהו גן שמפיע על איהו גן ומה הדינמיקה. גם כדי להבין את המוח חשוב לדעת איך ניוונים פועלים, אבל לא פחות חשוב לפענח את מפת הקשרים ביניהם, איהו ניוון מחובר לאחר. וכדי להבין את האינטרנט, לא מספיק להכיר את המחשבים, צריך לדעת איך הרשת בנויה".



למענו את מפת הקשרים. רשת ניוונים במוח

המרכז תחום התמחות משלו: ד"ר עמיעל אילני, חוקר רשתות חברתיות של בעלי חיים וביניהן של שפני סלע; ד"ר אמיר בשן מתמחה ברשת החיידקים בתוך הגוף שלנו; ד"ר אמיר לישם עוסק בהתפשטות רעיונות ברשת החברתית; וד"ר ברזל אמןן על התנהגות של רשתות. וכדי להבין איך כל זה קשור למתמטיקה צריך לחזור להתחלה, אל רכיבי הצעצוע המפורק. "אני בהשכלתי פיזיקאי, היום מתמטיקאי שימושי", מסביר לי ברזל. "אני לעולם לא אתמורד מול בילוג על הבנה של גנים, לא אתמורד מול מהנרס על הבנה של מערכות חשמל, ולא אתמורד מול סוציולוג על הבנת בני אדם. המומחיות שלנו במרכז לחקר רשתות היא להגיד – בואו נתעלה מעל הפרטים הקטנים, ונסתכל איך המערכת מתנהגת. אפשר להיות מומחה גדול לגנים, אבל הדרך שבה האדם פועל היא לא רק רשימת הגנים שיש לו; היא נובעת מרופסי ההיקשרות ביניהם, איהו גן שמפיע על איהו גן ומה הדינמיקה. גם כדי להבין את המוח חשוב לדעת איך ניוונים פועלים, אבל לא פחות חשוב לפענח את מפת הקשרים ביניהם, איהו ניוון מחובר לאחר. וכדי להבין את האינטרנט, לא מספיק להכיר את המחשבים, צריך לדעת איך הרשת בנויה".



המשתנים שמשפיעה על כוס מים היא עצומה, יש מיליארדים על גבי מיליארדים של פרמטרים שונים: בכוס יש 10 בחוקת 23 מולקולות מים, וכל מולקולה נעה ומתנהגת איך שבה לה. אין סיכוי שבכל היקום יהיו שתי כוסות מים זהות. ועדיין, כוסות מים לא מפתיעות אותנו. באפס מעלות המים יהפכו לקרח, במאה הם יהפכו לגז. עוד לא קרה שמים קפצו לי מהכוס בלי שצפיתי את זה. כלומר, אני לא יודע לנבא התנהגות של מולקולה אחת בודדת, אבל התנהגות של מיליארדי מולקולות אני יודע לנבא היטב. הפיזיקה יודעת להגיד איך מולקולות מתנהגות, ואילו קשרים יש ביניהן.

"עכשיו בואי נסתכל על מערכות אנושיות: אם אני חושב על בני אדם כחלקיקים, או כמולקולות שיוצרות אינטראקציות – א' פוגש את ב' ומדביק אותו במחלה, ב' פוגש את ג' ואת ד' ומעביר את הנגיף וכן הלאה – אני יכול למפות את זה מתמטית. אני לא יכול לנבא מה תעשי מחר בבוקר או אם תהיה לך שפעת בינואר הקרוב, אבל אני כן יכול, בעזרת כלים מתמטיים ומפות קישורים שיצרתי, לנבא מה יהיה שיעור האנשים שיחלו בשפעת באוכלוסייה מסוימת".

כדי להבין את הדרך שבה נולדו מפות כאלה ואת הדמיון בין הרשתות, צריך להיכנס קצת למתמטיקה ולחזור קצת להיסטוריה. בשנת 1999 החליט אותו ברבאשי, הכותן הגדול של התחום, יחד עם שותפו הוונג ג'אונג, לבדוק איך נראית רשת מבחינה מתמטית. כათות עשור באה לעולם הרשת ששינתה את העולם לבלי שוב – רשת האינטרנט, שהייתה אז קטנה מספיק כדי שיוכלו למרוד אותה, וגדולה מספיק כדי שאפשר יהיה לשאוב ממנה תובנות. שיטת העבודה הייתה פשוטה וסיויפית: לבדוק כמה קישורים מובילים לכל אתר, לסמן על גרף את הנתונים, ולראות את התפלגות הקישורים בין האתרים השונים. כאן המקום להזכיר שרוב הנתונים שנקראת לפיכך בעצה המקצועית "תפלגות נורמלית": קחו למשל קבוצה גדולה של אנשים בגריים שאינם כרוסלניגם, ומרדו את הגובה שלהם. אם תמצאו למשל שהגובה הממוצע הוא 1.70, תגלו גם שחלק נכבד של האנשים שמדרתם נמצאים בטווח צר משני צדדיו של הנתון הזה – נניח בין 1.60 ל־1.80. ככל שמתרחקים מהממוצע, כך הגובה הופך ל"נדיד יותר". שיטטנו גרף שמראה כמה אנשים יש לנו בכל גובה, ותקבלו צורה של פעמון, שה"שפיץ" שלו נמצא בנתון הממוצע. הנמוכים ביותר והגבוהים ביותר ישבו למרגלות ההר.

גם במקרה של האינטרנט ציפו שני החוקרים שהרשת תיענה לגרף הפעמון, אלא שהתמונה שגילו הייתה שונה לגמרי. למרבית האתרים היו מעט מאוד קישורים, ולאחרים לעומת זאת היו פי עשרה, מאה, פי אלף ופי עשרות אלפים קישורים נכנסים רק לסכר את האוּן; לו התפלגות הגובה באוכלוסייה הייתה בנויה בצורה כזו, היו מתהלכים בינינו אנשים שגובהם שני קילומטרים. לא הגרף לא נראתה הגבעה הפעמונית המוכרת, אלא עוקמה שונה לחלוטין, שאינה מצביעה על ממוצע כלשהו. בעקבות התגלית בחנו החוקרים כל רשת שנקרתה בדרכס – הרשת המטבולית, רשת החלבונים, רשת הפייסבוק ואחרות – וכל אחת מהן נראתה על הגרף בדיוק כמו מפת רשת האינטרנט, שיפוע מתעצל מטה. רשתות אלה, שזכו בשם נטול החן "דשתות חסרות סקאלה", חולקות בדיוק אותן תכונות – התפלגות רחבה ומרחקים קצרים מאוד בין הרכיבים. מכאן ועד היווצרותו של תחום מדעי חדש, הדרך הייתה קצרה.

אגב, אחת הרשתות שהרגימה גרף כזה קשורה באתר שהיה פופולרי מאוד בשלהי שנות התשעים – "האורקל של בייקון". בשנת 1994 הגו שלושה סטודנטים משועממים מקולג' בפנסילבניה מחחק שמטרתו למצוא בתוך שניים או שלושה צעדים את החיבור בין קווין בייקון – אחד משחקני הקולנוע העטוקים באותן שנים – לבין כל שחקן אחר. הם שלחו מכתב לאחת מתוכניות הטלוויזיה הפופולריות דאז, ונקיאו להופיע בה יחד עם הכוכב בכבודו ובעצמו. כל שם של שחקן שבתורו צוינים – הצליחו השלושה לחבר לבייקון. שני סטודנטים אחרים למתמטיקה צפו בתוכנית ופצחו בפרויקט

**כלומר – ניוונים, וירוסים ועוקבים בטוויטר, מבחינתכם חד הם.**

"הם שונים מאוד בפרטים כמובן, אבל כשמסתכלים מלמעלה, על מבנה הרשת, מגלים שהמערכות האלו הרבה יותר דומות זו לזו ממה שהיינו מנחשים. מהרבה בחינות, המפות שלהן שייכות למשפחה מתמטית אחת. התוכנה שאנחנו לוקחים מזה היא שאם רשתות כל כך שונות בנויות באופן כל כך דומה, זה אומר שהרשת היא המהות".

### אדם בגובה שני קילומטרים

לפני כארבעה חודשים קיבל ברזל (43) את פרס קריל היורתי, המוענק על הצטיינות במחקר מדעי. בנימוקים נכתב כי הוא "שואף להבין את המבנה של הרשתות, לנבא את התנהגותן ולנווט אותן לקראת תפקוד אופטימלי; לנצל את רשת התעופה כדי לחזות התפשטות של מגפה עולמית, לעצב את רשתות התשתית כך שתהיינה עמידות לתקלות וכשלים, ולמפות קשרים גנטיים כדי לחשוף את מנגנוני התא".

"המערכות שעליהן דיברנו הן מה שאנחנו קוראים 'מערכות מורכבות', יש להן התנהגות שגדולה מהרכיבים שלהן", הוא מסביר. "למה הנוונה? אם תיקחי 100 מיליארד ניוונים, כמספר הניוונים שנמצאים במוח האנושי, ותחברי אותם בחדר – לא תקבלי ניורון ענק. קחי 20 אלף גנים – לא תקבלי גן גדול. הרשת המטבולית, רשת האלה את מקבלת מערכת הרשה לגמרי. יש איזושהו נס שמתרחש בדרך. אף ניורון לא יודע להפעיל את המוטריקה של הרגל, אבל המוח יודע לעשות את זה. יש כאן שפה חדשה ומאוד רחבה שיכולה לתאר מערכות שונות".

**אני יכולה להבין את ההסתכלות ממערף הציפור על מערבה, ועדיין**

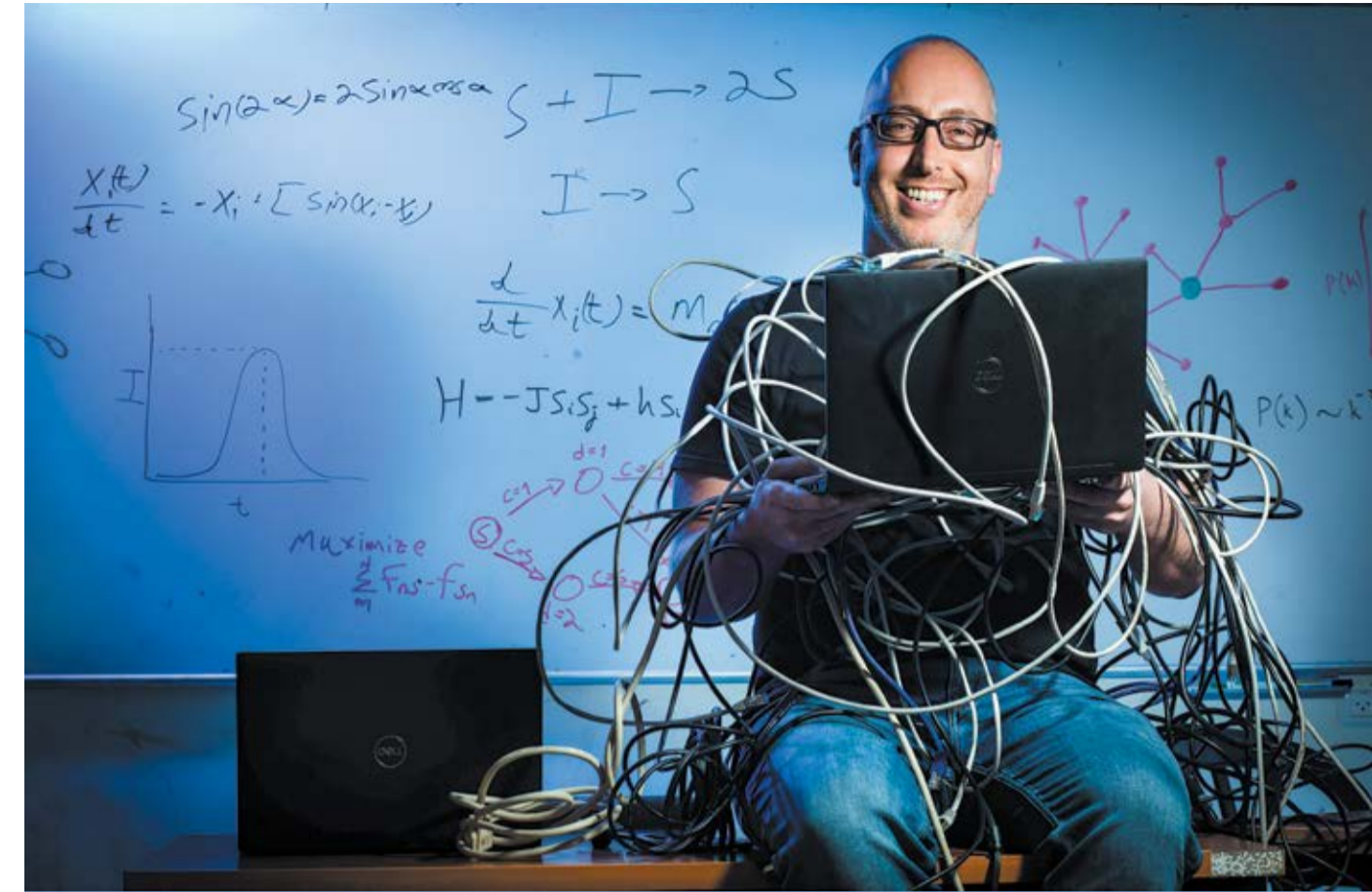
**– לנמלים יש אינטפוינקט שמכוון אותן לצמח מסוים, וירוס במחשב מתוכנת לפעול בדרך מסוימת, התרחישים הם צפויים. לעומת זאת גולשים ברשתות החברתיות, או אנשים שמעבירים מכתבים בחלק ממחקר – אתה לא יכול לצפות את הבחירות שלהם.**

ולניוונים או למולקולות יש אלגוריתם קבוע שלפיו הם פועלים, אבל אם אני אבקש ממך עכשיו להביא לי שתי כוסות מים זהות, לא תצליחי. כמות

< ממוחשב מעניין שמוצא את החיבור בין כל שני שחקנים בתעשייה. בייקון, התברר, לא היה שיאן הקישורים הקצרים. אגב, האתר עדיין פעיל, כך שאם תהיתם מה המרחק בין גל גדות לקווין בייקון, התשובה היא – שני צעדים. ברבאשי וג'אונג הכניסו גם את נתוני הרשת הוו לגרף, וקיבלו רשת חסרת סקאלה כיתר אחיזתיה.

### הג'י'פ'י'אס של הכשלים

או מה עושים עם המפות האלה? אילו יישומים חיוניים צמחו במהלך עשרים שנות מרע הרשתות? מכיוון שסיסמת המעבדה של ברזל היא Understand. Predict. Influence (להבין, לחזות, להשפיע), אני שואלת אותו על השפעת המחקר מחוץ לכותלי המעבדה. "אנחנו כאמור פיתחנו אוסף של כלים מתמטיים שבעזרתם אפשר לנבא התפשטות של מחלות או של כשלים במערכות חשמל ורובגמות, גם אם הם לא מתפשטים בצורה דומה", הוא מסביר. "בנינו תוכנת ניווט, מעין ג'י'פ'י'אס שיאפשר לנו לחזות איך הכשל או המחלה יתקדמו לאורך הרשת, כמו שהווייז יודע לנבא כמה זמן ייקח לך לנוע ברשת הכבישים עד ליעד. "אתן לך דוגמה לפרויקט שאנחנו עובדים עליו: בי2003 התרחשה בארה"ב הפסקת חשמל ענקית, שהשביתה למשך שבועיים את כל החוף המזרחי, היו הרוגים, דלקות, תקלות, מיליוני בני אדם היו ללא חשמל. אחר כך כמובן הוגדרו יעדים של חיזוק התשתית, שזה לא פשוט כשמדובר במערכות שבנו במהלך 150 שנה טלאי על טלאי. זאת בעצם הדרך שאומרת 'בראו נטפל ברכיבים'. הגישה השנייה והחרישה היא להסתכל על הרשת ולראות איפה נמצא עקב האכילס שלה, איפה צוואר הבקבוק, מהם הצמתים המרכזיים. בשביל זה קיימות המפות שלנו. יום חמישה אחוים מהמערכת, וכך להציל את 95 האחוזים האחרים. אני לא אומר את זה כי אני מומחה גדול להשמל, אלא כי אני מומחה לשאלה איך דברים מתפשטים ברשת. "בעזרת הג'י'פ'י'אס שלנו אנחנו יכולים לדעת כמה זמן ייקח להפסקת



רשת חברתית ענפה. שפן סלע



המתמטיקה תאפשר לכבות חלקית את התנועה. תרגיל כוונות בנת"ג לוחריש של התפרצות אבולה

חשמל להגיע לכל ניריורק, אם היא מתחילה מעץ שנפל על עמוד חשמל ברחוב קטן ברובע קווינס. אפשר להציל חלק גדול מהמערכת על ידי התערבות כמה ומינימלית, בצמתים מרכזיים בלבד. אלה פעולות מנע שמתבססות על הכרת מבנה הרשת. ואם כבר אירע כשל, כיוון שאנחנו מבינים את רפוטי ההתפשטות אנחנו נדע גם מתי ואיך להתערב".

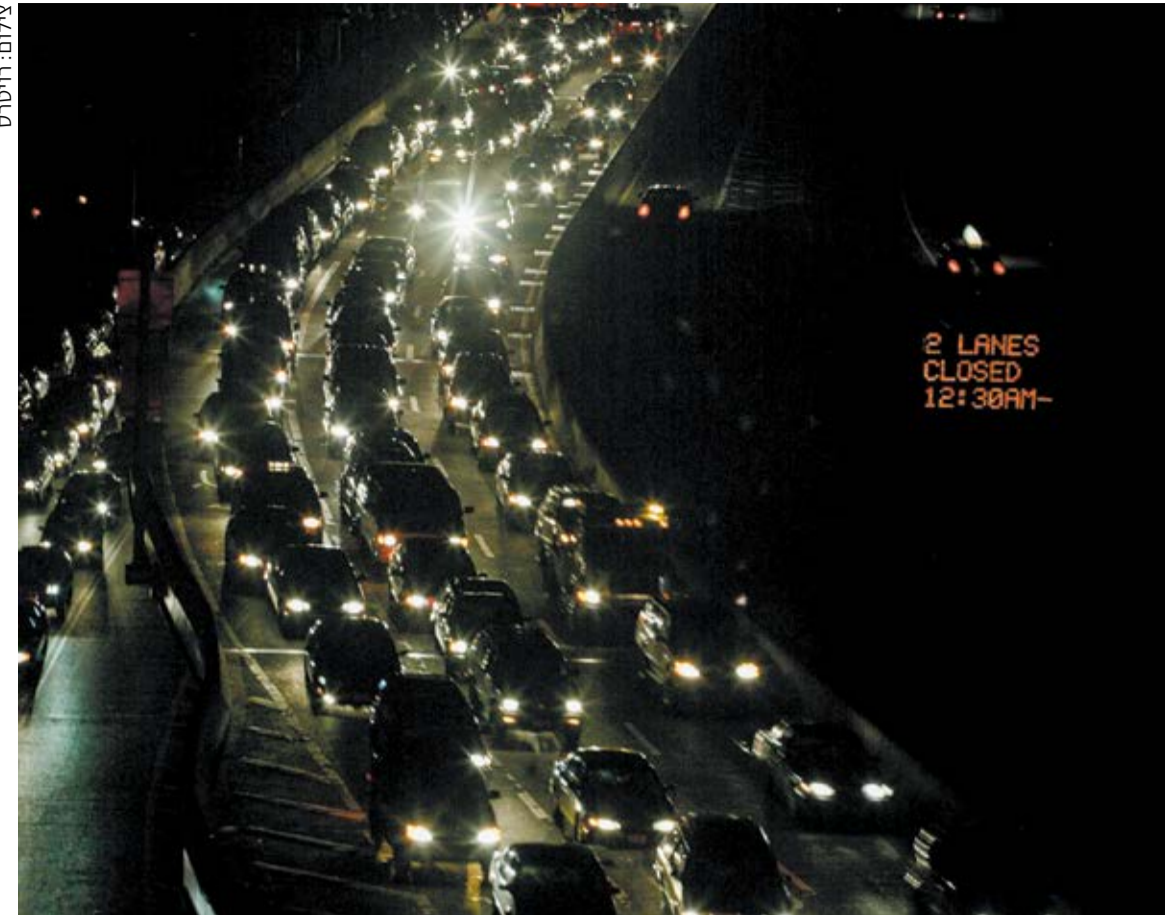
כאן מגלה לי ברזל שבמסגרת פרויקט שטרם נשלם, הוא ועמיתיו כבר יומיים "הפסקות חשמל אסטרטגיות" וירטואליות, כלומר מריצים סימולציות כאלה על רשתות חשמל בארה"ב ובאירופה, כדי למצוא איך עוצרים את הנפילה במקרה של כשל אמיתי. "כרגע ראינו שאפשר להציל 70 אחוזים מהכשלים על ידי תקלות יזומות שיפחיתו עשרים אחוז מהפעילות. אני מאמין שעוד נגיע לתוצאות טובות מזה".

בריוק כשאנחנו עוברים לדרך בהתפשטות מגפת בקנה מידה עולמי, נכנסת לחדר בתזמון מושלם הרוקטורגנית אדר הכהן מפרויקט המחלות, הכהן, ששותפה במאמר חדש שעומד להיחשף ממש בקרוב, מסבירה כי בכפר הגלובאלי מחלות מתפשטות באמצעות רשת התעופה. במעבדה קיים מאגר גדול של נתונים שמראה כמה אנשים טסים מכל נקודת מוצא לכל יעד במהלך שנה שלמה. לכאורה, כדי למנוע מגפה בינלאומית אפשר פשוט לעצור את כל התנועה האווירית, אלא שצער דרמטי כזה יהיה הרה אסון, כיוון שאוכלוסיית העולם זקוקה למוצרים רבים שמשוועים במטוסים. הפררון הוא להשתמש בכלי החיוני המתמטיים כדי "לכבות" חלקית את התנועה. הם גם אלה שיעורו לנו, אם המגפה כבר פרצה, להחליט באיזה אופן לחלק את התרופות.

"מגפה שמתפשטת ממדינה למדינה היא לא תרויש דימוני, כבר ראינו את זה קורה", אומרת הכהן. "יררוסים וחיידקים נעים ברשת התעופה האנושית מכל מקום לכל מקום. עכשיו, נניח שאת צריכה למצוא איך משתלטים על האיום, ויש לך ביד מלאי תרופות הנה. "בזמן חופשת הקיץ אתן קורה? אינטואיטיבית היינו



צילום: שאטרסטוק



כשל במערכות שבנו במהלך 150 שנה. הפסקת חשמל בארה"ב, 2003

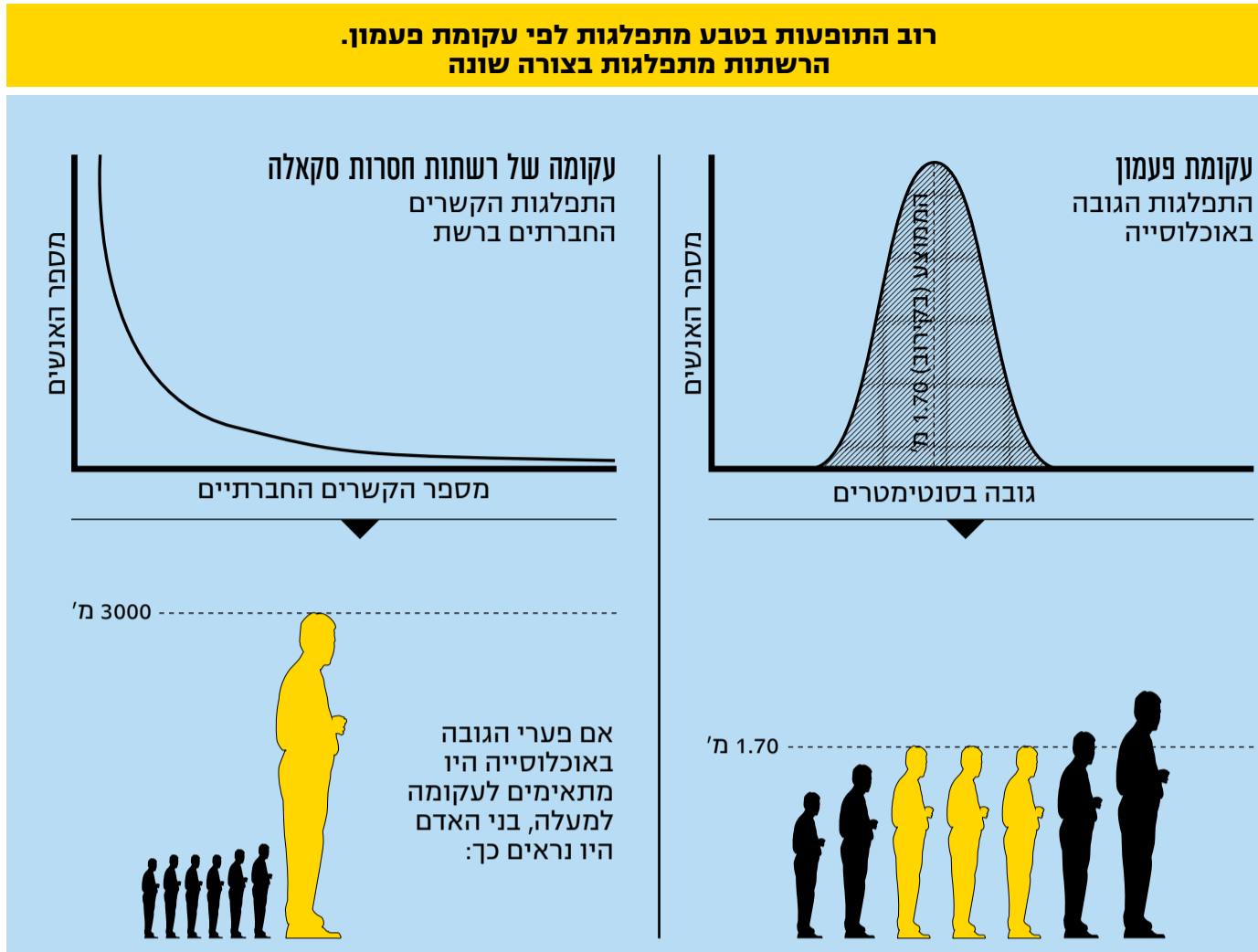
שולחים אותן למוקד שבו פרצה המחלה, או במקום שבו יש הכי הרבה אנשים חולים, נכון? אנחנו גילינו דבר מעניין: דווקא חלוקה שוויונית של תרופות תהיה היעילה ביותר. לא בקטע חברתי-סוציאליסטי, אלא מבחינת בלימה אופטימלית של התפשטות המחלה".

זה נשמע לא הגיוני. "הרציונל הוא שכאשר מדובר במחלה גלובלית, בסוף שיעורי המגפה יגיע לאותה רמה בכל מקום. אם בצרפת ימותו חלילה חמישה אחוזים מהאוכלוסייה, גם באפריקה וגם במקומות מרוחקים ומבודדים השיעור יהיה דומה. כשאת שולחת לכולם נחת דומה ממלאי התרופות, את לא מכבה שרפה מקומית, אלא מפחיתה את שיעורי התמותה בכללותם". עד כאן מה שניתן לספר על המחקר שעומד להתפרסם ב-Nature, ולהצטרף לשני אחיו שכבר ראו אור השנה בכתבי-עת חשובים. "תראי מה זה, המדע מנותק מערכים, והנה יצא לנו סוציאליזם. אני אהוב מאוד את הסיפור הזה", מתפעל ברזל.

### חפש את הכרטיסן

לאט'לאט זולגים לכאן כמה רכיבים אנושיים נוספים של רשת המעבדה, ומספרים על חלקם במחקר. שלושה מהם, בעלי דוקטורט בפזיקה, עשו דרכם מהודו לפוסטרדוקטורט בכריאילן. "עובתי את ישראל לארבע שנים, וכשחזרתי בשנת 2014 הבנתי שבינתיים קרה משהו: נפתחו השערים", מספר ברזל. "בריאילן השכיחה לבנות מעונות חדשים בקמפוס ולטפח מאוד את הסטודנטים הבינלאומיים. כמעט מדי שבוע אני מקבל פניות מכל העולם, ולא לכולן אני יכול לתת תשובה חיובית. הרבה מהבקשות מגיעות מהודו ומסין. אגב, במגיש הכרטיסן כאן משחקים בערב קריקט. זה כל כך יפה לראות".

אחד מהשלושה, ד"ר סומן אצ'רייה שהגיע מאזור קולקתה (כלכותה לשעבר), שותף לפרויקט רשתות החשמל. הוא מספר לנו על המוטיבציה שלו לבחור דווקא בפרויקט הזה: "בזמן חופשת הקיץ של 2012 היה חם מאוד בהודו, במיוחד



המחלקה למתמטיקה. "מהאבות המייסדים", מציג אותו ברזל. גם כהן מאפסן תעודת פרס קריל בארון. הוא התחיל לחקור רשתות עוד כשהתחום היה בחיתוליו, ולכן באופן טבעי נושא ההתמחות שלו ותיק יחסית.

"השאלה שהצבתי כבר במאמר הראשון, ואני עוסק בה גם היום, הייתה העמידות של רשתות", מספר פרופ' כהן. "איך רשת מגיבה לתקלות, כיצד היא עומדת בהן, למה היא לא מתפרקת לחתיכות. מכאן נובעות שאלות כמו כמה ראטרים צריכים ליפול כדי שהאינטרנט יתפורד ומיילים לא יישלחו, או כמה בני אדם צריך לחסן כדי שהרשת האנושית שמחברת ביניהם תיפרם והוירוסים לא יוכלו להתפשט. מתברר שלרשתות יש מבנה עמיד, וקשה מאוד לפרק אותן. לכן האינטרנט כל כך יציב, הבעיה כמובן היא מה עושים מול תקיפה חממה, שיודעת לזהות את הצמתים הקריטיים של הרשת. אז הסיפור שונה לגמרי.

לפעמים אתה רוצה לפרק את הרשת, למשל לעצור מחלה, ולפעמים אתה רוצה לשמר את הרשת – להגן על החשמל מנפילה. השאיפות הפוכות, אבל מתמטית זאת אותה בעיה בדיוק. עכשיו, אם מתפרצת שפעת ספרדית ויש לי מלאי חיסונים רק לעשרה אחוזים מהאוכלוסייה, איך לחסן חכם כך שהמגפה תיעצר? התשובה שלנו היא שזה תלוי בסוג של הרשת. צריך לחסן את הצמתים המרכזיים, למשל את הכרטיסן ברכבת התחתית. אם לכל בני האדם היה אותו מספר קשרים חברתיים, זה לא היה אפשרי".

"את יודעת מה התעלומה האמיתית בחקר הרשתות?", חותם ברזל את שיחתנו, "בסופו של דבר, עם כל התקלות והכשלים והמחלות והכאוס ברשתות, 99.9 אחוזים מזמן העסק עובר. המערכות האלה יציבות ואמינות בצורה יוצאת מן הכלל. מתרחש כאן נס, כי ששאנחנו מסתכלים על הרשתות אמורות להיות יציבות בכלל. למה הן בכל זאת עומרות? אנחנו למעשה ראינו שבמובן מסוים, יציבות היא ברירת המחלה של הרשת. אני חושב שאלה חרשות טובות, ואחרי כל האיומים והמחלות ומתקפות הסייבר, הנה, המחקר שלנו אופטימי".

לתגובות: dyokan@makorishon.co.il