השראה

צילום: עמית שעל

גיא פז ואלמוגים במעבדה. "אם נבין את מערכות האיחוי והדחייה בבוטריל, נבין טוב יותר למה שיעור הדחייה של שתלים בבני אדם גבוה"

ולפעמים, מעל צלחות פטרי ותחת נורות ניאון אפרפרות, הם מתבוננים ביצורים זעירים ומצליחים לנסח תובנה חדה על המין האנושי. לא רק על הטבע שלו, גם על הנפש שבבסיס החברה.

זה מה שקרה השנה במעבדה חיפאית אחת, שעוסקת במחקר בסיסי של יצור ימי זעיר ואזוטרי החי במפרץ חיפה. גם חוקרי המעבדה ידעו איפה הם מתחילים, ולא יכלו לתאר לעצמם שצלחת פטרי אחת שנשכחה בצד לפני כמה שנים תספק להם שיעור בסוציאליזציה, תקרא תיגר על האקסיומה האבולוציונית של "החזק שורד" — ואולי אפילו תשנה את עולם השתלות האיברים. ליצור הימי המסעיר הזה קוראים בוטריל.

סופג את האיברים של עצמו

הבוטריל חסר חוליות, אבל בעל אופי קשוח. רך למגע, אבל מחבב מצעים קשים. צנטרליסט עד כדי כך שהוא "מעכל" את האיברים של עצמו, אבל ידידותי למושבות אחרות מסוגו — מושיט להן יד סקרנית ולעתים מתאחד איתן. מוכיח שוב שהחזק הוא שמשתלט, אבל מעורר פרדוקס אבולוציוני — החלש שכביכול נעלם מנצל את החזק כדי להעמיד צאצאים "חלשים". והוא יצור זעיר שחי בים, אבל משמש מודל למחשבה חדשה על קליטת ודחיית איברים אצל בני אדם.

אחד ממרכזי המחקר המובילים בעולם שעוסקים בבוטריל שוכן בפאתיה הדרומיים של חיפה, במבנה בטון ריבועי שמכביש החוף נראה כמתקן מבודד ורציני. בפנים פועלות חלק מהמעבדות של חברת חקר ימים ואגמים לישראל, שבוחנות היבטים שונים בחקר הים התיכון. אחת מהן, בראשות הביולוג הימי פרופ' ברוך רינקביץ, עוסקת במחקר בסיסי של חסרי חוליות ימיים — בעלי חיים נטולי שלד, ובהם תולעים, סרטנים, רכיכות וחלזונות — והחוקרים מתמקדים בשתי קבוצות: הצורבנים (אלמוגים, שושנות ים וכמובן מדוזות) והאצטלנים (אלה שעטופים באצטלה ג'לטינית).

פרימיטיביים ככל שהם נשמעים, האצטלנים הם צומת אבולוציוני מעניין, חוליית ביניים בין חסרי החוליות לבעלי החוליות: בשלב ההתפתחות המוקדם שלהם הם נחשבים לבעלי חוליות, בזכות זנב עם מאפיינים של בעלי חוליות; בהמשך הם הופכים לחסרי חוליות, כשהזנב והמאפיינים שאיתו נספגים בשאר הגוף ונעלמים.

בוטריל. תסתכלו עליו ותראו אותנו

מבין האצטלנים כולם, הבוטריל הוא הכוכב. "הוא חי במים מלוחים ונצמד למצעים קשים, כגון סלעים", משרטט גיא פז, מהחוקרים הוותיקים במעבדה, קווים לדמותו של החבר בצלחת הפטרי. "הבוטריל הוא בעל חיים מושבתי שבנוי מכמה פרטים, 'זואידים'; כל אחד נראה כעלה תפרחת יחיד בגודל מילימטר, ויחד הם יוצרים מבנה דמוי פרח או כוכב. המערכות הראשוניות חוברות למושבות, שנראות כמו משטח פרחים ויכולות לכלול גם 500 מערכות, בגודל בול או אפילו כרטיס אשראי. בטבע המושבות מופיעות בשחור, חום, ירוק, אדום, כתום או צהוב, אבל אין לצבעוניות הזאת כל משמעות או יתרון ביולוגי. את הבוטריל אנחנו מלקטים ממש פה, בחוף שקמונה שלמרגלות המעבדה. יש כמה זנים, ואנחנו חוקרים את הבוטריל הפרחוני, שמושבותיו נראות כמו שרשרות של פרחים קטנים, ואת השדרני, המאורך יותר".

קם לתחייה כמו עוף החול

אבל לא הצבעים, הפרחים והכוכבים הם שהעניקו לבוטריל את מעמדו כמושא מחקר נחשק וכאורח קבוע בכתבי עת מדעיים. למעשה, במשך עשרות שנים הוא לא היה כזה, עד שסגולותיו התגלו לגמרי במקרה, באותה מעבדה חיפאית, לפני 16 שנים.

סטודנטית צעירה עבדה עם הבוטריל כשחקרה שיטות לגידול תרביות תאים של חסרי חוליות בתנאי מעבדה. התרביות הן חומר הגלם במחקרים רבים, בסיס לבחינת השפעות של חומרים שונים על תאים שונים, אבל קשה מאוד לשמור עליהן סטריליות. "תרביות של חסרי חוליות הן תרביות שקשה לגדל במעבדה, מפני שחסרי החוליות מכילים פרזיטים, וירוסים וחיידקים", מרחיב פז. "במעבדה אתה שואף לגדל את התרביות בתנאים הכי קפדניים, ובדרך כלל, למרות המאמץ, לאחר כמה ימים אתה מוצא שעל צלחת הפטרי השתלט איזה פרזיט או וירוס, וכל העבודה יורדת לטמיון. במחקר ההוא הסטודנטית מיינה והפרידה את תאי הבוטריל לפי סוגי הרקמות, וסיפקה לתאים חומרים מעודדי גדילה. והנה, דווקא על צלחת פטרי שנשכחה בצד בתנאים לא סטריליים ושלא קיבלה תוספות מזון מצאנו שהתרחשה רגנרציה (התחדשות) מלאה — מפיסה זעירה של רקמת כלי דם התפתחה מושבה שלמה. כך התחיל המחקר".

***"בן אדם שעובר השתלה של איבר דמי המכיל תאים שונים, כמו כבד, עשוי לקבל גם תאי גזע של התורם. אפשר לחשוב על מצב שבו תאי הגזע נודדים דרך מחזור הדם ומתמיינים לתאים שונים, כגון תאי זרע או ביצית. הצאצאים של המושתל, במקרה זה, עשויים להיות מבחינה גנטית בכלל של התורם"**

המקריות גילתה כבר אז שמושבת בוטריל מסוגלת לחדש את עצמה ללא הפסקה, להצמיח עוד ועוד איברים חדשים. התחדשות היא תופעה קיימת בטבע; הרי גם השממית מגדלת זנב אחרי קטיעה. אבל הרגנרציה הבוטרילית מקיפה ושלמה בהרבה מכל תופעה דומה של התחדשות אצל בעלי חיים אחרים. ההתחדשות הזאת, אגב, לא צריכה תנאי מעבדה: מושבות הבוטריל בים הפתוח סופגות את כל האיברים שלהן, עד שהם נעלמים ונותרת רק רקמת כלי דם. וזה קורה כל שבוע.

איך זה עובד בדיוק? "מכיוון שתהליך הרגנרציה שמתרחש בבוטריל לא נמצא בשום בעל חיים אחר, מסובך להבין אותו", אומר פז. "האנלוגיה שאני נוהג לתת היא לגבעול של צמח ועליו עלים. הגבעול שואב וסופג את הנוזלים מהעלים עד שהם קמלים ונושרים, ובמקביל מנצים ממנו עלים חדשים. זה מאוד דומה למה שקורה במושבות הבוטריל: גם שם יש גוף מרכזי ששואב את כל החומרים מהזואידים, הפרטים שלו, עד שהם נספגים ונעלמים. במקביל, מכל זואיד שנספג צומחים שניים חדשים. אנלוגיה אחרת היא לפניקס, עוף החול המיתולוגי, שכל 500 שנה נשרף ומהאפר שלו קם עוף חדש. גם לבוטריל יש תכונות מיתולוגיות, רק שאצלו התהליך אינו מיתולוגי אלא אמיתי, ונמשך רק שבוע, בטמפרטורה של 20 מעלות".

ההתחדשות המהירה הזאת היא תכונה נוספת שהופכת את הבוטריל למודל מצוין: חיתוך סכין אחד במרכז המושבה לא יפגע בה, אלא יאפשר לעבוד בתוך ימים אחדים עם שתי מושבות בעלות הרכב גנטי זהה, בנות אותו גיל, שגודלו בתנאים זהים — אידיאלי לבדיקות השוואתיות וקבוצות ביקורת.

אבל ככל שהחוקרים העמיקו לבלות עם הבוטריל, הוא התרומם לנגד עיניהם מדרגת עוד חסר חוליות מן השורה — לא מעניין כשלעצמו, רק בסיס לבדיקת דברים אחרים — לדרגת פלא של הטבע.

פרדוקס הנוסע השמיני

לצד הסתגלנות של הבוטריל בהתמודדות עם שינויים, כישורי ההישרדות הגבוהים שלו ניכרים גם במפגש עם מושבות אחרות. קשרי החוץ שלו מספקים שיעור מעורר מחשבה על יחסים בין קבוצות ועל גבולות הכוח.

בשולי המושבה הבוטרילית נמצאים כלי דם שמסתיימים ב"קצוות עיוורים" — סופים בולטים, סגורים, כמו אצבעות של כף יד פתוחה. כשמושבה אחת פוגשת אחרת, כלי הדם נוגעים זה בזה, מגששים ולומדים את האחר, באמצעות שחרור עשרות חלבונים ואנזימים שונים. שחרור החומרים לא נועד לבדוק אינטרסים משותפים או תחומי עניין דומים, כי אם רק את ההרכב הגנטי של המושבה השכנה.

אם המושבות לא התרשמו לטובה זו מזו, כלומר לא איתרו כל מכנה גנטי משותף, נוצרת דחייה. בנקודות המפגש של כלי הדם מתפתח נמק, וכל מושבה גדלה לכיוון האחר. אם הן מחבבות זו את זו, כלומר מצאו דמיון גנטי, כלי הדם בנקודות המפגש מתאחים, ושתי המושבות מתאחדות למושבה משותפת אחת גדולה, שנקראת "כימרה" (מפלצת מיתולוגית עם ראש אריה, גוף עז וזנב נחש, ומושג ביולוגי לתיאור יצור חי המכיל כמה גנוטיפים שונים).

מה יוצא להן מזה? "חייב להיות לתופעה הזו יתרון אבולוציוני, אחרת היא לא היתה קיימת", מבהיר פז. "ואכן מצאנו שמולטי־כימרה, מושבה שהיא תוצר התאחות של כמה מושבות, שורדת טוב יותר, נלחמת טוב יותר באויבים וקולטת יותר מזון. אם אחד הפרטים, למשל, ננגס — כל המושבה מתגייסת, מפרישה חומרים דוחים ושולחת לאזור תאים חיסוניים. מתחת למיקרוסקופ, כשנוגעים בעדינות בפרט אחד מתוך המולטי־כימרה ממש רואים איך כל המושבה מגיבה ומתכווצת".

ואולם חיי המושבה המאוחדת אינם אידיליים. כדרכם של קבוצות, גם בה יש משחקי כוח. אם, למשל, מתאחדות מושבות בצבעים שונים, בתוך כמה שבועות מתברר מיהי המושבה החזקה יותר. באיחוד של מושבה כתומה ומושבה שחורה, נניח, איחוי כלי הדם של שתי המושבות מאפשר העברה הדדית של הפיגמנטים, והצבעים כמו מתערבבים זה בזה. בעין בלתי מזוינת נראה הצבע של המושבה המאוחדת כמשהו שבין כתום ושחור, ורק מבט מתחת למיקרוסקופ מגלה מי המושבה השחורה ומי הכתומה. ואולם בתוך כמה שבועות מתחילה תחרות בין המושבות המאוחדות: החלשה שבהן נספגת אט אט, נעלמת, וגם תאי הפיגמנט שלה שנדדו למושבה החזקה נעלמים. הצבע של החזקה שולט בכל, וניכר היטב גם במראית עין בלתי מזוינת. אם תרצו, גרסת המיקרו־אורגניזם לאיחוד השבטים ב"הישרדות".

עד כאן חי הבוטריל על פי ההיגיון האבולוציוני הבריא. "אבל להפתעתנו הרבה", אומר פז, "בניסוי שנערך על כימרות של הבוטריל התברר שמושבה שחורה ספגה מושבה כתומה, וכמה חודשים אחר כך החלה להפיץ צאצאים כתומים. בהתחלה חשבנו שמדובר בטעות, ערכנו את הניסוי שוב וקיבלנו אותן תוצאות. גילינו כי בשלב הכימרה עברו תאים של המושבה הכתומה למערכת המין של המושבה השחורה. הכתומה נספגה ומתה, אבל תאי הגזע שלה נשארו במערכת המין של השחורה והתמיינו לתאי מין — ולכן קיבלנו את הצאצאים הכתומים.

"הגילוי הזה טרף את הקלפים. אף שהשחורה ספגה את הכתומה — המנצחת הגדולה בתחרות היא בכלל הכתומה. היא אפילו לא צריכה לחיות ולהתקיים כדי שיהיו לה צאצאים. ממש כמו בסרט 'הנוסע השמיני', שבו המפלצת השתמשה בפונדקאי שנשא את צאצאיה. זה פרדוקס אבולוציוני: הרי דרווין כבר קבע שמי שחזק הוא זה ששורד, ופה המושבה החלשה היא זו שמתרבה".

מה זה אומר עלינו

התובנות האלה מסעירות לא רק במישור הביולוגי, לא רק בדיון פילוסופי ולא רק כאנלוגיה סוציאלית. המשמעויות שלהן מגיעות גם לרפואת בני האדם, ובעיקר אל תחום ההשתלות. מה יכול לקרות אם גם אצל בני אדם יש נדידה כזאת של תאי גזע, שנודדים ומרימים ראש חודשים אחרי שהשתלבו בגוף?

לפז יש תשובה מפתיעה מאוד. "בן אדם שעובר השתלה של איבר דמי המכיל תאים מסוגים שונים, כמו כבד, עשוי לקבל עם האיבר גם תאי גזע של התורם", הוא מסביר. "אפשר לחשוב על מצב שבו תאי הגזע עוזבים את הכבד ונודדים דרך מחזור הדם לכל מיני מקומות בגוף ומתמיינים לתאים שונים, כגון לתאי זרע או ביצית. הצאצאים של המושתל, במקרה זה, עשויים להיות בכלל של התורם, מבחינה גנטית". בניסיון לצנן את הדרמה הביו־אתית שחולל במשפט האחרון, הוא מוסיף: "בדרך כלל אנשים שעוברים השתלות הם לא אנשים צעירים ולא מביאים עוד ילדים, אבל באופן תיאורטי האפשרות הזאת קיימת".

ומעבר למישור התיאורטי? "הרבה פעמים שואלים אותי 'מה הבשורה הגדולה במחקר על הבוטריל, ואיך זה טוב ליהודים?'. התשובה שלי היא שהמחקר נעשה לצורך המחקר, זה מחקר בסיסי. אנחנו חוקרים את הבוטריל כי התופעות הייחודיות שהוא מציג מעניינות אותנו, וחשוב לנו להבין את המנגנונים שלהן. זה נכון שבסוף הדרך קיימת השלכה בין מערכת הבוטריל למערכות מפותחות יותר, כמו של בני האדם.

"הרבה גילויים של תרופות התחילו במחקר בסיסי ארוך ומפרך, כשמעבדות שונות מכל העולם אספו פיסות של מידע ובסוף נוצר איזשהו פאזל שאפשר לנצל למען האנושות, למען הסביבה ולשיפור התנאים. אם נוכל להבין את שלבי ההתפתחות של מערכת איחוי־דחייה בבוטריל, נוכל גם ללמוד ולהבין טוב יותר את המערכת הזאת בבני אדם ולענות על שאלות כמו למה שיעור הדחייה של שתלים בבני האדם כל כך גבוה או למה ניתן לשתול רק חלק מסוגי הרקמות, ונוכל להבין את השגיאות ואת מה שאנחנו מפספסים בנושא תאי גזע, איחוי ודחייה ורגנרציה". ■

מתבונן
על העולם החדש

שיזף רפאלי

אובד עצות

אובד עצות הוא מושג שאבד עליו הכלח. בעידן הדיגיטלי כמעט אי אפשר להיות אובד עצות. ברשת אפשר למצוא תשובה, או תריסר תשובות, לכל שאלה, ועצה, או תריסר עצות, לכל אובד. בעת מצוקה פונה הציבור, קודם כל, לאינטרנט. אם פעם היינו הולכים לרופא או לכל מומחה אחר כדי לקבל אבחנה וטיפול, היום קודם גולשים, ואז באים למומחים כדי לספר להם מה מצאנו וקראנו וגילינו. האבחון והוראות הטיפול בידינו, למומחה נותר רק לאשר — או להתווכח. ולך תוכיח שאתה מומחה מול האינטרנט.

לשאלה מאין יבוא עזרי יש היום, אם כן, תשובה ברורה — עזרי מעם ויקיפדיה. הפופולריות של האנציקלופדיות המקוונות רק גדלה והולכת, כפי שמעיד למשל המקום הגבוה תמיד של ויקיפדיה בתוצאות החיפוש של גוגל. האנציקלופדיות האלו הן הכתובת לעזרה בהכנת שיעורי בית, ליישוב התערבויות, לחיפוש אחר פתרון לבעיה עסקית, או רפואית או טכנית, לקבלת מענה לשאלות מציקות או להשבעת הסקרנות.

במקביל צומח בעולם סוג אחר של אתרי מידע, יומרניים פחות אבל בעלי נפחי פעילות מרשימים למדי. אלו הם אתרי השאלות והתשובות הפרמביות, שבהם כולם מוזמנים לשאול — ולענות. כמה מהאתרים הבולטים בתחום הם Mahalo, AskVille מבית אמזון, Yedda.com (שנולד בישראל אבל פועל באנגלית), Answerbag, Answerology של מעצמת התקשורת הרסט, ואפילו האתר QnA ברשת Live של מיקרוסופט, שמהווה הד למסורת השו"ת היהודית. כל מפעילי האתרים האלה הבינו את מה שגם הרבנים כנראה היטיבו להבין: לשאלות ותשובות יש הצדקה עסקית.

כל שאלה באתרי השאלות מוצגת בצד התשובות המצטברות, והן מצטברות. אין אחריות לאיכותן, אבל יש אחריות כמעט מלאה שלכל סיר יהיה מכסה ולכל שאלה יינתן מענה. רובן המפתיע של התשובות נכונות, ורוב העצות טובות, תומכות, אפילו מחממות את הלב. אבל יש גם הרבה זבל. אם זהו המקור שעליו נסמכים התלמידים בהכנת שיעורי הבית, אם משם נלקחות תובנות הנוגעות לטיפול רפואי או להתנהלות העסקית, אם זוהי המשענת המחליפה את הסבתא בענייני הלב וניהול הבית — יש בהחלט סיבה לחשש. מאחר שאי אפשר ולא רצוי לסגור או לאסור, צריך בהחלט ללמד את עקרונות האוריינות: על מה אפשר לסמוך ומתי.

להבדיל מויקיפדיה, באתרי השאלות לא בודקים את התשובות, מוסיפים ומשפרים. לגולשים יש פחות כלים של ניהול, פיקוח ועריכה. אין מוצר סופי, אין סדר כמו בפורטלים נושאיים. אין גם ערכים משותפים, הדוגלים בניטרליות, בפתיחות או בכללי קניין רוחני נוקשים. אין פרויקטים משותפים של טיוב התוכן או מאמצים קבוצתיים לכסות תחומים מסוימים. במילים אחרות, אין שם קהילה. לכן גם אין כמעט דיאלוג, ואין שימוש בגוף ראשון רבים, כמו אצל אנשי ויקיפדיה. מנגד, האווירה באתרים האלה הרבה יותר פתוחה, פחות מעונבת. זה קרנבל של שואלים ומשיבים. דווקא חוסר הסדר הוא חלק מהקסם, לא רק מקור האיום.

צילום: שאטרסטוק

מפעילי אתרי השאלות והתשובות הבינו את מה שגם הרבנים שכתבו את השו"ת הבינו: לז'אנר הזה יש הצדקה עסקית

לאור ההבדלים האלה, ההתפתחות האחרונה מעניינת במיוחד. מייסד ויקיפדיה, ג'ימי ויילס, החליט להיכנס גם הוא לזירת השאלות והתשובות, והקים את wikianswers (answers.wikia.com). הוא לא רק נכנס לשדה צפוף, הוא גם מתנגש באתר שאלות ותשובות אחר, ישראלי במקורו, שנקרא WikiAnswers (wiki.answers.com).

גם גוגל הענקית ניסתה לפרוץ דרך בתחום הזה. ב־2001 היא השיקה את Google Answers, אתר שבו הגולשים יכלו לשאול, לשלם — ולקבל תשובות מקבוצה נבחרת של מאות משיבים מוסמכים. עשרות אלפי שאלות הופיעו שם, וכמה מיליוני דולרים התגלגלו בדרך לתשובות. אבל ב־2006 האתר נסגר, מסיבה שעדיין אינה ברורה. אולי מנהלי גוגל זיהו שהאתר הוא בעצם מענה חלוש למדי לשירות של יאהו. אתר השאלות והתשובות Yahoo Answers שולט בזירת השאלות והתשובות. ב־2006, כמעט במקביל לסגירת האתר של גוגל, פרסמה יאהו את השאלה העשרה מיליון (!). היום, מספר השאלות שעולות לאתר בחודש גבוה בהרבה, ב־Yahoo Answers יש כבר 400 מיליון תשובות, ומספר המשתמשים עומד על 120 מיליון גולשים.

יאהו היא גם המובילה ביצוא הפורמט לשפות שאינן אנגלית. בצד אתרים עצמאיים שמקורם בקוריאה, בסין, בדרום אמריקה ובאזורים אחרים, יאהו מפעילה יותר מעשרים גרסאות בשפות נוספות. דווקא בעברית הסוגה הזאת פחות מפותחת, ואינה זוכה לפופולריות דומה לזו שנרשמת בשאר העולם. האם אנו מסתפקים בשאלות ותשובות באנגלית? האם יש לנו פחות פנאי או סבלנות לעניין? האם אנחנו פחות סקרנים? הרי איש לא יחשוד בנו שאנחנו לא ששים לתת תשובות או להציע הצעות — בכך אנחנו דווקא מצטיינים. האם במקום להיות חכמים, רשעים או תמים, אנחנו בעצם אלה שאינם יודעים לשאול? ואולי זה דווקא שאנחנו לא יודעים לשאול ברשת?

זה מזכיר לי את הבדיחה החבוטה על הילד שלא מפסיק לשאול. "אבא למה השמים כחולים?", הוא שואל, ואביו עונה: "לא יודע". כעבור כמה דקות הוא שואל שוב: "אבא, למה הדשא ירוק?". "לא יודע". והילד בשלו: "אבא, למה כלבים נובחים?". "לא יודע". לאחר הרהור שואל הילד: "אבא, זה בסדר שאני שואל אותך כל כך הרבה שאלות?". והאב עונה: "שאל, בני, שאל. אם לא תשאל איך תדע?".

פרופ' שיזף רפאלי הוא ראש בית הספר לניהול והמרכז לחקר חברת המידע באוניברסיטת חיפה. sheizaf.rafaeli.net