

אסונות ורגיעות

רנה דאקוורת'

בעשורים האחרונים חוקרים תיעדו אינספור דוגמאות המעידות על שינויים אבולוציוניים מהירים שהתרחשו על רקע פגיעה קשה ומתמשכת במערכות אקולוגיות. המקרים הללו רומזים שהאבולוציה של החיים על פני כדור הארץ אינה מעצבת מינים רק באופן איטי ובהדרגה, אלא גם מאופיינת בפרצי שינוי קצרים ומהירים. פרצי האבולוציה הללו מתרחשים בעקבות אירועים קטסטרופליים, ואחריהם מגיעות הפוגות נטולות אירועים מיוחדים, שבהן רכיבי המערכות האקולוגיות משמרים סטטוס קוו. אם התיאוריה הזאת נכונה, פירושה שביולוגים אבולוציוניים בני ימינו נדרשים להסביר כעת שתי תעלומות: מה מונע ממינים להשתנות לאורך רוב שנות קיומם, וכאשר הדבר קורה – כיצד הם משתנים מהר כל כך?

נובמבר 2020

מקומות מסוימים ברחבי העולם – בבתרונות דראמה'לר שבאלברטה, קנדה, או במנהרות חול'המ'ר'חרובה (Geulhemmergroeve) שבהולנד, או בתצורת ה'ל קריק שבמזרח מונטנה – אפשר להושיט יד אל קו דק בסלע ולדעת שנגעת באירוע ההכחדה ההמונית המפורסם ביותר על פני כדור הארץ. שכבת הגבול הזאת, שאפשר למצוא בכל רחבי העולם, ידועה בשם ק'רטיקון-פ'לאוגן. זהו רובד חרסית עשיר באירידיום, יסוד המופיע על פני כדור הארץ רק כאשר מתרסק על פניו עצם מן החלל החיצון. השכבה משקפת רגע קצרצר, במונחים גיאולוגיים, המפריד בין עידן הדינוזאורים ובין העולם שבלעדיהם, כפי שאנו מכירים אותו.

הדינוזאורים זוכים אמנם למרבית תשומת הלב, אבל הם לא היו היחידים שנעלמו. מעל מחצית מכל החיים על פני כדור הארץ – מפלנקטון ועד פ'טרוזאורים – נכחדו עם פגיעתו של האסטרואיד צ'יקשולוב, אשר יצר מכתש ברוחב 150 קילומטרים בחצי האי יוקטן. 30 אלף שנים חלפו בטרם צצו החיים מחדש, כפי שמתועד במאובנים, ועוד 4 עד 9 מיליון שנים בטרם השתקמו החיים והגיעו להיקפים שלפני הפגיעה.

מה קרה ב-30 אלף השנים הראשונות הללו? חלק מבעלי החיים המשיכו לחיות, אף אם מספריהם לא היו גדולים דיים כדי שיתועדו במאובנים, שהרי אחרת לא היינו כאן היום. אבל כיצד נראו החיים עבור ניצולי הקטסטרופה הזאת?

המצב היה כנראה טוב יותר עבור יצורים שחיו מתחת לפני הקרקע, בהתחשב בכך שפגיעת האסטרואיד שיגרה לאטמוספירה שברי סלע ושאר חומרים במשקל כולל של 10 טריליון טון. כאשר השפוכת הזאת צנחה בחזרה אל פני האדמה רוסס כדור הארץ כולו ב"קליעים" לוהטים. עבור מי ששרד את המתקפה האדירה, תחזית מזג האוויר לחודשים הבאים הייתה גשם חומצי, שמיים שחורים וטמפרטורות מתחת לאפס, משום שחלקיקים אטמוספריים זעירים וענן של חומצה גופרתית כיסו את העולם.

ניצולי הפגיעה - כמו הפרוקרברוס (Procerberus) הקטן, דמוי העכברוש - יצאו בסופו של דבר ממקומות המסתור שלהם אל סביבה פוסט-אפוקליפטית של ממש. שרפות ענק השתוללו עדיין כתוצאה מפגיעת העצמים הלוהטים. גוויות מרקיבות ושרידים מפוחמים של כל מה שנפגע על פני הקרקע - מיליארדי צמחים ובעלי חיים חסרי מזל - כיסו כל פינה. מקורות של מי שתייה נקיים התייבשו או הזדהמו באבן, אבק וגשם חומצי.

הישרדות תבעה כושר המצאה וגמישות. מקורות המזון הרגילים נעלמו, הטמפרטורות צנחו, בני משפחה וקבוצות חברתיות נספו או נפוצו לכל עבר. תנאים כאלה היו עשויים לדחוק מין שבדרך כלל הוא שוכן עצים - כמו האב הקדמון שלנו, הזעיר ואוכל החרקים - למצוא מחסה במערות, ואילו מין אוכל-כול אך חובב צמחים בדרך כלל, כמו צב הנוינקילוס (Neurankylus) ששכן במים מתוקים, היה נאלץ אולי לעבור לתזונה שכללה פגרי דינוזאורים. בצד החיוב עמדה רק השמדתם המוחלטת של כל הטורפים הגדולים, שאפשרה לשורדים הקטנים יחסית לחפש ללא הפרעה שאריות מזון חרוכות.

המעטים שהחזיקו מעמד לא רק שרדו אלא גם התרבו בסופו של דבר, ולכך נדרשה בוודאי גמישות רבה עוד יותר. בהתחשב במיעוט האפשרויות, הניצולים לא יכלו להיות בררנים יתר על המידה בבחירת בני זוג. למעשה, זיווג בין מינים שונים היה כל הנראה שכיח יחסית בתקופה ההיא. יש ראיות גנומיות לכך שבאותה תקופה לערך, זו של הכחדת קרטיקון-פלאוגן, התרחשה הכלאה מוגברת בין מיני צמחים.

התקופה הפוסט-אפוקליפטית הזאת התאפיינה בחידושים. שילובים גנטיים חדשים שהופיעו כתוצאה מהכלאה בין מינים נוספו על שלל החריוגות שיצרה ההתפתחות בסביבת דחק. הדורות הראשונים בסדר העולמי החדש לא חיקו את ההרגלים שאפשרו לבני מינם לשרוד לאורך עידן ועידנים; הם חיקו את ההרגלים שאלתרו הוריהם בצוק העיתים. עולם החי שעלה מן האפר לא הזכיר את זה שגשג לפני פגיעת האסטרואיד. מיליוני שנים יחלפו בטרם יתייצבו המערכות האקולוגיות ובטרם ישתקם מגוון המינים ויגיע להיקפים דומים לאלה שגשגו לפני הפגיעה.



כשהסיבה התייצבה, בסופו של דבר, חזר תהליך האבולוציה לקיפאון יחסי. זה הדפוס המזוהה בתיעוד המאובנים: הפרעה, שינוי, ולאחריהם תקופות ארוכות של חוסר שינוי (סטזיס). אבל שנים רבות חלפו בטרם הסכימו מדענים להכיר בקיומו של הדפוס הזה. הוא עמד בסתירה לפרדיגמה הדרוויניאנית, שלפיה האבולוציה מתרחשת בשינויים איטיים והדרגתיים. על פי תפיסה זו, המגוון הגדול של החיים הוא תוצאה של הצטברות שינויים קטנים ורבים עד מאוד שעברו בירושה לאורך תקופה ממושכת. הדרגתיות כזאת נתפסה כמרכיב הכרחי בהסתגלות באמצעות ברירה טבעית - התהליך שבו בכל דור אובדות גרסאות מסוימות של תכונות, משום שנושאייהן אינם מעמידים צאצאים.

אבל ההתמקדות העיקשת בברירה הטבעית וראייתה כמנגנון היחיד של הסתגלות אבולוציונית תמיד היו נקודת תורפה בתיאוריה, מפני שתפיסה כזאת אינה יכולה להסביר כראוי כיצד צומח משהו חדש. שהרי הברירה הטבעית היא תהליך של ניפוי וריאנטים לא-כשירים; היא אינה בוראת יש מאין אלא רק משנה את השכיחות של מה שקיים ממילא. לכן, על פי הפרדיגמה הניאו-דרוויניסטית, חידושים אמורים לצמוח מן התהליך האקראי של מוטציות גנטיות. אבל הבעיה היא שבדרך כלל, כאשר מופיעות מוטציות חדשות הן אינן גורם חיובי. הסיכוי שמוטציות ישבשו מערכות מותאמות היטב גדול מהסיכוי שישפרו אותן, במיוחד אם השפעת המוטציה גדולה. המסקנה מכך היא שהתפתחות של משהו חדש - למשל עיניים או נוצות - דורשת זמן המתנה ממושך ביותר. ואם לא די בהמתנה הממושכת להתפתחותה של מוטציה מועילה, אחריה נדרש תהליך ארוך של שינויים מצטברים שיבנו אותה, שלב אחר שלב, ויצרו מבנה מורכב חדש.

למזלה של הפרדיגמה הדרוויניאנית, הזמן הגיאולוגי מקציב לאבולוציה מיליוני ומיליארדי שנים שבהן היא יכולה לעבוד. אבל בשנות השבעים הציעו הפליאונטולוגים האמריקנים סטיבן גיי גולד (Gould) וניילס אלדרדג' (Eldredge) את ההשערה כי דפוס חוסר השינוי והפרעה אינו משקף בהכרח פערים בתיעוד שמספקים המאובנים. שיווי המשקל המקוטע (punctuated equilibrium), כפי שקראו לתיאוריה שלהם, שיקף לטענתם את האופן הקופצני שבו האבולוציה מתרחשת בפועל. אך משמעות התיאוריה של גולד ואלדרדג' הייתה שהברירה הטבעית של מוטציות אקראיות נדרשה פתאום להשלים שינויים אבולוציוניים מהותיים לפי לוח זמנים קצר הרבה יותר. ומכיוון שכך, שיווי המשקל המקוטע התקבל תחילה בספקנות גדולה.

למרות זאת, עם השנים, כאשר מחקרים חדשים ושיטות מחקר חדשות גילו את הדפוס הזה שוב ושוב על פני מגוון רחב של אורגניזמים, קיבלו אותו יותר ויותר ביולוגים וחוקרי אבולוציה. סטיבן ארנולד (Arnold), למשל, ביולוג אבולוציוני מאוניברסיטת אורגון סטייט, בדק עם עמיתיו דפוסים של התפתחות ממדי גוף בבעלי חוליות. הם בחנו שלושה סוגי נתונים על פני צירי זמן שונים מאוד: מחקרים ארוכי טווח בשטח ובמוזיאונים, שמשווים שינויים על פני עשרות עד אלפי שנים; מדידות מאובנים שלפיהן אפשר להעריך שינויים על פני מאה אלף עד מיליון שנה; ונתונים השוואתיים שעשויים להראות הסתעפות של מינים (משוערת לפי נתונים גנטיים) על פני עשרות מיליוני שנים. הם מצאו שפרצי אבולוציה בממדי הגוף מתרחשים רק אחת למיליון שנים לערך.

למעשה, ייתכן שממדי גוף הם אחת התכונות שעליה פועלים האילוצים המועטים ביותר. ג'ין האנט (Hunt), ביולוג אבולוציוני במוזיאון הלאומי להיסטוריה של הטבע בושינגטון, השווה שינויים בממדי גוף ובצורתם ביותר מ-250 שושלות מאובנים, במטרה להעריך אם האבולוציה מתרחשת באחת משלוש דרכים: השתנות בכיוון מובהק, "הילוך מקרי" (שינוי איטי ללא כיוון עקבי), או חוסר שינוי. ב-5 אחוזים בלבד מן המקרים נמצאו ראיות לשינוי איטי בכיוון מובהק, כפי שראה צ'רלס דרווין בעיני רוחו. 95 האחוזים הנותרים התחלקו בין שני התהליכים האבולוציוניים האחרים. ממדי גוף התפתחו תכופות בהילוך מקרי, ואילו צורת הגוף נותרה בדרך כלל כשהייתה לאורך מיליוני שנים.

שכיחות הדפוס הזה פירושה שביולוגים אבולוציוניים בני ימינו נדרשים להסביר כעת שתי תעלומות. הראשונה: מה מונע ממינים להשתנות לאורך רוב שנות קיומם? והשנייה: כאשר הם משתנים, כיצד מתרחש הדבר מהר כל כך?



המנגנון שלעיתים קרובות משמש להסברת הדפוס הראשון מבין אלה ידוע בשם "ברירה מייצבת" (stabilizing selection) - סוג של ברירה טבעית המשמרת תכונות באמצעות סילוק וריאנטים קיצוניים. זוהי ברירה בנוסח זהבה ושלוש הדובים, שמעדיפה ומשמרת את הגרסאות ה"פשוטות"; לא מהר מדי ולא לאט מדי, לא גדול מדי ולא קטן מדי. אבל ברירה מייצבת מתקבלת על הדעת רק כאשר מין מאכלס סביבה שאינה משתנה. היא אינה מתיישבת עם שכיחותם של שינויים סביבתיים בקנה מידה גדול שאירעו לאורך ההיסטוריה של כדור הארץ - תנודות אקלים, שינויים בגובה פני הים, שינויים בשדה הגיאומגנטי. פרט לכך, לעיתים קרובות אנחנו עדים לשינויים מיקרו-אבולוציוניים - שינויים בקנה מידה קטן שמתרחשים בתוך מינים - בטווחי זמן קצרים בהרבה. מכאן אפשר ללמוד שהברירה המייצבת אינה מתקיימת תמיד.

בעשורים האחרונים תיעדו ביולוגים אבולוציוניים אינספור דוגמאות המעידות על שינויים אבולוציוניים מהירים במגוון רחב של תכונות. המדובר בשינויים שעוברים בתורשה ומתרחשים בתוך שנים אחדות או עשורים אחדים, בשלל אורגניזמים - מאצות, דרך עשים ועד דגי סלמון. ידוע גם שבברירה מלאכותית במעבדה מתרחשים שינויים מהירים עוד יותר. למעשה, אחד הדפוסים העקביים ביותר הוא שקצב האבולוציה על פני תקופות זמן קצרות גבוה הרבה יותר מאשר על פני תקופות זמן ארוכות.

אחת הפרשנויות לתופעה היא שהאבולוציה מתקדמת בזאוג קל ושאינן לה כיוון ברור במיוחד. במילים אחרות, כאשר מתבוננים בציר זמן מקרו-אבולוציוני - הדרגה הקיצונית ביותר של הטווח הארוך, שבה אפשר לראות הופעה של תכונות חדשות או של קבוצות אורגניזמים חדשות - שינויים מהירים מופיעים כרעש אקראי ולא יותר. בטווחים בינוניים ייתכן שמחזורי קרח ושינויים סביבתיים הדרגתיים אחרים דוחפים אוכלוסיות לכאן ולכאן סביב אפיון ממוצע של תכונה מסוימת, ולכן בסך הכול, על פני תקופות ארוכות מאוד, האבולוציה כמעט שאיננה יוצרת שינוי בתכונות.

דוגמאות ליציבות דינמית כזאת, שבה מערכת מתנוודדת סביב ממוצע אבל לאורך זמן היא משתנה אך מעט, מצויות בכל מקום. הדפוס ניכר במערכות מעשה ידי אדם, למשל במטוס שנתון בשליטת טייס אוטומטי שמתמודד עם איבודי גובה ומבצע תיקונים מזעריים בתנועתו. אנחנו רואים זאת בגלי מוח, או במערכות אקולוגיות שבהן מספר הפרטים באוכלוסייה או במין בחברה מסוימת עולה ויורד לאורך שנים אבל בסך הכול נותר יציב.

יש דמיון יוצא דופן בין דפוסים של יציבות דינמית הנצפים באבולוציה ובין כאלה שנצפים בשלל מערכות טבעיות ומעשה ידי אדם. מכאן עולה שיציבות נשמרת אולי על פי עקרונות אוניברסליים, אפילו ברמה של מינים שלמים. ואם אכן כך הדבר, גישה של "דינמיקת מערכות" (system dynamics) בתחום האבולוציה עשויה לשנות דרסטית את האופן שבו אנחנו רואים את תהליך האבולוציה. בראש ובראשונה, גישה כזאת מבהירה שחשוב אמנם להסביר כיצד מינים משתנים, אך חשוב לא פחות להסביר כיצד מינים נותרים כשהיו. נובע ממנה גם שהמנגנונים העומדים ביסוד שתי התופעות עשויים להיות קשורים זה בזה בקשר הדוק.



כל אימת שאנו מפעילים בקרת שיוט במכונית או תרמוסטט בבית, אנו משתמשים במערכת שבנויה לשמר תפוקה קבועה מסוימת. מערכות מעשה ידי אדם שמשמרות מצבי קבע כאלה מתוכננות לשמור על איתנות (robustness) בתנאי סביבה משתנים. מערכות איתנות נותרות כאלה לא מפני שכל מרכיביהן נותרים קבועים כאשר ההשפעות הסביבתיות משתנות, אלא משום שהפונקציה או התפוקה של המערכת נותרת יציבה. וכדי להשיג יציבות כזאת, הרכיבים שבבסיס המערכת צריכים לפעול ללא הפסק כדי להתאים את התנהגותם ואת האינטראקציות ביניהם בתגובה לשינויים סביבתיים.

בזכות מפעלי ההנדסה האנושיים הללו אנחנו יודעים כבר לא מעט על מנגנונים שמעניקים איתנות למערכות מורכבות. בקרת היזון חוזר (feedback control), מושג ישן בתחום התכנון ההנדסי, היא מן החשובים שבהם. אחת הדוגמאות המוכרות היא תנור חימום שנשלט באמצעות תרמוסטט. אנחנו מכוונים את וסת החום לטמפרטורה רצויה, וזו נעשית נקודת הייחוס של המערכת. אם החיישן בתרמוסטט מודד טמפרטורה נמוכה ממנה, שסתום הגז בתנור נפתח ומדליק את תיבת האש; הבית יתחמם עד שטמפרטורת החדר תעלה מעט מעל לנקודת הייחוס. בשלב זה יכבה התנור וטמפרטורת החדר תתחיל לרדת. כשתרד מעט מתחת לנקודה שנקבעה, התרמוסטט ישלח אות לפתוח שוב את שסתום הגז, והמחזור יתחיל מחדש. הרעיון הוא שאפשר למדוד את תפוקת המערכת באמצעות חיישן, להזין את תוצאות המדידה בחזרה לבקר כלשהו, וכך לשלוט בטמפרטורה באמצעות השוואה לנקודת הייחוס.

תכופות אנחנו משתמשים בסוג כזה של בקרת היזון חוזר כדי להסביר כיצד אורגניזמים משמרים שיווי משקל פיזיולוגי, או במונחיהם של ביולוגים - מצב הומיאוסטטי. לדוגמה, כדי לשמור על טמפרטורת הגוף שלנו יציבה, תאי עצב בעורנו שולחים אל המוח מידע לגבי טמפרטורת העור. המידע משמש לשינוי התגובות הפיזיולוגיות: אם טמפרטורת העור נמוכה מדי אנחנו מתחילים לרעוד, ואם היא גבוהה מדי

אנחנו מתחילים להזיע. ה"חיישנים" מותקנים במקרה זה על פני העור כי חשוב לזהות שינויים בטמפרטורה ולהגיב אליהם עוד לפני שטמפרטורת הליבה של הגוף משתנה. גם במוח יש תאי עצב רגישים לטמפרטורה, אבל מאחר שמטרת האורגניזם היא לשמר טמפרטורת מוח יציבה, תאי העצב האלה אינם נדרשים להיות מעורבים באופן פעיל בחישה השינויים בטמפרטורת הליבה של הגוף. מה מטרתם אפוא? אחת ההשערות היא שהם מספקים מידע על טמפרטורת הייחוס של הליבה, שאותה אפשר להשוות למידע המגיע מהעור, וכך לאפשר לאורגניזם להגיב לפני שמתעוררת סכנה אמיתית. תגובות מקדימות כאלה, שנקראות גם בקרת היזון מקדים (feedforward control), חיוניות ליציבות: בלעדיהן, טמפרטורת הליבה של הגוף אמנם תהיה מווסתת, אבל יחולו בה תנודות חריפות.

זו רק דוגמה אחת מני רבות למערכות ביולוגיות שבהן אנחנו רואים בקרה בהיזון חוזר ובהיזון מקדים כאחד. יכולתם של אורגניזמים לשמר שיווי משקל בטמפרטורה או בריכוזי נוזלים, מלחים וגלוקוז היא דוגמה לתפקודי ליבה פיזיולוגיים שנשארים יציבים יחסית גם בסביבה דינמית מאוד. אבל עדיין נשאלת השאלה אם אפשר להחיל את המושגים הללו גם על בעיית חוסר השינוי האבולוציוני. ואם כן, כיצד עשויים לפעול מנגנונים הומיאוסטטיים ברמה ביולוגית גבוהה יותר?

אקולוגים עוסקים ברעיון ההומיאוסטזיס זה עשרות שנים. הם משתמשים בו כדי להבין כיצד היציבות נשמרת ברמת הפרודוקטיביות, במאזן האנרגיה ובביומסה הכוללים של מערכות אקולוגיות, אך לעיתים נדירות בלבד השתמשו בו כדי להסביר דפוסים אבולוציוניים. אבל אפשר לחשוב על אוכלוסיות כעל מערכות מורכבות שתפוקתן היא מספר קבוע של צאצאים מדי דור. למרות היעדרם של חיישנים, משוונים (comparators) או בקרים במערכות האקולוגיות האלה, אנו עדים לעיתים קרובות לבקרת היזון חוזר. כאשר צפיפות האוכלוסין נעשית גבוהה מדי, גידול האוכלוסייה נעצר משום שלכל פרט יש סיכוי קטן יותר למצוא מזון מתאים, או משום שהצפיפות הרבה מגדילה את סיכויי להיטרף או ליפול קורבן לטפילים. גורמים אלו בתורם עלולים להוביל לצמצום שיעורי ההישרדות וההתרבות, וכך להאט את צמיחת האוכלוסייה או להפוך את מגמתה.

אבל צמצום גורף של סיכויי ההישרדות ושיעור הילודה הוא התיקון הגס ביותר האפשרי לצפיפות אוכלוסין גבוהה. אפשר לדמות זאת לאורגניזם שדוחה את הרעד בגופו עד שתאי העצב במוחו מזהים ירידה בטמפרטורת המוח - שלב שבו ההיפותרמיה כבר בעיצומה. ומאחר שבמרבית האוכלוסיות אין גלים דרמטיים של גידול וקיטון, חייבים להיות מנגנונים אחרים, קיצוניים פחות, לוויסות האוכלוסייה. מכאן אפשר ללמוד שבמערכות אקולוגיות פועלים מנגנונים לא רק להיזון חוזר אלא גם להיזון מקדים.

אורגניזמים יחידים מגיבים פעמים רבות לאותות על אתגרים סביבתיים באמצעות שינוי התנהגות או השפעה על תכונות צאצאיהם. כך לדוגמה, במחקרים שערכתי בעצמי על ציפורים, בביציהן של אימהות באוכלוסיות צפופות הייתה כמות גדולה יותר של טסטוסטרון והן העמידו צאצאים תוקפניים מאוד. מאחר שצאצאים כאלה הם מתחרים טובים, הם יכולים לעזוב אזורים צפופים יתר על המידה ולמצוא משכן חדש במקום אחר. לעומת זאת, אימהות בבתי גידול חדשים שצפיפות המתרבים בהם נמוכה העמידו צאצאים "נוחים" יותר, שנוטים יותר למצוא לעצמם טריטוריה קרובה. וכאשר הם מתרבים

בסמוך להוריהם, הצאצאים משתפי הפעולה הללו מוגנים מפני תחרות ומפני עלויות המעבר לאזור חדש. אבל גידול של צאצאים פחות תוקפניים יכול לעבוד רק כאשר המשפחות חולקות ביניהן שטח רחב. דוגמה זו מראה כי אימהות יכולות להשפיע על תכונות צאצאיהן בדרכים שמכינות אותם להתמודד עם האתגרים הסביבתיים הצפויים להם.

אם פחות צאצאים נשארים בסביבה כאשר צפיפות האוכלוסייה גבוהה, ויותר צאצאים נשארים בה כאשר הצפיפות נמוכה, הדבר עשוי למתן תנודות בגודל האוכלוסייה. תגובות מקדימות כאלה שכוחות בכלל הקטגוריות הטקסונומיות, ואינן מוגבלות להשפעותיהן של אימהות על ילדיהן. דפניות, למשל - סרטני שלולית זעירים - יכולות לפתח קוצים על גופן או מעין קסדות על ראשן (תלוי במין) כדי להתגונן מפני טורפים. לשם כך לא נדרש מפגש ממשי עם טורף; די בזיהוי החתימה הכימית שלו במים כדי שיתחמשו.

אסטרטגיות כאלה מאפשרות לאוכלוסיות להימנע מברירה טבעית אפילו לנוכח שינוי סביבתי קבוע, ולפיכך הן עשויות לעזור לנו להסביר דפוסים של חוסר שינוי אבולוציוני. במילים אחרות, חוסר השינוי מתרחש לא משום שהסביבה אינה משתנה, אלא משום שהאורגניזמים מגיבים בלי הרף לאותות של שינוי סביבתי.

ומה שאולי חשוב עוד יותר, אורגניזמים לא רק מגיבים במהירות לאותות צרה; לעיתים קרובות הם גם מקדימים את הצרה מלכתחילה באמצעות עיצוב פעיל של הסביבה לצורכיהם. בני האדם מומחים לכך, ובונים בתים, דרכים ומשקים כדי לשלוט בחשיפתם לגורמי לחץ א-ביוטיים, כדי לחסל טורפים ומתחרים וכדי לאגור משאבים. אבל אף שקנה המידה של מעשי האדם הוא קיצוני, כל האורגניזמים משנים את סביבתם במידה כלשהי - יהיו אלה בונים שמקימים סכרים מורכבים כדי ליצור לעצמם בריכות ציד או חיידקים שיוצרים שכבת ביופילם רירית כדי לחלוק חומרי הזנה ולהימנע מגורמים מזיקים בסביבתם.

למעשה, יכולתם של אורגניזמים לעצב את סביבתם לצורכיהם היא אפקטיבית עד כדי כך שהם מבודדים למדי מפני סוגים שכיחים של אתגרים סביבתיים. אבל להגנה קיצונית כזאת יש מחיר. גם למערכות איתנות יש מגבלות, והן עלולות להיפגע כאשר המערכת חווה שינויים סביבתיים החורגים מן הטווח הרגיל. המחשה אחת לכך הייתה קריסת שוניות האלמוגים באיים הקריביים בשנות השמונים של המאה הקודמת. טרם קריסתן המפתיעה נחשבו מערכות השוניות לעמידות מאוד ולבעלות יכולת להשתקם במהירות לאחר מפגע כמו הוריקן. שוניות בריאות קיימו סוגים רבים של אוכלי אצות, ואלה ריסנו את פריחת האצות. אבל דיג מופרז שנערך באזור עד אמצע שנות החמישים פגע במערכת האקולוגית והותיר את התפקיד הזה באופן כמעט בלעדי לקיפודי ים. בשל היעדר תחרות עם דגים, הקיפודים הלכו והתרבו, וגידול היתר באוכלוסייתם הוביל להתפרצות של מחלות בקרבם. כתוצאה מכך החלו האצות להתרבות ללא רסן, והדבר הוליד בסופו של דבר לקריסת כל המערכת האקולוגית של שונית האלמוגים. הדוגמה הזאת מראה שלאורך טווח זמן אבולוציוני המערכת פיתחה יציבות בפני סוג ההפרעה השכיח ביותר -

הוריקן - אבל נעשתה פגיעה לשינויים מעשה ידי אדם שגרעו ממנה סוגים רבים של אוכלי אצות. עודפות היא תנאי רווח לאיתנותן של מערכות אקולוגיות, אך העודפות בסוגי דגים חשפה את המערכת לפריחה של אצות, מפני שעד להיקף הדיג המופרז היא כנראה לא חוותה מעולם את הקושי המסוים הזה.



מעניין לציין שההפוגה בת מיליון השנים שזיהו ארנולד ועמיתיו בשינויים אבולוציוניים בממדי הגוף תואמת פחות או יותר את תוחלת החיים של מרבית המינים. עובדה זו עשויה לרמז ששינויים אבולוציוניים עיקשים דיים, כאלה שמתועדים במאובנים, מתחוללים אולי רק באירועים יוצאי דופן וקטסטרופליים ממש שדוחקים חברות שלמות אל מעבר לשיווי המשקל שלהן.

אירועים כאלה נדירים ומתרחשים רק אחת למיליון שנה לערך, אבל אז המערכת חייבת להשתנות או שתפסיק לתפקד. במונחים אבולוציוניים, פירוש הדבר להתפתח או להיכחד. על כן אי-אפשר להבין דפוסים מקרו-אבולוציוניים באמצעות חיבור פשוט של שינויים מיקרו-אבולוציוניים לאורך טווחי זמן ארוכים, משום שאירועים קטסטרופליים, למשל המטאור של צ'יקשולוב, אינם מתרחשים על בסיס הדרגתי קבוע. למעשה, כל הראיות מצביעות על כך ששינויים אבולוציוניים מהותיים עשויים להתרחש בהרף עין גיאולוגי, ולהתמיד רק כאשר מערכות מתמודדות עם הפרעה רצינית ונאלצות להתארגן מחדש.

היום אנו מצויים בזמן שיש המכנים אותו "ההכחדה ההמונית השישית". שינויים של הסביבה בידי האדם, מכיפות הקרח הנמסות בקטבים ועד לחתיכות מיקרו-פלסטיק המזהמות אפילו את הנביעות ההידרותרמיות העמוקות ביותר בים, שיבשו מערכות אקולוגיות בכל רחבי העולם. הדעות חלוקות בשאלה אם השיעור הנוכחי של הכחדת המינים מגיע לזה של הכחדות המוניות קודמות, אבל כך או כך, לא ברור אם האורגניזמים החיים כיום מסוגלים להגיב בגמישות לשינויים כאלה. יש המתנחמים בעובדה שלאורך ההיסטוריה של כדור הארץ, מחזורי אקלים גלובליים הופיעו על בסיס קבוע. מאובנים מעידים שמרבית המינים והחברות לא נכחדו או התפתחו, אלא פשוט העתיקו את משכנם ונדדו אחר אזור האקלים שלהם צפונה או דרומה.

אבל שינוי האקלים הנוכחי שונה. לא רק משום שההתחממות מתרחשת בקצב מהיר מאי פעם, אלא גם משום שהיא מתרחשת בהקשר של מערכת פגועה ממילא. שינוי האקלים לבדו לא בהכרח היה משפיע כל כך; אורגניזמים היו עשויים להסתגל אליו. אבל בהקשר של מערכות אקולוגיות שכבר הזדהמו, הותקפו בידי מינים פולשים וסבלו השחתה של בתי גידול, אזורים רבים בעולם עלולים לעמוד בנקודת מפנה שעבורה שינוי האקלים יהיה רק הקש האחרון.

ביולוגים אבולוציוניים תיעדו אינספור דוגמאות לשינויים אבולוציוניים מהירים שהתרחשו בעשורים האחרונים. מרבית השינויים הם במינים שמתמודדים עם הפרעה סביבתית קיצונית כלשהי, למשל פולשים ששחררו לבית גידול חדש או צמחים שהתאימו את עצמם במהירות לקרקע רעילה של פסולת מכרות. כל הדוגמאות הללו מעידות ששינוי אבולוציוני מהותי יכול להתרחש במהירות. הן מרמזות על כך שברירה טבעית איננה מעצבת מינים לאט ובהדרגה, אלא מתבטאת במיוחד בפרצי שינוי קצרים המתרחשים בעקבות הפרעה עמוקה.

כאשר המטאור של צייקשולוב היכה בכדור הארץ לפני 66 מיליון שנים נספו מיליארדי אורגניזמים, והניצולים נאלצו להגיב בגמישות וליצור מערכות חדשות של קשרים שיהיו טובים דיים כדי להבטיח את הישרדותם. במהלך אותה תקופה של התארגנות מחדש, אין ספק כי הברירה הטבעית מיינה בין תכונות ואסטרטגיות שהביאו תועלת ובין כאלה שלא הועילו. אבל מאין הגיע החידוש?

במהלך אירוע קטסטרופלי אי-אפשר להמתין זמן רב עד שיופיע באקראי השילוב הנכון של מוטציות. במקום זאת, התגובות הגמישות של אורגניזמים יחידים כנראה יצרו שפע חלופות חדשות, שעליהן הברירה יכלה לפעול. התגובות הגמישות הללו נעו מאסטרטגיות התנהגות חדשות, דרך חיבורים חדשים בין אורגניזמים שונים ועד פְּנוטיפים חדשים שנוצרו כתוצאה מדחק התפתחותי או מהכלאה בין מינים. אם כל אלה יכלו לעבור בתורשה, כי אז הווריאנטים החדשים יכלו לספק בסיס לשינויים אבולוציוניים מהירים שבסופו של דבר יובילו למצב יציב חדש. התוצאה הייתה קבוצות של מינים, תכונות ואינטראקציות שנבדלו לגמרי מאלה ששלטו בתקופת הדינוזאורים.

דפוס חוסר השינוי האבולוציוני שולט בהיסטוריה של החיים על פני כדור הארץ. אבל לעיתים קרובות מדי אנחנו מתמקדים בניסיון להסביר שינוי במקום להבין את המנגנונים שמשאירים את הדברים כמות שהם. למרבה האירוניה, לשתי הבעיות עשוי להיות מפתח יחיד. הבנה טובה יותר של האופן שבו אוכלוסיות שומרות על יציבות - ההיזון החוזר והמקדים, הגמישות המובנית והתגובתיות של המערכת, העודפות ומנגנוני העמידות - כל אלה עשויים לאפשר לנו לא רק להבין טוב יותר את חוסר השינוי האבולוציוני, אלא גם לנבא כיצד ישתנו האורגניזמים עם הפרעה במצבם היציב.

יחשוב מכך, ההתבוננות באבולוציה מבעד לעדשת הדינמיקה של המערכות משנה מהותית את האופן שבו אנחנו רואים את סיפור החיים על פני האדמה. אין זה סיפור של מאבק מתמיד על קיום; זהו סיפור שמתחולל בהפוגות, באתנחתות נטולות אירועים מיוחדים, שבהן רכיבי המערכות משמרים את הסטטוס קוו. השינוי מופיע רק בעקבות הפרעה כואבת וקיצונית.

ד"ר רנה דאקוורת' (Duckworth) היא חוקרת במחלקה לאקולוגיה וביולוגיה אבולוציונית באוניברסיטת אריזונה. מאמר זה פורסם לראשונה במגזין Aeon (אתר: aeon.co).

תרגום: יניב פרקש
ייעוץ מדעי: ד"ר גיל גרינבאום
