



אפקט כדור השלג

גרהם שילדס

במשך עשרות מיליוני שנים היה כוכב הלכת שלנו כדור שלג קפוא. הקרחונים הגיעו עד קו המשווה, והקור הקשה על קיומם של חיים. לא ברור מה גרם לתנאי האקלים יוצאי הדופן האלה, אך נראה שהם טבעו את חותמם בעיצוב מגוון החיים עלי אדמות. תנודות פרועות לאורך מיליוני שנים בין חום לקור, בין שפע חמצן למחסור בחמצן, חוללו מהפכה ביולוגית שהביאה להתגוננות המינים ושרטטה מחדש את עץ החיים. כך התחולל שינוי אבולוציוני קיצוני ומהיר להפליא, שהתאפיין במורכבות גדלה והולכת. עידן הקפאון היה זרז שסלל את הדרך למערכות אקולוגיות מורכבות, וייתכן שאף שיפר את היכולת של תאים לפעול בשיתוף פעולה. כולנו תוצרים של עידן הקרח

יולי 2026

כל שאנחנו מתרחקים מחופה המערבי של סקוטלנד כך הולכים פני האוקיינוס ונדמים למרצה, שנשדקת רק עקב טלטולי הסירה ותנועת הדולפינים הדולקים אחרינו. אנחנו שטים לעבר איים סלעיים ובלתי מיושבים הידועים בשם איי גארבֶּלֶאכְס (the Garvellachs). אפשר להגיע אליהם רק בימי הקיץ הסקוטי הקצר, ומאחר ששום יבשה אינה חוצצת בינם ובין צפון אמריקה, כדי לנחות עליהם - או ליתר דיוק, לזנק על סלעים חלקלקים ולקוות לטוב - אנו תלויים בחסדיהם של גלי הגיבוע האטלנטיים. באנו הנה לראות מערכת סלעים ייחודית בעולם, שמשמרת רגע היסטורי מדויק בעל משמעות גלובלית: הרגע שבו סביבה חמה וטרופית, גדושה צורות חיים שעושות פוטוסינתזה כמו כחוליות ואצות, התקררה בפתאומיות וכעת שורר בה קור תמידי.

דמיינו כוכב לכת שנאזק בקרח, קרחוניו נמתחים ברציפות מן הקטבים ועד קו המשווה. אירוע כזה, אילו התרחש על כדור הארץ של ימינו, היה פורש יריעות קרח שעוביין קילומטרים מן האוקיינוס הארקטי ועד איי הבהאמה. שלל מערכות אקולוגיות ומגוון אזוריים אקלימיים היו מתלכדים כולם למצב יחיד ואחיד, שכאילו נדון ליצור שממה. פעם טענו המדענים שמצב כזה של "כדור שלג" לא יכול היה בשום אופן להתקיים על פני כדור הארץ, משום שמצב של התקררות גלובלית לא יכול היה לשוב ולהתהפך. יתר על כן, הסברה הייתה שבעולם כזה כל החיים עלי אדמות, לרבות כל אבותינו הקדמונים, היו בוודאי

נכחדים. אבל ראיות חותכות יכולות לשנות אפילו את העמדות הנחרצות ביותר, ומה שפעם היה בלתי נתפס הוא היום הדעה הרווחת. היום מסכימים המדענים כי קרח אכן הגיע לקו המשווה. זה אירע לפחות בשני מקרים בפרק הזמן שהחל לפני 717 מיליון שנים והסתיים לפני 635 מיליון שנים, ובכל פעם נמשך המצב הזה כמה עשרות מיליוני שנים.

יתר על כן, אני ורבים מעמיתיי סבורים היום שלא זו בלבד שהחיים שרדו בעידן הקרח הזה, אלא שתנאים קיצוניים כאלה אולי אף סייעו בהפיכתם של החיים למורכבים יותר – תהליך שבסופו של דבר הוליד להתפתחות כל צורות החיים. אלמלא "כדור השלג ארץ", אף אחד מאיתנו פשוט לא היה כאן היום. ובסלעים הללו של איי סקוטלנד הנידחים טבועות הראיות המעידות על האופן שבו זה קרה.

לפני המפץ

במשך יותר ממאה שנים הוטרדו הגיאולוגים מהיעדרו של "פתיל ארוך" המוביל אל המפץ הקמבריוני – המפץ הדרמטי של מגוון צורות החיים, שאירע לפני כחצי מיליארד שנים. בהשוואה לתקופה שקדמה לו, בקמבריון התקיים מגוון אדיר של יצורים. כיצד יכלה מורכבות ביולוגית כזאת להופיע כאילו יש מאין? חידה זו, שמוסגרה לעיתים קרובות כ"דילמה של דרווין", הייתה הנימוק העיקרי נגד תיאוריית האבולוציה באמצעות ברירה טבעית, נימוק ששטחו גיאולוגים ספקנים כמו ג'ון פיליפס בספרו מ-1860 *Life on Earth*, שאותו הזדרז לפרסם מייד אחרי פרסום **מוצא המינים** (1859) של צ'רלס דרווין. אף שלימים נמצאו מאובנים רבים הקודמים לקמבריון, הפתאומיות של המפץ הקמבריוני עדיין מעוררת שאלות לא מעטות.

בימי דרווין, רק מעטים העלו בדעתם את האפשרות שכוכב הלכת כוסה פעם בקרח, ועוד פחות מכך – שתנאים כאלה מילאו תפקיד מפתח בקיומנו שלנו. כדי שניטיב להבין כל קשר אפשרי כזה, עלינו לצלול אל תוך מה שקרה בעידן כדור השלג ארץ, או כפי שאנו הגיאולוגים אוהבים לכנותו: תת-התור קריוגן. הקריוגן היה חלק מהעידן המכונה פרוטרוזואיקון, ואחת התקופות האחרונות לפני הקמבריון.

לאורך חלק גדול מהקריירה שלי עסקתי בבחינת ראיות פיזיות למראהו של כוכב הלכת בימי הקמבריון, ראיות שחקוקות בסלעים תחת רגלינו. במשך שלושה עשורים שאלתי שאלות כמו כמה זמן נמשך עידן הקרח, האם הוא באמת היה גלובלי בהיקפו, ומה היו השלכותיו על החיים. בשנים האחרונות הפנית את תשומת ליבי לאיי גארוולך שבסקוטלנד, ארכיפלג שחקרתי בראשית לימודיי האקדמיים אבל לא שבתי לבקר בו עד מגפת הקורונה, שסיכלה את האפשרות לנסוע רחוק יותר.

חקירת מחשופי הסלע באיי גארוולך איששה חשדות ישנים: סדרה יוצאת דופן של סלעים שמשתרעת מאירלנד ועד סקוטלנד – תצורת פורט אסקייג – משמרת ככל הנראה את התיעוד השלם ביותר בעולם לכדור השלג ארץ, ובעיקר את הרגע שבו הכול התחיל. עידן הקרח הקריוגני הראשון, העידן הקסטרטיאני, החל לפני כ-717 מיליון שנה, התפרש על פני כל כדור הארץ ונמשך כ-57 מיליון שנים

קפואות. התקררות שנייה, שמכונה עידן הקרח הקרינואי, נמשכה מלפני כ־645 מיליון שנים ועד לפני 635 מיליון שנים, והיא מציינת את סוף תת־התור הקריוגני. בשתי התקופות הללו הגיעו הקרחונים עד קו המשווה.

בניגוד לאתרים אחרים, שבהם כוח השחיקה של קרחונים קדמונים מחק את הראיות המכריעות, בסקוטלנד נותרו בסלעים עדויות לרגע המדויק שבו האקלים הטרופי נכנע לראשונה לפלישת הקיפאון העז. הסיבה לכך היא שעקב נדידת היבשות, סקוטלנד שכנה אז בקו רוחב נמוך הרבה יותר מזה שבו היא נמצאת היום. פרט לכך, שכבות סלעי המשקע השתמרו שם היטב. זה המקום היחיד שבו אנחנו יכולים ללכת עקב בצד אגודל לאורך כמעט שמונים מטרים של שכבות סלע שמייצגות את חלוף הזמן האיטי, ולראות כיצד האקלים השתנה והפך מחופים חמימים לשממה קרחונית.

סימנים ראשונים להתקררות ניכרים במספרים הגדלים והולכים של "סלעי נפולת" (dropstones) ומצבורי חצץ, אשר בהכרח נפלו מקרחונים שנסחפו בקדמת כיפות הקרח המתרחבות. הופעתה של קרקע הנושאת סימני קיפאון מגלה סביבה שהלכה ונעשתה קרה ושוממת יותר, ואשר התחלפה בהדרגה בקרחונים ואז ביריעות קרח מסיביות. חלקן היו אדירות כל כך, בעובי של קילומטרים אחדים, עד שנשאו עימן כמויות עצומות של שפוכת סלעים שנעקרה מן המשטח הפחמתי היסודי. הדוגמה הטובה ביותר לכך היא "הבועה", גוש עצום של סלע פחמתי לבן שנעוץ היום בליבה של "עיסה" עשויה פיסות סלע קטנות יותר. השכבות שפעם ציינו את קרקעית הים האופקית התעוותו כל כך במהלך הסעתן בידי הקרחונים עד שהיום הן ניבטות אל על, משום שהסלע המוצק קופל אל תוך עצמו כמו פלסטלינה. באנלוגיה מודרנית, דמיינו ששונית המחסום הגדולה של אוסטרליה הייתה מונפת מן הים ואז נדחסת עמוק אל תוך יריעות הקרח המתפשטות של אנטארקטיקה.

על אף פראותו של הים כאן, לאורך הדורות התיישבו בני אדם באיי גארוולך, אף שהיום הם אמנם לא מיושבים. ברנדן הקדוש, אחד הספנים המפורסמים בהיסטוריה, אפילו הקים בהם מנזר במאה השישית לספירה, בשובו ממסעות שבהם חצה את האוקיינוס האטלנטי. באי איילך אן ניב (Eileach an Naoimh), אשר יש המכנים אותו האי הקדוש, אפשר עדיין לראות בקתות כוורת, או "קלֹכְאָן" – מבני מדיטציה בצורת איגלו עשויים גושי אבן, שהוקמו בידי דורות של נזירים מאז ימי הנזיר קולומבה. הקירות המחוספסים של הבקתות הללו נבנו כולם ממִּוֹנֶת קרחונים מאובנת, שרידים קדמוניים של כדור השלג ארץ. ה"בועה" יוצאת הדופן בוודאי הפליאה לאורך מאות שנים נוסעים רבים, שלא היה להם מושג כיצד נוצרה.

שלמות התיעוד של סלעי המשקע באיי גארוולך משמעותית מבחינה נוספת: בזכותה הם מועמדים מצוינים להגדרת ראשיתה של תקופה גיאולוגית חדשה. החלטות כאלה מתקבלות לעיתים נדירות בלבד, ורק אחרי שנים של דיונים בין גיאולוגים. מרגע שהדבר אושרר בידי האיגוד הבינלאומי למדעי הגיאולוגיה (IUGS), אפשר לקבוע "גבול שכבה" חדש (Global Boundary Stratotype Section and Point). באופן בלתי רשמי, הגבולות הללו קרויים "יתדות זהב", כי בכל פעם שמיקום מסוים מוכרז כסטנדרט עולמי, נקבעים במחשופי הסלע ברוב טקס לוחות מתכת דקורטיביים. אבל לא כל המיקומים עוברים את המבחן: לאחרונה נדחתה ההצעה להגדיר בקנדה גבול שכבה כזה לעידן האנתרופוקן.

לסוף הקריוגון, לעומת זאת, כבר יש גבול שכבה מוכרז, המציין את ראשית האדיקר – תקופה גיאולוגית שידועה בתגליות רבות של מאובני בעלי חיים קדמוניים. אבל לראשית הקריוגון אין עדיין יתד זהב משלו. גבול השכבה של התקופה הקריוגנית יעמוד להצבעה במהלך 2026, וייצג את המעבר אל כשבעים מיליון שנות קיפאון שבמהלכן התרחשה רק תקופה יחידה, קצרה יחסית, של אקלים חמים.

האש והקרח

כיצד התחולל הקיפאון העמוק הזה? היה זה בלי ספק רגע יוצא דופן בהיסטוריה הגיאולוגית, ותופעות יוצאות דופן תובעות הסברים יוצאי דופן. אחד ההסברים הללו קשור בארגון הבלתי רגיל של היבשות באותה תקופה. לאורך ההיסטוריה של כוכב הלכת ארץ, הלוחות הטקטוניים התנגשו זה בזה ויצרו יבשות-על. עד לקריוגון התקבצה בהתמדה יבשת-על יחידה בשם רודיניה. אבל בסופו של דבר נעשתה רודיניה גוש יבשתי עצום וצחיח שהזכיר, לאחר עידן ועידנים של שחיקה ובליה, גרסה אדירה של אוסטרליה. בתקופה זו בתולדות כוכב הלכת, שהייתה כה שקטה עד שיש המכנים אותה "המיליארד המשעמם", שרשרות הרים היו נמוכות ונדירות. אבל אז הגיע רגע השינוי. רודיניה הייתה עתידה להתפרק, וטבורה המתפקע ציין את האתרים שבהם יתפרצו הרי געש ויולידו אוקיינוסים עופריים ומחזור חדש של יבשות-על.

מעט לפני שיריעות הקרח החלו לעטוף את כדור הארץ, סקוטלנד שכנה בשולי הגוש היבשתי הקרוי לאונְרְנְטִיָה, בסמוך לקצה של רודיניה. פירוש הדבר היה שהיא הושפעה עמוקות מהפחתת הלוחות הטקטוניים (subduction) מתחת לשולי יבשת-העל. את הסביבה הטקטונית ההרסנית הזאת אפשר לזהות לפי סוגי הסלעים והמינרלים המרכיבים את שכבות סלעי המשקע השוכנות מתחת לאופק הקרחונים בסקוטלנד ובאירלנד. בעקבות ההתקרחות החלו חומרי משקע לזרום פנימה כאשר רודיניה התקמטה כלפי מעלה ואז נקרעה והולידה אגן אוקיינוס חדש. לפני שאוקיינוסים נוצרים, מאגמה עולה וממלאת חללים תת-קרקעיים ובסופו של דבר גם הרי געש. סלעים געשיים ברחבי צפון אמריקה – שגם היא הייתה פעם חלק מלאורנטיה – הם עדים דוממים לעבר הסוער הזה. ומה שחשוב במיוחד הוא שאפשר לתארך אותם ולהראות שה"שבירה" הזאת החלה רק כמיליון שנים לפני ההתקרחות. זוהי ראייה מכרעת, גם אם נסיבתית, לכך שהתפצלות היבשת עשויה הייתה לחולל את ההתקררות. הרי געש אמנם פולטים גזי חממה, אבל אפקטים כאלה הם קצרי טווח בהשוואה להתקררות המתרחשת כאשר הבלה שנופלה עוברת בליה: הבליה הכימית של לבה טרייה היא תהליך שסופח פחמן דו-חמצני מן האטמוספירה (ולכן פיזור אבקת בזלת באדמות חקלאיות עשוי לתרום למיתון ההתחממות הגלובלית). הרעיון כי בליה של בזלת היא שגרמה לאירוע של כדור השלג ארץ נקראת לעיתים קרובות "השערת האש והקרח".

למודל האש והקרח יש היתכנות, אבל הוא בכל זאת מעורר שאלה גדולה: יבשות-על אחרות, כמו למשל היבשת החדשה יותר פאנגיאה, התפצלו אף הן בלי שהדבר יוליך להתקרחות. אם התפצלות של יבשת-על חוללה את כדור השלג ארץ, מדוע קרה הדבר רק פעם אחת? כנראה חסר משהו בסיפור.

כוכב לכת זר

כדור השלג ארץ הוא אירוע כה חריג עד שהוא קורא תיגר על "עקרון האחידות", שהושרש עמוק בתודעתם של גיאולוגים מאז ימי דרווין וצ'רלס לָיִל. סטודנטים לומדים עד היום ש"ההווה הוא המפתח לעבר", ומגלים רק בדיעבד שהאמירה הזאת לא תמיד תקפה ושלפעמים מוטב לאמץ דמיון פורה יותר. לו יכולנו לחזור בזמן אל השנים הגורליות ביותר בתולדות קדמונינו ולראות כיצד נוצרו בעלי החיים הראשונים, היינו מגלים כוכב לכת זר לא פחות ממאדים. הקריוגן, והאדיקר שהגיע מייד אחריו, פשוט אינם מתיישבים עם האופן שבו אנו מבינים את מנגנוני הפעולה של כדור הארץ בימינו.

נחשוב על האטמוספירה: הקריוגן והאדיקר היו שניהם תקופות של אי־יציבות אקלימית ניכרת, שמקורה היה ככל הנראה בריכוזים גבוהים מאוד של פחמן דו־חמצני באטמוספירה ואחריהם נקודות שפל קיצוניות באותה מידה, ואלה הובילו פעמים רבות להתקרחות. התנהגות תנודתית כזאת מצביעה על קיומם של מנגנוני משוב חיובי חזקים במיוחד, שאינם דומים לשום דבר שאירע בכדור הארץ קודם לכן או מאז. ייתכן שאי־היציבות הזאת חושפת את הסוד שמאחורי התעוקה האקלימית של כדור השלג ארץ. בימים ההם, דחיפה קלה בכיוון מסוים עלולה הייתה להוביל להתקררות או התחממות בלתי נשלטת. מנגנוני המשוב השלילי, כדוגמת אלה המייצבים את האקלים בימינו, היו בוודאי כה חלשים עד שההתקררות התקדמה לפעמים מהר מכדי שיספיקו להיכנס לפעולה.

תיעוד איזוטופים של פחמן בסקוטלנד מתיישב היטב עם הפרדיגמה החדשה הזאת. כאשר פחמן דו־חמצני מסולק מהאטמוספירה ונטמן בקרקע כחומר אורגני קל מבחינה איזוטופית, היחס בין פחמן 13 לפחמן 12 באוקיינוסים גדל, והחתימה האיזוטופית הכבדה הזאת עשויה להופיע בסלעי המשקע כסימן להתקררות גלובלית. מנגד, אם חומר אורגני חומק מהטמנה, שיעור הפחמן הדו־חמצני באטמוספירה עשוי לעלות ולהוביל להתחממות גלובלית. בעשור הקודם הלכה והתבהרה העובדה שהתקרחויות קדומות התרחשו אחרי אקלימים חמים ביותר, חמים עד כדי כך שכמעט שום חומר אורגני לא הספיק להיטמן בשום מקום על פני כדור הארץ, משום שקצב הריקבון האורגני עולה אקספוננציאלית עם הטמפרטורה. וכאשר חומר אורגני אינו יכול להיטמן, אפקט החממה מעלה את הטמפרטורות עוד ועוד. זו לולאת משוב חיובי קלאסית: טמפרטורות גבוהות יותר פירושן פחות הטמנה, וזו בתורה מחוללת טמפרטורות גבוהות עוד יותר. תנודות איזוטופיות משמשות ראיה חזקה לכך שההתקרחויות התפתחו כאשר התנאים נטו אל עבר הטמנה רבה יותר של חומרים אורגניים, כפי שמעידים השיעורים הגבוהים יותר של פחמן "כבד" בסלעי המשקע.

ניתוח איזוטופי הפחמן בסלעים של איי גארוולך מאפשר לנו לראות את שלבי ההתפתחות של השינוי הזה: החזרה לפחמן כבד מופיעה בדיוק במקביל לראיות ההתקררות הראשונות מסלעי המשקע. כצפוי, זו בדיוק שכבת סלעי המשקע המועמדת ל"יתד הזהב" שיציין את ראשיתו הרשמית בכדור הארץ של הקריוגן. התפצלותה של יבשת רודיניה בהחלט הייתה עשויה להיות הזרז להתקררות, אבל טבעה המאוד לא יציב של מערכת כדור הארץ הוא שגרם להשלכות הדרמטיות של האירוע.

חיים בין נקודות קיצון

אם כך, כיצד השפיעו התנודות הללו על החיים? החיים, שעד אותה עת שגשגו בשולי האוקיינוס, נדרשו לשרוד לא רק קיפאון עמוק, אלא גם את תנאי החממה הקיצוניים שהתפתחו לפני ואחרי כל צניחה שכזו בטמפרטורות. בדומה לרומאים הקדמונים, שהיו עוברים במרחצאות שלהם בין הפריגידריום והקלדריום, גם צורות החיים השונות נדרשו להתמודד עם זעזועים חוזרים ונשנים למערכת, וכך נוצר רצף של צווארי בקבוק שלא רק האיץ את קצב השינוי האבולוציוני אלא בעיקר קבע מי ישרדו ויהפכו לאבותינו הקדמונים.

רק בשנים האחרונות הבנו שנקודות קיצון אקלימיות מאפיינות את כל פרק הזמן שמן הקריוגן ועד למפץ הקמבריוני, ושתקופות הקיפאון של כדור הארץ מייצגות רק את שתי הדוגמאות הקיצוניות והממושכות ביותר של התקררות גלובלית. הנקודה המכרעת היא ששינויים בדפוסי ההטמנה האורגנית היו משפיעים לא רק על האקלים אלא גם על זמינות החמצן, משום שהטמנת חומר אורגני מאפשרת לחמצן המשתחרר בתהליכי פוטוסינתזה להישאר באטמוספירה. נראה הגיוני אפוא שרמות החמצן אף הן חוו תנודות פראיות בתקופות הגורליות הללו, דבר שחולל גאות ושפל גם בחיים עלי אדמות. החמצן חשוב לכל בעלי החיים המבצעים חילוף חומרים אנרגטי, כפי שנדרש לבניית שלד, שריר ואיברים שצורכים אנרגיה רבה. בלי חמצן שום יצור אינו יכול לזוז, לגדול, או אפילו לחשוב. יש אפוא חשיבות גדולה לכך שהקריוגן מפריד בין עולם שבו יש רק פרוטיסטים חד-תאיים ובין הרב-תאיות המורכבת יותר, המאפיינת את בעלי החיים האמיתיים שהופיעו אחרי ההתקרחות הגלובלית.

אף שנקודות הקיצון הטיפוסיות לתקופת הביניים הזאת – במאפייני האקלים, בשיעורי החמצן ובמאפייני הסביבה – עשויות אולי להסביר התגוננות ביולוגית באמצעות מחזורים נשנים של התפשטות והכחדה, הן אינן מסבירות באמת כיצד נבחר הנתבי של מורכבות גדולה יותר, בפרט בהתחשב במיליארד השנים הקודמות, שהתאפיינו בהתפתחות מועטה בלבד. נשוב אפוא לשאלתנו הקודמת: כיצד תמך כדור השלג ארץ בהתפתחותם של חיים מורכבים?

מורכבות גדלה והולכת

ההתקרחויות העמוקות זעזעו בוודאי את החיים שהתרגלו לאקלימים טרופיים, אבל מרגע שהתבססו הן נעשו במהירות לנורמה. כל מה שחי על פני כדור הארץ בתקופה זו נאלץ להסתגל בסופו של דבר לתנאי קור ויובש קיצוניים. אף שהמידע שמספקים לנו מקבצי מאובנים ממרבית הקריוגן אינו עשיר במיוחד, אנו יודעים כי רבים מסוגי האורגניזמים שעדיין חיים היום שרדו אז במקומות שונים, הגם שאיננו יודעים היכן. אחד הדברים שלמדנו בשנים האחרונות הוא שכוכב לכת שקפא כולו אינו בהכרח חסר חיים.

לעיתים קרובות אנו מדמיינים את כיפות הקרח כשממות צחיחות, אבל בפועל אין זה נכון. אורגניזמים רבים שמתמחים ברבייה איטית מתקיימים ב"נאות מדבר" מבודדות על גבי הקרח. בורות קריוקוניט הם דוגמה טובה לכך. בורות קריוקוניט נוצרים כאשר סחופת רוח, כמו למשל אפר געשי, סופגת חום מן

השמש ומפשירה חלקת קרח קטנה, וזו פועלת כמפלט זעיר ומבודד עבור מגוון מפתיע בגודלו של צורות חיים. כיום, בורות קריוקוניט מספקים בית לכל קבוצות החיים הגדולות: חיידקים, אצות ואאוקרואיוטים, לרבות פרוטיסטים שמעכלים חומר אורגני, וכן כמה מערכות של בעלי חיים חסרי חוליות, ובפרט דובוני מים (טרדיגרדה) ורוטיפרים חסונים. יש תיעוד מאובנים של פרוטיסטים דמויי אמבה שהופיעו לפני ראשיתו של עידן הקרח הקטורטיאני; אלה עתידים היו להיעשות דודניהם של כל בעלי החיים, ועל כן בוודאי שרדו את כל הקריוגן. עם זאת, ייתכן שלעולם לא יימצאו ראיות מאובנים מתקופת ההתקרחות עצמה, מאחר שנעלמו עם הקרח.

אורגניזמים מורכבים להפתיע התקיימו גם לפני הקרח. אנו בעלי החיים אמנם מתאפיינים באיברים בעלי הקישוריות המורכבת ביותר, אבל איננו היצורים היחידים המתאפיינים ברב־תאיות. אפילו צורות חיים חד־תאיות כמו חיידקים יכולות ליצור מושבות בנות מיליוני תאים זהים. גם התמיינות תאים אינה ייחודית לנו, וכנראה התפתחה יותר מפעם אחת לאורך ההיסטוריה של כדור הארץ: בצמחים יבשתיים (אמבריופיטים), באצות ירוקות (כלורופיטים), באצות אדומות (רודופיטים), באצות חומות (הטרוקונטופיטים), ולפחות פעמיים בפטריות. למרבה הפלא, כמה מן הקבוצות הללו התקיימו הרבה לפני הקריוגן. למעשה, חלק מקבוצות הפטריות, האצות הירוקות והאצות האדומות, וגם האמבות שהוזכרו לעיל, כולן שרדו בלא פגע את כדור השלג ארץ, בהסתמך על כך שמאובנים קדם־קריוניים זהים בדרך כלל לקרוביהם החיים. יתר על כן, ראיות מולקולריות מעידות שאצות, ואף אבותינו בעלי החיים, עברו התגוננות גם במהלך הקריוגן וגם מייד לאחריו. הייתה זו בלי ספק תקופה של שינוי אבולוציוני קיצוני ומהיר להפליא, שהתאפיינה במורכבות גדלה והולכת.

נראה שהקריוגן באופן כללי, ובפרט האירוע של כדור השלג ארץ, לא היה מבוי סתום אבולוציוני, אלא דווקא זרז ששלל את הדרך למערכות אקולוגיות מודרניות. הופעתה של רב־תאיות מורכבת בעקבות כדור השלג ארץ הניחה יסודות לרשת החיים המגוונת והמקושרת שמעצבת את המערכות האקולוגיות של כדור הארץ היום.

ובכל זאת יש עדיין תעלומות. בבעלי חיים רב־תאיים, תאים יחידים צריכים להקריב לטובת הכלל, ובמקרים רבים תסוכל גדילה של תא יחיד שבאה על חשבון האורגניזם. כדי להשיג אלטרואיזם מובהק כל כך יש צורך בחלוקת עבודה, בהקצאת משאבים מספיקים ובקיומן של סביבות מתאימות, כבכל עיר מנוהלת היטב. האם כדור השלג ארץ הפך את שיתוף הפעולה הבין־תאי לאפשרות ממשית יותר בהשוואה, למשל, לקיום חד־תאי או לצורות פשוטות יותר, מושבתיות, של רב־תאיות? בעניין זה קשה עדיין לקבוע מסמרות, אבל אפשר אולי ללמוד משהו מן האורגניזם הקרוי עובש רירי (slime mold).

התפתחותה הספונטנית של רב־תאיות בפרוטיסטים חד־תאיים נחשבת בדרך כלל תגובה לתנאים סביבתיים קשים שהופיעו בפתאומיות. במחזור החיים של עובש רירי תאי, אשר כיום אפשר למוצאו הן באזור הארקטי הן באזור האנטארקטי, תאים זהים מתקבצים יחדיו כמושבה ויוצרים גוש רב־תאי שמזדחל לאיטו לעבר האור. הגוש הופך במהרה לגוף פרי, ואז פולט את נבגיו כדי שיקימו מושבות חדשות

במקומות אחרים. נדמה אפילו שחלק מן התאים מקריבים עצמם ונעשים גבעול מעוצה, והכול למען טובת הכלל. ההתנהגות החייתית-לכאורה היא אסטרטגיה מצוינת להבטחת הישרדות במערכות אקולוגיות קשוחות ומבודדות שסובלות ממחסור בחומרי הזנה. הייתכן שגושים כאלה מראים לנו את הצעדים הראשונים אל בעלי החיים שהיו אבותינו הקדמונים? הייתכן שבימי כדור השלג ארץ נאחז בקרח יצור מסוג דומה?

בשובנו מאיי גארוולך, מותשים אחרי יום של מהלומות פטיש בסלע ומלוחים מרסס הים, מצאנו זמן לחשוב על האופן שבו המעבר המדהים הזה להתקרחות, לפני 717 מיליון שנים, היה הרבה יותר מאשר אירוע אקלימי חריג. תנודות פרועות לאורך מיליוני שנים בין חום לקור, בין שפע חמצן למחסור בחמצן, חוללו מהפכה ביולוגית ששרטטה מחדש את עץ החיים. שיתוף פעולה גובר בין תאים הוביל בסופו של דבר לחילופי חומרים אנרגטיים יותר, זוללי חמצן, ולמרוץ חימוש שהפך למפץ הקמבריוני.

לאורך החוף הסלעי הזה יכולנו לעקוב צעד אחר צעד, שכבת סלע אחת אחרי השנייה, אחר שבעים מיליון שנה שבהן החיים נאלצו להסתגל לקור קיצוני. תנאי הקיפאון טיפחו את הופעתה ההדרגתית של מורכבות ביולוגית, אבל ההפשרה היא שסיפקה ככל הנראה את המפתח. מי שצועד לאורך החוף באזור הזה רואה את הסלעים משתנים פתאום: אין פה כל ראייה לקרח, וגם לא בשום מקום אחר על פני כדור הארץ לפני 635 מיליון שנה. זו ראשיתו של האדיקר. הנסיגה הקטסטרופלית של יריעות הקרח והעלייה חסרת התקדים בגובה פני הים, שאירעו במהירות בתוך אלפי שנים בודדות, השיקו מאבק הישרדות בעולם שהלך והתחמם, הלך והתחמצן. במרוץ הזה, נראה כי האבות הקדמונים שלכם, שלי ושל כל דודנינו בעלי החיים הם שניצחו.

גרהם שילדס הוא פרופסור לגיאולוגיה ביוניברסיטי קולג' בלונדון. ספרו האחרון – *Born of Ice and Fire: How Glaciers and Volcanoes (and a Pinch of Salt) Drove Animal Evolution* (2024) – בוחן את הראיות לכדור השלג ארץ ושואל כיצד האירוע יוצא הדופן הזה עשוי היה לסלול את הדרך למורכבות ביולוגית גדלה והולכת. המאמר המקורי התפרסם במגזין Aeon תחת הכותרת "The Snowball Effect".

תרגום: יניב פרקש
