

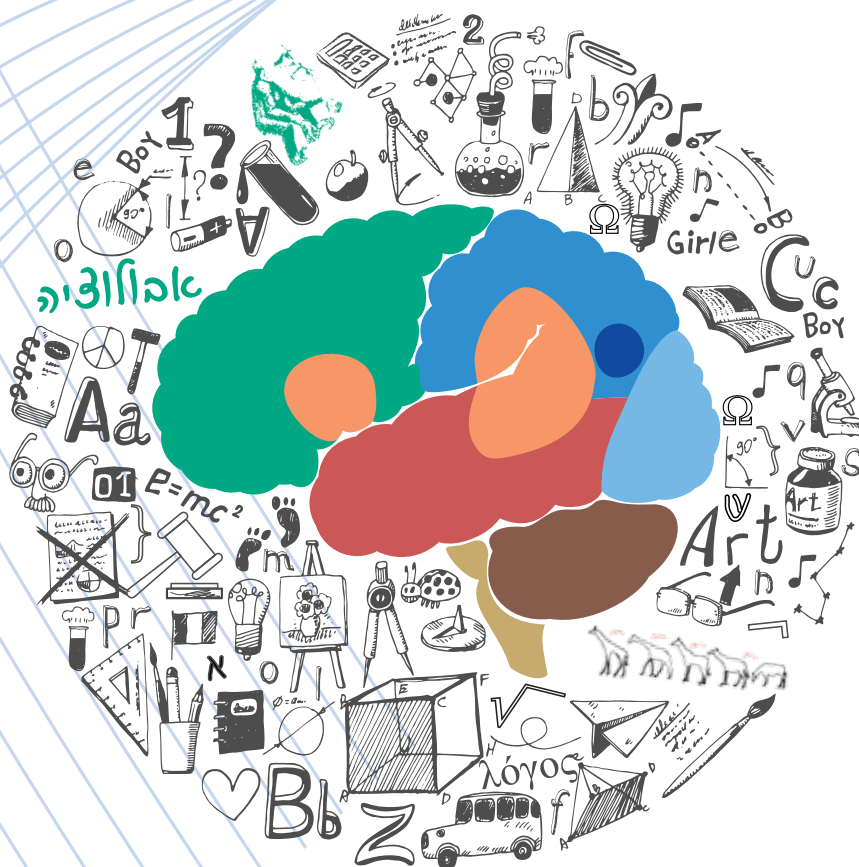
אבולוציה



פרופ' עמרם אשל

הפקולטה למדעי החיים
אוניברסיטת תל אביב

אבולוציה



פרופ' עמרם אשל

הפקולטה למדעי החיים
אוניברסיטת תל אביב

"האבולוציה היא אחד הדברים החכמים ביותר שברא אלוהים"
מאיר שלו, "גינת בר", עמ' 131

אבולוציה

כתיבה: **פרופ' עמרם אשל** הפקולטה למדעי החיים אוניברסיטת תל אביב
מנהל פרויקט **כדאי לדעת**: פרופ' אילון סולן
עריכת לשון: ד"ר דנה ברעם
רכזת אדמיניסטרטיבית: מיכל זוהר
עיצוב גרפי ועימוד: ניצן-שמיר מעצבים
איורים: מירל גולדנברג
איור עטיפה: shutterstock
כתובת אתר **כדאי לדעת**: goodtoknow.tau.ac.il

תצלומים: ויקיפדיה

תודות

המחבר מודה לפרופסור דוד וול מבית הספר לזואולוגיה ולפרופסור אילון סולן מבית הספר למדעי המתמטיקה מאוניברסיטת תל-אביב על הערותיהם החשובות. המחבר מודה לד"ר עומר חורש מתיכון הראשונים בהרצליה על ההירתמות למען הפרויקט, ולתלמידים שקראו גרסה מוקדמת של החוברת והציעו הצעות לשיפור: אור כהן, אלה בן אריה, אלון אביטל, גיא הלר, ים קדם, מיקה בר חיים ותומר סחייק מתיכון הראשונים בהרצליה, נמרוד קליינברג (מתכנית אלפא מחזור ד') ואסף גל (מתכנית אידאה מחזור א') מאוניברסיטת תל-אביב לנוער.

זכויות הקניין הרוחני, לרבות זכויות היוצרים והזכות המוסרית של היוצרים בחומר זה, מוגנות.

השימוש בחוברת, שמירתן במאגרי מידע והפצתן מותר לצורך שימוש לא-מסחרי בלבד. בעת שמירה במאגרי מידע, יש לציין במפורש את שיוך החוברת לפרויקט "כדאי לדעת" ולצורך קישור לאתר הפרויקט. השימוש לכל מטרה מסחרית ויצירת חומרים נגזרים אסורים ללא קבלת רשות מפורשת בכתב מהנהלת הפרויקט.

4	מגוון היצורים החיים על פני כדור הארץ - כל אחד בסביבה שהוא מותאם לה
6	עדויות ממאובנים: שינויים במגוון היצורים
8	שושלות היצורים החיים וקווי ההתפתחות שלהם
11	תכונות העוברות בתורשה ותכונות נרכשות שאינן עוברות בתורשה
12	יצורים חדשים הם תוצאה של תהליך ברירה
14	המידע על התכונות העוברות בתורשה מאוחסן בגנום
15	שינויים במבנה הגנום שמקורם בתהליכים הקשורים לרבייה ובתהליכים אקראיים
17	תהליך הברירה הטבעית - יתרון לבעלי צאצאים בוגרים רבים
19	האבולוציה - תוצאה של שינויים בגנום, לחצי ברירה משתנים וברירה טבעית
20	תהליך יצירת המינים והחלוקה הסיסטמטית
22	סלקציה לעמידות לקוטלי עשבים - עדות לאבולוציה המתרחשת לנגד עינינו
23	רעיון האבולוציה ושאלת מוצא האדם
25	צ'רלס דארווין ואלפרד ראסל וולאס - הוגי תורת האבולוציה
27	סיכום
28	לקריאה נוספת

מגוון היצורים החיים על פני כדור הארץ

כל אחד בסביבה שהוא מותאם לה

כשנתבונן בטבע סביבנו נבחין בהמוני יצורים - צמחים ובעלי חיים - השונים זה מזה, ואנחנו יודעים שיש עוד יצורים רבים, למשל חיידקים ווירוסים, הנסתרים מהעין. שפע זה של יצורים הוא מגוון החיים בטבע, והוא קיים בכל פינה על פני כדור הארץ.

הדעות חלוקות באשר למספרם של מיני היצורים החיים כיום, אך כל החוקרים העוסקים בכך מסכימים שמדובר במיליוני מינים שונים זה מזה. הקושי לקבוע את מספרם המדויק נובע מסיבה פשוטה: איננו בטוחים שאנחנו מכירים כבר את כל המינים, שכן מדי שנה מתגלים מינים חדשים שלא תוארו בעבר ולא ניתן להם שם. יש הערכות שונות הנוגעות למספר המינים שעדיין איננו מכירים.

מההתבוננות בטבע אנחנו מבחינים שכל יצור נמצא בסביבת החיים שהוא מותאם לה. ההתאמה מתבטאת בכל תכונותיו של היצור החי: במבנה גופו, בצבעיו, בצורת ההתנהגות שלו, במזון שהוא זקוק לקיומו, בדרך הרבייה שלו ובתכונות נוספות.

בחוברת זו נעסוק בשאלה: כיצד נוצר מגוון עצום זה של היצורים על פני כדור הארץ?

בכל התרבויות האנושיות יש סיפור העוסק בבריאת העולם והטבע, ויש בכך כדי להעיד ששאלה זאת העסיקה את בני האדם מאז שהכירו את הטבע סביבם. העיסוק התחיל מוקדם בהתפתחות האנושית, עוד טרם התפתחה החקלאות, כשבני האדם ליקטו את מזונם ואת צרכיהם בטבע. כבר אז הם הכירו במגוון הגדול של היצורים וידעו שלכל צמח ולכל בעל חיים יש תכונות מיוחדות, למשל: מגרעיני החיטה והשעורה אפשר לאפות לחם ואילו מפירות הזית אפשר להפיק שמן, לכבשים יש פרווה עבה ומחממת ומסיבי הפשתה אפשר לטוות חוטים ולארוג בדים קלים. מתוך הצורך והרצון להתקיים ולשפר את תנאי המחיה הכירו בני האדם את היצורים סביבם ואת תכונותיהם: היכן ומתי אפשר למצוא כל אחד, מתי כל צמח מבשיל את פירותיו ומי הם בעלי החיים הניזונים ממנו. מאוחר יותר, כשהחלו בני האדם לעסוק בחקלאות, הם הכירו גם את התנאים הנדרשים לכל צמח ולכל בעל חיים, כדי שיוכלו להפיק מהם את התוצרת הדרושה.

ההסבר שניתן בעת העתיקה לשאלת היווצרותו של המגוון העשיר הזה ולקשר שלו לסביבה הוא: כך ברא את העולם אותו כוח עליון אשר ברא את השמים ואת הארץ. כל עם קרא לכוח עליון זה לפי אמונתו: אלוהים לפי האמונה היהודית, האל אשור בארם-נהריים, האל המצרי אטום, אִירִינוֹמָה אלת היוונים הקדמונים, האל הרומי יופיטר, טיאן לפי המסורת הסינית, וכך הלאה - כל תרבות והכוח העליון שבו האמינה.

ההסבר שלפיו היצורים בטבע הם חלק ממעשה הבריאה שיצר את בני האדם ואת כל העולם שסביבם היה פשוט והגיוני. בגלל חשיבותה של האמונה הדתית בקרב חברות בני האדם לאורך ההיסטוריה, נחשב כל ערעור על האמונה בבריאה האלוהית לערעור על כל עיקרון של דת. היו דתות שבהן ערעור על אמונה זאת נחשב לכפירה שעונשה מוות. גישה זו מנעה כל שינוי בתפיסה של הבריאה האלוהית במשך מאות רבות של שנים. גם כיום, בעיני רבים כל מחקר בשאלת היווצרותו של מגוון החיים הוא ערעור על עקרונות הדת, אף שלאמיתו של דבר אין זה כך.

אם נקבל את סיפור הבריאה כפשוטו, נצטרך להאמין שמאז ומתמיד היו על פני כדור הארץ אותם יצורים שאנו רואים עכשיו סביבנו. נאמין גם שכל יצור ויצור נברא יחידי בפני עצמו, ואין בהכרח קשר בין היצורים השונים.

בפרקים הבאים נבהיר את העובדות שהביאו את החוקרים לחשוב שאי-אפשר לקבל את סיפור הבריאה כפשוטו. נסביר גם מדוע עובדות אלו הביאו אותם לגבש את העקרונות של תורת האבולוציה, המקובלת כיום על אנשי המדע כהסבר הנכון להופעת מגוון החיים על פני כדור הארץ.



עדויות ממאובנים: שינויים במגוון היצורים

חוקרי כדור הארץ גילו שכדור הארץ נוצר לפני ארבעה וחצי מיליארד שנים ושפניו השתנו במשך תקופת קיומו. ההרים והעמקים, היבשות והימים לא נראו בעבר הרחוק כפי שהם נראים כיום. הרים עלו, עמקים נפערו, יבשות זזו ממקום למקום, אוקיינוסים כיסו אזורים שמהם נסוגו היבשות - כל אלה הם תוצאה של הפעילות הגעשית הרוחשת במעמקי האדמה. גם כיום אנחנו עדים לתזוזות של פני כדור הארץ ולרעידות אדמה והתפרצויות הרי געש המתרחשות בעקבותיהן.

שיטות פיזיקליות וכימיות מאפשרות לנו לקבוע מהו גילם של הסלעים הבונים את ההרים בכל מקום. שכבות הסלע של כל הרי יכולות לשמש יומן לתולדותיו, ולפיהן אפשר לקבוע מתי ואיך הוא נוצר. בבדיקות מיקרוסקופיות של סלעים הבונים את ההרים באזורים שונים בעולם הוכח שחלקם בנויים מאותם חומרים ראשוניים הנמצאים גם במעמקי כדור הארץ. אלה הם סלעי היסוד, העשויים ממגמה ומלבה אשר עלו אל פני השטח בתהליכים הגעשיים.

לעומתם, במקומות רבים ואף בשרשרות הרים גדולות נמצא סלעים שנוצרו משלדים ומקונניות של בעלי חיים ימיים זעירים - אלה הם סלעי הגיר. סלעים אלה נוצרו במשך זמן ארוך בקרקעית הימים והאוקיינוסים: שלדיהם של בעלי חיים מיקרוסקופיים שחיו באוקיינוסים ובימים שקעו והצטברו באיטיות ובהדרגה על קרקעית הים. בשל לחץ המים, השכבות העבות של שלדי היצורים שבקרקעית הפכו לסלעי גיר קשים. אותם כוחות געשיים שהזכרנו הם אלה שהעלו את סלעי הגיר מעלה אל פני היבשה והביאו

להיווצרותם של ההרים שבהם הם נמצאים כיום. סלעי הגיר מכילים שרידים של בעלי חיים וצמחים שהתקשו והפכו לאבן ותוך כדי התהליך נשמר המבנה שלהם - שרידים אלה נקראים מאובנים. גם יצורים שחיו ביבשה הפכו למאובנים כאשר לאחר מותם לא נרקבו (מסיבות שונות) והתקשו כאבן בתוך סלעי משקע. המאובנים הם העדות ליצורים שחיו על פני כדור הארץ בעבר הרחוק, ומהם אנו למדים כיצד נראו בעלי החיים והצמחים לפני מיליוני שנים.



תמונה 1: מאובן של דינוזאור מסוג קודיפטריקס (Caudipteryx).

המוזיאון למדעי הטבע ביוסטון. מקור: ויקיפדיה, שימוש חופשי.



תמונה 2: מאובנים הנקראים
 סְטְרוֹמָטוֹלִיטִים (stromatolites),
 שנוצרו במים רדודים מיצורים חד-
 תאיים דמויי חיידקים, שהיו היצורים
 הראשונים שבתאיהם התבצע תהליך
 הפוטוסינתזה¹.
 מקור: ויקימדיה, שימוש חופשי. צלם:
 Michael C. Rygel

חקר המאובנים בשכבות הסלע למיניהן מאפשר לדעת מי היו היצורים שחיו בכל מקום ובכל תקופה, והממצאים מורים שלא כל היצורים הופיעו על פני כדור הארץ בעת ובעונה אחת. השרידים העתיקים ביותר הם של יצורים דמויי החיידקים החיים כיום, שחיו בים רדוד לפני כמעט ארבעה מיליארד שנים. בהדרגה הופיעו יצורים מורכבים ומפותחים יותר ויותר. נמצאו גם שרידי מאובנים של יצורים רבים מאוד שאינם קיימים עוד. רבים מכירים את סיפורם של הדינוזאורים שחיו כאן ונכחדו: הם נפוצו בכדור הארץ לפני כמאתיים וחמישים מיליון שנה ועד לפני כשישים מיליון שנה, והיו היצורים ששלטו בו בתקופה זו. העדויות מצביעות גם על בעלי חיים אחרים ועל צמחים רבים שהתקיימו בעבר וכיום נשארו מהם רק שרידים מאובנים.

¹פוטוסינתזה היא התהליך שבו מייצרים הצמחים (ובכללם גם אצות חד-תאיות) את החומר האורגני הבונה אותם מפחמן דו-חמצני וממים ותוך כדי כך משחררים חמצן.

שושלות היצורים החיים וקווי ההתפתחות שלהם

את בעלי החיים שאנחנו מכירים אנו משייכים לקבוצות לפי המבנה החיצוני של גופם: ציפורים, חרקים, דגים, זוחלים, יונקים, ועוד קבוצות רבות שונות ומשונות. בחינה מדוקדקת יותר של מבנה הגוף, של מבנה השלד ושל מערכות הגוף הפנימיות יכולה להצביע על קרבה בין הטיפוסים השונים בתוך כל קבוצה. נגלה שבתוך כל קבוצה יש קבוצות משנה: ציפורי השיר הקטנות שונות מהאנפות ומהחסידות בעלות הרגליים הארוכות, המקור הישר והארוך והגוף הזקוף, מהאווזים והברווזים השוחים במקווי המים או מהדורסים בעלי המקור הכפוף והטפרים החדים ברגליהם. בקבוצת החרקים אנחנו מבחינים בקלות בין חיפושיות, זבובים, דבורים וצרעות, נמלים ועוד. בקרב הזוחלים אנחנו מבחינים בין לטאות, נחשים, צבים וכדומה. בקבוצת היונקים אנחנו יכולים להבחין בקלות שאנחנו, בני האדם, דומים במבנה גופנו לחלק מהקופים ושונים מהחולדות והעכברים, מהכלבים, מהחתולים או מהסוסים והחמורים, שאף הם קבוצות משנה של יונקים.



תמונה 3: חלק ממיני החיפושיות.

מקור: ויקימדיה, צלם: H. Zell, רישיון CC BY-SA 3.0.



תמונה 4: מיני ציפורים מקבוצות שונות.

מקור: ויקיפדיה, רישיון: CC-BY 3.0 ו-CC-BY 2.0. צלמים (מלמעלה למטה, משמאל לימין):

Dick Daniels, Fiorellino, kansasphoto, Michael Pinczolits, Matt Biddulph, Steven Bennett, Alan D. Wilson, Alan Vernon, Boaworm, Donald Hobern, Alfred Sin, Adrian Pingstone, Jerzy Strzelecki, Matthias Barby, Ndecam, J.J. Harrison, Dick Daniels, supernova

כך גם בין הצמחים אפשר להבחין בקבוצות לפי צורתם ובעיקר לפי צורות הפרחים. למשל, הדגניים בעלי שיבולים, הכלניות והנוריות בעלות פרחים דמויי קערה בצבעי אדום וצהוב, הוורדים פורחים בשלל צבעים וניכרים בצורת הפרחים האופיינית להם. לצמחים רבים יש פרחים הדומים לפרחי המרווה, הנראים כצינורית שפתחה עטור שפתיים, ויש אחרים שפרחיהם אינם ניכרים כמעט כי הם ירוקים וקטנים.

כשבודקים במפורט את המבנה ואת מהלך ההתפתחות וההתרבות של כל יצור ויצור, אפשר לקבוע את יחסי הקרבה בין היצורים - מי הם הדומים זה לזה ומי השונים. לפי סימנים אלה מחלקים החוקרים את היצורים השונים לקבוצות. לכל בני קבוצה אחת יש תכונות דומות ואפשר לשער שיש קרבה ביניהם, כי כפי שאנחנו יודעים, הצאצאים דומים מאוד להוריהם ולקרובי משפחתם.

ניתוח של מבנה המאובנים אפשר לחוקרים לקבוע מתי הופיעה כל קבוצת יצורים על פני כדור הארץ, לגבש השערות באשר לקרבה בין הקבוצות ולזהות את מוצאה של כל אחת מהן. בתחילה הופיעו החיידקים, אחריהם האצות והצמחים הפשוטים, ובמהלך הזמן, במשך מיליוני שנים, הופיעו צמחים מפותחים ומורכבים יותר ויותר, עד אשר הופיעו הצמחים בעלי הפרחים שאנחנו מכירים כיום. כך גם בין בעלי החיים: ראשית הופיעו תאים יחידים שנעו במים והיו דומים לאצות שחיו באותה עת, אך הם השיגו את מזונם בדרך של אכילה ולא בדרך של פוטוסינתזה כמו הצמחים. בעלי החיים התפתחו

בהדרגה מתאים יחידים לקבוצות תאים ובהמשך לבעלי גוף מחולק לחלקים ובו מערכות כגון מערכת עיכול, מערכת עצבים, איברי ראייה, איברי תנועה. עם הזמן הופיעו בעלי חיים מורכבים ומשוכללים יותר: יצורים בעלי קונכיות שהגנו עליהם מבחוץ, יצורים שגופם עטוי מעטה של חומר הנקרא כיטין², ששימש כעין שלד חיצוני, ולבסוף יצורים בעלי שלד פנימי שאפשר להם לנוע במהירות במים ולאחר מכן גם על פני היבשה.



תמונה 5: בעלי חיים בעלי מעטה מכיטין.

משמאל: סרטן. מקור: ויקיפדיה, שימוש חופשי, צלם: Harrison George;
מימין: יתוש. מקור: ויקיפדיה, רישיון CC BY-SA 3.0, צלם: Alvesgaspar.

על אף נתיב זה של התפתחות מתמדת, גם כיום חיים סביבנו יצורים פשוטים, הדומים ליצורים הקדומים ביותר שחיו לפני זמן רב מאוד: חיידקים הנמצאים סביבנו בכל מקום, אצות החיות במים, בעלי חיים בעלי מבנה פשוט כמו ספוגים ואלמוגים. הזכרנו את הדינוזאורים, ששלטו בכדור הארץ לפני מאות מיליוני שנים - צאצאיהם כיום הם הלטאות ואולי אפילו הציפורים.

נראה, אם כך, שהעדויות מחקר המאובנים מצביעות על הופעה הדרגתית של היצורים, החל בבעלי מבנה פשוט, אחריהם בעלי מבנה מורכב יותר, ועד המפותחים ביותר שאנו מכירים בסביבתנו היום. מכיוון שגם כיום קיימים יצורים הדומים מאוד ליצורים הפשוטים שחיו בעבר, אנו יכולים לזהות את הקווים המצביעים על התפתחות הדרגתית זו מהפשוטים למפותחים. אפשר לסווג את היצורים, גם את הצמחים וגם את בעלי החיים, לקבוצות המעידות על דמיון ועל קרבה ביניהן.

מכאן אפשר להסיק שהיצורים לא נבראו בבת אחת אלא התפתחו בהדרגה. בהמשך נציג את התאוריה המסבירה את המנגנונים ואת הכוחות שהניעו את תהליכי ההתפתחות הללו.

לא נעסוק כאן בשאלת הופעתם של היצורים החיים הראשונים על פני כדור הארץ: כיצד הופיעו צורות החיים הראשונות, שמהן התפתחו היצורים המפותחים יותר? זוהי שאלה מעניינת וסבוכה בפני עצמה, והתשובות לה אינן ברורות די הצורך.

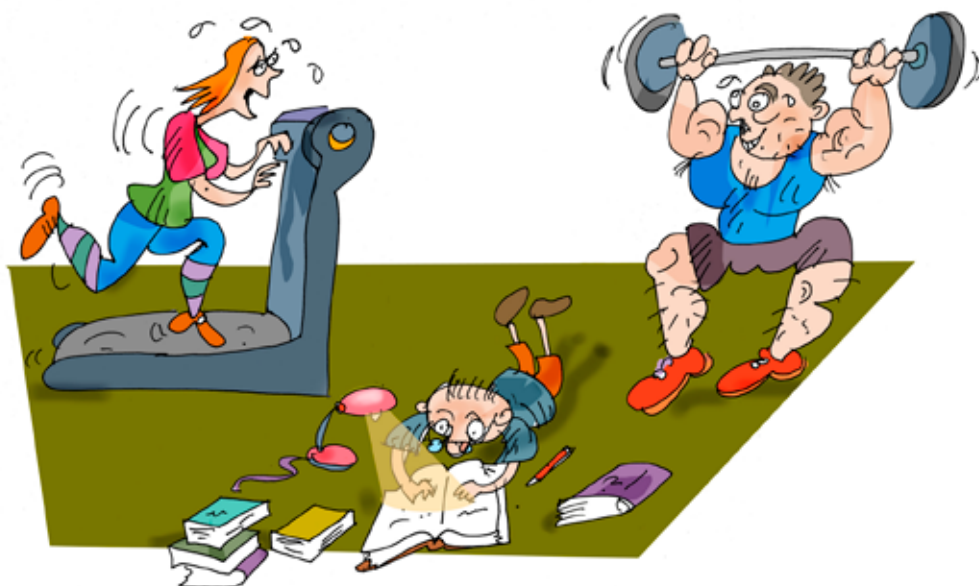
²כיטין הוא חומר אורגני קשה המכסה את גופם של חרקים, של סרטנים ושל פרוקי רגליים אחרים. הוא מגן עליהם ומקנה לגופם יציבות.

תכונות העוברות בתורשה

ותכונות נרכשות שאינן עוברות בתורשה

השאלה העומדת בפנינו היא, אם כן, כיצד ייתכן שיצורים מפותחים התפתחו מיצורים פשוטים יותר. אנחנו יודעים שכל זוג הורים מעמיד צאצאים הדומים לו. כך גם בין בעלי החיים והצמחים - הצאצאים דומים להוריהם. עם זאת, הדמיון בין ההורים לצאצאים איננו מוחלט. בכל צאצא משתלבות התכונות של אביו ושל אימו, והוא איננו העתק של אף אחד מהם. לא רק זאת, הצאצא מושפע גם מאורח חייו שלו. למשל, אם הוא עוסק בספורט ובעבודה מאומצת הרי ששריריו מפותחים, ואם הוא עובד בעבודה משרדית ומבלה את זמנו הפנוי בצפייה בטלוויזיה - ייתכן שכושרו הגופני ירוד. כך גם בקרב בעלי החיים, למשל יש הבדל בין בעלי חיים בשדה בור או ביער לבין אלה החיים בגן חיות או במשק חקלאי. גם בקרב הצמחים יש הבדלים: למשל, בין צמחים הגדלים בצל לבין הגדלים בשמש, בין הצמחים הקרובים למקור מים או מקבלים השקיה מסודרת לבין אלה המושקים במי גשם רק בעונת החורף.

אם כן, מכלול תכונותיו של כל יצור נובע משני מקורות - תורשה ותנאי המחייה: תכונות שירש מהוריו (תורשה) ותכונות שפיתח במהלך חייו (תנאי המחייה). את התכונות שירש מהוריו הוא מעביר הלאה לצאצאיו שלו. אם עיניו של משה חומות כמו עיניה של אימו, יש סיכוי גדול שגם לילדיו של משה תהיינה עיניים חומות. ואם רבקה נולדה עם שיער שצבעו שחור, יש סיכוי גדול שגם לבנותיה יהיה שיער שחור, על אף שהיא הולכת בכל חודש למספרה וצובעת את שיערה לבלונדיני. כך גם הצמחים ובעלי החיים: כל יצור מעביר לצאצאיו את התכונות שירש מהוריו. ואולם את התכונות שפיתח במהלך חייו כתוצאה מתנאי חייו המיוחדים אינו מעביר לצאצאיו.



יצורים חדשים הם תוצאה של תהליך ברירה

למרות הנאמר לעיל, לעיתים צאצאים של יצור עשויים להיות שונים ממנו בתכונותיו. נתבונן, למשל, בכלבים שאנו מגדלים כחיות מחמד. הכלבים הם צאצאים של הזאבים החיים בטבע. כלבי רועים וכלבי זאב דומים מאוד לאבותיהם הזאבים. לעומתם, כלבי בולדוג, פודל ופינצ'ר שונים מאוד מזאבי הבר. איך הופיעו זני כלבים אלה? זנים אלה הם תוצאה של ברירה ושל טיפוח בידי בני האדם במשך אלפי שנים. בין הכלבים שנולדו הופיעו מדי פעם גורים שהיו שונים במקצת מהוריהם, למשל מידות גופם היו קטנות יותר. בטבע כלבים כאלה לא היו שורדים משום שלא היה להם סיכוי להתחרות באחיהם הגדולים מהם. אך מכיוון שכלבים אלה טופחו בידי בני האדם, הם שרדו - בעליהם טיפחו אותם במיוחד



ודאגו שיחיו. לאחר מכן הכליאו בעלי הכלבים את הכלב הקטן עם כלבה קטנה ונוצרה שושלת של כלבים קטנים. לעיתים נולדו גם לכלבים אלה גורים קטנים עוד יותר, וגם אותם זיווגו זה עם זה. הגורים שנולדו לכלבים אלה היו קטנים כמו הוריהם, ולכן קטנים יותר מסביהם. והתהליך נמשך: בכל דור נולדו כלבים קטנים יותר אשר זווגו אלה עם אלה, עד שנוצרו זנים של כלבים קטנטנים, כמו פינצ'ר וצ'יוואווה. כך, בדרך של ברירה וטיפוח נוצרו זנים חדשים של כלבים: קטנים, בעלי שיער ארוך, בעלי שיער קצר, או גדולים וחזקים כמו כלבי שמירה והצלה.

תמונה 6: כלב זאב, הקרוב גנטית לזאב הבר ודומה לו בתכונותיו. זאבי הבר הם אבותיהם של כל הכלבים. מקור: ויקיפדיה, לשימוש חופשי.

צילום Elzbieta Wojtko.



תמונה 7: זני כלבים (מימין לשמאל ומלמעלה למטה) - צ'יוואווה, פינצ'ר, בולדוג, סן ברנרד. מקור: pixabay, שימוש חופשי.

התהליך לא התרחש רק בקרב כלבים, אלא גם בקרב כל חיות הבית והמשק, השונות מאוד מאבותיהן החיים חיי בר בטבע בתכונות שבני האדם בררו לצרכיהם. בני האדם טיפחו כבשים שיגדלו צמר ארוך ורך, טיפחו תרנגולות שיטילו ביצים בקביעות וכדומה. תהליכים דומים התרחשו גם בצמחים, שביניהם בררו בני האדם וטיפחו לעצמם את בעלי היבול הרב יותר, הפירות הטעימים והמזינים יותר, הפרחים היפים יותר. כל בעלי החיים והצמחים המבויתים³ שונים לגמרי מאבותיהם; אי-אפשר למצוא אותם בטבע והם גם לא חיו בר בטבע מעולם. הם נוצרו בתהליכי ברירה וטיפוח חוזרים ונשנים של פרטים בעלי תכונות רצויות מבין כל הצאצאים.

³יצורים מבויתים הם היצורים שהאדם מגדל בבית, במשק, בשדות או במטעים לצרכיו שלו. מוצאם בטבע, בחיי הבר, אך יש להם תכונות מיוחדות שבני האדם בררו במשך דורות רבים.

המידע על התכונות העוברות בתורשה מאוחסן בגנום

טענו קודם שתכונות שכל פרט מפתח במהלך חייו בעקבות פעילותו או רכש עקב חשיפתו לתנאי מחייה מיוחדים, אינן עוברות בתורשה לצאצאיו. לכן נשאלת השאלה: אילו תכונות כן עוברות בתורשה ואיך מתרחש המעבר? נוסף על כך מתעוררת השאלה הנוגעת לשינויים שעשויים לחול בתכונות במהלך העברתן מדור לדור: מה ההסבר לכך שהצאצאים אינם זהים בדיוק לאף אחד מהוריהם? על שאלות אלו נענה בפרק זה.

תכונותיו של כל יצור חי נקבעות לפי הגנים שלו, שאותם ירש מהוריו. לכלל הגנים קוראים בלועזית וגם בעברית גֵנוֹם. הגנום אצור בגרעין של כל תא חי בתוך חומצות הגרעין מסוג חומצה דִּאֹקְסִי-ריבוזוקלֵאית או בקיצור די-אן-אֵי (ראשי התיבות באנגלית - DNA), ורבים ודאי שמעו עליהן. אפשר לדמות את מבנה חומצות הגרעין לספר העשוי שורות רבות של אותיות, המצטרפות להברות. ההברות בונות מילים, המילים בונות משפטים המצטרפים לפסקאות, והפסקאות יוצרות פרקים המרכיבים את הספר כולו. כל מי שיודע לקרוא את השפה שבה כתוב הספר יכול להבין את הכתוב בו, ומובן שכל שינוי ברצף האותיות יביא לשינוי במשמעותו של הכתוב. ואכן המדענים יודעים כיום לקרוא את מבנה הגנום.

חומצות הגרעין בנויות מולקולות קטנות למדי הנקראות בסיסים. באלף-בית של חומצות הגרעין אין 22 אותיות כמו בשפה העברית, אלא רק ארבעה בסיסים. כל צירוף של שלושה בסיסים הוא הקוד ל"הברה" אחת בספר הגנום. בתהליך של ביטוי הגנום, הברה זאת מיתרגמת בתא למולקולה אחת מבין אוסף החומצות האמיניות הבונות את החלבונים שבתא. החלבונים הם החומרים הפעילים בתא, והם המביאים לידי ביטוי את התכונות של כל תא ושל היצור כולו.

בגופו של כל יצור יש שני עותקים של חומצות הגרעין שלו: עותק שקיבל מאביו ועותק שקיבל מאימו. שני העותקים יחדיו הם הגנום כולו. האב והאם הם יצורים שונים זה מזה, ולפיכך יש הבדלים בין הגנומים שלהם. לאחד רצף בסיסים בחומצות הגרעין הקובע שיהיו לו עיניים כחולות, ולאחרת רצף בסיסים הקובע שיהיו לה עיניים ירוקות. אצלה נמצא רצף בסיסים הקובע שהיא תהיה גבוהה ואצלו רצף בסיסים הקובע שהוא יהיה נמוך. לה שיער מתולתל ולו שיער חלק, הוא אלרגי למאכלים המכילים גלוטן ואילו היא אוכלת את כל מיני המאפה ללא חשש, וכן הלאה. כך מכתוב מבנה הגנום תכונות רבות, כמובן לא רק בבני האדם אל בבעלי החיים, בצמחים ובכל היצורים האחרים. כל תכונה של הצאצא היא תוצאה של שילוב הגנום שקיבל מאימו עם הגנום שקיבל מאביו. אם כן, ההורים יכולים להעביר בתורשה לצאצאיהם רק את המידע המצוי בחומצות הגרעין שלהם, שאותן קיבלו מהוריהם. אבל היות שההורים אינם זהים זה לזה, לצאצא יש שילוב תכונות ייחודי הנובע מהרכב חומצות הגרעין שקיבל משני הוריו.

במהלך החיים, כאשר מתבטאות התכונות הקבועות בגנום, מתרחשים תהליכים נוספים המשפיעים עליהן. למשל, אם הצאצא ירש מאחד ההורים גן לעיניים כחולות ומהורה האחר גן לעיניים ירוקות, צבע עיניו יהיה ירוק ולא כחול משום שבמהלך הביטוי "גובר" הגן לצבע עיניים ירוק על הגן לצבע עיניים כחול. דבר דומה מתרחש גם בתכונות אחרות.

שינויים במבנה הגנום שמקורם בתהליכים הקשורים לרבייה ובתהליכים אקראיים

איך קורה שאחים שנולדו לזוג הורים מסוים אינם זהים? נזכור שגם אצל ההורים שני העותקים שבגנום אינם זהים: האב קיבל עותק אחד מאביו ועותק אחד מאימו, והאם קיבלה עותק אחד מאביה ועותק אחד מאימה. איזו מחצית של הגנום מוריש כל הורה לכל אחד מצאצאיו? זאת אין לדעת מראש. התוצאה מתהליך זה היא שיש ארבעה צירופים שונים של הגנום שיכול כל צאצא לרשת מהוריו, ולכן גם אחים מאותו זוג הורים אינם זהים זה לזה. יתרה מזו, גם אם יש יותר מארבעה ילדים במשפחה לא נמצא בהם שניים זהים, אלא אם הם תאומים זהים. לפיכך אנחנו מבינים שיש תהליכים נוספים המובילים ליצירת תערובת הגנים העוברת מהורים לצאצאיהם, מלבד התהליך הפשוט שתואר כאן. תיאורי המנגנונים האחראים לתהליכים אלו הם מעבר לתחום הפירוט בחוברת זאת, והמתעניינים מוזמנים לעיין בספרי הגנטיקה.

נראה, אם כן, שהמקור הראשון למגוון התכונות שאנו מוצאים באוכלוסייה הוא שילוב התכונות של ההורים בצאצאיהם, המביא לכך שהצאצאים אינם זהים להוריהם או לאחיהם ולאחיותיהם.

שלא כמו אצל בני אדם או אצל יונקים אחרים, בין היצורים האחרים יש רבים שהם דו-מיניים. רבים מהצמחים הם כאלה: כל פרט הוא גם זכר וגם נקבה. כאשר הצמח מפרה את עצמו, לצאצאים יש רק הורה אחד והוא התורם להם את שני החצאים של הגנום. במקרה כזה, גדולים הסיכויים שתהיה אחידות בתכונות הצאצאים. בחקלאות, בררו המטפחים קווים של צמחים ששני חצאי הגנום שלהם זהים. בצמחים כאלה, צאצאים שהם תוצאה של "הפריה עצמית" זהים לחלוטין זה לזה. כך מצליחים החקלאים לגדל שדות שבהם לכל הצמחים גובה אחיד וצורה אחידה, פירותיהם מבשילים בעת ובעונה אחת והיבול שנאסף מכל הצמחים אחיד לגמרי. לאחידות זו, שהיא תוצר מלאכותי של תהליכי ברירה וטיפוח, יש חשיבות גדולה בחקלאות.

בטבע, כשההכלאות אינן מכוונות אלא מתרחשות באקראי, בדרך כלל ההפריה איננה עצמית, אלא "הפריה זרה": את הביציות של האם מפרים תאי זרע של אב השונה ממנה. לצמחי הבר יש כמה וכמה מנגנונים המבטיחים שגם בצמחים דו-מיניים לא תחול הפריה עצמית אלא הפריה זרה.

מקור נוסף להגדלת המגוון הגנטי באוכלוסייה הוא שינויים במבנה הגנום הנקראים מוטציות (ביחיד - מוטציה). אלה הם שינויים מקריים בהרכב או בסדר הבסיסים בחומצות הגרעין. בעת שכפול התאים והמעבר מדור לדור מועתקות חומצות הגרעין שוב ושוב. תהליך זה מתרחש בגופו של כל יצור פעמים רבות מאוד, בעיקר בעת היצירה של תאי המין - תאי הזרע והביציות - שמהם נוצר הדור הבא. במהלך ההעתקה חלים לעיתים שיבושים - מוטציות, למשל: בסיס אחד מוחלף בבסיס אחר, מקטע של חומצת הגרעין נמחק, מקטע עובר בתוך הגנום ממקום למקום. המוטציות מוליכות לשינויים במבנה הגנום. אם המוטציה מתרחשת במיקום המשפיע על תכונה מסוימת, למשל על גובה האדם, על נפח המוח שלו או על נפח השרירים שלו, הרי שתכונה זו של הצאצא עשויה להיות שונה מאותה תכונה אצל הוריו. המוטציה הופכת להיות חלק ממבנה הגנום של צאצא זה, וכאשר יהיו לו ילדים משלו היא תעבור לילדיו. כך גם ביצורים אחרים: מוטציות מביאות לשינויים בתכונות, ושינויים אלה עוברים בתורשה.

אנו רואים, אם כן, שהמוטציות מגדילות את המגוון הגנטי של האוכלוסייה. חשוב לציין שאין תהליך המכוון את המוטציות, וחלקן הגדול עלול לגרום פגמים גנטיים ותמותה של הצאצאים. אבל למוטציות ששינו את התכונות של היצורים מבלי להזיק להם, ובעיקר למוטציות שהועילו להם, יש חשיבות מכרעת בתהליכי האבולוציה שאנו דנים בהם כאן.



תמונה 8: דררה מצויה, מין תוכי שחי בלהקות באפריקה ובאסיה. צבעה של הדררה בדרך כלל ירוק ובעקבות מוטציות מופיעים פרטים בשלל צבעי הקשת.
מקור: ויקימדיה, רישיון CC-BY 2.0. צלם: south92.

תהליך הברירה הטבעית - יתרון לבעלי צאצאים בוגרים רבים

עד כה עסקנו בפרט הבודד, במבנה הגנום שלו ובתכונותיו. כל הפרטים הקרובים זה לזה במוצאם עד כדי כך שהם יכולים להזדווג ולהעמיד צאצאים פוריים, הם בני מין אחד והם דומים מאוד זה לזה בתכונותיהם. המילה מין במקרה זה היא תרגום של המילה הלועזית species, ויש להבחין בינה לבין המילה המציינת אם הפרט הוא זכר או נקבה, שהיא המילה העברית זָוּיג ובלועזית sex. בני אותו מין מרכיבים אוכלוסייה שבתוכה תיתכן העברה חופשית של מידע גנטי באמצעות הזדווגויות. כלל התכונות של בני המין נקבע לפי המגוון הגנטי של האוכלוסייה. יש גבוהים ונמוכים, כהים ובהירים, רגישים למחלות או עמידים להן וכן הלאה. מגוון זה הולך ומשתנה עם הזמן. בפרקים הקודמים הזכרנו מנגנונים אחדים המביאים להגדלת המגוון הגנטי של האוכלוסייה.

השאלה המתעוררת מכאן היא: האם המגוון הגנטי של האוכלוסייה ימשיך ויגדל או האם יש תהליכים המקטינים אותו? התהליכים שנדון בהם אינם קשורים למה שקורה לבני האדם כיום או למה שקרה במהלך ההיסטוריה; נדון כאן ביצורים אחרים ובאדם הפרה-היסטורי.

כל הצאצאים של יצור חי מתמודדים זה בזה על השגת המשאבים הסביבתיים הדרושים לקיומם, להתפתחותם ולרבייה שלהם. משאבים אלה יכולים לכלול מזון ומים, מקומות מתאימים למחייה ולמסתור כגון עצים לקינון, מאורות להסתתר בהן וכדומה. ככל שהפרט מצליח להשיג יותר ממשאבי הסביבה הדרושים לו, כך גדלים סיכוייו לחיות ולהעמיד צאצאים. משאבי הסביבה מוגבלים בכמותם, ולכן כשהאוכלוסייה גדלה, יהיו יצורים שיצליחו לחיות ולהעמיד צאצאים, ויהיו אחרים שלא יצליחו לעשות זאת משום שתכונותיהם לא יאפשרו להם להשיג די משאבים.

מי הם אלה שיצליחו להעביר את תכונותיהם לדורות הבאים? הפרטים ששישגו יותר משאבים מהסביבה ויעמידו יותר צאצאים - סיכוייהם להעביר את תכונותיהם לדור הבא גדולים יותר משל הפרטים שיעמידו פחות צאצאים.



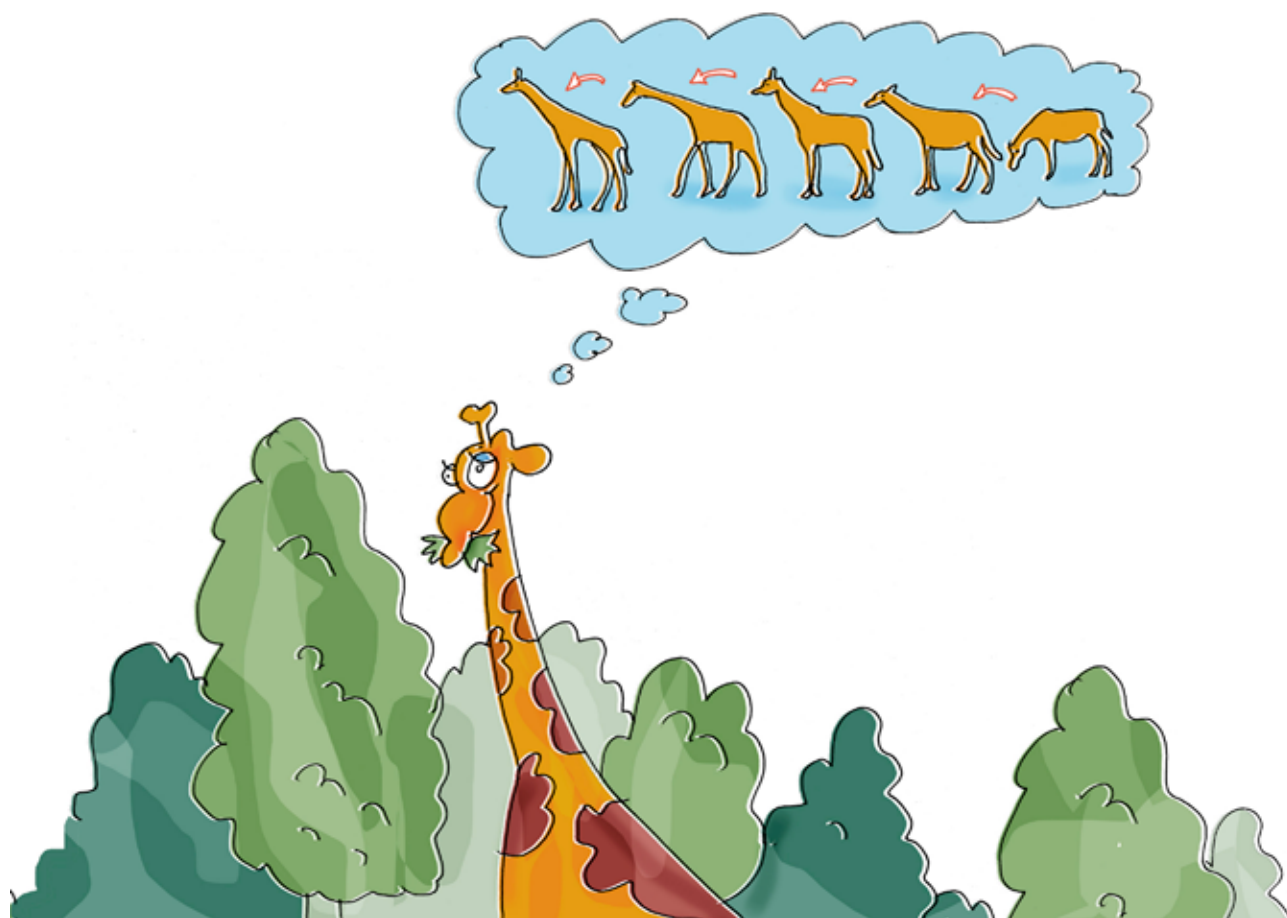
ניקח לדוגמה בעלי חיים הניזונים מהעלים שבראשי העצים. ברור שבעלי חיים אלה יוכלו לחיות רק בסביבה שיש בה עצים, והגבוהים שבהם יוכלו להשיג יותר מזון מאשר הנמוכים. היות שלגבוהים יהיה יותר מזון, הם אלה שיעמידו יותר צאצאים, ובמהלך הדורות הסיכוי של זכר גבוה להזדווג עם נקבה גבוהה ילך ויגדל. צאצאיהם יהיו גבוהים אף הם, ולגבוהים שבהם יהיה סיכוי גדול יותר לשרוד מאשר לנמוכים יותר. כך, במשך הדורות, יצטמצם המגוון הגנטי של האוכלוסייה ויישארו רק הגבוהים מבני אותו מין. דוגמה לתוצאה של תהליך כזה אנו רואים כיום בג'ירפות.

תמונה 9: ג'ירפה אוכלת מעץ.

מקור: ויקיפדיה, צלם: Brandt Luke Zorn, רישיון CC BY-SA 2.0.

היצורים החיים בטבע נתונים לתהליך של ברירה טבעית, שבו מוענק סיכוי גדול יותר לשרידותם של בעלי התכונות המאפשרות להעמיד צאצאים רבים יותר מהאחרים. הברירה היא תוצאה של לחצים שונים המשפיעים על הקיום ועל היכולת להעמיד צאצאים. לחצים אלה יכולים להיות קשורים לתנאים הפיזיים בסביבה או להשפעתם של היצורים האחרים, למשל אלה המשמשים מקורות מזון, אלה המזיקים כגון טורפים או אלה המתחרים על המשאבים החיוניים. עם זאת, המתחרים החריפים ביותר על המשאבים הם בני אותו מין, מכיוון שלכולם נדרשים אותם תנאים: הם ניזונים מאותם מקורות, חיים באותם מקומות ומתרבים באותו אופן.

תהליכי הברירה הטבעית נוטים לצמצם את המגוון הגנטי של האוכלוסייה ולהגביר את ההתאמה בין המין לבין תנאי המחיה שבהם הוא נתון. במשך הדורות מצטברים הבדלים במבנה הגנום באוכלוסייה שהייתה נתונה ללחץ ברירה כלשהו. בדוגמה שהזכרנו קודם - בעלי חיים הניזונים מהעלים שבראשי העצים - תיווצר אוכלוסייה חדשה שלכל הפרטים שבה גנום המכתיב צוואר ארוך. הצטברות השינויים במבנה הגנום תוביל לשינוי כה גדול במבנה הגנום, עד שכבר לא ייתכנו הזדווגויות פוריות בין בני האוכלוסייה החדשה לבני אוכלוסיית המוצא שלהם. בדרך זאת יכול מין אחד להפוך למין אחר, וכל הפרטים בעלי השינויים בדרגי הביניים יאבדו עקב לחצי הברירה שיפעלו עליהם. בסופו של דבר רק המותאמים ביותר מבין כל המינים, שהעמידו צאצאים רבים יותר, הם ששרדו בכל מקום ומקום.



האבולוציה - תוצאה של שינויים בגנום, לחצי ברירה משתנים וברירה טבעית

במהלך קיומו של כדור הארץ, התהליכים שתוארו קודם הם שהביאו להתפתחות של מינים רבים כל כך מצורות החיים הראשונות, שהיו פשוטות מאוד. הגורם העיקרי שאפשר זאת הוא הזמן הרב שעבר מאז שהופיעו צורות החיים הראשונות. מספר הדורות הרב, שבכל אחד מהם יכול היה להתרחש שינוי קל באמצעות תהליכי התורשה ויצירת המוטציות האקראיות, הוא שהביא לשינויים מרחיקי הלכת ביצורים וליצירת כל היצורים הנפלאים החיים בעולמנו כיום.

יחד עם השינויים בתכונות היצורים החיים, חלו גם שינויים בסביבה שבה הם התקיימו. הרים התרוממו, עמקים נוצרו, אוקיינוסים התייבשו או העמיקו, תנאי האקלים השתנו וגם הרכב האטמוספירה השתנה, שינוי שנבע לעיתים מפעילותם של היצורים החיים.

מחקרים מראים שבאטמוספירה הראשונית של כדור הארץ לא היה כלל חמצן. רק לאחר הופעתם של היצורים שייצרו את מזונם בתהליך הפוטוסינתזה, שבמהלכו משתחרר חמצן חופשי, הצטבר גז זה באוויר וכיום הוא מגיע לכדי כחמישית מהגזים העוטפים את כדור הארץ. חמצן זה, המאפשר את קיומם של רוב היצורים החיים כיום, לא היה באוויר של כדור הארץ הקדום.

החוקרים מניחים שהתרבות היצורים החיים זירזה גם את המעבר שלהם לסביבות חיים חדשות. היצורים הראשונים הופיעו במים רדודים. לאחר שהאוכלוסייה שלהם גדלה, נדדו מקצתם לאזורים אחרים במקווי המים. בתוך המים נמשכה ההתפתחות ובהדרגה הופיעו צורות חיים מורכבות יותר. בהמשך הגיעו היצורים החיים גם ליבשה, ובה הם נחשפו לתנאי חיים שונים לגמרי מאשר במים. תוך כדי מעבר באזורים של בוץ ולחות גבוהה, התפתחו בהדרגה יצורים בעלי תכונות שמנעו מהם להתייבש כשהיו חשופים לאוויר ואפשרו להם לחיות ביבשות ולנשום באוויר. כך נוצרו מינים נוספים שהצליחו להתקיים לא רק בקרבת החופים אלא הגיעו גם אל ראשי ההרים ואל המדבריות.

לחצי הברירה היו שונים ממקום למקום ומעת לעת, וכך נחשפו היצורים שחיו בכל מקום ללחצים אופייניים שכיוונו את התפתחותם. התוצאה הייתה שהתפתחו יצורים המותאמים לחיות במעמקי הים ואחרים המסוגלים לעוף לגבהים, יצורים המותאמים לחיים מתחת לשלג ולקרח ואחרים המותאמים לחיים במעיינות מים חמים או במדבריות לוחטים. השינויים הרבים שחלו בתנאי הסביבה והופעתם של יצורים שונים השפיעו על ההתפתחות של כל מין ומין וקבעו את יכולתו לשרוד.

דוגמה מפורסמת להשפעה של שינוי בתנאי הסביבה על עולם החי היא מטאור שפגע בכדור הארץ לפני יותר משישים מיליון שנה ושינה בקיצוניות ובמהירות את תנאי האקלים בכל העולם. ככל הנראה, שינוי זה הוא שהוביל להיעלמותם של הדינוזאורים, ששלטו עד אז ברבים משטחי כדור הארץ, ופתח פתח להתפתחותם של היונקים.

תהליך יצירת המינים והחלוקה הסיסטמטית

מעצם טבעם, התהליכים שתיארנו עד כה הם איטיים מאוד וקשה להבחין בהם. חשוב לזכור שהשינוי - שהוא תוצאה של הרכב גנומי חדש, של תהליכי תורשה או של מוטציה - מתרחש בפרט יחיד והוא בלבד נושא את התכונה החדשה. אם פרט זה אכן מוצלח והוא מצליח להעמיד צאצאים, הרי יש סיכוי שלפחות מחצית מהם יישאו את אותה תכונה. במהלך הדורות יהיו עוד ועוד שיישאו את התכונה המיוחדת. אם תכונה זו מקנה לנושאים אותה יתרון בהתמודדות עם לחצי הברירה המופעלים על המין והם יצליחו להעמיד צאצאים רבים יותר מאשר האחרים, הרי תדירותה באוכלוסייה תעלה במשך הזמן. אבל שינוי בתכונה אחת איננו מגדיר בהכרח מין חדש. יש צורך בהצטברות של תכונות מועילות אשר יאפשרו היווצרות של מין חדש והשתלטותו על כל השטח.

גורם מכריע בתהליך ההיווצרות של מין חדש הוא בידוד רבייתי מהמינים הקודמים לו. כאמור, בתחילה מופיע פרט יחיד בעל תכונה מיוחדת. אחדים מצאצאיו של אותו פרט יישאו את התכונה שירשו ממנו. בשלב זה התכונה נדירה מאוד בקרב האוכלוסייה כולה, לכן הסיכוי לזיווג בין שני פרטים בעלי אותה תכונה קטן מאוד. ואולם, אם גורם כלשהו מבודד את הצאצאים מהאוכלוסייה הכללית, למשל אם הם חיים בקבוצה קטנה בעמק מבודד ופרטים אחרים אינם מגיעים אליו, כל צאצאיהם יישאו את התכונה המיוחדת. כך תיווצר באותו עמק אוכלוסייה מיוחדת, השונה מבני אותו מין החיים במקומות אחרים.

אפשר לתאר עוד מצבים שבהם צאצאים של זוג הורים מבודדים מבחינה רבייתית משאר האוכלוסייה. בידוד כזה לאורך זמן חיוני כדי שיצטברו באוכלוסייה די שינויים שיהפכו אותה למין חדש, שונה מאוכלוסיית המוצא שלו. אנחנו מגדירים שפרט שייך למין כלשהו אם הוא איננו יכול להתרבות ולהביא לעולם צאצאים עם בני מין אחר, אפילו אם שני המינים דומים זה לזה. ההבדלים הגנטיים בין בני שני מינים, שהצטברו במהלך האבולוציה, אינם מאפשרים עוד יצירת גנום משותף שיכול לשמש בסיס לקיומו של יצור חי ופורה.

את המינים השונים אפשר לחלק לקבוצות, ובכל קבוצה המינים דומים מאוד זה לזה. הדמיון מעיד על קיומו של אב קדמון משותף, היות שכל שינוי של הגוף מתבסס על מבנה קיים. לדוגמה, כל בעלי החיים שיש להם כיסוי גוף קשה העשוי מכיטין שייכים לקבוצה אחת עם אב קדמון יחיד, שממנו ירשו תכונה זאת. לקבוצה זאת אנו קוראים קבוצת "פרוקי רגליים", היות שרגליהם בנויות פרקים פרקים ועטויות בכיסוי הכיטין החיצוני, שהוא שלד הגוף. בתוך הקבוצה חלה התפתחות רבה מאוד ואנו מוצאים כיום מגוון גדול של יצורים בעלי שלד חיצוני העשוי כיטין. לקבוצה זאת שייכים מיליוני מינים של יצורים, החל בסרטנים זעירים שאורכם כמילימטר אחד וכלה ביצורים שגודלם עשרות סנטימטרים. שייכים אליה החרקים השונים: חיפושיות, פרפרים, זבובים, דבורים, חגבים, וכן גם עכבישים, אקריות וקרציות ועוד קבוצות נוספות, כל מין וצורתו המיוחדת ואורח חייו האופייני רק לו. אבל מכיוון שלכולם אותו מבנה בסיסי של שלד חיצוני העשוי כיטין, אנו מניחים שלכולם מוצא משותף, אב קדמון יחיד שממנו ירשו תכונה זאת.

את המינים הקרובים ביותר אנו משייכים לאותו סוג; את כל הסוגים הקרובים זה לזה, שיש להם מוצא משותף קדום יותר, אנו משייכים לאותה משפחה, וכך הלאה. סידור המינים במערכת של קשרי קרבה ודמיון נקרא סיסטמטיקה. זהו המדע העוסק במיון היצורים החיים, בחלוקתם לקבוצות על פי הדמיון ביניהם, אשר לדעת החוקרים מצביע על יחסי קרבה ועל מוצא משותף. מדע זה מתבסס על ההבנה של מגוון הצורות של היצורים החיים ומצביע על כיווני ההתפתחות האבולוציונית שהביאה ליצירתם של כל המינים המוכרים לנו. בשנים האחרונות התפתחו שיטות המאפשרות לחוקרים להשוות את מבנה חומצות הגרעין בגנום של יצורים שונים. דמיון במבנה הגנום מעיד יותר מכול על מוצא משותף של יצורים שונים.



סלקציה לעמידות לקוטלי עשבים - עדות לאבולוציה המתרחשת לנגד עינינו

כפי שנאמר קודם, קשה מאוד להבחין בשינויים מסוג זה החלים בטבע בשל היותם איטיים מאוד. אבל בתנאים של לחצי ברירה מלאכותיים שהאדם מפעיל אפשר להבחין ביתר קלות בהשפעת התהליכים האבולוציוניים. הזכרנו כבר את חיות המחמד, את בהמות הבית ואת צמחי החקלאות והנוי שהאדם טיפח במכוון. תהליך הטיפוח מבוסס על לחצי ברירה חזקים ועל זיווגים מכוונים בין בעלי התכונות הרצויות.

יש גם דוגמאות למצבים שבהם לחצי ברירה שמפעיל האדם מובילים לשינויים גנטיים מרחיקי לכת באוכלוסיות של יצורים בטבע. דוגמה בולטת היא השפעת השימוש בקוטלי עשבים על התפתחותם המהירה של זני עשב עמידים. קוטלי עשבים הם חומרים כימיים המפריעים למהלכם התקין של התהליכים בצמח וכך מביאים למותו, ולכן כאשר חקלאי מרסס את שדהו בקוטל עשבים שהעשבים רגישים לו, הם ימותו ולא יתרבו. אבל לא די בכך כדי להיפטר מהעשבים, משום שעשבים צומחים בשדות שכנים ובשטחי בור שלא רוססו. זרעים הנוצרים בסביבה מתפזרים באמצעות רוח או בעלי חיים ויכולים להגיע שוב לשדה שרוסס. מסיבה זו חקלאים נאלצים לרסס את שדותיהם מדי שנה.

באחד המקרים הופיע בשדה, באקראי, צמח עשב יחיד שהיה עמיד לאותו קוטל עשבים. תכונה חדשה זאת של עמידות הייתה תוצאה של מוטציה באחד הגנים של הצמח, והיא הפכה אותו לעמיד לחומר הפעיל בקוטל העשבים. אף שניסו לקטול אותו בריסוס, הפרט הזה - עשב יחיד זה - גדל, יצר זרעים ופיזר אותם בשדה. בשנה שלאחר מכן, שוב ריסס החקלאי את השדה באותו קוטל עשבים. העשבים שלא הכילו את הגן שעבר מוטציה מתו. אולם צאצאיו של אותו עשב עמיד גדלו ופרחו והתרבו בינם לבין עצמם, כי לא היו צמחים רגישים בסביבתם. וכך, בתוך שנים ספורות הלכה ונוצרה אוכלוסייה חדשה של עשבים שהיו עמידים בפני קוטל העשבים. הם פיזרו את זרעיהם, הזרעים הגיעו גם לשדות הסמוכים והמשיכו והתפזרו הלאה, עד ששטחי חקלאות גדולים נעשו "נגועים" באותם עשבים עמידים שאין בנמצא קוטל עשבים יעיל שיכול להשמיד אותם. ידועים כיום כמה וכמה עשבים עמידים בפני קוטלי עשבים. זוהי דוגמה לתהליך אבולוציוני מהיר שהוא תוצאה של לחץ ברירה חזק המלווה בבידוד רבייתי של בעלי התכונה החדשה.

בדומה לכך, בשנים האחרונות מופיעים חיידקים העמידים בפני תכשירי אנטיביוטיקה. חיידקים אלה מתפשטים בעיקר בבתי חולים, שבהם נפוץ השימוש באנטיביוטיקה.

אלו דוגמאות לתהליכים אבולוציוניים מוכרים שהיה אפשר לחזות אותם מראש, אך אף שעקרונותיהם ידועים ומוכרים למדענים, לא היה אפשר להימנע מהם. הדוגמאות מעידות על היכולת של תהליכים אבולוציוניים להוביל להופעה של צורות חיים חדשות מצורות קיימות בעקבות לחצי ברירה ובידוד רבייתי.

רעיון האבולוציה ושאלת מוצא האדם

משחר ההיסטוריה האמינו בני האדם בבריאה על ידי כוח עליון. לפי האמונה הדתית, כל היצורים בעולמנו נבראו כפי שהם היום וקיימים כך מאז. לפי אמונות אלו, ששלטו ללא עוררין עד לפני כמאה ושישים שנה, האדם הוא נזר הבריאה והוא עוצב בידי האל כשליט יחיד ומיוחד בכל הטבע הסובב אותו.

באמצע המאה התשע-עשרה פרסמו שני חוקרים אנגלים, צ'רלס דארווין ואלפרד ראסל וולאס, את רעיון ה"אבולוציה באמצעות הברירה הטבעית". כל אחד מהם הגיע לרעיון בכוחות עצמו על סמך מחקרי הטבע שערך, אך במהלך השנים התפרסם דארווין ואילו שמו של וולאס כמעט נשכח בהקשר זה.

הרעיון שהציג וולאס ודארווין כלל את הנימוקים שהעלינו בחוברת זאת. הם הגיעו למסקנה שהיצורים החיים כיום בעולמנו לא נבראו במועד אחד אלא התפתחו בהדרגה במשך העידנים שקדמו לתקופתנו. במהלך ההתפתחות הזאת הופיעו יצורים שונים שהתפתחו מיצורים אחרים שקדמו להם. מהלך האבולוציה היה מהפשוט אל המורכב, או במילים אחרות מהפרימיטיבי למפותח. רוב מיני היצורים שהיו בעבר על פני כדור הארץ לא שרדו במהלך האבולוציה, ורק עדויות מאובנים נותרו כדי להצביע על קיומם. המחקרים שנערכו בשנים שלאחר מכן הצביעו על כך שהמעקב אחר מבנים של מאובנים העלה תימוכין להשערות שהעלו וולאס ודארווין באשר לקווי התפתחות מיצורים פשוטים ליצורים מפותחים יותר.

היצורים שאנו רואים כיום הם תוצרי השלב המאוחר ביותר בהתפתחות האבולוציונית בכל קו התפתחות. קו התפתחות אחד הוביל להופעת הצמחים וקו אחר הוביל להתפתחות של בעלי החיים על צורותיהם השונות. כל קו התפצל במשך הזמן לקווים אחדים. כשמתבוננים ביצורים השייכים לקווים שהתפצלו בשלבים מוקדמים של האבולוציה, רואים כיום יצורים הדומים לאותם יצורים שחיו לפני מיליוני שנים. דוגמאות ליצורים אלה הן אלמוגים, חרקים וחלזונות, הדומים ליצורים שהיו בבסיסם של קווי התפתחות שהתפצלו מאוחר יותר מאותו קו. אחריהם הופיעו הקווים של הדגים והזוחלים. בשלב המאוחר ביותר בקו התפתחות של בעלי החיים הופיעו היונקים.

על היונקים נמנים עכברים, דובים, פילים, אריות, נמרים, קופים, לווייתנים ועוד בעלי חיים רבים. היונקים הם אותם יצורים שאנו דומים להם במבנה הגוף ובמהלך החיים. לכולם יש שלד עצמות פנימי שיש בו גולגולת, עמוד שדרה וארבע גפיים. לכולם מערכת עצבים מרכזית שמרכזת נמצא במוח, המוגן בתוך קופסת הגולגולת. כולם דומים זה לזה גם במערכות אחרות של הגוף, כגון מערכת כלי הדם, מערכת העיכול, מערכת הנשימה. בכל מין יש יצורים משני זוויגים, זכר ונקבה, ובתהליך הרבייה הזכר מפרה את הנקבה. היא נושאת את העובר המתפתח ברחמה במהלך ההיריון, ובסופו נולד הצאצא או הצאצאים. הנקבה מזינה את הוולדות בהנקה בשלבים הראשונים של חייהם. כל אלו תכונות המציינות את היונקים לעומת בעלי החיים האחרים.

בני האדם נמנים עם היונקים מכיוון שהם בעלי כל אותן תכונות שמנינו. בבואנו לחקור את המבנה של קבוצות היונקים השונות, אנחנו מבחינים בתכונות התומכות בכך שהיה קו התפתחות שהוביל מקופים מטפסים על עצים, הולכי על ארבע בעלי זנב ארוך, לקופים חסרי זנב ההולכים על שתיים. נמצאו שרידים של שלדי יצורים שהראו תכונות ביניים בין הקופים לבין בני האדם, מבחינה זקיפות הקומה ומבנה הגולגולת. המסקנה המתבקשת מעדויות אלו היא שהאדם, ככל היצורים האחרים, הוא תוצר של האבולוציה, ומקורו ביצורים פרימיטיביים יותר שהיו דומים לקופים בני זמננו.

מסקנה זאת היא שעוררה את חמתם של מאמיני הדת הנוצרים באנגליה במאה התשע-עשרה. הם סרבו לקבל אותה וטענו שהאמונה בעקרונות אלו של האבולוציה משמעותה כפירה בעקרונות הדת. חוקרי האבולוציה הראשונים נתקלו בתגובות כעס ולגלוג מצד אנשי הכנסייה.

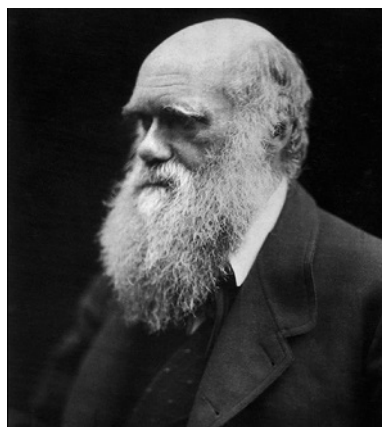
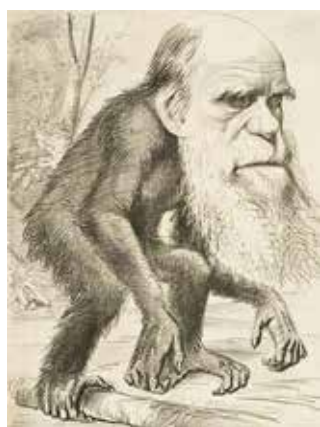
גם היום יש עדיין מאמינים בדת, הרואים ברעיון האבולוציה ניסיון לחתור תחת עיקרי האמונה הדתית, אף שחוקרים רבים הציעו הסברים המיישבים את סיפור הבריאה המקראי עם האבולוציה. המחלוקות העיקריות הן בשאלת משך הזמן שנמשך התהליך וכוונת הבורא. המאמינים מתעקשים להיצמד לסיפור המקראי כפשוטו וטוענים שכל בריאת היצורים על פני כדור הארץ נמשכה שישה ימים. אבל אם נניח שהכתוב איננו מתייחס בהכרח ליום של 24 שעות אלא לתקופה שאורכה אינו מוגדר, אפשר לראות שבסיפור הבריאה מוצג תהליך הדרגתי של עיצוב העולם והופעת היצורים בזה אחר זה, מהפשוט אל המורכב, שבסופו הופיע האדם.

אפשר גם לראות בכוחות האבולוציוניים, בהגדלת המגוון הגנטי ובברירה הטבעית חלק מכוח עליון כללי המניע את כל האירועים בעולם וביקום, כמו למשל חוקי הפיזיקה והכימיה. ואולם העיקרון שבלתי אפשרי להסכים עליו הוא שאלת הכוונה של הבורא. לפי תורת האבולוציה, התהליך כולו מונע על ידי אירועים אקראיים רבים שאינם מכוונים מראש לתוצאה כלשהי. לפיכך ייתכן שבכוכב אחר, גם אם הוא דומה במבנהו ובתכונותיו לכדור הארץ, היו נוצרים יצורים שונים מאלה שאנו מוצאים כיום סביבנו. כך גם ייתכן שבאותו כוכב, האדם לא היה נוצר בדמותו המוכרת לנו ויצור אחר היה מופיע בשלב העליון בקו ההתפתחות של בעלי החיים.

צ'רלס דארווין ואלפרד ראסל וולאס - הוגי תורת האבולוציה

צ'רלס דארווין (Charles Darwin) (1809-1882) היה אחד משני המדענים שהגו את תורת האבולוציה והציגו אותה לעולם המדעי באמצע המאה התשע-עשרה. בעקבות אביו, שהיה רופא, החל ללמוד בבית הספר לרפואה באוניברסיטת אדינבורו, אך השתעמם עד מהרה ועבר לעסוק בלימוד נושאים ביולוגיים מגוונים. בהמשך שלח אותו אביו לאוניברסיטת קיימברידג', והוא למד בה את עקרונות הביולוגיה לפי הדת, כמקובל באותה תקופה.

בסוף שנת 1831 הצטרף דארווין כחוקר טבע למסעה של הספינה *ביגל*, שיצאה למפות את חופיה של דרום אמריקה. מסעה של הספינה נמשך עד 1836, ובמהלכו חקר דארווין את שפע בעלי החיים והצמחים שחיו ביערות הגשם של ברזיל, התפעם מהמאובנים של חיות ענק שנתגלו בארגנטינה וחקר את בעלי החיים באיי גלאפגוס. בשנים שלאחר מכן עסק דארווין בניתוח הממצאים שהביא עימו מהמסע וגיבש את העקרונות של תורת האבולוציה. רעיונות אלה עלו במוחו תוך כדי מחקרים בגיאולוגיה, בזואולוגיה ובבוטניקה שערך במשך שנות עבודתו.



תמונה 10: מימין: צ'רלס דארווין. מקור: ויקיפדיה, שימוש חופשי. צלם: Julia Margaret Cameron. משמאל: קריקטורה שהפיצו בזמנו מתנגדי תורתו של דארווין בקשר למוצא האדם מהקוף. מקור: University College London Digital Collection, שימוש חופשי.

דארווין התכתב עם מדענים רבים באותה תקופה, ובהם גם אלפרד וולאס. דארווין וידידיו באנגליה התרשמו שוולאס הגיע לאותם רעיונות בקשר לברירה הטבעית ולמוצא המינים, ובשנת 1858 הוצגו רעיונות אלה בפני החברה המלכותית הבריטית כגילויי משותף של שניהם. שנה לאחר מכן פרסם דארווין את ספרו "מוצא המינים", שבו תיאר את תאוריית האבולוציה. למרות התנגדות האליטה המדעית והממסד הדתי, רעיונותיו של דארווין התקבלו בהתלהבות על ידי מדענים ברחבי העולם.

אלפרד ראסל וולאס (Alfred Russel Wallace) (1823-1913) היה חוקר טבע וגיאוגרפיה בריטי. משפחתו של וולאס לא הייתה עשירה ולכן הוא נאלץ לעזוב את בית הספר בגיל 14 כדי לעבוד. הוא למד להיות מודד קרקעות, ועבודתו קירבה אותו להתבוננות בטבע.

בשנת 1848 יצא וולאס למסע לברזיל יחד עם חוקר החרקים הנרי בייטס, וכדי לממן את מסעם הם תכננו לאסוף חרקים ולמכור אותם למוזאונים ולאוניברסיטאות. בין השנים 1854 עד 1862 חקר וולאס את הטבע באיי מלזיה בדרום-מזרח אסיה ואסף אלפי חרקים ובעלי חיים אחרים, ובהם רבים שלא היו מוכרים למדע. בשנים אלה גיבש לעצמו את רעיון הברירה הטבעית שבבסיס תורת האבולוציה. בשנת 1858 כתב על כך לדארווין, וכאמור - הרעיון הוצג כרעיון של שניהם.



תמונה 11: אלפרד ראסל וולאס

מקור: ויקימדיה, שימוש חופשי.

וולאס תרם תרומה חשובה לחקר פיזור המינים באזורים שונים, תחום שגובש לאחר מכן למדע הביו-גיאוגרפיה. לפי תצפיותיו בדרום-מזרח אסיה הוא קבע את הקו הגיאוגרפי המפריד בין בעלי החיים שמוצאם ביבשת אסיה לאלה שמוצאם באיי האוקיינוס השקט, והקו נקרא עד היום על שמו "קו וולאס". הוא פיתח גם את הרעיון של צבעי אזהרה בבעלי חיים. וולאס היה איש המדע הראשון שהציע שייתכנו חיים בכוכבים אחרים ביקום ודן ברצינות באפשרות של קיום חיים במאדים.

בהספדים שנכתבו לזכרו כונה וולאס "אחרון ענקי המדע של המאה התשע-עשרה".

סיכום

בחוברת זאת מוצגים העקרונות הבסיסיים של תורת האבולוציה, שהוצעה לראשונה על ידי החוקרים וולאס ודארווין באמצע המאה התשע-עשרה. לפי תורה זו, היצורים החיים בעולמנו הם תוצר של תהליכים אבולוציוניים שנמשכו מאות מיליוני שנים. את התהליכים הללו מניעים כוחות אבולוציוניים אקראיים והם אינם מכוונים מראש לתוצאה כלשהי.

עדויות המאובנים מרחבי כדור הארץ מצביעות על כך שבתחילה היו בעולם רק יצורים פרימיטיביים, הדומים לחיידקים של זמננו. בהדרגה, במשך מיליוני שנים, הופיעו עוד ועוד יצורים, ואפשר למצוא עדויות המצביעות על קווי התפתחות שהובילו לצורות החיים המוכרות לנו כיום.

האבולוציה פועלת באמצעות הגדלת המגוון הגנטי וגם באמצעות צמצומו. מצד אחד, הגדלת המגוון הגנטי נעשית באמצעות תורשה ומוטציות אקראיות, ומנגד - צמצום המגוון נעשה באמצעות הברירה הטבעית, אשר מעניקה יתרון למותאמים ביותר ומביאה להכחדתם של המותאמים פחות בכל מקום ומקום. תהליכים אלה אינם מכוונים להשגת תוצאה ידועה מראש, אלא הם התרחשו ומתרחשים באקראיות גמורה. היסוד המכוון את האבולוציה הוא תהליך הברירה הטבעית אשר מביא להכחדתם של הפחות מותאמים ופותח את המרחב להמשך התפתחותם של המותאמים ביותר בכל שלב ושלב. הצטברות שינויים אבולוציוניים ובידוד רבייתי הם העומדים בבסיס התפתחות המינים השונים של היצורים החיים כיום ואשר חיו בעבר.

היצורים שאנו רואים בעולם כיום הם המפותחים ביותר בכל אחד מהקווים האבולוציוניים שהופיעו במשך הזמן. כך קיימים כיום זה בצד זה חיידקים, צמחים ובעלי חיים מקבוצות שונות. כל יצור קיים משום שלא נוצר עדיין יצור אחר המאיים לדחוק אותו מהסביבה שהוא חי בה. את היצורים החיים כיום אפשר למיין למינים, לסוגים וכן הלאה לפי יחסי הקרבה ביניהם, המעידים על מוצא משותף.

ככל שאר היצורים, גם האדם הוא תוצר של תהליכי האבולוציה. התכונות המייחדות אותנו מהמינים הקרובים לנו קשורות בעיקר למבנה המוח וליכולות מפותחות של מחשבה, תכנון, למידה ותקשורת. כל אלו, כמו תכונות אחרות, גם הן תוצר של תהליכים אבולוציוניים.

המחלוקת בין המאמינים בסיפור הבריאה האלוהית לבין הדוגלים בתורת האבולוציה איננה עקרונית, אלא היא נוגעת להבחנה במילים ובמונחים הניתנים לפירוש ביותר מצורה אחת.

לקריאה נוספת:

פירוט רב יותר על אודות תורת האבולוציה אפשר למצוא במרשתת באתר של "קמפוס טבע" באוניברסיטת תל-אביב שכתובתו

<http://evolution.campusteva.tau.ac.il/node/4727>

אפשר למצוא במרשתת עותקים של ספרו המקורי של דארווין, "מוצא המינים":

The Origin of Species

http://darwin-online.org.uk/converted/pdf/1861_OriginNY_F382.pdf

<http://www.gutenberg.org/files/1228/1228-h/1228-h.htm>

חברות "כדאי לדעת" מציגות מגוון נושאים אקדמיים וסוגיות מתקדמות בשפה שווה לכל נפש. מטרתן לחשוף את הקוראים לתחומים חדשים ולאתגר את חשיבתם.

חברת זו מציגה את העקרונות שבבסיסה של תורת האבולוציה, אשר הוצעה באמצע המאה ה־19 על-ידי אנשי המדע הבריטים וולאס ודארווין, על מנת להסביר את התהליכים שהביאו להופעתם של כל היצורים החיים על-פני כדור הארץ ובכללם האדם.



תוכנית בנו ארבל לתלמידים צעירים מצטיינים במתמטיקה

בית הספר למדעי המתמטיקה

הפקולטה למדעים מדויקים ע"ש ריימונד וברלי סאקלר
אוניברסיטת תל אביב

goodtoknow.tau.ac.il