

אשנב לאבולוציה

מותאם לתכנית הלימודים המעודכנת בביולוגיה



כתיבה: ד"ר מרב סיאני

פיתוח: ד"ר מרב סיאני, ד"ר רות אמיר, עינת פילר

ייעוץ מדעי: פרופ' אריאל צ'יפמן

ייעוץ אקדמי: פרופ' ענת ירדן

קראו והעירו: ד"ר יעל גבריאלי, ד"ר אירית שדה

ניהול הפרויקט: ד"ר מוריה אריאלי

עימוד ועיצוב גרפי: זיו אריאלי, אבי טל

עריכת לשון: ענבל גיל

תמונת העטיפה: כחליל האפון (*Lampides boeticus*). בתחתית הכנף האחורית יש זוג "מחושים" ו"עיניים" בולטות. זהו ראש מדומה המסיט טורפים מתקיפת הראש האמיתי לחלק הפחות חשוב של הפרפר. כך, גם אם הטורף יצליח, הוא יפגע במקום פחות חשוב והנזק לפרפר יהיה קטן.

צילום: ד"ר עוז בן יהודה

צילומים: רוב הצילומים המשולבים נלקחו ברישיון מאתר shutterstock.com.

הקדמה למורה

חוברת זו נועדה לרכז את חומר הלימוד הנדרש בתחום האבולוציה המהווה חלק מנושא האקולוגיה, אחד משלושת נושאי הליבה בהתאם ל**תוכנית הלימודים בביולוגיה, 2015**.

בספר "פרקים באקולוגיה" מאת רות אמיר נכתב מעט על נושא האבולוציה, אך מאחר שניתן משקל רב יותר לנושא בתוכנית הלימודים המעודכנת, נדרשנו לעדכן את הידע בתחום זה ולהנגישו למורים.

אנו מביאים להלן מידע המתבסס על מחקרים חדשים, ונוסף על כך, מידע המוכר לחלק מן המורים, אך נדרשת תמונה שלמה יותר בהקשרו.

במקומות רבים לאורך החוברת הוספנו שאלות ופעילויות המסומנות ב **?**. אפשר להשתמש בשאלות ופעילויות אלה לצורך תרגול וביסוס החומר הנלמד בקרב התלמידים. בסוף החוברת נמצאות התשובות לשאלות. הפניה לתשובות נמצאת בסופה של כל שאלה.

במקומות בהם מופיע הסימן **+** נתונים קטעים שנועדו להרחיב את הידע של התלמיד ושל המורה, אך אינם חלק מתוכנית הלימודים ואין חובה ללמדם, למרות העניין הרב שיש בהם.

הסימן **!** מסמל קטעי מידע בהם יש ענין נוסף.

נוסף על כך, לאורך החוברת תמצאו הפניות לסרטונים ולאנימציות שנועדו לגוון את ההוראה ולהרחיב את הידע של המורה ושל התלמיד.

בחוברת מופיעות תמונות של מאובנים ושלדים מקוריים שנמצאו בישראל. הקפדנו להציג ממצאים מקוריים מישראל כדי שתמונות אלו ישמשו את המורים כאשר הם מדגימים עדויות מתחום האבולוציה, וכך התלמידים יבינו כי ממצאים מתחום זה מצויים גם באזורנו.

ב**נספח לחוברת** תמצאו מידע מתחום המחשבה היהודית, עבור מורים המעוניינים להרחיב את ידיעותיהם בנושא זה או עבור מורים אשר נשאלים על הסתירה שיש מי שחושבים שקיימת בין דת לאבולוציה. אף שהמידע בחלק זה אינו מדעי, ועל כן לכאורה אינו מתאים להימצא באתר מדעי, מצאנו לנכון להוסיפו; נושא האבולוציה שנוי מאוד במחלוקת בקרב קהלים מסוימים, ובחרנו להוסיף למורים המעוניינים בכך מעט ידע בתחום.

נשמח לשמוע הערות והארות על החוברת כדי שנוכל לשפרה לטובת המורים והתלמידים.

תוכן עניינים

1	הקדמה למורה.....
4	1. מבוא.....
6	2. התפתחות תאוריית האבולוציה.....
7	3. עקרונות תאוריית האבולוציה.....
7	3.1. שונות גנטית ומקורותיה.....
8	3.2. מנגנון הברירה הטבעית והתורשה.....
9	3.3. חוקרים אבולוציה: בעקבות דרווין באיי גלפגוס.....
10	3.4. גישתו של למארק לעומת גישתו של דרווין.....
11	4. עדויות לקיומה של אבולוציה.....
11	4.1. חקר המאובנים - פלאונטולוגיה.....
12	4.2. אנטומיה משווה.....
13	4.3. מבנים שרידיים.....
14	4.4. התפתחות עוברית.....
16	4.5. אחידות במבנה התאים ובהרכבם הכימי.....
16	4.6. חוקרים אבולוציה: תצפיות שדה כעדות לאבולוציה.....
18	5. אבולוציה בצמחים.....
18	5.1. חוקרים אבולוציה: איך נראה הפרח הראשון?.....
19	6. מינים משתנים: מיקרו-אבולוציה.....
19	6.1. מיקרו-אבולוציה בצוואר הג'ירף.....
20	6.2. חוקרים אבולוציה: עדויות למיקרו-אבולוציה מניסויים בלטאות.....
20	6.3. מיקרו-אבולוציה ביתושים.....
21	7. מינים חדשים מתפתחים ממינים קודמים - מאקרו-אבולוציה.....
21	7.1. ארגון המינים בטבע: בניית עצים אבולוציוניים.....
23	7.2. מחסומים כמנגנון להיווצרות מינים חדשים.....
24	7.3. סחיפה גנטית כמנגנון להיווצרות מינים חדשים.....
25	7.4. חוקרים אבולוציה: מחסומים היוצרים שני מיני עבד.....
25	7.5. חוקרים אבולוציה: היווצרות מין חדש של פרוש.....
26	8. קו-אבולוציה.....
26	8.1. קו-אבולוציה בין נמלים לעצי שיטה.....
27	8.2. קו-אבולוציה בין עש לסחלב.....

9. השפעת האדם על תהליכים אבולוציוניים.....27

- 9.1 השפעת האדם על עמידות לאנטיביוטיקה.....27
- 9.2 השפעת האדם על אבולוציה של העשים באנגליה29
- 9.3 השפעת האדם בביות כלבים31
- 9.4 השפעת הרפואה המודרנית.....32
- 9.5 חוקרים אבולוציה: אבולוציה בחיידקים מעשה ידי אדם32

10. ביומיקרי: חיקי הטבע המופלא.....33

11. סיכום33

12. מידע נוסף ופעילויות נוספות35

- 12.1 פעילות - שינויים בקוטיקולה של זבובים.....35
- 12.2 מידע - שינויים בסביבה המשפיעים על המידע התורשתי בחיידקים35
- 12.3 מידע - היווצרות מינים חדשים.....35
- 12.4 מידע - השפעת האדם על מינים באמצעות ברירה מלאכותית.....36
- 12.5 תרשים נוסף להצגת עקרונות תאוריית האבולוציה.....37

הערות סיום.....38

1. מבוא

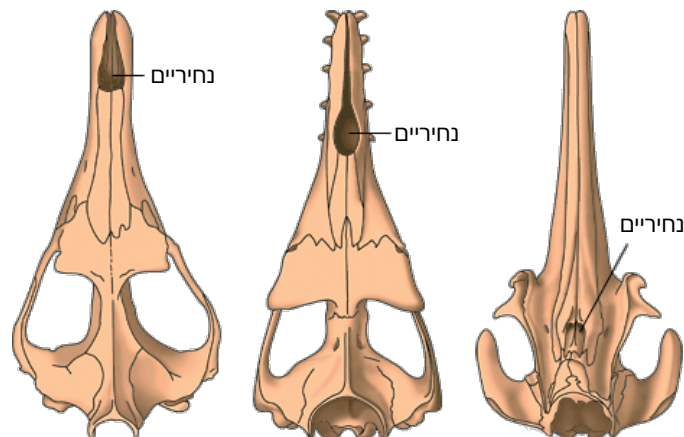
מדע האקולוגיה עוסק בעיקר בסוגיות מנקודת מבט עכשווית: מהם התהליכים המתרחשים במערכת האקולוגית? איך היא מאורגנת? מהי השפעת הגורמים הא-ביוטיים? מהם יחסי הגומלין בין הגורמים הביוטיים? ומהי השפעת האדם על כל אלה? האבולוציה^{1,2} מסבירה איך אורגניזמים השתנו במרוצת העידנים וכיצד התפתחו אורגניזמים המותאמים לסביבתם, תהליך המתרחש לעיתים בתקופות זמן קצרות, יחסית, ולעיתים במשך דורות רבים (מיקרו-אבולוציה). כמו כן האבולוציה עוסקת בהסבר על האופן שבו הופיעו מינים חדשים בטווחי זמן ארוכים (מאקרו-אבולוציה).

מעניין לדעת: על האבולוציה של הלווייתן מיונק החי ביבשה ליונק ימי מותאם לסביבתו.³

האם מאז ומעולם היו הלווייתנים ואבותיהם הקדמונים שחיינים מצטיינים? מתברר שלא בכל התקופות. עוד לפני כמאה שנה הוצע, בעקבות ממצאי מאובנים, שהיונקים הימיים, כמו הלווייתן (ראה איור 1א), התפתחו מקבוצת יונקים יבשתיים שנכחדה זה מכבר. יש בידינו רצף גולגלות המראה את השלבים השונים של המעבר מבעל חיים יבשתי, דרך בעל חיים החי בסמוך למים ועד לבעל חיים ימי לחלוטין. לאבותיהם הקדומים של הלווייתנים היו ארבע גפיים מתפקדות שאפשרו להם להתהלך על האדמה. יונקים יבשתיים אלו מצאו את מזונם ביבשה, אולם בעקבות הידלדלות מקורות המזון ביבשה נאלצו, ככל הנראה, לחפש מקורות מזון חדשים לאורך חופים וביצות, ובהמשך מצאו את מזונם ואת ההגנה הדרושה להם בסביבה הימית. במהלך מיליוני שנים חלו שינויים הדרגתיים בגפיים של אוכלוסיית הלווייתנים, שתרמו להתאמתם לתנועה מהירה במים. הגפיים האחוריות התנוונו, מה שאפשר לאב הקדמון של הלווייתן לשחות בצורה יעילה ומהירה יותר, ולבסוף, עם התפתחות הזנב השטוח המשמש לתנועת-דחף, נעלמו הגפיים האחוריות כמעט לחלוטין. בפלג גופו האחורי של הלווייתן בן-ימינו מסתתרים שרידים של עצמות הגפיים האחוריות שאין להם תפקיד תנועתי נראה לעין אך הם משמשים עדות לשינוי זה. הגפיים הקדמיות התפתחו לסנפירים ושיפרו אף יותר את יכולות התנועה במים.



איור 1א: שריד לגפיים אחוריות אצל לווייתן אפור *Eschrichtius robustus*. אורכו של שלד הלווייתן 8.3 מטר, ורוחבו מטר. צילום מתערוכה במוזיאון הטבע ע"ש שטיינהרדט בתל אביב



איור 1ב: במהלך האבולוציה של הלווייתנים מאורח חיים יבשתי לימי, הנחיריים הופיעו בהדרגה במיקום אחורי יותר.

התאמת הלווייתן לחיים במים כוללת גם מיקום של הנחיריים בחלק האחורי של הראש, והתאמות פיזיולוגיות/ ביוכימיות המייעלות את חילוף הגזים בגוף וברקמות. דוגמה לכך היא דמם של הלווייתנאים העשיר בהמוגלובין, אשר משפר הובלת חמצן מהריאות לחלקי גופו ולמוחו של הלווייתן; שריריו, לעומת זאת, עשירים במיוגלובין, שהוא חלבון הקושר חמצן ומאפשר אחסון שלו לצורכי חילוף חומרים בשרירים במהלך צלילה ממושכת. התאמות אלו ואחרות מקנות ללווייתן אפשרות לשהות מתחת למים דקות ארוכות.

למרות מגוון ההתאמות לחיים במים, ללווייתנים יש תכונות המאפיינות יונקים יבשתיים, לדוגמה, נשימה באמצעות ריאות, המחייבת עלייה לפני המים על מנת לנשום אוויר דרך פתח הנחיריים אחת לזמן מסוים. כמו כן, עופרי הלווייתנים מתפתחים ברחם אימם וניזונים באמצעות שליה וחבל הטבור. נקבות הלווייתנים ממליטות גורים מפותחים הניזונים מחלב אם שהם יונקים מבלוטות החלב של אימם.



ימין: אוויר יוצא מנחיר שמאל בזמן העליה מעל למים, שמאל: עליה של לווייתן מעל למים על מנת לנשום.

על מושגים: מאובנים⁴ (Fossils)



מאובנים הם העדות היחידה שנותרה מבעלי חיים וצמחים שנכחדו לפני מיליוני שנים. המאובנים אינם יצורים מתים, אלא בדרך כלל הצורה המדויקת שלהם, שהשתמרה על הסלע. החלקים שמתאבנים הם לרוב שלד או שריון של בעלי חיים ועלים של צמחים, ובמקרים יוצאי דופן גם תדפיס של רקמות רכות. אפשר ללמוד מהמאובנים מה היה מבנה גופם של בעלי חיים וצמחים שחיו בתקופות שונות, כיצד מתו, מתי חיו ומי קדם למי בעידנים, על פי השכבה שבה נמצאו. ראוי לציין כי נמצאו מאובנים בני מאות או אלפי שנים של בעלי חיים הקיימים עד היום.

איור 2: ימין: מאובן של אַמוֹנִיט (*Ammonoidea*) שהוא חסר חוליות ימי ממחלקת הסילונים. נמצא במצפה רמון וגילו כ-20 מיליון שנה (וגודלו כ-8 ס"מ). שמאל: מאובן של צמח שנמצא במכתש הגדול (גודלו כ-9 ס"מ). מאובנים שצולמו באוספי הטבע הלאומיים באוניברסיטה העברית בירושלים. צילום: אסף אוזן

הלווייתנים של היום נושמים אוויר מהאטמוספירה וממליטים גורים ישירות למים. ציינו שתי מגבלות האופייניות ליונקים החיים במים וחפשו מידע כיצד הם מתמודדים איתן.⁵



מדוגמת הלווייתן ומדוגמאות רבות נוספות של בעלי חיים וצמחים ניכר כי עולם החי והצומח שאנחנו רואים סביבנו שונה מזה שהיה קיים בעבר הקדום וכי מינים שחיו בתקופות קודמות עברו שינויים במהלך ההיסטוריה הארוכה של כדור הארץ. תהליך ההשתנות ההדרגתית של אוכלוסיות של אורגניזמים לאורך דורות הוא תהליך האבולוציה.

2. התפתחות תאוריית האבולוציה

במשך שנים רבות שלטה האמונה כי הטבע החי והדומם (ההרים, הנחלים) שאנחנו רואים סביבנו הוא קבוע, אינו משתנה וכך היה מאז ומעולם. הרעיון שהדבר אינו כך ושבתרבות השנים חלו בטבע שינויים, התפתח בהדרגה החל מהמאה השמונה-עשרה. עובדות שתמכו ברעיון שהטבע אינו קבוע כלל מאובנים של אורגניזמים שניכר בהם שוני מהאורגניזמים הקיימים היום, דמיון במבנה השלד של בעלי חיים שונים, פיזיולוגיה השוואתית ושינויים גיאוגרפיים (נדידת יבשות, שחיקת הרים).

את הבסיס לתאוריית האבולוציה, שלפיה אורגניזמים משתנים לאורך הדורות, גיבש צ'רלס דרווין⁶, (Charles Robert Darwin; 1809-1882). דרווין היה חוקר טבע אנגלי שהתעניין בתופעות טבע ועקב אחריהן בשיטתיות מאז ילדותו ובעיקר במסע בן חמש שנים מסביב לעולם באוניית המחקר "ביגל" שיצאה לדרך ב-1831. במסעו זה התבונן דרווין בצורות החיים במקומות שבהם ביקר, תיעד ואסף באופן קפדני דוגמאות של בעלי-חיים, צמחים ומאובנים. בין המקומות שבהם ביקר אוניית המחקר והשפיעו רבות על דרווין היו איי גלפגוס באוקיינוס השקט, מערבית לחופי אקוודור שבדרום אמריקה. ממצאיו מאיי גלפגוס היו חלק ממכלול הרעיונות שהובילו את דרווין לנסח את תיאוריית האבולוציה.

בשנת 1839 יצא לאור ספרו של דרווין "המסע של הביגל" (The Voyage of the Beagle) שבו תיעד בפרטי פרטים את ממצאי תצפיותיו ומחקריו שלאורם הגה וניסח את התיאוריה המכונה "תיאוריית האבולוציה". תיאוריה זו מסבירה את קיומו של מגוון כה גדול של מינים ביולוגיים הנמצאים בסביבות החיים השונות ומותאמים לסביבתם התאמה מופלאה. התאמות אלו התפתחו בתהליך ארוך והדרגתי במשך אלפי דורות. על פי דרווין, כל האורגניזמים החיים (כולל הצמחים והחידקים) מוצאם מאב קדמון משותף. צאצאיו של אותו אב קדמון השתנו בהדרגה למינים שונים ונפרדים בהשפעת הסביבות שבהן חיו.

עשרים שנה לאחר שובו מהמסע פרסם דרווין את התיאוריה המזוהה עימו. היא הוצגה לראשונה יחד עם ממצאיו הזחים של החוקר האנגלי אלפרד וולאס (A.R. Wallace; 1823-1913) בשנת 1858 והופיעה בדפוס בספר "מוצא המינים בדרך של ברירה טבעית" (The Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life) שראה אור ב-1859.



ימין: בול המראה את האנייה ביגל ואת מסעותיו של דרווין, אמצע: צ'ארלס רוברט דרווין (1840), שמאל: בול עם ספרו של דרווין "מוצא המינים בדרך של ברירה טבעית" שיצא לאור לראשונה ב-1859.

היבט היסטורי: לייל, מלתוס ודרוון



דרוון, כמו מדענים אחרים, נשען "על כתפי ענקים". שני המדענים שהייתה להם השפעה מכרעת על התפתחות תיאוריית האבולוציה שהציע דרווין הם צ'רלס לייל (Charles Lyell; 1817-1897) ותומס מלתוס (Thomas Malthus; 1768-1834).

לייל היה גיאולוג שהציע כי שינויים גיאולוגיים הדרגתיים ואפילו קטנים ביותר עיצבו את פני כדור הארץ במהלך שנים רבות מאוד. מתוך כך הסיק לייל שגילו של כדור הארץ הוא יותר מ-6000 שנה. אם כך, הסיק דרווין, גם אבולוציה באמצעות שינויים קטנים ובמשך זמן רב אכן יכולה להתרחש. את ספרו של לייל, "עקרונות הגיאולוגיה", שפורסם החל בשנת 1830, לקח איתו דרווין למסע של הביגל וקרא בו רבות במהלך המסע. ספרו של תומס מלתוס, "עקרונות של אוכלוסיות" משנת 1798, השפיע בכיוון אחר על מחשבתו של דרווין. מלתוס טען שאוכלוסיות גדלות בקצב מהיר יותר מהקצב שבו מתרבים המשאבים והתוצאה של מצב זה היא רעב ומחלות. הגידול המספרי מצד אחד והמוות של החלשים ביותר מהצד האחר, גורמים למלחמת קיום ולכך שגודל האוכלוסיות נשאר קבוע פחות או יותר.

3. עקרונות תאוריית האבולוציה

דרוין ביסס את תיאוריית האבולוציה על **שלושה עקרונות**:

1. בכל אוכלוסייה קיימת שונות שמקצתה עוברת בתורשה.

2. אף-על-פי שבכל דור נוצרים הרבה צאצאים, גודל האוכלוסיות נשאר לרוב יציב, משום שלא כל הצאצאים שורדים ויש מלחמת קיום. הפרטים השורדים הם בעלי תכונות המאפשרות את המשך קיומם בתנאי סביבה מסוימים, בעוד שהפרטים הפחות מותאמים לסביבה אינם שורדים. זוהי הברירה הטבעית.

3. הפרטים השורדים מעבירים לצאצאיהם בתורשה את התכונות התורמות להישרדותם, וכך עולה שכיחות התכונות המעניקות לפרטים אלו התאמה לסביבה.⁷

שלושת העקרונות יפורטו להלן. תרשים נוסף המציג את עקרונות האבולוציה מופיע בסעיף 12.5.

על מושגים: כשירות

'כשירות' היא מידת היכולת של פרט מסוים להעמיד צאצאים פוריים וכך להוריש את המידע הגנטי שלו לדורות הבאים, וזאת יחסית לפרטים אחרים באוכלוסייה. תהליך הברירה הטבעית תורם לכך ששכיחות הפרטים הכשירים יותר באוכלוסייה עולה בעוד שכיחות הפרטים האחרים קטנה.

הפרט הכשיר ביותר אינו בהכרח החזק ביותר, המהיר ביותר או הגדול ביותר, אלא זה שמצליח בעקביות למצוא מזון, לחמוק מטורפיו, למצוא בן זוג, להתרבות, ובסופו של דבר להעביר את המידע התורשתי שלו לדורות הבאים. כשירות של פרט נאמדת במספר הצאצאים המגיעים לבגרות ומעמידים צאצאים יחסית לפרטים אחרים באוכלוסייה.



מקלונים מסוים היטב על ענף יבש

3.1. שונות גנטית ומקורותיה

אחד מעקרונות תיאוריית האבולוציה הוא השונות הגנטית הקיימת בטבע. בקרב היצורים החיים רואים כי צאצאים של הורים המתרבים ברבייה זוויגית דומים להוריהם אך אינם זהים להם. גם בין אחים יש דמיון אך לא זהות. השונות בין פרטים באוכלוסייה מתבטאת בהבדלים התנהגותיים, פיזיולוגיים, אנטומיים וברמה התאית-מולקולרית. שונות זו היא אבן היסוד בתיאוריית האבולוציה. דרוין היה מודע לקיומה של שונות בקרב פרטים באוכלוסייה, אך כיום אנחנו יודעים להסביר את מקורותיה:

לשונות הגנטית בקרב פרטים באוכלוסייה כמה מקורות:

- תהליך המיזוג הוא תנאי לרבייה זוויגית. בתהליך זה נוצרים תאי זוויג בעלי צירופים שונים של אללים בעקבות אירועי שחלוף והתפלגות בלתי תלויה של כרומוזומים.
- מוטציות⁸ בחומר התורשתי המועבר לדור הבא.

מוטציות עוברות בתורשה לדורות הבאים רק אם הן מתרחשות בתאי הרבייה של פרט מסוים. המוטציות יוצרות אללים נוספים לאותה תכונה כאשר האללים המקנים כשירות עוברים בשכיחות גבוהה יותר לדורות הבאים. מוטציות היוצרות אללים חדשים הן נדירות מאוד. לעומת זאת, רבייה זוויגית מייצרת בכל צאצא הרכב ייחודי של מגוון הגנים של ההורים. השונות הגנטית באוכלוסייה היא תוצאה של שני התהליכים.



מעניין לדעת:

בזמנו של דרווין לא ידעו כיצד פועלת התורשה ומהן מוטציות. אולם הניסיון הרב שנרכש מברירה מלאכותית של צמחים ובעלי-חיים שערכו חקלאים במשך דורות רבים היה בסיס לתיאוריה ותמך בה. דרווין הבין מתוך תצפיותיו כי תכונות עוברות מהורים לצאצאים וכי מוטציות מתרחשות, אף שלא ידע מהם המנגנונים לכך. מנגנון התורשה התברר בעקבות מחקריו של מנדל ופרסום "חוקי מנדל" בשנת 1865. אם כן, הקשר בין ברירה מלאכותית ואבולוציה הוא בכך שדרוין הבין על סמך הניסיון מברירה מלאכותית שיש שונות העוברת בתורשה ושמינים אכן יכולים להשתנות בהדרגה במהלך דורות.

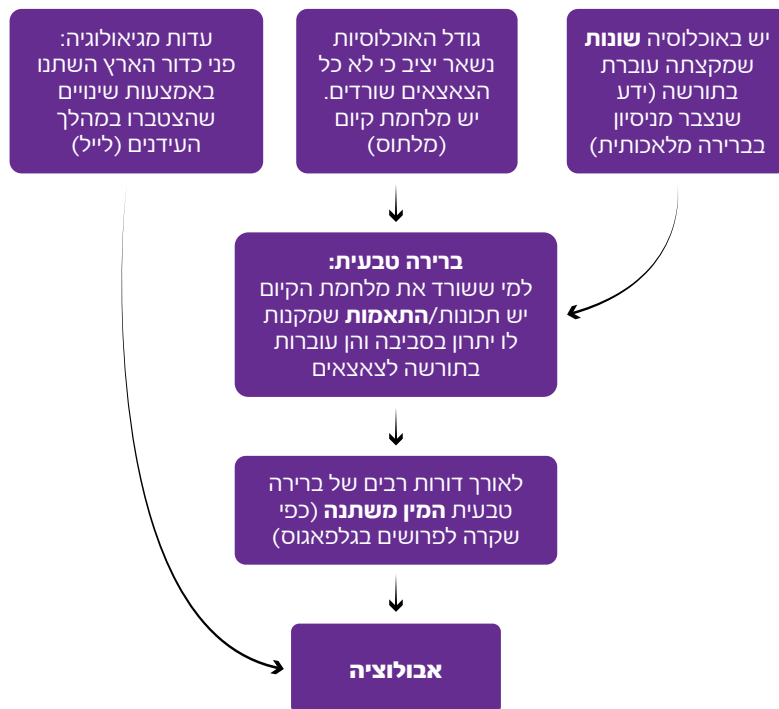
3.2 מנגנון הברירה הטבעית והתורשה

תהליך מרכזי שמוביל את האבולוציה, מהווה אחד מעקרונותיה המרכזיים ומבוסס על שונות הקיימת באוכלוסייה. הברירה הטבעית. דרווין ידע שרוב הצאצאים אינם שורדים את מלחמת הקיום והבין שמשאבים מוגבלים בסביבה יוצרים תחרות בין הפרטים. לאותם צאצאים ששורדים כשירות גבוהה יותר: הם מנצלים בצורה יעילה יותר את המשאבים, או מתמודדים טוב יותר עם לחצי הסביבה. הפרטים ששורדים מתרבים ומורשים לצאצאיהם תכונות המהוות התאמה לסביבה ומקנות להם עדיפות על פני צאצאים אחרים. הם מצליחים לגבור על אחרים בתחרות על המשאבים המוגבלים של הסביבה, מצליחים להימלט מפני טורפים, מצליחים להימנע מתנאים עוינים וכן הלאה. זוהי הברירה הטבעית הפועלת על הפרטים באוכלוסייה. במהלך דורות של ברירה טבעית משתנה הרכב האוכלוסייה, כך שגדלה שכיחותם של הפרטים בעלי התאמות לסביבה, ועם הזמן האוכלוסייה נעשית מותאמת יותר ויותר לתנאי סביבתה. מכל זה נובע שאבולוציה באמצעות ברירה טבעית היא תהליך שנמשך כל העת.

בעוד שמוטציות התורמות לשונות מתרחשות באקראי בפרט מסוים באוכלוסייה, הרי שהברירה הטבעית אינה אקראית, אלא פועלת בתנאי סביבה מסוימים ומשפיעה על האוכלוסייה כולה: הפרטים באוכלוסייה השורדים בסביבה זו הם לרוב אלה המותאמים יותר לתנאיה. אותם גנים או שילובי גנים המאפשרים לפרטים לנצל בצורה יעילה יותר את המשאבים ייעשו נפוצים יותר עם הזמן. לעיתים מופיעות מוטציות או שילובי גנים חדשים המאפשרים ניצול של הסביבה בצורה יעילה אף יותר. איור 3⁹ מסכם את עיקרי האבולוציה בעיניים של דרווין.



בזכות השונות, אוכלוסיות יכולות להמשיך להתקיים, גם כשתנאי הסביבה משתנים. הסבירו משפט זה¹⁰.



איור 3: אבולוציה בעיניים של דרווין: ניסיון חיים, תצפיות ותמיכה מגיאולוגיה וממאובנים לתיאוריה

3.3 חוקרים אבולוציה: בעקבות דרווין באיי גלפגוס¹¹

אפשר לעקוב אחרי תהליך החשיבה המדעית של דרווין לאור תצפיותיו: דרווין הבחין כי יש באיים מעט מיני ציפורים אשר רובן שייכות לסוג ה"פרוש".

באיים השונים הוא הבחין במינים שונים של פרושים. בעקבות תצפיותיו שאל דרווין שאלות רבות, שביניהן:

למה יש באיים כל כך מעט מינים?

למה רוב המינים שייכים לסוג ה"פרוש"?

איך הגיעו הציפורים הללו לאיי גלפגוס?

מדוע הפרושים דומים למינים מדרום אמריקה יותר מאשר למינים החיים באזורים אקלימיים זהים לשלהם?

למה על איים שונים גדלים מינים שונים?

דרווין התחבט רבות בשאלות אלו אף לאחר שעזב את איי גלפגוס. וכידוע, נדרשו לו שנים לנסח את התיאוריה ולבסס אותה.



איור 4: דרום אמריקה ואיי גלפגוס (מוקפים בעיגול)

דרווין שהה באיי גלפגוס רק כמה שבועות. עוד בהיותו במקום הוא שמ לב שבכל אי יש מינים הייחודיים לו (ציפורים, צבים, צמחים). אך להבנה שכל מיני הציפורים באיים קרובים מאוד זה לזה הוא הגיע רק לאחר שובו לאנגליה, בזמן שחוקר הציפורים (John Gould; 1804-1881) שאליו הוא שלח את הציפורים שאסף, זיהה את המינים השונים של הציפורים ובהם הפרושים.



מבין הממצאים הרבים שתיעד דרווין במסעותיו לאיי גלפגוס היו ציפורי שיר קטנות מסוג פרושים קרקעיים (*Geospiza*) וצבי ענק שהציתו את סקרנותו.

דרווין הבחין כי אף שכל מיני הפרושים החיים על איים שונים בגלפגוס, מוצאם ממין אחד שמקורו ביבשת דרום אמריקה, למינים השונים יש מבנה שונה של מקור. דרווין הסביר כי מבנה המקור מותאם לסוג המזון הנמצא בכל אי והוא השתנה במהלך האבולוציה שעבר כל מין פרוש באי שהוא חי בו (איור 5).



איור 5: מיני פרושים אותם תיעד דרווין באיי גלפגוס.

בעלי המקור העבה ניזונים מזרעים גדולים וקשים ובעלי המקור הדק והעדין ניזונים מזרעים קטנים.



איור 6ב:
קקטוס גבוה באי פינסון

באופן דומה, זיהה דרווין בעזרת אנשי איי גלפגוס טיפוסים שונים של צבי ענק אשר מעט נבדלים זה מזה במבנה השריון שלהם, בהתאם לאי שממנו הגיעו. לדוגמה, באי פינסון הוא תיעד צב ממין *Saddle Back* (ראו איור 6א) שהשריון שלו מתעקל בחזיתו בדומה לאוכף ואילו באי סנטה קרוז נמצא צב ממין *Dome Shelled* (ראו איור 6ב) שצורת השריון שלו היא ככיפה, ללא העיקול בחזית השריון. תצפיות נוספות הראו כי באי פינסון צורת השריון המעוקלת מאפשרת לצב לזקוף את צווארו ולאכול את הקקטוסים הגבוהים הגדלים באי (איור 6ב), ואילו בצבים הגדלים באי סנטה קרוז צורת השריון השונה מותאמת לאכילת צמחים הגדלים על הקרקע.

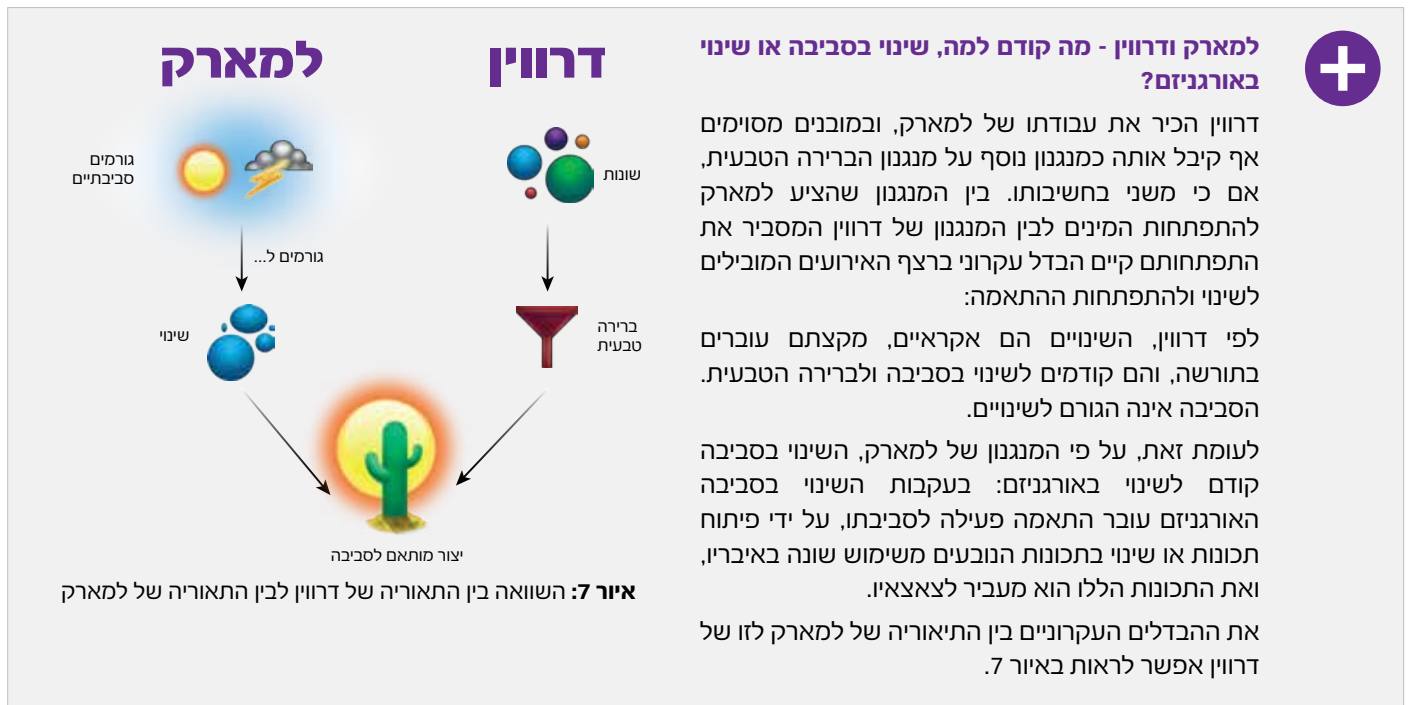
לפיכך, כמו במקרה של הפרושים, ההבדלים המבניים בצבים מצביעים על התאמה של מבנה השריון שהתפתחה בהשפעת ברירה טבעית. ההתאמה התפתחה בהתאם לתנאים הא-בינטיים והבינטיים השוררים באיים השונים; האי סנטה קרוז עשיר בצמחייה גבוהה ובלחות גבוהה; ולעומת זאת, באי פינסון שורר אקלים מדברי.



איור 6א: מעלה: צב ממין *Saddle Back* הדומה לזה שחי באי פינסון.
מטה: צב ממין *Dome Shelled* החי באי סנטה קרוז

4.3. גישתו של למארק לעומת גישתו של דרווין

כפי שתואר לעיל, השאלה על עצם קיומם של מינים רבים ושונים ועל מוצאם עניינה גם חוקרים שקדמו לדרווין. אחד המפורסמים שבהם הוא החוקר הצרפתי ז'אן-בטיסט דה למארק (1744-1829) (Jean-Baptiste de Lamarck). למארק הבין שמינים משתנים (אינם קבועים) לאורך זמן ואף הציע את המנגנון המוביל לשינוי: אופן השימוש באיבר מסוים ותדירות השימוש בו גורמים בהדרגה לשיפור במבנה האיבר ובתפקודו. כמו בדוגמה הידועה של התארכות צוואר הג'ירפים, שימוש רב בתנועת התארכות הצוואר על מנת להגיע למזון הנמצא על עצים גבוהים עובר בתורשה לדורות הבאים. למארק התייחס בתיאוריה שלו רק לתכונות המקנות יתרון לאורגניזם.¹²



4. עדויות לקיומה של אבולוציה

ראוי לציין כי קצב האבולוציה אינו קבוע. יש תקופות או נסיבות שבהן קצב האבולוציה הופך להיות מהיר מאוד באופן יחסי, אך גם אז הוא לרוב איטי מכדי לראות שינויים משמעותיים. במהלך חייו של האדם אפשר לראות שינויים בתדירות אללים (כמו בדוגמת העשים באנגליה ובמקרה של שינויים המתרחשים בחיידקים), אך לרוב שינויים משמעותיים נצפים במעקב אחרי מאובנים מתקופות שונות.

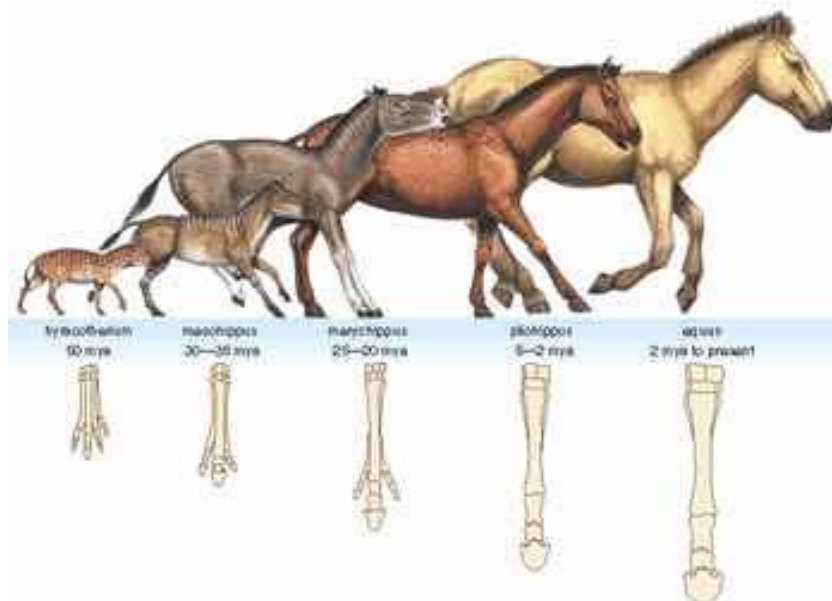
כל תיאוריה מדעית, ובכלל זה תיאוריית האבולוציה, זקוקה לעדויות התומכות בעיקרה. עדויות מתחומים שונים הן המהוות סימוכין לקיומו של תהליך האבולוציה ותומכות בהסברים שמציעה התיאוריה.

4.1. חקר המאובנים - פלאונטולוגיה

עדויות ראשונות על כך שמינים השתנו, נחשפו בפני חוקרי הטבע ממאובנים שנראו שונים ממינים קיימים. מיקומם של המאובנים בשכבות הסלע מאפשר לאמוד את רצף הזמן שבו הופיעו האורגניזמים שהותירו אחריהם את המאובנים.

התבוננות במאובנים מאפשרת במקרים רבים לעקוב אחרי רצף אירועים אבולוציוניים (כפי שיודגם בסוסים, איור 8), בעוד שבמקרים אחרים אפשר לראות את המצב הפשוט והקדום יותר שממנו הגיע דגם הגוף הקיים כיום (כפי שיודגם להלן בטטרפודופיס איור 9).

דוגמה אחת מיני רבות המעידה על אבולוציה של מינים המסתמכת על ממצאים ממאובנים היא שושלת הסוסים. ממצאים אלה הראו כי בתהליך האבולוציוני שנמשך כחמישים מיליון שנה, מן הסוס הקדום ועד הסוס המודרני, חלו כמה וכמה שינויים, כמו עלייה במשקל הגוף וצמצום מספר האצבעות משלוש לאחת. מהאצבע היחידה התפתחה בסופו של דבר הפרסה שאותה אנו מכירים כיום. הפרסה היא התאמה לריצה מהירה, מאחר שהיא מקטינה את החיכוך בין הרגל לקרקע. שינוי הדרגתי כזה אפשר לסוסים הרצים מהר מאחרים להימלט מטורפים ולהעמיד צאצאים מהירים, אף הם בעלי אצבע אחת.



איור 8: עליה במשקל הגוף במקביל לצמצום מספר האצבעות

דוגמה מעניינת נוספת מקורה בברזיל, שם נמצאו מאובנים של בעל חיים דמוי נחש בעל ארבע גפיים, טטרפודופיס (*Tetrapodophis*). גופו של הטטרפודופיס (איור 9 א') היה בעל מאפיינים הקיימים בנחשים של היום: גופו היה ארוך - היו לו כ-160 חוליות בצווארו ולאורך הגו - והוא היה מסוגל לפרוק את לסתותיו כדי לבלוע טרף גדול. גפיו היו קטנות ואצבעותיו ארוכות מאלה של לטאות, וכנראה לא שימשו אותו לתנועה. מה היה תפקידן של הגפיים? חוקרים משערים שהאצבעות הארוכות שימשו לתפיסה, לחיבוק - אולי של טרף, כדי להכניע אותו, ואולי של בן זוג בזמן הזדווגות.



איור 9א: מאובן של טררהפודופיס

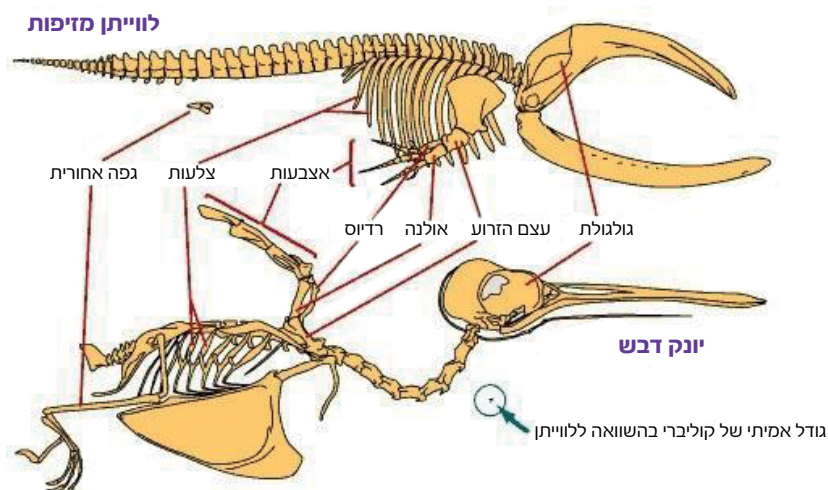
איור 9ב: טביעות רגליים של דינוזאור שנתגלו בבית זית וגילם כ-100 מליון שנה (גובה טביעת האצבע 20 ס"מ).
צולם באוספי הטבע הלאומיים באוניברסיטה העברית בירושלים.
צילום: אסף אוזן

נוסף על העדויות הישירות שבהן עסקנו, מאובנים יכולים לכלול עדויות בלתי ישירות על אודות בעלי חיים שחיו בעבר, כגון עקבות. בשנת 1962 גילה פרופ' אבנימלך מן האוניברסיטה העברית כ-200 עקבות של דינוזאורים בבית זית שליד ירושלים. העקבות בנות כ-100 מליון שנה וניכרים בהם בבירור סימנים של 3 אצבעות, כמו באיור 9ב'.

4.2. אנטומיה משווה

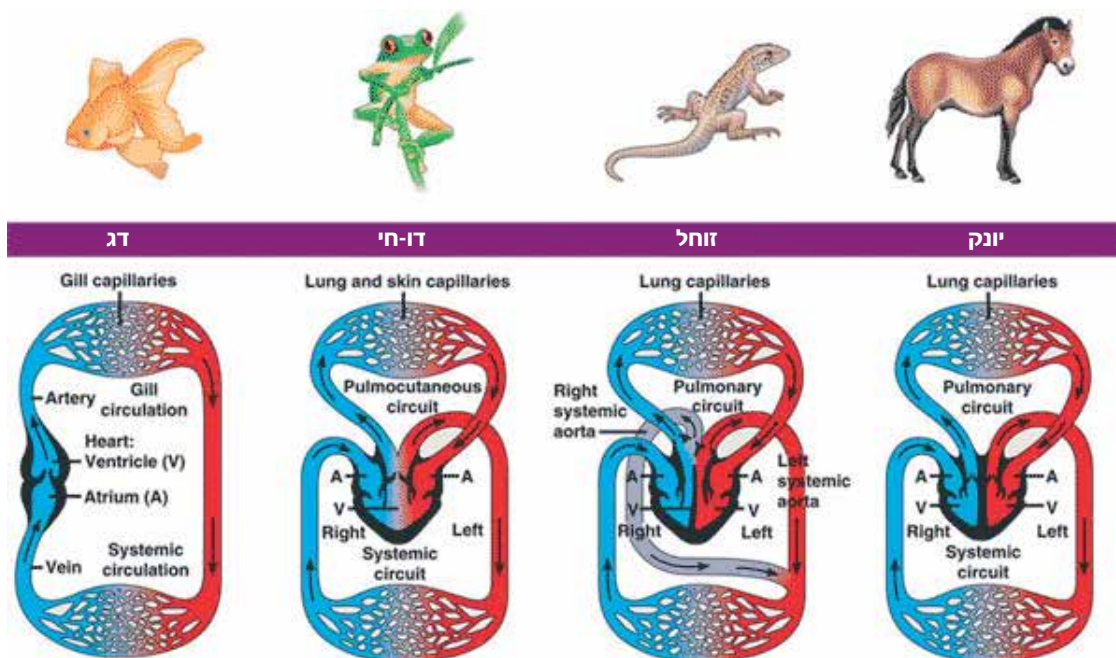
דמיון אנטומי בין מינים קרובים מעיד על קרבתם זה לזה. לעיתים הדמיון בולט, למשל, הדמיון בין תנינים לאליגטורים, אך לעיתים נדרש לא מעט מחקר משווה כדי להבין לעומק את הדמיון והקרבה.

לדוגמה, במבט ראשון, לווייתנים והציפור הזעירה יונק דבש (קוליברי) נראים שונים מאוד: הגדלים שלהם שונים לחלוטין¹³ והם חיים בסביבות חיים אחרות לגמרי. המראה החיצוני שלהם אינו מרמז בשום דרך על קרבה כלשהי ביניהם. אולם, לשני המינים שלד של הולך על-ארבע שירשו מאב קדמון משותף (איור 10)¹⁴. תהליכים אבולוציוניים שהתרחשו במשך מיליוני שנים יצרו, בתהליך של ברירה טבעית, התאמה של כל אחד מהם לאורחות חייו. למרות השוני החיצוני, קל להדגים את יחסי הקרבה ביניהם כשבוחנים את מבנם האנטומי ומשווים בין השניים; כמעט לכל עצם בגוף של אחד מהם עצם מקבילה בגופו של האחר, למעט אותן עצמות שנעלמו במרוצת האבולוציה.



איור 10: השוואה בין האיברים של לווייתן מזיפות לבין איבריו של יונק דבש. ניכר כי לשני המינים איברים משותפים רבים.

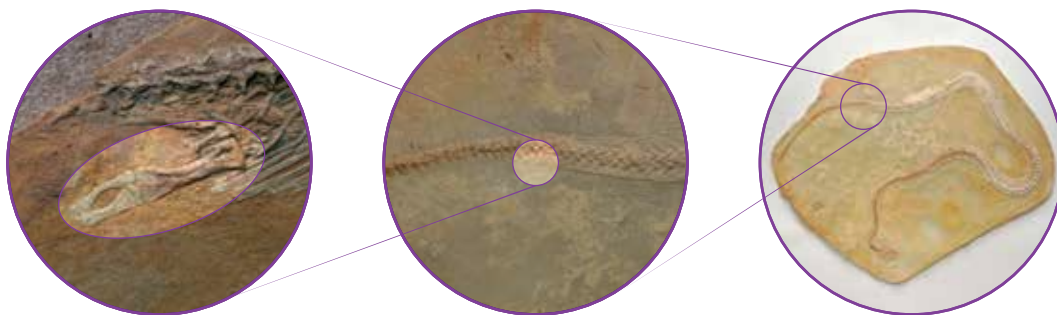
אנטומיה משווה מאפשרת לסווג בעלי חיים לקבוצות ולעקוב אחרי התפלגות של תכונות בקבוצות שונות, וכך לשחזר את האבולוציה של תכונות אלו. כאשר עוקבים אחר מבנה הלב של חולייתנים (דגים, דו-חיים, עופות ויונקים) מוצאים כי בכולם קיים דמיון יסודי במבנה הלב ובאופן תפקודו: הלב הוא איבר שרירי המזרים את הדם לכל חלקי הגוף, באמצעות התכווצויות, והדם חוזר אל הלב. בצד דמיון יסודי זה יש הבדלים שהתפתחו במהלך האבולוציה: בדגים הלב הוא איבר צינורי בעל עלייה אחת וחדר אחד, בעוד דו-חיים, זוחלים, בעופות וביונקים קיימים מבנים נוספים, כמו שסתומים והפרדה מוחלטת לשתי עליות ושני חדרים (המונעת ערבוב של דם עשיר בחמצן עם דם שהינו פחות עשיר בחמצן). מבנה זה של הלב מאפשר להגביר את רמת המטבוליזם. ההשתנות ההדרגתית של מבנה הלב תואמת את רצף ההתפתחות האבולוציונית של החולייתנים (ראו איור 11). ראוי לציין כי כל אחד מן הלבבות ביצורים השונים מותאם לסביבת החיים של היצור החי. מבנה ליבו של דג, החי במים, מותאם לחיים אלו, וכך גם מבנה הלבבות של שאר היצורים החיים.



איור 11: השוואה בין לבבות של דגים דו-חיים זוחלים ויונקים.

4.3 מבנים שרידיים

השוואה אנטומית בין אורגניזמים מקבוצות שונות מראה איברים שרידיים שבהווה אין להם תפקיד (איור 12), אם כי הגיוני להניח שבעבר הרחוק היו אלה איברים תפקודיים, כשם שתיארנו בראשית הפרק ביחס לשרידי עצמות הגפיים בלווייתן. מבנים שרידיים מלמדים אותנו על קרבה אבולוציונית ועל התהליך ההדרגתי של שינוי בתכונות; תכונה, איבר או מבנה שאין בהם יתרון לאורגניזם אינם נעלמים בבת אחת, אלא בתהליך הדרגתי, שבמהלכו אנחנו רואים רמות שונות של מבנים שרידיים.



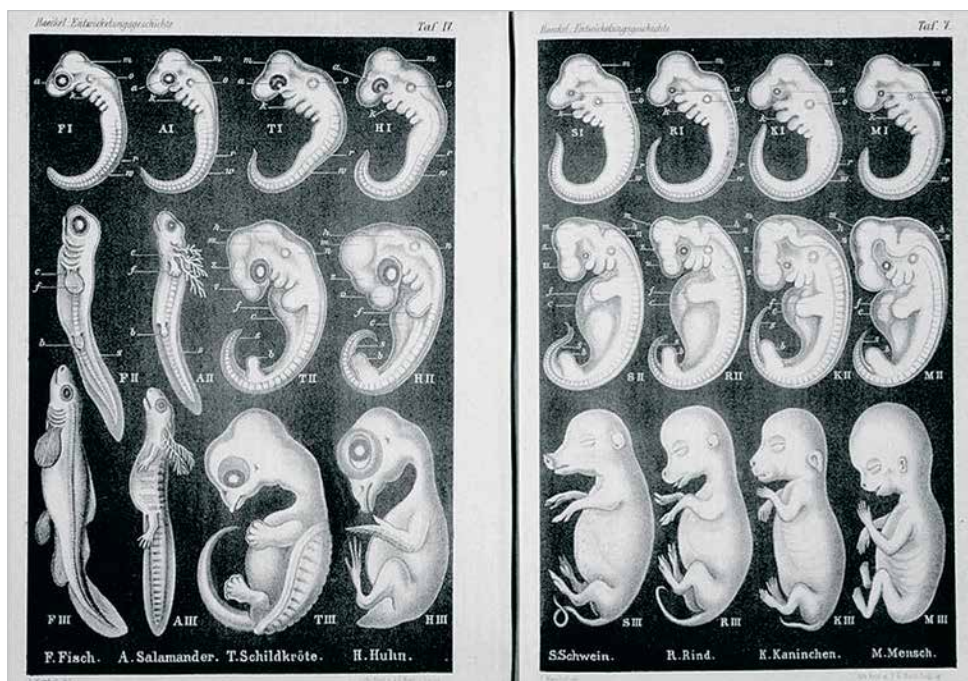
איור 12א: מאובן של נחש ימי *Haasiophis terrasanctus* שנתגלה בעין יברוד שבהרי בנימין, שאורכו כ-80 ס"מ. בתמונה הימנית רואים מאובן של הנחש כולו עם שרידי רגליים. שרידי הרגליים מוגדלות באיור האמצעי והשמאלי גילו כ-90 מליון שנה.



איור 12ב: חנק (*Eryx jaculus*) בניגוד לנחשים המאובנים להם יש רגליים של ממש, בחנק נשארו "מתגים" קטנים המהווים את האיבר השרירי (רוחב הרגל כ-2 ס"מ ואורך החנק כ-60 ס"מ). התמונות צולמו באוספי הטבע הלאומיים באוניברסיטה העברית בירושלים. צילום: אסף אוזן

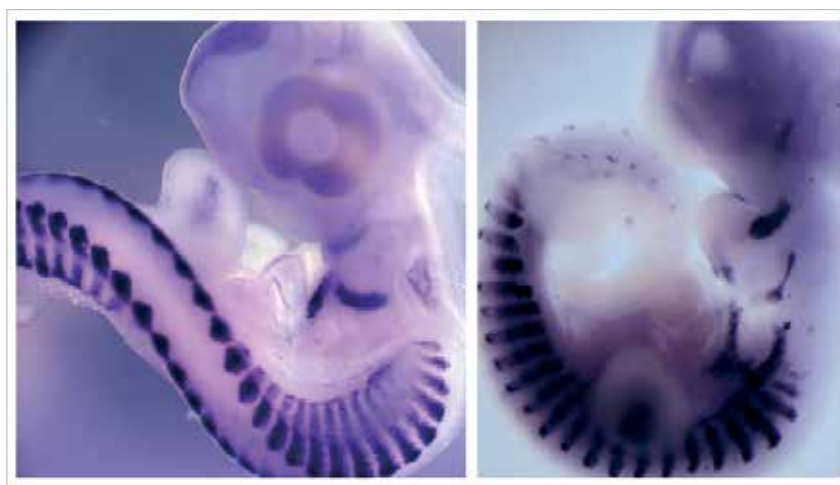
4.4. התפתחות עוברית

בעלי חיים רב-תאיים המתרבים ברבייה זוויגית מתחילים את התפתחותם בדרך דומה: הפריית תא ביצית על ידי תא זרע. תא מופרה זה עובר במהלך התפתחותו שלבים שונים. אם נתבונן בשלבי ההתפתחות העוברית של חולייתנים, כמו יונקים, זוחלים, דו-חיים, עופות ודגים, ונשווה ביניהם, נמצא דמיון מפתיע בין עובריהם, אף-על-פי שקשה למצוא דמיון בין אותם בעלי חיים בצורתם הבוגרת (איור 13 א ב).¹⁵



איור 13א': השוואה בין התפתחות עוברית של בעלי חוליות שונים. שימו לב לדמיון בעיקר בשלבים המוקדמים של ההתפתחות העוברית. מקור: ויקיפדיה

שמות בעלי החיים מימין לשמאל: אדם, ארנב, פרה, חזיר, עוף, צב, סלמנדרה, דג



איור 13ב': צילום עוברים של עכבר ושל אפרוח. צולם במעבדתו של פרופ' אלדד צחור ממכון ויצמן למדע. הפסים הנראים בתמונה מצביעים על ביטוי של גן המשותף לשני סוגי העוברים.

נוסף על מבנים אנטומיים דומים, מגגונים מולקולריים היוצרים מבנים שונים משמשים עדות למקור אבולוציוני משותף. דוגמה לכך היא קבוצת גנים הקרויים Hox. אלו הם גנים שמורים מאוד בקרב כל האאוקריוטים הרב-תאיים, שהינם בעלי תפקיד משמעותי בתהליך ההתפתחות העוברית. תפקידם לקבוע את זהותם של המקטעים בציר הראש-זנב בעובר. הכוונה היא כי גנים אלו קובעים את סוגי ה"תוספות" שיווצרו בבעל החיים, כמו כנפיים או רגליים. כמו כן הם קובעים את סוג החוליה בבעלי חוליות. שימורם של גנים אלו מצביע על מוצא אבולוציוני משותף של האאוקריוטים.

ראוי לציין כי הגנים המוזכרים מאפיינים אאוקריוטים רב-תאיים בעלי סימטריה דו-צדדית (בילטרלית).

4.5 אחידות במבנה התאים ובהרכבם הכימי

עדויות תומכות אחרות מגיעות מן האחידות הרבה במבנה התאים, בסוגי החומרים המרכיבים אותם (חלבונים, חומצות גרעין) והנמצאים בתוכם. אחידות זו היא עדות חשובה מאוד למוצא המשותף של כל האורגניזמים.

החל מאמצע המאה העשרים החלה המהפכה בידע הגנטי ובדרכי הורשתו. הידע על מבנה ה-DNA והחלבונים הוסיף נדבך חדש לידע שהצטבר ממאובנים ומהשוואת מבנים באורגניזמים קיימים. היתרון המשמעותי בשימוש ברצפים גנטיים הוא שאין הם מחייבים ידע על אודות האורגניזמים הנבדקים מבחינת מקום מחייתם, התקופות שבהן חיו ועוד. על כן, השימוש בנתונים גנטיים הוא "ניטרלי" בהרבה משימוש בתכונות אחרות.



חוקרים רצו לבחון את מידת הקרבה התורשתית בין יונקים שונים: סוסים, פרות, חתולים, כלבים ועטלפים. לצורך כך הם השוו את רצפי ה-DNA של כל היונקים הנבדקים. על סמך בדיקה זו מצאו החוקרים שהקרבה בין סוסים לעטלפים גדולה מהקרבה בין הסוסים לכלבים, לפרות ולחתולים. הסבירו מדוע אפשר לקבוע דרגת קרבה בין מינים באמצעות השוואה בין רצפי ה-DNA שלהם. בהסבר הסתמכו על ההנחה שליצורים הנבדקים יש אב קדמון משותף.¹⁶

איור 14 מראה כי קיימים רצפים זהים לבעלי חיים שונים, וכן שקיימים אתרים שניכרים בהם שינויים ב-DNA המצביעים על התרחשויות מוטציות. ככל שיותר מינים חולקים את המוטציה כך היא אירעה מוקדם יותר במהלך האבולוציה.

	1	10	20	30	40	50	56																																																	
1	G	C	A	T	T	C	T	A	C	T	T	C	T	A	A	T	C	C	T	A	G	T	A	A	T	A	G	C	C	A	C	T	G	C	T	T	T	C	G	T	A	G	G	T	T	A	T	G	T	A	C	T	A	C	C	T
2	G	C	G	T	A	A	T	C	C	T	C	C	T	A	T	T	C	T	T	A	G	T	C	A	T	A	G	C	C	A	C	A	G	C	C	T	T	T	G	T	C	G	G	C	T	A	T	G	T	C	C	T	A	C	C	A
3	G	A	A	C	T	A	C	C	T	T	C	T	A	A	T	T	G	T	T	C	T	C	A	T	A	G	C	T	A	C	C	G	C	C	T	T	C	T	T	C	G	G	C	T	A	T	G	T	C	C	T	C	C	A		
4	G	T	A	T	C	C	T	G	C	T	C	C	T	T	T	T	T	G	C	C	G	T	A	A	T	A	G	C	A	A	C	A	G	C	C	T	T	C	A	T	A	G	G	C	T	A	T	G	T	A	C	T	C	C	C	A
5	G	A	G	T	T	G	T	C	C	T	A	C	T	A	C	T	C	C	T	A	A	T	T	A	T	A	G	C	C	A	C	C	G	C	A	T	T	C	A	T	A	G	G	C	T	A	C	T	C	C	T	A	C	C	C	
6	G	A	A	T	T	A	T	C	T	T	A	T	G	T	T	C	G	C	A	A	C	C	A	T	G	G	C	C	A	C	A	G	C	A	T	T	T	A	T	G	G	C	T	A	C	G	T	T	T	T	A	C	C	G		
7	G	A	G	T	A	A	T	T	C	T	T	T	A	T	T	T	G	C	T	G	T	A	A	T	A	G	C	C	A	C	T	G	C	A	T	T	T	A	T	A	G	G	A	T	A	T	G	T	G	C	T	T	C	C	A	

איור 14: מקטע מתוך הגן המיטוכונדריאלי המקודד לציטוכרום 8.

בתמונה מוצגים שבעה חוליתנים על פי הסדר (מלמעלה למטה): שממית, צפרדע, עכן (מין נחש), עטלף, צב יבשה, שועל, פסמון.

מהשוואת רצפי ה-DNA של מינים שונים נוכל לבדוק עד כמה הם דומים זה לזה ולתת להם ציון מספרי על-פי מידת הדמיון. בעזרת הציונים שנתנו לקטעי ה-DNA מהמינים השונים אפשר לדעת מי התפצל ממי, ואף להעריך לפני כמה זמן זה קרה. ככל שההבדלים בין רצפי ה-DNA גדולים כך אפשר להעריך שעבר זמן רב ממועד ההתפצלות. עדויות גנטיות כאלה מתאימות באופן מרשים מאוד לתיארוך המבוסס על מאובנים שהתגלו בשכבות שונות בכדור הארץ.

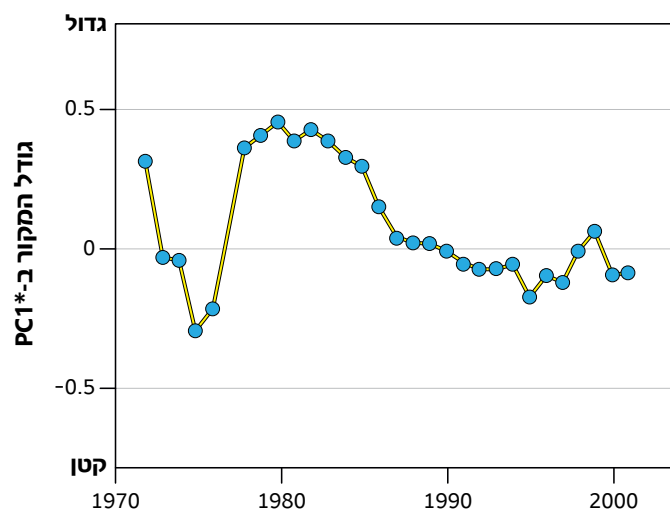
לדוגמה, השוואת רצפי חומצות אמינו של חלבון ההמוגלובין הראתה שהמוגלובין של בני אדם שונה מזה של הכלב ב-15 (מתוך כ-300) חומצות אמינו ושונה מזה של תרנגולת ב-45 חומצות אמינו.

4.6 חוקרים אבולוציה: תצפיות שדה כעדות לאבולוציה

החל מ-1970, במשך ארבעים שנה, נערך בא"י גלפגוס מחקר שדה רחב-היקף על פרושים.

אחד מהאיים שבהם נערך המחקר הוא אי קטן מאוד הנקרא "דפנה". בתחילת המחקר חי באי זה מין אחד של פרושים, המכונה "פורטיס". מין זה מאופיין במקור קטן, יחסית, והוא ניזון מזרעים שהוא מפצח במקורו.

בשנים 1977-1978 הייתה באי בצורת קשה שפגעה בצמחייה. בעוד שבתנאים רגילים יש שפע של זרעים קטנים ורכים, בתקופת הבצורת כמותם פחתה ונשארו בעיקר זרעים גדולים וקשים. הבצורת נמשכה כ-18 חודשים, ורוב הפרושים מתו בתנאים הקשים.



* גודל המקור נמדד ביחידות PC1 המשקפות את אורך, עומק ורוחב המקור.

איור 15: שינויים בגודל הממוצע של המקור בפרושים באי דפנה במהלך השנים. (הקו המצויר על ציר ה-Y בנקודה 0, מייצג את הגודל הממוצע של המקור בשנת 1973).

- א. על פי העקום לעיל (איור 15), תארו את השתנות גודל המקור הממוצע של הפרושים מהמין "פורטיס" בשנים 1970 עד 2005.
- ב. בשנים 1976-1978 הייתה באי דפנה בצורת קשה ורכים מהפרושים לא שרדו. הדבר השפיע על גודל המקור הממוצע של הפרושים. הציעו הסבר לשינוי שאירע בגודל המקור של הפרושים במהלך השנים. היעזרו בגרף על מנת לתמוך בטענתכם.¹⁷



5. אבולוציה בצמחים

רוב רובם של הדיונים, הממצאים, העדויות והטיעונים הנוגעים לאבולוציה שהצגנו בפניכם עד כה מבוססים על מידע המתייחס לבעלי חיים, אך למעשה יש גם הרבה מאובנים של צמחים שהותירו אחריהם שלד סידי או צורני. התפתחות חשובה שאירעה במהלך האבולוציה של צמחים היא הופעת הצמחים בעלי הפרחים והפירות המכונים מכוסי זרע. מחקרים מצביעים כי צמחי היבשה הופיעו לפני 470 מיליון שנה לפחות וכי מכוסי הזרע הופיעו לפני 130 מיליון שנה לפחות.

האבולוציה של צמחים מתאפיינת במורכבות הולכת וגדלה של האורגניזם, החל מאצות, שבת גידול במים, עבור דרך טחבים, שרכים, צמחים חשופי זרע וכלה בצמחים מכוסי זרע.

כיום משערים שצמחי היבשה התפתחו מאצות פוטוסינתטיות שחיו במים. המעבר לחיים ביבשה התאפשר באמצעות התאמות למניעת התייבשות, כמו כיסוי גוף אטום - קוטיקולה, ובה פתחים לחילוף גזים (פיוניות), וזרעים רדומים, לא פעילים, המוגנים בקליפה ו"מצוידיים" בחומרי תשמורת, אשר שורדים תקופות ארוכות של חוסר מים.

שימו לב: גם בעלי החיים החלו את התפתחותם במים, והמעבר לחיים ביבשה לווה באמצעים להגנה על הפנים ועל החוץ מפני התייבשות, הפריה פנימית, הגנה על עוברים (ביצה ורחם) ואספקת מזון לעוברים.

החידוש העיקרי של מכוסי הזרע שהוביל לכך שהם הצמחים השליטים ביבשה היה התפתחות פרחים ופירות. משערים שחלקי הפרח הקשורים ברכייה - שחלה ואבקנים - התפתחו מעלים שטוחים. בד בבד עם התפתחות זו התפתחו גם ההתאמות המגוונות שעליהן מתבססים יחסי השיתוף ההדדיים עם בעלי חיים הן בהאבקה והן בהפצה.



יחסי שיתוף בין צמחים לבעלי חיים: דבורה מאביקה פרח.



פירות ופרחים בעץ קטלב.

5.1 חוקרים אבולוציה: איך נראה הפרח הראשון?



איור 16ב': מאובן שצולם באוספי הטבע הלאומיים באוניברסיטה העברית בירושלים. גודל: כ-1 ס"מ צילום: אסף און

באוגוסט 2017 החלו להתפרסם בעיתונות בארץ ובעולם כתבות שדיווחו על מחקר פורץ דרך על אודות מבנהו של הפרח הקדום שהיווה מוצא למגוון העצום של פרחי הצמחים מכוסי הזרע המהווים כ-90% מצמחי היבשה.

במחקר, שנערך בשיתוף 36 חוקרים מ-17 אוניברסיטאות ומוסדות מחקר, אספו החוקרים 13,444 פריטי מידע מבני וגנטי של 792 צמחים וניתחו אותם בשיטות שונות. על סמך מידע זה הציעו החוקרים כי הפרח הראשון נראה כנראה כמו זה הנראה באיור 16 א.¹⁸



איור 16א': הפרח הראשון על פי מחקרים

המבנה המשוער של הפרח הראשון כלל 10 עלי עטיף (ללא הבחנה בין עלי גביע לכותרת), יותר מ-10 אבקנים ויותר מ-5 עליים. האיברים השונים היו מאורגנים במעגלים, כ-3 איברים בכל מעגל.

החוקרים מציינים שאין כיום פרח הזהה במראהו ובמבנהו לפרח הראשון, ואין בכך פלא, משום שחלפו לפחות 140 מיליון שנה שבמהלכן עברו הפרחים אבולוציה בעקבות לחצי ברירה טבעית וקו-אבולוציה עם מאביקיהם, מפציהם וכן אוכליהם. כתוצאה מכל אלה התפתח מגוון עצום של פרחים. שני שינויים שחלו מאז במבנה הפרחים היו: צמצום מספר האיברים ואיחוד איברים.

המחקרים הנוגעים לאבולוציה של צמחים נתקלים בקושי בשל מיעוט יחסי של ממצאים ממאובנים, והם נעזרים במידע השוואתי על מבנה הצמחים ואבריהם וכן במידע מולקולרי. בדומה למחקרים אבולוציוניים הנערכים על בעלי חיים, מחקר זה מבוסס על ביולוגיה השוואתית של אורגניזמים הקיימים היום עם ממצאים מן העבר.

6. מינים משתנים: מיקרו-אבולוציה¹⁹

תהליך מיקרו-אבולוציוני הוא שינוי בשכיחות האללים באוכלוסייה (שינוי בתכונות של הפרטים לאורך הדורות, (descent with modifications) וכפועל יוצא מכך, שכיחות הפרטים באוכלוסייה המותאמים לסביבתם. אוכלוסייה היא קבוצה של פרטים שמתרבים זה עם זה ולכן בעלי מאגר גנים משותף. תהליך המיקרו-אבולוציה יכול להתרחש תוך דור אחד או במספר דורות בודדים ויכול להימשך דורות רבים. לדוגמה, דרורי בית שמקורם באירופה עברו התאמה לאקלים של צפון אמריקה, וכנימות פיתחו עמידות לקוטלי חרקים. אף וירוס ה-HIV, הגורם למחלת האיידס, משתנה לעיתים תכופות ומפתח עמידות לתרופות הניתנות לחולים כנגדו.

כל אלו הן דוגמאות למיקרו-אבולוציה.

6.1 מיקרו-אבולוציה בצוואר הג'ירף

דוגמה מעניינת של מיקרו-אבולוציה היא צווארו הארוך של הג'ירף. זוהי אינה תכונה נפוצה בקרב יונקים, ועל כן מעוררת שאלות ותהיות: כיצד התפתח הצוואר הארוך של הג'ירף?

1. הציעו תשובה לשאלה, כיצד התפתח הצוואר הארוך של הג'ירף על פי למארק ועל פי דרווין?
2. חפשו במאגרי מידע מהי התיאוריה המקובלת היום ביחס להתארכות צוואר הג'ירף.
3. הג'ירפים הם אוכלי צמחים. איזה שינוי סביבתי יכול היה לגרום להתארכות צוואר הג'ירפים?



אפשר להעלות השערות רבות, אך ייתכן כי עצים גבוהים היו משאב מזון לא מנוצל. ג'ירפים שהיה להם צוואר ארוך ורגליים ארוכות התחילו לנצל את המזון הממוקם על העצים הגבוהים ועל כן התפתחה תחרות סביב ניצול יעיל של העצים והגעה לאזורים גבוהים אף יותר בעץ, שבהם התחרות קטנה ולכן הזמינות רבה.

בתנאים אלו לג'ירפים בעלי צוואר ארוך, ולו במעט, היה יתרון על פני פרטים אחרים, משום שהם יכלו למצוא מזון גם על עצים גבוהים. אלא שבמקרה הייתה באוכלוסיית הג'ירפים שונות רבה יותר באורך הצוואר. בעלי הצוואר הארוך נהנו מיתרון ושרדו משום שהיו מותאמים טוב יותר לסביבה. במילים אחרות, הצוואר הארוך הוא התאמה לסביבה שבה המזון הצמחי נמצא במקום גבוה. חשוב לזכור שמה שתואר כאן בכמה משפטים קצרים הוא תהליך איטי שכלל שינויים קטנים מצטברים בתדירות האללים באוכלוסייה לצוואר ארוך; התהליך נמשך דורות רבים ומיליוני שנים והיה תלוי בכך שהיתרון של בעלי הצוואר הארוך נשמר אף הוא לאורך דורות ועבר לצאצאים. כל התהליך הזה התאפשר מאחר שתכונת אורך הצוואר היא תורשתית. אם כן, במהלך הדורות עלתה שכיחותם של הפרטים בעלי הצוואר הארוך יותר, ואורכו הממוצע של הצוואר באוכלוסייה עלה. מעניין שהתארכות צוואר הג'ירף לא נבעה מתוספת של חוליות, שכן גם לג'ירף, כמו לשאר היונקים, יש 7 חוליות צוואריות, והתארכות הג'ירף נבעה מהתארכותן במהלך האבולוציה.

ניתן להבין כי האב הקדום, המשותף לכל הג'ירפים הקיימים כיום בעולם, כבר היה בעל צוואר ארוך. בכל מקום שהגיעו צאצאי אוכלוסיית ארוכי הצוואר הם דחקו את האוכלוסיות הקדומות וגרמו להכחדתן, מאחר שהיו מותאמים יותר לסביבה. כך נותרה אוכלוסיית הג'ירפים בעלי הצוואר הארוך והם אלו ששרדו עד ימינו.



ג'ירף בזמן שתיה.

התארכות הצוואר יצרה אצל הג'ירפים יתרון אך גם קושי הניכר בתמונת הג'ירף השותה. כאשר הג'ירף רוכן קדימה על מנת לשתות, מוחו עלול לקבל זרם גדול מדי של דם ואילו כאשר הוא מתרומם חזרה, זרם הדם קטן באופן משמעותי. בשני המקרים עלול הג'ירף לאבד את הכרתו, דבר שנמנע בזכות קיומם של שסתומים המאפשרים ויסות של זרימת הדם בעורקים המובילים לראש.

6.2. חוקרים אבולוציה: עדויות למיקרו-אבולוציה מניסויים בלטאות²⁰

במחקר שנערך באיים בים התיכון אספו חוקרים חמישה זוגות של לטאות *Podarcis sicula* והעבירו אותן לאי שכן שבו לא היו לטאות מסוג זה. כעבור 36 שנה הגיעו חוקרים לבדוק את אוכלוסיית הלטאות באי וגילו התאמות מדהימות לבית הגידול החדש. באי זה זמינות החרקים, שזהו המזון המועדף על הלטאות, הייתה נמוכה ולכן שרדו הלטאות שהצליחו להיזון גם מצמחים. עם הזמן עלתה באוכלוסייה שכיחות הלטאות המותאמות ללעיסת מזון צמחי. ההתאמה התבטאה בשינויים בולטים שחלו במבנה הלסת שאפשרו לעיסה של צמחים. שינוי מדהים אף יותר היה מבנה דמוי שסתום שהתפתח במעי ואפשר למזון לנוע לאט יותר לאורכו ולחיידיקים מפרקי תאית לשגשג בו. למעשה, בפרק זמן קצר של 36 שנה החל להיווצר במעיים של הלטאות איבר תסיסה.



לטאה *Podarcis sicula*

6.3. מיקרו-אבולוציה ביתושים

אצל יתושים מסוג *Wyeomyia smithii*²¹ קיים קוצב זמן שהוא מנגנון גנטי ובו אורך היום הוא מדד לזמן. חוקרים עקבו אחרי הקשר שבין ההתחממות הגלובלית לבין קוצב הזמן של היתושים ומצאו כי אוכלוסיית היתושים עברה שינוי אבולוציוני ובו באקלים מעט חם יותר וחורפים קצרים יותר, היתושים מחכים זמן רב יותר עד שהם מגיעים לשלב התרדמה. יתושים אלו ככל הנראה מותאמים יותר לתנאי האקלים שנוצרו בשנים האחרונות ועל כן תפוצת אוכלוסיית היתושים גדלה באקלים חם יותר. (היתוש מתפתח בתוך הגביע של צמח טורף, אם כי לא נטרף על ידו; זחל היתוש הוא טורף-על במיקרו-בית גידול הזה.)



יתוש *Wyeomyia smithii*

7. מינים חדשים מתפתחים ממינים קודמים - מאקרו-אבולוציה

נשאלת השאלה, איך המיקרו-אבולוציה המבוססת על שינויים קטנים יכולה לגרום לשינויים גדולים עד כדי היווצרות של מינים חדשים? התשובה היא שמיקרו-אבולוציה מתרחשת לעיתים בממדי זמן קצרים של דורות ספורים, אך כאשר שינויים קטנים רבים מצטברים במשך דורות רבים באותה אוכלוסייה ובמשך מיליוני שנים, הם יוצרים את התהליכים והשינויים הגדולים של האבולוציה הנקראים מקרו-אבולוציה.

מקרו-אבולוציה עוסקת אפוא בשאלות כמו: איך מתפתחים מינים חדשים? כיצד התפתח המגוון הביולוגי העצום שנאמד כיום במיליונים רבים של מינים?²²

בתת-פרק זה נבין כיצד חוקרי האבולוציה מארגנים את המינים הרבים הקיימים בטבע על פי סדר התפתחותם, נבין אילו גורמים יכולים להשפיע על היווצרות מינים חדשים וכן נתרשם ממגוון דוגמאות להיווצרות מינים חדשים.

מהו מין?

על מנת להבין את התהליכים האבולוציוניים המובילים ליצירת מינים חדשים עלינו להגדיר את המונח "מין ביולוגי". ההגדרה המקובלת ביותר כיום היא: קבוצה של פרטים המסוגלים להתרבות ביניהם בטבע ולהעמיד צאצאים פוריים. הגדרה זו היא שימושית למדי, אך גבולותיה מוגבלים: היא אינה מתאימה למינים שאינם מתרבים לרוב ברכייה זוויגית, כגון חיידקים, ואינה מתאימה למקרים נדירים שבהם יש התרבות בין מינים שונים בטבע. כמו כן, ההגדרה אינה שימושית למינים שאינם נפגשים בטבע רק משום שהם חיים במקומות מרוחקים). למרות מגבלות ההגדרה נשתמש בה בחוברת זו.

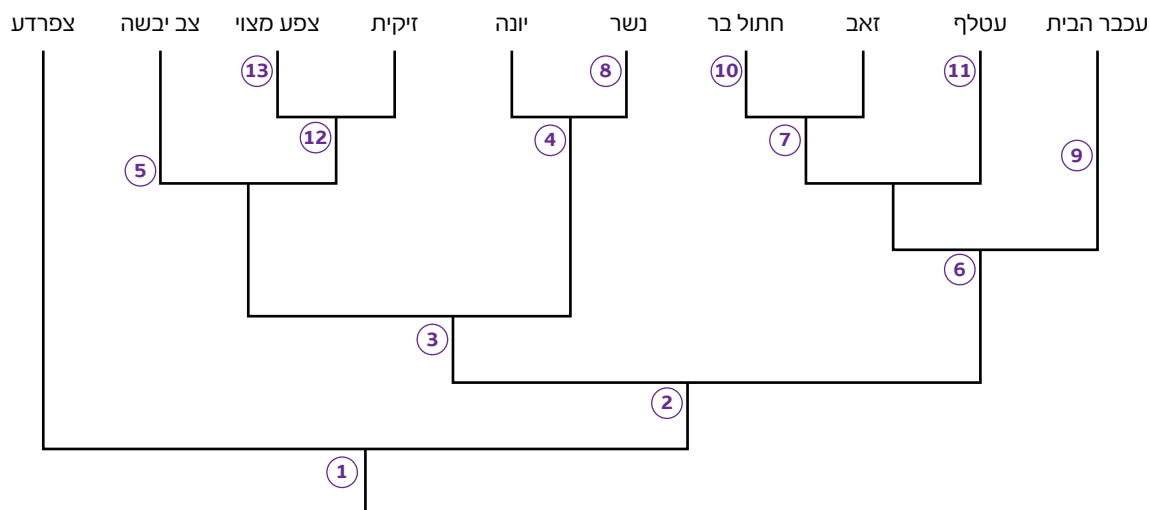
7.1. ארגון המינים בטבע: בניית עצים אבולוציוניים²³

החוקרים משתמשים ב"עצים אבולוציוניים" כדי לייצג את היחסים ההיסטוריים-אבולוציוניים המשוערים בין מינים ביולוגיים שונים על סמך דמיון גנטי או מורפולוגי ביניהם. עצים אבולוציוניים (ראו איור 17) מזכירים בצורתם קנים של חנוכייה או ענפים של עץ, ומתארים קשרי קרבה או מרחק אבולוציוניים בין מינים.

עץ אבולוציוני הוא כמו עץ משפחה שבקצה כל ענף שלו מיוצג מין של אורגניזם. ככל שהמינים חולקים מספר רב יותר של מאפיינים הם נחשבים קרובים יותר. המאפיינים יכולים להיות קשורים במבנה, בדרכי הרבייה, או בחומר התורשתי. כל ענף במודל ה"עץ" מייצג הצטברות הדרגתית של שינויים לאורך זמן באותו המין, וכל נקודת פיצול מייצגת נקודה בזמן שבה הצטברו שינויים כה רבים עד שאב קדמון משותף התפצל לשני מינים שונים. כאשר מין מתפצל לשני מינים נפרדים, כל אחד מהם מוסיף להתפתח ולהשתנות. עם הזמן יקטן עוד ועוד הדמיון בין המינים הנפרדים וכן בין כל אחד מהם לבין האב הקדמון שממנו התפצלו.

העץ המופיע באיור 17 מבוסס על דמיון בתכונות אנטומיות ומורפולוגיות. המספרים באיור 17 מייצגים תכונות משותפות לכל בעלי החיים הנמצאים בענף שמעל מספר זה. אם בעל חיים אינו בעל התכונה המשותפת, יש פיצול בעץ. בנייתו של עץ אבולוציוני מבוססת על כמה כללים:

1. א. המיקום בעץ שבו כתובה התכונה, לדוגמה "עור עמיד בפני התייבשות", הוא המקום על ציר הזמן שבו הופיעה תכונה חדשה.
2. ב. התכונות הקדומות יותר מופיעות בחלקו התחתון של העץ. למשל, התכונה של בעלי חיים הקשורה להיותם בעלי "עור עמיד בפני התייבשות" קדמה לתכונה "עור מכוסה בקשקשים".



איור 17: עץ אבולוציוני של בעלי החוליות

מקרא:

- 1 - בעלי ארבע רגליים, נשימת אוויר
- 2 - עור עמיד בפני התייבשות, הטלת ביצים מחוץ למים
- 3 - שני פתחים בגולגולת, שינוי בתפקוד הריאות
- 4 - נוצות, כנפיים, אובדן שיניים
- 5 - שריון על הגב והבטן
- 6 - שיער, בלוטות חלב, ולדות חיים
- 7 - שיניים מותאמות לטריפה, עיניים פונות קדימה
- 8 - מקור חזק, טופרים.
- 9 - שיניים חותכות ארוכות מותאמות לכרסום
- 10 - ציפורניים נשלפות
- 11 - כנפיים, יכולת ניווט באמצעות הדים
- 12 - עור מכוסה קשקשים, שינויים במבנה הלסת
- 13 - התארכות הגוף, אובדן רגליים, שיני ארס.

ענו על השאלות הבאות על פי איור 17

1. מה משותף לזיקית ולצפע מצוי?
2. מה משותף לזיקית וליונה?
3. איזו תכונה הופיעה קודם במהלך האבולוציה, מקור חזק או הטלת ביצים מחוץ למים?²⁴



מהעץ האבולוציוני ניכר כי תכונות השיער, בלוטות החלב ולידת וולדות חיים משותפות לעכבר, עטלף, זאב וחתול בר. לעומת זאת הנשר והיונה החסרות תכונות אלו, נמצאות על ענף אחר בעץ. עץ זה מאפשר לנו לראות את הקשר האבולוציוני בין בעלי החיים ההולכים על ארבע ונושמים נשימה אווירנית ולבדוק את הקרבה או המרחק האבולוציוני ביניהם.

ההתקדמות המדעית המאפשרת לקבוע את רצף ה-DNA ואת רצף חומצות האמינו בחלבונים של מינים שונים, מאפשרת שימוש בכלי עזר מחקרי חשוב מאוד לבניית עצים אבולוציוניים. שיטות אלו תוארו בתת-הפרק העוסק ב"עדויות לקיומה של האבולוציה".

7.2. מחסומים כמנגנון להיווצרות מינים חדשים

אחד התהליכים המשמעותיים באבולוציה הוא התפצלות של מין אחד לשני מינים נפרדים (או יותר), ואירוע זה מיוצג בעץ האבולוציוני כנקודת ההתפצלות של ענף אחד לשניים. רוב התהליכים הגורמים להתפצלות מבוססים במידה זו או אחרת על היווצרות מחסום גיאוגרפי בין שתי קבוצות של אוכלוסייה של מין קיים. מחסום גיאוגרפי כזה יכול להיווצר באופן טבעי, למשל על ידי התרחקות היבשות זו מזו, התרוממות שרשרת הרים, היווצרות אגם או נהר, וכן כתוצאה מפעילות האדם הסולל כביש או בונה חומה. בעבר הרחוק יצרה נדידת היבשות מחסום גיאוגרפי שהוביל להתפתחות מינים שונים מאוד אלה מאלה ביבשות שהתרחקו זו מזו.

המחסום הגיאוגרפי מונע מפגש של פרטים המצויים משני צידי המחסום, למרות השתייכותם לאותו המין. בכל אחת מהאוכלוסיות משני צידי המחסום מצטברים שינויים במשך דורות רבים. השינויים הם פועל יוצא של תהליכי ברירה טבעית וכן סחיפה גנטית המבוססים על השונות הקיימת בפרטים שבאוכלוסייה ומידת התאמתם לתנאי הסביבה השונים משני צידי המחסום.

לאחר דורות רבים, האוכלוסיות משני צידי המחסום שונות כל-כך זו מזו עד כי פרטים משני צידי המחסום אינם יכולים להתרבות ביניהם. עם הזמן עוברת כל אוכלוסייה, משני צידי המחסום, שינויים אבולוציוניים. כך נוצרים שני מינים נפרדים משני צידי המחסום. חוסר היכולת להעמיד צאצאים משותפים נובע ממחסום רבייתי הנוצר כתוצאה מהשינויים שהצטברו.

במינים שיש ביניהם מחסום רבייתי אפשר למצוא שוני בעונת רבייה, טקסי חיזור שונים, מבנה אנטומי שונה של אברי הרבייה והבשלה של תאי המין במועדים שונים. כמו כן ישנם אורגניזמים שבהם תא זרע של מין אחד אינו יכול להפרות תא ביצית ממין אחר, למשל, כאשר הזרע אינו יכול להתקשר אל רצפטורים על גבי קרום הביצית, ולכן אינו מתלכד עם הביצית ולא ייווצר עובר.

לדוגמה, בין שני מינים של צמח דבורנית - דבורנית דינסמור ודבורנית נאה - יש אי התאמה רבייתית משום שכל אחד מהמינים פורח בחודש אחר ולכן נמנעת הפריה הדדית שלהם.



דבורנית דינסמור



דבורנית נאה

בעין גדי קיימים שני מינים של מכרסמים מן הסוג קוצן: קוצן מצוי (*Acomys cahirinus*) וקוצן זהוב (*Acomys russatus*). שני המינים נבדלים זה מזה בשעות הפעילות: פרטים ממין אחד הם פעילי יום ואילו פרטים מהמין האחר הם פעילי לילה.



האם ייתכן שמקורם של שני המינים באוכלוסייה אחת שהתפצלה? איזה מחסום סביר להניח שיש ביניהם? הסבירו.²⁵

כביש חוצה ישראל הוא כביש אורך ארצי באורך שלוש מאות קילומטרים ועתיד להשתרע מהגליל בצפון ועד דרומית לבאר-שבע. 1. האם ייתכן שכעבור שנים רבות יתברר שכביש חוצה ישראל מהווה מחסום גיאוגרפי? וכי יוביל להיווצרות מינים חדשים? הסבירו.



2. האם הכביש עלול להוות מחסום גיאוגרפי בעבור כל המינים הביולוגיים? נמקו.²⁶



מעבר עילי מעל מנהרות הכרמל המשמש מעבר לבעלי חיים על מנת שהמנהרות לא יהוו מחסום גאוגרפי.

7.3. סחיפה גנטית כמנגנון להיווצרות מינים חדשים

בנוסף למנגנון הברירה הטבעית, הפועל באופן שאיננו אקראי להגדלת אחוז הפרטים הכשירים באוכלוסייה, ובדרך זו מניע את האבולוציה, גם אירועים מקריים משפיעים על האבולוציה. אירועים כגון מגפה, הרס בית-גידול, שיטפון, ציד או התפרצות געשית יכולים להוביל למוות של הכשירים ולהישרדות דווקא של פרטים שאינם כשירים. גם אירועים מקריים כאלה מובילים לשינוי בשכיחות של אללים באוכלוסייה. האללים בדורות הבאים יהיו אלה של הפרטים בני-המזל, ולא בהכרח אלה של הפרטים המותאמים או הכשירים יותר באוכלוסייה. תהליך זה נקרא סחיפה גנטית ומוביל להתפתחותו של מין חדש שונה מקודמו.



איור 18: סחיפה גנטית, משמאל לימין: אירוע שפגע באקראי בחיפושיות החומות גרם לשינוי בשכיחות החיפושיות הירוקות והחומות (בהשוואה לאוכלוסייה המקורית).

סחיפה גנטית היא חשובה במיוחד ובעלת השפעה מכרעת באוכלוסיות קטנות. כאשר האוכלוסייה גדולה מאוד, לסחיפה הגנטית אין השפעה רבה על שכיחות התכונות.

בקבוצת יעלים, למשל, יכול לשרוד פרט שהוא איטי יחסית לפרטים אחרים, רק משום שהנמר שחי בסביבה לא נתקל בו, וזאת על דרך המקרה. פרט זה

יעמיד צאצאים, ותכונותיו ישפיעו על הרכב הקבוצה בעתיד. לעומת זאת, בשדה פרחים יכול להיקטף הפרט המותאם ביותר לסביבתו (בעל מספר אבקנים רב, לדוגמה), וגם זאת על דרך המקרה. כל תכונותיו המועילות לא יעזרו במקרה כזה, והוא לא יוכל להורישן לדורות הבאים.

על פי איור 18, באוכלוסייה שבה האלל לצבע חום מקנה יתרון בולט על פני האלל לצבע ירוק, מאחר והוא מסווה היטב, הכוח העיקרי שיקבע את השכיחות היחסית של שני האללים יהיה הברירה הטבעית. אך הסחיפה הגנטית משפיעה כאשר אירוע מקרי מגדיל את שכיחות האלל הירוק, ולכן ייצוגם של פרטים אלה בדורות הבאים יהיה בעיקר עניין של מזל.

לכאורה, הסחיפה סותרת את עקרונות הברירה הטבעית, שלפיהם הפרטים המותאמים הם אלה ששורדים ומעמידים את מספר הצאצאים הגדול ביותר. למעשה, הסחיפה היא כוח נוסף שפועל על אוכלוסיות במקביל, ללא קשר לברירה הטבעית. אורגניזמים יכולים להיות נתונים למגוון לחצי ברירה, הנובעים מתנאי האקלים, מנוכחות טורפים, מזמינותו של מזון מסוים ועוד, ונוסף על כל אלה הם נתונים לתהליכים אקראיים של סחיפה גנטית, שכתוצאה מהם שורדים ומתרבים פרטים ממין מסוים ללא קשר לתכונותיהם.

7.4. חוקרים אבולוציה: מחסומים היוצרים שני מיני עבד²⁷

בישראל נפוץ עקרב עביד (*Scorpio maurus*) בשני אזורים. המין *palamatus* נפוץ באזור ים המלח ואילו המין *fuscus* נפוץ באזור הגליל (איור 19). בעבר חשבו כי אלו הם תתי-מינים של עקרב עביד, אך מחקר חדש שבו זיהו חוקרים הבדלים ב-DNA שבגרעין התא, בצבע הקוטיקולה ואף במבנה ובאורך המחילה שהעקרים חופרים, גרם לחוקרים לחשוב אחרת; לאור ההבדלים המשמעותיים ביניהם טוענים החוקרים כי מדובר בשני מינים נפרדים שנוצרו בעקבות מחסום גיאוגרפי ורבייתי, ולא-בתתי מינים.²⁸



איור 19: A: מין העב יד הנפוץ בצפון (*fuscus*) כהה יותר, **B:** מין העב יד הנפוץ בדרום (*palamatus*) בהיר יותר, בגוון צהבהב, מוסווה טוב יותר ובכך מותאם לסביבה.

כיצד אפשר לברר אם אכן מדובר בשני מינים שונים של עבד? הסבירו.²⁹



המדע מכיר גם מחסומים גנטיים, שהגורם להם הוא אי התאמה במספר הכרומוזומים ולכן בהכלאה ביניהם לא נוצרים צאצאים, או שהצאצאים שנוצרים אינם פוריים (לדוגמה במקרה של הכלאה בין חמור לסוס).

נוסף על סוגי המחסומים הללו מוכרת גם אי התאמה התנהגותית המובילה ליצירת מינים חדשים.

7.5. חוקרים אבולוציה: היווצרות מין חדש של פרוש

בספרו "המסע של הביגל" מתאר דרווין את מגוון מיני הפרושים שמצא באיי גלפגוס. הוא הבחין שאוכלוסיית הפרושים בכל אי מותאמת למזון הנפוץ באי ושונה מאוכלוסייה אחרת של פרושים באי אחר. דרווין שיער שכל הפרושים התפתחו והתפצלו ממין אחד שהגיע במקרה לאיים המרוחקים מהיבשת.

כיום מאכלסים את איי גלפגוס 15 מינים של "פרושי דרווין", הקרויים כך בשל "תרומתם" המשמעותית לניסוח תיאוריית האבולוציה. בשנת 2009 הצליחו ביולוגים מאוניברסיטת פרינסטון לראות ולתעד התפתחות של מין חדש בטבע תוך דורות ספורים בלבד. המחזה המופלא התרחש על האי דפנה מייג'ור (*Daphne Major*). באופן חריג זכר בוגר מהמין פֶּרוּש קטטוס גדול (*Geospiza conirostris*) עף מאי שכן לאי דפנה מייג'ור. על האי הוא התבלט בין המינים המקומיים בגודלו, ברוחב המקור שלו ובשירתו. החוקרים עקבו אחרי הזכר הפולש וחזו בהזדווגות שלו עם צמד נקבות מהמין פֶּרוּש קרקעי בינוני (*Geospiza fortis*). המין הזר מצא בת זוג והם העמידו חמישה צאצאים זכרים. לפי המסורת המשפחתית של הפרושים, הצאצאים הזכרים לומדים את שיר החיזור מאביהם. אך האב המהגר שר שירה שונה אשר הובילה להפרדת הבנים מהפרושים המקומיים. חמשת הבנים מצאו בני זוג אך בתוך דורות בודדים החלו הפרושים המקומיים להתעלם מהשושלת החדשה, ובני השושלת החלו להתרבות בתוך עצמם. לאחר ארבעה דורות מאז בואו של האב חווה האי בצורת קשה, ורק שני פרושים, זכר ונקבה, אחים, שרדו. הם התרבו זה עם זה, וכך גם צאצאיהם.³⁰

בדרך כלל הכלאות בין מינים שונים (מינים מוגדרים כיום באמצעות ריצוף גנטי או באמצעות מאפיינים מורפולוגיים) מובילות להעמדת צאצאים שאינם פוריים, אבל במקרה זה, כמו במקרים נוספים בעולם החי והצומח, הצאצאים התגלו כפוריים והוסיפו להעמיד צאצאים בינם ובין עצמם. המין החדש, השונה מהמינים האחרים בצורת המקור שלו ובשירת החיזור, נוצר ממש לנגד עיני החוקרים.

בשנת 2018 פורסמו ממציא ריצוף גנומי של הפרושים השונים בשושלת. מן הממצאים עולה כי המין החדש היה מוצלח מבחינה אקולוגית. כמו כן עולה כי בתוך שלושה דורות נוצר מחסום רבייתי, מה שקורה על פי רוב לאחר מאות דורות. שימו לב שאין ברשות החוקרים תמונה של בת הזוג של המין המהגר.

המקרה המתואר כאן הוא דוגמה להשפעת הגירה על התפתחותו של מין חדש. איי הגלפגוס מוסיפים לספק הוכחות לתיאוריית האבולוציה גם עשרות ומאות שנים לאחר ביקורו של דרווין.



איור 20: בתמונה מימין: זכר מהגר לאי דפנה מאיור המין פֶּרוּשׁ קקטוס גדול (*Geospiza conirostris*). בתמונה משמאל: פרוש מן המין החדש שנוצר בעקבות המחסום הרבייתי

8. קו-אבולוציה

ההתאמות שתיארנו עד כה היו התאמות של מינים לתנאי הסביבה. כאשר התאמות מתפתחות במקביל בשני מינים החיים יחד ומקיימים ביניהם יחסי גומלין, התופעה נקראת קו-אבולוציה. בתהליך זה שני המינים משפיעים באופן הדדי זה על האבולוציה של זה.

קו-אבולוציה מתרחשת בדרך כלל כאשר מינים שונים מקיימים יחסי גומלין הדוקים זה עם זה לאורך זמן ארוך, כמו יחסי טורף-נטרף, יחסי טפיל-פונדקאי, תחרות ויחסי הדדיות. בעקבות הקו-אבולוציה מתפתחות בכל אחד משני המינים תכונות המתאימות אותם זה לזה.

מעניין לדעת: המרוץ של המלכה האדומה



בספר "אליס בארץ הפלאות" מסבירה המלכה האדומה שכדי להישאר במקום צריך להמשיך ולרוץ כל הזמן. חוקרי אבולוציה אימצו רעיון זה כדי להסביר תופעות של קו-אבולוציה: כאשר חיים יחד, שינוי באחד השותפים מחייב שגם השני ישתנה בהתאם, על פי השונות הקיימת באוכלוסייתו, וכל זאת כדי להמשיך ולקיים את התלות בין המינים.

בעולם הטבע קיימים מקרים רבים מספור של קו-אבולוציה שאפשר לראות בהם שני מינים המתאימים זה לזה ומקיימים חיי שיתוף. נתאר פה כמה דוגמאות:

8.1. קו-אבולוציה בין נמלים לעצי שיטה³¹

בין נמלים מסוג *Pseudomyrmex* לבין עצי שיטה מסוג *Acacia* מתקיימת תועלת הדדית שנוצרה כתוצאה מתהליך קו-אבולוציה (איור 21).



איור 21 א: עלים של שיטה (*Acacia*) ובהם גופיפי מזון צהובים, ב: נמלה מסוג (*Pseudomyrmex ferrugineus*)

בעצי השיטה התפתחו קוצים מיוחדים וחלולים וכן גופי מזון עשירים בחלבונים המספקים לנמלים מזון ומקום מחיה מוגן, ואילו הנמלים פיתחו התנהגות של הגנה על עץ-הבית והן תוקפות כל אוכל-צמחים או צמח מתחרה המאיים על ביתן. באופן כזה יכולות הנמלה והשיטה לחיות יחד ולהגן זו על זו.

8.2 קו-אבולוציה בין עש לסחלב³²

התאמה מופלאה קיימת גם בין העש (*Xanthopan morgani praedicta*) לבין סחלב (*Angraecum sesquipedal*). בשנת 1862 שלח ידיד לדרווין אוסף של סחלבים ממדגסקר, וביניהם סחלב בעל צינור צוף באורך 30 ס"מ! דרווין כתב לידידו שתכונה ייחודית זו של הסחלב התפתחה ככל הנראה במקביל לעש בעל לשון ארוכה במיוחד היונק צוף מתוך הסחלב ותוך כדי כך מאביק אותו. רק בשנת 1907, יותר מעשרים שנה לאחר מותו של דרווין, נמצא העש המיוחד (ראו איור 22), הדומה לעש שהיה מוכר קודם לכן באפריקה. השם שניתן לעש המיוחד רומז על כך שניבא כי הוא קיים בעולם (*praedicta* מלשון לנבא, to predict). צעד סופי לאישוש השערתו של דרווין התרחש בשנת 1992, 130 שנה לאחר השערתו הראשונית, בה צפו חוקרים בעש יונק צוף מתוך הסחלב הייחודי ותוך כדי כך מאביק אותו.



עש בעל לשון באורך 30 ס"מ



איור 22: סחלב בעל צינור צוף באורך של 30 ס"מ.

9. השפעת האדם על תהליכים אבולוציוניים

נוסף על תהליכים אבולוציוניים המתרחשים באופן טבעי, קיימים גם תהליכים המתרחשים בעקבות התערבות האדם בתהליכי רבייה. בתהליכי ברירה מלאכותית מתקבלים מינים בעלי תכונות רצויות לאדם (לדוגמה, פיתוח זן של תרנגולות שיטילו ביצים בתדירות גבוהה באופן משמעותי מזו הקיימת בטבע) שלרוב אינם מותאמים לחיים בטבע. לעומת זאת, בתהליכי ברירה טבעית ייתכן כי יתפתחו מינים חדשים שהיו מותאמים לשינויים סביבתיים.

האדם משפיע על המינים בטבע לא רק בדרך של ברירה מלאכותית מכוונת, שבמהלכה הוא משיב מינים לתועלתו, אלא גם על ידי כך שהוא משנה את הסביבה הביוטית והא-ביוטית ובכך משפיע על שכיחותם של מינים ועל תכונותיהם. שינויים סביבתיים כוללים, בין השאר, כריתת יערות, כריית משאבים ועקב כך הרס נופים ובתי-גידול, הזרמת פסולת ומזהמים, ייבוש מקווי מים, פיזור רעלים (חומרי הדברה, תרופות) ועוד. שינויים אלה הם תוצאה של הגידול המתמשך במספר בני האדם על כדור הארץ. מה שמייחד את השפעת האדם על האבולוציה הוא כי בניגוד לתהליכים אבולוציוניים שתוארו עד כה ונמשכים עשרות ומאות מיליוני שנים, השפעת מעורבותו של האדם ניכרת גם בימי חיינו. אחת ההשפעות ההרסניות של בני האדם היא הפגיעה במגוון הביולוגי.

9.1 השפעת האדם על עמידות לאנטיביוטיקה³³

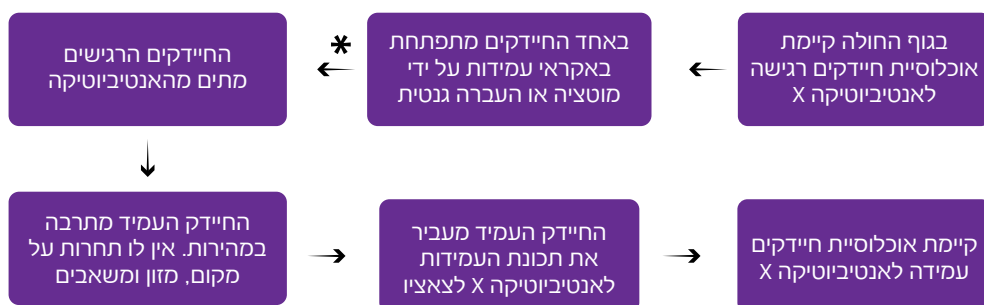
דוגמה לתהליך אבולוציוני שבו האדם משפיע על מאפייני המינים בעקבות שינוי סביבתי היא התפתחות העמידות לאנטיביוטיקה בחיידקים. באוכלוסיית חיידקים התרחשה בחיידק אחד או יותר מוטציה אקראית הגורמת לעמידות בפני אנטיביוטיקה. בעקבות החשיפה לאנטיביוטיקה ישרדו החיידקים העמידים, ובתוך דורות מספר הם אלה ששיעור רוב באוכלוסיה (איור 23). זהו תהליך אבולוציוני לא ארוך שאפשר לראותו מתרחש במעבדה בטווח של ימים ולאפיין אותו עד רמת המוטציה לעמידות.

ראוי לציין כי אף-על-פי שהתהליך אינו ארוך, מספר הדורות הנכללים בתהליך האבולוציוני הוא רב. לכן אנו רואים את התהליכים הללו באורגניזמים שזמן הדור שלהם קצר, יחסית, למשל, חיידקים.



1. מדוע מומלץ להמעיט בשימוש באנטיביוטיקה כיום?

2. אילו אוכלוסיות חיידיים ישרדו בסביבה שנעשה בה שימוש נרחב באנטיביוטיקה? הסבירו.³⁴



*** חשיפה לאנטיביוטיקה X**

איור 23: שלבי התפתחות העמידות לאנטיביוטיקה



איור 24: חיידקים עמידים לאנטיביוטיקה גדלים על צלחת פטרי

אפשר לקבוע את מידת עמידותם של חיידקים לאנטיביוטיקה על ידי מבחן הדסקיות (איור 24, מבחן Kirby-Bauer). מבחן זה מבוסס על כושרו של החומר האנטיביוטי לעבור דיפוזיה במצע מזון מוצק ולעכב גידול של חיידק בתחום אזור הדיפוזיה. סביב הדסקית מתקבלים אזורי עיכוב שקופים, הריקים מגידול של חיידקים עקב רגישותם של החיידקים לאנטיביוטיקה שבדסקית. קוטר העיכוב נקבע לפי כמות החומר האנטיביוטי שעל גבי הדסקית, מסיסות החומר, מקדם הדיפוזיה והשפעת החומר על החיידק.

חיידק עמיד יגדל גם בנוכחות האנטיביוטיקה, וכך נוכל לדעת כי חלה בחיידק זה מוטציה שהובילה לעמידות, או שעבר אליו פלסמיד ובו הגן לעמידות בפני האנטיביוטיקה. מן הדוגמה של עמידות חיידקים בפני אנטיביוטיקה אנו מסיקים שהשינוי הסביבתי שחולל האדם גרם לכרייה של בעלי המוטציה העמידים, והם אלה ששרדו ולאחר דורות מספר נעשו רוב באוכלוסייה.

דבר דומה קורה בהשפעת שימוש בקוטלי עשבים ובחומרי הדברה המזיקים לגידולים חקלאיים. עמידות בפני חומרי הדברה מתפתחת באופן דומה להתפתחותה לעמידות בפני אנטיביוטיקה, כשם שתוארה לעיל (איור 23). מוטציה אקראית המתרחשת בפרט באוכלוסייה מקנה לו יתרון הישרדותי על פני שאר החרקים המתים בעת החשיפה לחומר ההדברה ומאפשרת לו לשרוד ולהעמיד צאצאים העמידים אף הם לחומר ההדברה. כך עולה שכיחותם של החרקים העמידים בפני חומר ההדברה וכתוצאה מכך הוא איננו יעיל עוד בהדברה.

אילו אפשרויות עומדות בפנינו בבואנו להקטין את הסכנה הנובעת מעמידות בפני אנטיביוטיקה ומהשימוש בחומרי הדברה? הסבירו.³⁵



באנגליה של סוף המאה התשע-עשרה הבחינו חובבי פרפרים בכמה עשים שצבעם כהה (*Biston Betularia*) באזור זה רוב העשים היו בהירים, ועשים שצבעם כהה נחשבו נדירים. בשנים שלאחר מכן נעשו העשים הכהים נפוצים יותר ויותר. בד בבד ירדה שכיחותם של העשים הבהירים. התברר שהעשים ממין זה נוהגים לנוח על גזעי עצים. צבעם של העשים הבהירים היה מותאם היטב לצבע קליפת העצים ולחזזיות הבהירות שגדלו על העצים (איור 24) וכך הם הוסוו היטב מעיני הטורפים.

בעקבות התרבות מפעלי התעשייה ושימוש בפחם לחימום ביתי, גבר זיהום האוויר באזור ופגע בחזזיות שגדלו עד אז על העצים ושיוו להם גוון אפרפר. כתוצאה מכך, ובהשפעת הפיח שפלטו המפעלים, נעשו גזעי העצים כהים יותר, ואף שחורים. מוטציה שאירעה בעבר הלא רחוק בפרטים של העשים המפולפלים גרמה לצאצאיהם להיות שחורים, צבע שהקל עליהם להסתוות בסביבה החדשה ולהתחמק מציפורים ומטורפים אחרים.



עש בהיר המסווה היטב על העץ

באוכלוסיית העשים גדלה אפוא שכיחותם של העשים שצבעם כהה, משום שעש בהיר הנח על פני גזע כהה בולט על פני השטח וחשוף יותר לטריפה, ולעומתו העש הכהה מוסווה ואינו בולט. אם צבע העש הוא תכונה תורשתית, אזי סביר שהעשים הכהים ישרדו, יעמידו צאצאים שחלקם יהיו כהים אף הם, וכך תגדל שכיחותם של העשים הכהים באוכלוסייה.



במחקר שהתפרסם בשבועון Science בשנת 2011, ואנט הוף מאוניברסיטת ליברפול וחוקרים נוספים מאנגליה ומצ'יה חיפשו את הדרך לזהות את הגן האחראי לצבע הכהה בעשים. הם הכליאו בין עש בהיר לעש כהה, וחיפשו מקטע גנטי השונה בין העשים הכהים לבהירים. מקטע כזה נמצא בכרומוזום מס' 17: מוטציה בגן אחד באזור זה אחראית ככל הנראה לצבע השחור, אם כי עדיין לא ידוע מה תפקידו של הגן ואיך הוא קשור למלנין.

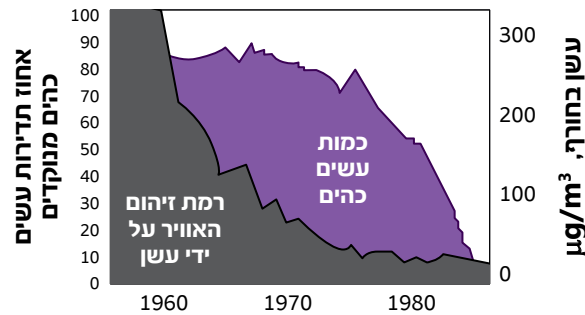
לאחר שזיהו את המקטע הגנטי ערכו החוקרים סקר גנטי מקיף בשתי אוכלוסיות שונות של העש המפולפל, ונוסף על כך בדקו עשים שנשמרו במוזיאונים בכל רחבי בריטניה, מ-1925 ועד לתקופת המחקר. בשני המקרים נבדקו עשים בהירים וכהים. כשבדקו החוקרים את המידע הגנטי שנמצא במקטעים שבסמיכות למוטציה בעשים השחורים, הם מצאו שלא הייתה כמעט שונות במקטע שנבדק בין העשים מאזורים שונים, ואפילו מזמנים שונים. דבר זה מצביע על כך שמוטציה יחידה, שמקורה בעבר הלא רחוק, היא האחראית לכל מקרי העשים השחורים שנבדקו. אם המוטציה הייתה ממקור עתיק יותר, ואף יותר מכך - אם הצבע השחור נובע מיותר ממוטציה אחת באוכלוסייה - היינו מצפים לראות שונות גנטית גדולה יותר בעשים השחורים. מוטציה יחידה המתפשטת במהירות באוכלוסייה אופיינית למקרה של לחץ ברירתי חזק, כלומר, לפרטים המוטנטיים היה יתרון גדול על פני חסרי המוטציה. לחץ כזה אפשר למצוא כשהתנאים הסביבתיים משתנים במהירות, כפי שאכן קרה במקרה של עש הפלפל.³⁷

	מוטציה גנטית יחידה גורמת להופעת עשים שחורים גזעי עצים מכוסים חזזיות בהירות. באוכלוסיית העשים יש שונות, יש בה פרטים _____ ופרטים _____, אך _____ בולטים על רקע סביבתם, נטרפים לעתים קרובות יותר, ולכן נדירים יותר. עשים _____ מוסווים היטב כאשר הם נחים על גזעי העצים.	מצב התחלתי
	התרבות מפעלי התעשייה הפולטים _____ .. בעקבות זאת, היעלמות החזזיות והצטברות פיח כהה על גזעי העצים.	שינוי סביבתי
	עשים _____ ניצודים יותר מאשר עשים _____ ..	השפעה על אוכלוסיית העשים
	עלייה בשכיחותם של העשים _____ באוכלוסייה. אוכלוסיית העשים מותאמת לסביבת חיים שהאוויר בה מזהם והעצים משחירים.	מצב חדש

איור 25: שרשרת האירועים שהובילה לשינוי בשכיחות העשים באנגליה



- מה היה קורה אילו אוכלוסיית העשים המקורית הייתה מורכבת כולה מעשים בהירים? הסבירו.
- בעקבות הגברת המודעות לזיהום האוויר באנגליה החלו מאמצע שנות השישים של המאה העשרים להשתמש באמצעים לצמצום פליטת הפיח ממפעלי תעשייה ובפחם לשימוש ביתי, וכמות הפיח באוויר קטנה. מה לדעתכם קרה בסביבה בעקבות שינוי זה? המשיכו את רצף האירועים שתואר לעיל.



איור 26: שינוי באוכלוסיית העשים משנים 1960 ועד 1990

- תארו את הגרף שבאיור 26.
- בין הירידה בריכוז המזהמים לירידה במספר העשים הכהים עברו כעשרים שנה. הסבירו מדוע. השתמשו במונחים ברירה טבעית, שונות, התאמה, כשירות.³⁹
- השינוי באוכלוסיית העשים הוא דוגמה לברירה טבעית שהתרחשה באוכלוסיית העשים בתוך זמן קצר יחסית (פחות ממאה שנים). ברצף האירועים המוצג למעלה יש שלוש נקודות חשובות להבנת התפתחות ההתאמה באמצעות ברירה טבעית:
 - באוכלוסיית העשים המקורית היו גם עשים בהירים וגם עשים כהים, אך שכיחותם של הכהים הייתה נמוכה יותר. כלומר, באוכלוסיית העשים הייתה שונות, והיו ביניהם הבדלים בצבע.
 - השינוי הסביבתי שנגרם בעקבות פעילות האדם קדם לשינוי שחל באוכלוסיית העשים.
 - הברירה הטבעית פועלת על הפרטים ומובילה לשינוי בשכיחות תכונות באוכלוסייה.



הניסויים של קטלוול בוצעו בשנות החמישים של המאה העשרים, ובשנת 1978 פורסם ב-Scientific American מאמר: Darwin's Missing Link.

במאמר זה ציטט קטלוול את דרווין, אשר טען בעצמו כי לא חזה באירוע של ברירה טבעית בטבע ולכן המחקר בנושא העשים מספק את החוליה החסרה. בעקבות המאמר קיבל הסיפור לגיטימציה מדעית רחבה ושולב בספרי לימוד.

כעשרים שנה לאחר מכן, ב-1998, פירסם מ. מג'רוס (M. Majerus) את הספר Malanism Evolution in Action, ובו בחן בצורה ביקורתית את ניסוייו של קטלוול. הוא התייחס לכמה נקודות חולשה במערך הניסויים, אך הגיע למסקנה הבאה: הניסויים מצוטטים בהרחבה בספרי לימוד מאחר שהדוגמה הינה קלה להבנה, יחסית, והעדויות התומכות בסיפור הבסיסי הן משכנעות.

ביקורת על ספרו של מג'רוס, שכתב ג'יי קוין (J. Coyne) הוא מטיל ספק מסוים במסקנתו הגורפת של קטלוול שלפיה, גורם הברירה של העשים הוא טריפה על ידי ציפורים, וזאת על סמך הליקויים שתוארו בספרו של מג'רוס על האופן שבו ביצע קטלוול את הניסויים.

ביקורת נוספת נכללה בביורפיה שכתבה העיתונאית ג'יי הופר (J. Hooper) על חייו של קטלוול (שאותו תיארה כמדען רשלן) ועל ניסויו, שלטענתה בוצעו ברשלנות הגובלת בהונאה.

ביקורות אלה אומצו בהתלהבות על ידי שוללי האבולוציה, אשר ראו בהן עדות לאי קבילותה של תיאוריית האבולוציה.

מג'רוס כפי הנראה הוטרד לא מעט מהדרך שבה התקבל ספרו, והקדיש את שארית חייו הקצרים (הוא נפטר בטרם עת ב-2009) ל"הצלת" סיפורם של העשים. הוא חקר את הגורמים לברירה של עשים לאחר שהתחלפה באופן מובהק המגמה: העשים הכהים התמעטו בהשוואה לעשים הבהירים. ממצאיו התבססו על תצפיות מדוקדקות, ופורסמו לאחר מותו ב-2012 על ידי עמיתיו. מסקנות מחקרו זה תומכות במסקנות הקודמות:

"אין אפשרות להתחמק מהמסקנה הקודמת והמקובלת שלפיה טריפה סלקטיבית על ידי ציפורים, באמצעות חוש הראייה, היא הגורם העיקרי לשינויים בשכיחות הצורות המלניות של העש המפולפל."

סוף דבר: איגוד חובבי החרקים באנגליה מציע מענק מחקר על שמו של מג'רוס לחוקרים הממשיכים את המחקר.

9.3. השפעת האדם בביות כלבים⁴¹



כלב פנצ'י, המוכר גם בשם "רועה גרמני", הכלב הגזעי היחיד שמוצאו בארץ ישראל

הקשר בין האדם לבין ידידו הטוב ביותר החל לפני כ-12 עד 14 אלף שנה, עת גילה האדם שהוא יכול להיעזר בחוש הריח של להקות זאבים כדי לאתר עקבות ציד. הכלב היה בעל החיים הראשון שהאדם ביית, עוד בהיות האדם צייד-לקט ויושב מערות.

תהליך הביות היה מקרי. הזאבים התחילו לחיות בקרבת בני אדם ונעשו ידידותיים יותר כלפיהם, וכך חלה זיקה הולכת וגוברת בין זאבים לבין בני אדם.

לאחר תהליך הביות של הכלב ברר האדם את תכונות הכלבים הרצויות לו, כמו גודל, התנהגות רגועה או הישגים במשימות גישוש. על מנת לקבל את התכונות הרצויות הללו זיווג האדם בין הכלבים בעלי התכונות הרצויות והעמיד להם צאצאים, בעוד שבכלבים בעלי התכונות הבלתי רצויות השתמש למאכל. במקביל התרחש תהליך הפוך של השארות תכונות שלא היו שורדות בטבע, כמו ניבים קטנים או צבעי פרווה שאינם בצבעי הסוואה.

נוסף על ביות הכלבים לצורכי צייד ביות כלבים לצורכי רעייה, שמירה וסיוור, משא והצלה. ברומא העתיקה החל האדם לביית כלבים גם לצורכי שעשועים. בתהליך זה פותחו גזעי כלבים שונים: זעירים, גדולי עיניים וארוכי פרווה. פיתוח גזעים של כלבי מחמד נמשך עד ימינו. למעשה החליף האדם את הטבע בתהליך הברירה הטבעית, וכיוון במידתו כיצד ייראה ויתנהג הדור הבא של הכלבים.

9.4. השפעת הרפואה המודרנית

בעקבות התפתחות התרופות והטיפוליים שמציעה הרפואה המודרנית, קטן לחץ הברירה הטבעית, ואנשים החולים במחלות שלא היו שורדים מהן בעבר יכולים עתה לשרוד ולהעמיד צאצאים. כך למשל, היום אפשר לטפל באלרגיות ולחיות בהתקיימן כמעט ללא הפרעה; גם עם מחלת ההמופיליה ועם סוכרת הנעורים החולים יכולים לחיות חיים מלאים הודות לפתרונות רפואיים, ויש דוגמאות נוספות. מכאן שלחץ הברירה על האוכלוסייה קטן, מאחר שהחולים במחלות אלו עשויים לחיות ללא הפרעה, כמעט, ולהעמיד צאצאים הנושאים את המידע למחלה התורשתית.

יש הטוענים כי שימוש בשיטות הרפואה המודרנית וגודלה העצום של אוכלוסיית בני האדם מובילים לכך שלא קיימים עוד תהליכים אבולוציוניים בקרב בני האדם.

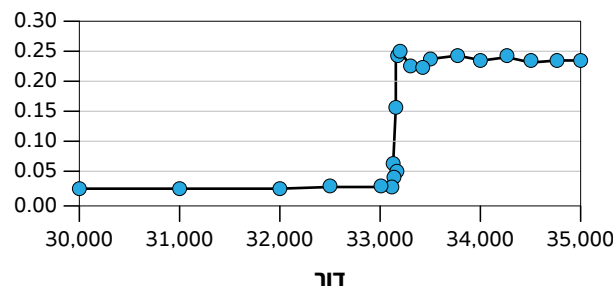


העלו נימוקים בעד וגד טיעון זה.⁴²

9.5 חוקרים אבולוציה:⁴³ אבולוציה בחיידקים מעשה ידי אדם

בשנת 1988 זרע החוקר ריצ'רד לנסקי 12 מושבות של חיידקי אי-קולי (*E. coli*), שהמקור שלהן היה בחיידק בודד בתרבות נוזלית שהכילה מעט גלוקוז וריכוז גבוה של ציטראט (אחד מתוצרי הנשימה התאית), והניח להן לגדול. החיידקים בתרבות המקורית לא היו מסוגלים לנצל את הציטראט שבתמיסת המזון. בכל יום הפריד לנסקי עשרה אחוזים מכל תרבות וזרק את תשעים האחוז הנותרים. תוצאות הניסוי היו מרתקות. בכל 12 המושבות חלו שינויים דומים בנפח וקצב גידול החיידקים, וכל המושבות פיתחו תלות מלאה בהרכב תמיסת הגידול, ברמת המזון וכן ברמת הלחץ האוסמוטי. ב-2008, כעשרים שנה לאחר תחילת הניסוי, זיהה לנסקי מושבה אחת שהחלה להתרבות בקצב שהיה גדול משמעותית מקצב ההתרבות ביתר המושבות. בדיקה העלתה שהחיידקים במושבה זו החלו לפרק ציטראט ולנצל אותו כמקור אנרגיה נוסף. התכונה החדשה הזו העניקה יתרון מובהק לחיידקים אלו, ושכיחות הפרטים נושאי המידע לתכונה זו גדלה והשתרשה מהר מאוד באוכלוסייה. התברר שהסיבה לכך שנדרש זמן רב עד להופעת היכולת לפרק ציטראט היא כי נדרשו יותר ממוטציה יחידה; רק צירוף נדיר, אך אפשרי, של כמה מוטציות אפשר את השינוי. הניסוי נמשך עד ימינו ומתקרב לדור ה-60,000!

מעניין לדעת: הניסוי של לנסקי⁴⁴ הוא הניסוי הארוך ביותר שנעשה באבולוציה והוא דוגמה למערכת מעבדתית למחקר אבולוציוני. לנסקי הקפיד להקפיד דגימות של חיידקים לכל אורך הניסוי, כך שאפשר לחזור אחורה ולשחזר בדיוק כיצד ומתי התרחשה כל אחת מן המוטציות, ובכך לשחזר את האירועים האבולוציוניים שהובילו בסופו של דבר לקיומם של חיידקים בעלי יכולת לפרק ציטראט.



איור 27: השינויים בצפיפות האופטית (OD) של החיידקים שגדלו בתרבות לאורך הדורות. ניתן לראות כי בסביבות דור 33,000 יש גידול משמעותי בצפיפות האופטית עקב הופעת המוטנט המפרק ציטראט

1. עיינו במקורות מידע ובררו מדוע צפיפות אופטית היא מדד לגידול חיידקים.

2. תארו את התהליך האבולוציוני שבו התפתחה אוכלוסיית המוטנטים המפרקת ציטראט.

3. איזה תהליך, לדעתכם, יהיה מהיר יותר - הברירה הטבעית או הברירה המלאכותית? הסבירו.

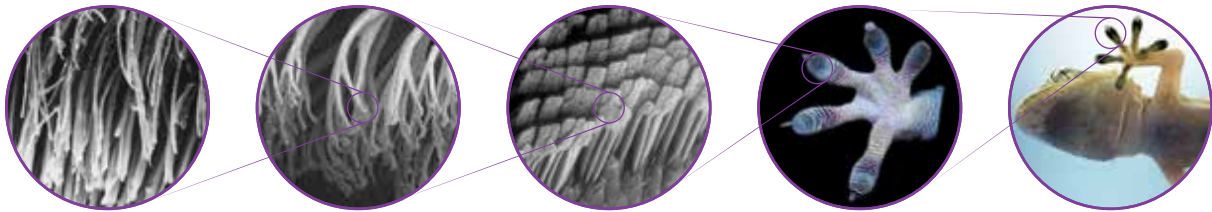
4. באיזה תהליך ברירה, מלאכותית או טבעית, תצפו שתתקבל בסופו של דבר אוכלוסייה אחידה יותר בתכונותיה?⁴⁵



10. ביומימיקרי: חיקוי הטבע המופלא⁴⁶

ביחידה זו עסקנו במינים משתנים ובחנו כיצד מתפתחות התאמות ייחודיות במהלך האבולוציה. כיום לומד האדם מההתאמות הקיימות בטבע כיצד לייצר מוצרים לתועלתו. מתברר אפוא שיש תשובות ופתרונות לבעיות שהאדם נתקל בהן שנפתרו זה כבר על ידי "מהנדסי הטבע". הטבע הוא ספרייה גדולה של רעיונות, מבנים, חומרים ותהליכים מקיימים וסביבתיים. בתוך כך, הטבע הוא מקור להשראה, ללמידה ולחיקוי.

ביומימיקרי (Biomimicry: ביו - חיקוי; מימיקרי - חיקוי) הוא תחום טכנולוגי התופס תאוצה בעשור האחרון. תחום זה בוחן את המנגנונים הקיימים בטבע בחיפוש אחר פתרונות לצרכים טכנולוגיים והנדסיים של האדם. כריות ההדבקה של השממית, המאפשרות לה להיצמד בחוזקה למצע אנכי ובאותה מידה גם להתנתק ממנו במהירות, הן דוגמה להשראה של הטבע על האדם. כריות ההדבקה של השממית הן כה יעילות עד שהן מאפשרות לשממית להיתלות במהופך מתקרת זכוכית חלקה. ייחוד נוסף של הכריות הוא שהן אינן מתבלות ואינן מתלכלכות מחומרים אשר נדבקים אליהן בטעות (איור 28).⁴⁷ סרטי ההדבקה הידועים בשם GeckoTape בנויים משערות ננו-סקופיות היוצרות קשרים בין-מולקולריים חלשים, ובכך מחקות את זיפי הקרטין על כפות רגלי השממית. כך סרטי הדבקה אלה יוצרים דבק חזק מאוד ורב-פעמי.



איור 28: מבנה כפות רגלי השממית, העשויות מזיפי הקרטין, שמחקים אותן בייצור הדבק gecko-tape

קיימות כיום דוגמאות רבות נוספות לתעשייה ביומימיקרית, ביניהן הצמדן (סקוץ') שמייצר המדען השווייצרי ג'ורג' דה-מסטרל. תוך כדי מאבק בשליפת קוצים מפרוות כלבו קיבל דה-מסטרל השראה לפתח מערכת הצמדה על פי מבנה הקוץ הייחודי של הלפה הקוצנית (*Arctium lappa*). מבנה זה מסייע לקוץ להידבק בנקל לפרוות בעלי חיים על מנת להגיע לתפוצה רחבה יותר. בהתבוננות במיקרוסקופ הוא למד כיצד הזרעים נצמדים למשטחים באמצעות מבנה של ווים זעירים. אלו היוו עבורו השראה להמצאת הסקוץ'.



11. סיכום

1. מדע האבולוציה מסביר:
 - א. מקרו אבולוציה: השתנות בין מינית- הופעת מינים חדשים.
 - ב. מיקרו-אבולוציה: השתנות תוך מינית- השתנות תכונות בתוך המין.
2. הלויטן הוא דוגמה ליונק מימי שהיה בעברו יבשתי. בגופו חלו שינויים בהתאמה לתנאים הסביבתיים שהשתנו.
3. את הביסוס לתיאוריית האבולוציה הניח חוקר הטבע צ'רלס דרווין שחי ופעל במאה התשע-עשרה.
4. דרווין הגה וניסח את תיאוריית "הברירה הטבעית" ב-1839 כמנגנון שנועד להסביר כיצד מינים משתנים לאורך זמן.
5. בשנת 1859 פרסם ספר המפרט את התיאוריה ובו ניסה להסביר את קיומו של מגוון כה גדול של מינים ביולוגיים הנמצאים בסביבות חיים שונות ומותאמים להן.

6. על פי התיאוריה של דרווין, התהליך האבולוציוני מבוסס על פעולתם של שלושה עקרונות עיקריים: קיומה של שונות בטבע, מנגנון הביריה הטבעית ומנגנון התורשה.
7. עקרונות תיאוריית האבולוציה מסבירים כיצד ההתאמה מתרחשת ומהו רצף האירועים המאפשר לאורגניזמים המותאמים ביותר לשרוד.
8. 'כשירות' מציינת את מידת היכולת של פרט מסוים להעמיד צאצאים פוריים וכך להוריש את המידע הגנטי שלו לדורות הבאים, וזאת בהשוואה ליכולת זו בפרטים אחרים באוכלוסייה.
9. תהליך הביריה הטבעית תורם לכך ששכיחות הפרטים הכשירים יותר באוכלוסייה עולה והם מעבירים את החומר התורשתי שלהם לצאצאיהם, בעוד שפרטים אחרים שהינם פחות כשירים אינם שורדים.
10. חוקר האבולוציה ז'אן-בפטיסט דה למארק (חי ופעל במאות השמונה-עשרה והתשע-עשרה) סבר כי אורגניזם עובר התאמה פעילה לסביבתו שהשתנתה על ידי רכישת תכונות הגורמות לשימוש שונה באיבריו.
11. קצב האבולוציה אינו קבוע. יש תקופות או נסיבות שבהן קצב האבולוציה נעשה מהיר מאוד באופן יחסי, אך גם במקרים אלה הוא לרוב איטי מדי מכדי לראות שינויים משמעותיים. בסדרי גודל של חיי האדם אפשר לראות שינויים בתדירות אללים (כמו בדוגמת העש הבהיר והכהה). שינויים משמעותיים יותר אפשר לראות במעקב אחרי מאובנים מתקופות שונות.
12. עדויות לאבולוציה קיימות במאובנים של צמחים ובעלי חיים, באנטומיה משווה, במבנים שרידיים, באמבריולוגיה משווה וכן באחידות במבנה של תאים ובהרכב הכימי.
13. אבולוציה קיימת גם בצמחים. מאובנים של צמחים שהותירו אחריהם שלד משמשים עדויות לאבולוציה של צמחים.
14. בעקבות תהליכים מיקרו-אבולוציוניים חלים שינויים בשכיחות האללים באוכלוסייה, וכתוצאה מכך חל שינוי בשכיחות הפרטים המותאמים לסביבתם.
15. כאשר שינויים קטנים רבים מצטברים באוכלוסייה כלשהי לרוב במשך מיליוני שנים, הם יוצרים שינויים גדולים, הנקראים מיקרו-אבולוציה. זו עוסקת אפוא בשאלה, איך מתפתחים מינים חדשים? כיצד התפתח המגוון הביולוגי?
16. עץ אבולוציוני הוא כמו עץ משפחה שבקצה כל ענף שלו מיוצג מין של אורגניזם. ככל שהמינים חולקים מספר רב יותר של מאפיינים כך הם נחשבים קרובים יותר. כדי לייצג את היחסים ההיסטוריים-אבולוציוניים המשוערים בין מינים ביולוגיים שונים על סמך הדמיון הגנטי או המורפולוגי ביניהם, עושים חוקרים שימוש בעצים אבולוציוניים.
17. מחסומים גיאוגרפיים, אנטומיים וגנטיים משפיעים על שינויים בהרכב התכונות של אוכלוסיות ועל האבולוציה שלהן.
18. קו-אבולוציה הוא מצב שבו שני מינים או יותר משפיעים באופן הדדי זה על האבולוציה של זה תוך שינוי בהרכב הגנטי של שני המינים המקיימים ביניהם יחסי גומלין.
19. האדם משפיע על תהליכים אבולוציוניים באמצעות ברירה מלאכותית, באמצעות הרפואה המודרנית ובאמצעות חומרי הדברה.
20. האדם לומד מן האבולוציה ומיישם עקרונות מעולם הטבע לטכנולוגיה, למשל באמצעות ענף הביומימיקרי.

מושגים עיקריים שנלמדו בפרק :

אב קדמון משותף	מחסום רבייתי
ביומימיקרי	מיקרו-אבולוציה
ברירה טבעית	מסדרון אקולוגי
ברירה מלאכותית	מיקרו-אבולוציה
התאמה	סחיפה גנטית
כשירות	עמידות
מחסום אנטומי	עץ אבולוציוני
מחסום גיאוגרפי	קו-אבולוציה
מחסום גנטי	תיאוריית האבולוציה שהגה דרווין

12. מידע נוסף ופעילויות נוספות

12.1 פעילות - שינויים בקוטיקולה של זבובים⁴⁸

לרוב זבובי המים יש קוטיקולה דקה העוטפת את גופם. לעומתם, זבובים החיים באזורים חמים ויבשים הם לרוב בעלי קוטיקולה עבה יותר המאפשרת הגנה טובה מפני איבוד מים. עובי הקוטיקולה הוא תכונה תורשתית. ידוע כי בעקבות שינויים אקלימיים המתרחשים במשך אלפי שנים, אזורים מסוימים שהיו פעם גשומים ולחים נעשים חמים ויבשים.

מה יקרה, לדעתכם, לעובי הקוטיקולה באוכלוסיית זבובים החיה באזור שחל בו שינוי אקלימי?



1. על פי המידע לעיל, האם קיימת שונות גנטית באוכלוסיית הזבובים?
2. כיצד עשויה התכונה התורשתית של עובי הקוטיקולה להשפיע על כשירות הזבובים באזורים שבהם האקלים לח מאוד?
3. כיצד תכונה גנטית זו עשויה להשפיע על כשירות הזבובים באזורים שבהם האקלים חם ויבש?
4. איך תיראה, לדעתכם, אוכלוסיית הזבובים בדור הראשון לאחר התחממות והתייבשות האקלים? הביאו בחשבון שלא כל הזבובים בעלי הקוטיקולה הדקה ימותו מיד עם התחממות האקלים. נסו לשער מדוע.
5. מה יקרה, לדעתכם, לאוכלוסיית הזבובים במשך אלף שנים שבהם האקלים באזור ילך וייתייבש? (משך הדור של זבוב הוא קצר מאוד - כשבועיים)
6. האם הסביבה היא הגורמת באופן ישיר לשינוי באוכלוסייה?⁴⁹

12.2 מידע - שינויים בסביבה המשפיעים על המידע התורשתי בחיידקים

בשנים האחרונות התגלו מערכות שחלים בהן שינויים לא אקראיים בגנום כתוצאה משינויים החלים בסביבה, ומערכות אלו עשויות לעורר מחדש את הרלבנטיות של התיאוריה של למארכ כתאיאוריה משלימה. לזו של דרווין בנוגע לאבולוציה של המינים.

דוגמה למערכת כזאת היא CRISPR-Cas.

CRISPR-Cas היא מערכת הגנה בחיידקים והינה חלק מהגנום של החיידק. כאשר בקטריופאג' (גורם סביבתי) תוקף תאי חיידקים, הוא משנה את הגנום של החיידק על ידי החדרת מקטע DNA שלו ל-DNA של החיידק. אם החיידק ישרוד את ההדבקה של הבקטריופאג', חלק מרצפי ה-DNA שלו ישתלבו בתוך אחד הצברים של מערכת CRISPR של החיידק. לאחר מכן ייווצרו בתא החיידק מולקולות RNA קצרות מרצפי הבקטריופאג'.

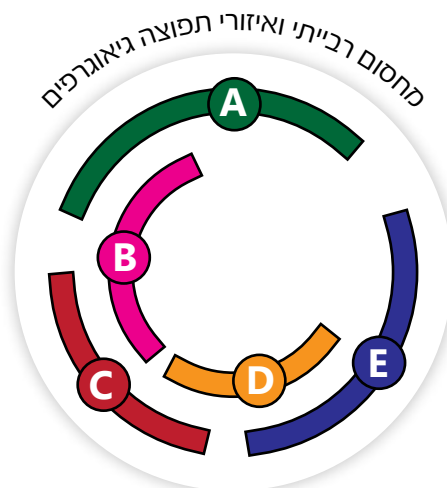
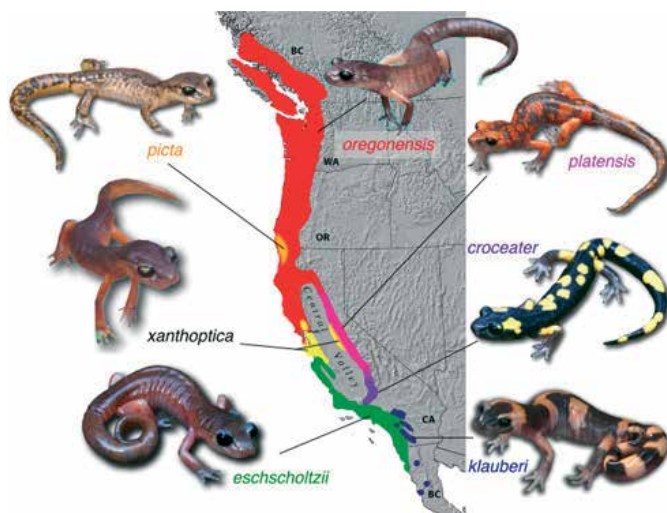
אם החיידק יספוג שוב תקיפה על ידי בקטריופאג' מאותו סוג, תשלמנה מולקולות RNA קצרות אלו את גדיל חומצת הגרעין של הבקטריופאג' התוקף, ויתחיל ייצור של אנזימים (המקודדים על ידי גנים סמוכים) המפרקים את חומצת הגרעין של הבקטריופאג' התוקף. בכך נוצר שינוי תורשתי בחיידק המקנה לו עמידות בפני הווירוס ואשר עובר לצאצאיו. זוהי הדגמה למערכת שבה שינוי סביבתי גורם לשינוי גנטי. כיום אף בודקים אפשרויות לשימוש במערכת זו לריפוי מחלות גנטיות בבני אדם.

12.3 מידע - היווצרות מינים חדשים

אחת מהתופעות שממחישות את תהליך היווצרותם של מינים חדשים היא של מיני טבעת. מיני טבעת (ring species) הם מינים בעלי תפוצה מרחבית דמוית טבעת. לאורך אזור התפוצה של מינים אלה, האוכלוסיות הן בעלות הבדלים מורפולוגיים וגנטיים קלים, אך אין מחסום רבייתי, והן מתרבות זו עם זו. בקצה הטבעת קיימות שתי אוכלוסיות סמוכות אשר אינן מסוגלות להתרבות זו עם זו. למיני הטבעת יש חשיבות גדולה, מכיוון שהם פותחים בפנינו אשנב לתהליך ההתמיינות בטבע.

אחת הדוגמאות למין טבעת היא הסלמנדרה (*Ensatina eschscholtzii*) החיה מסביב לעמק סן חואקין (San Joaquin Valley) בקליפורניה. אוכלוסיות סמוכות של הסלמנדרה מתרבות זו עם זו, אך במקום שבו שני קצוות הטבעת נפגשים, בדרום קליפורניה, שתי האוכלוסיות נראות שונות

זו מזו, לרוב אינן מתרבות זו עם זו, ומתנהגות כשני מינים שונים (*klauberi*) ו- (*eschscholtzii*). השינויים בין האוכלוסיות לאורך הטבעת מייצגים את ההיסטוריה האבולוציונית של המין שהובילה להתפצלותו לשני מינים נפרדים.



איור 29: ימין: תרשים פשוט של מין טבעת - כל אוכלוסייה יכולה להתרבות עם שכנותיה, אך האוכלוסיות הקיצוניות (כמו A-E) אינן יכולות להתרבות זו עם זו, אף אם אזור המחיה שלהן חופף מבחינה גיאוגרפית. שמאל: מיני הסלמנדרות בפליפורניה. מקור התמונה: ויקיפדיה

12.4 מידע - השפעת האדם על מינים באמצעות ברירה מלאכותית

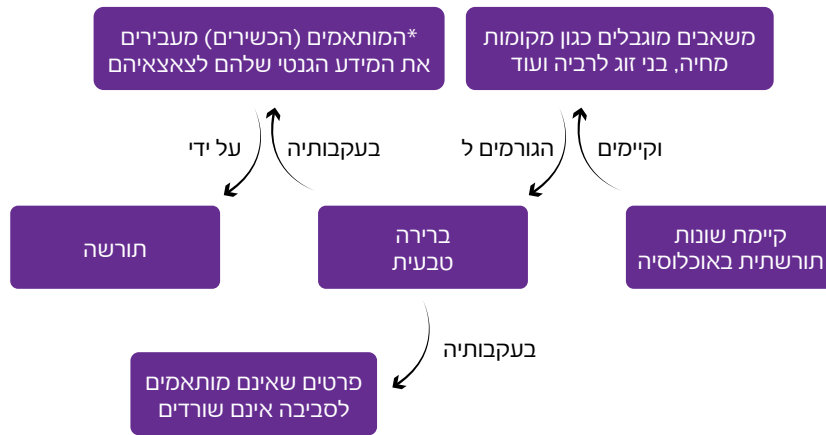
החל מראשית התפתחות החקלאות, לפני כ-10,000 שנה, עשה האדם כל שביכולתו כדי להפיק את המרב מן המשאבים שהעמיד לרשותו הטבע. האדם השתמש בהכלאות מכוונות כדי להשביח מינים של צמחים ובעלי חיים כך שיתאימו לצרכיו. כך ברר האדם את המינים שיתרבו וישמשו אותו למזון ולצרכיו האחרים. סביר שבתהליך טיפוח הפרה על ידי האדם נבחרו להרבעה דווקא פרות בעלות תנובת חלב רבה. חלק מצאצאותיהן (אך לא כולן) היו אף הן בעלות תנובת חלב גבוהה, ונבחרו על ידי האדם להיות אלה שיעמידו דור המשך. הכלאה של הפרות המניבות חלב רב במשך דורות רבים הביאה במהלך שנים לברירה של פרות המניבות יותר ויותר חלב, עד לכמות ממוצעת של כ-12,000 ליטר חלב בשנה לפרה בישראל, תנובה מהגבוהות בעולם. אילו היו פרות משק אלה חיות בטבע, סביר שלא היו שורדות, שכן היו מגושמות מדי.

אותו הדבר נכון גם בצמחים כמו החיטה: מבין צמחי חיטת הבר בחר האדם את הצמחים בעלי שיבולים שאינן מתפרקות ואשר נושאות מספר גרעינים רב, ואותם זרע בשדהו. בעונה הבאה גדלו בשדה צמחי חיטה בעלי שיבולים שלמות ובעלי גרעינים המניבים קמח רב, וכן עשירים בחלבונים, אבץ וברזל. מתוכם ברר האדם שוב את הפרטים המובחרים וחזר על פעולת ההשכלה עד שהתקבלה החיטה המבויתת המוכרת כיום השונה מאוד מאם החיטה (Gegas et al., 2010).⁵⁰

בשני המקרים התרחשו השינויים הגנטיים באופן אקראי לחלוטין, אך הברירה הוכתבה בידי האדם לצורך קבלת התוצר הרצוי לו ובכך היא שונה מהברירה הטבעית. בעת המודרנית השתכללו הדרכים להשבת מינים והן כוללות הנדסה גנטית ואף השראת מוטציות באמצעות חשיפה לחומרים מוטגניים (יוצרי מוטציות) או לקרינה רדיואקטיבית. גם כאן מתקבלים שינויים גנטיים אקראיים, אך שכיחותם באוכלוסייה גדולה ולכן תהליך הברירה המלאכותית הוא מהיר.

כך, באמצעים טכנולוגיים מתקדמים הובילה החקלאות המודרנית לשינויים דרמטיים ומהירים בצמחים ובעלי חיים. שיטות של הנדסה גנטית הובילו ליצירת תכונות חדשות כמו עמידות לקוטלי עשבים בתירס, בכותנה ובתפוחי אדמה, עמידות לוורוסים בשעורה ובתפוחי אדמה, וליצירת זנים חקלאיים חדשים שלא היו יכולים להיווצר בדרך של הכלאות טבעיות או מכוונות.

12.5 תרשים נוסף להצגת עקרונות תאוריית האבולוציה



* יש לציין כי כשירות אינה מושפעת מתכונה אחת, אלא מתכונות רבות. לאורך הזמן השכיחות של צירופי האללים המקנים כשירות תגדל ביחס לתכונות אחרות.

איור 30: סיכום עקרונות תאוריית האבולוציה

- 1 המילה אבולוציה משמשת בפרק זה בשני מובנים: כשמה של תיאוריה וכתהליך.
- 2 אתרים וסרטים שימושיים להוראת הנושא:
[השיטה המדעית](#). סרט, מתורגם לעברית. כולל הדרך שבה מתפתחת תיאוריה וכן מעט על תיאורית האבולוציה.
[אתר מצוין של משחקים ומצגות \(באנגלית\)](#).
[סרטים - איך האבולוציה עובדת? שמונה פרקים של סרטים קצרים \(בעברית\)](#).
[אתר מצוין ובו הסברים פשוטים על מונחים עיקריים באבולוציה \(באנגלית\)](#).
[תפיסות שגויות באבולוציה \(באנגלית\)](#).
[גילאים בהם אפשר להבין מונחים באבולוציה \(בעברית\)](#).
[אבולוציה לא רק תהליך איטי \(מאמר בעברית\)](#).
[קמפוס טבע - אתר מצוין בעברית](#).
- 3 [אנימציה של אבולוציית לווייתנים](#)
- 4 [מהם מאובנים. סרטון קצר והסבר בעברית](#)
- 5 תשובה: מגבלות של היונקים החיים במים: מחסור של חמצן במים, שמירה על טמפרטורת גוף קבועה בסביבה דלה בחמצן.
- 6 [Darwin Now - חוברת על פועלו של דרווין, על התאוריה שלו ועל עיקרי האבולוציה \(בעברית\)](#).
- 7 נושא האבולוציה עוסק בשינויים המתרחשים ביצורים חיים במשך דורות רבים מאוד, באוכלוסיות, ולא בשינויים ברמת פרט יחיד, על אף שהשינוי התורשתי עצמו מתרחש בפרט. שינויים אלו הנובעים ממוטציות הם לרוב שינויים קטנים מאוד, ורק כאשר הם מצטברים בעקבות ברירה טבעית ממושכת לאחר דורות רבים אפשר להבחין בשינוי נראה לעין. מוטציה המתרחשת בפרט משפיעה על הישרדותו ועל ההישרדות של צאצאיו, שכן המוטציה עוברת אליהם, ובכך עשויה לשנות את הרכב האוכלוסייה בעתיד.
מוטציות הן נדירות. באדם הסיכוי שתתרחש מוטציה בנוקלאוטיד מסוים בהכפלת תא אחד הוא אחד למיליארד, אבל בגלל שהגנום מורכב משלושה מיליארד נוקלאוטידים, ויש לנו שני עותקים שלו - אחד מכל הורה, הרי שבכל הכפלה של תא מתרחשות כמה עשרות מוטציות.
- 8 מוטציות הן נדירות. באדם הסיכוי שתתרחש מוטציה בנוקלאוטיד מסוים בהכפלת תא אחד הוא אחד למיליארד, אבל בגלל שהגנום מורכב משלושה מיליארד נוקלאוטידים, ויש לנו שני עותקים שלו - אחד מכל הורה, הרי שבכל הכפלה של תא מתרחשות כמה עשרות מוטציות.
- 9 איור זה מבוסס על המקורות:
Lyell, C., & Deshayes, G. P. (1830). Principles of Geology: being an attempt to explain the former changes of the Earth's surface, by reference to causes now in operation (Vol. 1). John Murray.
Malthus, T. R. (1888). An essay on the principle of population: or, A view of its past and present effects on human happiness. Reeves & Turner.
Darwin, C. (1859). The origin of species by means of natural selection. Modern Lib.
- 10 תשובה: כאשר תנאי הסביבה משתנים, פרטים שהיו מותאמים לסביבה כבר אינם יכולים לשרוד בה. אם ישנם באוכלוסייה פרטים בעלי התאמות שונות לסביבה, יש לפרטים אלו סיכוי לשרוד בתנאים הסביבתיים החדשים, הודות להתאמות שלהם.
- 11 ביסוסה המדעי של תיאוריה תלויה בתוצאות של תצפיות ומחקרים. מחקרים בנושאים אבולוציוניים אינם פשוטים לביצוע משום שתהליכים אלה נמשכים לעיתים זמן ארוך מאוד, בהתאם לזמן הדור של האורגניזמים הנבדקים. לפיכך לחקירת תהליכים אבולוציוניים נבחרים אורגניזמים שזמן הדור שלהם קצר יחסית והחוקר יכול להיות בטוח שעוד בימי חייו יוכל לראות את תוצאות מחקריו. לאורך הפרק ישולבו מחקרים המאששים את עקרונות האבולוציה.
- 12 מה גרם לזניחת הרעיון שלפיו המינים בטבע הם קבועים?
התקדמות בתחום הגיאולוגיה וגילוי של מאובנים שונים הובילו לכך. עוד בסוף המאה השמונה-עשרה הופיעו ספרים שדיברו על שינוי במינים לאורך זמן. למאבק היה אחד מהראשונים שדיברו במפורש על מינים כדבר שאינו קבוע. הגיאולוג צ'רלס לייל (1797-1875) דיבר במפורש על העולם כדינמי ומשתנה, והתפיסה שלפיה גם עולם החי משתנה איתו לא איחרה לבוא.
- 13 גודלו של לווייתן הוא כמה עשרות מטרים ואילו גודלו של יונק דבש הוא כמה סנטימטרים.
- 14 <https://evolution.berkeley.edu/evolibrary/copyright.php>
- 15 הפסים הנראים בתמונה מצביעים על ביטוי הגן המשותף MyoD הגורם לשעתוק ייחודי לשרירי שלד בעובר המתפתח.
- 16 מתוך בגרות 003, תשס"ז.
- תשובה: ככל שהרצפים שונים יותר, היצורים רחוקים יותר זה מזה, מאחר שמספר המוטציות שהתרחשו במשך הדורות ב-DNA של האב הקדמון המשותף גדול יותר ככל שהמרחק בזמן מהאב הקדמון המשותף הוא גדול יותר.
- 17 (מבוסס על בגרות 003, תשס"ז)

תשובות:

- א. גודל המקור בפרטים ששרדו את הבצורת החל לעלות ב-1977 בקצב מהיר, ואחר כך מ-1978 המשיך לעלות בקצב איטי יותר.
ב. בין הפרטים של המין פורטים הייתה שונות בגודל המקור. כנראה לבעלי מקור גדול קל יותר לפצח זרעים גדולים וקשים, על כן בעלי מקור גדול רבים יותר שרדו, העמידו צאצאים והורישו להם את תכונת המקור גדול וכולי.

18 Hervé Sauquet & Jürg Schönenberger <https://www.nature.com/articles/ncomms16047>

19 [סרטון מיקרו-אבולוציה ומקרו-אבולוציה](#) (באנגלית, עם תרגום בעברית)

20 Herrel, A., Huyghe, K., Vanhooydonck, B., Backeljau, T., Breugelmans, K., Grbac, I., ... & Irschick, D.J. (2008). Rapid large-scale evolutionary divergence in morphology and performance associated with exploitation of a different dietary resource. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(12), 4792-4795

21 <https://bugguide.net/node/view/1242204>

22 לא בכל המקרים מובילים תהליכים אבולוציוניים ליצירת אורגניזם מוצלח או מפותח יותר.

23 [עץ החיים, סרטון והסבר על עצים אבולוציוניים](#) (בעברית).

- 24 1. תכונה 12: עור מכוסה קשקשים, שינויים שחלו במבנה הלסת.
2. תכונה 3: שני פתחים בגולגולת, שינוי בתפקיד הריאות.
3. תכונה 2 בהשוואה לתכונה 8: הטלת ביצים מחוץ למים קדמה למקור חזק.

25 תשובה: כן, סביר שיש ביניהם מחסום רבייתי.

26 תשובות

א. אם נפגיש אוכלוסיות הנמצאות משני צידי הכביש וניווכח שהן אינן יכולות להתרבות ביניהן, יוכח שהכביש מהווה מחסום גאוגרפי.

ב. לא. מכיוון שתנועתם של מינים רבים אינה תלויה ברצף שנקטע: ציפורים, חרקים, צמחים.

27 Talal, S., Tesler, I., Sivan, J., Ben-Shlomo, R., Tahir, H.M., Prendini, L., ... & Gefen, E. (2015). Scorpion speciation in the Holy Land: multilocus phylogeography corroborates diagnostic differences in morphology and burrowing behavior among Scorpio subspecies and justifies recognition as phylogenetic, ecological and biological species. *Molecular phylogenetics and evolution* 91, 226-237

28 תשובה: באוכלוסייה המתקיימת בסביבה מסוימת רוב הפרטים מותאמים לסביבה. אך חשוב לזכור כי גם באוכלוסייה כזו יש שונות ונוכל למצוא בקרבה פרטים שאינם מותאמים היטב לסביבה.

כיצד שורדים פרטים בעלי תכונות שאינן מקנות יתרון בסביבה מסוימת?

• ייתכן שלא עבר די זמן ולא כל ה"פחות מותאמים" נכחדו.

- לחץ הביריה (למשל כמות הטורפים) אינו חזק כל-כך ומעטים מבין ה"פחות מותאמים" מצליחים להימלט מטורפיהם ולשרוד באוכלוסייה קיימת תכונות אחרות המקנות יתרון התורם להישרדות הפרטים. דוגמה לכך היא עמידותם של חולי אנהמיה חרמשתית בפני טפילה מלריה.
- המבנה דמוי חרמש של תאי הדם האדומים מקשה על טפילי המלריה להתרבות בהם ותורם דווקא להישרדותם של החולים באנהמיה חרמשית.
- הייתה הגירה מאזור אחר, ובין פרטים היו גם פרטים שהינם "פחות מותאמים".

29 תשובה:

הדרך לברר אם מדובר בשני מינים הוא להפגיש את העקרבים באופן מכוון ולנסות להרבות אותם. אם הם לא יתרבו, אפשר יהיה להסיק כי קיים מחסום רבייתי ביניהם.

30 Grant, P.R. & Grant, B.R. (2009). The secondary contact phase of allopatric speciation in Darwin's finches. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106(48), 20141-20148.

31 <http://dx.doi.org/10.1111/mec.12320>

32 [סרטון על העש המיוחד לסחלב](#) (באנגלית).

33 [קישור לסרטון מצוין על עמידות לאנטיביוטיקה](#)

שאלות לסרט:

1. ציינו שלושה מנגנוני עמידות לאנטיביוטיקה הקיימים אצל חיידקים.
2. על פי המנגנון הראשון, באיזה אנזים יכולה האנטיביוטיקה לפגוע?
3. איזה תהליך בתאי החיידקים מושפע מחוסר פעילות של האנזים?
4. כיצד פועל החיידק שבו האנזים פעיל באופן תקין?
5. מה תפקידה של משאבת efflux במנגנון העמידות של חיידקים?
6. כיצד חיידקים מפתחים עמידות לאנטיביוטיקה בהעברה גנטית?

1. מפני שאוכלוסיות של חיידקים עמידים יתפתחו מאחר שימוש נרחב באנטיביוטיקה חיסל את אוכלוסיית החיידקים הרגישה וכך שרדו העמידים, העמידו צאצאים והתרבו.
2. העמידים. השאר ימותו.
- 35 צמצום השימוש באנטיביוטיקה בבני אדם: מניעת שימוש שלא לצורך. הגבלת שימוש באנטיביוטיקות רחבות טווח רק למקרים מיוחדים, על מנת למנוע התפשטות זיהומים (בבית, בחוץ, בבתי חולים) וכך לצמצם תחלואה.
- בחקלאות: שימוש בהדברה ביולוגית במקום בהדברה כימית.
- החלפת חומרי ההדברה מדי כמה שנים. כך זנים של קוטלי חרקים העמידים לאנטיביוטיקה ייחשפו לחומרי הדברה שונים שהם אינם עמידים בפניהם.
- הערה: הדברה ביולוגית נגד מזיק מסוים עלולה לפגוע בעקיפין גם באורגניזמים אחרים שאינם מזיקים.
- 36 [אנימציה: אבולוציה של פרפרים](#)
- 37 [הבסיס הגנטי לשינוי הצבע של עש הפלפל](#)
- 38 מצב התחלתי: גזעי עצים מכוסים חזזיות בהירות. באוכלוסיית העצים יש שונות, יש בה פרטים בהירים ופרטים כהים אך הכהים בולטים על רקע סביבתם, נטרפים לעתים קרובות יותר, ולכן נדירים יותר. עשים בהירים מוסווים היטב כאשר הם נחים על גזעי העצים.
- שינוי סביבתי: התרבות מפעלי התעשייה הפולטים מזהמים בעקבות זאת, היעלמות החזזיות והצטברות פיח כהה על גזעי העצים.
- השפעה על אוכלוסיית העצים: עשים בהירים ניצודים יותר מאשר עשים כהים.
- מצב חדש: עלייה בשכיחותם של העצים הכהים באוכלוסייה. אוכלוסיית העצים מותאמת לסביבת חיים שהאוויר בה מזוהם והעצים משחירים.
- 39 תשובות לשאלות:
 1. אם כל העצים היו בהירים, ולא הייתה שונות, יתכן שכל העצים היו נכחדים מאחר שהיו נטרפים על ידי הצפרים.
 2. העצים הכהים אינם מותאמים לסביבה עוד ועל כן פחות מהם שורדים ומתרבים ומעבירים את החומר התורשתי לצאצאים. העצים הבהירים מותאמים היטב לסביבה הבהירה, ועל כן הם שורדים ומתרבים ומעבירים את החומר התורשתי לצאצאיהם. מכאן שמספר העצים הבהירים יגדל ומספר העצים הבהירים יקטן.
 3. החל משנת 1960 ועד 1980 לערך חלה ירידה בכמות העשן הנפלטת ממפעלי תעשייה.
 - במקביל, החל משנות השישים ובעיקר החל מאמצע שנות השבעים חלה ירידה הדרגתית במספר העצים הכהים.
 4. בעקבות הירידה בריכוז המזהמים התרחשה ברירה טבעית לטובת הפרטים הבהירים. אלו שרדו והעמידו צאצאים רבים. הם היו מותאמים טוב יותר לסביבה החדשה, שבה העצים נשארים בהירים ופיח אינו מצטבר עליהם. החל משנות השישים הכשירות של העצים הבהירים היא גבוהה יותר. השינוי בהרכב האוכלוסייה - העלייה בשכיחות היחסית של העצים הבהירים - נמשך לאורך מספר דורות של עשים.
- 40 Cook, L.M.; Grant, B. S.; Saccheri, I. J.; Mallet, J. (2012). "Selective bird predation on the peppered moth: the last experiment of Michael Majerus." *Biology Letters*, Published online before print February 8, 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1098/rsbl.2011.1136>. Abstract at Journal, Supplementary Online Material
- 41 [\(כיות כלבים\) \(מאמר בעברית\)](#)
- 42 תשובה: האדם המודרני מרפא מחלות שאילולא נרפאו, לא היה האדם החולה מעמיד צאצאים, והמידע הגנטי לא היה עובר הלאה. כיום יש פחות "ברירה טבעית".
- 43 [אבולוציה בפעולה \(מאמר בעברית\)](#)
- 44 Blount, Z. D., C. Z. Borland, and R. E. Lenski. 2008. Historical contingency and the evolution of a key innovation in an experimental population of *Escherichia coli*. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA* 105:7899-7906.
- 45 תשובות:
 1. חיידקים הם תאים לא שקופים ולכן האור אינו עובר דרכם או עובר פחות מאשר בנוזל צלול. לכן תמיסה של חיידקים עכורה יותר מנוזל צלול, ואפשר לבדוק הבדל זה ניתן לבדוק בספקטרופוטומטר.
 2. סביר שמוטציה לפירוק ציטראט הופיעה באקראי בחיידק אחד, ובשל היתרון של התכונה החדשה הוא וצאצאיו התרבו יחסית לצאצאי חיידקים אחרים שאינם מפרקים ציטראט. מאחר שבית הגידול הינו בעל נפח ומשאבים מוגבלים החיידקים המפרקים ציטראט הם רוב באוכלוסייה.
 3. ברירה מלאכותית היא מהירה יותר, מאחר וזהו שבתהליך בוזה האדם בורר את הפרטים המוצלחים עבורו ומרבה אותם באופן מכוון..
 4. ברירה מלאכותית הרבייה אינה אקראית, בעוד שבטבע מפגש בין הזוויגים הוא אקראי.
 - אוכלוסייה אחידה יותר תתקבל בברירה מלאכותית, מאחר ושהאדם בורר רק את הפרטים בעלי התכונות המתאימות למטרותיו ומרבה ביניהם. ברירה מלאכותית מקטינה את השונות באוכלוסייה. בברירה טבעית המפגש בין הזוויגים הוא אקראי ושורדים פרטים מגוונים, וביניהם כאלו שאינם בהכרח מותאמים לצורכי האדם. כלומר, נשמרת רמה מסוימת של שונות באוכלוסייה.
- 46 [הרצאה: כיצד לומדים על מבנה של משטח מונע הדבקה מצמח הלוטוס. 6 דקות עד 10 \(בעברית\).](#)

Photographs courtesy of Mark Moffett; electron micrographs courtesy of Stas Gorb and the author. 47

48 מעובד מתוך הספר "אבולוציה איך זה קורה", חגי, צור, רייספלד ושטרן.

49 תשובות:

1. כן. אם קיימים באוכלוסייה זבובים בעלי קוטיקולה דקה ואחרים בעלי קוטיקולה עבה, זו עדות לשונות.
2. באזורים לחים כשירותם של בעלי הקוטיקולה הדקה גבוהה יותר. הם אינם צריכים להשקיע אנרגיה בבניית קוטיקולה עבה, אלא שזו הדקה מספיקה בהתאם לסביבת הגידול שלהם. כשירות הפרטים בעלי הקוטיקולה הדקה עולה ושכיחותם באוכלוסייה תהיה גדולה יותר, והיא גם מקלה על התעופה.
3. באזורים יבשים כשירותם של בעלי הקוטיקולה העבה תעלה ובעקבות כך שכיחותם באוכלוסייה תהיה גדולה יותר.
4. בדור הראשון לאחר ההתחממות צפוי כי יהיו יותר זבובים בעלי קוטיקולה עבה בהשוואה לכמותם לפני ההתחממות.
5. אוכלוסיית בעלי הקוטיקולה הדקה תתמעט מאוד, ואלי אף תיכחד. רוב האוכלוסייה תמנה בעלי קוטיקולה עבה.
6. הסביבה לא הובילה לשינוי ישיר אלא עקיף. בעקבות שינוי באקלים, ומאחר שהייתה שונות באוכלוסייה בעלי הקוטיקולה העבה היו רבים יותר במעט והם אלה ששרדו והתרבו. בכל דור גדלה שכיחותם של בעלי הקוטיקולה העבה.

Gegas, V. C., Nazari, A., Griffiths, S., Simmonds, J., Fish, L., Orford, S., ... & Snape, J. W. (2010). A genetic framework for grain size and shape variation in wheat. *The Plant Cell*, 22(4), 1046-1056. 50