אבולוציה - איך זה קורה?

גלית חגי, חן צור,
סמדר רייספלד, לולי שטרן

מטה מל"מ
המרכז הישראלי לחינוך מדעי - טכנולוגי ע"ש עמוס דה-שליט

הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל
המחלקה להוראת הטכנולוגיה והמדעים
מוסד הטכניון למחקר ופיתוח

משרד החינוך התרבות והספורט
המזכירות הפדגוגית
האגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

משרד החינוך התרבות והספורט
המזכירות הפדגוגית
האגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל
המחלקה להוראת הטכנולוגיה והמדעים
מוסד הטכניון למחקר ופיתוח

מטה מל"מ
המרכז הישראלי לחינוך מדעי –
טכנולוגי ע"ש עמוס דה–שליט

אבולוציה – איך זה קורה?

גלית חגי, חן צור
סמדר רייספלד, לולי שטרן

© כל הזכויות שמורות
אגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים
משרד החינוך

אין לשכפל, להעתיק, להפיץ או לתרגם ספר זה או קטעים ממנו בשום צורה ובשום אמצעי אלקטרוני או מכני
(לרבות צילום והקלטה), ללא אישור בכתב מהמחברות

נדפס בישראל, 2005
Evolution: How does it happen
Luli Stern, Galit Hagay, Chen Tsur, Smadar Reisfeld
Printed in Israel, 2005 ©

ראש הפרויקט: ד"ר לולי שטרן, המחלקה להוראת הטכנולוגיה והמדעים, הטכניון, חיפה

צוות פיתוח וכתיבה: גלית חגי
חן צור
ד"ר סמדר רייספלד
ד"ר לולי שטרן

תחקיר פעילויות: חן צור

תחקיר תמונות: גלית חגי

יעוץ מדעי: מהדורת הניסוי (פרקים א–ד, ו): איתן אביטל, החוג למדעי הטבע, המכללה לחינוך ע"ש דוד ילין, ירושלים
מהדורה סופית (פרקים א–י"א): ד"ר עופר מוקדי, המחלקה לזואולוגיה, הפקולטה למדעי החיים, אוניברסיטת תל–אביב

עריכה לשונית: חיה וטנשטיין–מאייר

איורים: נועה שטרן (עמ' 5, 28, 49, 70, 74)
שיר למדן (עמ' 30)

מורות נסייניות:
מהדורת ניסוי: מאשה צאושו, אורט מעלות
תמר גבריאל, חן צור, בי"ס תיכון אזורי מגידו
מהדורת עיצוב: גלית חגי, בי"ס כרמל–זבולון, קיבוץ יגור
דבורה בן–דוד, בי"ס תיכון אזורי מגידו

עריכה גרפית והבאה לדפוס: "קו מעוצב", קיבוץ יגור

הדפסה: דפוס "מילניום"

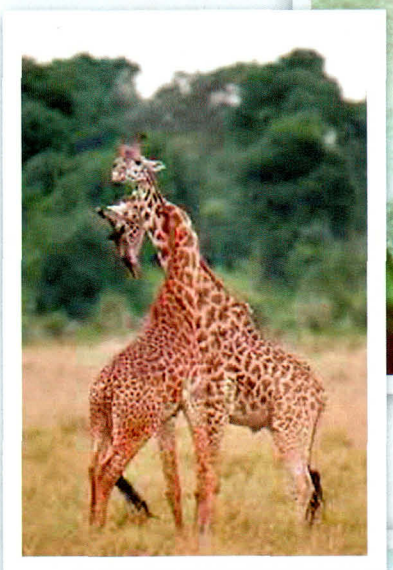
גף אישור ספרי לימוד
באישור
משרד החינוך התרבות והספורט
אישור מס' נ' / 4100

תודות

ברצוננו להודות מעומק הלב לאלה שעזרו בשלבים השונים של כתיבת הספר:
לד"ר **עופר מוקדי** ו**לאיתן אביטל**, על הייעוץ המדעי המקצועי והזמין; לפרופ' **יואל רק** על עצותיו בנוגע לאבולוציה של האדם; **לאיריס בן עקיבא**, שפיתחה וניסתה עם תלמידיה את הפעילויות הראשונות; **ליפעת צימרמן**, שפיתחה וניסתה שאלות הערכה; **למאשה צאושו**, **נעה אבולעפיה**, **נירית די–נור**, **שרון שר**, **מיכל נחשון** (פרקים א–ב) ו**רותי מנדלוביץ** (פרקים א–ד), על הערותיהם בשלבים שונים של כתיבת הספר; **לורד קוטנר**, על עזרתה במחקר שליווה את כתיבת הספר; למורות הנסייניות **דבורה**, **מאשה** ו**תמר**, על העידוד וההערות; לכל תלמידי כיתות הניסוי ובעיקר לתלמידי כיתה י' תשס"ד בבית הספר "כרמל זבולון" שנרתמו לנסות ולהגיב; **לנועה** ו**שיר**, על האיורים; לעמיתינו ב"פורום האבולוציה": **שלום**, **רעיה**, **חיה**, **יפעת**, **נירית** ו**שרון**, על הערותיהם הדידקטיות; לד"ר **ברוריה אגרסט** על התמיכה והעידוד בשלבים שונים במהלך הפיתוח; לפרופ' **דני סגל**, על העזרה בגיבוש רצף הרעיונות; לצלמים שאפשרו לנו להשתמש בתמונות (רשימה מפורטת מופיעה בסוף הספר).

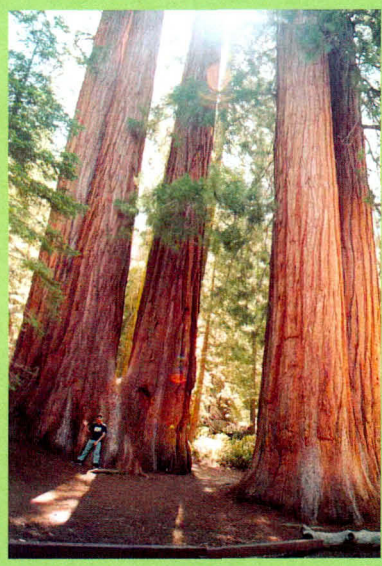
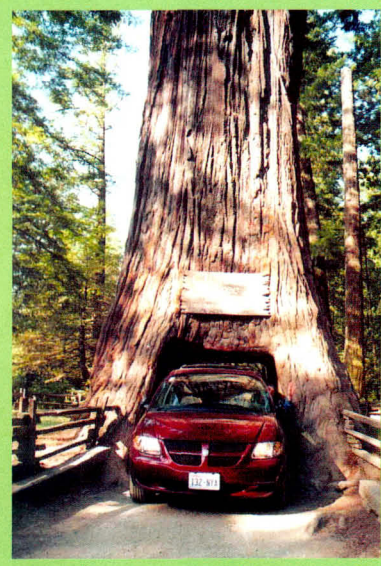
תוכן העניינים

פרק א: כיצד התארך צווארן של הג׳ירפות? 3
פרק ב: האם כל הצפרדעים דומות? 11
פרק ג: אז כיצד באמת התארך צוואר הג׳ירפות לאורך הזמן? מנגנון הברירה הטבעית 21
פרק ד: האם ניתן לראות ברירה טבעית בפעולה? 28
פרק ה: כיצד נוצרת שונות? 39
פרק ו: האם שינויים יכולים להצטבר? 52
פרק ז: האם אפשר לשחזר את העבר? 66
פרק ח: כיצד נוצרים מינים חדשים? 74
פרק ט: כיצד אפשר להסביר את הדמיון בין יצורים חיים? 85
פרק י: עץ החיים 97
פרק י״א: על כתפי ענקים 105



פרק א' כיצד התארך צוואר של הג'ירפות?

בחוף המערבי של ארצות הברית גדלים עצי סקוויה (Sequoia).

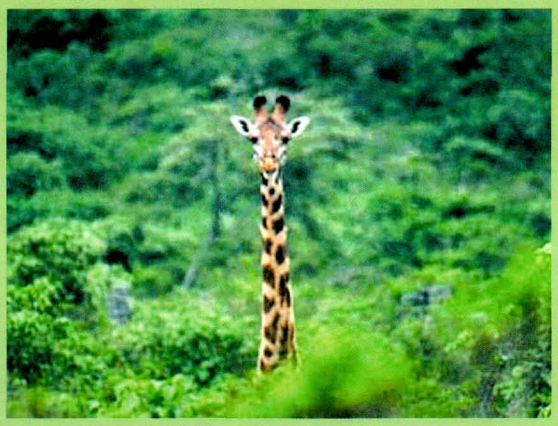
עצי הסקוויה יכולים להגיע למשקל של יותר מאלפיים טון ולגובה של יותר ממאה מטרים (כגובהו של בניין בן שלושים קומות). בפארק הסקוויה שבארצות הברית נסלל כביש העובר דרך גזעי העצים.

עצים ענקיים אלה יכולים לחיות שלושת אלפים שנה ואף יותר. על העצים הללו חיים סנאים ומינים רבים של חרקים וציפורים.
נתאר לעצמנו זחל של פרפר שחי על עץ כזה וניזון מעליו. הזחל חי ימים ספורים בלבד. לו היה אפשר לספר לו, שהעץ החסון שהוא חי עליו היה פעם זרע, שבמשך שנים רבות התפתח וגדל עד שהגיע לגודלו הנוכחי, הוא היה מוצא את הרעיון מגוחך ואף בלתי אפשרי. מנקודת מבטו העץ הוא אובייקט קבוע, והשינויים היחידים המתרחשים בו הם תנועת הענפים ברוח או נשירה אקראית של עלים. מלבד זאת נשאר העץ כמעט ללא שינוי כל חייו של הזחל. אך השינויים, שאותם חווה הזחל במהלך חיין, אינם אלא חלק קטן מאוד מכלל השינויים העוברים על העץ. לו חי הזחל זמן ארוך יותר, והיה מלווה את כל מחזור גידולו של העץ, היה יכול לחוות שינויים מרחיקי לכת, כגון: התפתחות הנבט לצמח צעיר ואחר כך לעץ, הופעת אצטרובלים והבשלתם ועוד.

בדומה לפרפר, גם אנו חיים זמן קצר יחסית למשך קיומו של כדור הארץ ושל היצורים החיים בו. כשאנו צופים באוכלוסיות של יצורים חיים, השינויים שאנו מבחינים בהם במהלך חיינו הם קטנים יחסית לשינויים שהתרחשו בהן במשך מיליוני שנים. לכאורה, הסוסים שאנו רואים כיום נראו כך מאז ומעולם. למעשה, אומרים לנו מדענים, סוסים אלה שונים מאוד מאבות אבותיהם, שרגליהם היו קצרות בהרבה. וכך, לו היינו חיים מיליוני שנים, היינו יכולים להבחין בשינוי זה שהתרחש במהלך דורות רבים אצל הסוסים.

ספר זה עוסק בשינויים המתרחשים ביצורים חיים במשך דורות רבים, שינויים המתרחשים באוכלוסיות ולא כאלה העוברים על פרט יחיד. תהליכים כאלה הם בדרך כלל כה אטיים, עד שאי–אפשר להבחין בהם במשך זמן החיים של המתבונן.

מעדויות מאובנים אפשר ללמוד כיצד נראו היצורים החיים, שאכלסו את כדור הארץ בתקופות קדומות. כך, למשל, מתברר, שהג'ירפות שחיו בעבר, היו בעלות צוואר קצר בהרבה מאלה שחיות כיום.



- כיצד, לדעתכם, התארך צווארן של הג'ירפות? נסו לתת את דעתכם לשלבים בתהליך.

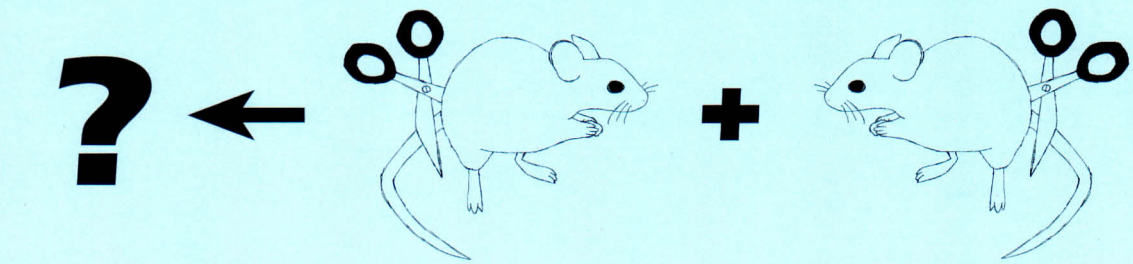
האם תכונות נרכשות עוברות בתורשה?

מדען גרמני בשם אוגוסט וייסמן (1914–1834) רצה לבדוק אם תכונות שיצורים רוכשים במהלך חייהם עוברות בתורשה לצאצאיהם. הוא ערך את הניסוי הבא: הוא לקח עכברי בית, חתך את זנבותיהם ואפשר להם להתרבות בינם לבין עצמם. אחר כך חתך גם את זנבות הצאצאים ואפשר גם להם להתרבות וכך עשה לכל הצאצאים במשך כשישים דורות. הניסוי בוצע בתנאי שבי.

משך דור הוא פרק הזמן שחולף מלידת הפרט ועד שהוא מעמיד צאצאים. באוכלוסיית האדם משך הדור נחשב לעשרים וחמש שנה. אצל עכברים משך הדור הוא כחודשיים.

- האם אצל כל האנשים שאתם מכירים משך הדור זהה?
- האם בכל התרבויות האנושיות משך הדור זהה?
- האם, לדעתכם, חל שינוי במשך הדור במהלך הקיום האנושי? (השוו בין האדם הקדמון לאדם המודרני).
- מהם, לדעתכם, היתרונות בביצוע הניסוי דווקא בעכברים?

הניסוי של וייסמן



דור ההורים **דור הצאצאים**

- כיצד, לדעתכם, נראו זנבות הצאצאים כעבור דור אחד של חיתוך זנבות ההורים? בחרו אחת מהאפשרויות שלפניכם ונמקו.

דומים לאורך הזנבות המקוריים של ההורים.	מעט קצרים יותר מהזנבות המקוריים של ההורים.	קצרים בהרבה מהזנבות המקוריים של הורים.	הצאצאים נולדו ללא זנב.

- כיצד, לדעתכם, נראו זנבות הצאצאים כעבור שישים דורות של חיתוך זנב? בחרו אחת מהאפשרויות ונמקו.

דומים לאורך הזנבות המקוריים של ההורים.	מעט קצרים יותר מהזנבות המקוריים של ההורים.	קצרים בהרבה מהזנבות המקוריים של הורים.	הצאצאים נולדו ללא זנב.

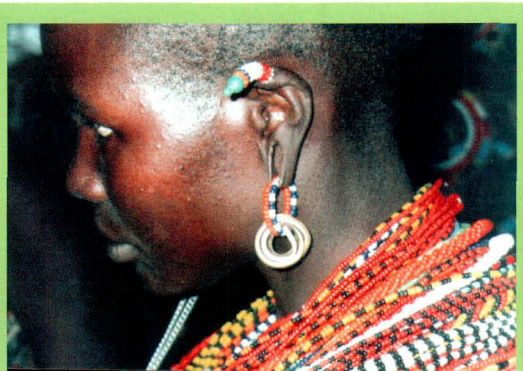
- וייסמן חתך את זנבות העכברים במשך שישים דורות. אילו היה ממשיך לחתוך את זנבות העכברים במשך מאתיים דורות, כיצד, לדעתכם, היו נראים זנבות הצאצאים בתום הניסוי האחרון? בחרו אחת מהאפשרויות ונמקו.

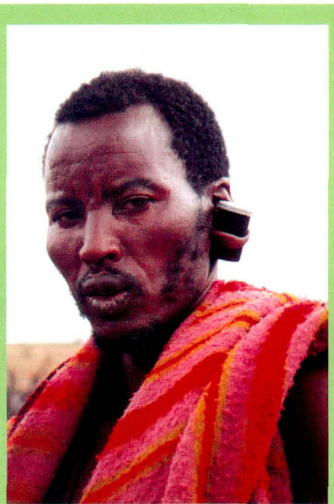
דומים לאורך הזנבות המקוריים של ההורים.	מעט קצרים יותר מהזנבות המקוריים של ההורים.	קצרים בהרבה מהזנבות המקוריים של הורים.	הצאצאים נולדו ללא זנב.

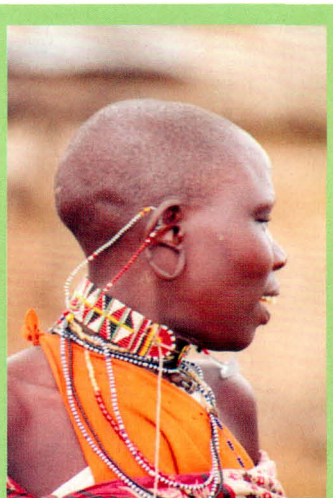
וייסמן אמנם לא המשיך בניסוי במשך מאתיים דורות אולם אנו יכולים להסתכל על מנהגים שונים של בני אדם שמתקיימים במשך מספר גדול אף יותר של דורות. יהודים, למשל, נוהגים לערוך טקס ברית מילה זה כמאתיים דורות.

מנהגים נוספים מוצגים בתמונות שלפניכם. נסו לחשוב: האם התכונות, שבני האדם משנים בצורה מכוונת, מופיעות גם אצל הצאצאים?

בנות שבטים מסוימים בתאילנד עונדות טבעות מתכת רבות סביב צווארן, שגורמות לצווארן להתארך. מנהג זה קיים במשך דורות רבים.







במשך דורות רבים בני שבט המסאיי שבקניה מנקבים חורים באוזניהם ועונדים עגילים כבדים, שגורמים לתנוכי אוזניהם להתארך.

בעלי כלבים השייכים לגזעים מסוימים נוהגים לקצץ לכלבם את הזנב. גם מנהג זה קיים כבר עשרות רבות של שנים.

בגנים שונים מעצבים את העצים והשיחים על ידי גיזום חוזר ונשנה.

- האם, לדעתכם, בכל אחת מהדוגמאות השינוי מופיע גם בצאצאים?
חשבו על הצוואר הארוך, על התנוכים המוארכים, על הזנב הקצוץ, על צורת השיח המעוצבת ועל היעדר העורלה. הסבירו את קביעתכם.
- הביאו דוגמאות נוספות של תכונות שיצורים רוכשים או מאבדים במהלך חייהם והחליטו אם הן עוברות בתורשה לצאצאיהם. תנו דוגמאות מהחי ומהצומח.

נחזור לשאלת ההתארכות של צוואר הג'ירפה.

- נניח שג'ירפה מסויימת מתחה את צוארה, וצווארה התארך בסנטימטר.
האם צאצאיה יהיו אף הם בעלי צוואר ארוך בסנטימטר?

מדוע תכונות מסויימות עוברות מדור לדור ואחרות לא?

אתם מכירים בוודאי תכונות שעוברות מדור לדור. למשל, באדם – הימצאות גומה בסנטר או סוג הדם, בחיידק – יכולתו לפרק סוכר מסוים, בפרח – צבעם של עלי הכותרת.

- חשבו על תכונות נוספות, הלקוחות מעולם החי והצומח, שעוברות מדור לדור.
- מה מאפשר לתכונות אלו לעבור בתורשה?
- מה ההבדל בין התכונות שהזכרנו קודם לכן (למשל, זנב מקוצר, אוזניים מחוררות או שיחים גזומים) לתכונות שעוברות בתורשה?

איך יודעים, אילו תכונות עוברות בתורשה?

כאשר תכונה שכיחה בקרב בני משפחות מסוימות ושכיחה פחות בקרב בני משפחות אחרות, מתעורר חשד שמדובר בתכונה תורשתית.
אתם מכירים בוודאי משפחות שרבים מבניהן מצטיינים בספורט, עוסקים בעריכת דין, בעלי עיניים כחולות, יודעים לדבר צרפתית, חולים בסוכרת, בעלי מזג חם, מעשנים או בעלי נימוסי שולחן טובים. לעתים התכונות הללו מופיעות במשך כמה דורות.

- האם כל תכונה, שמופיעה אצל רבים מבני אותה משפחה לאורך דורות, היא תכונה תורשתית? נמקו את קביעתכם.

תכונות תורשתיות עוברות מהורים לצאצאיהם ונקבעות על ידי החומר הגנטי – ה–DNA.
ה–DNA מהווה מעין רשימת הנחיות להתפתחות היצור החי ולקיומו. באדם, למשל, התכונה של צורת האף נמצאת ב-DNA, ולכן היא עוברת מהורים לצאצאים. לעומת זאת, עיצוב האף באמצעות ניתוח פלסטי אינו משנה את ה–DNA, ולכן צורת האף החדשה לא תעבור לצאצאים. ההורה מוריש לצאצאיו את ה–DNA ולא את התכונות עצמן (במקרה זה – את האף עצמו). האישור לכך שתכונה מסוימת היא תורשתית נעשה על ידי ניסויים גנטיים כמו הכלאות או זיהוי הגנים (שהם מקטעים של DNA) המעורבים בקביעתה. תהליך זה ממושך ומורכב, ולכן פעמים רבות אין בידי המדענים אישור כזה.
כדאי לזכור שתכונות רבות נקבעות הן על ידי ה–DNA והן על ידי גורמים סביבתיים. כך, למשל, היכולת ללמוד שפה היא תורשתית ומשותפת לכל המין האנושי, אך רכישת שפה מסוימת (למשל, עברית) היא תוצאה של חיים בסביבה שבה מדברים שפה זו.
דוגמה נוספת: בקרב בני משפחות, שבהן התגלו מקרים רבים של סרטן ריאות, זוהו שינויים מסוימים ב–DNA שמעורבים בהופעת המחלה. יחד עם זאת, הוכח שלעישון (שהוא גורם סביבתי) יש השפעה מובהקת על התפרצות המחלה.
שכיחות סרטן השד בקרב נשים ביפן נמוכה בהרבה בהשוואה לשכיחותו בקרב נשים החיות בארצות הברית. בשנות התשעים זוהו מקטעי ה–DNA המעורבים בהופעתו של סרטן שד בנשים. כאשר עקבו אחר אוכלוסייה יפנית שהיגרה לארצות הברית (וחבריה התחתנו בינם לבין עצמם) נמצא, שבמהלך הדורות עלתה שכיחות סרטן השד בקרב הנשים היפניות ובדור השלישי – היא השתוותה לזו של כלל הנשים בארצות הברית.

- מה תוכלו לומר על הגורמים להופעת מחלת סרטן השד?

כיצד באות לידי ביטוי תכונות תורשתיות?

תכונות תורשתיות באות לידי ביטוי ברמות ובאופנים שונים:

✔ בצורה החיצונית (למשל, צבע העין, צורת העלים, צורת האוזן של הכלב);

✔ במבנה הפנימי (למשל, מבנה הלב בדג, קיומם של חללי אוויר בגבעול);

✔ במאפיינים הביוכימיים (למשל, סוג הדם, רמת הסוכר בדם, עמידות לאנטיביוטיקה בחיידקים, מציאותם של אנזימים שאחראים ליצירת ארס בנחשים);

✔ בהתנהגות (אופן חיזור בחרקים, בניית רשת ציד בעכבישים).

- האם כל תכונה תורשתית באה לידי ביטוי החל מרגע הלידה?
- האם כל תכונה נרכשת ניכרת רק כעבור זמן כלשהו לאחר הלידה?

שאלות לסיכום

1

עידו וחיים הם תאומים זהים (כלומר, הם בעלי מטען תורשתי זהה) בני ארבעים ושתיים. עידו הוא רואה חשבון ועובד במשרד, ואילו חיים עובד בעשר השנים האחרונות כמציל בבריכה. לפני כשנתיים חלה חיים בסרטן העור.

למי יש סיכוי רב יותר, לדעתכם, לחלות בסרטן העור:

א. לילדיו של חיים
ב. לילדיו של עידו
ג. לילדי שניהם במידה שווה
ד. אי אפשר לקבוע

הסבירו את קביעתכם.

מה הייתה תשובתכם, לו ידעתם שילדיו של חיים נולדו **לפני** שחלה בסרטן העור?

מה הייתה תשובתכם, לו ידעתם שילדיו של חיים נולדו **אחרי** שחלה בסרטן העור?

2

יוסי מרים משקולות כבר עשר שנים. הוא פיתח שרירים ואפילו היה אחד המתמודדים בתחרות "מר ישראל". בחדר הכושר הוא הכיר את אשתו סופיה (שהוכתרה במשך שנתיים רצופות בתואר "מרת ישראל"). לשניים נולד תינוק.

כיצד נראה, לדעתכם, תינוקם של בני הזוג – בעל שרירים מפותחים או בעל שרירים רגילים?

התינוק היום הוא בן שלוש. לאחר הולדתו לא היה לזוג זמן להתאמן, שריריהם אינם מפותחים כמו בעבר וליוסי אף צמחה כרס קטנה. השניים מצפים שוב לתינוק. כיצד ייראה ,לדעתכם, תינוקם – בעל שרירים מפותחים או בעל שרירים רגילים?

השוו את תשובותיכם והסבירו אותן.

סיכום

פרק זה התמקד ברעיון שתכונות מסוימות עוברות בתורשה ואחרות אינן עוברות בתורשה. תכונות תורשתיות נקבעות על ידי ה–DNA ומשפיעות על יצורים חיים ברמות שונות (למשל, ברמת התא, האיבר או הרקמה).

אורך הצוואר בג׳ירפות היא תכונה תורשתית הנקבעת על ידי ה–DNA, בדומה לתכונות אחרות הקשורות למבנה הגוף. לעומת זאת, צוואר שמתארך כתוצאה ממתיחתו (אם דבר כזה אפשרי), אינו משנה את ה–DNA ולכן לא יעבור בתורשה. באופן דומה, נשות השבטים שמאריכות את צווארן בעזרת טבעות, אינן משנות את החומר התורשתי שלהן, ולכן הן מורישות לצאצאיהן את אורך הצוואר המקורי.

עם זאת, אנו יודעים שאבות אבותיהן של הג׳ירפות היו בעלי צוואר קצר יותר מאשר הג׳ירפות החיות כיום. מה, אם כן, גרם לאורך צוואר הג׳ירפה להשתנות?

בפרקים הבאים נתקדם בגילוי ההסבר.

מפת למידה:

במהלך הספר נכיר מספר רעיונות הקשורים אלה באלה ונבנים זה על גבי זה. בסיומו של כל פרק נציין את הרעיונות המרכזיים שבו ונבנה בהדרגה מפה המשלבת אותם עם הרעיונות שנלמדו בפרקים הקודמים. בפרק זה למדנו את הרעיון המתואר להלן:

פרק א
תכונות מסוימות עוברות בתורשה ואחרות אינן עוברות בתורשה. תכונות אלו באות לידי ביטוי ברמה מולקולרית וברמה של היצור השלם.

מונחים שנלמדו בפרק:

אוכלוסייה
תכונות תורשתיות
תכונות לא תורשתיות

פרק ב' האם כל הצפרדעים דומות?

אם נתבונן בקבוצה של דרורים, נמצא שיש לכולם שתי עיניים, ארבע אצבעות ברגליים, זוג כנפיים וכסות של נוצות בגוונים אפורים. אם נתבונן בשדה פרגים, נבחין בצבע עלי הכותרת האדום של כולם ובעליהם המפורצים. לכאורה, כל הפרטים בקבוצת הדרורים ובקבוצת הפרגים זהים. אך אם נתבונן היטב, נבחין כי בכל קבוצה קיימים הבדלים קטנים בין הפרטים.

מצאו את ההבדלים

לפניכם ערמה של בוטנים בקליפתם.

1. עבדו בזוגות והציעו ארבע תכונות המשותפות לכל תרמילי הבוטנים.
2. הציעו ארבע תכונות המבדילות בין הפרטים.
3. א. בחרו עשרה תרמילים בצורה אקראית ככל האפשר מן הערמה.
   ב. מדדו את אורך התרמילים. רכזו את התוצאות בטבלה.
   ג. פתחו את התרמילים וספרו את מספר הזרעים בכל תרמיל.
   בנו טבלה ורשמו את התוצאות במקום המתאים.
   דוגמה:

מספר הבוטן	אורך התרמיל	מספר הזרעים בתרמיל
1	2.9 ס"מ	3
2	2.7 ס"מ	2
3		
4		

ד. בנו טבלה המתארת את התפלגות אורך התרמילים (התפלגות השכיחויות). דוגמה:

טווח אורך התרמילים (בס"מ)	**מספר תרמילים**
2.1–2.5	1
2.6–3.0	4

ה. שרטטו גרף עמודות המייצג את שכיחות התרמילים בכל טווח (אורך התרמילים כפונקציה של מספר התרמילים בכל טווח).

ו. בצעו סעיפים ד–ה גם לגבי התפלגות מספר הזרעים בכל תרמיל.

ז. קבצו את התוצאות הכיתתיות בטבלה (בצעו את סעיפים ד–ו על פי הנתונים של **כל** התלמידים).

שאלות לדיון:

1. מה אפשר ללמוד מגרף שכיחויות?
2. מה תוכלו לומר על צורת הגרפים שקיבלתם כשעבדתם כזוג? השוו אותם לגרפים שהתקבלו מהתוצאות הכיתתיות. במה הם דומים ובמה הם שונים?
3. איזה גרף, לדעתכם, הייתם מקבלים, לו היו בידיכם נתונים של מאה כיתות?

הגרפים ששירטטתם מציגים את השונות בקבוצת הבוטנים.
שונות היא מדד המתאר עד כמה שונים פרטים בקבוצה זה מזה.

4. השוו בין הגרף המתייחס לאורך התרמיל לגרף המתייחס למספר הזרעים. באיזה מקרה השונות בין הפרטים גדולה יותר?
5. מה ההבדל בין הערכים המתקבלים במדידת אורך התרמיל לבין אלו המתקבלים בספירת הזרעים?
6. האם היו בכיתה שני תרמילי בוטנים זהים הן מבחינת אורך התרמיל והן מבחינת מספר הזרעים? האם, לדעתכם, אפשר למצוא שני תרמילי בוטנים הזהים זה לזה בכל תכונותיהם? מדוע?

הטבלה שלפניכם מציגה את מספר התינוקות שנולדו במרכז הרפואי "כרמל" בחיפה בשנים 2001 ו-2002 על פי משקלם בעת הלידה:

משקל (בגרמים)	שנת 2001	שנת 2002
1000>	18	21
1000–1500	21	23
1500–2000	60	49
2000–2500	154	120
2500–3000	488	463
3000–3500	944	974
3500–4000	590	580
4000–4500	128	125
4500<	14	12

הנתונים באדיבות חדר הלידה, מרכז רפואי כרמל, חיפה.

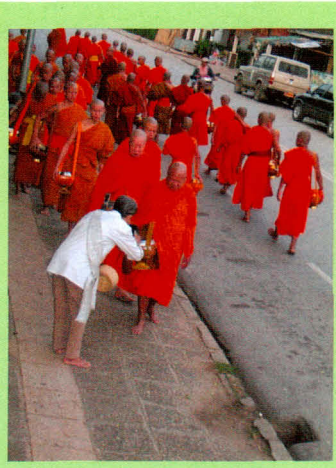
- התבוננו בנתונים משנת 2001. מה תוכלו לומר על פיזור הנתונים?
- האם פיזור הנתונים של שנת 2002 דומה לזה של 2001?
- השוו בין הנתונים של משקל התינוקות לבין הנתונים ששאספתם בפעילות הבוטנים. מה המשותף ביניהם?

בכל אוכלוסייה, על אף שהפרטים בה נראים לעתים זהים, קיימת שונות. למשל, באוכלוסיית חלזונות אפשר להבחין בהבדלים בצבעי הקונכייה ובכיווני הפיתול שלה בין הפרטים השונים; לכלבים דלמטיים יש דגם כתמים שונה על פרוותם; חמציצים שונים נבדלים זה מזה בגוון עלי הכותרת שלהם.

שונות קיימת הן בתכונות רציפות (אורך תרמיל הבוטנים, גובה של בני אדם, רוחב עלי הבננה ועוד) והן בתכונות בדידות (סוגי דם, כיוון הפיתול של הקונכייה ומספר הזרעים בתרמיל הבוטן).

- במה, לדעתכם, יכולה להתבטא השונות באוכלוסיות המוצגות בתמונות שלפניכם?

שונות יכולה להתבטא בתכונות רבות, לאו דווקא כאלה המשפיעות על הצורה החיצונית. למשל, במבנה האיברים הפנימיים, במאפיינים ביוכימיים שונים, בצורות התנהגות ועוד.
כבני אדם נוח לנו, לעתים, להבחין בין פרטים בעזרת הבדלים אלה. חיידקים, למשל, שלגביהם קשה לנו להבחין בהבדלים צורניים (על אף שהם קיימים!), יכולים להיות שונים זה מזה ביכולתם לייצר אנזים מסוים, ואנו יכולים להבדיל ביניהם על פי שונות זו.



אנשים מערביים מתקשים בדרך כלל להבדיל בין אנשים אסיאתיים או בין אנשים אפריקניים, אם אינם חיים בקרבם. גם ההיפך נכון: אסיאתיים ואפריקניים מתקשים להבחין בין אנשים מערביים. מובן, שהקושי נעוץ בהרגלים שלנו ולא בהיעדר שונות באוכלוסייה.

מה המשמעות של השונות באוכלוסייה?

ערבה בוכייה היא עץ הגדל בגינות נוי. ערבות בוכיות שונות נבדלות זו מזו, בין השאר, בדרגת הגמישות של ענפיהן. תארו לעצמכם שני אזורים בהם גדלות ערבות. האחד נתון לסערות ולפרצי רוח חזקים, ואילו האחר מוגן על ידי גבעות. לאילו פרטים יש יתרון באזור המוכה רוחות – לערבות בעלות הענפים הגמישים יותר או לערבות שענפיהן קשיחים יותר? נמקו.

חישבו על עדר צבאים שהפרטים בו נבדלים זה מזה, בין היתר, במהירות ריצתם. במשך שנים רבות חי העדר באזור מסוים באין מפריע, עד שהגיעו נמרים.

- מתי הייתה למהירות הריצה של הצבאים חשיבות רבה יותר – לפני שהגיעו הנמרים או מאז הופעתם? מדוע?
- מה קרה לצבאים מאז הופעת הנמרים? התייחסו לסיכויי ההישרדות של הצבאים השונים לעומת סיכוייהם בתקופה שלפני הופעת הנמרים.
- על סמך שתי הדוגמאות שלעיל, האם לתכונה מסוימת יש תמיד (בכל סביבה) אותה חשיבות?

בפעילות הבאה נעקוב אחר יתרונותיה של תכונה בתנאי סביבה שונים.

האם יתרון עכשיו מבטיח יתרון אחר כך?

פעילות זו היא הדמיה של ליקוט מזון על ידי ציפורים באוכלוסייה שיש בה שונות גנטית רבה. אנו נתרכז בהבדלים בצורת המקור.

הדמיה של ליקוט מזון על ידי ציפורים.

- מלבד צורת המקור, חשבו על תכונות נוספות שבהן עשויה להיות שונות באוכלוסייה זו.

התחלקו לקבוצות. אחד מחברי הקבוצה יקצוב את הזמן (45 שניות בכל פעם). כל אחד משאר חברי הקבוצה ייצג ציפור בעלת צורת מקור מסוימת. לשם כך יקבל כל תלמיד כלי אחסון שישמש לו כְּפָה וכלי איסוף שישמש לו כמקור (אטב, שיפוד, קש וכו').
בעזרת "המקור" עליכם ללקט את ה"מזון" (חרוזים, סוכריות, צימוקים וכו') שיונח על הדשא הסינתטי שלפניכם ולהכניסו ל"פה".

חוקי הציד

1. ניתן לאסוף כל סוג מזון.
2. המזון חייב להילקח בעזרת המקור בלבד.
3. יש להרים (ולא לגרור) את המזון ולהכניסו לתוך הפה.
4. בכל פעם, יש להכניס לפה פריט מזון אחד.
5. אפשר לגנוב מזון מתלמיד אחר, כל עוד הוא לא הוכנס לתוך הפה (אך אסור לגנוב מזון שכבר נכנס לפה).

שלב ראשון

בשלב זה יש בנמצא שפע של מזון מסוגים שונים.

1. פזרו את פריטי המזון על הדשא. עמדו כשגבכם לדשא.
2. בחרו כלי איסוף שישמש אתכם כמקור.
3. בהינתן האות (על ידי התלמיד שנבחר לעשות כן), הסתובבו ונסו לתפוס מספר רב ככל האפשר של פריטי מזון עד שיינתן האות להפסיק. איסוף המזון יימשך 45 שניות.
4. ספרו את מספר פריטי המזון שאסף כל אחד מכם ומלאו את הטבלה שלפניכם:

סוג מקור	מספר פריטי מזון שנאספו
אטב	
מלקטת	
כפית	
שיפוד	

5. ארגנו את הנתונים בטבלה כיתתית (יש להוסיף טורים כמספר הקבוצות בכיתה):

סוג מקור	מספר פריטים (קבוצה 1)	מספר פריטים (קבוצה 2)	מספר פריטים (קבוצה 3)	מספר פריטים (קבוצה 4)	מספר פריטים (קבוצה 5)	ממוצע מספר הפריטים
אטב						
מלקטת						
כפית						
שיפוד						

- האם מספר פריטי המזון שנאספו על ידי בעלי המקורים השונים דומה או שונה? כיצד תסבירו זאת?
- האם אפשר להצביע על צורת מקור מסוימת (אחת או יותר) שיש לה יתרון על פני היתר? על סמך מה קבעתם?
- האם תשובתכם לשאלה הקודמת תהיה זהה גם אם תנאי הסביבה ישתנו? תנו דוגמה.

שלב שני

אסון פקד את אוכלוסיית הציפורים! בצורת קשה השמידה את רוב היבולים והותירה רק סוג אחד של מזון. כיצד ישפיע הדבר על אוכלוסיית הציפורים?

חזרו על הפעולות שבסעיפים 1–4 בשלב הראשון, אלא שהפעם פזרו על יריעת הדשא רק סוג מזון אחד שתקבלו מהמורה.

- האם מספר פריטי המזון שנאספו על ידי בעלי המקורים השונים דומה או שונה? כיצד תסבירו זאת?
- האם אפשר להצביע על צורת מקור מסוימת (אחת או יותר) שיש לה יתרון על פני היתר? האם אפשר להצביע על צורת מקור מסוימת (אחת או יותר) שהיא בבחינת חיסרון? על סמך מה קבעתם?
- לגבי כל צורת מקור, השוו את מספר פריטי המזון שנאספו בשלב הראשון לעומת השלב השני. תנו דעתכם לממוצעים. כיצד תסבירו את ההבדלים (אם ישנם)?
- תנו דעתכם לצורת מקור שהייתה יעילה פחות באיסוף המזון בשלב השני. חשבו על תנאים שבהם יהיה דווקא לצורה זו יתרון באיסוף מזון. מה תוכלו להסיק מכך על השפעת הסביבה על חשיבותן של תכונות מסוימות?

עד כה ראינו, שקיימת שונות בכל אוכלוסייה, ושתכונות מסוימות עשויות להקנות יתרון לפרטים הנושאים אותן על פני פרטים אחרים. היתרון ניכר בתנאי סביבה מסוימים, אך יכול להצטמצם או להתבטל, כאשר משתנים התנאים.

בתרגיל הבא ננסה לחזות כיצד ישפיעו ההבדלים הקיימים בין אריות זכרים על הצלחתם בטבע ועל הדורות הבאים.

כיצד נמדדת "הצלחה"?

אריות בסוואנה

בסוואנה (מישור עשב) באפריקה חיות כמה להקות של אריות. לרוב מורכבת כל להקה משני זכרים (אחים בדרך כלל), ממספר נקבות בוגרות (שהן אחיות או בנות דודות, אך אין קרבה ביניהן לבין הזכרים) ומגורים. לצורך התרגיל המחשבתי הבא נדמיין מבנה פשוט יותר של להקה שלפיו יש בה זכר אחד בלבד. לפניכם תיאור של ארבעה זכרים, שכל אחד מהם מנהיג להקה אחרת:

שם האריה	כפיר	ליובה	אסאד	לאון
גודל	3 מטרים 220 ק"ג	2.6 מטרים 200 ק"ג	2.7 מטרים 205 ק"ג	2.7 מטרים 200 ק"ג
מספר הגורים שנולדו לו	19	25	20	20
אורך חיים	13 שנים	16 שנים	12 שנים	9 שנים
מספר הגורים שהגיעו לבגרות	15	14	14	19
הערות	כפיר הוא האריה החזק ביותר.	לליובה יש את מספר הנקבות הגדול ביותר.	כאשר אזור המחיה נהרס בשריפה, אסאד הוביל את הלהקה לאזור מחיה חדש.	לאון מת מזיהום כתוצאה מחתך ברגלו.

- איזה אריה, לדעתכם, הוא ה"מוצלח" ביותר? הסבירו את קביעתכם.
- לו הייתם צריכים להמר על האריה שמספר צאצאיו בעוד דורות רבים יהיה הגדול ביותר, במי הייתם בוחרים?

מנקודת מבט ביולוגית, פרט מוצלח אינו דווקא היפה, החזק, המהיר, העשיר ביותר ואפילו לא הפרט ששורד זמן רב יותר. פרט מוצלח הוא מי שמעמיד את מספר הצאצאים הגדול ביותר שמגיעים לבגרות. הישרדותו במשך די זמן היא רק תנאי ליכולתו להעמיד צאצאים כאלה. הצלחה זו מכונה **כשירות (fitness)**. לאון, אם כן, הוא האריה הכשיר ביותר מבין הארבעה.

- מדוע, לדעתכם, נמדדת הצלחה ביולוגית ביכולת להעמיד צאצאים שמגיעים לבגרות ולאו דווקא בהישרדותו של הפרט?

כשירות היא מונח יחסי המשמש להשוואה של פרט מסוים עם פרטים אחרים מאותו המין החיים באותה הסביבה. אי-אפשר, אם כן, להשוות בין כשירות של דולפין לכשירות של אדם, של זבוב או של חדף, אלא רק בין כשירות של דולפין מסוים לדולפינים אחרים באותה סביבה.

- האם נכון להשוות את הכשירות של לאון לכשירות של אריה, שחי בסביבה אחרת, שבה תנאי המחיה אחרים? תארו לעצמכם, למשל, אריה שחי בסביבה שתנאיה קשים יותר. אריה זה העמיד רק שני צאצאים שהגיעו לבגרות (בניגוד ללאון שהיו לו, כזכור, 19 צאצאים כאלה).
האם אריה זה הוא בהכרח כשיר פחות מלאון? האם אפשר לדעת כמה צאצאים היה לאון מעמיד בתנאים כאלה?
- האם נכון להשוות בין הכשירות של לאון לכשירותה של אחת הנקבות בלהקתו? מדוע?

מה משפיע על כשירות?

- האם מחלות משפיעות על כשירות החולים בהן?
  חשבו על:
  1. מחלת האלצהיימר – מחלה הפוגעת בזיכרון של בני אדם ומתחילה בדרך כלל בעשור השביעי לחיים.
  2. מחלת האיידס.
  3. המופיליה (המתבטאת בהפרעה בקרישת הדם). בעבר מתו החולים בה בגיל צעיר מאוד. כיום יש תרופות מתאימות שאפשר בעזרתן להתמודד בהצלחה עם המחלה.
- חזרו והתבוננו בטבלה המציגה את ארבע להקות האריות. השוו בין מספר הגורים שנולדו לכל אריה לבין מספר הגורים שהגיעו לבגרות. מה המשותף לכל הלהקות? נסו להסביר את הממצאים.

החיים על הנייר והחיים במציאות

חוקרים שונים חישבו את מספר הצאצאים שיכולים להיווצר מהורה אחד (או משניים, אם מדובר ברבייה זוויגית) במהלך כמה דורות. החוקרים הניחו שבכל דור, כל הצאצאים ישרדו ויתרבו. כך הם מצאו, שזוג פילים יכול ליצור אוכלוסייה בת 19 מיליון פילים תוך 750 שנה; זבובים, שזמן הדור שלהם קצר יותר, יכולים ליצור אוכלוסייה בת 191×10^{18} פרטים תוך חמישה חודשים ואילו חיידק מסוג סטפילוקוקוס, שזמן הדור שלו קצר אף יותר, יכול לכסות את כדור הארץ בשכבה בעובי של שני מטרים בתוך 48 שעות בלבד. עד כאן החישובים. במציאות אנו יודעים, שהעולם אינו מלא בפילים, בזבובים ובחיידקים. למעשה אנו יודעים, שגודל האוכלוסיות נשאר קבוע פחות או יותר לאורך הדורות. מכאן, שבכל דור מספר הצאצאים ששורדים ומתרבים קטן בהרבה ממספר הצאצאים הפוטנציאלי.

בין הורים לצאצאים

בתרגיל הבא תוכלו לחשב בעצמכם את הפוטנציאל של אוכלוסייה להתרבות.
התבוננו בפרי (אפשר לבחור בכל פרי שיש לו יותר מזרע אחד: עגבנייה, מלון, קלמנטינה).

1. ספרו ורשמו את מספר הזרעים שבפרי.
2. אם כל אחד מהזרעים ינבוט, כמה צמחים יהיו בדור השני?
3. אם כל אחד מצמחי הדור השני ייצר עשרה זרעים חדשים, כמה צמחים יהיו בדור השלישי?
4. אם כל אחד מצמחי הדור השלישי ייצר אף הוא עשרה זרעים, כמה צמחים חדשים יהיו בדור הרביעי?
5. שרטטו גרף של מספר הצאצאים האפשרי כתלות במספר הדורות (ציר Y ייצג את מספר הצאצאים וציר X את מספר הדור).
6. איזו מסקנה כללית אפשר להסיק מכך לגבי הפוטנציאל של קצב ההתרבות של הזרעים?
7. המציאות מראה, שבסופו של דבר מהפרי הבודד שבידכם ישרוד בדור הבא רק פרי אחד וכך גם בדור שלאחריו. האם נתון זה תואם את חישוביכם?

8. מה יכולות להיות הסיבות להבדלים בין החזוי למצוי?
9. האם סיבות אלה יכולות להסביר את ההבדלים בין החזוי למצוי באוכלוסיות הפילים, הזבובים והחיידקים? חשבו על סיבות נוספות.

הפילים, הזבובים, החיידקים והצמחים מעמידים יותר צאצאים ממה שיכולים לשרוד. אוכלוסיות אינן גדלות בלי סוף והעולם איננו מלא ביצורים משום שרוב הצאצאים מתים.

שאלות לסיכום

1 לפניכם תכונות שיש לגביהן שונות באוכלוסיות מסוימות. חשבו לאילו פרטים באוכלוסייה יהיה יתרון בסביבה המוגדרת בטבלה. הסבירו את תשובותיכם.

היצור	התכונה שיש לגביה שונות באוכלוסייה	תנאי הסביבה	לאילו פרטים יש יתרון בסביבה על פני אחרים?
לוטוס מכסיף	מידת הזקיפות של הענפים (שרועים או זקופים).	רוחות עזות	
תיקנים	המהירות שבה הם בורחים מהאור (מהירות גבוהה או נמוכה).	מטבח במסעדה	
שועל הקוטב	צבע הפרווה ועוביה (פרווה לבנה, חומה, עבה, דקה).	אזור מכוסה שלג	
חרקים	עמידות לחומרי הדברה (עמידות או רגישות).	כשלא נעשה שימוש בחומר ההדברה	

2 האם התכונות שמדדתם קודם לכן בבוטנים, משפיעות על כשירות זרעי הבוטן?

3 חיידקים אינם נבדלים זה מזה במספר הצאצאים: כל חיידק מתחלק לשניים. גם חיידק המותאם מאוד לסביבתו, לא מתחלק ליותר משניים. מכיוון שחיידקים אינם נבדלים במספר הצאצאים, האם, לדעתכם, המושג "כשירות" רלוונטי לחיידקים?

4 בשנת 1971, תוחלת החיים הממוצעת של גברים בישראל היתה 70.1 שנים ושל נשים – 73.4 שנים. בשנת 1998 עמדה תוחלת החיים הממוצעת על 76.1 שנים אצל גברים ועל 80.3 שנים אצל נשים. האם הארכת תוחלת החיים ושיפור איכות החיים משפיעים על כשירות האדם?

סיכום

פרק זה עסק בשונות הקיימת באוכלוסיות ובעובדה שיש פרטים כשירים יותר וכשירים פחות. הפרטים הכשירים ביותר הם אלה שמעמידים מספר גדול יותר של צאצאים שמגיעים לבגרות. ראינו גם כי מספר הצאצאים האפשרי (או הפוטנציאל של אוכלוסייה להתרבות) גדול לאין שיעור ממספר הצאצאים ששורד ומגיע לבגרות. בפרק הבא נבחן מדוע לא כל הצאצאים מגיעים לבגרות בטבע וכיצד קשור הדבר להתארכות צוואר הג'ירפות.

מפת למידה:

פרק ב
בכל אוכלוסייה קיימת שונות.

פרק א
תכונות מסוימות עוברות בתורשה ואחרות אינן עוברות בתורשה. תכונות אלו באות לידי ביטוי ברמה מולקולרית וברמה של היצור השלם.

פרק ב
בתנאי סביבה מסוימים יש תכונות שמקנות יתרון ליצור בהישרדות וברבייה.
כשהסביבה משתנה, הכשירות של הפרטים יכולה להשתנות.

פרק ב
מספר הצאצאים השורדים קטן בהרבה ממספר הנולדים.

מונחים שנלמדו בפרק:

שונות
כשירות (fitness)

פרק ג' אז כיצד באמת התארך צוואר הג'ירפות לאורך הזמן? מנגנון הברירה הטבעית

לזבובים שחיים באזורים גשומים או לחים מאוד, יש לרוב קוטיקולה דקה העוטפת את גופם. לעומתם, זבובים החיים באזורים חמים ויבשים הם לרוב בעלי קוטיקולה עבה יותר המאפשרת שמירה טובה יותר מפני איבוד מים. עובי הקוטיקולה הוא תכונה תורשתית.

ידוע כי בעקבות שינויים אקלימיים המתרחשים במשך אלפי שנים, אזורים מסוימים שהיו פעם גשומים ולחים, הופכים לאזורים חמים ויבשים.

- מה יקרה, לדעתכם, לאוכלוסיית זבובים שחיה באזור כזה?
  כדי לענות על השאלה העזרו בשאלות הבאות:

1. האם קיימת שונות באוכלוסיית הזבובים? הביאו מספר דוגמאות.
2. איזו תכונה מוזכרת בקטע? מהי השונות הקיימת לגבי תכונה זו?
3. כיצד עשויה תכונה זו להשפיע על כשירות הזבובים באזורים שבהם האקלים לח מאוד? כיצד עשויה תכונה זו 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 שבהן האקלים באזור ילך ויתייבש? (משך הדור של זבוב הוא קצר מאוד – כשבועיים).
6. האם תשתנה האוכלוסייה במהלך הדורות? כיצד?
7. האם ישתנו הפרטים עצמם? הסבירו.
8. האם הסביבה היא שגורמת לשינויים באוכלוסייה?

התעבות הקוטיקולה של הזבובים, בדוגמה שזה עתה ראינו, והתארכות צוואר הג'ירפות לאורך זמן, עליה דיברנו בפרק הראשון, הן דוגמאות לשינויים החלים באוכלוסיות. תהליך ההישתנות של אוכלוסיות לאורך הדורות נקרא **אבולוציה**.

הרעיון שאוכלוסיות משתנות במהלך הדורות, כלומר עוברות אבולוציה, מיוחס לצ'ארלס דארווין, אך למעשה נהגה עוד לפניו על ידי אנשים שונים, המפורסם בהם היה ז'אן בפטיסט למארק. תרומתו האדירה של דארווין (ושל אלפרד וואלאס שאת סיפורו נספר בהמשך) היא בהצעת המנגנון האחראי לאבולוציה ובהצגת ראיות רבות התומכות בו.

מנגנון זה נקרא **הברירה הטבעית**.

בתהליך הברירה הטבעית נבררים בסביבה מסוימת הפרטים המצליחים לשרוד ולהעמיד צאצאים רבים יותר שמגיעים לבגרות. כתוצאה מכך מתרחשים שינויים בהרכב האוכלוסייה: שכיחות הפרטים הכשירים יותר עולה, ואילו שכיחות הפרטים הכשירים פחות יורדת. השינוי **בשכיחות היחסית** הוא בדרך כלל הדרגתי ומתרחש במשך מספר דורות. תהליך הברירה הטבעית מביא לכך שאוכלוסיות של יצורים הופכות למותאמות יותר לסביבתם העכשווית. שימו לב: **האוכלוסייה** היא שעוברת תהליך של **התאמה** ולא הפרטים.

באוכלוסיית הזבובים, למשל, ההתאמה לסביבה היבשה יותר באה לידי ביטוי לא בהשתנות עובי הקוטיקולה אצל כל זבוב בנפרד, אלא בעלייה בשכיחות היחסית של זבובים בעלי קוטיקולה עבה. דבר זה הופך את האוכלוסייה כולה למותאמת יותר.

כשאנו מדברים על "התאמה אבולוציונית", אנו מתייחסים הן **לתכונה עצמה** (כמו קוטיקולה עבה בקרב זבובים החיים בתנאי יובש) והן **לתהליך** שבו התפתחה ההתאמה (כלומר, העלייה ההדרגתית לאורך הדורות בשכיחותם היחסית באוכלוסייה של פרטים בעלי קוטיקולה עבה יותר).

- האם תוכלו לשער כעת כיצד השתנה צוואר הג'ירפות במהלך הדורות?
- האם, לדעתכם, עדיין קיימת שונות באוכלוסיות ג'ירפות שחיות כיום?

תהליך הברירה הטבעית מתואר לעתים קרובות כתחרות אכזרית בין פרטים או כמלחמת קיום עקובה מדם. במלחמה כזו הבריאים, החזקים ובעלי הכושר הגופני הגבוה הם ששורדים על חשבון פרטים חזקים פחות. אולם, יש לזכור שבמרבית המקרים לא מדובר בתחרות פיזית או במלחמה, ולא החזק הוא הקובע בהכרח אלא תכונות אחרות המעלות את הכשירות (כמו עובי הקוטיקולה בזבובים או אורך הצוואר בג'ירפות). כפי שהדגשנו, הצלחה בטבע נמדדת רק במספר הצאצאים (השורדים ומגיעים לבגרות) שמעמיד הפרט.

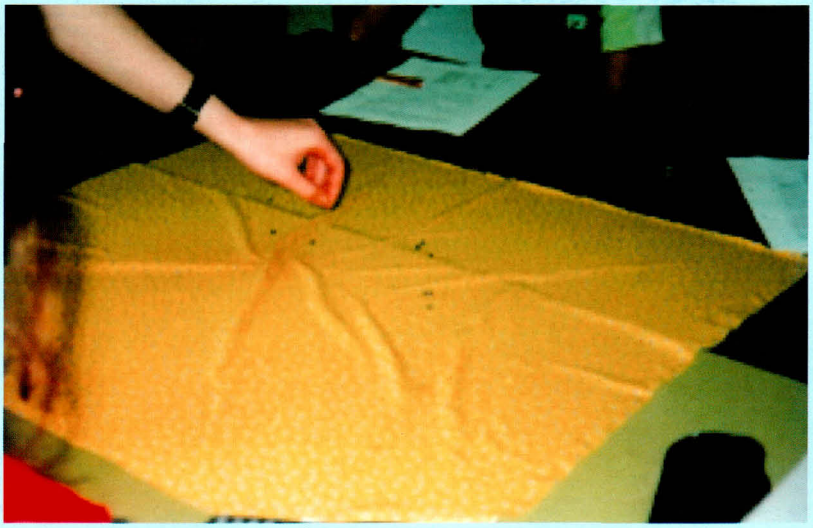
אבולוציה של חרזנים

התרגיל הבא הוא הדמיה של תהליך הברירה הטבעית, כפי שהיא מתרחשת באוכלוסיית חרזנים, שהם חרקים דמיוניים.
החרזנים הם חרקים החיים בשדות פרחים. הגורם היחיד למותם של פרטים באוכלוסייה זו הוא אכילתם על ידי ציפורי טרף. בכל שנה נטרפת כמחצית מאוכלוסיית החרזנים. אך בכל שנה האוכלוסייה, המתרבה ברבייה אל-זוויגית, גם מכפילה את עצמה: פעם בשנה כל חרזן מעמיד צאצא אחד הזהה לו בדיוק.

מהלך העבודה

במהלך ההדמיה חרוזים ייצגו את החרזנים, בד פרחוני ייצג את שדה הפרחים שבו הם חיים ואתם תייצגו את הציפורים הטורפות.

1. פזרו באופן שווה 20 חרזנים מכל צבע (40 בסך הכול) על הבד הפרחוני שקיבלתם.
2. האם קיימת שונות באוכלוסיית החרזנים שלכם?
3. מהי השכיחות באחוזים של כל אחד מסוגי החרזנים?
   חשבו כך: $\frac{\text{מס' החרזנים מצבע מסוים} \times 100}{\text{סך כל החרזנים משני הצבעים}}$
4. טריפת החרזנים על ידי ציפורי הטרף תיעשה בדרך זו: נציג מהקבוצה יהיה הטורף ויעמוד, כשגבו מופנה מהבד. נציג אחר ייתן לטורף סימן על ידי נגיעה בכתף. כדי לטרוף, יסתובב הטורף אל הבד וייקח במהירות את החרזן הראשון שהוא מבחין בו. חזרו על כך 20 פעמים (כך שבסופו של דבר ייטרפו 20 חרזנים). שני נציגים נוספים מהקבוצה ישמרו שהבד יהיה מתוח במהלך כל הטריפה.



פעילות החרזנים – הדמיה של תהליך הברירה הטבעית

5. ספרו כמה חרזנים נשארו מכל צבע וחשבו יחס מספרי באחוזים.
6. בשלב זה בצעו את הרבייה של החרזנים בדרך זו: הכפילו את מספר החרזנים שנותרו על הבד בהתאם לצבעם. למשל, אם נותרו על הבד 7 חרוזים צהובים, הוסיפו 7 חרוזים צהובים חדשים.
7. אספו את כל החרוזים ופזרו אותם על הבד באופן אחיד.
8. חזרו על שלבים 3–7 פעמיים נוספות (כך שבסך הכול תהיה הדמיה של שלושה דורות).
9. מלאו את הטבלה:

		צבע 1	צבע 2
אוכלוסיה התחלתית	מס' חרזנים	20	20
	יחס מספרי באחוזים	50	50
דור 1	מס' חרזנים שנותרו אחרי הטריפה		
	יחס מספרי באחוזים		
דור 2	מס' חרזנים שנותרו אחרי הטריפה		
	יחס מספרי באחוזים		
דור 3	מס' חרזנים שנותרו אחרי הטריפה		
	יחס מספרי באחוזים		

שאלות:

1. לאילו פרטים באוכלוסיית החרזנים היה יתרון בסביבה? מדוע?
2. לאילו פרטים באוכלוסיית החרזנים לא היה יתרון? מדוע?
3. שרטטו גרף עמודות שיציג את התוצאות. החליטו מה ייצג ציר ה–X ומה ייצג ציר ה–Y.
4. מה קרה לאחוז החרזנים בעלי היתרון לאחר שלושה דורות?
5. מה קרה לאחוז החרזנים, שלא היה להם יתרון, לאחר שלושה דורות?
6. כיצד הייתם מסבירים את השינוי באחוזים בשני סוגי החרזנים?
7. מדוע חישבנו בכל פעם את אחוז החרזנים ולא הסתפקנו במספרם?
8. האם בגלל נוכחות הציפורים הטורפות חל שינוי בחרזנים (בפרטים עצמם)?
9. האם בגלל נוכחות הציפורים הטורפות חל שינוי באוכלוסיית החרזנים?
10. כיצד תסבירו את ההבדל בין תשובתכם לשאלה 8 לבין תשובתכם לשאלה 9? איזו מסקנה אפשר להסיק מהבדל זה לגבי אופן הפעולה של תהליך הברירה הטבעית?
11. האם השפיעה הסביבה על צבע החרזנים? הסבירו.
12. מה היה קורה, לדעתכם, אילו היינו ממשיכים בטריפה וברבייה כמה דורות נוספים?
13. הדמיית החרזנים מדמה את תהליך הברירה הטבעית. המציאות כמובן מורכבת יותר, וההדמיה (כמו כל הדמיה, אנלוגיה או מודל) מוגבלת ביכולתה לדמות את המציאות. במה, לדעתכם, היא מוגבלת?
14. האם אתם חושבים שהתכונה שהקנתה יתרון בסביבה המסוימת הזאת, הייתה מקנה בהכרח יתרון גם בסביבות אחרות? נמקו ותנו דוגמה. תארו מה יקרה להרכב האוכלוסייה בסביבה שהבאתם כדוגמה.
15. סכמו, כיצד משנה הברירה הטבעית שכיחויות יחסיות של תכונות באוכלוסייה?
16. מה קורה לשונות באוכלוסייה לאחר מספר דורות?

- מה משותף לדוגמאות שראינו עד עכשיו (זבובים, ג'ירפות וחרזנים) בהקשר של הברירה הטבעית? השתמשו במושגים: יתרון, כשירות, סיכויי הישרדות, סביבה, שינוי ה–DNA, שכיחות.

תהליך הברירה הטבעית הוא הדרגתי וממושך. **עוצמת הברירה** היא שקובעת את קצב השינוי של הרכב האוכלוסייה: ככל שהברירה חזקה יותר, השינוי יהיה מהיר יותר (מבחינת מספר הדורות) ולהיפך.
למשל, לו היינו משתמשים במשחק ההדמיה ביריעת בד בצבע אחיד, הזהה לצבעו של אחד החרזנים, הייתה עוצמת הברירה חזקה יותר מאשר במקרה שבו השתמשנו בבד הפרחוני. השינוי בהרכב האוכלוסייה היה אז מהיר יותר.

תנאי סביבה מסוימים יכולים להשפיע על הרכב אוכלוסייה בצורות שונות. כך למשל, בדוגמה של הזבובים החיים באזורים שהופכים לחמים ויבשים, קוטיקולה עבה היא רק תכונה אחת מני רבות שיכולה להקנות יתרון בתנאים אלה. תכונות נוספות שמקנות יתרון יכולות להיות קשורות בהתנהגות; למשל, פעילות לילה או פעילות בצל (זבובים הפעילים בלילה או בצל יהיו חשופים פחות לסכנת התייבשות ולכן יהיו כשירים יותר).

- חשבו על אוכלוסיית חרקים בשדה פרחים. אילו תכונות יכולות להקנות להם יתרון, אם יש בסביבה ציפורים המסתמכות על חוש הראייה כדי לטרוף אותם?

שאלות לסיכום

1 שני תלמידים מנסים להסביר איך השתנתה הג׳ירפה ממין בעל צוואר קצר יחסית למין בעל צואר ארוך.

דני: ״כתוצאה מהרצון של ג׳ירפה קדומה להתפתח והצורך שלה להגיע לצמרות העצים, נוצר במשך האבולוציה צוואר ארוך אצל הג׳ירפות. זה קרה לאט, כי בכל דור הג׳ירפות האריכו רק במעט את צווארן״.

ברוך: ״בקרב הג׳ירפות הקדומות (שלרובן היה צוואר קצר יחסית) היו גם כמה כאלו בעלות צוואר יותר ארוך. לג׳ירפות אלה היה יתרון, ולכן במשך הדורות שרדו יותר ויותר מהן, והן העמידו יותר צאצאים שגם להם היה צוואר ארוך יחסית״.

ההסבר של מי נראה לכם נכון יותר? דני / ברוך

מה לא בסדר בהסבר שלפי החלטתכם **אינו** נכון?

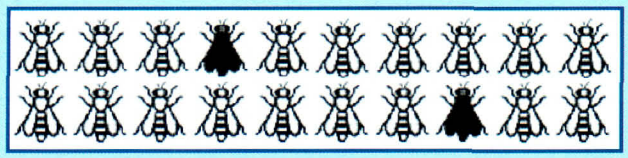
2 על פי מה שלמדתם בפרק זה, מי מהבאים יכול לעבור שינויים אבולוציוניים בתהליך של ברירה טבעית:

א. עדרי בקר החיים בשומרון
ב. החיידקים במעיים שלכם
ג. פרגים בשדה בגלבוע
ד. עץ אלון בכפר–סבא

אפשר לבחור יותר מתשובה נכונה אחת. הסבירו את תשובתכם.

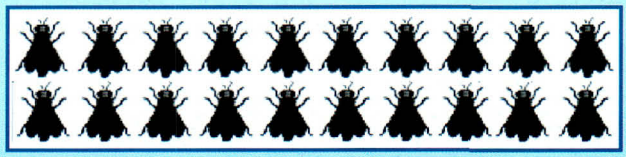
3 מדענים ישראלים גילו מין חדש של זבובים בניו–יורק. הם הבחינו שהזבובים הבוגרים מזדווגים בכל קיץ, והנקבות מטילות ביצים. בסוף הקיץ כל הזבובים הבוגרים מתים. הזבובים החדשים בוקעים מהביצים באביב הבא ויוצרים את דור הבוגרים הבא. המדענים הביאו לישראל עשרים זבובים ושחררו אותם בשדה מחקר מבודד על מנת להמשיך את מחקרם. כנפיהם של שניים היו שחורות ושל כל היתר – לבנות.

דור ראשון:



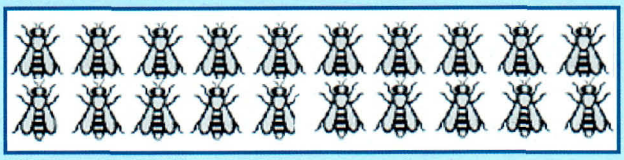
בדור העשירי היו כל הזבובים שחורים:

דור עשירי:



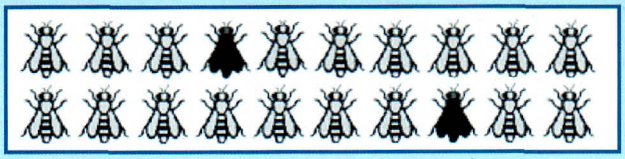
החוקרים הסיקו שבתנאים של שדה המחקר, לזבובים השחורים יש יתרון על פני הלבנים. לאור העובדה שבשדה המחקר צמחו פרחים כהים מאוד ושהזבובים בילו עליהם את רוב זמנם, שיערו החוקרים שזבובים שחורים מוסווים טוב יותר ולכן נטרפים פחות. על פי השערה זו, איזה מהאיורים שלפניכם מראה קבוצה מייצגת של זבובים בדור השני? הסבירו את בחירתכם.

א. דור שני:



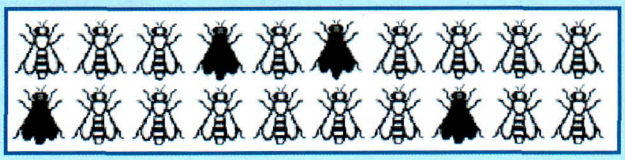
(הזבובים היו כהים יותר ויותר בכל דור.)

ב. דור שני:



(הזבובים היו כהים יותר ויותר בכל דור, אבל היו גם כמה פרטים שחורים בכל דור.)

ג. דור שני:



(שכיחות הזבובים השחורים עלתה בכל דור.)

נניח שהחוקרים היו משחררים את עשרים הזבובים המקוריים שהביאו מניו–יורק בשדה כותנה במקום בשדה שבו נערך הניסוי (צבע הרקע הבולט בשדה כותנה הוא לבן). מה, לדעתכם, היה קורה אז לאוכלוסיית הזבובים ומדוע?

4 בניסוי של וייסמן, שתואר בפרק הראשון, קוצצו זנבות עכברים במשך עשרים דורות. למרות זאת, אורכם הממוצע של זנבות הצאצאים לא השתנה באופן משמעותי.

א. תארו לכם אוכלוסיית עכברים שחיה בשטח מסוים שאליו הגיעו תנים. מתברר, שככל שזנב העכבר ארוך יותר, הוא מסרבל את תנועתו, וכך קל יותר לתנים לצוד אותו. האם, לדעתכם, ישתנה האורך הממוצע של זנבות העכברים באזור במהלך הדורות לאחר הגעת התנים? כיצד?

ב. מה ההבדל בין הסיפור על העכברים הנטרפים על ידי התנים לבין העכברים בניסוי של וייסמן?

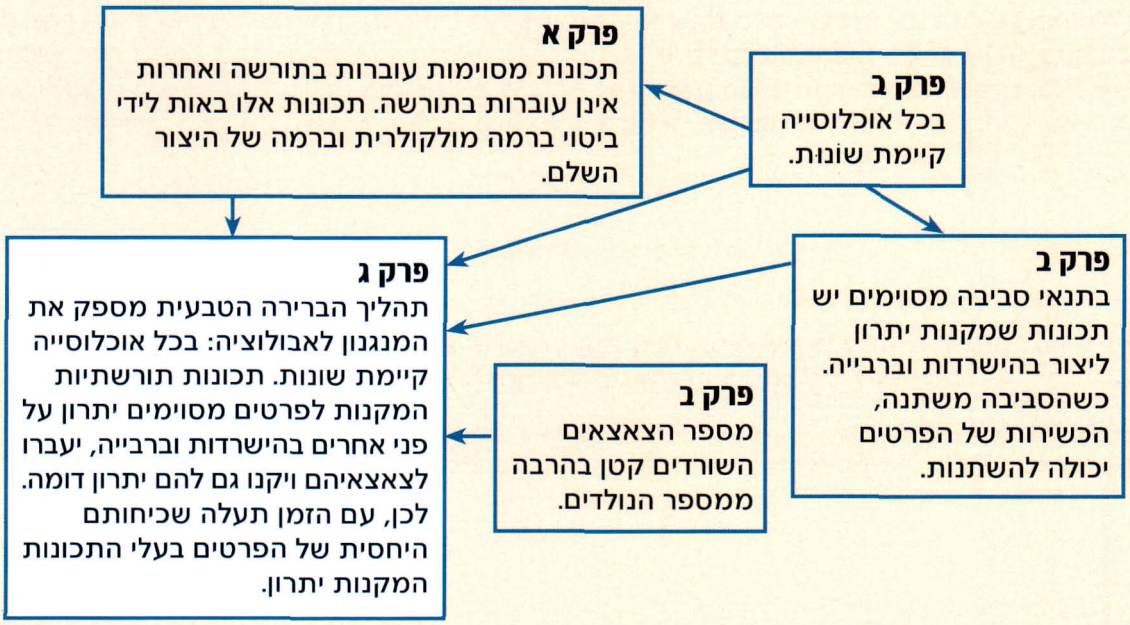
סיכום

בפרק זה הכרנו את רעיון הברירה הטבעית שמסביר כיצד משתנות אוכלוסיות עם הזמן. תהליך הברירה הטבעית מביא לכך שאוכלוסיות של יצורים הופכות למותאמות יותר לסביבתם. תהליך ההתאמה הוא (על פי רוב) הדרגתי וממושך. עוד למדנו כי בתנאי סביבה נתונים, ייתכנו בדרך כלל כמה פתרונות המאפשרים הישרדות ורבייה.

בבואנו להסביר כיצד פועלת הברירה הטבעית באוכלוסייה מסוימת, יש לתת את הדעת לנקודות האלה:

- ה**שונות** באוכלוסייה (באוכלוסיית הג'ירפות, למשל, הייתה שונות: היו בה פרטים בעלי צוואר קצר יחסית ולצדם גם פרטים בעלי צוואר ארוך יותר).
- השפעת ה**סביבה**: יש לזכור, שהסביבה **אינה גורמת** לשינוי של פרטים. היא מאפשרת את הישרדותם של הפרטים הכשירים ביותר ולא את זו של פרטים כשירים פחות. (בית הגידול שבו הידלדל היצע המזון במקומות הנמוכים לא גרם לצווארם של פרטים להתארך. בסביבה זו **נבררו** פרטים שהיו בעלי צוואר ארוך יחסית, משום שהיו כשירים יותר).
- התכונה הרלוונטית (זו שמשפיעה על הכשירות) עוברת **בתורשה** (צאצאי הג'ירפות בעלות הצוואר הארוך יחסית היו אף הם בעלי תכונה זו).
- השינוי בשכיחות היחסית הוא **הדרגתי** ומתרחש במשך דורות (בכל דור עלתה שכיחותם היחסית של בעלי הצוואר הארוך יותר וירדה שכיחותם של בעלי הצוואר הקצר).

מפת למידה:



מונחים שנלמדו בפרק:

אבולוציה
ברירה טבעית
שכיחות יחסית
התאמה
עוצמת ברירה

פרק ד' האם ניתן לראות ברירה טבעית בפעולה?

בפרק הקודם ראינו, שמנגנון הברירה הטבעית יכול להסביר שינויים מרחיקי לכת, שמתרחשים באוכלוסיות במשך מיליוני שנים. בדרך כלל, תהליך הברירה הטבעית הוא תהליך איטי, והשינויים המתרחשים בכל דור הם קטנים מאוד, ולכן איננו יכולים להבחין בתהליך תוך כדי התרחשותו. לו תוחלת החיים שלנו הייתה בת מיליוני שנים, סביר להניח, שהיינו מבחינים, למשל, בהתארכות הצוואר של הג'ירפות.

בפרק זה נעסוק בכמה מקרים, שבהם תועדה פעולתה של הברירה הטבעית בצורה שיטתית. תיעוד זה התאפשר בזכות המהירות הרבה יחסית שבה התרחשו השינויים.

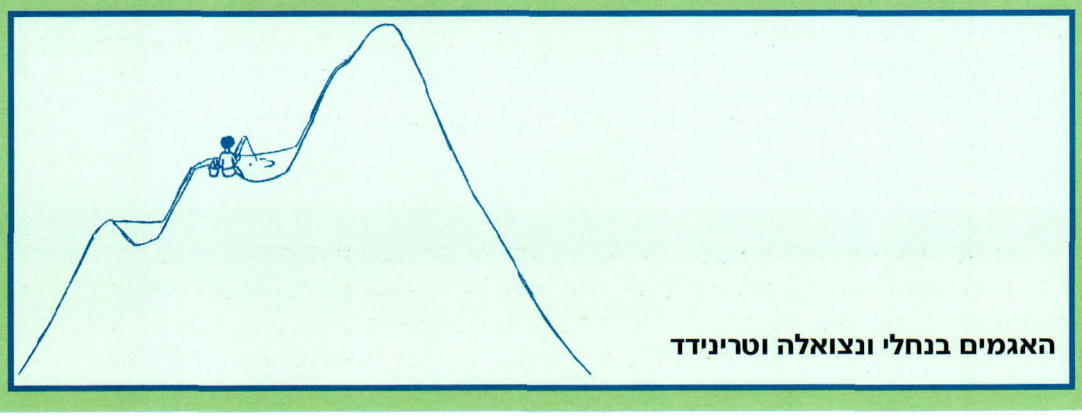
על צבעים, על טורפים ועל גופים

קיימות דוגמאות רבות בטבע שבהן הנקבות הן שבוחרות את הזכרים שאיתם יזדווגו וכך קובעות את כשירותם של הזכרים (כלומר, את יכולתם להעמיד צאצאים). במינים רבים כאלה הנקבות "בוחנות" את המראה או את התנהגות החיזור של כמה זכרים, לפני שהן בוחרות בזכר מסוים.

גופים הם דגים טרופיים שאנשים נוהגים לגדל באקווריומים. בטבע הם חיים באגמים ובנחלים של ונצואלה והאיים הקריביים. הזכרים הם באורך של 2.5–3 סנטימטרים, ולרבים מהם נקודות זוהרות בשחור, ירוק, כחול, כתום ואדום. הנקבות הן אפורות. הנקבות בוחרות את הזכרים על פי צבעיהם ותנועות החיזור שלהם: ככל שצבעי הזכר בולטים יותר ותנועותיו נמרצות יותר, סיכוייו להיבחר על ידי הנקבות ולהזדווג אתן גבוהים יותר.

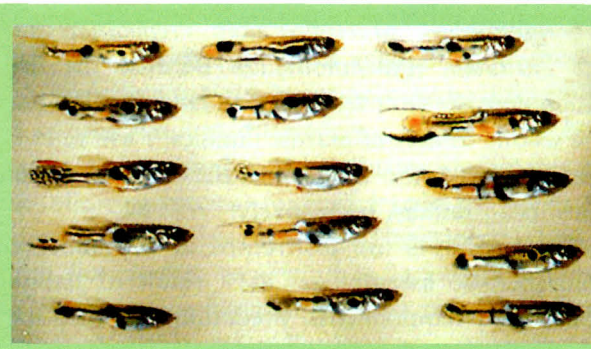
1. אילו זכרים כשירים יותר? האם הם יהיו כשירים יותר בכל תנאי סביבה?

החוקר ג'ון אנדלר (John Endler) חקר בשנות השבעים אוכלוסיות גופים שחיות בנחלים זורמים במורדות ההרים בוונצואלה ובטרינידד. הנחלים הללו מחולקים למקטעים המופרדים ביניהם על ידי מפלים.

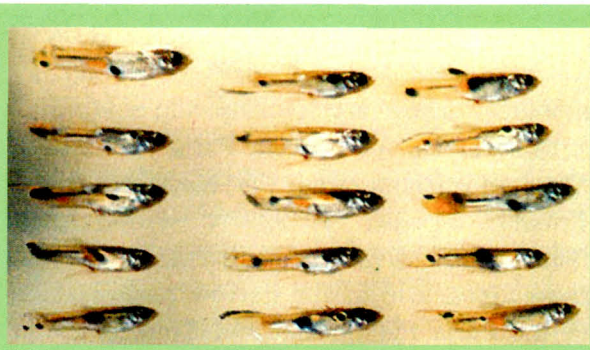


האגמים בנחלי ונצואלה וטרינידד

בכל מקטע כזה חיה אוכלוסיית גופים נפרדת מאחר שאין כמעט מעבר גופים בין מקטע למקטע. אנדלר זיהה בתוך מקטעי המים את הטורפים הטבעיים של הגופים – בעיקר דגים – והבחין שהם אינם מפוזרים באופן שווה: ככל שיורדים במורד ההר, יש יותר טורפים במים – מבחינת המספר הכולל ומבחינת המגוון (יותר סוגים של טורפים). אנדלר דגם גופים מכל מקטע ושם לב, שבמקטעים הקרובים לראש ההר למרבית הזכרים יש צבעים זוהרים, ושבמקטעים שבתחתית ההר למרבית הזכרים צבעים בולטים פחות.



זכרים ממעלה ההר:
צבעים חזקים ובעלי ברק. יותר נקודות באזור הזנב.



זכרים ממורד ההר:
צבעים דהויים ובורקים פחות. פחות נקודות באזור הזנב.

2. הציעו הסבר, כיצד משפיע הפיזור השונה של הטורפים במורד הנחל על שכיחות הזכרים בעלי הצבעים הבולטים במקטעים השונים.
3. כיצד הייתם בוחנים את ההסבר?

אנדלר לקח גופים הנבדלים בצבעוניותם, ממקטעים שונים, ערבב אותם ואפשר להם להתרבות במעבדה במשך מספר דורות (משך הדור אצל הגופים הוא כארבעה עד שישה שבועות). הצאצאים שהתקבלו היו שונים זה מזה במידת צבעוניותם, והם גודלו בעשר בריכות מלאכותיות, שבקרקעיתן היה חצץ צבעוני עמום (בדומה לקרקעית הנחלים). בכל בריכה הייתה אוכלוסייה של מאתיים גופים, זכרים ונקבות, שהזכרים שבהן הציגו שונות רבה במידת הצבעוניות שלהם. לחלק מהבריכות הכניס אנדלר טורפים. לאחר חמישה חודשים נבדקו הדגמים והצבעים של הזכרים בכל בריכה.

4. איזו השערה, לדעתכם, ביקש החוקר לבחון באמצעות הניסוי?
5. אילו זכרים יהיו כשירים יותר, לדעתכם, בבריכות שאין בהן טורפים?
6. אילו זכרים יהיו כשירים יותר, לדעתכם, בבריכות שיש בהן טורפים?
7. מה יקרה להרכב האוכלוסייה (מבחינת הזכרים) במהלך הדורות בבריכות שיש בהן טורפים ובבריכות שאין בהן טורפים?
8. מדוע הקפיד החוקר שבכל בריכה תהיה אוכלוסייה התחלתית דומה (מבחינת מספר הפרטים והצבעוניות)?

על מנת לראות אם תהליך כזה מתרחש גם בטבע (ולא רק בתנאי מעבדה), לקח אנדלר מדגם של מאתיים גופים ממקטע בתחתית ההר. רובם היו, כזכור, בעלי צבעים לא בולטים יחסית. הוא שם את הגופים הללו במקטע אחר גבוה במעלה ההר, שלא היו בו גופים אחרים. במקטע החדש גם לא היו טורפים. לאחר שנה (כחמישה עשר דורות) הוא בדק את הזכרים. הרכב האוכלוסייה היה שונה מההרכב המקורי: שכיחות הזכרים בעלי הצבעים הבולטים עלתה מאוד.

בפרק הקודם ראינו, שבקרב יצורים חיים מספר הצאצאים המגיחים לעולם עולה בהרבה על מספרם של השורדים. לכן, נגזר על כל היצורים להיקלע לתחרות עם דומיהם על המשאבים הקיימים (למשל, מציאת מזון, בני זוג והגנה). בתחרות זו מספר יצורים זקוקים לאותו המשאב, שכמותו אינה מספקת לכולם.
המאבק העיקרי מתנהל לא בין פרטים ממינים שונים (למשל, בין הטורף לנטרף) אלא בין פרטים השייכים לאותו המין (למשל, בין הנטרפים לבין עצמם). לפיכך, בדוגמה שראינו, המאבק המכריע אינו בין הגופים לבין טורפיהם, אלא בין פרטי הגופים השונים. רק המנצחים במאבק בקרב הגופים הם שיעמידו את הדורות הבאים.

חטי פילים באפריקה

חטים הם השיניים החותכות העליונות הבולטות מפי הפיל. החטים משמשים את הזכרים בהזדמנויות שונות בחייהם. למשל, במאבק עם זכרים אחרים על הנקבות יש חשיבות רבה לנוכחות החטים, ופילים ללא חטים מזדווגים פחות. הימצאות חטים היא תכונה תורשתית.

1. אילו זכרים הם כשירים יותר? האם הזכרים הללו יהיו כשירים יותר בכל תנאי סביבה?
2. ברוב אוכלוסיות הפילים בטבע שכיחות בעלי החטים גבוהה. הסבירו זאת על פי מנגנון הברירה הטבעית.

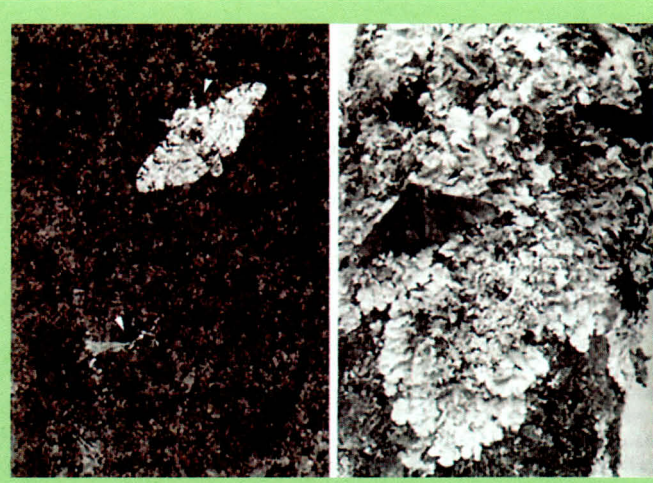
מאז הגיע האדם הלבן לאפריקה, הפכו חטי הפילים למצרך מבוקש במערב. הפופולריות של אביזרי נוי שונים העשויים שנהב (החומר שממנו עשויים החטים) העלתה מאוד את מחירו. פילים רבים ניצודים מדי שנה כדי לספק את הביקוש, וככל שהחטים ארוכים יותר, כך הם קוסמים יותר לציידים. הציד המוגבר, הנמשך כבר יותר משבעים שנה, מהווה לחץ ברירה על הפילים וזאת נוסף על **לחץ הברירה** הפועל על הזכרים בגלל השתתפותם במאבקים על הנקבות.

בשמורות מסוימות באפריקה יש פיקוח על הציד (ואז הציד אסור) בעוד שבשמורות אחרות אין פיקוח.

3. אילו זכרים יהיו כשירים יותר בשמורות שיש בהן פיקוח על הציד? אילו זכרים יהיו כשירים יותר בשמורות שאין בהן פיקוח?
4. מהו, להערכתכם, ההרכב של אוכלוסיית הפילים (מבחינת הזכרים) כיום, לאחר כמה עשרות שנים של ציד (וכמה דורות של פילים) בשמורות שאין בהן פיקוח?
5. האם התרחש במקרה זה תהליך של ברירה טבעית?
6. השוו בין הדוגמה של חטי הפילים והדוגמה של הגופים. מה המשותף לשתי הדוגמאות?

עשים באנגליה

הדוגמה המפורסמת ביותר שנחקרה (ועדיין נחקרת) באוכלוסיות בטבע ידועה בשם "השחרה (מלניזם) תעשייתית".



עשים על גזעי עצים בבריטניה

העשים הם פעילי לילה ואת שעות היום הם מבלים בעיקר במנוחה על גזעי עצים ועל סלעים. בעבר היו מרבית העשים המנוקדים בבריטניה בהירים יחסית. רק מיעוטם היו כהים. בתקופה זו מרבית גזעי העצים היו מכוסים בחזזיות שצבען בהיר, ולכן בשעות המנוחה העשים כמעט שלא נראו לעין על רקע הגזעים והענפים.

1. איזה יתרון הקנה הצבע הבהיר לעשים?

במהלך המהפכה התעשייתית בבריטניה, במאה התשע עשרה, הוקמו מפעלים רבים, והזיהום של העשן והפיח, שנפלטו מארובות המפעלים, הביא לתמותה רבה של חזזיות. גזעי העצים, שקודם לכן היו מכוסים בחזזיות, התכסו בהדרגה בפיח. בתקופה זו עלתה שכיחותם של עשים כהים באזורים מתועשים אלה, ובאזורים מסוימים היא הגיעה לשיעור של למעלה מ-90% מכלל העשים.

2. נסו להסביר את השינוי בהרכב של אוכלוסיית העשים.
3. האם תצפו לשינוי דומה גם באזורים לא מתועשים בבריטניה?

בשנות החמישים והשישים של המאה העשרים, ניסה החוקר האנגלי Bernard Kettlewell להסביר את השינוי באוכלוסיות העשים. הוא לכד פרטים כהים ופרטים בהירים של העש המנוקד, סימן אותם, שחרר אותם ולכד אותם שוב לאחר מספר ימים. הוא ביצע את הניסוי במספר מקומות: באיזורים מתועשים שבהם היו גזעי העצים כהים ובאזורים לא מתועשים שבהם היו גזעי העצים בהירים.

4. מהי ההשערה שניסה החוקר לבדוק?

תוצאות הלכידה מחדש באיזור ברמינגהם (אזור מתועש) מופיעות בטבלה שלפניכם:

	מספר העשים ששוחררו	מספר העשים שנלכדו מחדש	% העשים המשוחררים שנלכדו מחדש
עשים כהים	154	82	52.3%
עשים בהירים	64	16	25%

5. מדוע, לדעתכם, לא נלכדו מחדש **כל** העשים ששוחררו?
6. מדוע מצוין אחוז העשים שנלכדו ולא רק המספר?
7. הסבירו את ההבדל בין אחוז העשים הכהים שנתפסו לבין אחוז העשים הבהירים.
8. האם הייתם מצפים לממצאים דומים בניסויים שערך Kettlewell באזורים לא מתועשים? הסבירו.

תוצאות הלכידה מחדש באיזור דורסט (אזור לא מתועש) מופיעות בטבלה שלפניכם:

	מספר העשים ששוחררו	מספר העשים שנלכדו מחדש	% העשים המשוחררים שנלכדו מחדש
עשים כהים	473	30	6.3%
עשים בהירים	496	62	12.5%

9. האם הסביבה המזוהמת גרמה לפרטים להפוך לכהים? הסבירו.
10. האם ממצאי החוקר מתאימים למנגנון הברירה הטבעית? הסבירו.

מתברר, שהברירה הטבעית בעשים היא יותר מורכבת ממה שסברו תחילה. במקרים מסוימים נמצא, שהשכיחות היחסית של פרטים כהים לעומת בהירים אינה מתאימה לשכיחות הצפוייה. כך, למשל, באיזור מסוים שאינו מתועש נמצא ששכיחות הפרטים הכהים הגיעה ל-80%, ולעומת זאת באזורים מתועשים מסוימים עלתה שכיחות העשים הכהים פחות מהצפוי. הטענה היא שבמקרים רבים פועלים על העשים כוחות ברירה נוספים, ולא רק גורם הטריפה. בתנאי סביבה מסוימים, למשל, ייבררו דווקא פרטים בעלי עמידות לקרינה, לטפילים, לזיהום ועוד, ללא קשר לצבעם. זוהי דוגמה נוספת למורכבותם של לחצי ברירה בטבע, הפועלים בכיוונים מנוגדים, כפי שראינו כבר בדוגמה של הגופים ושל חטי הפילים.
הברירה הטבעית היא תהליך המתרחש בטבע ללא נוכחותה של יד מכוונת וללא מטרה ידועה מראש. השורדים בטבע הם אלה שתכונותיהם מתאימות לתנאי הסביבה ומאפשרות להם להעמיד צאצאים רבים יותר ביחס לאחרים. פעמים רבות יש יותר מאפשרות אחת להישרדות בתנאי סביבה מסוימים. למשל, בתנאים שבהם היצע המזון על הקרקע מידלדל, יכול להיות יתרון לג'ירפות בעלות צווארים ארוכים, אך גם לכאלה שיש להן רגליים ארוכות ולאחרות שניזונות גם ממזון מסוג אחר שעדיין מצוי בשפע. אלא שבמקרה, בזמן שהיצע המזון הידלדל, התקיימה באוכלוסיית הג'ירפות שונות ניכרת באורך הצווארים ולא באורך הרגליים או בהעדפת סוגי מזון. משום כך פעלה הברירה הטבעית על תכונה זו. במילים אחרות, הצווארים הארוכים נבררו לא כתוצאה מתכנון של מישהו שרצה דווקא יצור עם צוואר ארוך, אלא כיוון שבאותן הנסיבות לפרטים בעלי הצווארים הארוכים הייתה כפי הנראה הכשירות הגבוהה ביותר.

בדוגמה הבאה נעסוק בתהליך אחר של ברירה, אך הפעם נעסוק בברירה מלאכותית, שנעשית על ידי אדם שיש לו רצון, כוונה ומטרה ידועה מראש.

ברירה מלאכותית

כבר עשרות אלפי שנים נוקטים בני האדם דרכים שונות כדי לטפח בעלי חיים וצמחים המתאימים לצורכיהם. בכל דור פוסל האדם את הפרטים שאינם מתאימים לצרכיו (הורג אותם או לא מאפשר להם להתרבות) ושומר ומרבה את אלה שמתאימים לו. המתאימים, והם לבדם, הם ששורדים ומעמידים את הדור הבא.

כך, למשל, ניתן לשער שבראשית התפתחות החקלאות גילה האדם בשדה החיטה שלו שיבולים מסוימות, שגרגריהן היו צמודים לגבעול בחוזקה, בניגוד לשאר השיבולים שגרגריהן ניתקו מהן בקלות. האדם השכיל להבין שתכונה יוצאת דופן זו עשויה להביא לו תועלת, שכן כך יכול היה לאסוף את השיבולים מבלי לאבד בשדה את הגרגרים היקרים שמהם עושים את הקמח. הוא לקח את הגרגרים של שיבולים מיוחדות אלה, הרבה אותם בינם לבין עצמם וקיבל שדה שהיו בו יותר שיבולים בעלות התכונה המבוקשת. הוא חזר על פעולה זו שוב ושוב; כלומר, הוא ברר את הפרטים שגרגריהם היו צמודים והירבה רק אותם. כתוצאה מכך, לאחר כמה דורות הייתה ברשותו אוכלוסייה המורכבת רק משיבולים שגרגריהן צמודים.

באופן דומה ברר האדם גם בעלי חיים שהתאימו לצרכיו. לדוגמה, היתרון בגידול כבשים איטיות שאינן משוטטות בזריזות בשטח הוא גדול: ההשגחה עליהן נוחה יותר והן אינן הולכות לאיבוד. לפני כמאתיים שנה הבחינו במקרה איכרים באנגליה בפרטים בעלי רגליים קצרות במיוחד, שהיו אטיים בהשוואה ליתר הכבשים. לאחר שאפשרו לפרטים בעלי תכונה זו להתרבות במשך כמה דורות, התקבלה אוכלוסייה המורכבת רק מזן של כבשים "עצלות", שההשגחה עליהן נוחה וזולה יותר. זן זה קיים עד היום.

אי שם בעבר החלו בני האדם להבין, שאם יכליאו בכוונה תחילה פרטים שונים בעלי תכונות משלימות (למשל, תות מתוק עם תות שאינו נמעך בקלות), עשויים הצאצאים לשלב את תכונותיהם הרצויות של הוריהם. האדם הכליא רק את הצאצאים האלה (כלומר, רק תותים מתוקים שאינם נמעכים בקלות, ולא, למשל, תותים המצטיינים רק במתיקותם) בינם לבין עצמם, ומבין צאצאיהם ברר שוב את הצאצאים המבוקשים.

תהליכים כאלה של ברירה והכלאה נקראים **ברירה מלאכותית**. ברירה זו, בניגוד לברירה הטבעית, מתבצעת מתוך כוונה ומטרה מסוימת, שכן האדם יודע מראש אילו תכונות הוא מבקש לברור. לא תמיד נבררות בברירה המלאכותית תכונות בעלות חשיבות חקלאית. כך, למשל, לעתים נבררים פרחים בעלי צבע עלי כותרת מסוים או כלבים בעלי אוזניים ארוכות, רק כי תכונות אלו נחשבות יפות בתקופה מסוימת.

1. איזה תהליך, לדעתכם, יהיה מהיר יותר – הברירה הטבעית או הברירה המלאכותית? הסבירו.

פעמים רבות, הברירה המלאכותית מאפשרת את הישרדותם של פרטים שהיו נכחדים אילו הכוח היחיד שהיה פועל עליהם היה ברירה טבעית. שיבולי חיטה, למשל, שגרגריהן צמודים לגבעול בחוזקה, הן בעלות כשירות נמוכה בטבע, שכן גרגריהן אינם מתפזרים. קרוב לוודאי שגם הכבשים האטיות בעלות הרגליים הקצרות לא היו שורדות בטבע.
צ׳ארלס דארווין, שהגה את רעיון הברירה הטבעית, שאב חלק מרעיונותיו מתהליכים של השבחת זנים מלאכותית. פרק י״א יעסוק בהיסטוריה של הרעיונות האבולוציוניים ובתרומתו הגדולה של צ׳ארלס דארווין.

2. השוו בין תהליך של ברירה מלאכותית לתהליך של ברירה טבעית. מדוע השבחת זנים היא ברירה מלאכותית?
3. באיזה תהליך ברירה, מלאכותית או טבעית, תצפו שתתקבל בסופו של דבר אוכלוסייה אחידה יותר בתכונותיה?
4. הביאו דוגמאות לברירה מלאכותית.
5. גם בדוגמה שעסקה בחטי הפילים באפריקה, האדם הוא שיצר את לחץ הברירה. האם, לדעתכם, העלייה בשכיחות הפילים חסרי החטים היא דוגמה לברירה מלאכותית? הסבירו את קביעתכם.
6. הסתכלו שוב על תמונות הגופים שג׳ון אנדלר בודד מהטבע. בהשוואה לדגי גופי מבוייתים, המצויים בחנויות לחיות מחמד, הם צבעוניים פחות ובעלי שונות גבוהה פחות. כיצד תסבירו זאת לאור מה שאתם יודעים על ברירה מלאכותית?

בעזרת ההתפתחויות המדעיות בעשרות השנים האחרונות, מביאה החקלאות המודרנית לשינויים דרמטיים ומהירים ביותר בצמחים ובבעלי חיים. מניפולציות ב–DNA (הנדסה גנטית) הביאו ליצירת תכונות חדשות וליצירת זנים חקלאיים חדשים שלא היו יכולים להיווצר בדרך של הכלאות טבעיות או מכוונות.

שאלות לסיכום

1 באיזור הצפון מערבי של האוקיינוס השקט מתפרנסים הדייגים מדיג של דגי סלמון. ב–1945 השתנתה שיטת התשלום של שכר הדייגים: במקום לשלם להם על פי מספר הדגים שדגו, החלו לשלם להם על פי משקל הדגים. בתגובה, עברו הדייגים להשתמש ברשתות בעלות חורים גדולים המאפשרים דיג של דגי סלמון גדולים בלבד. בעקבות המעבר לרשתות אלו ירד בהדרגה (במשך עשרים וחמש שנים) המשקל הממוצע של דגי סלמון בכמה נהרות באזור. הסבירו את השינוי בעזרת מנגנון הברירה הטבעית.

2 תכשירים להשמדת כינים היו יעילים יותר לפני שנים אחדות מאשר היום. מדענים טוענים כי חלק מהכינים כיום עמידות בפני התכשיר. כיצד, לדעתכם, נוצר מצב זה?

3 בישראל, דור הצאצאים גבוה בממוצע מדור ההורים. האם אפשר לקבוע ששינוי זה הוא תוצאה של ברירה טבעית?

4 צמחי שן הארי הם צמחים קטנים, חד–שנתיים, בעלי פרחים צהובים הנפוצים בשדות ובמדשאות. קבוצת סטודנטים אמריקניים יצאה לבית קברות מסוים, שיש בו אזור חדש ואזור ישן. האזור החדש מטופח מאוד, והדשא (וצמחי שן הארי שבו) מכוסח מדי מספר שבועות. לעומת זאת, באיזור הישן הדשא והצמחים אינם מכוסחים. הסטודנטים קטפו את צמחי שן הארי מהמדשאות של שני האזורים. הצמחים שגדלו באיזור הלא מכוסח היו בגבהים שונים, ואילו הצמחים באיזור המכוסח היו נמוכים כולם, גובהם היה כגובה הדשא או אף למטה מכך. הסטודנטים אספו את זרעי כל הצמחים וגידלו אותם במעבדה. הם השוו את הגובה הממוצע של הצמחים שהתפתחו – אלה שהתקבלו מהזרעים של צמחי האיזור המכוסח לעומת אלה שהתקבלו מהזרעים של צמחי האיזור הלא מכוסח. גובה הצמחים הוא תכונה תורשתית.

א. מדוע, לדעתכם, גידלו הסטודנטים את הזרעים של שני האזורים?

ב. מה, לדעתכם, היו תוצאות ההשוואה? כיצד אפשר להסביר זאת?

ג. כיצד, לדעתכם, תראה אוכלוסיית שן הארי בבית הקברות אם יוחלט להפסיק לכסח את הדשא?

5 הסתכלו שוב בטבלה המציגה את משקלי היילודים החיים שנולדו במרכז הרפואי "כרמל" בשנים 2001 ו–2002 (בפרק ב).

א. מה תוכלו לומר על ההתפלגות של משקלי היילודים בבית חולים זה?

ב. נסו לשער, כיצד תיראה טבלה כזאת בקרב יילודים חיים שנולדו באותן שנים בחברות אנושיות שאינן טכנולוגיות (ללא ניתוחים קיסריים, ללא אינקובטורים וכו'). הסבירו את תשובתכם.

ג. האם מנגנון הברירה הטבעית עדיין פועל, לדעתכם, על משקלי יילודים בעולם המערבי? הסבירו.

ד. בדוגמאות הקודמות נבררו פרטים בעלי תכונות שיש להן לכאורה "כיווניות" מסוימת (ג'ירפות עם צוואר גבוה יותר, פילים עם חטים קטנים יותר). מה מייחד את הדוגמה הזו?

6 במחקר שנעשה בשנות ה-50 באנגליה נאספו פרטים ממין עשב מסוים משני אזורים: אזור של מכרה נחושת נטוש, שהיו בו שרידי נחושת, ואזור אחר (במרחק של חמישה עשר מטרים) שלא נמצאו בו שרידי נחושת.
בדיקות במעבדה העלו כמה ממצאים:

1. כל הפרטים (העשבים) שנאספו מאזור המכרה היו עמידים לנחושת.
2. כל הפרטים שנאספו מהאזור המרוחק יותר היו רגישים לנחושת.
3. תכונת העמידות היא תכונה תורשתית.

א. הציעו הסבר להבדל בעמידות העשבים לנחושת באזורים השונים.
כאשר הנביטו במעבדה (באדמה שלא הייתה בה נחושת) פרטים עמידים, שנמצאו באזור המכרה, התברר כי בדור הצאצאים קיימת שונות בדרגת העמידות לנחושת. בעוד שמרבית הפרטים הבוגרים היו עמידים לרמות גבוהות של נחושת, נמצא שבדור הצאצאים היו גם פרטים עמידים פחות.

ב. כיצד אפשר להסביר את ההבדלים בדרגת העמידות בין אוכלוסיית הצאצאים לאוכלוסיית העשב הבוגרת?
החוקרים שיערו כי לתכונת העמידות יש השפעה מזיקה על העשב ושבמידה מסוימת תכונת העמידות משבשת פעולות אחרות בצמח וכך מקטינה את סיכוייו לשרוד.

ג. אילו ממצאים תומכים בהשערה זו?

7 באיי הגלפאגוס שבאוקיינוס השקט נערך בשלושים השנים האחרונות מחקר רחב היקף על פרושים (ציפורי שיר). בשאלה נתמקד בנתונים שנאספו באי דפנה על סוג מסוים של פרושים.
האי דפנה הוא אי זעיר בגודלו (כחצי קילומטר מרובע בסך הכול), והאקלים בו עונתי. אפשר לעקוב אחר הפרושים באי בקלות יחסית, מכיוון שאוכלוסיית הפרושים באי קטנה (כ-1200 פרטים), ויש מעט הגירה (נדידה) של פרושים מהאי ואליו.
פרוש הקרקע הבינוני (medium ground finch) ניזון בעיקר מזרעים שהוא מפצח במקורו.

פרוש הקרקע הבינוני

החוקרים הראו שפרטים בעלי מקור גדול יותר אוכלים זרעים גדולים יותר, ופרושים בעלי מקור קטן אוכלים זרעים קטנים יותר.

א. מדוע, לדעתכם, נמצאה התאמה גבוהה בין גודל המקורים לגודל הזרעים?

החוקרים תפסו, סימנו, ביצעו מדידות שונות ושחררו את הפרושים באי. הם מצאו שונות בין הפרטים בתכונות רבות: משקל, אורך הכנף, אורך הזנב, וגודל המקור. החוקרים התמקדו בשינויים בגודל המקור ובדקו אותם לאורך עשרות שנים (משך הדור של פרוש הוא כשנה). על סמך התאמה בין גודל המקור אצל הורים לבין גודל המקור אצל הצאצאים, הסיקו החוקרים שתכונה זו היא כנראה תורשתית.
בשנת 1977 התרחשה באי בצורת קשה שפגעה בצמחייה. הפגיעה לא התבטאה רק בירידה במספר הזרעים, אלא גם בשינוי בזמינותם של סוגי זרעים שונים. בעוד שבתנאים רגילים יש שפע של זרעים קטנים ורכים, בתקופת הבצורת כמותם ירדה, ונשארו יותר זרעים גדולים.
הבצורת נמשכה כ-18 חודשים, ומרבית הפרושים מתו בתנאים הקשים. לאחר שהסתיימה הבצורת, בדקו החוקרים את אוכלוסיית הפרושים ששרדה ומצאו שבקרב הפרטים ששרדו הייתה שכיחות גבוהה של בעלי מקור גדול יחסית.

ב. נסו לשער מדוע הפרושים בעלי המקור הגדול יותר הם אלה ששרדו.

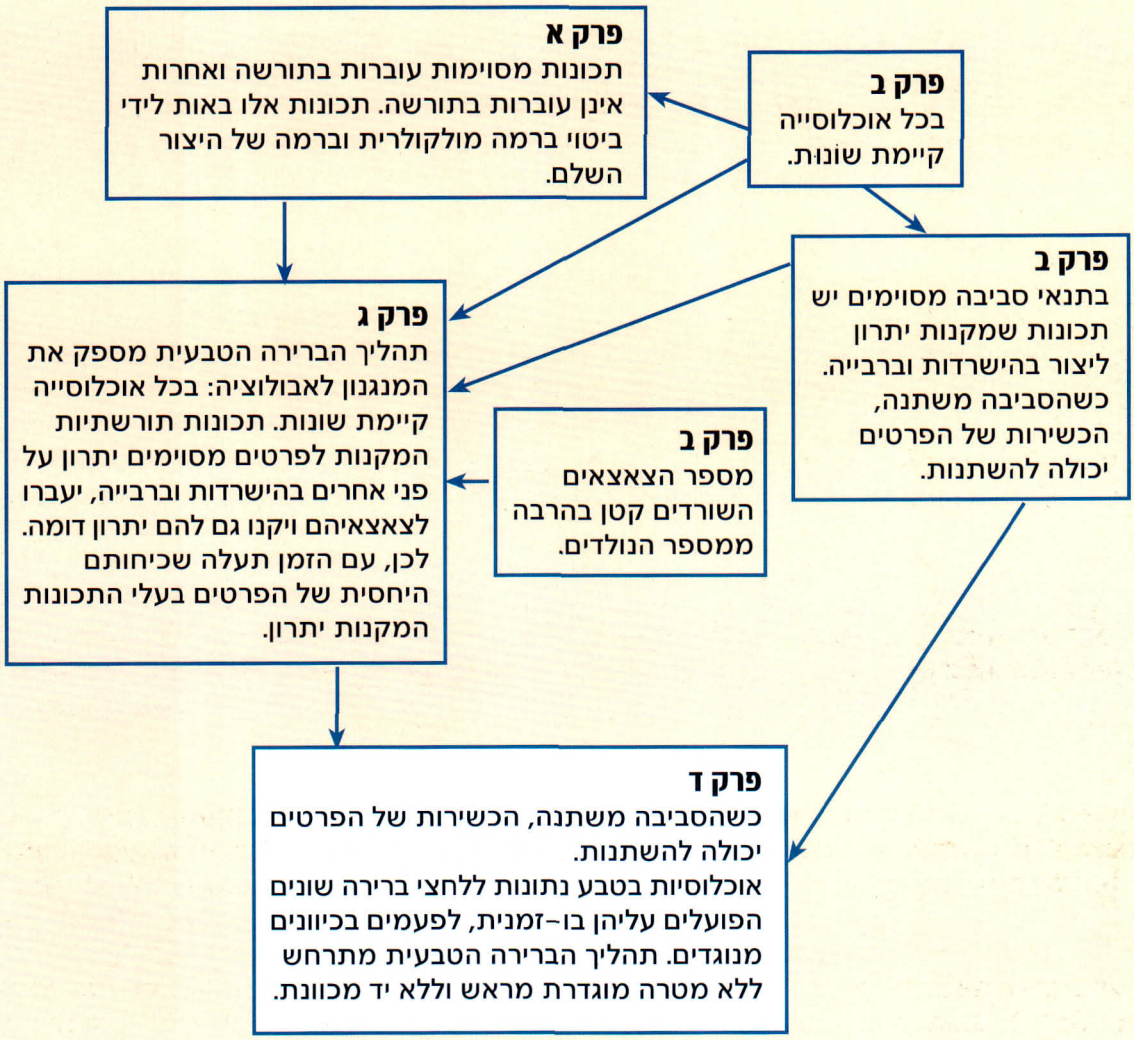
ג. מה היה קורה, לדעתכם, לו הייתה הבצורת נמשכת כמה שנים רצופות?

סיכום

בפרק זה בחנו דוגמאות אחדות של תהליכים אבולוציוניים המתרחשים במנגנון של ברירה טבעית.
ראינו, שהברירה הטבעית עוסקת בתחרות המתקיימת בין פרטים השייכים לאותו המין. למדנו, שאוכלוסיות בטבע נתונות ללחצי ברירה שונים הפועלים עליהן בו-זמנית, לפעמים בכיוונים מנוגדים. הדגשנו שתהליך הברירה הטבעית מתרחש ללא מטרה מוגדרת מראש וללא יד מכוונת.
הדוגמאות שראינו בפרק זה מאופיינות הן במשך הזמן הקצר יחסית שבו התרחשו השינויים והן בתוצאה הניכרת שלהם.

שינויים אבולוציוניים מתחוללים סביבנו כל הזמן, אך מרביתם הם אטיים יחסית מכדי שנבחין בהם במשך חיינו או שהם חבויים מעינינו. בחלק מהשינויים המתחוללים כיום יהיה אפשר להבחין אולי בעתיד הרחוק.

מפת למידה:



מונחים שנלמדו בפרק:

לחץ ברירה

ברירה מלאכותית

פרק ה' כיצד נוצרת שונות?

לפניכם תיאור של כמה תופעות שלכולן מאפיינים משותפים:

בשבט המסאי בקניה, שכל בניו הם פרטים כהי עור, נולד תינוק לבקן (אלבינו) שעורו לבן, מאחר שהוא חסר פיגמנטים בעור. הוריו הביולוגיים היו כהי עור.

בספרו "הגמד של מנדל" מספר סיימון מאואר על מדען גמד שנולד להורים בעלי גובה נורמלי.

בקרב האוכלוסייה של זבובי תסיסה (דרוזופילה) בקע זבוב שהיה תקין לחלוטין בכל מערכות גופו, אך זוג מחושיו היה מנוון.

בעיתון דווח על מקרה של חיידק אלים שחדר לרקמות גופה של אישה וגרם למותה. חיידק זה זכה לכינוי "החיידק הטורף". חיידקים מסוג זה אינם אלימים בדרך כלל ואף מאכלסים דרך קבע את חלל הפה ואת דרכי הנשימה של האדם.

הלבקנות, הגמדות, המחושים המנוונים והאלימות בחיידקים הן תכונות שהופיעו **פתאום** באוכלוסייה (מעולם קודם לכן לא הופיעה וריאציה זו באוכלוסייה). הן גורמות לנושאים אותן להיות שונים מאוד מהוריהם ומיתר הפרטים באוכלוסייה.

- נסו להציע הסבר להופעת הפרטים יוצאי הדופן באוכלוסייה. האם אותו מנגנון בסיסי יכול להסביר את כל התופעות (הופעת התינוק הלבקן באוכלוסיית המסאים, הגמדות של המדען, המחושים המנוונים והחיידק האלים)?

כפי שכבר למדנו, ה–DNA הוא החומר התורשתי המצוי כמעט בכל אחד מתאי הגוף של כל היצורים החיים, והוא מהווה מעין רשימה של הוראות והנחיות להתפתחות היצור החי ולתכונותיו. ה–DNA הוא מולקולה ארוכה הבנויה מרצף של יחידות. היחידות דומות זו לזו, אך אינן זהות, ולמעשה יש ארבעה סוגים שונים של יחידות כאלה.

אפשר להשוות את ה–DNA לשפה העברית. אך בעוד שבשפה העברית יש 22 אותיות, ברצף ה–DNA יש רק ארבע "אותיות" – נוקליאוטידים – שהם ארבעת הסוגים של היחידות המרכיבות את ה–DNA. כל "מילה" בשפת ה–DNA מורכבת מרצף של שלושה נוקליאוטידים. וכמו שבשפה העברית רצף האותיות הוא שיוצר את משמעות המילים והמשפטים, כך גם הרצף בו מסודרים הנוקליאוטידים קובע את משמעות ההוראות הגלומות בו. שינוי של אחד הנוקליאוטידים עשוי לשנות את ההוראה או לשבש אותה כך שתהיה חסרת כל מובן.
נבחן את הדוגמא הבאה. לצורך האנלוגיה של השפה העברית עם "שפת" ה–DNA, הרכבנו משפט שכל המילים בו הן בנות שלוש אותיות:

גָדִי אכל לחם יבש

למשפט זה יש משמעות ברורה. אם תשתנה אחת האותיות, למשל, האות "י" המסומנת תהפוך ל"ע", יתקבל המשפט: **גדי אכל לחם עָבֵש**. משפט זה שונה במובנו מהמשפט המקורי, אך לא באופן ניכר.
לעומת זאת, אם תשתנה האות "ל" המסומנת ובמקומה תופיע האות "פ", יתקבל המשפט **גדי אכל פחם יבש**.
גם משפט זה הוא בעל משמעות, אך משמעותו שונה לחלוטין מהמשפט המקורי.

אם נוסיף לתוך המשפט אות חדשה, למשל, את האות "י" לפני האות "ל" המסומנת, יתקבל המשפט:
גדי אכל ילח סיב ש (כזכור, כל מילה מורכבת מרצף של שלוש אותיות).
המשפט החדש הזה הוא חסר מובן.

שינוי ברצף ה–DNA (למשל, בעקבות החלפה של אחד הנוקליאוטידים המרכיבים אותו באחר) נקרא: **מוטציה**.

כאמור, ה–DNA קובע את תכונותיו של היצור. מקטעים שונים ב–DNA, שלכל אחד מהם רצף ייחודי, מעורבים בקביעתן של תכונות שונות. כל מקטע כזה נקרא **גֶן**. שינוי ברצף הגן (מוטציה) יכול להשפיע על התכונה שהוא קובע ביצור. בדומה לשיבוש משפט בשפה העברית, השינוי יכול לשנות מעט, הרבה ואפילו לשבש לחלוטין את התכונה המתקבלת.
מרגע היווצרות התכונה החדשה, היא מהווה תכונה לכל דבר: במכלול תכונות היצור אין הבדל בינה לבין תכונות "ותיקות" שנוצרו בעבר הרחוק יותר (אף הן על ידי מוטציות). אם תכונה זו משפיעה על כשירותו של היצור, הברירה הטבעית פועלת עליה כמו על שאר התכונות.
מוטציות הן מקור **תמידי** לשונות באוכלוסייה.

מלאו את הטבלה שלפניכם המסכמת את האנלוגיה בין השפה העברית ל–DNA:

השפה העברית	ה-DNA
אות (יש 22 אותיות)	
	רצף של שלושה נוקלאוטידים
משפט	
חוברת הוראות	
שינוי כתיב	

על גנים ושכפול אמין

בתהליך התורשה ה–DNA עובר מדור לדור, והוא שמאפשר את העברתן של תכונות תורשתיות מהורים לצאצאים. אלא שההורים אינם "מוסרים" את ה–DNA שלהם לצאצאיהם ונותרים ללא DNA משלהם: בתהליך התורשה משוכפלים רצפי ה–DNA (הגנים) הנושאים את ההוראות לתכונות. השכפול מתרחש אצל ההורים, וכל צאצא מקבל עותק מכל גן. הסיבה לכך שצאצאים דומים להוריהם – החל מהעובדה שנשים יולדות ילדים ולא חמניות או פילונים ועד לדמיון בצורת האף בין הורים לילדיהם – טמונה באמינות השכפול של ה–DNA.

- מה, לדעתכם, יקרה אם יתרחש שיבוש בתהליך השכפול וכתוצאה ממנו ישתנה רצף ה–DNA (תתרחש מוטציה)? היעזרו באנלוגיה שערכנו קודם בין ה–DNA לשפה העברית.

מוטציות מתרחשות בתאים במהלך שכפול ה–DNA בתדירות נמוכה ביותר. מדענים מעריכים, שעל כל מיליון תאי מין נוצר תא אחד המכיל מוטציה. גורמים סביבתיים מסוימים מעלים את תדירות התרחשותן של מוטציות ונקראים **מוטגנים** (=יוצרי מוטציות). כאלה הם, למשל, קרינת UV (שמגיעה מהשמש), קרינת רנטגן, קרינה רדיואקטיבית, חומרים כימיים שונים כמו אלה הנמצאים בסיגריות ובעשן מכוניות ואף וירוסים מסוימים.

הקשר בין מוטציות לתכונות - תרגיל מחשבתי

חשבו על אוכלוסייה של חרזנים הדומה לזו שפגשתם בפרק ג. האוכלוסייה הנוכחית מתקיימת באזור של עשב ירוק, והיא מורכבת מפרטים צהובים ומפרטים כחולים. במשך דורות נבררים בתהליך הבררה הטבעית פרטים כחולים המוסווים בעשב טוב יותר מפרטים צהובים, ומשום כך הם מהווים כיום את רוב האוכלוסייה.

באחד הפרטים הכחולים באוכלוסייה התרחשה מוטציה ב–DNA שגרמה לשינוי בצבע צאצאיו. חשבו על האפשרויות האלה:

1. בעקבות המוטציה נוצר פרט ירוק. האם, לדעתכם, ישפיע הדבר על הרכב האוכלוסייה במהלך הדורות? הסבירו.
2. בעקבות המוטציה נוצר פרט לבן (הצבע הלבן בולט יותר על רקע העשב משאר הצבעים). האם, לדעתכם, ישפיע הדבר על הרכב האוכלוסייה במהלך הדורות? הסבירו.
3. בעקבות המוטציה נוצר פרט כחול בעל נקודות שחורות (מידת הסוואתו של פרט זה אינה שונה מזו של פרט כחול). האם, לדעתכם, ישפיע הדבר על הרכב האוכלוסייה במהלך הדורות? הסבירו.
4. לגבי כל אחת מהאפשרויות שלעיל, קבעו אם המוטציה העלתה את כשירותו של הפרט, הורידה אותה או לא השפיעה עליה כלל. הסבירו.
5. חזרו לסוף הפרק הקודם לקטע "ברירה מלאכותית" וקראו שוב את הדוגמה על החיטה. האם המוטציה שגרמה לגרגרי השיבולים להיות צמודים יותר לשיבולת הקנתה יתרון לפרטים שהשתנו?

האם הסביבה היא הקובעת אילו מוטציות יתרחשו?

בסוף המאה ה–19 יצאה קבוצת אנשים למסע אל הקוטב הצפוני. אף אחד מהם לא שרד את המסע, וגופותיהם אבדו בשלג. לפני כחמש עשרה שנה התגלו גופותיהם הקפואות של שניים מחברי הקבוצה. כיוון שבגופו של כל אדם מצויים באופן טבעי חיידקים, נמצאו חיידקים גם בגופות הקפואות. חיידקים, בניגוד ליצורים רב–תאיים, אינם מתים בהקפאה, וכאשר הם מועברים לטמפרטורה המתאימה ובנוכחות מזון, הם משגשגים ומתרבים. מדענים בדקו את העמידות לאנטיביוטיקה של החיידקים שנלקחו מהגופות.

- האם, לדעתכם, יכלו המדענים למצוא חיידקים עמידים, על אף העובדה שהאנטיביוטיקה הראשונה (פניצילין) התגלתה רק בשנת 1928, כלומר, שנים רבות לאחר שהחיידקים קפאו? נמקו.
- מה אפשר ללמוד מהסיפור לגבי הופעת העמידות לאנטיביוטיקה אצל החיידקים: האם היא תגובה להימצאות אנטיביוטיקה בסביבה או שהיא מתרחשת ללא קשר לאנטיביוטיקה? הסבירו.

השאלה של אקראיות המוטציות הטרידה חוקרים רבים במהלך השנים. יהושע ואסתר לדרברג (Joshua Lederberg ו–Esther Lederberg) בחנו בתחילת שנות החמישים את השאלה הבאה: האם מוטציה המקנה לחיידק עמידות לאנטיביוטיקה נוצרת בתגובה לנוכחות אנטיביוטיקה או ללא קשר לנוכחות אנטיביוטיקה? כדי לבדוק את השאלה, הם ניצלו את העובדה שאפשר לגדל חיידקים במעבדה על צלחת פטרי שמכילה מזון מוצק. אי–אפשר לראות חיידק יחיד ללא מיקרוסקופ, אך כאשר הוא מתרבה, הוא יוצר תוך מספר שעות מיליוני תאי בת זהים אשר נשארים באותו המקום על הצלחת ויוצרים מושבה קטנה, שאותה אפשר לראות בעין.

הזוג לדרברג ביצע את הניסוי הבא:
בצלחת פטרי שהכילה את כל החומרים הדרושים לגידול חיידקים נזרעו חיידקים. החיידקים התרבו בה ויצרו מושבות צפופות. צלחת זו נקראת "צלחת המקור". המדענים לקחו חתיכת עץ עטופה בד קטיפה סטרילי ונגעו בעזרתה בעדינות בצלחת המקור. מעט חיידקים מכל מושבה מצלחת המקור נצמדו לחוטי הקטיפה. בשלב הבא הניחו המדענים את "חותמת" הקטיפה על מספר צלחות חדשות, שהכילו נוסף על המזון גם אנטיביוטיקה. כל הצלחות הכילו אותו סוג של אנטיביוטיקה.

- החיידקים ששימשו בניסוי היו מזן רגיש לאנטיביוטיקה. האם, לדעתכם, הופיעו מושבות על הצלחות עם האנטיביוטיקה? אם כן, מה מקורן?

המדענים "החתימו" את צלחות האנטיביוטיקה באופן כזה שעל כל צלחת נזרעו אותם החיידקים בדיוק באותו המיקום. במילים אחרות, מושבות שהופיעו באותו המקום על צלחות האנטיביוטיקה, מקורן במושבה שגדלה באותו המקום על צלחת המקור.

המדענים בדקו היכן גדלו המושבות העמידות בכל צלחת. אילו תוצאות התקבלו, לדעתכם?

אפשרות א: המוטציות המקנות עמידות לאנטיביוטיקה נוצרות רק בתגובה לאנטיביוטיקה. במקרה כזה, המוטציות לא התרחשו על צלחת המקור (שאינה מכילה, כזכור, אנטיביוטיקה) אלא רק על צלחות האנטיביוטיקה.

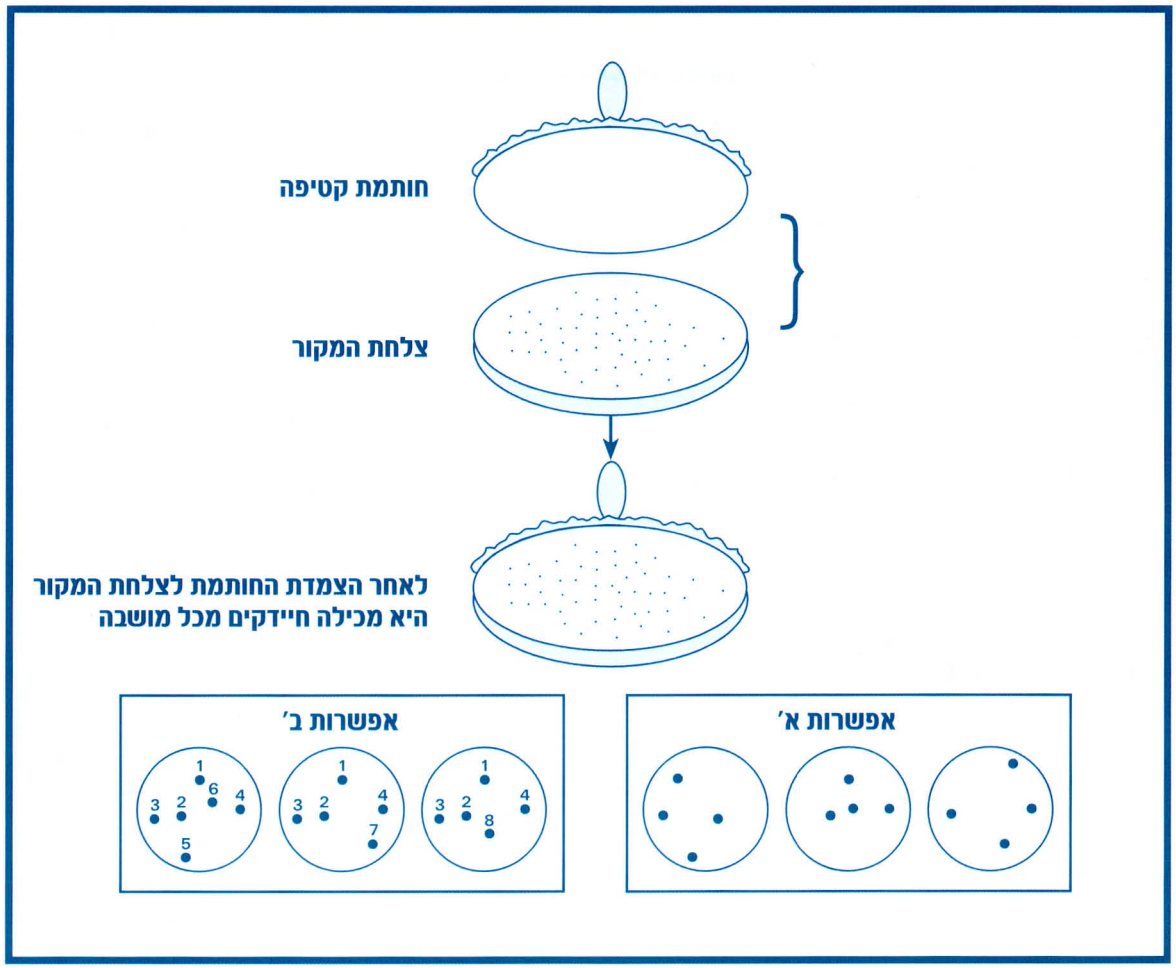
- אם אפשרות זו נכונה, היכן הייתם מצפים שיגדלו המושבות העמידות (האם באותם המקומות בכל הצלחות או במקומות שונים)? הסבירו.

אפשרות ב: המוטציות המקנות עמידות לאנטיביוטיקה נוצרות באופן ספונטני, ללא קשר לאנטיביוטיקה. במקרה כזה, המוטציות יכולות להתרחש גם על צלחת המקור.

- אם אפשרות זו נכונה, היכן הייתם מצפים שיגדלו המושבות העמידות (האם באותם המקומות בכל הצלחות או במקומות שונים)? הסבירו.

התוצאות שהתקבלו תאמו לאפשרות השנייה: בכל צלחות האנטיביוטיקה ניתן היה לזהות מושבות שגדלו באותו מיקום. מקורן של מושבות אלה היה במושבות מאותו מיקום בצלחת המקור. מושבות אלה מעידות על כך שהמוטציות לעמידות התרחשו כבר בחיידקים בצלחת המקור. המוטציות היו ספונטניות, הן לא התרחשו בתגובה לסביבה (במקרה זה לאנטיביוטיקה) ולא נוצרו "כדי" להקנות יתרון לחיידקים בסביבת האנטיביוטיקה. כשהחיידקים העמידים הועברו לצלחות מכילות האנטיביוטיקה הם התרבו ויצרו מושבה.

- אילו היו המדענים מעבירים את חותמת הקטיפה מצלחת המקור לצלחת שאינה מכילה אנטיביוטיקה, היכן הייתם מצפים שיופיעו מושבות?
- בנוסף למושבות שהופיעו במיקום זהה על כל צלחות האנטיביוטיקה, הופיעו גם מספר מושבות ייחודיות לכל צלחת. מה, לדעתכם, מקורן של מושבות אלה?
- כיצד תרם הניסוי של הזוג לדרברג להבנת הקשר בין מוטציות לסביבה?



הניסוי של הזוג לדרברג

האם מוטציות מעלות את הכשירות או מורידות אותה?

ראינו שתכונת העמידות לאנטיביוטיקה, מעלה את הכשירות של החיידק בנוכחות אנטיביוטיקה, ולא מורידה את הכשירות בסביבה ללא אנטיביוטיקה. האם תמיד מוטציות מעלות את הכשירות?
חשבו על משפט בשפה העברית. מה, לדעתכם, יקרה, אם אחת האותיות במשפט תשתנה באופן אקראי? למה יש סיכוי גבוה יותר – שהמשפט ישמור על משמעותו, שיקבל משמעות חדשה או שיהפוך לחסר משמעות? הסבירו.

- מוטציות מתרחשות באופן אקראי, כלומר, בכל מקום ברצף ה–DNA של היצור. אילו מוטציות, לדעתכם, יתרחשו בשכיחות הגבוהה ביותר – מוטציות שמורידות את כשירות הפרט, מוטציות שמעלות את הכשירות או מוטציות ניטרליות (כלומר, כאלה שאינן משפיעות על הכשירות)? הסבירו.

האם כל מוטציה עוברת בתורשה?

ראינו (בפרק א), שתכונה צריכה להיות טבועה ב–DNA כדי שתעבור לצאצאים. אך האם זהו תנאי מספיק?

- לפניכם שלוש דוגמאות של מוטציות שהתרחשו בגופם של שלושה בני אדם.
לגבי כל מוטציה חשבו: האם היא תעבור בתורשה לצאצאיו של הפרט הנושא אותה?

1. מוטציה בתאי העור שנוצרה כתוצאה מחשיפה ממושכת לשמש וגרמה לסרטן עור.
2. מוטציה בתאי הריאות שנוצרה כתוצאה מעישון סיגריות וגרמה לסרטן ריאות.
3. מוטציה בתאי המין שנוצרה כתוצאה מחשיפה מוגברת לקרינה רדיואקטיבית.

בכל הדוגמאות הללו התרחש שינוי בחומר הגנטי של האנשים. למרות זאת, שתי המוטציות הראשונות לא תעבורנה בתורשה, שכן השינוי התרחש בתאי הגוף ולא בתאי המין (תאי הזרע ותאי ביצה). מוטציות עוברות בתורשה, רק אם הן מתרחשות **בתאי המין**.

מחלות תורשתיות התפתחו בעקבות מוטציה שאירעה בתאי המין של פרט מסוים. מוטציה כזאת עוברת לצאצאים ולצאצאי הצאצאים באופן שמשפחות שלמות לאורך הדורות נושאות אותה מוטציה. בקהילות שבהן נישואים מתרחשים רק בתוך הקהילה, יש מוטציות אופייניות לקהילה. כך, למשל, בקרב יהודים שמוצאם ממזרח אירופה, רווחות מוטציות מסוימות הגורמות למחלה התורשתית "טאי זקס". לעומת זאת, בקרב לא יהודים שחיו באותה סביבה ובקרב יהודים שמוצאם מקהילות אחרות בעולם מוטציות אלה נדירות יותר. בקרב שחורים בארצות הברית שכיחה יחסית המוטציה האחראית למחלה "אנמיה חרמשית".

- מחלת הפנילקטונוריה היא מחלה תורשתית. בקרב יהודים שמוצאם מתימן שכיחותה גבוהה יחסית, ואחראית לה בעיקר מוטציה מסוימת אחת. האם, לדעתכם, אירעה המוטציה אצל הורי הנבדקים בדור האחרון או לפני דורות רבים?

כאמור, גנים שחלה בהם מוטציה (ולכן השתנו), הם גנים לכל דבר ועשויים, לכן, להשפיע על תכונות היצור. מכיוון שמוטציות מתרחשות כל הזמן, הן מהוות מקור תמידי לשונות באוכלוסייה.

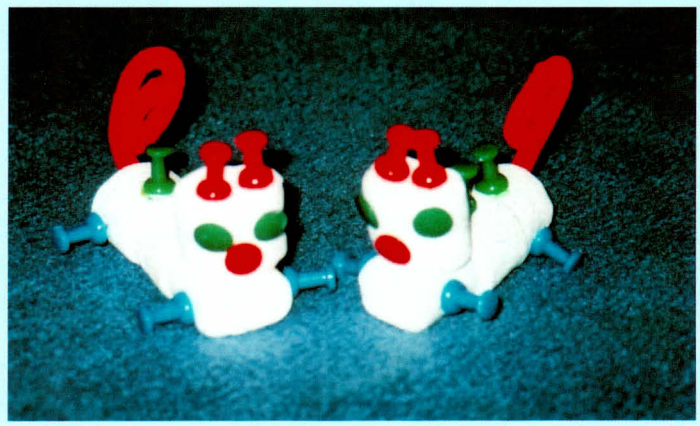
האם כל שונות נובעת ממוטציה?

רובינו דומים להורינו אך איננו זהים להם. גם בין אחים הנולדים לאותם הורים קיים דמיון רב אך אין זהות. מה מקורם של הבדלים אלה? האם אפשר להסבירם במוטציות רבות שהתרחשו בדור אחד?

בתרגיל הבא נייצר, בעזרת ממתקים וחפצים אחרים, משפחה של יצורים – זוג הורים וצאצאיהם - ונעקוב אחר התפתחות השונות במשפחה.

מדוע לכל האחים שלי עינים חומות ולי כחולות?

המורה יציג בפניכם זוג הורים ריבופים. גופם וראשם עשוי מחתיכות מרשמלו, שני מחושיהם – ממסמרים אדומים, שתי עיניהם עשויות מסיכות ירוקות, אף מנעץ אדום, שתי דבשות מסוכריות צבעוניות, רגליים ממסמרים כחולים, וזנב מסולסל שעשוי ממנקה מקטרות.

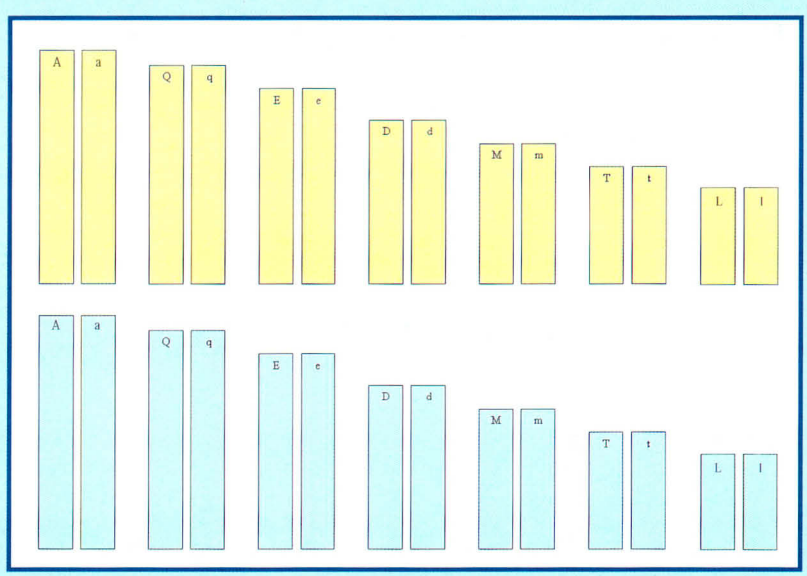


זוג ריבופים

לכל היצורים החיים יש כרומוזומים שהם רצפים ארוכים של DNA. כל כרומוזום מכיל גנים רבים הקובעים את תכונות היצור. אצל בעלי חיים המתרבים ברבייה זוויגית מופיעים הכרומוזומים בזוגות – אחד הכרומוזומים בכל זוג מקורו באב, והאחר – באם. כל תכונה נקבעת, אם כן, על ידי זוג של גנים, אחד שמקורו באם ואחד באב.

לריבופים יש 7 זוגות כרומוזומים.

כל שני תלמידים יקבלו במעטפות נפרדות שתי סדרות של רצועות נייר המייצגות את הכרומוזומים של ההורים שהמורה הציג בפניכם – סדרה אחת (הלבנה) תייצג את כרומוזומי האם והשנייה (הכחולה) את כרומוזומי האב. על כל רצועה מופיעה אות המייצגת גן שאחראי לתכונה מסוימת (זכרו שבמציאות כל כרומוזום מורכב מגנים רבים ולא רק מאחד). שימו לב: כל זוגות התלמידים בכיתה יקבלו אותם כרומוזומים בדיוק!



הכרומוזומים של בני הזוג

1. **סידור הכרומוזומים:** מיינו את הכרומוזומים לזוגות על פי אורכם, כל צבע בנפרד. רצועות באותו האורך מייצגות כרומוזומים מאותו הסוג. כך תקבלו 7 זוגות לבנים (של האם) ו–7 זוגות כחולים (של האב). הפכו אותם באופן שהאותיות שעליהן יפנו כלפי מטה.

2. **יצירת תאי מין:** בשלב זה נדמה את התהליך שבו נוצרים תאי המין אצל כל הורה, שבסופו כל תא מין מכיל כרומוזום אחד מכל סוג.
מכל זוג כרומוזומים בחרו באופן אקראי כרומוזום אחד. תלמיד אחד יבחר כרומוזומים מהזוגות הלבנים (מהאם) ותלמיד אחר – מהכחולים (מהאב). החזירו את רצועות הנייר שנותרו למעטפות.

3. **הפריה:** בשלב זה נדמה את ההפריה, שכתוצאה ממנה נוצר צירוף של הכרומוזומים שנתרמו מהאם עם הכרומוזומים שנתרמו מהאב. צירוף זה מהווה את מכלול הכרומוזומים של הצאצא ולכן גם את מכלול הגנים שלו.
הניחו את כל הכרומוזומים שבחרתם על השולחן. עליכם לקבל 7 זוגות, כל אחד מורכב מכרומוזום לבן ומכרומוזום כחול.

4. **יצירת הצאצא:** הפכו את הכרומוזומים באופן שייראו הגנים שעליהם (האותיות שעל רצועות הנייר). בנו בעזרת החומרים שברשותכם צאצא ריבופ על פי האותיות והמפתח הבא:

הקוד הגנטי של הריבופים:

AA – מחוש אדום אחד.
Aa – 2 מחושים אדומים.
aa – ללא מחושים.

MM – דבשת ירוקה אחת.
Mm – 2 דבשות ירוקות.
mm – 3 דבשות ירוקות.

QQ – אף כתום.
Qq – אף אדום.
qq – אף צהוב.

TT או Tt – זנב מסולסל.
tt – זנב ישר.

EE או Ee – 2 עיניים ירוקות.
ee – 3 עיניים ירוקות.

LL או Ll – רגלים כחולות.
ll – רגלים אדומות.

dd – 2 מפרקי גוף.
DD או Dd – 3 מפרקי גוף.

מפתח לבניית צאצאי הריבופים

5. **הצגת הצאצאים:** הניחו את הריבופים הצאצאים ש"נולדו" לכם על שולחן המורה. התבוננו בריבופים ה"אחים" (שנוצרו על ידי זוגות אחרים בכיתה).

דיון בתוצאות

1. במה דומים הריבופים זה לזה? ממה נובע הדמיון ביניהם?
2. ממה נובע השוני בין הריבופים?
3. האם תוכלו למצוא שני צאצאים זהים לחלוטין?
4. האם תוכלו למצוא צאצא הזהה לחלוטין לאחד ההורים?
5. מלאו את הטבלה הבאה המסכמת את האנלוגיה בין ההדמיה לרבייה הזוויגית.

הדמיית הריבופים	רבייה זוויגית
רצועות הנייר	
האותיות על רצועות הנייר	
	יצירת תאי המין בכל הורה, שכל אחד מהם מורכב מצירוף אקראי של כרומוזומים
	תאי מין
צירוף שתי הסדרות של רצועות הנייר	
בניית הריבופ על פי המפתח	

6. מה הקשר בין מגוון הריבופים שקיבלתם לבין העובדה שהרבייה הייתה זוויגית?
7. לו הייתה ההדמיה מתבצעת גם בכיתה המקבילה והייתם מתבוננים בכל הריבופים הצאצאים, האם אז הייתם יכולים למצוא שני צאצאים זהים לחלוטין זה לזה? האם הייתם יכולים למצוא צאצא הזהה לחלוטין לאחד ההורים? נסו להסביר את תשובתכם.
8. במציאות יש, כמובן, לכל יצור הרבה יותר משבע תכונות. מה תוכלו לומר על הסיכוי לקבל צאצאים הזהים בדיוק להוריהם (או זה לזה) במציאות?
9. כמו בכל הדמיה, גם הדמיה זו אינה מדמה את המציאות באופן מושלם, וקיימים הבדלים בינה לבין המציאות. במה שונה הדמיה זו מהרבייה הזוויגית?

בהדמיה ראינו שצאצאים של הורים המתרבים ברבייה זוויגית דומים להוריהם אך אינם זהים להם. גם בין אחים יש דמיון אך לא זהות. ראינו שהבדלים אלה נובעים מהמספר העצום של צירופים אפשריים של גנים. בכל צאצא בא לידי ביטוי צירוף אחר שקובע את מכלול תכונותיו הייחודי ובזאת קובע את כשירותו.

צירופי תכונות הן מקור תמידי לשונות באוכלוסייה המתרבה ברבייה זוויגית. כפי שראינו בתחילת הפרק, גם מוטציות הן מקור תמידי לשונות. אבל בעוד שהמוטציות הן נדירות יחסית, צירופים חדשים של גנים (הנוצרים רק ברבייה זוויגית) מתרחשים תמיד. הברירה הטבעית פועלת על שונות זו, ללא קשר לדרך שבה נוצרה, ובוררת את המתאימים ביותר.

מי צריך מין?

צמחים רבים יכולים להתרבות הן ברבייה זוויגית והן ברבייה אל-זוויגית. תפוח האדמה הוא צמח כזה. כאשר הוא מתרבה ברבייה זוויגית, מאביקים גרגרי האבקה הזכריים את השחלה הנקבית, וכתוצאה מכך נוצרים זרעים, שמכל אחד מתפתח צאצא בעל צירוף תכונות ייחודי.
בדרך הרבייה האל-זוויגית נשלחות מתפוח האדמה (מה"עיניים") שלוחות, המתפתחות לצמחים בוגרים. אם לא חלו מוטציות, צמחים אלה יהיו זהים לחלוטין לתפוח האדמה ההורה.

- היכן תצפו שתהיה שונות גדולה יותר – בין הפרטים באוכלוסיית תפוחי אדמה שמתרבה ברבייה זוויגית או באוכלוסייה המתרבה ברבייה אל–זוויגית?

השונות נוצרת הן על ידי היווצרות של מוטציות אקראיות ב–DNA והן על ידי צירופים חדשים ואקראיים של גנים קיימים. אצל יצורים המתרבים ברבייה זוויגית מתקיימים שני המנגנונים, ולכן השונות ביניהם היא גדולה, יחסית. בקרב יצורים המתרבים ברבייה אל–זוויגית השונות מקורה במוטציות בלבד, ולכן היא קטנה יותר.

- חבורה של פרדסנים מחדרה נסעה לקליפורניה והתרשמה מזן מסוים של עצי תפוז שמניב פירות טעימים. התלהבותם הייתה כה גדולה, עד שהם החליטו להחליף את כל העצים בפרדסים שלהם הכוללים מספר זנים, שחלקם מניבים הרבה פירות וחלקם מעט, בעצים מהזן הקליפורני. מה דעתכם, האם החלטתם נבונה? השתמשו בתשובתכם ברעיון הברירה הטבעית.
- למי יש סיכוי טוב יותר לשרוד, אם ישתנו תנאי הסביבה – לאוכלוסייה המתרבה ברבייה זוויגית או לאוכלוסייה המתרבה ברבייה אל–זוויגית?

מבחינת האוכלוסייה, הן זו המתרבה ברבייה זוויגית והן זו המתרבה ברבייה אל–זוויגית, יש לשונות תפקיד מרכזי. לולא היו באפריקה פילים ללא חטים בצד הפילים נושאי החטים, ולולא היו קיימים באוכלוסיית החיידקים גם פרטים עמידים לאנטיביוטיקה, לא היו אוכלוסיות אלה ממשיכות להתקיים בתנאי הסביבה, שבהם מופיע גורם ברירה המכחיד את רוב הפרטים האחרים (הציידים במקרה של הפילים והאנטיביוטיקה במקרה של החיידקים). בגלל השונות אוכלוסיות יכולות להמשיך להתקיים, גם כשתנאי הסביבה משתנים.

כעת, ניתן לתת תשובה מלאה לשאלה: **כיצד השתנה אורך הצוואר של הג'ירפות לאורך הדורות?**
באופן כללי, אוכלוסיות משתנות לאורך דורות, כלומר עוברות אבולוציה בעזרת שילוב שני תהליכים בלתי תלויים אחד בשני:
האחד אקראי לחלוטין – זהו תהליך יצירת השונות (על ידי מוטציות ורביה זוויגית). השני אינו אקראי – זהו תהליך הברירה הטבעית שבתנאי סביבה מסוימים יש לו כיוון.
כיצד, אם כן, התארך צוואר הג'ירפות?
התהליך האקראי של יצירת השונות, הוא זה שהביא לכך שהייתה קיימת שונות באורך הצוואר של הפרטים באוכלוסיית הג'ירפות הקדומות. בתהליך הברירה הטבעית, נבררו הפרטים בעלי הצוואר הארוך יותר שהיו מותאמים טוב יותר לסביבה. מדי פעם, במהלך הדורות, התרחשו (ועדיין מתרחשות) מוטציות אקראיות. חלק קטן מהן הביא לשיפור הכשירות על ידי הארכת הצוואר ובכל פעם שהתרחשו מוטציות כאלו, הן נבררו. במהלך הדורות אם כן, עלתה שכיחותם של הפרטים בעלי הצוואר הארוך יותר ואורכם הממוצע של הצוואר עלה.

שאלות לסיכום

1 קיימים חיידקים מפרקי ניילון כדוגמת הפלבובקטריום (Flavobacterium). ניילון הוא המצאה חדשה יחסית (לפני שנת 1937 לא הייתה בעולם פסולת של ניילון), אולם מדענים סבורים כי הגן לפירוק ניילון נוצר הרבה לפני המצאת הניילון. לחיידקים לא הייתה יכולת לדעת שבעתיד יומצא החומר הקרוי ניילון שיוכל להוות מקור מזון עבורם. באיזה רעיון שלמדנו בפרק זה תומכת הדוגמה הזו?

2 שודד ים אחד החליט שמוטב שכל צאצאיו ייוולדו עם חורים בתנוכי אוזניהם במקום שייאלץ לנקב בכל פעם מחדש את אוזניו של כל ילד. נניח ששודד הים היה יכול לבצע ב-DNA שלו את השינויים הגנטיים הדרושים ליצירת חורים בתנוכי האזניים, באילו תאים כדאי היה לו לעשות את השינויים?

א. בתאי תנוך האוזן.
ב. בתאי המוח.
ג. בתאי המין (תאי זרע וביציות).

3 אילו היינו חוזרים לאוכלוסיית הג'ירפות הקדומה, האם הייתה מתפתחת שוב תכונת הצוואר הארוך?

4 בחלזונות, צבע הקונכיה הוא תכונה תורשתית. לפניכם תיאור של שתי אוכלוסיות של חלזונות הנמנות על אותו המין:

אוכלוסייה 1 – חלזונות עם קונכיה בצבע לבן.
בית הגידול: אזור חולות הים, החשוף מצמחיה.

אוכלוסייה 2 – חלזונות עם קונכיה מפוספסת.
בית הגידול: אזור עם צמחיה.

קונכיה לבנה מצמצמת את מידת ההתחממות מהשמש, לכן לחלזונות בעלי קונכיה לבנה יש יתרון בסביבה החשופה, וקונכיה מפוספסת מוסווית טוב בין השיחים מפני טורפים, לכן לחלזונות עם קונכיה מפוספסת יש יתרון בסביבה עם צמחיה.
חוקר אחד העביר כמה חלזונות עם קונכיה לבנה לאזור עם צמחיה. הוא בדק ומצא כי דור אחר דור, הצאצאים היו בעלי קונכיה לבנה, ורובם נטרפו על-ידי מכרסמים.
לאחר שעברו מספר דורות, מצא החוקר בנוסף לחלזונות בעלי קונכיה לבנה, גם חלזון אחד בעל קונכיה מנוקדת.
הוא הניח שהסיבה להופעת חלזון בעל קונכיה מנוקדת, היא מוטציה.

- האם יש קשר בין הופעת החלזון בעל הקונכיה המנוקדת לבין המעבר לסביבה בעלת הצמחיה? הסבירו את תשובתכם.
- האם החלזון בעל הקונכיה המנוקדת היה מופיע אילו החוקר היה משאיר את אוכלוסיית החלזונות עם הקונכיה הלבנה בסביבה החשופה מצמחיה? הסבירו את תשובתכם.

5 לפניכם שני תרחישים שכל אחד מהם כולל רצף של שלוש תמונות המתארות אוכלוסיית ארנבים בדורות שונים. שבעת הארנבים בכל תמונה מייצגים את האוכלוסייה כולה באותו הדור.
באזור בו חיה אוכלוסיית זו, ארנב בעל פרווה בהירה מוסווה טוב יותר מארנב בעל פרווה כהה, ולכן יש לו יתרון בהישרדות מפני טריפה על-ידי עופות דורסים.

תרחיש מס׳ 1: קרתה מוטציה לצבע פרווה לבן **לפני** הופעת העוף הדורס.

תרחיש מס׳ 2: קרתה מוטציה לצבע פרווה לבן **אחרי** הופעת העוף הדורס.

הקיפו בעיגול את האפשרות הנכונה:

א. קיימת סבירות גבוהה יותר שיקרה תרחיש מס׳ 1.
ב. קיימת סבירות גבוהה יותר שיקרה תרחיש מס׳ 2.
ג. לשני התרחישים קיים סיכוי שווה לקרות.
ד. לא ניתן לקבוע.

הסבירו את תשובתכם.

סיכום

בפרק זה למדנו שתכונות תורשתיות חדשות נוצרות באמצעות שני מנגנונים: האחד, הקיים בכל היצורים החיים, כרוך בשינויים **אקראיים** ברצף ה–DNA (מוטציות). למרות שהמוטציות הן אקראיות, רובן מורידות את הכשירות, אך יש כאלה שאינן משפיעות על הכשירות ואחרות שאף מעלות אותה. מוטציות הן **ספונטניות** ואינן מתרחשות כתגובה לתנאי הסביבה. הן עוברות בתורשה, רק אם הן מתרחשות בתאי המין.
המנגנון השני ליצירת שונות באוכלוסייה מתקיים רק אצל יצורים המתרבים ברבייה זוויגית, והוא מתבטא בצירופים **אקראיים** של גנים קיימים.

שני מנגנונים אלה הם מקור תמידי לשונות באוכלוסיות. אבל בעוד שהמוטציות הן נדירות, יחסית, צירופים חדשים של גנים מתרחשים תמיד. הברירה הטבעית פועלת על השונות ללא קשר לדרך בה היא נוצרה ובוררת את המתאימים ביותר. השונות מעלה את הסיכוי, שאם ישתנו תנאי הסביבה יהיו פרטים שיתאימו לסביבה החדשה ויעמידו צאצאים.

אוכלוסיות משתנות לאורך דורות על ידי שילוב שני תהליכים בלתי תלויים אחד בשני. האחד הוא תהליך יצירת השונות והוא תהליך אקראי והשני הוא תהליך הברירה הטבעית והוא אינו אקראי.

מפת למידה:

פרק ב
בכל אוכלוסייה קיימת שונות.

פרק א
תכונות מסוימות עוברות בתורשה ואחרות אינן עוברות בתורשה. תכונות אלו באות לידי ביטוי ברמה מולקולרית וברמה של היצור השלם.

פרק ב
בתנאי סביבה מסוימים יש תכונות שמקנות יתרון ליצור בהישרדות וברבייה. כשהסביבה משתנה, הכשירות של הפרטים יכולה להשתנות.

פרק ג
תהליך **הברירה הטבעית** מספק את המנגנון לאבולוציה: בכל אוכלוסייה קיימת שונות. תכונות תורשתיות המקנות לפרטים מסוימים יתרון על פני אחרים בהישרדות וברבייה, יעברו לצאצאיהם ויקנו גם להם יתרון דומה. לכן, עם הזמן תעלה שכיחותם היחסית של הפרטים בעלי התכונות המקנות יתרון.

פרק ב
מספר הצאצאים השורדים קטן בהרבה ממספר הנולדים.

פרק ד
כשהסביבה משתנה, הכשירות של הפרטים יכולה להשתנות.
אוכלוסיות בטבע נתונות ללחצי ברירה שונים הפועלים עליהן בו-זמנית, לפעמים בכיוונים מנוגדים. תהליך הברירה הטבעית מתרחש ללא מטרה מוגדרת מראש וללא יד מכוונת.

פרק ה
תכונות תורשתיות חדשות נוצרות כל הזמן כתוצאה ממוטציות של גנים בתאי הרבייה או כתוצאה של צירופים חדשים של גנים קיימים (ברבייה זוויגית). מוטציות מתרחשות בדרך כלל בתדירות נמוכה, ורק אם הן קורות בתאי המין, הן עוברות בתורשה.
תכונות תורשתיות חדשות הן אקראיות: יש כאלה המביאות ליכולות חדשות ואף משופרות, יש הגורמות להפחתה ביכולות ואחרות אינן מעלות ואינן מורידות.

מונחים שנלמדו בפרק:

מוטציה
מוטגנים
רבייה זוויגית
רבייה אל-זוויגית

פרק ו' האם שינויים יכולים להצטבר?

"ההנחה, שהברירה הטבעית יצרה את העין על כל מורכבותה ... נראית, אני חייב להודות, מגוחכת ביותר".
צ'ארלס דארווין בספרו "מוצא המינים".

בפרק הקודם נוכחנו שבכל אוכלוסייה של יצורים, גם באוכלוסיות של יצורים זהים לכאורה, נוצרת כל הזמן שונות כתוצאה ממוטציות ומצירופים שונים של גנים המתקבלים ברבייה הזוויגית. אך האם מוטציות אקראיות וצירופי גנים יכולים להיות אחראים לתכונות מרשימות ומורכבות כמו חדק הפיל או צוואר הג'ירפה? נסתכל, למשל, על העין. זהו איבר מורכב ביותר הכולל מנגנון אופטי ומנגנון עצבי, ששילובם יחד מקנה לנו יכולות מופלאות: קליטת מידע, העברתו למוח, אמדן מרחקים, פענוח תמונות וזיהוי דמויות. ברור שתפקודם והתפתחותם של מנגנונים אלה תלויים במעורבותם של הרבה מאוד גנים. כיצד, אם כן, התפתחה העין – האם בבת אחת, על כל מורכבותה, או אולי בהדרגה, בצעדים קטנים ומדודים שהצטברו לבסוף לשינוי גדול? האם אפשר בכלל שתכונות מורכבות יהיו תוצאת הצטברות של מוטציות בודדות או צירופי גנים אקראיים?

כדי לענות על השאלה בצעו את פעילות ההדמיה שלפניכם:

האבולוציה של "שטוחדגים"

בפעילות הבאה נדַמה שושלת של יצור דמיוני הקרוי "שטוחדג" המתרבה בצורה אל-זוויגית.

- כיצד, לדעתכם, ייראו צאצאיו של יצור המתרבה בצורה אל-זוויגית לאחר מספר דורות – זהים למקור מבחינת ה-DNA, שונים מהמקור ואולי אי-אפשר לדעת?

מהלך הפעילות:
כל תלמיד היושב בשורה הראשונה שבכל טור יקבל דף ועליו ציור של דג. זהו השטוחדג. המורה ימדוד 15 שניות, שבהן יעתיק כל תלמיד על הדף החלק שברשותו את הדג (תוך הסתמכות על הראייה, לא על ידי הנחת הדף החלק על הדף המצויר). בתום 15 השניות יעביר כל תלמיד את הדף שעליו צייר לתלמיד היושב מאחוריו. בהמשך יימדדו 15 שניות נוספות וכך הלאה, עד שהתלמיד האחרון בטור יעתיק את השטוחדג. כל תלמיד יעביר הלאה רק את הדף שצייר וישאיר ברשותו את הדף שקיבל.

1. השוו בין הציורים שהתקבלו בטור שלכם. מה אתם רואים?
2. מה מייצגת ההדמיה במציאות? מלאו את הטבלה שלפניכם:

ההדמיה	המציאות
הדף המקורי	
העותקים השונים	
ההעברה של הדף	
השינויים החלים בציור	

3. האם הצאצאים האחרונים שהתקבלו שונים מההורה הראשוני? במה?
4. האם יש הבדל במידת הדמיון בין צאצאים מדורות שונים (עותק שצויר בהעברה הראשונה, עותק שצויר בהעברה השנייה וכו׳) לבין הדג המקורי? הציעו הסבר לתופעה.
5. מה היה קורה, לדעתכם, לו הטור שלכם היה ארוך פי שניים ממה שהוא באמת? ופי ארבעה?
6. נסחו מסקנה כללית המקשרת בין מספר הדורות שעוברים לבין מספר השינויים שיכולים להצטבר בצאצאי השטוחדגים ביחס לדג המקורי. בססו את מסקנתכם על ההדמיה.
7. מצאו שינוי (מוטציה) שהופיע באחד הצאצאים הראשונים. האם שינוי זה הועבר תמיד גם לצאצאים המאוחרים יותר? מה אפשר ללמוד מכך? האם כל שינוי בהכרח "מצטבר" ומועבר לדור הבא?
8. נניח שהיינו מבצעים את התהליך לאורך הרבה יותר דורות (נאמר, אלף). האם אפשרי, לדעתכם, שיצטברו כל כך הרבה שינויים, עד שלא יהיה כמעט שום דמיון בין הצאצא האחרון בשושלת השטוחדגים לצאצא המקור? נמקו .
9. מהם קווי הדמיון והשוני בין ההדמיה של השטוחדגים לבין התהליך האמיתי המתרחש בטבע מבחינת דרך הרבייה, תדירות השינויים, סוג השינויים, הצטברות השינויים, כיווניות השינויים והדמיון בין היצורים השייכים לאותה שושלת.
10. הסבירו, לפי עקרונות הברירה הטבעית, מה פירוש האמירה שהשינויים מצטברים? תארו מה קורה באוכלוסייה לגבי שינוי אחד ואחר כך לגבי השינויים הבאים.
11. בהדמיה עקבנו אחר שינויים חיצוניים של השטוחדגים. האם תהליך דומה יכול להתרחש גם לגבי שינויים אחרים ביצורים חיים – במבנה של איבריהם הפנימיים, בהתנהגות, בתהליכים ביוכימיים? הסבירו.

הצטברות של שינויים בתהליכי הברירה הטבעית יכולה להביא ל"השתכללות" של יצורים חיים ולהתאמות מופלאות בין יצורים לסביבתם. נבחן כמה דוגמאות של התאמות כאלה.

חיידקים בכל מקום

חיידקים מספקים דוגמאות רבות להתאמות ייחודיות של יצורים חיים לתנאי הסביבה. סוגים מסוימים לא רק שורדים בתנאים הקיצוניים, אלא אף משגשגים ומצליחים באותם תנאים ורק בהם. למשל:

- ✔ אפשר למצוא חיידקים אפילו בים המלח, המכונה ים המוות בגלל מליחותו הגבוהה שאינה מאפשרת לרוב היצורים לשרוד בו.
- ✔ חיידקים חיים בגופנו גם בקיבה שמכילה חומצות חזקות במיוחד (דרגת ה–pH שבה היא 1.5–2).
- ✔ חיידקים קיימים גם במקומות ששוררות בהם טמפרטורות קיצוניות כמו משטחי הקרח הארקטיים ומעיינות מים חמים (שבהם המים רותחים!).

- ים המלח נוצר בהדרגה על ידי אידוי מתמשך של מים. כיוון שהמים מתאדים והמלח שוקע עולה המליחות עם הזמן. דמיינו מין מסוים של חיידקים שחי כיום בים המלח.
נסו לתאר את התהליך האבולוציוני שעברה אוכלוסיית החיידקים בים המלח.

פרפר או עלה?

התבוננו בתמונות הפרפרים שלפניכם:

פרפר העלה המת – הדמיון לעלים הוא כמעט מושלם

פרטים אלה דומים מאוד לעלים מתים בשל צורת הכנפיים שלהם, הדוגמאות המופיעות בצידן התחתון וצבעיהם. לא מפתיע, אם כן, שהם מכונים פרפרי העלה המת (dead leaf butterflies). כל פרפרי העלה המת מאופיינים בדמיון רב לעלים, ומבחינה זו השונות ביניהם קטנה. פרפרים אלה חיים בדרך כלל באזורים מיוערים וגשומים, ולעתים רחוקות ביותר הם נראים באזורים פתוחים.

1. במה מתבטאת ההתאמה של פרפרי העלה המת לסביבתם?
2. כיצד, לדעתכם, התפתחה ההסוואה של פרפרי העלה המת? נסו לפרט את שלבי התהליך.
3. נסו להסביר: מדוע כיום השונות בקרב הפרטים האלה לגבי יכולת ההסוואה קטנה?
4. הביאו עוד דוגמאות לתכונה מורכבת (או לאיברים מורכבים) ביצורים חיים. נסו לשחזר את התהליכים האבולוציוניים שהובילו להתפתחותה.

לכל סיר יש מכסה

ההתאמות בין פרחים לבין החרקים המאביקים אותם הן דוגמה מרתקת לקשרי הדדיות, שהתפתחו בהדרגה במהלך האבולוציה. בקשרים אלה הפרח מספק לחרק המבקר בו מזון (צוף המכיל סוכרים וגרגרי אבקה עשירים בחלבונים), ואילו החרק מצדו מספק לפרח שירותי האבקה: בזמן שהוא פוקד את הפרח ואוסף את המזון, נצמדים אליו גרגרי האבקה של הפרח, והוא מעביר אותם (ללא ידיעתו, כמובן) אל פתח השחלה של הפרח הבא שבו הוא מבקר.

כך מצוידים פרחים שונים בצבעים המושכים את עיניהם של החרקים ולעתים ב"שבילי צוף" המכוונים את החרקים כמו סימני דרך אל הצוף.

שבילי הצוף של הפשתה "מכוונים" את החרק לצוף.

פרחים רבים ניחנו בריח חזק, המושך אליו את החרקים. לפעמים הריח מתוק ונעים גם לאפנו, ולפעמים הוא דווקא מסריח כמו ריחו של הלוף המנומר, המזכיר ריח של צואת בעלי חיים. הריח המצחין מושך אליו זבובים וחיפושיות זבל, שהם המאביקים העיקריים של הלוף המנומר.

ללוף המנומר יש ריח מצחין, והוא מושך אליו זבובי תסיסה.

במקרים רבים קיימת התאמה מופלאה בין מבנה הפרחים לבין מבנה החרקים הבאים להאביק אותם. כך, למשל, חיפושיות הן מעופפות מסורבלות למדי, ומבנה הפרחים שהן מאביקות – כלניות, נוריות ופרגים – מותאם היטב למגבלה זו. פרחים אלה הם בעלי מבנה של קערה עמוקה שבמרכזה, כמו סימון של מטרה, יש עיגול שחור. אין צורך בכושר תעופה מופלא כדי להגיע אל המטרה. ברגע שהחיפושית נוחתת על הפרח, היא מתגלגלת אל תחתית הקערה, הישר אל גרגרי האבקה המשמשים לה למזון.

דוגמה נוספת היא מבנה "הפה" (איבר האכילה) של הפרפרים. זהו צינור ארוך הנפרש למלוא אורכו בשעת האכילה ומשמש להם כקשית. בהתאמה לכך, בפרחים המואבקים על ידי פרפרים, נאגר הצוף עמוק בתוך הפרח הנראה ככלי קיבול צר וארוך. במקרים רבים יש התאמה מרשימה בין אורך "הקשית" של הפרפר לבין עומק הפרח שבו חבוי הצוף.

1. במה שונה הדוגמה המתארת את ההתאמות במבנה בין פרחים למאביקיהם מהדוגמאות הקודמות (החיידקים ופרפר העלה המת)?
2. בתהליך שמביא להתאמה בין "קשית" הפרפר לבין עומק הפרח המואבק על ידו, על מי פועלת הברירה הטבעית קודם – על הפרפרים או על הפרחים?
3. התבוננו שוב בדוגמאות של התאמות בין פרחים למאביקיהם. רשמו בטבלה: אילו תכונות נבררו בכל אחת מהאוכלוסיות? האם יש לתכונה מסוימת באחת האוכלוסיות יתרון ללא התכונה המתאימה לה באוכלוסייה האחרת? הסבירו.

פרחים	מאביקים
צבע עז	היכולת לראות את הצבע

4. נסו לשחזר, בעזרת מנגנון הברירה הטבעית, כיצד עשויה היתה להתפתח ההתאמה בין אוכלוסיית הפרחים הצרים והעמוקים לבין אוכלוסיית הפרפרים המאביקים אותם.

לשינויים המתרחשים במקביל בשתי אוכלוסיות (או יותר) של יצורים שונים, כאשר שינויים בתכונותיהם של יצורים באוכלוסייה אחת משפיעים על האבולוציה של היצורים באוכלוסייה האחרת, קוראים **קו-אבולוציה.** כל אוכלוסייה מהווה חלק מהסביבה של האוכלוסייה האחרת ולכן הן מפעילות לחצי ברירה זו על זו.

5. איזו בעיה יכולה להיווצר כתוצאה מהתאמה שנוצרת בתהליך של קו-אבולוציה בין מבנה הפרח למבנה החרק המאביק אותו?
6. הביאו דוגמאות נוספות לאוכלוסיות שעברו קו-אבולוציה. נסו לשחזר את התהליכים האבולוציוניים שהן עברו.

בהתאם לנסיבות

כשלמדנו את מנגנון הברירה הטבעית, הדגשנו, שהאוכלוסיות הן שמשתנות (על ידי עלייה הדרגתית בשכיחות המותאמים) ולא הפרטים עצמם. אם נחזור לדוגמת הג'ירפות, ג'ירפות בעלות צוואר קצר לא האריכו אותו במכוון והפכו לג'ירפות בעלות צוואר ארוך, אלא שכיחות הפרטים בעלי הצוואר הארוך עלתה באוכלוסייה. לעומת זאת, יש מקרים שבהם תכונותיו של אותו פרט עצמו משתנות כאשר תנאי הסביבה משתנים. כזה הוא, למשל, השועל הארקטי, שחי באזור בו השלג נמס בקיץ. בחורף יש לו פרווה לבנה ואילו בקיץ צבעה הוא חום-אפור. האם הפרט עובר אבולוציה? לא! מדובר במופעים שונים של אותו הפרט, המתבטאים בתנאי סביבה שונים.

שועל ארקטי (Alopex lagopus) בחורף ובקיץ

1. איזה יתרון מקנה היכולת להיות בעל פרווה בצבע שונה בכל עונה לשועל הארקטי?
2. האם דוגמת השועל סותרת את מנגנון הברירה הטבעית?

התהליך של התארכות צוואר הג'ירפה מכונה **התאמה אבולוציונית**. לעומת זאת, שינוי צבע הפרווה אצל השועל הארקטי מכונה **התאמה פיזיולוגית**. ההתאמה האבולוציונית בעניין פרוותו של השועל היא התפתחותה של פרווה שאינה 'לבנה' ואינה 'חומה' אלא 'פרווה שיש לה יכולת להשתנות באופן עונתי צפוי בהתאם לתנאי הסביבה'. במילים אחרות: ההתאמה האבולוציונית של הפרווה היא התפתחותה של היכולת לעבור התאמה פיזיולוגית.

כבר בפרק הראשון ראינו, שתכונות תורשתיות רבות מושפעות גם מתנאי הסביבה. במקרים כאלה, לפרטים בעלי מטען גנטי זהה שחיים בסביבות שונות יכולים להיות מופעים שונים. גם לאותו פרט עצמו יכולים להיות מופעים שונים כאשר תנאי הסביבה משתנים.

התאמה פיזיולוגית מכונה לעיתים בספרי לימוד בביולוגיה בשם "הסתגלות".

3. נסו לעמוד על ההבדלים בין שני סוגי ההתאמות. היעזרו בטבלה שלפניכם:

	התאמה אבולוציונית	**התאמה פיזיולוגית/התנהגותית (הסתגלות)**
מי עובר את ההתאמה – אוכלוסיות או פרטים		
מה משתנה בתהליך?	הרכב האוכלוסייה – השכיחות היחסית של הפרטים הכשירים יותר עולה	
באילו טווחי זמן מדובר?		
האם ה–DNA משתנה?		

4. האם אפשר להסביר את יכולתו של השועל הארקטי להגיב לתנאי הסביבה על ידי תהליך הברירה הטבעית? נסו לשחזר את שלבי התהליך.

5. הביאו דוגמאות נוספות להתאמות פיזיולוגיות/התנהגותיות. שערו, כיצד הן התפתחו בדרך הברירה הטבעית?

6. זמן מה לאחר שרפה בהרי יהודה, נצפו בשטח חגבים רבים בעלי צבע כהה בהשוואה לצבע הרגיל, הבהיר, של רוב החגבים מאותו מין באזור. זוג חוקרות ניסו להסביר את הופעת החגבים הכהים. חוקרת אחת טענה, כי מדובר בתוצאה של ברירה טבעית: לפני השרפה היו קיימים באוכלוסייה פרטים כהים ובהירים. לאחר השרפה היו הפרטים הכהים מוסווים יותר על רקע הסלעים המפויחים, ולכן נבררו. חברתה, לעומתה, טענה שלחגבים (כפרטים) יש יכולת לשנות את צבעם לכהה, בהתאם לצבע הרקע שלהם. כיצד תוכלנה החוקרות לקבוע באיזו אפשרות מדובר?

אפשר, אם כן, לבחון את ההתאמה של יצורים לסביבתם בשתי רמות: ברמת האוכלוסייה מתרחשת התאמה אבולוציונית, שבמהלכה משתנה הרכב האוכלוסייה, ועולה שכיחותם של הפרטים בעלי התכונות המקנות להם יתרון. ברמת הפרט יכולה להתרחש התאמה פיזיולוגית (או התנהגותית), ובמהלכה מגיב הפרט לשינויים בסביבה באופן שמקנה לו יתרון. יכולת ההתאמה הפיזיולוגית נבררה על ידי הברירה הטבעית במהלך הדורות. שני סוגי ההתאמה אינם תלויים ב"רצון" של הפרט או האוכלוסייה.

כיצד יכולים שינויים קטנים ליצור שינוי גדול?

בידינו חמש קוביות. מה הסיכוי שאם נטיל את כולן יחד, נקבל רצף של מספרים מ-1 עד 5?

מובן שהסיכוי קטן מאוד...
אך מה יקרה, אם נוכל להטיל את הקוביות כמה פעמים, ובכל פעם שאחת הקוביות תיפול על אחד ממספרי הרצף, נְקַבֵּע אותה (לא נזיז אותה יותר), ונטיל רק את הקוביות הנותרות? במקרה כזה, הסיכוי שלנו לקבל את התוצאה המבוקשת יגדל בהרבה, והזמן שיארך עד שנגיע לתוצאה המבוקשת יתקצר. (אם אתם מכירים את המשחקים "יאנג" או "יאצי", תוכלו לזהות שזה בדיוק מה שקורה בו.)

קצת מספרים:
על כל קובייה מופיעות שש ספרות. כשזורקים קובייה, יש לכל אחת מהספרות סיכוי שווה להתקבל: 1/6. הסיכוי שהקובייה הראשונה תיפול, כשהפאה הממוספרת בספרה 1 כלפי מעלה, הוא 1/6 . (מתוך 6 הטלות של הקוביה צפוי, מבחינה סטטיסטית, שהטלה אחת תיתן את הספרה 1.) הסיכוי שהקובייה השנייה תיפול, כשהפאה הממוספרת בספרה 2 כלפי מעלה, גם הוא 1/6. הסיכוי לקבל גם את הספרה 1 בקובייה הראשונה וגם את הספרה 2 בקוביה השנייה הוא 1/6*1/6 שזה סיכוי של 1/36 (אם נטיל את הקוביות 36 פעמים, צפוי שבאחת ההטלות נקבל על הקובייה הראשונה את הספרה 1 ועל השנייה את הספרה 2).

אבל, כזכור, יש לנו חמש קוביות. כדי לחשב את הסיכוי לקבל את הרצף המבוקש בהטלה אחת, נצטרך להכפיל את הסיכויים של כל קובייה: 1/6*1/6*1/6*1/6*1/6. סיכוי זה שווה ל-$1/6^5$, שהוא 1/7776 (התוצאה המבוקשת אמורה להתקבל בהטלה אחת מתוך 7776 הטלות). זהו סיכוי קטן לכל הדעות.

אבל, אם בכל פעם שאחת הקוביות תיפול על המספר המבוקש, היא תקובע, ולא נוכל לשנותה יותר, הרי שהסיכוי שלנו להגיע לרצף המבוקש יגדל בהרבה, והזמן המשוער עד לקבלת רצף כזה יקטן. נדגים זאת:
נבצע את ההטלה הראשונה. כאמור, הסיכוי שהרצף המבוקש יתקבל הוא 1/7776.
נניח שנקבל תוצאה כזאת:

הקובייה השנייה נפלה על הספרה 2 – שינוי אחד כבר התרחש! נקבע את הקובייה ונטיל עכשיו רק את 4 הקוביות הנותרות. הסיכוי להגיע לתוצאה המבוקשת בהטלה הבאה הוא $1/6^4 = 1/1296$ (הטלה אחת מתוך 1296 זריקות). זהו עדיין סיכוי קטן אך הוא גדול בהרבה מהסיכוי שהיה לנו כשזרקנו את כל חמש הקוביות.
אם אחת הקוביות שהטלנו תיפול על הספרה המתאימה לרצף, נוכל לזרוק בהמשך רק 3 קוביות. הסיכוי לקבל את שאר הספרות המרכיבות את הרצף יהיה אז: 1/216.
בהמשך, תיתן הטלה של שתי קוביות יחד את שאר מרכיבי הרצף החסרים בסיכוי של 1/36, והקובייה האחרונה תשלים את הרצף בסיכוי של 1/6 (אחת מתוך שש הטלות צפוייה לתת את המספר החסר).

ומה הקשר ל"מציאות"?
בדוגמה זו קבלת הרצף על כל הקוביות דומה להופעת מבנה מסודר, לא שגרתי, ייחודי ביצור החי. מבחינת הקוביות הופעת הרצף המסודר היא שינוי גדול מאוד יחסית לאי–הסדר ששרר בהן קודם. הטלה של כל חמש הקוביות יחד במטרה לקבל את הרצף דומה לציפייה ששינוי גדול יתרחש בבת אחת, בשלב אחד. לעומת זאת, סדרה של הטלות, שבהן מקובעת בכל פעם הקובייה שנופלת על המספר המבוקש ברצף, ובהמשך מקובעות קוביות נוספות שמראות את מספרי הרצף, דומה לשינוי גדול המתרחש על ידי הצטברות הדרגתית של שינויים.
בכל פעם שמופיע באוכלוסייה שינוי המגביר את כשירות הפרט, הוא מתקבע (שכיחותו באוכלוסייה עולה), והתכונה שהשינוי אחראי לה "מצטברת" והופכת לחלק מתכונות כלל הפרטים באוכלוסייה. שינויים נוספים יכולים להוביל, בהדרגה, לקבלת שינוי גדול.
חשוב להדגיש, שבדוגמת הקוביות השינוי הגדול הוא שינוי מתוכנן מראש – סדרת המספרים מ–1 עד 5. כפי שציינו פעמים רבות בספר, השינויים בטבע הם אקראיים, ואין להם מטרה ידועה מראש.

בספרו "השען העיוור" מתאר ריצ'ארד דוקינס מצב תיאורטי, בו נותנים לשימפנזה להקיש באופן אקראי על מקלדת המחשב. הסיכוי שיתקבל משפט מסוים (במקרה של דוקינס המשפט: "סבורתני שהוא דומה לשפן") בניסיון ראשון (ברירה בשלב יחיד) הוא נמוך ביותר: יש 28 אותיות אפשריות (כולל אותיות סופיות ומקש רווח) ולכן הסיכוי לקבל אות מסוימת הוא 1/28. מכיוון שבכל הקשה של אות הסיכוי הוא שוב 1/28 הרי שהסיכוי לכל המשפט, המונה 21 אותיות הוא $1/28^{21}$ ($1/28_{(1)} \times 1/28_{(2)} \times 1/28_{(3)} \times 1/28_{(4)} \ldots\ldots 1/28_{(21)}$). סיכוי כזה הוא קלוש ביותר: הוא בערך אחד מתוך ארבעים מיליון, מיליון, מיליון, מליון מיליונים (1:40,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000).
אך אם בכל הקשה האותיות ה"נכונות" יקובעו במקום ויהוו בסיס להקשה הבאה (יצטברו), הרי שעל פי חישוביו של דוקינס יצליח השימפנזה להגיע למשפט הנכון כעבור 72–47 ניסיונות.

נסתכל שוב על פרפר העלה המת. הדמיון בינו לבין העלים בסביבתו הוא כמעט מושלם.
באופן עקרוני, אפשר לחשוב שההתאמה המדהימה של הפרפר לעלים התרחשה בבת אחת, כתוצאה ממוטציה יחידה או מצירוף גנטי יחיד חדש, שהתרחשו אצל אחד מאבותיו של הפרפר. אולם סביר יותר להניח, שהדמיון המשוכלל הוא תוצאה של תהליך רב–שלבי. ההסוואה המורכבת של פרפרי העלה המת הלכה והשתכללה במהלך הדורות כתוצאה מתהליכי ברירה טבעית שפעלו הן על תכונות ותיקות והן על תכונות חדשות, שהופיעו מדי פעם באוכלוסייה.
סביר להניח שבעבר הרחוק היו פרטים שלא היו דומים במיוחד לעלים מתים. בשלב מסוים הופיע במקרה באוכלוסייה פרפר, שהיה דומה באופן כלשהו לעלה מת, ודמיון זה, גם אם היה דמיון פעוט, הקנה לו יתרון בהסוואה מטורפים על פני שאר הפרטים, שהיו דומים אף פחות לעלים. משום כך העמיד פרט זה יותר צאצאים (יחסית לפרטים אחרים) והוריש להם את הדמיון החלקי לעלה מת. דמיון ראשוני זה היה יכול להיות, למשל,

בצבע. אם הופיע באוכלוסייה פרפר שצבע כנפיו היה חום, כצבע העלה המת, הוא היה כשיר יותר וכך עלתה במהלך הדורות שכיחותם של הפרטים החומים. ייתכן שבשלב מאוחר יותר הופיע באוכלוסיית הפרפרים החומים, במקרה, פרפר שהיה בעל פס דק על כנפיו, שהיה דומה לעורק של עלה. מובן שלפרט זה היה יתרון על פני חבריו, ולכן במשך הדורות עלתה שכיחותה של תכונה זו באוכלוסייה. וכך, בכל פעם שהופיע באוכלוסייה פרט שהיה דומה אפילו במעט יותר לעלה מת, הוא היה כשיר יותר משאר הפרטים, ושכיחותן של תכונותיו – הוותיקות והחדשות גם יחד – עלתה באוכלוסייה. כך הצטברו השינויים במהלך הדורות, והפרפרים הפכו יותר ויותר דומים לעלה מת.

- לו היינו יכולים להזיז את הזמן לאחור, למשל, לזמן בו פרפר העלה המת נראה כמו פרפר רגיל או לזמן בו צוואר הג'ירפה היה קצר, ואז היינו נותנים לזמן לרוץ שוב קדימה עד ימינו, האם הייתה האבולוציה חוזרת על עצמה בדיוק? האם היינו מגיעים לאותם יצורים שאנו מכירים כיום? הניחו שתנאי הסביבה היו חוזרים על עצמם בדיוק רב.

כיצד יש למדוד תהליכים אבולוציוניים?

נסתכל, למשל על תקופה של שלושים שנה. במהלך תקופה זו מספר המוטציות המתקבלות באוכלוסייה של חיידקים, שמשך הדור שלהם הוא שעה, הוא עצום בהשוואה למספר המוטציות המתרחשות באוכלוסיית עכברים, שמשך הדור שלהם הוא חודשיים. מספר המוטציות והצירופים הגנטיים החדשים המתקבלים באוכלוסיית העכברים גדול לאין שיעור ממספר המוטציות והצירופים הגנטיים המתקבלים במשך אותו הזמן באוכלוסייה של אנשים, שמשך הדור שלהם הוא 30–25 שנה.

- כיצד, אם כן, יש למדוד תהליכים אבולוציוניים – בדורות או במספר מוחלט של שנים?

מה גילו של כדור הארץ?

אחת מהנחות היסוד של דארווין, שהסתמכה על מחקרים מתחום הגאולוגיה, הייתה שכדור הארץ נוצר לפני מיליוני שנים. אך בזמנו של דארווין סברו רוב האנשים, שגילו של כדור הארץ הוא כחמשת אלפים שנה בלבד. זו הייתה בעיניהם הוכחה ניצחת כנגד רעיונות האבולוציה והברירה הטבעית: הרי לא ייתכן שהמנגנון שדארווין הציע (הצטברות השינויים לאורך דורות) התרחש במשך זמן כה קצר.

- מדוע חייב היה דארווין להניח שגילו של כדור הארץ גדול מ- 5000 שנה?

כיום, יכולים מדענים להעריך את גילו של כדור הארץ בעזרת שיטות מדידה מודרניות. גילו של כדור הארץ מוערך כיום בכ-4.5 ביליון שנה (4,500,000,000).

- העדות הראשונה לקיומו של יצור חי היא מלפני 3.5 ביליון שנה. מה תוכלו לומר על גילם של היצורים החיים לעומת גיל כדור הארץ?

כיצד קבעו את גילו של כדור הארץ?

גיל כדור הארץ נקבע על ידי מדענים, שבדקו סלעים משלושה מקורות: סלעים שנלקחו ממקומות שונים על פני כדור הארץ, סלעים שהובאו לכאן מהירח ומטאוריטים שנחתו כאן מהחלל. המשותף לסלעים משלושת המקורות הוא היותם שייכים למערכת השמש ומכאן שהם נוצרו באותו הזמן.

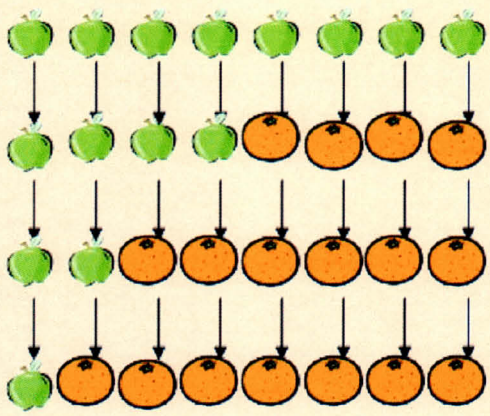
כדי לדעת את גילו של סלע או של עצם דומם אחר כמו מאובן, למשל, משתמשים בשיטה שנקראת **"תיארוך רדיואקטיבי"**, המתבססת על נטייתם של חומרים מסוימים להתפרק ולהפוך לחומרים אחרים. המונח החשוב בהקשר זה הוא **"זמן מחצית החיים"**. זמן מחצית החיים של חומר הוא הזמן שבו מתפרקת מחצית מהחומר ההתחלתי והופכת לחומר אחר. כדי להבין את השיטה נסתכל על דוגמה ציורית שבה תפוחים הם חומרים לא יציבים שהופכים באופן ספונטני לתפוזים. בדוגמה שלנו, זמן מחצית החיים של התפוחים הוא שנה אחת; כלומר, במשך כל שנה שעוברת הופכים מחצית מהתפוחים לתפוזים.

נניח שיש בידכם סל ובו שמונה תפוחים ותפוזים. אתם יודעים שכל התפוזים שבסל מקורם בתפוחים, ואתם מעוניינים למדוד כמה זמן עבר מזמן שהסל הכיל רק תפוחים. כיצד תחשבו זאת?

ראשית, יש לספור את מספר התפוחים ואת מספר התפוזים בסל. נניח שמצאתם שיש בו שישה תפוזים ושני תפוחים. מאחר שאתם יודעים שזמן מחצית החיים של התפוחים הוא שנה אחת תוכלו לשחזר את התהליך שהתרחש:

בתחילה היו בסל שמונה תפוחים (המספר הכולל של תפוחים ותפוזים קבוע לאורך כל הזמן ואינו משתנה). במשך שנה אחת הפכו ארבעה תפוחים (מחצית מהחומר ההתחלתי) לתפוזים, ונשארו ארבעה תפוחים. בשנה השנייה הפכו מחצית מארבעת התפוחים הנותרים לתפוזים, וכך נשארו רק שני תפוחים. זוהי תמונת המצב שאנו רואים כיום. מכאן, שמאז שהכיל הסל רק תפוחים ועד למצב שבו הוא מכיל שני תפוחים ושישה תפוזים עברו שנתיים. אתם יכולים להיעזר באיור שלפניכם:

השתנות התפוחים עם הזמן:



התחלה:

אחרי "זמן מחצית חיים" אחד (שנה אחת):

אחרי פעמיים "זמן מחצית חיים" (שנתיים):

אחרי שלוש פעמים "זמן מחצית חיים" (שלוש שנים):

על ידי השוואה בין מספר התפוחים והתפוזים שבידינו ובהתבססות על ידיעת "זמן מחצית החיים" של התפוחים, יכולנו לחשב את הזמן שעבר מתחילת תהליך השינוי של תפוחים לתפוזים. תהליך זה נקרא "תיארוך".

ומה קורה ב"עולם האמיתי"?
חומרים מסוימים בטבע הם חומרים בלתי יציבים. כזה הוא, למשל, האיזוטופ אורניום ^{235} (^{235}U). **איזוטופים** של יסוד מסוים הם וריאציות של אותו היסוד. אלה הם אטומים שיש להם בגרעין אותו מספר פרוטונים, אך מספר הנויטרונים שלהם שונה. לחומרים רבים, כמו האורניום, יש בטבע מספר איזוטופים. במקרה של אורניום מדובר באורניום ^{234}, אורניום ^{235} ואורניום ^{238}. לכולם יש 92 פרוטונים (ולכן הם נחשבים לאותו יסוד), אבל לכל אחד יש מספר נויטרונים שונה במקצת (המספרים 234, 235 ו–238 מציינים את סכום הנויטרונים והפרוטונים בגרעין האטום).

המספר השונה של הנויטרונים גורם לחלק מהאיזוטופים להיות לא יציבים. אלה הם **איזוטופים רדיואקטיביים**. הגרעינים שלהם מתפרקים באופן ספונטני, והאטומים הופכים לאטומים פשוטים יותר. תוצרי הפירוק, שהם יסודות יציבים שאינם ממשיכים להתפרק, נקראים "אטומי בת". בדוגמה הציורית שראינו קודם לכן, התפוחים הם האיזוטופים הרדיואקטיביים, והתפוזים הם אטומי הבת שלהם. האיזוטופ הרדיואקטיבי אורניום ^{235} אינו יציב, וכאשר הוא מתפרק, הגרעין שלו מאבד 10 פרוטונים והופך מאטום אורניום המכיל 92 פרוטונים לאטום עופרת בעל 82 פרוטונים בלבד (^{207}pb). אטום העופרת הוא אטום הבת של האורניום, והוא יציב ואינו ממשיך להתפרק.

לא כל האטומים של איזוטופ רדיואקטיבי מתפרקים בבת אחת. קצב ההתפרקות משתנה מיסוד ליסוד: יש יסודות רדיואקטיביים קצרי חיים שמתפרקים תוך שניות ספורות או תוך ימים ספורים, ויש יסודות שהתפרקותם מתרחשת במשך מיליוני שנים. "זמן מחצית חיים" של החומר נותן מדד על קצב ההתפרקות. זהו הזמן הדרוש למחצית מכמות האיזוטופים הרדיואקטיביים של יסוד מסוים להתפרק ולהפוך לאטומי הבת שלו. זמן מחצית חיים של אורניום ^{235}, למשל, הוא 710 מיליון שנה, ופירושו של דבר הוא שבמשך 710 מיליון שנה מחצית האטומים של איזוטופ זה מתפרקים והופכים לעופרת.

ככל שהזמן חולף, יותר ויותר איזוטופים בקבוצה מתפרקים לאטומי הבת שלהם. משום כך, כאשר רוצים לדעת את גילו של עצם מסוים, בודקים את מספר האיזוטופים המצויים בו: כמה אטומים כבר התפרקו (והפכו לאטומי הבת) וכמה עדיין לא התפרקו. בעזרת יחס זה וזמן מחצית החיים מחשבים את גיל העצם הנבדק, ממש כפי שעשינו בדוגמת התפוחים והתפוזים.

הנחת העבודה היא, כמובן, שתהליך הפירוק הרדיואקטיבי מתחיל עם יצירת הסלע. וכך אם, למשל, ימצאו מדענים בסלע מספר שווה של איזוטופים ושל אטומי הבת שלהם, הם יידעו שמחצית מכמות האיזוטופים ההתחלתית התפרקה ושגילו של הסלע שווה לזמן מחצית החיים של האיזוטופ.

באיזה איזוטופ כדאי להשתמש לצורך התיארוך?
כשמדענים רוצים לדעת מה גילו של עצם עתיק מאוד כמו סלע, הם בודקים איזוטופ בעל זמן מחצית חיים ארוכה, כמו אורניום ^{235} (שזמן מחצית החיים שלו הוא 710 מיליון שנה) או אורניום ^{238} (שזמן מחצית החיים שלו היא 4.5 ביליון שנה).
כאשר רוצים לתארך עצמים צעירים יותר, כמו מאובנים צעירים, עצמות אדם או גיל של עצים עתיקים, משתמשים באיזוטופ בעל זמן מחצית חיים קצר יותר כמו זה של פחמן ^{14} (שזמן מחצית החיים שלו הוא "רק" 5570 שנה).

כיצד עובדת השיטה לקביעת גילם של מאובנים צעירים?

האיזוטופ שהמדענים משתמשים בו לצורך זה הוא פחמן^{14}. בגופם של בעלי חיים יש תרכובות פחמן, שמקורם בפחמן הדו חמצני הנקלט על ידי הצמחים בתהליך הפוטוסינתזה. הצמחים קולטים את הפחמן ויוצרים ממנו סוכרים. בשרשרת המזון יש בעלי חיים הניזונים מהצמחים ובעלי חיים אחרים הניזונים מהם, וכך עוברות תרכובות הפחמן מהצמחים לכל היצורים החיים.

הפחמן הנקלט מהאוויר על ידי הצמחים מורכב ברובו מהאיזוטופ פחמן^{12}, שהוא איזוטופ יציב, אך באוויר יש גם כמות מסוימת של פחמן^{14}, שהוא איזוטופ רדיואקטיבי המתפרק והופך לחנקן. חנקן הוא כידוע גז שנפלט לאטמוספרה.

כל זמן שהיצור חי, קיים בגופו יחס קבוע בין כמות הפחמן^{14} לבין כמות הפחמן^{12} (אותו יחס המצוי באופן קבוע באוויר). משום כך, מדידת כמות הפחמן^{12} בגופו של היצור מצביעה גם על כמות הפחמן^{14} שבו. אלא שמהרגע שהיצור מת, נפסקת קליטת פחמן חדש, בעוד שהאיזוטופ פחמן^{14} ממשיך להתפרק לחנקן ולהיעלם לאוויר. מכאן, שההבדל בין כמות הפחמן^{14} המצויה במאובן כיום לבין מה שהיה בו ברגע מותו, נובע מפחמן^{14} שהתפרק והפך לחנקן.
את כמות הפחמן^{14}, שהייתה במאובן ברגע מותו, אפשר לדעת על ידי מדידת כמות הפחמן^{12} המצויה בו כיום (שלא השתנתה מרגע מותו), וכך, ביודענו שזמן מחצית החיים של פחמן^{14} הוא 5570 שנה, נוכל לחשב כמה זמן עבר מאז מת היצור.

שיטה זו מתאימה לתיארוך של תקופות קצרות יחסית, שכן אחרי 30,000 שנים כמות הפחמן^{14} הנותרת היא קטנה מכדי שיהיה אפשר למדוד אותה. כדי לתארך עצמים עתיקים יותר, כמו מאובנים עתיקים, בודקים את שכבת האדמה שהמאובן נקבר בה, שבה מצויים איזוטופים שזמן מחצית החיים שלהם ארוך בהרבה מזה של הפחמן.
כדי לקבל תוצאה מדויקת ככל האפשר של תיארוך, נוהגים המדענים לבדוק במקביל שני סוגים של איזוטופים בעלי זמן מחצית חיים שונה. גם גילו של כדור הארץ נקבע על ידי שימוש ב"שעון רדיואקטיבי" כפול – מדידה של שני איזוטופים של עופרת. כאמור, נתונים שנאספו משלושה מקורות מובילים כולם לנתון המקובל היום הקובע שגיל כדור הארץ (ומערכת השמש) הוא 4.5 ביליון שנה, אם כי תיתכן טעות של 40 מיליון שנים לכאן או לכאן.

- 40 מיליון שנים הם זמן רב לכל הדעות! האם העובדה שיש אפשרות לטעות ב–40 מיליון שנים, כאשר מתארכים את גיל כדור הארץ, הופכת את תהליך התיארוך לחסר משמעות?

שאלות לסיכום

1. נסו לשחזר את השלבים השונים בהתפתחותן של כנפי התעופה הראשונות.
2. מדענים מצאו מאובן עתיק מאוד (מעל 100,000 שנה). כיצד ניתן לקבוע את גילו?
3. לו היה מסתבר ממחקרים מדעיים שגילו כדור הארץ הוא רק 10,000 שנה, האם היה נתון זה מפריך את רעיונותיו של דארווין? הסבירו.
4. לו היו מוצאים בשכבת אדמה שגילה הוא כ–3.5 ביליון שנה (סמוך לזמן בו הופיעו היצורים החיים הראשונים) מאובן של יצור מורכב מאוד (בעל איברים משוכללים), האם ממצא זה היה מפריך רעיונותיו של דארווין? הסבירו.
5. לו היינו חוזרים אחורה בזמן, למשל לתקופת הדינוזאורים, האם בהכרח היה מתפתח בסופו של דבר אדם? הסבירו.

סיכום

בפרק ד בחנו מקרים שבהם יכולנו לצפות בשינויים האבולוציוניים בעודם מתרחשים. מקרים אלה מהווים עדות לכך, ששינויים בשכיחותן של תכונות במהלך הדורות אכן מתרחשים. בפרק זה ניסינו לשחזר תהליכים אבולוציוניים שאירעו בעבר הרחוק. לגבי מקרים אלה, אין אנו יכולים אלא לשער את שלבי הברירה הטבעית שהם עברו.

ראינו, ש**שינויים יכולים להצטבר** כך שצאצאי הצאצאים יכולים להיות שונים יותר ויותר מהמקור. היכולת לצבור שינויים מאפשרת יצירה הדרגתית של מבנים ומערכות מורכבים ביותר, שלא היו יכולים להיווצר בבת אחת. כך נוצרו ההתאמות המדהימות הקיימות בטבע בין יצורים חיים לסביבתם.

הברירה הטבעית יכולה להסביר תופעות רבות: שינוי בהרכב אוכלוסייה (כאשר מתרחש שינוי בתנאי הסביבה והאוכלוסייה אינה מותאמת) וגם חוסר שינוי (כאשר האוכלוסייה מותאמת והתנאים לא משתנים). תהליך ההתאמה מביא לירידה בשונות של אוכלוסיות וכן להתאמות המדהימות הקיימות בטבע בין יצורים חיים לסביבתם.

כדי ששינויים יתרחשו ויצטברו באוכלוסייה, דרוש זמן רב מאוד, דורות רבים. בעבר האמינו, שגילו של כדור הארץ הוא רק 5000 שנה. כיום, באמצעות שיטת ה"תיארוך הרדיואקטיבי", מעריכים את גילו של כדור הארץ בכ–4.5 ביליון שנה. השיטה מתבססת על נטייתם של חומרים מסוימים להתפרק ולהפוך לחומרים אחרים. כיוון שלכל חומר יש קצב התפרקות אופייני, יכולה מדידה של כמות החומרים האלה בסלעים עתיקים, להצביע על גילו של כדור הארץ. גילו של כדור הארץ תומך במנגנון הברירה הטבעית שתלוי בהצטברות הדרגתית ואיטית של שינויים.

מפת למידה:

פרק א
תכונות מסוימות עוברות בתורשה ואחרות אינן עוברות בתורשה. תכונות אלו באות לידי ביטוי ברמה מולקולרית וברמה של היצור השלם.

פרק ב
בכל אוכלוסייה קיימת שונות.

פרק ב
בתנאי סביבה מסוימים יש תכונות שמקנות יתרון ליצור בהישרדות וברבייה. כשהסביבה משתנה, הכשירות של הפרטים יכולה להשתנות.

פרק ג
תהליך **הברירה הטבעית** מספק את המנגנון לאבולוציה: בכל אוכלוסייה קיימת שונות. תכונות תורשתיות המקנות לפרטים מסוימים יתרון על פני אחרים בהישרדות וברבייה, יעברו לצאצאיהם ויקנו גם להם יתרון דומה. לכן, עם הזמן תעלה שכיחותם היחסית של הפרטים בעלי התכונות המקנות יתרון.

פרק ב
מספר הצאצאים השורדים קטן בהרבה ממספר הנולדים.

פרק ד
כשהסביבה משתנה, הכשירות של הפרטים יכולה להשתנות.
אוכלוסיות בטבע נתונות ללחצי ברירה שונים הפועלים עליהן בו–זמנית, לפעמים בכיוונים מנוגדים. תהליך הברירה הטבעית מתרחש ללא מטרה מוגדרת מראש וללא יד מכוונת.

פרק ה
תכונות תורשתיות חדשות נוצרות כל הזמן כתוצאה ממוטציות של גנים בתאי הרבייה או כתוצאה של צירופים חדשים של גנים קיימים (ברבייה זוויגית). מוטציות מתרחשות בדרך כלל בתדירות נמוכה, ורק אם הן קורות בתאי המין, הן עוברות בתורשה. תכונות תורשתיות חדשות הן אקראיות: יש כאלה המביאות ליכולות חדשות ואף משופרות, יש הגורמות להפחתה ביכולות ואחרות אינן מעלות ואינן מורידות.

פרק ו
שינויים קטנים המתרחשים במהלך הדורות יכולים להצטבר, כך שבסופו של דבר צאצאי הצאצאים יכולים להיות מורכבים מאוד ושונים מאוד מהוריהם. השינויים מצטברים במשך מיליוני שנה (דורות רבים). גילו המופלג של כדור הארץ (4.5 ביליון שנה), שנקבע בשיטה של תיארוך רדיואקטיבי, תומך במנגנון כזה.

מונחים שנלמדו בפרק:

הצטברות מוטציות
קו-אבולוציה
התאמה אבולוציונית
התאמה פיזיולוגית/התנהגותית (הסתגלות)
תיארוך רדיואקטיבי
זמן מחצית חיים
איזוטופ

פרק ז' האם אפשר לשחזר את העבר?

כפי שראינו, תהליכי הברירה הטבעית יכולים להביא להתאמות מופלאות ומורכבות עד מאוד בין יצורים חיים לסביבתם, אך לא כל היצורים מותאמים בצורה כה טובה.

האם הכול מושלם?

אווזים הם בדרך כלל עופות מים נודדים. הם מצוידים בקרומי שחייה מפותחים בין אצבעות הרגליים המאפשרים להם לשחות. אווז הוואי (Branta sandvicensis), לעומת זאת, אינו שוחה ואינו נודד למרחקים. התקדמותו נעשית בעיקר בהליכה. רגליו הארוכות ואצבעותיו החזקות (יחסית למיני אווזים אחרים) מותאמות להליכה מרובה. אבל למרות התאמות אלה, אווז הוואי אינו מותאם לחלוטין לסביבתו. הוא חי בעיקר על משטחי לבה, בית גידול יוצא דופן למדי עבור אווז, ולמרות זאת הוא מצויד בקרומי שחייה. לא זו בלבד שהקרומים אינם מקנים לו יתרון, אלא שהם מהווים חיסרון להולכים על משטחי לבה. הם מקטינים את גמישות האצבעות ונחתכים בקלות מהמשטח הקשה והמחוספס.

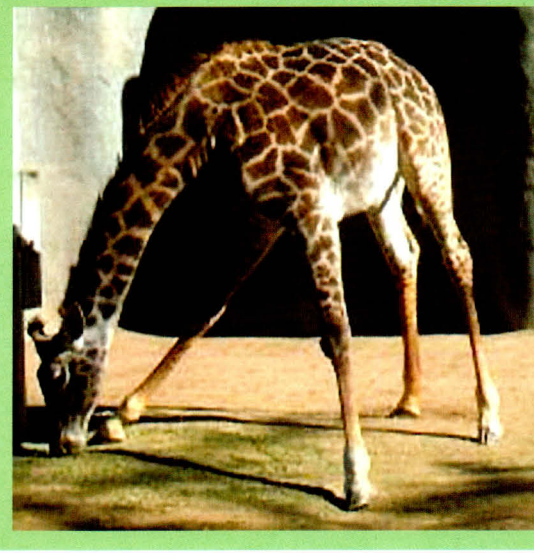
אווז הוואי

1. כיצד אפשר להסביר את ההתאמה הלא מושלמת של אווז הוואי לבית גידולו? האם לא התרחש כאן תהליך של ברירה טבעית? נסו להסביר.
2. מדוע, לדעתכם, לא נוצרו אווזים ללא קרומים בתהליך של ברירה טבעית?
3. האם, לדעתכם, יתפתחו בעתיד אווזים נטולי קרומים? הסבירו.

כדאי להדגיש שמנגנון הברירה הטבעית בורר את המותאמים ביותר מתוך מגוון האפשרויות הקיימות. חומר הגלם לברירה הטבעית הוא השונות הקיימת באותו זמן בין הפרטים, ולכן מדובר בתהליך שפועל תחת אילוצים קיימים.

חשבו על אדם שבונה שולחן אוכל. כל שעומד לרשותו הוא שני כיסאות ישנים, שלאחד מהם יש רגל אחת קצרה יותר מהשאר. האיש יכול, למשל, לקצר את הרגליים של שני הכיסאות לפי גובהה של הרגל הקצרה ביותר, להיפטר מהמשענות ולהצמיד את הכיסאות יחד. הוא יכול גם, במקום לנסר את רגלי הכיסאות, להשלים את גובהה של הרגל הקצרה על ידי אבן או חבילת עיתונים. על כל פנים, השולחן שיתקבל יתפקד בהצלחה מסוימת בתפקידו החדש, אולם ברור שיהיו בו פגמים: הוא יהיה נמוך למדי, ייתכן שלא יהיה יציב דיו והמשטח העליון שלו לא יהיה רציף. מובן ששולחן כזה יהיה מוצלח פחות משולחן שנבנה מלכתחילה לשמש כשולחן.

האבולוציה פועלת כאותו אדם שמאלתר על הקיים. בתהליך האבולוציה אין יכולת לצפות מה יידרש בהמשך או לתכנן את הצעדים וליצור את היצורים החיים יש מאין. האבולוציה פועלת על מה שקיים. הדבר מביא לעתים לשרידתם ולשגשוגם של יצורים שהתאמתם לסביבה אינה מושלמת, ואף מאולצת לפעמים. דוגמה לכך היא צוואר הג'ירפה. למרות היתרונות שמקנה הצוואר הארוך, די להביט בג'ירפה המתכופפת לשתות כדי להבחין בקושי הגדול שנגרם על ידי אותו צוואר.



לג'ירפה קושי גדול בכיפוף הצוואר

בעוד שבאדם המרחק בין הראש ללב הוא כ–40 ס"מ, אצל הג'ירפה מגיע מרחק זה ליותר משני מטרים! כדי שהדם יגיע לראש הג'ירפה ויזרום למרחק כה גדול בניגוד לכוח המשיכה, הלב מזרים אותו בלחץ גבוה מאוד. וכך, כאשר הג'ירפה מתכופפת כדי לשתות, עולה לחץ הדם בראשה אף יותר, ונימי הדם שבראשה היו יכולים להיות נתונים לסכנת התפקעות אלמלא ההתאמות שהג'ירפות מצוידות בהן.

כיום סבורים, שבעיות הגב התחתון שמהן סובלים רוב האנשים בשלב מסוים של חייהם נובעות מעומס יתר על השלד. עומס זה נובע מהעובדה שהאדם הולך זקוף, על שתי רגליו. היתרונות של הליכה זקופה ברורים: טווח הראייה גדל, הידיים פנויות לפעולות מגוונות כמו בנייה, שימוש בכלים ועוד. לו היו התהליכים האבולוציוניים פועלים בהתאם למטרה ולתכנון מראש, היה נוצר, אולי, שלד המותאם יותר לשאת את משקל הגוף הזקוף. אלא שהאבולוציה פועלת על מבנים קיימים, ולכן השלד שלנו מותאם להליכה זקופה, אך אינו מושלם.
נוסף על כך, כפי שכבר ראינו (למשל, במקרה של חטי הפילים), הברירה הטבעית פועלת בתגובה ללחצי ברירה שונים ולעתים מנוגדים. אי השלמות נוצרת, אם כן, מפשרה בין לחצי הברירה.
כך, למשל, אזור הגרון אצל האדם משמש גם להכנסת מזון וגם להכנסת אוויר. המיקום היחסי של דרכי העיכול והנשימה ביצורים קדומים ותכונת האלתור של האבולוציה, הם שהביאו להצטלבות הפתוחה של קנה הנשימה והוושט שלנו. סמיכות הצינורות רחוקה משלמות ויכולה להיות מסוכנת ואף קטלנית.

- במה נבדל תהליך האבולוציה מהתהליך שבו אדם בונה שולחן מכיסאות?

לעתים, תכונה או מבנה מסוים "עוברים" לשמש בתפקיד אחר לחלוטין כשהתנאים משתנים. למשל, החלק הנראה כ"בוהן" או אצבע שישית אצל הפנדות ומסייע להן להחזיק את מקלות הבמבוק, אינו באמת בוהן. מבחינה אנטומית זוהי עצם בפרק כף היד. ההשערה היא שכאשר אוכלוסיות הפנדות החלו לאכול במבוק, הייתה קיימת שונות באורך העצם הזו. כתוצאה מברירה חזקה ומתמשכת במשך דורות רבים, האורך הממוצע של העצם הזו באוכלוסייה גדל, וכעת היא נראית כבוהן.

תכונה (או מבנה) שעוברת לשמש בתפקיד אחר ובסופו של דבר אף "משתכללת" בגלל הברירה הטבעית נקראת **פרה-אדפטציה**. בגלל לחצי ברירה תכונות קיימות עוברות "הסבה מקצועית" כשהתנאים משתנים. אין כאן תכנון מראש תוך ציפייה לבאות, אלא "אלתור" של מבנים או תכונות שהיו קיימות במקרה.

לא רק הברירה הטבעית משפיעה על הישרדות

אופס, דרכו עלי!

במהלך התרגיל הבא נצפה שוב באוכלוסיית החרזנים ונראה מה קורה לה כאשר מופיע בשטח עדר פרות שתוך כדי צעידתן בשדה, רומסות למוות חרזנים. לצורך המשחק נחליט שבכל שנה נרמסת כמחצית מאוכלוסיית החרזנים. אך בכל שנה האוכלוסייה, המתרבה ברבייה אל-זוויגית, גם מכפילה את עצמה: פעם בשנה כל חרזן מעמיד צאצא אחד הזהה לו בדיוק.

מהלך העבודה

במהלך ההדמיה חרוזים ייצגו את החרזנים, בד פרחוני ייצג את שדה הפרחים שהם חיים בו ואתם תייצגו את עדר הפרות.

1. פזרו באופן שווה 20 חרזנים מכל צבע (40 בסך הכול) על הבד הפרחוני שקיבלתם.
2. מהי השכיחות באחוזים של כל אחד מצבעי החרזנים?

   חשבו כך: $\frac{\text{מס' החרזנים מצבע מסוים} \times 100}{\text{סך כל החרזנים}}$

3. רמיסת החרזנים על ידי הפרות נעשית בדרך זו: עיניו של נציג מהקבוצה יהיו מכוסות, והוא יהיה הפר הרומס. על אצבעו יהיה כרוך נייר דבק באופן שקצהו הדביק יופנה כלפי חוץ. הוא ייגע בבד כך שיידבקו אליו חרזנים, ואז יכניס נציג אחר את החרזנים שנדבקו לקופסה. הרומס ימשיך להדביק לאצבעו חרזנים עד שבתוך הקופסה יהיו 20 חרזנים. (אם עלה המספר מעל ל-20, יוריד הנציג באופן שרירותי חרזנים ויחזירם לשדה עד שיתקבל המספר המבוקש.)
4. ספרו כמה חרזנים נשארו מכל צבע וחשבו יחס כמותי באחוזים.
5. בשלב זה בצעו את הרבייה של החרזנים בדרך זו: הכפילו את מספר החרזנים שנותרו על הבד בהתאם לצבעם. למשל, אם נותרו על הבד 7 חרזנים צהובים, הוסיפו 7 חרזנים צהובים חדשים.
6. אספו את כל החרזנים ופזרו אותם על הבד באופן אחיד.
7. חזרו על שלבים 2-6 פעמיים נוספות (כך שבסך הכול תהיה הדמיה של שלושה דורות).
8. מלאו את הטבלה:

		צבע 1	צבע 2
אוכלוסיה התחלתית	מס' חרזנים	20	20
	יחס מספרי באחוזים	50	50
דור 1	מס' חרזנים שנותרו אחרי הרמיסה		
	יחס מספרי באחוזים		
דור 2	מס' חרזנים שנותרו אחרי הרמיסה		
	יחס מספרי באחוזים		
דור 3	מס' חרזנים שנותרו אחרי הרמיסה		
	יחס מספרי באחוזים		

עיבוד התוצאות

1. לאילו פרטים באוכלוסיית החרזנים היה יתרון בסביבה? מדוע?
2. שרטטו גרף עמודות שיציג את התוצאות. החליטו מה ייצג ציר ה–X ומה ייצג ציר ה–Y.
3. מה קרה לאחוז החרזנים מכל צבע לאחר שלושה דורות?
4. האם השתנה הרכב האוכלוסייה?
5. כיצד אפשר להסביר את התוצאה?
6. השוו את התוצאות שקיבלתם עם תוצאות שאר הקבוצות. האם צורת הגרפים שלכם זהה? הסבירו.
7. מה היה קורה לדעתכם אילו היינו ממשיכים ברמיסה וברבייה עוד כמה דורות?
8. האם יכול להיווצר מצב שבו כמעט כל האוכלוסייה תהיה בצבע מסוים אחד לאחר דורות רבים? (התנאים נשארים אותם התנאים – האוכלוסייה נתונה לרמיסה אך לא לטריפה).

השוואה - הישרדות אקראית מול הברירה הטבעית

השוו בין הגרפים שקיבלתם בהדמיית החרזנים שערכתם בפרק ג (שדימתה טריפה על ידי ציפורים) לבין הגרפים בהדמיית החרזנים שביצעתם זה עתה (שדימתה רמיסה על ידי פרות).

1. מדוע הגרפים של הדמיית הציפורים דומים יותר אלה לאלה בין הקבוצות השונות בכיתה, ואילו הגרפים של הדמיית הפרות שונים אלה מאלה?
2. מה היה קורה, לדעתכם, אילו בשדה החרזנים היו בו–זמנית גם ציפורים טורפות וגם פרות?
3. השוו בין שתי ההדמיות למציאות.

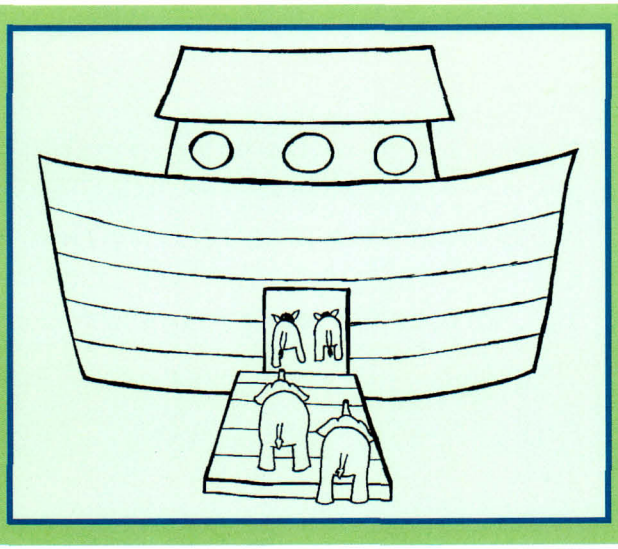
מתברר, כי גם למזל יש השפעה מכרעת על הישרדותם של פרטים. נתבונן בכמה דוגמאות:
כשבחנו את כשירותם של האריות (בפרק ב), הכתרנו את ליאון כאריה הכשיר ביותר, כיוון שהעמיד את מספר הצאצאים הרב ביותר שהגיעו לבגרות. ליאון מת מדלקת ברגלו בגיל תשע, אך אילו, מסיבה אקראית לחלוטין, היה ליאון מת מאותה דלקת בגיל שנתיים, לפני שהספיק להעמיד צאצאים, הרכב אוכלוסיית האריות היה שונה. אריה אחר מתוך הארבעה היה הכשיר ביותר.

בקבוצת יעלים, למשל, יכול לשרוד פרט שהוא איטי יחסית לפרטים אחרים, רק משום שבמקרה הנמר שחי בסביבה לא נתקל בו. פרט זה יעמיד צאצאים, ותכונותיו ישפיעו על הרכב הקבוצה בעתיד. לעומת זאת, בשדה פרחים יכול להיקטף במקרה הפרט המותאם ביותר לסביבתו. כל תכונותיו המופלאות לא יעזרו לו במקרה כזה, והוא לא יוכל להורישן לדורות הבאים.

מדוגמאות אלו אנו למדים כי שינויים בהרכב התכונות של אוכלוסיות יצורים לאורך דורות מושפעים גם מתהליכים אקראיים. הישרדות, אם כן, איננה רק תוצאה של תהליך הברירה הטבעית בו שורדים המותאמים ביותר, אלא גם של מזל פשוט.
השינוי בהרכב אוכלוסיות כתוצאה מהישרדות ורבייה אקראיים נקרא **סחיפה גנטית**. בעקבות סחיפה גנטית מסולקים פרטים מסוימים ונותרים אחרים, פרטים מסוימים מתרבים ומעמידים צאצאים ואחרים לא, ללא קשר לתכונותיהם ולהתאמתם לסביבה. לכאורה, הסחיפה סותרת את עקרונות הברירה הטבעית, שלפיהם המתאימים הם אלה ששורדים ומעמידים את מספר הצאצאים הגדול ביותר. למעשה, הסחיפה היא כוח נוסף שפועל במקביל על אוכלוסיות ללא קשר לברירה הטבעית.
במציאות המורכבת פועלים על אוכלוסיות תהליכים רבים **במקביל**. יצורים חיים יכולים להיות נתונים למגוון של לחצי ברירה, שנובעים מתנאי האקלים, מנוכחות טורפים, מזמינותו של מזון מסוים ועוד. נוסף על כל אלה הם נתונים לתהליכים אקראיים של סחיפה גנטית, שכתוצאה מהם שורדים ומתרבים פרטים ללא קשר לתכונותיהם.

בעוד שלא תמיד קיימים בסביבה לחצי ברירה, ולא תמיד ישנה באוכלוסייה שונות הרלבנטית ללחצי הברירה בסביבה, הסחיפה הגנטית מתרחשת כל הזמן: היא אינה תלויה בשונות באוכלוסייה ולא בתנאי הסביבה. היא מתבטאת בהשפעה על הרכב התכונות באוכלוסייה בכל מיני כיוונים. התוצאה של ברירה טבעית היא התאמה טובה יותר של האוכלוסיה לסביבה, בעוד שסחיפה גנטית אינה מובילה בהכרח להתאמה כזאת.

סחיפה גנטית חשובה במיוחד, כאשר האוכלוסיות קטנות. כאשר האוכלוסיה גדולה מאוד, לסחיפה הגנטית אין השפעה רבה על שכיחות התכונות. אך באוכלוסיות קטנות, לסחיפה הגנטית יש השפעה מכרעת. כדי להמחיש את הרעיון נחזור שוב לתרגיל האריות. ליאון, האריה הכשיר ביותר, היה אחד מארבעה אריות. אילו במקרה היה מת לפני שהעמיד צאצאים, מותו היה משנה לחלוטין את הרכב קבוצת האריות בדורות הבאים. אך אילו היו באוכלוסייה מאה אריות ובהם עשרים וחמישה אריות הדומים בתכונותיהם לליאון (במילים אחרות, היחס המספרי היה נשמר), הרי מותו המקרי בגיל שנתיים לא היה משנה באופן משמעותי את הרכב התכונות של האוכלוסייה בדורות הבאים. הסיכוי שכל העשרים וחמישה היו מתים בצעירותם הוא קלוש.



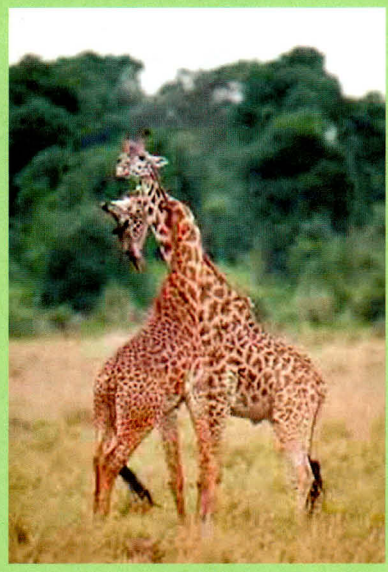
על פי הסיפור המקראי, נוח אסף לתיבתו שני פרטים מכל מין, זכר ונקבה. זוגות אלו הם שהעמידו את דורות הצאצאים הבאים ומהם התפתחו קבוצות היצורים. אפשר לחשוב על סיפור זה כעל דוגמה לסחיפה גנטית. מאחר שנוח פעל בלוח זמנים צפוף, סביר שאסף אל התיבה את הפרטים שהיה קל ופשוט ביותר לתפוס, אולי אפילו את האטיים או החלשים או את אלו שהזדמנו לאזור לגמרי במקרה. אוסף מקרי זה הוא שהיווה את הבסיס להרכב הקבוצות בדורות הבאים.

אז האם אפשר לשחזר את העבר?

מחקרים רבים בתחום האבולוציה עוסקים בהתאמות של יצורים לסביבתם. בפרק הקודם בחנו כמה דוגמאות של התאמות מורכבות וייחודיות וניסינו לשחזר את התהליך שהביא ליצירתן. אך למעט מקרים מעטים יחסית שבהם אפשר לעקוב אחר הברירה הטבעית בפעולה (חלקם הובאו בפרק ד), רוב ההתאמות התפתחו (או התחילו להתפתח) בעבר הרחוק, לפני מיליוני שנים, וכך יוצא שאנו מנסים לשחזר תהליך לאחר שכבר התרחש. לעתים יש בידינו עדויות לחלק מההשערות, אך נראה שיש דברים שלעולם לא נוכל לדעת בוודאות.

לא תמיד ידוע לנו, למשל, איזה יתרון הקנתה תכונה מסוימת לבעליה. איזה יתרון מקנות דבשת הגמל או הרגליים המרובות של מרבה הרגליים? אפשר כמובן להעלות השערות לגבי יתרונות אפשריים, אולם לא תמיד אנחנו יכולים להיות בטוחים בהן.
על היתרון שמקנים הפסים לזברה חלוקות הדעות בין הביולוגים. יש הטוענים כי דגם הפסים מקנה יתרון בחיזור, ויש הטוענים כי דגם זה מקשה על זבוב הצה–צה למקד את ראייתו ולעקוץ את הזברה.

לעתים יכול קיומה של תכונה מסוימת להיות מוסבר על ידי יותר מיתרון אחד: אמרנו, למשל, שצוואר הארוך של הג'ירפות הקנה להן יתרון בכך שהוא אפשר להן למצוא מזון על ענפים גבוהים. אולם ישנם חוקרים רבים הסבורים שלצוואר ארוך ומסיבי יש יתרון אחר: נמצא, שצוואר הג'ירפות הזכרים ארוך בממוצע ב–30–40 סנטימטרים מצוואר הנקבות, וכן שהזכרים חובטים זה בצווארו של זה כאשר הם נלחמים, לעיתים אפילו עד מוות. ייתכן, אם כן, שלצוואר הארוך יש יתרון לזכרים במלחמתם עם זכרים אחרים על הנקבות. תימוכין לכך נמצאו בעובדה שנקבות הג'ירפות אכן מעדיפות זכרים בעלי צוואר מסיבי.



שני פרטים זכרים בעת עימות

ומה היתרון במבנה האף הבולט שלנו? דן גראור מצטט בספרו[2] את פאנגלוס, יציר דמיונו של וולטיר, שטען: "ברור שאפים נבראו לצורך הרכבת משקפי צבת, ועל כן אנחנו מרכיבים משקפי צבת. רגליים בבירור נועדו לצורך ביריות (רצועות המחזיקות את הגרביים), ועל כן אנחנו לובשים ביריות".
הניסיון למצוא תמיד הסבר ליתרון של תכונה מסוימת יכול להיות, אם כן, אפילו מגוחך. לאור מה שלמדנו על הסחיפה הגנטית, ייתכן אפילו שהוא נדון לכישלון: לא כל תכונה שאנו מוצאים כאן ועכשיו, עברה בהכרח ברירה טבעית. לא לכל תכונה שאנו רואים יש יתרון: ייתכן שהיא שרדה בעקבות תהליכים אקראיים, ודי בכך שלא היה בה חיסרון ממשי שגרם לירידה בכשירותו של בעליה.
ייתכן אפילו שבשלב מסוים באבולוציה של יצורים חיים נוצרו דווקא תכונות מתאימות יותר, אך הן לא שרדו בגלל תהליך אקראי כלשהו שהכחיד אותן (טורף, שיטפון, רעידת אדמה וכו' שהכחידו את היצור שהופיעה אצלו במקרה התכונה המתאימה יותר).

[2] אבולוציה: מדארווין עד ה–DNA, 1997, משרד הביטחון, ההוצאה לאור.

שאלות לסיכום

1. בכי של תינוק או היכולת לחוש כאב הן תכונות שליליות לכאורה. האם תוכלו להציע הסבר כיצד נבררו תכונות אלו במנגנון של ברירה טבעית?
2. השוו בין מנגנון הברירה הטבעית לסחיפה גנטית.
3. מדוע השפעתם של תהליכים אקראיים רבה יותר באוכלוסיות קטנות?
4. חשבו על עיצוב כיסא נדנדה על ידי נגר לעומת הסבת רהיט קיים לכיסא נדנדה. איזה כיסא סביר שייראה טוב יותר וימלא את תפקידו בצורה מוצלחת יותר? איזה מהתהליכים הייתם בוחרים כאנלוגיה לתהליך הברירה הטבעית? הסבירו את תשובתכם.
5. עד כה עסקנו בתהליכים המשנים הרכב אוכלוסיות במהלך הדורות. חזרו לעמוד הראשון בספר זה. במה דומה האנלוגיה של הפרפר על עץ הסקוויה לתהליכים כמו ברירה טבעית, שמשנים אוכלוסיות לאורך זמן ובמה היא שונה?

סיכום

בפרק הקודם למדנו כי ברירה טבעית יכולה להביא להתאמות מופלאות בין אוכלוסיות של יצורים חיים לסביבתם. בפרק זה ראינו שלא כל היצורים מותאמים לסביבתם בצורה מושלמת מאחר שהברירה הטבעית פועלת מתוך אילוצים. ניתן אפילו לומר, שמרוב אילוצים ניתן למצוא אי-שלמויות בכל היצורים שסביבנו. תהליכי הברירה פועלים רק על התכונות המצויות בזמן נתון באוכלוסייה ובהתאם לתנאי הסביבה הקיימים.

יכולתנו לשחזר את התהליכים האבולוציוניים שהביאו ליצירת תכונות קיימות מוגבלת ביותר שכן לא כל מה שקיים בהווה, עבר בהכרח ברירה. במקביל לכוח המכוון של הברירה הטבעית קיים גם כוח לא פחות חשוב והוא הסחיפה הגנטית. וכך, בעוד שהברירה הטבעית היא כוח כיווני, המוביל להתאמה הולכת וגדלה לתנאי הסביבה, הסחיפה הגנטית היא כוח שפועל באופן אקראי, ללא קשר לסביבה ולשונות הקיימת באוכלוסייה. בעוד שהברירה הטבעית פועלת, רק כאשר יש מה לברור; כלומר, כאשר קיימת באוכלוסייה שונות רלוונטית ללחצי הסביבה, הסחיפה הגנטית פועלת כל הזמן ומשפיעה בעיקר כאשר האוכלוסייה קטנה.

מפת למידה:

פרק ב
בכל אוכלוסייה קיימת שונות.

פרק א
תכונות מסוימות עוברות בתורשה ואחרות אינן עוברות בתורשה. תכונות אלו באות לידי ביטוי ברמה מולקולרית וברמה של היצור השלם.

פרק ב
בתנאי סביבה מסוימים יש תכונות שמקנות יתרון ליצור בהישרדות וברבייה. כשהסביבה משתנה, הכשירות של הפרטים יכולה להשתנות.

פרק ג
תהליך **הברירה הטבעית** מספק את המנגנון לאבולוציה: בכל אוכלוסייה קיימת שונות. תכונות תורשתיות המקנות לפרטים מסוימים יתרון על פני אחרים בהישרדות וברבייה, יעברו לצאצאיהם ויקנו גם להם יתרון דומה. לכן, עם הזמן תעלה שכיחותם היחסית של הפרטים בעלי התכונות המקנות יתרון.

פרק ב
מספר הצאצאים השורדים קטן בהרבה ממספר הנולדים.

פרק ד
כשהסביבה משתנה, הכשירות של הפרטים יכולה להשתנות.
אוכלוסיות בטבע נתונות ללחצי ברירה שונים הפועלים עליהן בו–זמנית, לפעמים בכיוונים מנוגדים. תהליך הברירה הטבעית מתרחש ללא מטרה מוגדרת מראש וללא יד מכוונת.

פרק ה
תכונות תורשתיות חדשות נוצרות כל הזמן כתוצאה ממוטציות של גנים בתאי הרבייה או כתוצאה של צירופים חדשים של גנים קיימים (ברבייה זוויגית). מוטציות מתרחשות בדרך כלל בתדירות נמוכה, ורק אם הן קורות בתאי המין, הן עוברות בתורשה. תכונות תורשתיות חדשות הן אקראיות: יש כאלה המביאות ליכולות חדשות ואף משופרות, יש הגורמות להפחתה ביכולות ואחרות אינן מעלות ואינן מורידות.

פרק ו
שינויים קטנים המתרחשים במהלך הדורות יכולים להצטבר, כך שבסופו של דבר צאצאי הצאצאים יכולים להיות מורכבים מאוד ושונים מאוד מהוריהם. השינויים מצטברים במשך מיליוני שנה (דורות רבים). גילו המופלג של כדור הארץ (4.5 ביליון שנה), שנקבע בשיטה של תיארוך רדיואקטיבי, תומך במנגנון כזה.

פרק ז
הברירה הטבעית אינה בנייה מחדש אלא מתרחשת בשלבים. כל שלב מסתמך על השלב הקודם, ומשום כך התוצאה היא לפעמים פשרה ואינה מושלמת. גם תכונות שאינן מקנות יתרון יכולות לשרוד: במקביל לברירה הטבעית קיימת **סחיפה גנטית** שפועלת באופן אקראי, שאינו קשור להתאמה לסביבה. היא משפיעה בעיקר על אוכלוסיות קטנות.

מונחים שנלמדו בפרק:

פרה-אדפטציה

סחיפה גנטית

פרק ח' כיצד נוצרים מינים חדשים?

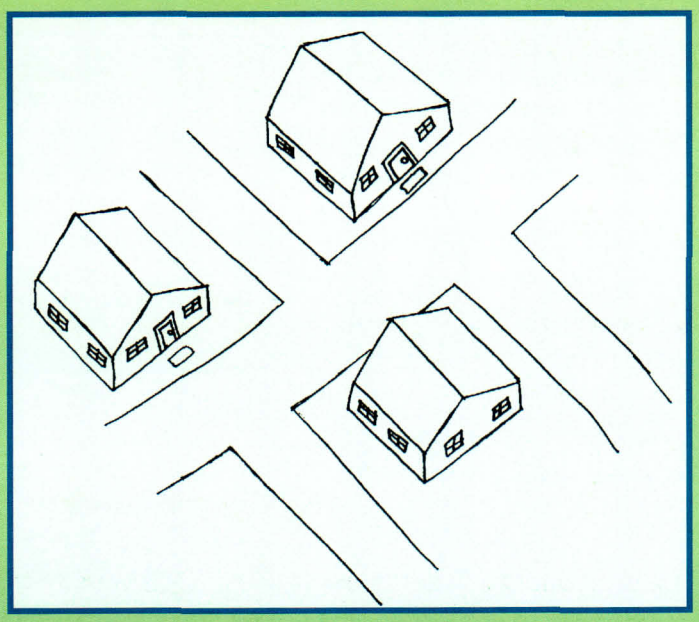
מדענים מעריכים שעל פני כדור הארץ חיים כיום כ–350,000 מינים שונים של חיפושיות! כיצד אפשר להסביר את היווצרות המגוון העצום הזה?

- האם, לדעתכם, כל מיני החיפושיות נוצרו בבת אחת? אם כן, הסבירו. אם לא, כיצד נוצרו?
- האם עדיין נוצרים מינים חדשים של חיפושיות? הסבירו.

בשנות השלושים של המאה הקודמת הובאו לארצות הברית מצרפת חלזונות שדה (מהמין Helix aspersa) במטרה להוות מעדן במסעדות. כשהתברר שהם אינם טעימים לחיכם של האמריקנים, הם שוחררו לחופשי. כמה מהחלזונות נקלעו לתוך משלוח של עציצים, שהגיעו יום אחד לעיירה ברייין שבטקסס. החלזונות התפשטו בעיירה.
לחלזונות אלה קצב רבייה מהיר יחסית: זמן הדור שלהם הוא כשנתיים, ובכל הטלה מוטלות כשמונים וחמש ביצים.

- בהנחה שזמן הדור של החלזונות היה קבוע במהלך השנים, כמה דורות של חלזונות עברו משנות השלושים ועד היום?

במשך השנים נסללו בברייין כבישי אספלט רחבים בין חצרות הבתים. החום הרב של הכביש במשך היום והמכוניות העוברות בו במהלך היממה מונעים מהחלזונות לעבור מצד אחד של הכביש לצידו האחר.



רחובות הבתים בעיירה ברייין

- התייחסו לאוכלוסיית חלזונות שחיה בצד **מסוים** של הכביש. עד כמה יהיו תכונותיהם התורשתיות של פרטים באוכלוסייה זו דומים לאלה של הפרטים מאוכלוסיית המוצא שלהם (מלפני שלושים דורות)? הסבירו.
- התייחסו **לשתי** אוכלוסיות של חלזונות החיות משני צדי הכביש:

א. האם, לדעתכם, אותן תכונות חדשות, שנוצרו במשך שלושים הדורות כתוצאה ממוטציות ומצירופים חדשים של גנים, הופיעו באוכלוסיות משני צידי הכביש? הסבירו.

ב. האם לדעתכם אותם לחצי ברירה פועלים משני צדי הכביש? הסבירו.

ג. נניח שבאוכלוסייה החיה מצדו האחד של הכביש הופיעה לפני עשרים דורות מוטציה המשפרת את עמידותם של חלזונות ליובש. מה קרה להרכב אותה אוכלוסייה ביחס לתכונה זו במהלך הדורות? מה קרה להרכב האוכלוסייה שחיה בצדו השני של הכביש?

ד. מה תוכלו לומר, אם כן, על הדמיון בתכונות של פרטים השייכים לאוכלוסיות שחיות בנפרד דורות רבים?

בשנות השבעים בדקו חוקרים 2218 חלזונות בבריין. הם השוו בין ארבע עשרה אוכלוסיות שונות, שהיו מופרדות זו מזו על ידי כבישים. הם מצאו כי פרטים שהיו שייכים לאוכלוסיות שונות ומופרדות, נבדלו בגנים שלהם יותר מאשר פרטים בתוך אותה האוכלוסייה. במילים אחרות, השונות **בתוך** כל אוכלוסייה הייתה קטנה יותר מהשונות **בין** אוכלוסיות משני צדי הכביש.

- כיצד תסבירו את העובדה כי השונות בין אוכלוסיות מופרדות גדולה יותר מאשר השונות בתוך כל אוכלוסייה?

ממצאים דומים נמצאו כמעט בכל מין של יצורים חיים שנחקר עד היום: **כאשר משווים בין אוכלוסיות נפרדות של פרטים השייכים לאותו המין, מוצאים, שכל אוכלוסייה מאופיינת על ידי תכונות שונות.**

דרור הבית

דרורי הבית (Passer domesticus), למשל, הגיעו ליבשת אמריקה לפני כמאה וחמישים שנה. בתחילה הגיעו הדרורים לניו יורק ומשם התפשטו במהירות רבה לכל היבשת ויצרו אוכלוסיות שונות המרוחקות גאוגרפית זו מזו. מדענים עוקבים אחר הדרורים מאז הגיעו לאמריקה. כיוון שמשך הדור של דרורים הוא כשנה, הרי המעקב נעשה אחר מאה וחמישים דורות של דרורים.

נמצא, שאוכלוסיות הדרורים השונות באמריקה נבדלות זו מזו בתכונות רבות, כגון: צבע הנוצות, אורך הכנפיים, גודל הגוף וצורתו. כך, למשל, הדרורים בצפון גדולים יותר מאלו שבדרום; הדרורים בצפון מערב היבשת ובמכסיקו כהים יותר בהשוואה לדרורים במקומות אחרים; לדרורים החיים בהוואי אין כתמים על גופם בניגוד לדרורים בכל שאר האוכלוסיות. תכונות אלה הן תורשתיות.

- מה מקורם של ההבדלים התורשתיים בין האוכלוסיות השונות?
- האם העובדה שכל הדרורים שחיים כיום באמריקה מקורם באוכלוסייה אחת שהגיעה לניו יורק, חשובה על מנת להסביר את מקור ההבדלים? הסבירו.

המצב דומה גם בבני אדם: כך, למשל, מחלות תורשתיות רבות שכיחות בקרב אנשים שחיים באזור מסוים בעולם ונדירות באזורים אחרים. לדוגמה, פנילקטונוריה (מחלה מטבולית קשה) שכיחה יותר בקרב יהודים שמוצאם מתימן. מחלת הטאי זקס (מחלה מטבולית אחרת), לעומת זאת, שכיחה יותר בקרב יהודים שמוצאם מאירופה.

- נסו להסביר את השכיחות השונה של שתי המחלות התורשתיות הללו: בהנחה שכל בני האדם מוצאם מאוכלוסייה אחת, מה יכולה להיות הסיבה לשוני בפיזור המחלות?
- פנילקטונוריה וטאי זקס שכיחות יותר בקרב יהודים מאשר בקרב האוכלוסייה הלא יהודית שחיה באותה סביבה. נסו להסביר זאת.
- אילו מחסומים מפרידים בין אוכלוסיות של בני אדם?
- היזכרו בהדמיה של השטוחדגים מפרק ו. כיצד מיוצג בהדמיה הרעיון שבאוכלוסיות נפרדות מצטברים שינויים שונים?

איך מין נולד?

- מקורם של החלזונות מטקסס הוא באוכלוסייה אחת שהופרדה לפני כשבעים שנה.
  האם, לדעתכם, הפרטים החיים באוכלוסיות המופרדות על ידי כביש שייכים לאותו מין ביולוגי?
  האם בעוד מאה דורות הם יהיו שייכים לאותו מין ביולוגי? ומה יקרה בעוד אלף דורות?
  האם יש חשיבות למספר הדורות? הסבירו.
- אם, בעוד אלף דורות ייקחו מדענים חלזונות משתי אוכלוסיות המופרדות על ידי כביש ויפגישו ביניהם, האם יוכלו הפרטים משתי האוכלוסיות להתרבות זה עם זה?

כדי להיטיב לענות על השאלות האלו נברר את המונח **מין ביולוגי**.
קרלוס לינאוס, בוטנאי שוודי שחי וחקר לפני כמאתיים וחמישים שנה, עסק באיסוף צמחים ובעלי חיים כמו רבים בתקופתו. הוא ניסה לתת שם לכל יצור חי כדי שמדענים וחובבי טבע מכל העולם יוכלו להבין זה את זה, כאשר הם עוסקים ביצורים חיים.
הדבר דומה לצורך לקטלג ספרים באופן אחיד בכל ספריות העולם. בכל ספרייה בעולם, למשל, מסומנים ספרי המדע במספרים המתחילים בספרה 5 ואילו ספרי הפסיכולוגיה – במספרים המתחילים בספרה 1. שיטה זו מאפשרת התמצאות נוחה בכל ספרייה בעולם.

לינאוס היה הראשון שפיתח שיטה לקטלוג ולמיון של יצורים חיים. לכל יצור ניתנו שני שמות, בדומה לשם פרטי ושם משפחה הנהוגים בחברה האנושית. השם הראשון ציין את ה"**סוג**" (genus) והשם השני ציין את ה"**מין**" (species). שיטה זו למתן שמות ליצורים חיים מקובלת בעולם המדעי עד היום.
על פי הגדרתו של לינאוס, יצורים השייכים לאותו המין דומים מאוד זה לזה וחולקים ביניהם תכונות רבות. יצורים השייכים לאותו הסוג דומים ביניהם, אך פחות מאשר בני אותו המין. כך, למשל, שייכים כל עצי האלון בארץ לאותו הסוג – אלון – אך אלון התבור הוא מין שונה מהאלון המצוי. גם אלון התבור וגם האלון המצוי שונים מאוד מהאורן – על כן הם נחשבים לסוג נפרד ממנו. הם חולקים ביניהם די תכונות משותפות כדי להיחשב בני אותו הסוג. עם זאת, קיימים ביניהם די הבדלים, כדי שהם ייחשבו למינים נפרדים זה מזה.

לינאוס מיין את היצורים החיים על פי תכונות **מורפולוגיות** (מבנה חיצוני) ו**אנטומיות** (מבנה פנימי).
יתרונה הגדול של דרך מיון זו היא שהיא מאפשרת למיין גם מאובנים, אך היא עלולה להטעות במקרים רבים.

- מה יכולים להיות הקשיים, כאשר מסתמכים, כמו לינאוס, רק על תכונות מורפולוגיות ואנטומיות?

כדי לענות על השאלה התבוננו בתמונות שלפניכם:

ראשן

עץ מלבלב

צפרדע

אותו עץ בשלכת

טווס זכר

טווס נקבה

- מה משותף לכל הזוגות בתמונות?

כפי שאתם יודעים, למרות ההבדלים המורפולוגיים הניכרים, הצפרדע והראשן שייכים לאותו המין, אלא שהם נמצאים בשלבי התפתחות שונים. גם הטווס הזכר והטווס הנקבה שייכים לאותו מין ביולוגי, למרות המופע הזוויגי השונה. העץ נשאר אותו מין בעונות שונות למרות המופעים השונים. לעומת דוגמאות אלה, מיני חיידקים רבים, השונים זה מזה בתכונות ביוכימיות ושייכים לשני מינים נפרדים, נראים דווקא זהים תחת המיקרוסקופ. הגדרתו של לינאוס, שהסתמכה רק על תכונות מורפולוגיות ואנטומיות, לא נתנה אם כן מענה מספק למיון יצורים בטבע.

כיום מקובל להגדיר מין על פי קריטריון של רבייה. על פי הגדרה זו, **פרטים שייכים לאותו מין ביולוגי, אם הם יכולים להתרבות זה עם זה ולהעמיד צאצאים פוריים בטבע**. כיוון שעל פי רוב מין מורכב ממספר אוכלוסיות, הרי הרבייה יכולה להתרחש בין פרטים בתוך אוכלוסייה מסוימת או בין אוכלוסיות.

יש לזכור כי ההבדלים בין יצורים שונים (בתכונות מורפולוגיות, בהתנהגות, ביכולת הרבייה וכו') הם חלק מהמגוון הקיים בטבע. לעומת זאת, ההבדל שעל פיו ייקבע אם שני יצורים יהיו שייכים לאותו המין או לשני מינים נפרדים הוא עניין של הגדרה, כלומר, פרי החלטה של בני אדם.

ראינו שבאוכלוסיות החיות בנפרד מצטברים במהלך הדורות שינויים גנטיים, המאפיינים כל אוכלוסייה. ככל שחולפים דורות רבים יותר, הולכות האוכלוסיות ונעשות שונות יותר זו מזו. האם בנקודה מסוימת הופכות האוכלוסיות לשונות זו מזו עד כדי כך שפרטים שלהן לא יוכלו להתרבות אלה עם אלה?
המדענים ביקשו לבדוק שאלה זו לגבי החלזונות בבריין. לשם כך הפגישו במעבדה בין חלזונות מאוכלוסיות החיות משני צדי הכביש. מתוצאות הניסוי הם הסיקו, שכל החלזונות בבריין שייכים לאותו המין.

- מה, לדעתכם, היו תוצאות הניסוי–האם חלזונות מאוכלוסיות שונות התרבו אלה עם אלה?
- האם, לדעתכם, תמיד יוכלו החלזונות להתרבות אלה עם אלה, גם אם ניסוי דומה ייערך בעוד אלף דורות?

השאלה אם אוכלוסיות נפרדות יכולות להפוך למינים נפרדים, שאינם יכולים להתרבות ביניהם, הטרידה מדענים רבים. אחת הדרכים לענות על שאלה זו היא באמצעות ניסוי במעבדה. באחד הניסויים לכדו מדענים זבובי פירות מאזור מסוים והביאו אותם למעבדה. הם חילקו אותם לשתי אוכלוסיות וגידלו כל אחת בנפרד במשך כמה דורות. האוכלוסיות השונות גודלו בתנאים שונים: מחצית האוכלוסיות קיבלו עמילן כמקור מזון והמחצית האחרת קיבלו את הסוכר מלטוז. כצפוי, לאחר כמה דורות נוצרו הבדלים גנטיים בין האוכלוסיות השונות. כאשר הפגישו המדענים זבובים משני סוגי האוכלוסיות, הם ראו, ש"זבובי העמילן" העדיפו להזדווג עם "זבובי עמילן" אחרים, ואילו "זבובי מלטוז" העדיפו "זבובי מלטוז". המחסום הפיזי בין האוכלוסיות הפך, אם כן, ל**מחסום רבייה**. מחסום הרבייה, שהתבטא במחסום התנהגותי של העדפה של אוכלוסיה אחת על פני השנייה, הביא ליצירת שני מינים נפרדים.

- נסו להציע הסבר מדוע במקרה של החלזונות לא נוצרו מינים חדשים ואילו במקרה של הזבובים נראה כי נוצרו מינים חדשים?
- מהם היתרונות של ניסוי כזה שנערך במעבדה על פני תצפית בטבע?

האם תזכור אותי עד שניפגש?

האם בכלל אפשר לצפות בהיווצרות מינים בטבע?
הקטע המתואר להלן הוא תיאור מקרה מרתק המשמש כאחת העדויות המרכזיות ליצירת מינים בטבע.
ה"סלמנדרות הקטנות" (Ensatina eschscholtzii) הן דו-חיים, המטילות את ביציהן ביבשה. לסלמנדרות אין ריאות, ונשימתן נעשית דרך העור בלבד. משום כך הן זקוקות לסביבה לחה ואינן שורדות באזורים צחיחים.
החוקר הראשון שחקר אוכלוסיות אלו רצה למפות את אזורי המחיה של הסלמנדרות החיות בקליפורניה. לשם כך אסף פרטים רבים מאוכלוסיות שונות. התרשים שלפניכם, המוצג על גבי תצלום לוויין של קליפורניה, מציג את ממצאיו. כל סלמנדרה בתרשים מייצגת אוכלוסייה של סלמנדרות.

מפה של פיזור אוכלוסיית הסלמנדרות בקליפורניה

1. האם אפשר למצוא סלמנדרות בכל שטח קליפורניה? הסבירו מדוע.
2. כאשר נערכה השוואה של מספר גנים בין האוכלוסיות השונות של הסלמנדרות, נמצא, שרוב התכונות הנקבעות על ידי גנים אלה משותפות לכל האוכלוסיות. על מה יכול להעיד דמיון זה?
3. האם, לדעתכם, מצא החוקר גם תכונות ייחודיות לכל אוכלוסייה? השוו, למשל, את צבע העור והדגם של הסלמנדרות החיות באוכלוסיות השונות.
4. האם אפשר לזהות "סדר" מסוים בצבע העור והדגם של הסלמנדרות? השוו את צבע העור (והדגם שעליו) של הסלמנדרות החיות בצד המזרחי של שרשרת ההרים לאלה של הסלמנדרות החיות בצד המערבי.

על סמך כל הממצאים, מה אפשר להסיק על ההתפתחות של אוכלוסיות הסלמנדרות?
החוקרים סבורים, שבמהלך השנים סלמנדרות התפשטו מאוכלוסייה אחת, אוכלוסיית המוצא, לאזורים נוספים. הדבר קרה כנראה בתקופות גשומות שאפשרו להן לעבור מאזור לאזור. בעיתות יובש נותקו האוכלוסיות אלה מאלה, וסלמנדרות לא יכלו לעבור מאוכלוסייה אחת לאחרת. כל אוכלוסייה התרכזה סביב מקור המים שלה, כך שכיום הסלמנדרות חיות באוכלוסיות נפרדות ולא בשטח רצוף.

5. בהנחה שלכל האוכלוסיות יש מוצא משותף, כיצד אפשר להסביר את קיומה של שונות בין האוכלוסיות?

כמעט בין כל שתי אוכלוסיות צמודות של סלמנדרות נמצאו "בני כלאיים", פרטים שתכונותיהם הם שילוב של תכונות משתי האוכלוסיות הסמוכות. למשל, פרטים שנמצאו בין אוכלוסייה 1 לאוכלוסייה 2 דומים בחלק מתכונותיהם לאוכלוסייה 1 ובחלק אחר לאוכלוסייה 2.

6. נסו להסביר, כיצד נוצרו בני הכלאיים?
7. על מה מעידים בני הכלאיים? האם אוכלוסייה 1 ואוכלוסייה 2 שייכות לאותו המין או לשני מינים נפרדים?
8. מדוע, לדעתכם, לא נמצאו בני כלאיים בין אוכלוסיות 1 ו–3?

החוקר המשיך לאסוף נתונים. כשבדק את שתי האוכלוסיות הדרומיות ביותר (1 ו–7), הסתבר לו ששתי אוכלוסיות אלה הן היחידות שעל אף שהן צמודות זו לזו, ונמצא שפרטים של שתיהן חולקים לעתים את אותו אזור ממש, לא נמצאו ביניהן בני כלאיים המשותפים לשתיהן. כיצד זה ייתכן?

9. נמצא שבין שתי האוכלוסיות הדרומיות (1 ו–7) קיימת השונות הגדולה ביותר מבין כל שתי אוכלוסיות שנבדקו. האם יש קשר בין השונות הגדולה לבין העובדה שלא נמצאו ביניהן בני כלאיים?
10. האם ייתכן, ששתי האוכלוסיות הדרומיות שייכות לשני מינים נפרדים? נמקו את תשובתכם.
11. בהנחה שלכל האוכלוסיות יש מוצא משותף, על מה מעידה העובדה שבין האוכלוסיות הדרומיות יש השונות הגדולה ביותר?
12. נסו לשער, היכן הייתה ממוקמת אוכלוסיית המוצא שממנה נוצרו כל האוכלוסיות? הסבירו את תשובתכם.

13. מה, לדעתכם, יקרה בעתיד לשתי האוכלוסיות הדרומיות, האם השונות ביניהן תגדל, תקטן או תישאר כפי שהיא? הסבירו.

14. מה יקרה אם מדענים ינסו להכליא במעבדה זכר ונקבה, שכל אחד מהם שייך לאוכלוסיה דרומית אחרת? האם יצליחו? האם זה משנה את תשובתכם לשאלה 10?

לסיכום, על פי הממצאים, אפשר לקבוע כי אוכלוסיות הסלמנדרות בקליפורניה מתפצלות לפחות לשני מינים נפרדים. זוהי דוגמה מאלפת להיווצרות מינים חדשים בטבע, הנעשית בדרך של הצטברות הדרגתית של שינויים. המדענים משערים שבעבר היה מין אחד של סלמנדרות, שחי בצפון קליפורניה והתפשט בצורה מעגלית: בשנים גשומות, שבהן היובש לא הגביל את תנועת הסלמנדרות, התפשטה האוכלוסייה דרומה בשני מסלולים שביניהם הפריד עמק: המזרחי והמערבי. בתקופות יובש נוצרה הפרדה בין אוכלוסיות, וכל אוכלוסייה הצטמצמה למקווה המים שלה. בכל אוכלוסייה הצטברו שינויים אופייניים לה (כתוצאה מהופעה של תכונות חדשות, ברירה טבעית וסחיפה גנטית). תוך כדי ההתפשטות מצפון לדרום הצטברו יותר ויותר שינויים. כאשר נפגשו שתי האוכלוסיות הדרומיות ביותר (בקצה רכס ההרים), נסגר המעגל, אך האוכלוסיות שנפגשו היו כה שונות זו מזו עד שלא יכלו להתרבות ביניהן למרות קרבתן הפיזית.

בכל המקרים שלמדנו עד כה (החלזונות, הזבובים והסלמנדרות) **המחסום הגאוגרפי** של האוכלוסיות הוביל ליצירת שונות גדולה ולעתים ליצירת מינים. מחסום גאוגרפי כזה יכול להיווצר על ידי שרשרת הרים, חומה, נהר, כביש או אפילו הפרדה בין-יבשתית.
האם כל מחסום רבייה חייב להיות מחסום גאוגרפי?

לא! קיימים מקרים בהם פרטים חולקים אותו אזור מחיה (כלומר, אין ביניהם מחסום גיאוגרפי) ואף על פי כן הם אינם יכולים להתרבות ביניהם.

אם הפרטים שנמצאים באותו מקום גיאוגרפי אינם פעילים באותו הזמן (אלא בשעות אחרות של היממה או בעונות שונות), יש ביניהם **מחסום בזמן** (גם אם תאי המין שלהם לא מבשילים באותו הזמן זהו מחסום בזמן). דוגמה לכך היא הדבורנית: דבורנית דינסמור פורחת בחודשים פברואר- מארס, ואילו הדבורנית הנאה פורחת במארס-אפריל. הבדל זה בזמני הפריחה מונע רבייה ביניהן.

אם הפרטים נמצאים באותו מקום גיאוגרפי, פעילים באותו הזמן אך אינם "רוצים" להזדווג ביניהם, הרי שיש ביניהם **מחסום התנהגותי**. ראינו, למשל, את זבובי העמילן וזבובי המלטוז שהעדיפו להזדווג עם פרטים בני אותה קבוצה. העדפה שונה של בני זוג יכולה לנבוע מכך שפרטים מקבוצה מסוימת אינם מזהים את שפת החיזור של הפרטים מקבוצה אחרת.

לעיתים בין הפרטים קיים **מחסום אנטומי**. איברי הרבייה או תאי המין שלהם אינם מתאימים זה לזה. ישנו גם **מחסום כרומוזומלי וגנטי**, שגורם לכך, שבגלל אי התאמה במערכות הכרומוזומים, לא נוצרים צאצאים או שהצאצאים שנוצרים אינם פוריים בעצמם (כמו במקרה של החמור והסוס).

שאלות לסיכום

1 אוכלוסיות של ציפורים (כמו בעלי חיים אחרים) יכולות להיבדל זו מזו במספר הצאצאים. ירגזים החיים בישראל מטילים כחמש ביצים בממוצע בכל תטולה. אותו מין של ירגזי בצפון אירופה יטיל בממוצע עשר ביצים בכל תטולה. בהנחה שיש לירגזים בשני המקומות מוצא משותף, נסו לשער כיצד נוצרה השונות במספר הצאצאים?

2 השונות בין שתי אוכלוסיות הירגזים מדגימה את אחד הרעיונות המדעיים שלמדתם בפרק זה. מהו?

3 ככל שהשתכללה יכולתו של האדם להכליא מינים באופן מלאכותי, הוא הצליח להתגבר על מחסומים שמונעים רבייה בין מינים בטבע. כך, למשל, ה"יעז" הוא תוצר הכלאה של עז עם יעל, והנקטרינה ("אפרשזיף") היא תוצר הכלאה של שזיף עם אפרסק. שניהם פותחו על ידי האדם בצורה מלאכותית ואינם מצויים בטבע. האם היעל והעז שייכים לאותו המין או שהם מינים נפרדים? האם האפרסק והשזיף שייכים לאותו המין או שהם מינים נפרדים? הסבירו.

4 בישראל מוקם כביש חוצה ישראל. זהו כביש אורך ארצי באורך של שלוש מאות קילומטרים שאמור להשתרע מהגליל בצפון ועד דרומית לבאר-שבע.

א. האם כביש חוצה ישראל יכול להוות מחסום גאוגרפי עבור מינים ביולוגיים?

ב. האם הכביש יהווה מחסום גאוגרפי עבור **כל** המינים הביולוגיים?

ג. האם כביש חוצה ישראל יגרום, לדעתכם, להיווצרות מינים חדשים?

5 בעין גדי קיימים שני מינים של קוצנים (סוג של מכרסם): קוצן מצוי (Acomys cahirinus) וקוצן זהוב (Acomys russatus). שני המינים נבדלים ביניהם בשעות הפעילות: פרטים ממין אחד הם פעילי יום ואילו פרטים מהמין השני הם פעילי לילה. האם ייתכן שמקורם של שני המינים באוכלוסייה אחת שהתפצלה לשניים? הציעו השערה, כיצד נוצרו שני המינים?

5 מספר המינים החיים כיום על-פני כדור הארץ **גדול יותר** מאשר מספר המינים שחיו על פני כדור הארץ בתקופות קדומות יותר, כגון בתקופה שלפני 20 מיליון שנים. מהם הגורמים שהביאו לעלייה במספר המינים על-פני כדור הארץ?

סיכום

בפרק זה למדנו כי כאשר משווים בין אוכלוסיות שונות של פרטים השייכים לאותו המין, מוצאים, שכל אוכלוסייה מאופיינת על ידי תכונות שונות. במהלך הדורות מצטברים יותר ויותר שינויים בכל אוכלוסייה בנפרד, עד שלעתים נוצרים מינים נפרדים.
מחסומי רבייה יכולים להיות מחסומים גיאוגרפיים, אקולוגיים, התנהגותיים, אנטומיים וגנטיים.
מטבע הדברים, בגלל פרקי הזמן הארוכים שבהם מדובר, קשה לצפות בהיווצרותם של מינים בטבע. למרות זאת, קיימות תצפיות של יצורים בטבע (כמו הסלמנדרות בקליפורניה) וכן עדויות מעבדתיות רבות (כמו הניסוי בזבובי הפירות) התומכות בתהליך זה.
הגדרת המין של לינאוס התבססה על תכונות מורפולוגיות ואנטומיות. הגדרת המין המקובלת כיום, מבוססת על היכולת להתרבות בטבע ולהעמיד צאצאים פוריים אך יש לזכור, כי לא כל היצורים בטבע מתרבים בדרך של רבייה זוויגית.

הברירה הטבעית והסחיפה הגנטית יכולות להסביר לא רק את השינויים המתרחשים בהרכבן של אוכלוסיות, אלא גם את מגוון המינים הקיים בטבע.

הפעולות האטיות והמתמשכות של הברירה הטבעית ושל הסחיפה הגנטית מוסיפות להתרחש. הן פועלות על תכונות חדשות כל הזמן, בתנאי סביבה שונים ומשתנים ויחד עם מחסומי הרבייה השונים מביאות ליצירה מתמדת של מינים חדשים ומגוונים.

החלזונות בטקסס החלו לפני שבעים שנה כמין אחד. יתכן שבעוד דורות רבים, בעקבות הופעת תכונות חדשות ובעקבות תהליכים של ברירה טבעית ושל סחיפה גנטית, נמצא בטקסס מינים שונים של חלזונות, שמקורם באוכלוסייה אחת שהופרדה על ידי הכבישים. קרוב לוודאי שלא ניתן יהיה לזהות בדיוק את רגע הפיצול לשני מינים נפרדים. ייתכן שאם מחסום הרבייה הגאוגרפי (הכביש) יוסר בשלב כלשהו, לא ייווצר מין חדש. עם זאת, ייתכן, כמו במקרה הסלמנדרות, שמפגש של שתי אוכלוסיות לאחר דורות רבים ושינויים שהצטברו בנפרד לא יניבו רבייה בין פרטים משתי האוכלוסיות, כיוון שיווצרו מינים נפרדים.

מפת למידה:

פרק ד
כשהסביבה משתנה, הכשירות של הפרטים יכולה להשתנות.
אוכלוסיות בטבע נתונות ללחצי ברירה שונים הפועלים עליהן בו–זמנית, לפעמים בכיוונים מנוגדים. תהליך הברירה הטבעית מתרחש ללא מטרה מוגדרת מראש וללא יד מכוונת.

פרק ו
שינויים קטנים המתרחשים במהלך הדורות יכולים להצטבר, כך שבסופו של דבר צאצאי הצאצאים יכולים להיות מורכבים מאוד ושונים מאוד מהוריהם.
השינויים מצטברים במשך מיליוני שנה (דורות רבים).
גילו המופלג של כדור הארץ (4.5 ביליון שנה), שנקבע בשיטה של תיארוך רדיואקטיבי, תומך במנגנון כזה.

פרקים א–ג
תהליך **הברירה הטבעית** מספק את המנגנון לאבולוציה: בכל אוכלוסייה קיימת שונות. תכונות תורשתיות המקנות לפרטים מסוימים יתרון על פני אחרים בהישרדות וברבייה, יעברו לצאצאיהם ויקנו גם להם יתרון דומה. לכן, עם הזמן תעלה שכיחותם היחסית של הפרטים בעלי התכונות המקנות יתרון.

פרק ח
אוכלוסיות נפרדות של פרטים השייכים לאותו המין מאופיינות על ידי תכונות שונות.
הפעולה של הברירה הטבעית ושל הסחיפה הגנטית על תכונות חדשות ובתנאי סביבה שונים ומשתנים, במשך מיליוני שנים, מביאה ליצירה מתמדת של מינים חדשים ומגוונים.

פרק ה
תכונות תורשתיות חדשות נוצרות כל הזמן כתוצאה ממוטציות של גנים בתאי הרבייה או כתוצאה של צירופים חדשים של גנים קיימים (ברבייה זוויגית). מוטציות מתרחשות בדרך כלל בתדירות נמוכה, ורק אם הן קורות בתאי המין, הן עוברות בתורשה.
תכונות תורשתיות חדשות הן אקראיות: יש כאלה המביאות ליכולות חדשות ואף משופרות, יש הגורמות להפחתה ביכולות ואחרות אינן מעלות ואינן מורידות.

פרק ז
הברירה הטבעית אינה בנייה מחדש אלא מתרחשת בשלבים. כל שלב מסתמך על השלב הקודם, ומשום כך התוצאה היא לפעמים פשרה ואינה מושלמת.
גם תכונות שאינן מקנות יתרון יכולות לשרוד:
במקביל לברירה הטבעית קיימת **סחיפה גנטית** שפועלת באופן אקראי, שאינו קשור להתאמה לסביבה. היא משפיעה בעיקר על אוכלוסיות קטנות.

מונחים שנלמדו בפרק:

מין ביולוגי

מחסום רבייה

פרק ט' כיצד אפשר להסביר את הדמיון בין יצורים חיים?

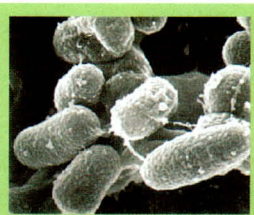
בין שני מיני הסלמנדרות הדרומיות, שראינו בפרק הקודם, קיים דמיון עצום. הסיבה לכך היא שלשני המינים יש מוצא משותף או "אב קדום" משותף.

סלמנדרה מאוכלוסייה 1

סלמנדרה מאוכלוסייה 7

דמיון רב אפשר למצוא גם בין הסלמנדרות השייכות למחלקת הדו-חיים לבין הזיקית, החרדון והנחש השייכים למחלקת הזוחלים: כיצד נוכל להסביר את הדמיון הזה?

מפתיע יותר שגם בין יצורים שונים לחלוטין למראית עין, אפשר למצוא דמיון. למעשה, קיימים מבנים המשותפים לכל היצורים החיים - בעלי חיים, צמחים, פטריות ואפילו חיידקים.



כך, לדוגמה, מורכבים **כל** היצורים החיים מתאים, ואת התאים מקיף קרום העשוי משכבה פוספוליפידית (שומנית) כפולה. גם אברונים רבים בתוך התא משותפים לכל היצורים, או לחלק ניכר מהם, כמו הריבוזומים שבהם נוצרים החלבונים, או המיטוכונדריה שבהם מופקת אנרגיה בתהליך הנשימה התאית.

בכל התאים החיים מצוי אותו החומר התורשתי (DNA), אותה מולקולה המובילה אנרגיה זמינה (ATP) וחלבונים רבים (למשל, החלבון ציטוכרום C הפעיל בתהליך הנשימה).
תהליכים רבים, כמו שכפול ה-DNA ותרגום ה-DNA לחלבונים, משותפים לכל היצורים החיים. תהליך ההפריה של תא נקבי על ידי תא זכרי משותף לכל היצורים המתרבים ברבייה זוויגית.

- האם הדמיון הזה מקרי, לדעתכם, או שאינו מקרי?
- כיצד תסבירו את קיומם של המבנים המשותפים הללו?

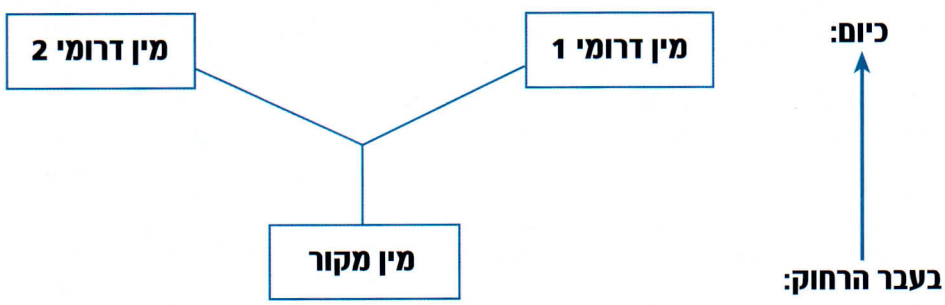
במחקר שנערך בין תלמידי תיכון בארץ ניתנו כמה הסברים לדמיון בין יצורים:
היו שהסבירו שהדמיון הקיים במבנים המשותפים בכל היצורים החיים נובע מהעובדה שרק מבנים אלו יכולים לאפשר קיום בתנאים השוררים על פני כדור הארץ. לכן, התפתחו, במקביל, מבנים דומים אצל מרבית היצורים החיים.
אחרים הסבירו את הדמיון כך: לחלק מהיצורים, או אפילו לכולם, היה "אב קדום" משותף. מאותו "אב קדום" משותף התפתחו יצורים חיים רבים, ובמהלך האבולוציה שרדו חלק מהמבנים המשותפים והתפתחו חדשים.

בפעילות הבאה נבחן הצעות שונות לתהליך ההתפתחות של יצורים על פני כדור הארץ מאז ראשית החיים. בעקבות הפעילות נחזור וננסה להסביר את הדמיון בין היצורים.

שורשים

בתקופות שונות של ההיסטוריה המדעית ניסו מדענים לתאר את התפתחות המינים מראשית החיים ועד ימינו. ההסברים השונים מוצגים לפניכם בצורה גרפית בדומה לעצי משפחה שעושים בני מצווה. מובן שלא יכולנו לכלול באיורים את כל היצורים, שחיו מראשית החיים ועד ימינו על פני כדור הארץ, ולכן הסתפקנו בנציגים בלבד.
הקו הרציף באיורים מציין הצטברות של שינויים בתכונות לאורך הזמן (כתוצאה מתהליכי מוטציה, ברירה וסחיפה). נקודת פיצול מציינת יצירת מינים חדשים. יצורים שנמצאים מעבר לנקודת הפיצול אינם יכולים להתרבות ביניהם.

נדגים זאת בעזרת הסלמנדרות מקליפורניה:



תרגול בקבוצות:

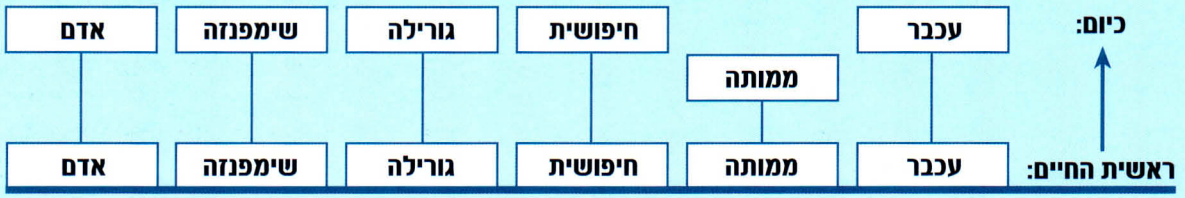
לפניכם מספר מודלים. זהו את הרעיונות המרכזיים שבבסיס כל מודל ובחרו את המודל הנכון ביותר לדעתכם.

לגבי כל אחד מהמודלים שדחיתם, ציינו מדוע החלטתם לדחותו.

נסו לשלב בהסבריכם תופעות או עדויות שאתם מכירים מעולם החי והצומח.

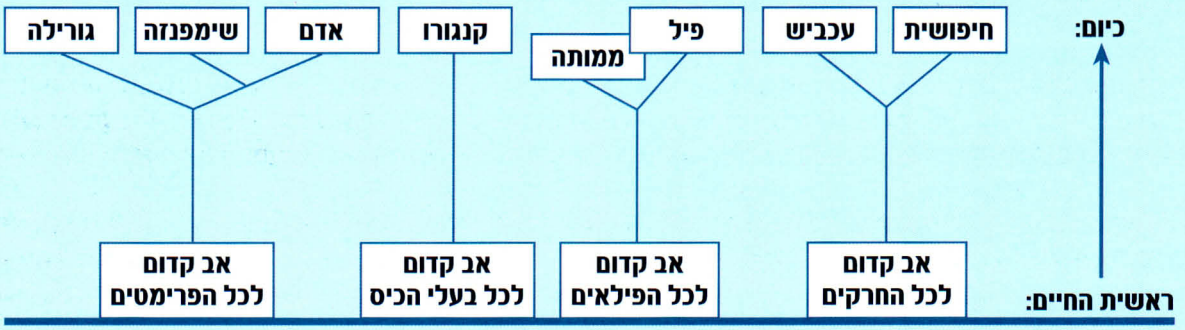
מודל מרובה התחלות

לפי מודל זה, כל מין שחי כיום, קיים מיום שהופיעו יצורים חיים לראשונה. מאז נכחדו מינים (כמו הממותה), אבל לא נוצרו מינים חדשים. על פי מודל זה אין מוצא משותף ליצורים החיים.



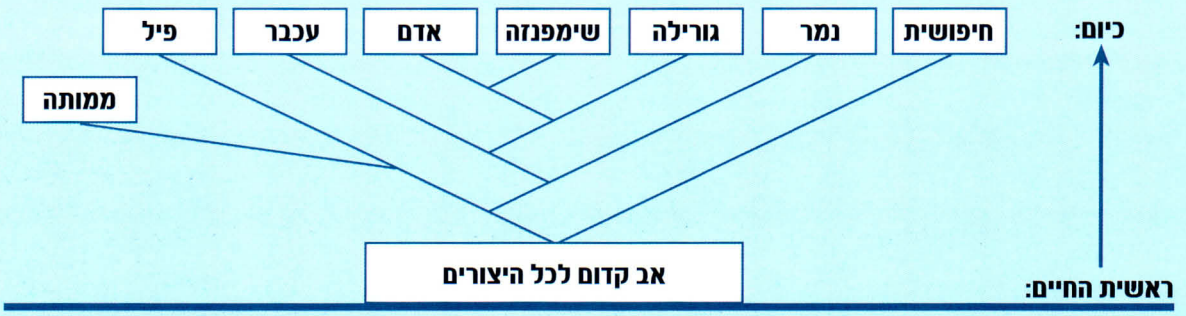
מודל הקבוצות

לפי מודל זה, כל קבוצה של מינים קרובים שחיה כיום למשל, יונקים, זוחלים או עופות התפתחה ממין קדום אחר: לכל היונקים היה אב קדום אחד, לכל הזוחלים אב קדום אחר ולכל העופות אב קדום שלישי. לפי מודל זה אין מוצא אחד שמשותף לכל הקבוצות. לכל קבוצה מוצא משותף אחר, שממנו התפצלו כל היצורים בקבוצה. בכל קבוצה בנפרד מתפתחים מינים ונכחדים מינים.



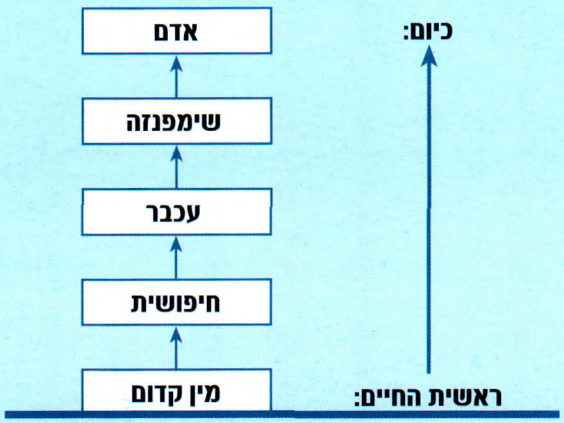
מודל ה"שיח"

לפי מודל זה, התפתחות היצורים החיים דומה לשיח שבו מין קדום אחד היווה מוצא לכל המינים וממנו התפצלו כל היצורים. במהלך האבולוציה נוצרים מינים ונכחדים מינים.
חלק מהמינים המוצגים באיור נכחדו, וקו ההתפתחות שלהם לא מגיע עד ימינו, כמו הממותה. חלק מהיצורים התפצלו מוקדם, כמו החיפושית באיור, וחלק הם תוצאה של התפצלות חדשה יחסית, כמו השימפנזה והאדם.



מודל ה"סולם"

לפי מודל זה, התפתחות היצורים החיים דומה לשלבים בסולם, שבו מין קדום אחד היווה "מוצא" (התחלה) לכל המינים וכל מין חדש התפתח ישירות ממין שקדם לו. במהלך האבולוציה שלבים נמוכים הוחלפו בשלבים גבוהים. האדם נמצא בראש ה"סולם".



בוודאי שמתם לב כי מספר האבות הקדומים, שמהם התפתחו היצורים החיים, שונה בכל אחד מהמודלים. על פי מודל ה"סולם" ומודל "השיח" היה אב קדום משותף אחד לכל היצורים. על פי "מודל הקבוצות" היה אב קדום משותף לכל קבוצה של יצורים קרובים. על פי המודל "מרובה ההתחלות" אין אף אב קדום משותף ליצורים החיים: כל יצור התפתח בנפרד מאב קדום אחר.

האם צריך להכליל את תפוח האדמה בצוואה שלנו?

מודלים במבחן

מטרת התרגיל הבא היא לבדוק איזה מהמודלים מסביר טוב יותר תופעות ותצפיות, ולכן סביר יותר. נתמקד בשאלה מכמה אבות קדומים התפתחו היצורים החיים.

ההתלבטות איזה מן המודלים משקף בצורה הנכונה ביותר את התפתחות המינים היא דוגמה לתהליך חשיבה של מדענים המתלבטים בין רעיונות שונים. פעמים רבות בהתלבטויות מסוג זה נעזרים המדענים בניסויים או בתצפיות כדי להחליט אם לקבל הסבר או לדחותו. בנושא ההתפתחות האבולוציונית קשה לערוך ניסויים, האירועים מתרחשים בדרך כלל במשך שנים רבות, ורבים מהם כבר אירעו בעבר ולכן אי אפשר לעקוב אחריהם. אנו נאלצים להסתפק, אם כן, בעדויות בלתי ישירות.
נסו להיות לרגע מדענים הנדרשים לשקול הסברים שונים בעזרת תופעות המובאות בפניהם.

לפניכם מספר תופעות. לגבי כל תופעה, בדקו אם אפשר להסבירה באמצעות קיומו של אב קדמון יחיד משותף לכל היצורים, אב קדמון משותף לכל קבוצה של יצורים קרובים או התפתחות מינים באופן נפרד ללא אב קדמון משותף. אם אי–אפשר להסביר את התופעה, נסו לקבוע אם התופעה סותרת את הרעיון או רק "לא תומכת" בו.

את מסקנותיכם רשמו בטבלה בעמ' 90.

1. **מאפיינים ייחודיים לקבוצות של יצורים:** לקבוצות יצורים (חרקים, יונקים, זוחלים וכו׳) יש מאפיינים ייחודיים השונים מאוד מקבוצות אחרות גם במבנה הפנימי וגם במבנה החיצוני.
החרקים, למשל, נושמים דרך טרכאות (צינורות נשימה), הם בעלי מערכת דם פתוחה, ומתפתחים בדרך של גלגול. בכך הם שונים מאוד מהיונקים הנושמים דרך ריאות, יש להם מערכת דם סגורה והם מתפתחים באופן רציף.

2. **דמיון למרות המגוון:** גם בין יצורים שונים מאוד מבחינה חיצונית קיים דמיון. לדוגמה, כל היצורים בנויים מתאים, ובהם אפשר לראות אברונים דומים, ובכל היצורים מבנה החומר התורשתי זהה והדרך שבה מתורגמות ההוראות ב-DNA לחלבונים זהה.

3. **חוסר שלמות בטבע:** ביצורים מקבוצות שונות אפשר למצוא מבנים חסרי שימוש. לאדם, לדוגמה, יש עצם זנב אף-על-פי שהאדם, כידוע, לא נושא זנב. בלווייתנים וגם בנחשים קיימת חגורת גפיים, אף-על-פי שאינם הולכים. פעמים רבות יש ליצורים חיים תכונות או מבנים שלא די בכך שהם חסרי שימוש אלא עלולים להזיק, כמו ההצלבה בין קנה הנשימה ודרכי הבליעה באדם.

4. **יצורים בעלי תכונות שאופייניות לכמה קבוצות:** קיימים יצורים בעלי תכונות המשייכות אותם, לכאורה, לקבוצות שונות של יצורים. ההידרה, למשל, הנו יצור רב-תאי זעיר בעל תכונות רבות האופייניות לבעלי חיים כמו תא חסר דופן וחוסר יכולת לבצע פוטוסינתזה. יחד עם זאת, הוא מסוגל להתרבות על ידי הנצה אל-זוויגית בדומה לצמחים. לברווזן (פלטיפוס), שחי על גדות נחלים בדרום אוסטרליה, יש בלוטות חלב ושיער בדומה ליונקים (ולכן הוא נחשב ליונק), אך הוא גם בעל פתח (ביב) משותף להפרשות ולמערכת המין, והוא מטיל ביצים בעלות קליפה בדומה לעופות ולזוחלים.
הצפרדעים (כמו כל הדו-חיים), חיות במים בשלבי חייהן הראשונים ונושמות בעזרת זימים בדומה לדגים, ואילו בוגריהן נושמים אוויר חופשי בעזרת ריאות בדומה לזוחלים, לעופות וליונקים.

הידרה

ברווזן

5. **מאובני ביניים:** מאובנים הם שרידים של יצורים שאפשר בעזרתם ללמוד על יצורים שחיו בעבר. בין המאובנים שנמצאו ישנם מאובנים שנראים כמו ״יצורי כלאיים״ כיוון שיש להם תכונות המאפיינות שתי קבוצות שונות של יצורים. לדוגמה, נמצאו מספר מאובנים של יצור הנקרא ארכאופטריקס (Archaeopteryx), שהיה בעל זנב ושיניים כשל זוחל ונוצות ומקור כשל עוף.
בדרך כלל איברים פנימיים ורקמות רכות של יצורים אינם נשמרים במאובנים. למרות זאת, לפני כעשר שנים התגלה בארצות הברית שלד של דינוזאור, אשר בבית החזה שלו נמצאה בליטה, שמיקומה דומה לזה של לב הזוחלים. סריקה טומוגרפית (CT) הראתה שהלב של הדינוזאור היה מחולק לארבעה חלקים בדומה ללב העופות והיונקים ולא לשלושה חלקים כמו לב הזוחלים.

ארכאופטריקס

6. **מחסור במאובני ביניים:** לא נמצאו מאובנים שיתמכו בקשר בין כל הקבוצות הקיימות. לא נמצאו, למשל, מאובנים שייצגו את היצורים המהווים חוליות מקשרות בין הדגים לדו-חיים או בין הדו-חיים לזוחלים.

התופעה	רעיון האב הקדמון המשותף לכל היצורים (מודל ה"שיח" ומודל ה"סולם")	רעיון האב הקדמון המשותף ליצורים קרובים (מודל "הקבוצות")	התפתחות נפרדת לחלוטין של היצורים (מודל "מרובה התחלות")
1. מאפיינים ייחודיים לקבוצות של יצורים			
2. דמיון למרות המגוון			
3. חוסר שלמות (ואף "שלומיאליות") בטבע			
4. עדויות חיות			
5. מאובני ביניים			
6. מחסור במאובני ביניים			

סיכום התרגיל

- התבוננו בטבלה ובחרו במודל הסביר ביותר, לדעתכם (כזה שאפשר להסביר בעזרתו את כל התופעות שבחנו).
- האם שיניתם את דעתכם בעקבות בדיקת העובדות והתופעות השונות? אם כן, מה שכנע אתכם?

מדענים סבורים, שהרעיון המתאר בצורה הטובה ביותר את התפתחות המינים מראשית החיים ועד ימינו הוא הרעיון של אב קדמון משותף **לכל** היצורים (מוצא משותף). מבין שני המודלים שטוענים למוצא משותף, מקבלים המדענים את המודל שצורתו כשל שיח המסתעף מנקודה משותפת (המודל שקראנו לו מודל ה"שיח").
מודל ה"סולם" סביר פחות, לדעת המדענים. על פי מודל זה, מינים "ישנים" מוחלפים במינים "חדשים" משוכללים יותר, אך כפי שראינו, כשמתפצלים שני מינים חדשים מאב קדמון משותף, שני המינים מתקיימים במקביל, זה לצד זה. שני מיני הסלמנדרות בדרום קליפורניה, למשל, לא החליפו זה את זה, ושניהם מתקיימים זה לצד זה. מודל ה"סולם" מתקשה, אם כן, להסביר את העובדה שיצורים ממינים שונים כמו, למשל, קופים ובני אדם (ועל אחת כמה וכמה חיידקים ובני אדם) חיים בו-זמנית על פני כדור הארץ.

כל "ענף" במודל ה"שיח" מייצג הצטברות הדרגתית של שינויים לאורך זמן **באותו** המין וכל פיצול מייצג נקודה שבה הצטברו שינויים כה רבים עד שנוצרו **שני מינים** שונים. בנקודת הפיצול נמצא, למעשה, **אב קדמון** משותף לשני מינים.

רעיון האב הקדמון המשותף הוצע לראשונה על ידי צ'ארלס דארווין בספרו **מוצא המינים** בהסתמכו על הדמיון הקיים בין כל היצורים ועל חוסר השלמות בטבע. במהלך השנים הרעיון התבסס יותר ויותר בעזרת עדויות נוספות. עדויות אלו כוללות גילוי מאובנים נוספים או השוואת רצף הגנום האנושי לגנומים של יצורים אחרים, והן ממשיכות להיאסף גם בימינו.

המודל כולל מספר עקרונות:

1. כל מין, מאובן או כזה שחי כיום, נוצר כתוצאה משינוי במין אחר שקדם לו.
2. שינויים ביצורים חיים הם הדרגתיים ומתרחשים לאורך דורות רבים.
3. הברירה הטבעית והסחיפה הגנטית, בתנאי סביבה שונים ומשתנים, בצד הופעה אקראית של תכונות גנטיות (כתוצאה ממוטציות ומרבייה זוויגית) מביאות להתפצלות למינים חדשים.
4. כל היצורים החיים – בעלי חיים, צמחים ומיקרואורגניזמים – התחילו מיצור אחד פשוט שהיה למעשה האב הקדמון המשותף לכל היצורים.
5. נקודת הפיצול בין שני יצורים, שדומים יותר זה לזה (למשל, שימפנזה ואדם), התרחשה מאוחר יותר בהיסטוריה של היצורים החיים בהשוואה לנקודת הפיצול בין שני יצורים שדומים פחות (כמו חיפושית ואדם). כלומר, שימפנזה ואדם חולקים ביניהם אב קדמון מאוחר יחסית לאב הקדמון המשותף לחיפושית ואדם. במילים אחרות, השימפנזה והאדם קרובים יותר זה לזה מבחינה אבולוציונית בהשוואה לחיפושית ולאדם.
6. חלק מהמינים החיים כיום דומים מאוד למינים קדומים שחיו בעבר, חלק מהמינים שחיו בעבר נכחדו לחלוטין וחלק התפצלו פעמים רבות כך שנוצרו יצורים מורכבים ביותר.
7. המנגנונים שהביאו בעבר להתפצלות מינים מחד ולהכחדת מינים מאידך פועלים גם היום.

- ביבשת אוסטרליה התפתחו יונקי הכיס. לעומת זאת יונקים בעלי שליה לא התפתחו ביבשת זו (היום אפשר למצוא יונקי שליה ביבשת אוסטרליה, אך אלו הובאו אליה ממקומות אחרים על ידי האדם). כיצד תסבירו עובדה זו?

מדענים סבורים, שבשלב מסויים בהתפתחות החיים על פני כדור הארץ היו כל היבשות מחוברות זו לזו ליבשת ענק הקרויה פנגיאה. בגלל תנועת הלוחות הטקטוניים המרכיבים את פני כדור הארץ, הופרדה פנגיאה ליבשות אחדות. ההפרדה גרמה להיווצרות מחסומים גאוגרפיים בלתי עבירים. מעריכים כי ההפרדה התרחשה לפני כמאתיים מיליון שנה, בתקופה שבה החלו להופיע היונקים הראשונים.

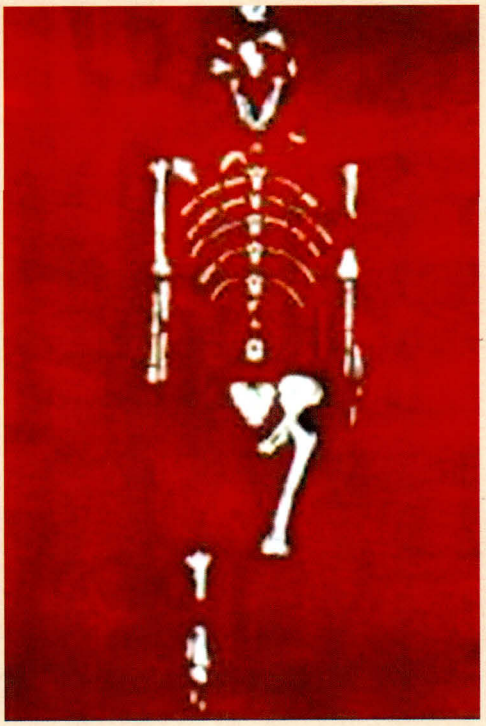
- אם היה אפשר לחזור לראשית החיים ולהתחיל מחדש את ההתפתחות האבולוציונית של המינים, האם, לדעתכם, היו נוצרים אותם המינים שקיימים היום?

ומה על התפתחות האדם?

האדם המודרני, הקיים כיום על פני כדור הארץ על כל גזעיו המגוונים, שייך למין אחד – **הומו סאפיינס**. ככל המינים המצויים על פני כדור הארץ כיום, גם מין זה הוא תולדה של מינים קדומים יותר, שאת שרידיהם אפשר למצוא כמאובנים המלמדים אותנו על המבנה שלהם ועל אורחות חייהם. התפתחות האדם, בדומה להתפתחות שאר היצורים, היא תוצאה של הצטברות שינויים רבים לאורך דורות.
אחד מאבותיו הקדומים של האדם הוא המין הנקרא **הומו ארקטוס**. הוא הלך זקוף כמונו וגובהו היה דומה לשלנו. הוא השתמש במגוון גדול של כלי אבן וידע לנצל את האש. מאובנים שלו נמצאים בכל אפריקה ואף מחוצה לה, במגוון של אזורי אקלים וצמחיה, ומכאן שהוא הצליח להתיישב בנישות אקולוגיות מגוונות, כנראה בזכות יכולותיו הטכנולוגיות. אבל למרות הדמיון להומו סאפיינס, אפשר למצוא בו גם שוני רב. נפח מוחו היה קטן בהרבה משלנו (והגיע ל–900–1,000 סמ"ק), פניו היו בולטות יותר ואף צורת הגולגולת שלו דמתה יותר לזו של שימפנזה. הוא חי עד לפני כ–500,000 שנה. בעמוד 95 מופיע תרשים שמתאר את התפתחות האדם.

מאובן האדם המפורסם ביותר שנמצא עד כה הוא של אישה שנמצאה באתיופיה ומכונה "לוסי". לוסי שייכת למין שנקרא "קוף האדם הדרומי" (**אוסטרלופיתקוס אפארנזיס**).

האוסטרלופיתקוס – ציור משוער על פי מאובנים

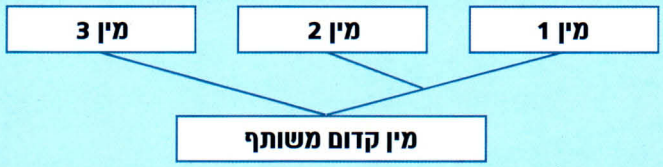


השלד של "לוסי" (מלפני 3.5 מליון שנה)

האוסטרלופיתקים אופיינו ביכולת הליכה על שתיים, גובהם הגיע לכ–1.35 מטר ונפח מוחם היה כשליש מנפח הגולגולת של האדם המודרני (400–500 סמ"ק). לסתותיהם בלטו קדימה, בדומה לשימפנזה.

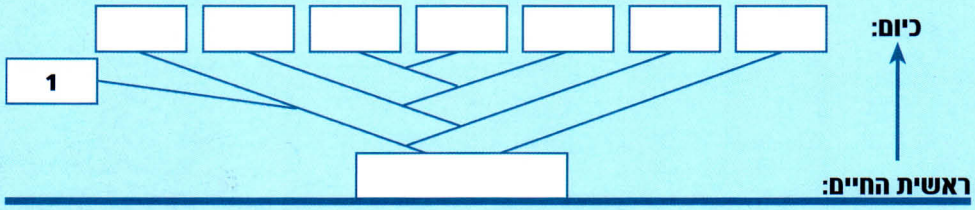
שאלות לסיכום

1 לפניכם קטע ממודל ה"שיח" המסתעף ובו שלושה מינים:

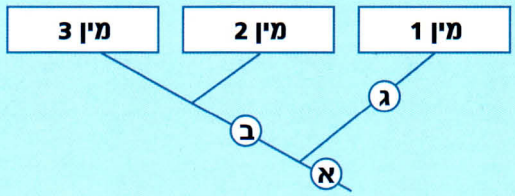


אילו מהמינים חולקים ביניהם, קרוב לודאי, יותר תכונות משותפות, 1–2, 1–3 או 2–3? הסבירו את תשובתכם.

2 מדוע, לדעתכם, מינים מסוימים, כדוגמת המין המסומן בספרה 1 במודל שלפנינו, אינם נמצאים בקו אחד עם שאר המינים? הביאו דוגמאות למינים כאלו.



3 לפניכם קטע ממודל ה"שיח" המתאר הופעה של שלוש מוטציות (א, ב, ג) ושלושה מינים בני זמננו. ב–DNA של מי מבין שלושת המינים, לדעתכם, יש סיכוי שתימצא כל מוטציה?



4 כיצד מסביר מודל ה"שיח" המסתעף מאב קדמון יחיד לכל היצורים את התופעה שלקבוצות יצורים יש מאפיינים ייחודיים השונים מאוד מקבוצות אחרות (החרקים, למשל, נושמים דרך טרכאות בעוד שהיונקים נושמים דרך ריאות)?

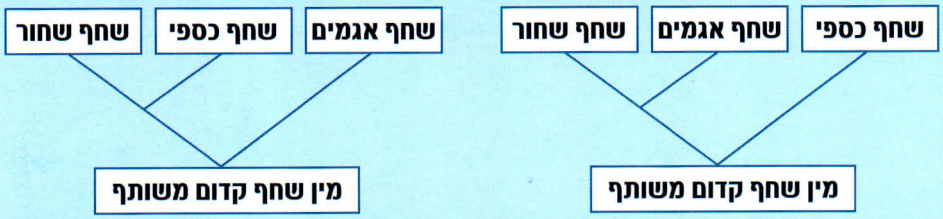
5 נתבונן בשני מינים שונים של שחף החיים בקוטב הצפוני – השחף הכספי והשחף השחור.

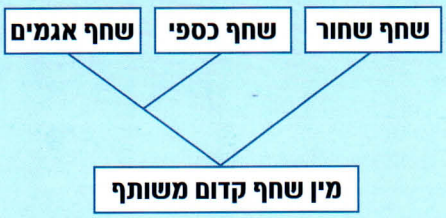
שחף כספי

שחף שחור

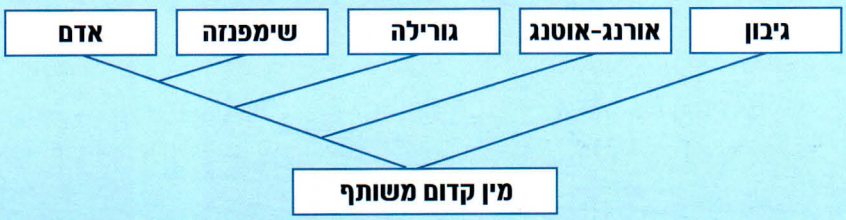
שני מיני השחף התפצלו מאב קדמון משותף, שחי בעבר באזור הקוטב הצפוני. מחסום גאוגרפי גרם לפיצול האוכלוסייה של אותו אב קדמון. במשך הדורות הצטברו שינויים בכל אחת מהאוכלוסיות, עד שנוצרו שני מינים שונים.
אפשר לתאר חלק מהשיח האבולוציוני שלהם באופן המתואר להלן:

א. מה מייצגת נקודה מספר 1?
ב. מה מציינים הקווים?
ג. הביאו דוגמה לשינויים שיכולים היו לחול לאורך הקווים.
ד. האם, לדעתכם, יכולים מדענים לקבוע בוודאות מתי התרחשה נקודת הפיצול? מדוע?
ה. מה ההבדל בין יצור שנמצא בקצה העליון של הקו המקשר בין המינים לבין יצור שנמצא קרוב יותר לנקודת הפיצול?
ו. בארץ אפשר למצוא מין נוסף של שחף, שחף האגמים. האם, לדעתכם, קיים אב קדמון המשותף לשחף האגמים שחי בארץ, ולשחף הכספי והשחף השחור שחיים בקוטב? נמקו.
ז. נמצא ששני מיני השחפים החיים בקוטב חולקים תכונות משותפות רבות יותר מאשר התכונות שכל אחד מהם חולק עם שחף האגמים. מבין המודלים שלפניכם, איזה נראה לכם סביר יותר ומדוע?

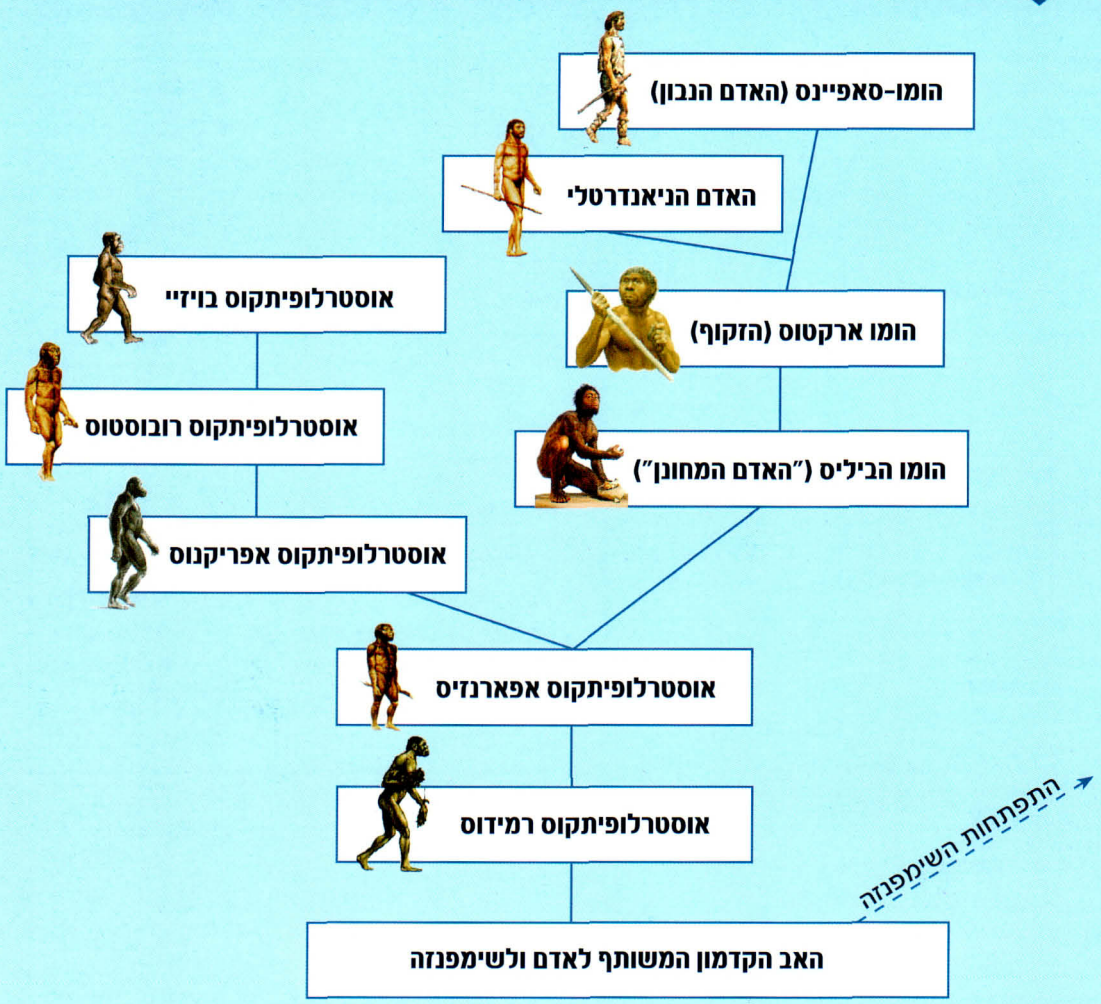




6 לפניכם מודל ה"שיח" האבולוציוני של התפתחות האדם וקופי האדם, כפי שהמדענים סבורים שהתרחשה. לפי מודל זה, מהו סוג הקוף הקרוב ביותר לאדם? באילו נתונים, לדעתכם, נעזרו המדענים על מנת להציע את השיח הזה?



7 לפניכם חלק מהשיח האבולוציוני של התפתחות משפחת ההומינידים (״משפחת האדם״), כפי שהמדענים סבורים שהתקיימה (על פי פרופ׳ יואל רק):



האדם הניאנדרטלי חי במקביל להומו ארקטוס עד לפני 27,000 שנה. שרידים שלו נמצאו בישראל, באירופה ואף בעירק ובאירן. לפי המודל, מה קרה לאדם הניאנדרטלי?

סיכום

בפרק זה למדנו את הרעיון כי כל המינים החיים כיום על פני כדור הארץ (וגם אלו שחיו בעבר) התפתחו מיצור אחד פשוט שהיה למעשה האב הקדמון המשותף לכל היצורים. חלק מהמינים החיים היום דומים מאוד למינים קדומים, חלק נעלמו לחלוטין וחלק התפצלו פעמים רבות כך שנוצרו יצורים מורכבים ביותר.
הרעיון שכל היצורים חולקים מוצא משותף, מסביר תופעות רבות בטבע: את קווי הדמיון הקיימים בין כל היצורים, את הימצאותם של מבנים חסרי שימוש בקרב יצורים רבים ואת קיומם של יצורים שיש להם תכונות המשייכות אותם, לכאורה, לקבוצות שונות. רעיון המוצא המשותף נהגה על ידי צ׳ארלס דארווין שהסתמך בין היתר על עדויות מאובנים ועל דוגמאות המראות את חוסר השלמות בטבע. במהלך השנים הרעיון התבסס בעזרת עדויות נוספות הכוללות גילוי מאובנים נוספים והשוואת רצף ה–DNA של יצורים אחרים.

מפת למידה:

פרק ד
כשהסביבה משתנה, הכשירות של הפרטים יכולה להשתנות. אוכלוסיות בטבע נתונות ללחצי ברירה שונים הפועלים עליהן בו–זמנית, לפעמים בכיוונים מנוגדים. תהליך הברירה הטבעית מתרחש ללא מטרה מוגדרת מראש וללא יד מכוונת.

פרק ו
שינויים קטנים המתרחשים במהלך הדורות יכולים להצטבר, כך שבסופו של דבר צאצאי הצאצאים יכולים להיות מורכבים מאוד ושונים מאוד מהוריהם.
השינויים מצטברים במשך מיליוני שנה (דורות רבים).
גילו המופלג של כדור הארץ (4.5 ביליון שנה), שנקבע בשיטה של תיארוך רדיואקטיבי, תומך במנגנון כזה.

פרקים א–ג
תהליך **הברירה הטבעית** מספק את המנגנון לאבולוציה: בכל אוכלוסייה קיימת שונות.
תכונות תורשתיות המקנות לפרטים מסוימים יתרון על פני אחרים בהישרדות וברבייה, יעברו לצאצאיהם ויקנו גם להם יתרון דומה. לכן, עם הזמן תעלה שכיחותם היחסית של הפרטים בעלי התכונות המקנות יתרון.

פרק ט
המינים הקיימים כיום על פני כדור הארץ התפתחו ממינים קדומים השונים מהם בהרבה.
כל המינים החיים כיום על פני כדור הארץ התפתחו **מאב קדמון משותף**.

פרק ח
אוכלוסיות נפרדות של פרטים השייכים לאותו המין מאופיינות על ידי תכונות שונות.
הפעולה של הברירה הטבעית ושל הסחיפה הגנטית על תכונות חדשות ובתנאי סביבה שונים ומשתנים, במשך מיליוני שנים, מביאה ליצירה מתמדת של מינים חדשים ומגוונים.

פרק ה
תכונות תורשתיות חדשות נוצרות כל הזמן כתוצאה ממוטציות של גנים בתאי הרבייה או כתוצאה של צירופים חדשים של גנים קיימים (ברבייה זוויגית). מוטציות מתרחשות בדרך כלל בתדירות נמוכה, ורק אם הן קורות בתאי המין, הן עוברות בתורשה.
תכונות תורשתיות חדשות הן אקראיות: יש כאלה המביאות ליכולות חדשות ואף משופרות, יש הגורמות להפחתה ביכולות ואחרות אינן מעלות ואינן מורידות.

פרק ז
הברירה הטבעית אינה בנייה מחדש אלא מתרחשת בשלבים. כל שלב מסתמך על השלב הקודם, ומשום כך התוצאה היא לפעמים פשרה ואינה מושלמת.
גם תכונות שאינן מקנות יתרון יכולות לשרוד: במקביל לברירה הטבעית קיימת **סחיפה גנטית** שפועלת באופן אקראי, שאינו קשור להתאמה לסביבה. היא משפיעה בעיקר על אוכלוסיות קטנות.

מונחים שנלמדו בפרק:

אב קדמון (מוצא משותף) "מוצא המינים" של דארווין
מאובני ביניים

פרק י׳ עץ החיים

כיצד קובעים את דרגת הקרבה בין יצורים?

ראינו שלעתים, מדענים קובעים קרבה אבולוציונית בין יצורים בהסתמך על עדויות מאובנים, אך על פי רוב מתבססות קביעותיהם על קווי הדמיון בין היצורים החיים: בין יצורים שהתפצלו זה מזה לפני זמן רב מאוד קיים דמיון מועט יחסית, בעוד שבין יצורים שהתפצלו זה מזה בתקופה מאוחרת יותר, יחסית, קיים דמיון רב יותר. מידת הדמיון בין יצורים חיים יכולה, אם כן, לעזור למדענים ל"שחזר" את ההיסטוריה של היצורים החיים.

דמיון שנובע ממוצא משותף נקרא **דמיון הומולוגי**. הדמיון ההומולוגי בא לידי ביטוי ברמות שונות ובשלבים שונים של ההתפתחות: דמיון בצורה החיצונית ובאיברים פנימיים (דמיון מורפולוגי ואנטומי), דמיון בהרכב מולקולות ה–DNA והחלבונים (דמיון מולקולרי) ודמיון בדגם ההתפתחות העוברית. כאשר משחזרים את השיח האבולוציוני, משתמשים בכל סוגי הדמיון האלה.

דמיון מורפולוגי ואנטומיה משווה: אפשר להבחין בנקל בדמיון בין הסלמנדרה, הנחש, הזיקית והחרדון. גם בין הסוס והחמור, הכבשה והעז, כלב הבית והזאב, הדולפין והלווייתן קיים דמיון מורפולוגי ברור. אם נשווה איבר כמו הלב בין יצורים שונים נוכל לראות כי ליונקים ולעופות יש לב המחולק לשתי עליות ושני חדרים, לזוחלים יש לב המחולק לשתי עליות וחדר אחד המפוצל לשניים באופן חלקי, הלב של הדו–חיים מחולק לשתי עליות וחדר אחד ואילו לדגים יש לב שאינו מחולק כלל. השוואה של אברונים תוך–תאיים מראה כי כל הצמחים חולקים אותה דופן ייחודית העשויה מתאית, לחיידקים דופן אחרת ולתאים של בעלי חיים אין דופן כלל.
לעתים מבנים שמקורם במוצא משותף (מבנים הומולוגיים) משמשים ביצורים שונים לתפקוד שונה. כך, למשל, סנפיר הלווייתן משמש לשחייה, כנף העטלף – לתעופה וזרוע האדם – לאחיזה. למרות זאת, מבנה העצמות והשרירים של איברים אלה דומה מאוד, והם בנויים לפי תכנית גנטית דומה.

אמבריולוגיה (ענף העוסק בהתפתחות העוברית) משווה: קיים דמיון רב בין העוברים של בעלי חיים רב–תאיים בשלבים שונים של התפתחותם. העוברים של בעלי החוליות השונים כגון: צפרדע, כריש, עוף, זוחל ואדם דומים זה לזה בצורתם וכן בפרטים האנטומיים של מערכות הדם, העצבים והשלד. חלק מהמבנים האנטומיים בעוברים אינם מופיעים ביצור הבוגר כלל או מופיעים בצורה שונה לחלוטין. כך, למשל, בשלבים המוקדמים של עובר אדם אפשר למצוא שרידים של קשתות זימים וסדקי זימים. מבנים אלה מצויים גם אצל עובר העוף, גם אצל עובר הזוחל וכמובן גם אצל עובר הדג. רק אצל הדג נשארים מבנים אלה גם בבוגר. בהמשך התפתחותו של עובר האדם מתפתחות משרידי הזימים הלסתות ועצמות השמע.

השוואות רצפים של DNA וחלבונים: ההתפתחות הטכנולוגית בשלושים השנה האחרונות מאפשרת לבחון דמיון ברמת המולקולות המצויות בתאים – חלבונים ו–DNA. בעזרת טכנולוגיות מתוחכמות זוהו רצפי חלבונים רבים ונקבע רצף ה–DNA של גנים רבים ביצורים שונים. בשנים האחרונות, קבעו מדענים את רצף ה–DNA המלא (הכולל את כל הגנים) של כמה יצורים: האדם, מינים מסוימים של חיידקים, מין מסוים של תולעים, עכבר, חולדה וזבוב הפירות. מאמצים נעשים לקבוע את רצף ה–DNA המלא של מינים נוספים. נתונים של רצפי DNA המפוענחים במקומות שונים בעולם נאגרים ב**בנק גנים**, דבר המאפשר השוואה מהירה של DNA ביצורים שונים. כך, למשל, כשמשווים את ה–DNA של זוחלים, יונקים ועופות, מוצאים שבכל היצורים האלה קיים הגן שאחראי לייצור אמאייל, המעורב בבניית השיניים. זאת, למרות שלעופות, בניגוד ליונקים ולזוחלים, אין שיניים.

- כיצד מסביר רעיון המוצא המשותף את העובדה שאצל עופות קיים הגן לייצור אמאיל?
- בעזרת השוואה של רצף הגן המקודד להמוגלובין קבעו מדענים, שהשימפנזה הוא הקרוב ביותר לאדם מבין כל קופי האדם. באיזה סוג של דמיון מדובר?

האם כל דמיון בין יצורים נובע ממוצא משותף?

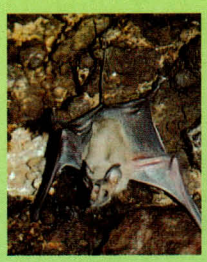
עד כה עסקנו בדמיון הומולוגי, כלומר, בדמיון הנובע ממוצא משותף. אך בניגוד לדמיון זה, קיימות דוגמאות בטבע לדמיון מורפולוגי או אנטומי בין מינים שונים שאינו נובע ממוצא משותף.
קרני האייל וקרני הפרה דומות זו לזו, אך קרן האייל עשויה מעצם והיא חלולה, ואילו קרן הפרה עשויה מחומר קרני (קרטין) ואינה חלולה. הגנים האחראים על ייצור קרן הפרה שונים בתכלית מאלה האחראים על ייצור קרן האייל. מכאן, שאי אפשר לייחס את הדמיון בין קרני האייל וקרני הפרה למוצא משותף. הם נוצרו ממקורות שונים.

- האם תוכלו לשער כיצד התפתחו מבנים כה דומים ביצורים שונים באופן נפרד? חשבו על כך שקרני האייל וקרני הפרה משמשים לצרכים דומים.

דמיון בתפקוד או במבנה שנובע ממוצא שונה נקרא **דמיון אנלוגי**. מבנים אנלוגיים התפתחו באופן נפרד בקווים אבולוציוניים שונים.

- השוו בין דמיון הומולוגי ודמיון אנלוגי.
- האם, לדעתכם, גנים דומים מעורבים בקביעתם של מבנים אנלוגיים או הומולוגיים? הסבירו את תשובתכם.

אנלוגיה: קוצי הוורד וקוצי הקקטוס



הומולוגיה: כנפי העוף וכנפי העטלף

- קשקשי הדגים וקשקשי הזוחלים משמשים להגנה קשיחה המאפשרת גם תנועה.
קשקש הזוחל עשוי מהתקשות ומהתעבות של העור, וקשקש הדג בנוי מעצמות שדוחפות את העור כלפי מעלה. האם על סמך מידע זה תוכלו לקבוע אם הקשקשים הם אנלוגיים או הומולוגיים? הסבירו את קביעתכם.

- הנוצות בעופות אנלוגיות לשיער היונקים והומולוגיות לקשקשי הזוחל. אם תשוו בין הגנים המעורבים בקביעת מבנה הנוצה, השיער והקשקש, היכן יימצא, לדעתכם, הדמיון הרב ביותר? האם אפשר, על סמך מידע זה, לומר למי קרובים יותר העופות – לזוחלים או ליונקים?
- מדוע אין די במיון יצורים חיים על פי דמיון מורפולוגי או אנטומי (כמו זה שהציע לינאוס) לקביעת יחסי קרבה אבולוציוניים ויש לבדוק קווי דמיון נוספים?

עץ החיים

לינאוס, שהיה כזכור הראשון שניסה למיין את היצורים החיים, יצר "שיח" של יחסי קרבה בין יצורים חיים המבוסס על דמיון מורפולוגי ואנטומי. כיום מנסים המדענים לשחזר את השיח המציין את התפתחות היצורים החיים מראשית החיים ועד ימינו, והם מתבססים על עדויות המאובנים, על אנטומיה ואמבריולוגיה משווה, וכן על השוואת רצפים של חלבונים ו–DNA. חלקים מסוימים בשיח המשוחזר מבוססים על עדויות רבות ומגוונות, ואילו חלקים אחרים – על עדויות מועטות. ממצאים חדשים גורמים לעתים לשינויים במודל.

מיון ביולוגי (חלוקת היצורים החיים לקבוצות ולתת–קבוצות) משקף כיום, אם כן, את הקשרים האבולוציוניים בין יצורים חיים. המיון מבוסס על היררכיה שבה רק יצורים קרובים ביותר שייכים לאותו **מין**, יצורים הקרובים מעט פחות שייכים לאותו **סוג** ויצורים הקרובים עוד פחות שייכים לאותה **משפחה**. כמה משפחות מרכיבות **סדרה**, כמה סדרות יוצרות **מערכה** והקבוצה הגדולה ביותר שהוגדרה היא **ממלכה**, והיא כוללת מספר מערכות.

כך, למשל, נקבע שהאדם שייך למין הומו–סאפיינס, לסוג אדם (הומו), למשפחת ההומינידים, לסדרת הפרימטים (שאליה שייכים גם קופי האדם), למחלקת היונקים, למערכת המיתרניים ולממלכת בעלי החיים.
המין אלון מצוי שייך לסוג אלון, למשפחת האלוניים, לסדרת האשוראים, למחלקת הדו–פסיגיים, למערכת הצמחים בעלי הפרחים (מכוסי הזרע) ולממלכת הצמחים. כל מיני האלון השונים חולקים יותר קווי דמיון משותפים מאשר אלון וחרוב המשתייכים לאותה מחלקה.

יש לזכור כי שיטות המיון אינן חלק מהטבע. הן נוצרו על ידי ביולוגים כדי לתאר את המגוון העצום של יצורים חיים בטבע ולשקף (ככל האפשר) את דרגות הקרבה בין יצורים חיים. המיון ושחזור ה"שיח" ההיסטורי מציעים דרגות קרבה בין יצורים, ובעקבותיהם מתעורר לעתים קרובות הצורך במחקרים חדשים.

הכחדות יצורים במהלך האבולוציה

על פני כדור הארץ מוכרים כיום כמה מיליונים של מינים שונים, ומעריכים כי מספר המינים האמיתי גבוה יותר פי 10 (כ–10^7 מינים). מדענים סבורים, בעיקר על פי עדויות של מאובנים, שבמהלך ההיסטוריה של היצורים החיים מראשית החיים ועד ימינו היו כ–10^9 מינים של צמחים ובעלי חיים, כלומר, בערך פי 100 ממספר המינים החיים כיום על פני כדור הארץ. הם מעריכים כי 90% ממיני הצמחים (בעיקר אצות) וכ–60%–75% מהמינים האחרים נכחדו במהלך האבולוציה. **הכחדה** פירושה השמדה של כל היצורים מאותו המין.

מבדילים בין שני סוגים של הכחדות על פי מספר המינים הנכחדים, המרחב הגאוגרפי שבו חיים מינים אלה ופרק הזמן שבו חלה ההכחדה: **הכחדת רקע** היא הכחדה של מין בודד או של מספר מינים קטן והיא תוצאה של שינויים קטנים יחסית בסביבה. **הכחדה המונית** היא כזו שחלה בפרק זמן קצר יחסית, במרחב גאוגרפי גדול בעקבות שינוי גדול ומשפיעה על מספר מינים רב. ההכחדה המפורסמת ביותר (אך לא הגדולה ביותר!) התרחשה לפני 65 מיליון שנה, ובה הוכחדו גם הדינוזאורים. הכחדה זו קרתה בגלל שינוי פתאומי בתנאי הסביבה שטיבו עדיין נחקר.

עדויות המצויות כיום בידי החוקרים מראות, שקצב הכחדת המינים גבר מאוד מאז הופעת האדם. התעשייה המתפתחת ורמת החיים העולה הביאו לזיהום האוויר, הים והיבשה ולאסונות אקולוגיים קשים. ה"איגוד העולמי לשימור הטבע" (IUCN), המפרסם את ה"ספר האדום"[3] ובו נתונים על מינים הנמצאים בסכנת הכחדה, מציין יותר מ-15,000 מינים הנמצאים בסכנת הכחדה (נכון ל-2004).
כל היצורים, כידוע, כולל האדם, הם חלק ממארג מזון סבוך ומורכב. המארג מורכב מצמחים, מבעלי חיים הניזונים מהם ומבעלי חיים הניזונים מאלה. יחסי הגומלין בין היצורים החיים הם כה סבוכים, עד כי קשה לחזות מה יקרה למארג המזון, אם מינים מסוימים ייכחדו.

- לפני 250 מיליון שנה קרה אירוע שבו מתו 96% מכלל היצורים שחיו באותה תקופה. לאיזה סוג משני סוגי ההכחדות תשייכו הכחדה זו?
- אם תצומצם השפעת האדם על שיעור ההכחדות, האם ייפסקו ההכחדות בטבע?
- האם אפשר למנוע הכחדות?
- בהכחדות המוניות נעלם חלק גדול מהמינים ולאחריהן, בעקבות יצירת מינים חדשים, עולה שוב מספר המינים בהדרגה. האם, לדעתכם, לאחר הכחדות נוצרים שוב אותם מינים שהוכחדו?

אפשר לומר, שכל המינים הביולוגיים הם למעשה "תושבים ארעיים" על פני כדור הארץ, וסוף כל אחד מהמינים להיכחד. מין ביולוגי מתקיים על פני כדור הארץ עשרה מיליון שנים בממוצע (יש יוצאים מהכלל כמו התיקנים המתקיימים כבר למעלה ממאתיים מיליון שנה).

- למרות ההכחדות ההמוניות במהלך האבולוציה ואף-על-פי שקיימת הכחדה מתמדת של מינים, מספר המינים המאכלסים את כדור הארץ הוא עצום. כיצד תסבירו זאת?

בשנים האחרונות קמו ארגונים רבים בעולם (וגם בארץ) שמטרתם - שימור הסביבה והמינים החיים בה. עם העלייה במודעות לגבי שמירה על מגוון המינים, הוגבלו היתרי הציד וכריתת העצים, ניטעו יערות חדשים ונעשים ניסיונות להצלת מינים שנמצאים בסכנת הכחדה.

---

[3] אתר ה"ספר האדום": www.redlist.org

כיצד נוצר האב הקדמון המשותף ואיך בעצם התחיל הכול?

כיצד נוצר היצור החי הראשון? מיהו האב הקדמון המשותף לכל היצורים החיים? אם תחשבו מעט על שאלות אלה, תגלו שהן מובילות, למעשה, לשאלה מרתקת מאין כמוה: כיצד התרחש, לפני כמה ביליוני שנים, המעבר מחומר דומם שהיה בכדור הארץ לחומר חי, ליצור החי הראשון ביקום, שממנו התפתח ה"שיח" האבולוציוני כולו?

בהסתמך על נתונים שונים, יכולים מדענים כיום לשער את התנאים הסביבתיים ששררו על פני כדור הארץ בעבר הרחוק. במשך השנים הועלו השערות שונות לגבי התהליכים שהיו עשויים להביא להתהוות החיים.
ההשערה המקובלת כיום היא שהתהוות החיים הייתה תהליך שההסתברות לו גבוהה למדי והוא עשוי לחזור על עצמו בכל מקום בו שוררים התנאים הפיזיקליים והכימיים המתאימים (ופירושו של דבר הוא שחיים יכולים להיווצר גם מחוץ לכדור הארץ). כדאי לשים לב, שהשערה זו בדבר ההסתברות הגבוהה יחסית להיווצרות החיים אינה סותרת את הרעיון שכל היצורים החיים התפתחו מאותו אב קדמון ראשוני (לפי "מודל השיח"), ושהסבירות שאותם המינים יתפתחו שוב באותו הסדר קלושה ביותר.

לפי השערה זו, האטמוספרה הקדומה, בניגוד למצב כיום, לא הכילה חמצן חופשי אלא הייתה עשירה בתרכובות מימן וחנקן (חמצן חופשי השתחרר לאטמוספרה, רק כאשר נוצרו הצמחים והחל תהליך הפוטוסינתזה). בתנאים כאלה יכולות תרכובות אורגניות להיווצר ביתר קלות. כך נוצרו מולקולות אורגניות מורכבות, שהצטברו באוקיינוסים ויצרו את מה שמכונה בשם: "המרק הקדמון".
השערה זו הועלתה על ידי אלכסנדר אופרין, חלוץ המחקר אודות ראשית החיים במאה העשרים, ועל ידי ג'ון סנדרסון הולדן. ההשערה המשותפת (שהוצעה ב-1938 ללא קשר כלשהו בין שני החוקרים) ידועה כ"השערת אופרין-הולדן".

ב-1953 נערך אחד הניסויים המרתקים ביותר בחקר ראשית החיים. סטנלי מילר מארה"ב ניסה לשחזר במעבדה את ראשית היווצרות החיים. הוא בנה מערכת סגורה שדימתה את התנאים ששררו על פני כדור הארץ בתקופה בה נוצרו החיים: לתוך כלי זכוכית סגור הוא הכניס תערובת גזים, שהייתה דומה לזו שבאטמוספרה הקדומה וכללה תרכובות מֶתָן (פחמן ומימן), אמוניה (חנקן ומימן) ומימן גזי. אדי מים שעלו מ"האוקיאנוס הקדום" (שכבת מים נוזלית שחוממה לטמפרטורה גבוהה) התערבבו עם הגזים. התפרקויות חשמליות שמילר יצר במערכת חיקו את סערות הברקים שאפיינו את כדור הארץ הקדום. הניסוי נערך כמה פעמים ובכל פעם הייתה התוצאה דומה: ה"אוקיאנוס", שהכיל בתחילת הניסוי רק מים נקיים, הכיל בסופו תרכובות שונות של חומרים. ההתפרקויות החשמליות במערכת גרמו להתרכבות הגזים אלה עם אלה, וכך נוצרו, בין היתר, תרכובות אורגניות קטנות, וביניהן גם חומצות אמיניות - אבני הבניין של החלבונים - ובעיקר גְלִיצִין ואָלַאנִין, שהן מהחומצות השכיחות ביותר בחלבונים.

ב-1969 נפל באוסטרליה מטאוריט. כאשר בדקו את הרכבו הכימי, נמצאו בו אותן חומצות אמיניות כמו אלה שנמצאו בניסוי של מילר ובאותם יחסים כמותיים. כיוון שמניחים שהמטאוריטים הם שריד מהתקופה שבה נוצרה מערכת השמש (שכדור הארץ הוא חלק ממנה), הרי שגם המטאוריט יכול להוות עדות לתהליכים העתיקים שהתרחשו על פני כדור הארץ והביאו ליצירת חומר אורגני.
ההנחה היא שבשלב מסוים נוצר, באקראי, בתוך המרק הקדמון מבנה פשוט ביותר שיכול היה לשכפל את עצמו, אפילו באופן גס, וכך נוצר היצור החי הראשון שממנו התפתח כל השאר.

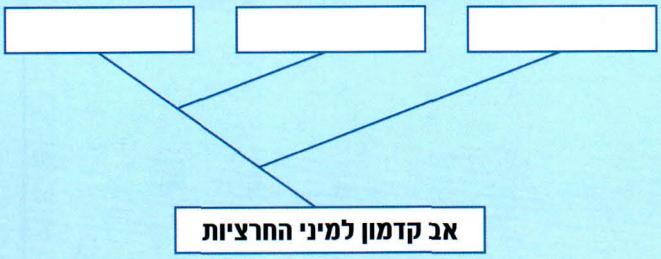
שאלות לסיכום

1 נניח שבעידן הדינוזאורים היה כוכב לכת שכל התנאים הסביבתיים בו וכל היצורים בו זהים למה שהיה על כדור הארץ באותו זמן. מאז, עברו על אותו כוכב לכת בדיוק אותם שינויים סביבתיים כמו על כדור הארץ. על סמך מידע זה, האם אתם חושבים שעל כוכב הלכת קיימים כיום יונקים ואולי אפילו בני אדם?

א. בלתי אפשרי לחלוטין. ב. הסיכוי לכך קלוש. ג. הדבר אפשרי. ד. קרוב לודאי שכן.

הסבירו את תשובתכם.

2 כשבדקו את ההרכב הגנטי של שלושה מינים של חרציות נמצא כי יש ביניהם הבדלים המתבטאים בהופעה של שלוש מוטציות שונות: מין 1 ומין 2 הכילו את המוטציות X ו–Y. מין 3 הכיל מוטציות X ו–Z. מקמו את שלושת המינים ואת שלוש המוטציות בשיח שלפניכם:



הסבירו כיצד החלטתם היכן למקם את המינים ואת המוטציות.

3 מדענים הצליחו לקבוע את הרצף של כל ה–DNA של האדם, העכבר ומינים נוספים. לאחרונה התפרסם כי הקנגורו הוא היצור הבא שרצף ה–DNA שלו ייחקר. מדוע, לפי דעתכם, נבחר דווקא הקנגורו ולא יצורים אחרים כמו הפיל או הג'ירפה?

4 הלטימריה הוא דג שנמצא באוקיאנוס ההודי. הוא שוחה במים באופן בו זוחל הולך על היבשה. נסו להסביר כיצד יתכן שהלטימריה, שהוא דג, הוא בעל תכונה של זוחל?

5 שני תלמידים ניסו להסביר את הדמיון הגנטי הרב (99.4%) בין ה–DNA של השימפנזה ל–DNA של האדם. אורי טען ש"האדם התפתח מהשימפנזה" ואילו גורי טען ש"לשימפנזה ולאדם היה אב קדמון משותף".

עם מי משני התלמידים אתם מסכימים? מדוע **אינכם** מסכימים עם התלמיד השני?

סיכום

בפרק זה למדנו כי מיון ביולוגי (חלוקת היצורים החיים לקבוצות ולתת-קבוצות) משקף את הקשרים האבולוציוניים בין יצורים חיים.

מדענים מנסים לקבוע יחסי קרבה בין יצורים חיים ולשחזר את התפתחות היצורים מראשית החיים ועד ימינו. הם מתבססים על עדויות המאובנים ועל קווי הדמיון בין יצורים. דמיון שנובע ממוצא משותף (דמיון הומולוגי) בא לידי ביטוי ברמות שונות ובשלבים שונים של ההתפתחות: דמיון מורפולוגי ואנטומי, דמיון מולקולרי ודמיון בדגם ההתפתחות העוברית. כאשר משחזרים את השיח האבולוציוני, משתמשים בכל סוגי הדמיון האלה. חלקים מסוימים בשיח המשוחזר מבוססים על עדויות רבות ומגוונות, ואילו חלקים אחרים – על עדויות מועטות. נוסף על הדמיון הנובע ממוצא משותף, קיימות דוגמאות בטבע לדמיון מורפולוגי או אנטומי בין מינים שונים שאינו נובע ממוצא משותף (דמיון אנלוגי). מבנים אנלוגיים התפתחו באופן נפרד בקווים אבולוציוניים שונים.

הכחדה פירושה השמדה של כל היצורים מאותו המין. חלק מההכחדות מתרחשות בעקבות שינויים גדולים בסביבה, וחלק – בעקבות שינויים קטנים.

למרות שהשאלות רבות, כנראה, מהפתרונות, ומחלוקות רבות עדיין לא יושבו בין המדענים, רוב הרעיונות מוסכמים על אנשי המדע: העולם נוצר בדרך של תהליכים אבולוציוניים הכפופים לחוקים פיזיקליים; החומר החי הראשוני נוצר מרצף תהליכים שמקורם בחומר דומם; רצף זה התרחש מהר יחסית, וכלל שלבים רבים שכל אחד מהם היה מותנה בקודמו. הרעיון המשמעותי מכולם – כל החיים על פני כדור הארץ התחילו מאותו חומר חי ראשוני, אף כי אנו עדיין מתקשים לקבוע מתי הוא הפך לחומר חי או מאיזה שלב נוכל להגדירו ככזה.

ואם נרצה לסכם את הספר כולו על רגל אחת:
הרעיונות המודרניים לגבי האבולוציה של היצורים החיים מספקים הסבר מדעי להיסטוריה של החיים על פני כדור הארץ. הברירה הטבעית והסחיפה הגנטית מסבירות את **המגוון** של היצורים החיים, ואילו הרעיון שלכל היצורים מוצא משותף מסביר את **הדמיון** בתוך המגוון.

מונחים שנלמדו בפרק:

דמיון הומולוגי	מיון (מין, סוג, משפחה, סדרה, מערכה, ממלכה)	הכחדה המונית
בנק גנים	הכחדה	ראשית החיים
דמיון אנלוגי	הכחדת רקע	

מפת למידה:

פרק ד
כשהסביבה משתנה, הכשירות של הפרטים יכולה להשתנות.
אוכלוסיות בטבע נתונות ללחצי ברירה שונים הפועלים עליהן בו-זמנית, לפעמים בכיוונים מנוגדים. תהליך הברירה הטבעית מתרחש ללא מטרה מוגדרת מראש וללא יד מכוונת.

פרקים א-ג
תהליך **הברירה הטבעית** מספק את המנגנון לאבולוציה: בכל אוכלוסייה קיימת שונות. תכונות תורשתיות המקנות לפרטים מסוימים יתרון על פני אחרים בהישרדות וברבייה, יעברו לצאצאיהם ויקנו גם להם יתרון דומה. לכן, עם הזמן תעלה שכיחותם היחסית של הפרטים בעלי התכונות המקנות יתרון.

פרק ה
תכונות תורשתיות חדשות נוצרות כל הזמן כתוצאה ממוטציות של גנים בתאי הרבייה או כתוצאה של צירופים חדשים של גנים קיימים (ברבייה זוויגית). מוטציות מתרחשות בדרך כלל בתדירות נמוכה, ורק אם הן קורות בתאי המין, הן עוברות בתורשה.
תכונות תורשתיות חדשות הן אקראיות: יש כאלה המביאות ליכולות חדשות ואף משופרות, יש הגורמות להפחתה ביכולות ואחרות אינן מעלות ואינן מורידות.

פרק ו
שינויים קטנים המתרחשים במהלך הדורות יכולים להצטבר, כך שבסופו של דבר צאצאי הצאצאים יכולים להיות מורכבים מאוד ושונים מאוד מהוריהם.
השינויים מצטברים במשך מיליוני שנה (דורות רבים). גילו המופלג של כדור הארץ (4.5 ביליון שנה), שנקבע בשיטה של תיארוך רדיואקטיבי, תומך במנגנון כזה.

פרק ז
הברירה הטבעית אינה בנייה מחדש אלא מתרחשת בשלבים. כל שלב מסתמך על השלב הקודם, ומשום כך התוצאה היא לפעמים פשרה ואינה מושלמת. גם תכונות שאינן מקנות יתרון יכולות לשרוד: במקביל לברירה הטבעית קיימת **סחיפה גנטית** שפועלת באופן אקראי, שאינו קשור להתאמה לסביבה. היא משפיעה בעיקר על אוכלוסיות קטנות.

פרק ח
אוכלוסיות נפרדות של פרטים השייכים לאותו המין מאופיינות על ידי תכונות שונות.
הפעולה של הברירה הטבעית ושל הסחיפה הגנטית על תכונות חדשות ובתנאי סביבה שונים ומשתנים, במשך מיליוני שנים, מביאה ליצירה מתמדת של מינים חדשים ומגוונים.

פרק ט
המינים הקיימים כיום על פני כדור הארץ התפתחו ממינים קדומים השונים מהם בהרבה. כל המינים החיים כיום על פני כדור הארץ התפתחו **מאב קדמון משותף**.

פרק י
מיון ביולוגי מבוסס על דרגת הקרבה בין יצורים. יצורים ממוינים להיררכיה של קבוצות ותת קבוצות שמשקפת את הקשרים ביניהם.

הרעיונות המודרניים לגבי האבולוציה מספקים הסבר מדעי להיסטוריה של החיים על פני כדור הארץ.
הברירה הטבעית והסחיפה הגנטית מסבירות את המגוון של היצורים החיים והמוצא המשותף מסביר את הדמיון בתוך המגוון.

פרק י"א על כתפי ענקים

"העובדה שיכולתי לראות למרחוק היא רק הודות לכך שעמדתי על כתפי ענקים". אייזיק ניוטון, 1676

מה הופך אנשים למדענים? האם העובדה שהם חובבי טבע נלהבים, שהם עוקבים אחר חיפושיות או נחשים או סחלבים? ואולי העובדה שהם אוספים אותם ומתעדים את תצפיותיהם? לא! מדענים הם כל אלה, אך יש בהם עוד משהו: הם מונעים על ידי רצון עז למצוא את המשותף לתופעות שנראות שונות זו מזו ולהבין את החוקים העומדים בבסיסן.

חשבו, למשל, על התופעות האלה: סוכר ש"נעלם" בתוך הקפה; גלידה שהופכת לנוזל; ריחה המפתה של עוגת שוקולד הנאפית בתנור; הניסיונות הכושלים להפוך חומר לזהב; העובדה שמשקלה של קוביית קרח לעולם יהיה זהה למשקל המים שנוצרו כאשר הקרח הותך. האם אפשר למצוא הסבר אחד לכל התופעות הללו? כן, את כולן אפשר להסביר על ידי הרעיון הפשוט שכל חומר מורכב מחלקיקים הנמצאים בתנועה מתמדת. רעיון זה מוכר כמודל החלקיקי של החומר, והוא מסביר את תהליך ההמסה, שינויים במצבי צבירה, קיומם של יסודות בטבע וחוק שימור החומר.

גם בעולם היצורים החיים אפשר לראות תופעות רבות שלכאורה אין קשר ביניהן. המגוון הגדול של יצורים הקיים על פני כדור הארץ; קווי הדמיון המפתיעים ביניהם לצד ההבדלים הגדולים; ההתאמה המופלאה לעתים בין תכונות היצורים לבין הסביבה שהם חיים בה, ושלל המאובנים שהתגלו, חלקם שונים מאוד מהיצורים הקיימים כיום.

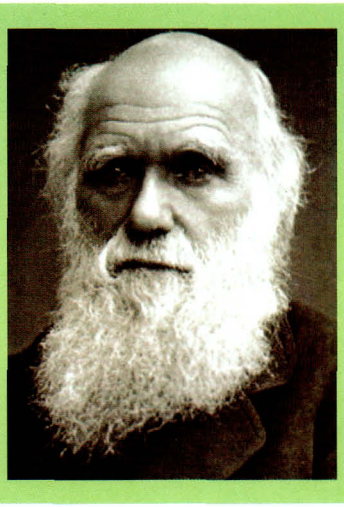
במשך השנים ניסו מדענים לתת הסברים לתופעות אלה. רעיון האבולוציה, כלומר הרעיון שמינים משתנים במהלך הדורות הועלה על ידי כמה מדענים; הבולט בהם היה ז'אן בפטיסט למארק, שחי בצרפת במאות השמונה עשרה והתשע עשרה (1744–1829). לפני כן האמינו מרבית האנשים שכל מיני היצורים, שאנו רואים כיום, קיימים באותה הצורה מאז ומעולם.
בתחילה עסק למארק במיון חסרי חוליות ימיים. הוא נדהם לגלות עושר של מאובנים ימיים והחל לבדוק באילו שכבות סלע הם מופיעים. הוא גילה, שמינים פשוטים יותר של מאובנים נמצאים בשכבות סלע עתיקות יותר ומינים מורכבים – בשכבות חדשות יחסית. ממצאים אלה הובילו אותו לרעיון, שמינים של יצורים משתנים.
למארק הבין, שהשתנות כזאת היא הדרגתית ואורכת, לכן, זמן ממושך. משום כך לא מפתיע שהוא קיבל את הרעיון, שהיה אז חדש יחסית, שגילו של כדור הארץ הוא עתיק הרבה יותר משסברו לפני כן. הזמן הזה אפשר את התרחשותם של השינויים, שלמארק החל להאמין בקיומם. כפי שאתם כבר יודעים, רעיון זה של אבולוציה בקרב יצורים חיים מקובל עד היום. בתקופתו של למארק היה הרעיון חדשני.

הבעיה הייתה במנגנון שלמארק הציע.
לפי למארק, יצורים משתנים בתגובה להשתנות של תנאי הסביבה. הדוגמה המפורסמת ביותר שלו עוסקת בצווארה של הג'ירפה: הוא קבע כי כאשר הידלדלו מקורות המזון במקומות הנמוכים, מתחו הג'ירפות את צווארן כדי להגיע לעלים שבצמרות העצים. צאצאיהן של ג'ירפות אלה ירשו את הצוואר הארוך מעט יותר ומתחו אף הם את צווארם.

מנגנון זה מייחס יכולת השתנות **לפרטים** (ולא לאוכלוסיות), כתוצאה של כוונה ומטרה: ג'ירפות **רצו** להאריך את צווארן **כדי** להתאים לסביבה. מובן שמנגנון זה היה חייב להניח את יכולתן של התכונות הנרכשות (הצוואר המוארך) לעבור בתורשה. לפי למארק, יצורים שלא השתנו במהירות מספקת או בצורה מוצלחת דיה נכחדו ואלה הם המאובנים שאנו מוצאים.

כזכור, בחנו מנגנון זה בתחילת הספר (הניסויים של קיצוץ הזנב על ידי וייסמן, ברית מילה ותופעות אחרות) וראינו שתכונות נרכשות אינן עוברות בתורשה.

צ'ארלס דארווין (1809–1882) הכיר את עבודתו של למארק ואת רעיון האבולוציה. כשהיה בן 22 יצא למסע בן חמש שנים על סיפונה של האוניה האנגלית "ביגל". בכל הזדמנות הוא ירד מהספינה וסייר ביערות העד של דרום אמריקה או על הסלעים באיי הגלפאגוס, אסף דוגמאות של יצורים חיים ומאובנים ותיעד את ממצאיו. כשחזר לאנגליה, עסק במשך שנים ארוכות בניתוח הממצאים והציג עדויות רבות המבססות את רעיון האבולוציה. אך גדולתו הייתה במנגנון שהציע לאבולוציה, שלפיו הברירה הטבעית היא ההסבר להשתנות המינים.



צ'ארלס דארווין

כמו רבים בזמנו, גם דארווין קרא מאמר של כלכלן בשם תומאס מאלתוס. מאלתוס טען, שבטבע, צמחים ובעלי חיים מעמידים הרבה יותר צאצאים ממה שיכולים לחיות על פי אמצעי המחיה העומדים לרשותם. גם האדם, הוא אמר, מתרבה באופן מהיר יותר מאשר המזון העומד לרשותו, ולכן רעב ומוות הם תופעות טבעיות והכרחיות (אלא אם כן מבקרים את גידול האוכלוסייה).

דארווין, שבהסתמך על ממצאיו כבר היה בשל לקבל את הרעיון של מלחמת הקיום, כתב ש"זכה להארה" בעקבות קריאת מאמרו של מאלתוס. הוא הבין שבנסיבות אלה יש לשונות הקיימת בכל אוכלוסייה תפקיד מרכזי בקביעה מי ישרוד: פרטים מסוימים שמתחרים טוב יותר מאחרים ישרדו ואילו אחרים ייכחדו. דארווין קבע כי גורמים נוספים מלבד המזון מגבילים את קיומם של הפרטים (למשל, הימצאותם של טורפים).
בספרו **מוצא המינים**, שהתפרסם ב–1859, הוא הציג את מנגנון הברירה הטבעית ואת רעיון האב הקדמון המשותף לכל היצורים. השפעתו של הספר על הביולוגיה הייתה מיידית. ראשית, הרעיונות שדארווין הציע, מהפכניים ככל שהיו, הוצגו בצורה פשוטה ומובנת. שנית, כל אחד מטיעוניו התבסס על שפע של עדויות מיצורים חיים וממאובנים. גם ההשוואה שערך בין הברירה הטבעית לברירה המלאכותית תרמה לביסוס הרעיון.
בין היתר, התייחס דארווין לדוגמה של למארק בדבר הארכת צוואר הג'ירפה. לפי מנגנון הברירה הטבעית שהוא הציע, השונות באורכי הצוואר של הג'ירפות קיימת כל הזמן, וכאשר הידלדלו מקורות המזון במקומות הנמוכים, היה יתרון לבעלות הצוואר הארוך. פרטים אלה הם ששרדו והעמידו יותר צאצאים, שירשו מהוריהם את תכונת הצוואר הארוך. במהלך הדורות עלתה בהדרגה שכיחותן היחסית של בעלי הצוואר הארוך. כפי שראינו, מנגנון הברירה הטבעית מייחס יכולת השתנות ל**אוכלוסיות** (ולא לפרטים), ללא כוונה ומטרה (הג'ירפות לא "רצו" להאריך את צווארן; הפרטים בעלי הצוואר הארוך הם ששרדו).
מנגנון הברירה הטבעית נהגה, במקביל לדארווין, גם על ידי מדען צעיר בשם אלפרד ראסל וואלאס. וואלאס שלח לדארווין מכתב ובו תיאר את רעיונותיו בדבר הברירה הטבעית. מכתב זה האיץ בדארווין לפרסם את ממצאיו מוקדם משתכנן. וכך, התפרסמו תקצירי עבודותיהם של השניים במקביל. שנה אחר כך פרסם דארווין את ספרו המפורסם. לימים חזר בו וולאס מהרעיון שלאדם יש מוצא המשותף גם לשאר היצורים החיים.

- ערכו טבלה שבה תשוו בין רעיונותיו של דארווין לרעיונותיו של למארק מכמה בחינות: קיומו של רעיון השתנות המינים (האבולוציה), הרמה שבה מתרחשים השינויים, קיומה של מטרה סופית שמניעה את השינויים, הזמן הנדרש עד שאוכלוסייה משתנה.

שני הרעיונות הגדולים של דארווין – הברירה הטבעית וקיומו של האב הקדמון המשותף לכל היצורים – מספקים את הבסיס להסבר המקובל עד היום להיסטוריה של היצורים החיים על פני כדור הארץ.

בשנות ה–30 של המאה העשרים נוסדה התיאוריה המכונה **"הסינתזה המודרנית"**, שהיא שילוב של רעיונותיו של דארווין עם גילויים מתחום הגנטיקה. יש לזכור, שקיומם של גנים וחוקי התורשה לא היה ידוע בזמנו של דארווין (מנדל אמנם פענח את חוקי התורשה בערך בזמנו של דארווין, אולם רעיונותיו לא זכו אז לפרסום ולהכרה הראויים), ולכן מדהים לגלות שכל התהליכים המולקולריים הידועים כיום מתאימים להפליא לרעיונותיו. למשל, כשהתברר קיומם של גנים, אללים, מוטציות וצירופי אללים במהלך המיוזה נמצא ההסבר המפורט לאופן בו נוצרת שונות באוכלוסיות של יצורים. התפתחותה של הביולוגיה המולקולרית הוסיפה נדבך חשוב ביותר לביסוס תורת האבולוציה. כיום ניתן למצוא דמיון מופלא בין כל היצורים לא רק ברמת המבנה האנטומי שלהם, אלא גם ברמה התאית וברמה המולקולרית. מסתבר, שגם מבנה החומר התורשתי (ה– DNA) והדרך שבה הוא עובר מדור לדור וקובע את תכונות היצורים – זהים בכל צורות החיים המוכרות לנו. דמיון זה מאושש את קיומו של אב קדמון משותף לכל היצורים, שכן לו היו היצורים מתפתחים בנפרד, היו יכולים להיווצר קודים גנטיים שונים. לשילוב של רעיונות האבולוציה של דארווין עם מדע הגנטיקה קוראים **ניאודארוויניזם**.

קיומה של אבולוציה בדרך של ברירה טבעית והמוצא המשותף לכל היצורים החיים הם רעיונות המקובלים כיום על כל המדענים. ויכוחים מדעיים קיימים, כמובן, כל הזמן אך הם אינם מטילים ספק בעצם המנגנון אלא דנים בפרטיו, למשל: האם האבולוציה מתרחשת בקצב קבוע או בקצבים משתנים? עד כמה משמעותית הסחיפה הגנטית יחסית לברירה הטבעית? האם מעורבים מנגנונים נוספים בהורשה והשתנות אוכלוסיות?

לעתים קורה, שאנשים בציבור הרחב מנצלים ויכוחים אלה כדי להוכיח, כביכול, שגם בקרב מדענים מתנהל ויכוח על נכונותה של תורת האבולוציה. אך כאמור, מדענים (גם אלה החלוקים ביניהם על הפרטים) אינם מטילים ספק בתקפותה של תורת האבולוציה.

בעשורים שלאחר הופעת "מוצא המינים" ניסו אנשים ליישם את רעיונות הברירה הטבעית לחברה האנושית. במחצית השנייה של המאה ה–19 זכתה תורתו של דארווין לאחת הפרשנויות המעוותות והמשחיתות ביותר, שכונתה "דארוויניזם חברתי".
חסידיה הסתמכו על 'חוק הטבע' של מלחמת הקיום והשתמשו בו על מנת להצדיק את התחרות הפרועה שאפיינה את המשטר הקפיטליסטי, את הניצול המעמדי ואת השעבוד הקולוניאלי. בשם "הדארוויניזם החברתי" נעשו עוולות מזעזעות בטענה, שגם החברה האנושית אמורה להתנהג כפי שתיאר דארווין את הטבע, כלומר שהחזקים הם שראויים לשלוט והחלשים – למות.

דארווין, שהיה אדם נאור ביותר והומניסט אמיתי (הוא התנגד, למשל, לעבדות שהייתה מקובלת מאוד בזמנו), היה מתקומם בוודאי נגד הפרשנות המעוותת שניתנה לתורתו. ראשית, כפי שראינו, הרעיון שהחזק הוא ששורד אינו עולה מתורתו של דארווין. המתאים, ולאו דווקא החזק, הוא ששורד בטבע.
נוסף על כך, אין ספק שהאדם שונה משאר היצורים החיים בהיותו יצור חושב ומוסרי. חייו מנוהלים לא רק על פי צווים ביולוגיים כי אם גם על פי ערכים וצווי מוסר המורים לו להתאפק, להתחשב ולעזור לנזקק. על כך אמר הפילוסוף עמנואל קאנט: "המוסר מתחיל בנקודה שבה אנו מתחילים להתנהג בניגוד לנטיותינו".

מונחים שנלמדו בפרק:

הסינתזה המודרנית
ניאודארוויניזם
דארוויניזם חברתי

תודתנו לצלמים ולמוסדות שהרשו לנו באדיבותם להשתמש בתצלומיהם:

- נגה לנגר (עצי הסקוויה, ג׳ירפות, משפחת ארוכות הצוואר, שבט המסאי)
- רן בן-דוד (ארוכות הצוואר)
- עפרה דור (שבט המסאי)
- ענת תבור (כלב קצוץ זנב)
- גלית חגי (עצים מעוצבים, ורדים, פעילות הדשא, עץ מלבלב ובשלכת, ורד, קקטוס, פעילות הריבופים, פעילות החרזנים, פעילות הדשא, נרקיס)
- אופיר קרן (יונה)
- יותם ורדי (סביונים, פשתה, לוף, טווסים)
- חנה לוי (תצלומים מפיג׳י, נזירים)
- אסף צוער, האוניברסיטה העברית בירושלים (עטלף)
- John Endler (גופים)

תודתנו למאיירי התמונות:

- נועה שטרן (העיירה ברייין, תיבת נוח, נחלים בטרינידד וונצואלה, הניסוי של וייסמן, שודד ים)
- שיר למדן (קריקטורה)

תודתנו לאתרי האינטרנט שאישרו את השימוש בתמונות:

- http://www.dimijianimages.com/Africa-page1/Africa-p1.htm (אריות, זברות, פילים, ג׳ירפות בזמן עימות)
- Silvio Sommazzi באתר: http://www.justbirds.org/home.htm (פרוש קרקע בינוני, שחפים)
- http://perso.wanadoo.fr/papillon.macro/les_exotiques.htm (פרפר העלה המת)
- http://www.dimijianimages.com/Crypsis-mimicry-page1/Crypsis-and-mimicry-page1.htm (פרפר העלה המת מקוסטה ריקה)
- http://www.rsp-photos.com/PhotoDetail.aspx?xPhotoID=114 (שועל ארקטי בחורף)
- www.fish.washington.edu/. ../scenic_fox.html (שועל ארקטי בקיץ)
- www.feathersite.com/ Poultry/NDG/Nene/BRKNene.html (אווז הוואי)
- trainedmonkey.com/ week/2002/07 (ג׳ירפה מתכופפת)
- http://www.herp.it/index.htm (דו-חיים)
- http://www.indiana.edu/~ensiweb/lessons/step.sp.html (סלמנדרות)
- http://www.herp.it/ (זוחלים ודו-חיים)
- pond1.gladstonefamily.net:8080/ diary.html?wl_start=52 (הידרה)
- Tom Bentley באתר: http://www.fnal.gov/ecology/wildlife/specs/House_Sparrow.html (דרור הבית)
- sarah.clark באתר www.cheltenham.gov.uk/.../ page.asp?URN=1741 (שחף כספי)
- http://users.pandora.be/worldhistory/milestones_frame.html?pages/australopithecus_afarensis_lucy.htm משפחת האדם, דארווין)