

אבולוציה - אין זה קורה?

מדריך
למורה

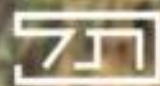
לולי שטרן, סמדר רייספלד
חן צור, גלית חגי



מטה מל"ם
המרכז הישראלי לחינוך מדעי -
טכנולוגי ע"ש עמוס דה-שליס



הסכניון - מכון טכנולוגי לישראל
המחלקה לישראל הטכנולוגיה ומדעים
מוסד הסכניון למחקר ופיתוח



משרד החינוך התרבות והספורט
המזכירות הפדגוגית
האגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים



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

אבולוציה – איך זה קורה?

מדריך למורה

על פי תכנית הלימודים החדשה

לולי שטרן, סמדר רייספלד
חן צור, גלית חגי

© 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?
A teacher's guide
Luli Stern, Galit Hagay, Chen Tsur, Smadar Reissfeld
Printed in Israel, 2005 ©

ראש הפרויקט:	ד"ר לולי שטרן, המחלקה להוראת הטכנולוגיה והמדעים, הטכניון, חיפה
צוות פיתוח וכתובה:	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 צאוש, אורט מעלות תמר גבראל, חן צור, בי"ס תיכון אזורי מגידו
פיתוח השתלמויות מורים:	חן צור גלית חגי
עריכה גרפית והבאה לדפוס:	"קו מעוצב", קיבוץ יגור
הדפסה:	דפוס "מילניום"



תודות

ברצוננו להודות מעומק הלב לאלה שעזרו בשלבים השונים של כתיבת הספר: לד"ר **עופר מוקדי וליתן אביטל**, על היעוץ המדעי המקצועי והזמין; לפרופ' **יואל רק** על עצותיו בנוגע לאבולוציה של האדם; ל**איריס בן עקיבא**, שפיתחה וניסתה עם תלמידיה את הפעילויות הראשונות; ל**יפעת צימרמן**, שפיתחה וניסתה שאלות הערכה; ל**מאשה צאוש**, נעה **אבולעפיה**, **נרית די-נור**, **שרון שר**, **מיכל נחשון** (פרקים א-ב) ו**רותי מנדלוביץ** (פרקים א-ד), על הערותיהם בשלבים שונים של כתיבת הספר; ל**ורד קוטנר**, על עזרתה במחקר שליווה את כתיבת הספר; למורות הנסייניות **דבורה**, **מאשה ותמר**, על העידוד וההערות; לכל תלמידי כיתות הניסוי ובעיקר לתלמידי כיתה י' תשס"ד בבית הספר "כרמל זבולון" שנרתמו לנסות ולהגיב; ל**נועה ושיר**, על האיורים; ל**עמיתנו ב"פורום האבולוציה"**: **שלום**, **רעיה**, **חיה**, **יפעת**, **נרית ושרון**, על הערותיהם הדידקטיות; לד"ר **ברוריה אגרסט** על התמיכה והעידוד בשלבים שונים במהלך הפיתוח; לפרופ' **דני סגל**, על העזרה בגיבוש רצף הרעיונות; לד"ר **רות אמיר** על הדיון הפורה במושגים התאמה אבולוציונית ופיזיולוגית; ל**נרית די-נור** ו**יפעת צימרמן** על סקר הספרות המקיף שעשו במחקריהן שמופיע בחלקו במדריך זה; ל**מיכל מליכין** מ"קו מעוצב" שהגשימה חלומות עם הרבה סבלנות ושיתוף פעולה; לצלמים שאפשרו לנו להשתמש בתמונות (רשימה מפורטת מופיעה בסוף הספר).

במדריך למורה	בספר התלמיד	
II		מבוא למורה
3	3	פרק א: כיצד התארך צווארן של הג'ירפות?
13	11	פרק ב: האם כל הצפרדעים דומות?
23	21	פרק ג: אז כיצד באמת התארך צוואר הג'ירפות לאורך הזמן? מנגנון הברירה הטבעית..
30	28	פרק ד: האם ניתן לראות ברירה טבעית בפעולה?
43	39	פרק ה: כיצד נוצרת שונות?
57	52	פרק ו: האם שינויים יכולים להצטבר?
75	66	פרק ז: האם אפשר לשחזר את העבר?
83	74	פרק ח: כיצד נוצרים מינים חדשים?
94	85	פרק ט: כיצד אפשר להסביר את הדמיון בין יצורים חיים?
108	97	פרק י: עץ החיים
116	105	פרק י"א: על כתפי ענקים

תיאורית האבולוציה מקשרת בין תחומים שונים בביולוגיה, בין רמות הארגון הביולוגיות השונות ובין עדויות שנאספו במקומות שונים בעולם ובזמנים שונים. ניתן לומר, שתיאורית האבולוציה מלכדת את הפרטים ומהווה מכנה משותף לביולוגיה כולה. היטיב לתאר זאת לפני למעלה משלושה עשורים Dobzhansky, שהיה אחד המדענים שיצרו את הסינתזה בין האבולוציה לבין הגנטיקה בשנות השלושים: "...דבר אינו מסתבר בביולוגיה, אלא לאורה של האבולוציה".

תיאורית האבולוציה מסבירה הן את המגוון העצום של היצורים החיים והן את קווי הדמיון בתוך המגוון: מנגנון הברירה הטבעית מבוסס על קיום הבדלים מסוימים בתכונות התורשתיות של פרטים באוכלוסייה. תכונות תורשתיות המקנות לפרטים מסוימים יתרון על פני אחרים בהישרדות וברבייה, יעברו לצאצאיהם ויקנו גם להם יתרון דומה. כתוצאה מכך, תעלה עם הזמן שכיחותם היחסית של הפרטים בעלי התכונות המקנות יתרון. בנוסף לברירה הטבעית קיימת **סחיפה גנטית** שפועלת באופן אקראי ומביאה להישרדותן של תכונות באופן שאינו קשור לתנאי הסביבה. הברירה הטבעית והסחיפה הגנטית מסבירות את המגוון של היצורים החיים, שכן פעולתן על תכונות חדשות בתנאי סביבה שונים ומשתנים שוב ושוב במשך מיליוני שנים, מביאה ליצירה רצופה של מינים חדשים ומגוונים. רעיון **המוצא המשותף** הוא הרעיון על פיו לכל המינים החיים כיום על פני כדור הארץ (ולכל המינים שנכחדו) מוצא משותף. רעיון זה מסביר את הדמיון בתוך מגוון היצורים החיים.

ב-25 השנים האחרונות נערכו במקומות שונים בעולם, וגם בישראל, מחקרים רבים שבדקו את מידת ההבנה של רעיון הברירה הטבעית בקרב תלמידי תיכון ואוניברסיטה. מחקרים אלה הראו כי תלמידים רבים מחזיקים בתפיסות נאיביות הקשורות ברעיון הברירה הטבעית ושתפיסות אלה נפוצות בכל רמות הגיל גם לאחר הוראה של הנושא. על פי ממצאי המחקרים, קיימת נטייה להסביר תופעות אבולוציוניות כתהליך שאין בו אקראיות. לפי ההסברים הרווחים, יצורים רוכשים במהלך חייהם תכונות כתגובה מודעת ומכוונת לצורך הנוצר בעקבות שינוי סביבתי. תכונות אלה עוברות כתורשה לצאצאיהם.

במחקר שליווה את כתיבתו של ספר זה, השתתפו למעלה מ-300 תלמידי תיכון בארץ וזוהו בו לראשונה תפיסות רווחות של תלמידים לגבי רעיון המוצא המשותף ויצירה של מינים חדשים. כך, למשל, נמצא כי תלמידים רבים אינם מסבירים קווי דמיון בין יצורים במוצא משותף וסבורים כי תכונות דומות (כמו הדמיון בין תאי תפוח אדמה לתאי אדם) התפתחו אצל יצורים שונים במקביל בגלל צרכים זהים. גם כאשר מוצג הרעיון של מוצא משותף בפני תלמידים, מתקשים מרביתם לקבלו ומאמינים שרק למינים קרובים למראית עין היה אב קדמון משותף.

ממה נובע הקושי להבין את הרעיונות האבולוציוניים?

- רעיונות אבולוציוניים סותרים לעתים את האינטואיציה ואת ההתנסויות היומיומיות. כך, למשל, בחיי היומיום, פרטים מסתגלים לסביבתם בצורה מכוונת ומודעת. מצב בו תלמיד מסתגל לכ"ס חדש מוכר לתלמידים והם עלולים להקיש ממצב זה לגבי הסתגלותה של אוכלוסייה לסביבה חדשה. באופן דומה, בחיי היומיום, כלבים נשארים כלבים ואריות נשארים אריות. מתופעה זו, תלמידים עשויים להסיק כי מינים אינם משתנים.
- רעיונות העומדים בבסיס תיאורית האבולוציה, דורשים יכולת חשיבה מופשטת, למשל: הצטברותם של שינויים קטנים, לאורך פרק זמן ממושך מאוד, המביאה, בסופו של דבר, לשינוי משמעותי.
- הבנת התיאוריה האבולוציונית דורשת שילוב של שני תהליכים נפרדים שבמובנים מסוימים מנוגדים זה לזה: יצירת מתמדת של שונות, שהיא תהליך **אקראי**, וברירת המתאימים, שהיא תהליך **מכוון**.
- תיאורית האבולוציה מתבססת על ידע בנושאים רבים בביולוגיה (כמו מוטציות גנטיות כמקור לשונות) ובתחומי דעת אחרים (כמו תהליך של יצירת מאובנים).
- כמעט לא ניתן לצפות בתהליכים אבולוציוניים באופן ישיר.
- השפה בה נעשה שימוש בחיי היומיום, בביה"ס, בספרים, בספרי קריאה ולעיתים אף בספרי לימוד, היא שפה שעלולה לבלבל. למשל: "**החזק שורד**" לעומת "המותאם שורד"; הפרטים "**מפתחים** עמידות", לעומת "עמידות מתפתחת באוכלוסייה"; "**הסוס**" כאשר לא ברור אם מדובר בפרט יחיד, באוכלוסיית סוסים או בכל סוס באשר הוא. תלמידים נתקלים (ומשתמשים בעצמם) לא פעם בניסוחים טלאולוגיים המסבירים שינויים במבנים או בפעולות של יצורים בתכלית שלהם ("לנמר יש חברבורות **משום** שהוא זקוק להן להסוואה") או בהסברים של שינויים תוך השלכת תכונות אנושיות על צמחים ובעלי חיים ("העץ **רצה** יותר מים לכן העמיק שורשיו", "האייל מגדל קרניים גדולות וכבדות, על-מנת **להרשים** את הנקבות").

התפיסות שתוארו במחקרים שתועדו בשלושת העשורים האחרונים כמו גם אלה שזוהו במחקרים שלנו היוו את הבסיס לפיתוח הספר והשפיעו על רצף הרעיונות, התכנים ודרכי ההוראה. טיוטות של הספר השלם נוסו בשש כיתות

וחלקים מתוך הספר נוסו בהשתלמויות מורים ובכיתות נוספות. בכל שלב, נערכו שינויים על פי שאלונים שאכחנו אם התלמידים מבינים כל אחד מהרעיונות הנלמדים בספר, ועל פי הערות המורים והתלמידים, עד שהתקבל הנוסח הסופי.

רצף הרעיונות בספר

רצף הרעיונות בספר אינו "כרונולוגי" (כלומר, הוא אינו מתאר את ההיסטוריה של החיים על פני כדור הארץ מהמוקדם למאוחר או להיפך) וגם לא נכתב על פי הסדר בו התפתחו הרעיונות במהלך ההיסטוריה של המדע, אלא מנסה לבנות שלב אחרי שלב הסבר אבולוציוני לכלל התופעות הגדולות של הביולוגיה: המגוון העצום של היצורים, הדמיון ביניהם למרות השוני, ההתאמה בין היצורים החיים לסביבתם והפיזור הגיאוגרפי שלהם.

פרקים א-ד מטפלים בשאלה: כיצד משתנות אוכלוסיות לאורך זמן? בפרקים אלה מוסברים השינויים המתרחשים באוכלוסיות יצורים השייכים לאותו מין ביולוגי בעזרת רעיון הברירה הטבעית. **פרק ה** מציג את המנגנונים בהם נוצרת שונות באוכלוסיות (מוטציות וצירופים חדשים של גנים קיימים ברבייה זוויגית). בסוף הפרק נערך השילוב בין היצירת המתמדת והאקראית של השונות, לבין תהליך הברירה הטבעית. **פרק ו** מציג את הרעיון כי שינויים קטנים יכולים להצטבר במהלך הדורות ולהסביר את התפתחותן של תכונות מורכבות. **בפרק ז** מוצגת הסחיפה הגנטית שמשפיעה על הישרדותן של תכונות באופן אקראי ללא קשר לתנאי הסביבה. **פרקים ח-י** עוסקים בתופעות שמעורבים בהן מינים רבים. הם מסבירים כיצד נוצרים מינים חדשים ואיך ניתן להסביר את הדמיון בין המינים. **פרק י"א** מתאר את התפתחות הרעיונות האבולוציוניים בהיסטוריה של המדע ומציג את עבודתם של מדענים שונים.

הרצף נבנה בהסתמך על מחקרים שנעשו בהוראה ולמידה של נושא האבולוציה מתוך מטרה לעבור עם התלמידים תהליך מתפתח ובעל היגיון. התהליך מלווה בבנייה הדרגתית של **מפת למידה** המופיעה בסיום כל פרק בספר התלמיד ומקשרת בין הרעיונות שנלמדו באותו פרק לבין רעיונות שנלמדו בפרקים קודמים. מפת הלמידה היא אמצעי ויזואלי להמחשת הקשרים בין הרעיונות המרכזיים המוצגים בספר ובעזרתה יכולים התלמידים לעקוב אחרי המורכבות ההולכת וגדלה של הרעיונות הנלמדים.

כדוגמה מובאת מפת הלמידה הניתנת בסוף פרק ג':



דרכי ההוראה בספר

א. טיפול ברעיונות נאיביים של תלמידים

- בניסיון לטפל ברעיונות הנאיביים הקשורים באבולוציה, הצגנו במדריך למורה מספר פעמים את התפיסות הרווחות בקרב התלמידים על מנת שיהוו כלי עזר. לעיתים קרובות, היצגנו את תפיסות התלמידים בטבלה כשמוול כל תפיסה נאיבית מוצגת התפיסה המדעית המקובלת.

רעיון שכיח אצל תלמידים	הרעיון המדעי המקובל	בעיה
כל קבוצה של מינים קרובים שחיה כיום כמו יונקים, זוחלים או עופות, התפתחה ממין קדום אחר: היה אב קדום אחד לכל היונקים, שני לכל הזוחלים ושלישי לכל העופות (מודל הקבוצות). התפתחות היצורים החיים דומה לשלבים בסולם, שבו מין קדום אחד היווה מוצא לכל המינים וכל מין חדש התפתח ממין שקדם לו. במהלך האבולוציה שלבים נמוכים הוחלפו בשלבים גבוהים. האדם נמצא בראש הסולם (מודל ה"סולם").	התפתחות היצורים החיים דומה ל"שיח" לפיו מין קדום אחד היווה מוצא לכל המינים, וממנו התפצלו כל היצורים. במהלך האבולוציה נוצרים מינים ונכחדים מינים (מודל ה"שיח").	כיצד התפתחו היצורים על פני כדור הארץ?

- מחקרים מראים כי חשיפה של תפיסות התלמידים לפני תחילת ההוראה ובמהלכה חיונית ללמידה משמעותית. משום כך, כללנו בתחילת כל פרק שאלות לדין עם התלמידים. מטרת השאלות **אינה** לומר לתלמידים את התפיסות המדעיות המקובלות אלא לברר מהם הרעיונות האינטואיטיביים של התלמידים ולאפשר להם לשמוע את רעיונות עמיתיהם. נוסף על השאלות בספר התלמיד, מובאים במדריך למורה שלושה שאלונים מוכנים לצילום (בתחילת פרק א, בתחילת פרק ה ובתחילת פרק ו). השאלונים יכולים לשמש לבדיקת הידע המוקדם בתחילת ההוראה. ידע זה, שכולל גם רעיונות נאיביים וגם רעיונות מקובלים מדעית, הוא הבסיס להמשך ההוראה. אנחנו ממליצים להחזיר את השאלונים מתחילת ההוראה לתלמידים כחלק מההערכה המסכמת ולתת להם אפשרות לתקן את תשובותיהם. דבר זה יתן הזדמנות לתלמידים לראות כיצד השתנו רעיונותיהם.
- נעשה ניסיון להביא לשינוי בתפיסות הנאיביות של התלמידים בעזרת תופעות שסותרות את רעיונותיהם הנאיביים. כך, למשל, הרעיון השכיח בקרב תלמידים 'הורשת תכונות נרכשות' קשור קשר הדוק ליכולתם של תלמידים להבין את רעיון הברירה הטבעית. בניסיון להתמודד עם התפיסה הנאיבית הנפוצה לפיה "הגירפות מתחו את צווארן כדי להגיע לעלים על הענפים הגבוהים", מוצגות בפרק א תכונות נרכשות כמו: אוזניים מחוררות, זנב מקוצץ בעכברים ועוד. התלמידים מתבקשים להסביר מדוע תכונה נרכשת אחת, כמו צוואר שהוארך בעזרת טבעות מתכת, לא תעבור בתורשה, בשעה שתכונה נרכשת אחרת, דוגמת צוואר שהוארך "במטרה להגיע לעלים הגבוהים" תעבור לדעתם מהורה לצאצאיו. דיון זה מאפשר לתלמידים להתמודד עם תופעות סותרות ומטרתו לעורר קונפליקט ואף להוביל לשינוי בתפיסות. מדובר, כמובן, בתהליך מורכב יותר מאשר זה המוצג לעיל. נעשה שימוש ביותר שאלות ניבוי, בתופעות רבות יותר ושלב העימות אף הוא ממושך ומעמיק יותר.

ב. הצגת מגוון תופעות

באבולוציה, בניגוד לתחומים אחרים במדע, קשה מאוד לערוך ניסויים ולאסוף עדויות עם התלמידים בכיתה. כללנו בספר דוגמאות רבות לתופעות טבע המשמשות כעדויות לתהליכים האבולוציוניים. הדוגמאות נלקחו מיצורים מגוונים – צמחים, בעלי חיים ומיקרואורגניזמים – וממקומות מגוונים בארץ ובעולם.

ג. שימוש בהדמיות

מכיוון שלא ניתן לצפות בתהליכים אבולוציוניים באופן ישיר, כללנו בספר הדמיות של תהליכים כאלה שמטרתן להקל על הבנת הרעיונות הנלמדים. הפעילויות מסייעות בהמחשת הרעיונות המופשטים ומספקות התנסות מעשית בכיתה.

ד. שימוש בשאלות לתרגול והערכה

מתוך המחקרים עולה כי דרך טובה לפתח הבנה אמיתית של רעיון מדעי בכלל, ושל האבולוציה בפרט, יכולה להיעשות דרך שיתוף התלמידים בלמידה באופן פעיל. במדריך למורה ישנן הנחיות לדיונים כאלה, שלב אחרי שלב. בספר התלמיד נכללות שאלות רבות נוספות בשלבים שונים של ההוראה. שאלות אלה מאפשרות לתלמידים לתרגל את שלמדו ויכולות לעזור במעקב אחרי התקדמות התלמידים ובתכנון המשך ההוראה בהתאם.

בהצלחה,
לולי, גלית, חן וסמדר

מדריך להתמצאות במדריך למורה

המדריך למורה מכיל תשובות לשאלות (לא לכולן), הערות חשובות, טבלאות ורעיונות מרכזיים. מספר סימנים, החוזרים על עצמם בכל הפרקים, נועדו להקל את הקישור בין ספר התלמיד למדריך למורה.

מפתח הסימנים

הערה או תשובה לשאלה שאינה ממוספרת בספר התלמיד	
תשובה לשאלה ממוספרת	 
תשובה לשאלת סיכום המופיעה בסוף פרק	
רעיון הרחבה	
הבהרה במקומות בהם הוצגה לתלמידים גרסה פשוטה יותר של רעיון או תהליך מדעי	
שאלה המופיעה רק במדריך למורה	
תשובה לשאלה המופיעה רק במדריך למורה	
שאלון מקדים מוכן לצילום	
תפיסות רווחות בקרב תלמידים	
הצעה לצילום על גבי שקף	



לפרקים א-ד

1. מעדויות מאובנים ידוע כי אבות אבותיהן של הג'ירפות שחיות כיום היו בעלי צוואר קצר יחסית. ידוע כי הייתה תקופה מסוימת שבה המזון על הקרקע התמעט בעקבות בצורת, אך תמיד נותר מזון על ענפי העצים. כיצד אפשר להסביר את העובדה שלג'ירפות שחיות כיום יש צוואר ארוך?

2. תכשירים להשמדת כינים היו יעילים הרבה יותר בעבר מאשר היום. מדענים טוענים כי עם השנים לתכשירים יש פחות ופחות השפעה על הכינים. הסבירו בפירוט מה, לדעתכם, קרה במהלך השנים שגרם להשפעה הפחותה של התכשירים על הכינים.

3. משקלם של דלית שגב ושל בעלה, דני שגב, היה גבוה מהממוצע, כאשר פגשו זה את זו ונישאו. כשנה לאחר נישואיהם נולדה להם התינוקת רחל. לאחר לידת התינוקת, הפחיתו דלית ודני ממשקלם, והם שומרים על משקל זה עד היום. כחמש שנים לאחר לידת רחל, נולדה התינוקת רות. האם, לדעתכם:

א. משקלה של רחל בעת הלידה היה גבוה מזה של רות?

ב. משקלה של רות בעת הלידה היה גבוה מזה של רחל?

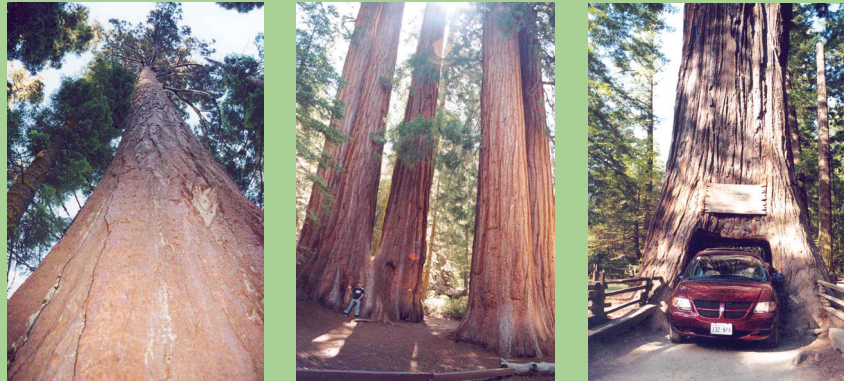
ג. אי-אפשר לקבוע.

הסבירו את קביעתכם.

פרק א'

כיצד התארך צווארן 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 חייו, 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 חייו 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.

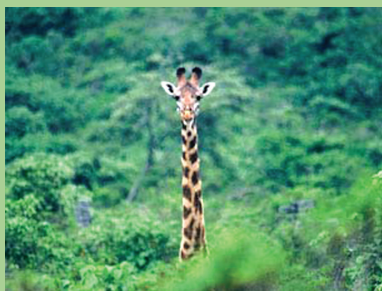
3

אוכלוסייה (population) – קבוצת פרטים השייכים לאותו המין וחיים באזור מסוים. אפשר להציג מונח זה, אם זו הפעם הראשונה שהתלמידים נחשפים אליו.

הדיון במושג "מין" (species) ובבעייתיות הגלומה בו ייעשה בחלק השני של הספר. לעת עתה נשתמש במונח במשמעותו המקובלת שהיא קבוצת פרטים שיכולים להתרבות ביניהם ולהעמיד צאצאים פוריים (לא במשמעות של זכר או נקבה).

יש להדגיש שהדמיון בהקבלה בין הפרפר והאדם הוא במשך החיים הקצר שלהם יחסית לשינויים סביבם. אך בעוד שהפרפר מתייחס לעץ סקוויה מסוים, המדענים מתייחסים לאוכלוסייה שלמה של פרטים במהלך דורות רבים.

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 (1834–1914) 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? **א**
- האם בכל התרבויות האנושיות משך הדור זהה? **ב**
- האם, לדעתכם, חל שינוי במשך הדור במהלך הקיום האנושי? (השוו בין האדם הקדמון לאדם המודרני). **ג**
- מהם, לדעתכם, היתרונות בביצוע הניסוי דווקא בעכברים? **ד**

4

מאובנים הם שרידים של יצורים או של עקבות שלהם שהוטבעו בשכבות סלע שונות והשתמרו במשך השנים. על המאובנים נרחיב בהמשך הספר.

אף-על-פי שהתלמידים ניסו להסביר בכתב את התארכות צוואר הג'ירפה ותופעות אחרות בשאלון הפתיחה, כדאי לאפשר להם לבטא את רעיונותיהם גם בעל פה. מטרת הדיון בשלב זה אינה לתת את "התשובה הנכונה", אלא לחשוף את רעיונותיהם המוקדמים של התלמידים. לתלמידים רבים יש רעיונות אינטואיטיביים הקשורים להורשת תכונות נרכשות ולשינויים באוכלוסייה, שאינם עולים בקנה אחד עם התפיסות המקובלות על המדענים.

תלמידים חושבים ש...

תלמידים רבים מסבירים את השתנות הצוואר אצל הג'ירפות כך: "עקב הידלדלות המזון על הקרקע נוצר אצל הג'ירפות צורך קיומי להגיע לעלים שבצמרות העצים. לפיכך הן מתחו את צווארן וכך פיתחו צוואר ארוך. הצוואר המתוח עבר בתורשה לצאצאים. בכל דור מתחו הג'ירפות את צווארן קצת יותר וצאצאיהן נולדו עם צוואר ארוך מעט יותר, עד שהגיע לאורך הצוואר של ימינו" (תלמידת כיתה יא).

במחקרים רבים שנערכו בעשרים וחמש השנים האחרונות באוסטרליה, באנגליה, בארצות הברית ובישראל ועסקו בלמידה של מנגנון הברירה הטבעית, נמצא באופן עקבי שתשובות כאלה שכיחות בקרב תלמידי תיכון ואוניברסיטה רבים. גם על פי ניסיונו, רעיונות אלה שכיחים מאוד בקרב תלמידי תיכון, שלמדו כבר חלק מהנושאים בביוגנטיקה. אפשר לסכם את הרעיונות הרווחים בקרב תלמידים בטבלה שבעמוד הבא:

בעיה	רעיון שכיח אצל תלמידים	הרעיון המדעי המקובל
איך משתנות אוכלוסיות לאורך זמן?	על ידי שינוי הדרגתי בתכונות של כל הפרטים באוכלוסייה (השינוי קורה בגלל רצון הפרט או ש"הטבע" דואג לזה).	על ידי עליית השכיחות היחסית של פרטים בעלי התכונה שמקנה יתרון.
מה קורה לפרטים בעקבות שינויים בסביבה?	פרטים יכולים לשנות בצורה מכוונת את תכונותיהם בתגובה לשינויים בסביבה (למשל, על ידי שימוש מוגבר או חוסר שימוש באיברים מסויימים).	לפרטים שהם כבר בעלי תכונות מסוימות יש סיכוי לשרוד ולהעמיד צאצאים יותר מאשר לאחרים.
איך משפיעים תנאי הסביבה על אוכלוסיות?	הסביבה גורמת לשינויים.	בסביבה נבררים הפרטים המתאימים ביותר מתוך אלו הקיימים.

שאלות מנחות לדיון בשאלה "כיצד התאריך צוואר הג'ירפות?", בתגובה לתלמידים המציעים את התשובה שלפיה הג'ירפה מותחת את צווארה כדי להגיע לעלים הגבוהים:

- נניח שהיצע המזון הזמין לג'ירפה אכן פחת במידה ניכרת באזורים הקרובים לקרקע. חשבו על ג'ירפה אחת בעלת צוואר קצר ותארו מה קורה לה.
- מה יקרה לצאצאיה של ג'ירפה זו? (למשל, אם הצליחה למתוח את צווארה בסנטימטר אחד, כיצד ייוולדו צאצאיה?).
- מה היה קורה, אילו בשלב מסוים היה המזון בשיחים ובמקומות נמוכים אחרים חוזר להיות זמין (למשל, אילו תקופת בצורת, שנמשכה מספר שנים, הייתה מסתיימת)?

חשוב להנחות את התלמידים להסביר כיצד לדעתם קרה השינוי ולא להתמקד רק בכדאיות השינוי לג'ירפות. תלמידים יודעים לומר, שהצוואר הארוך הקנה לג'ירף יתרון כי הוא אפשר לו להגיע למזון שנמצא במקומות גבוהים. עודדו אותם גם להציע מנגנון של התהליך (רצף אפשרי של שלבים).

בשלב זה של הלימוד המטרה היא לשקף לתלמידים את הרעיונות שלהם, אך עדיין לא לומר להם את התשובה "הנכונה". אפשר לומר, למשל: "פירוש הדבר, שמה שאתם אומרים זה שהג'ירפה מתחה את צווארה על מנת לשרוד, והתכונה עברה לצאצאים. במילים אחרות, תכונה שהיצור רוכש במהלך חייו, יכולה לעבור לצאצאיו. אתם גם אומרים שהג'ירפה האריכה את צווארה במטרה להגיע לעלים בצמרות העצים. כלומר, היא שינתה את עצמה באופן מכוון כדי לשרוד".

גם אם לא עולה הסבר כזה בכיתתן, כדאי להעלותו בכל מקרה כהסבר שניתן על ידי תלמידים מכיתה אחרת, שכן בהחלט ייתכן שתלמידים שנמנעו מלהשתתף בדיון, חושבים שזהו ההסבר הנכון.

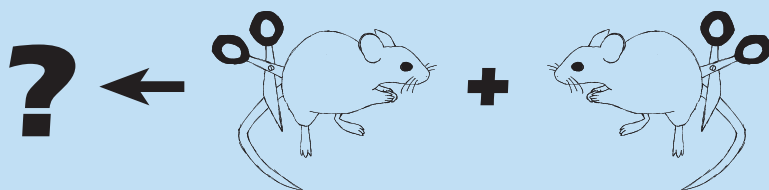
בסיכום הדיון יש לומר לתלמידים כי, למעשה, הם מציעים, שתכונות שנלמדו או נרכשו במהלך חיי הפרט עוברות בתורשה לצאצאיו.

- האם תכונות שיצורים רוכשים במהלך חייהם עוברות בתורשה? תנו דוגמה שתתמוך בקביעתכם. החוקר אוגוסט וייסמן, שחי ופעל בסוף המאה התשע עשרה ובתחילת המאה העשרים, בדק בדיוק את השאלה הזו.

- א) זה המקום להסביר כי משך הדור, שאליו מקובל להתייחס, הוא משך דור ממוצע.
- ב) אפשר להשוות בין מדינות מערביות לבין מדינות העולם השלישי ולקשר בין משך דור לבין תזונה, רמת רפואה, תוחלת חיים, מודעות לתכנון משפחה ונורמות חברתיות.
- ג) בעקבות השיפור בתזונה וברמת הרפואה והעלייה בתוחלת החיים ובמודעות לתכנון משפחה, משך הדור בתקופה המודרנית התארך.
- ד) בגלל משך הדור הקצר ומספר הצאצאים הגבוה בשגר.

הצעה לשקף

הניסוי של וייסמן



דור הצאצאים

דור ההורים

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

הצאצאים נולדו ללא זנב.

קצרים בהרבה מהזנבות המקוריים של ההורים.

מעט קצרים יותר מהזנבות המקוריים של ההורים.

דומים לאורך הזנבות המקוריים של ההורים.

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

הצאצאים נולדו ללא זנב.

קצרים בהרבה מהזנבות המקוריים של ההורים.

מעט קצרים יותר מהזנבות המקוריים של ההורים.

דומים לאורך הזנבות המקוריים של ההורים.

- 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.

הצאצאים נולדו ללא זנב.

קצרים בהרבה מהזנבות המקוריים של ההורים.

מעט קצרים יותר מהזנבות המקוריים של ההורים.

דומים לאורך הזנבות המקוריים של ההורים.

וויסמן 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.

5

מומלץ לצלם את דף הניסוי כשקף ולמלא אותו במהלך הדין הכיתתי.

לאחר שכל התלמידים סיימו לענות על השאלות, כדאי לערוך הצבעה בכיתה ולרכז על הלוח או בשקף את מספרי התלמידים שבחרו בכל תשובה. עודדו את התלמידים לשתף את הכיתה בנימוקיהם.

תלמידים חושבים ש...

בכל הכיתות שבהן ניסו את יחידת הלימוד, היו תלמידים רבים שבחרו תשובה שונה בכל שאלה: כל התלמידים טענו כי לאחר דור אחד לא היה הבדל באורך הזנב ולכן בחרו בתשובה הראשונה, אולם רבים חשבו כי אורך זנבות הצאצאים יתקצר לאחר מאתיים דורות. כמו כן, היו לא מעט תלמידים בכל כיתה שחשבו שזנבות הצאצאים יתקצרו מעט כבר לאחר שישים דורות.

בקשו מהתלמידים להסביר את ההבדל בתשובותיהם: מדוע, לדעתם, לא יהיה הבדל לאחר דור אחד ויהיה הבדל לאחר מאתיים דורות?

ייתכן שתלמידים יעלו בשלב זה טיעונים שנובעים מידיעותיהם בנושא התורשה (לדוגמה, "זה תלוי בשני ההורים"; "זה תלוי אם התכונה דומיננטית או רצסיבית" וכן הלאה). הערות אלה אינן רלוונטיות לשאלה שאנו עוסקים בה. מקדו את התלמידים בשאלה.

- תארו לכם, שזוג עכברים מסוים שהשתתף בניסוי של וייסמן, הספיק להתרבות לפני שוייסמן קיצר את זנבם והתרבה שוב לאחר החיתוך. האם, לדעתכם, יהיה הבדל באורך זנבות הצאצאים שנולדו לפני החיתוך ולאחריו? מדוע?

בסיכום הדין יש לומר לתלמידים כי וייסמן מצא שאורך הזנב של כל הצאצאים בכל הדורות דומה פחות או יותר לאורך הזנבות המקוריים של הוריהם.

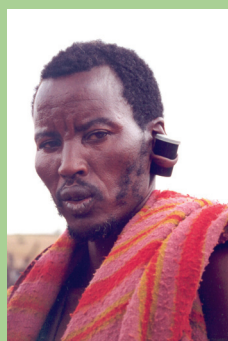
ליחור דיוק...

סביר להניח שדווקא היו הבדלים קטנים בין אורך הזנבות של הצאצאים לבין אורך הזנבות של ההורים. הבדלים אלה מייצגים את השונות הקיימת בכל אוכלוסייה ואשר נובעת מהעובדה שבמהלך הרבייה המינית נוצרים מגוון של תאי מין ושל צירופים של תאי מין. נרחיב על כך בפרק ה'. בשלב זה חשוב להבין שגם לו היו הבדלים, הם היו אקראיים ולא בעלי מגמה מסוימת (כלומר, בכיוון של התקצרות הזנב עם העלייה במספר הדורות).

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 לתנכי אוזניהם להתארך.



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



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

כדאי לחדד את השאלה עבור הדוגמה העוסקת בצמחים: אם למשל, ייקחו ייחורים או זרעים מאחד השיחים המעוצבים האלו וישתלו אותם במקום אחר, האם יצמחו מהם שיחים מעוצבים גם ללא גיזום?

6

עוד שתי דוגמאות למנהג שנעשה במשך דורות רבים:

יהודים נוהגים לערוך טקס ברית מילה מזה 200 דורות. על פי המסורת, מניין השנים שבהן נערך טקס ברית מילה הוא כחמשת אלפים שנה וכפי שהזכרנו, מקובל לראות בעשרים וחמש שנים זמן דור בבני אדם ($5,000/25=200$).

בסין נחשבו בעבר כפות רגליים קטנות של נשים ליפות יותר. על מנת להגביל את גדילת כפות הרגליים נהגו לחבוש את רגלי הבנות חבישה הדוקה. בעקבות העיוות שיצרה הקשירה בעצמות כף הרגל נותרו כפות רגליהן של בנות אלה קטנות מאוד גם בכגרותן. מנהג החבישה התקיים לאורך דורות רבים.

א בכל הדוגמאות בוצעה פעולה במשך עשרות דורות, ששינתה את צורתם החיצונית של היצורים (בני אדם, כלבי בוקסר, שיחים). למעשה, היצורים רכשו או איבדו תכונה חדשה במהלך חייהם. התכונה החדשה (השינוי בצורה) לא עברה בתורשה לצאצאים: למשל, ענדת טבעות סביב הצוואר האריכה את צוואר האישה, אך לא את צוואר צאצאיה, קיצוץ זנבם של הכלבים לא הוביל לצאצאים קצרי זנב, וגם גיזום השיחים וברית מילה לא גרמו לשינוי התכונה בצאצאים.

ב שיער צבוע, עור שזוף מהשמש, קעקועים, שרירים מפותחים, ידע, ניסיון בתחומי חיים שונים, או גבעול צמח הכופף לכיוון מסוים על פי מקור האור.

- 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. **א**
- הביאו דוגמאות נוספות של תכונות שיצורים רוכשים או מאבדים במהלך חייהם והחליטו אם הן עוברות בתורשה לצאצאיהם. תנו דוגמאות מהחי ומהצומח. **ב**

נחזור לשאלת ההתארכות של צוואר הג'ירפה.

- נניח שג'ירפה מסוימת מתחה את צווארה, וצווארה התארך בסנטימטר. האם צאצאיה יהיו אף הם בעלי צוואר ארוך בסנטימטר? **ג**

מדוע תכונות מסוימות 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. **ד**
- 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 מביניהן 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. **ה**

7

ג תלמידים עשויים לטעון, שתכונת הצוואר שהתארך, עברה בתורשה לצאצאים ולנמק זאת בדרכים שונות. אנו ממליצים **לא** לומר את התשובה הנכונה, אלא, כפי שיוסבר להלן, לנסות לנהל דיון בטיעונים אלו. חלק מטיעוני התלמידים הגיוניים למדי, ובתקופות שונות במהלך ההתפתחות של הרעיונות האבולוציוניים אף בוטאו על ידי מדענים.



לפניכם דברי תלמידים הטוענים, שהתארכות צוואר הג'ירפות היא תכונה שעוברת בתורשה בניגוד להקטנת רגלי הנשים או להארכת תנוכי האוזניים. טיעונים אלה הועלו בכיתות שבהן נלמדה גרסת הניסוי של היחידה. הם מופיעים בטבלה שלפניכם לצד טיעונים שאפשר לטעון נגדם במסגרת דיון כיתתי. טיעוני הנגד יכולים לבוא מהמורה או מעמיתים. לאחר הדיון הכיתתי כדאי לסכם עבור התלמידים (על גבי שקף, למשל) את טיעוניהם הספציפיים ואת טיעוני הנגד המתאימים.

טענות התלמידים	טענות נגד אפשריות
מתיחת הצוואר אצל ג'ירפות היא צורך קיומי, לכן התכונה עוברת לצאצאים. ניקוב חורים באוזניים אינו צורך קיומי, ולכן לא יעבור.	נניח שניקוב חורים באוזניים ייהפך לצורך קיומי (אם פתאום יחליטו חלילה להרוג כל ילד שיוולד ללא חורים באוזניו), האם אז תעבור התכונה לצאצאים? איך "ידעו" הילדים שכדאי להם להיוולד עם חורים באוזניים? (איך "ידעו" צאצאי הג'ירפה שכדאי להם להיוולד בעלי צוואר ארוך?)
גם אם ניקוב האוזניים ייהפך לצורך קיומי, מדובר בהריגה על ידי אנשים ולא על ידי הטבע. לכן תכונת החורים באוזניים לא תעבור לצאצאים.	האם צורך קיומי נקבע תמיד על ידי הטבע? האדם משפיע על הטבע וגורם לעתים קרובות לשינוי ניכר ביצורים שונים. לדוגמה, ציד, כריתת יערות או זיהום מקורות מים גורמים לשינויים מרחיקי לכת באוכלוסיות יצורים – לעתים שינויים שמביאים לשגשוג של אוכלוסייה מסוימת, אך לעתים קרובות יותר לצמצום ואף להכחדה של יצורים חיים.
הג'ירפה מתאמצת בעצמה למתוח את צווארה, ואילו ניקוב חורים באוזניים נעשה על ידי אדם אחר.	מה לגבי פיתוח שרירים? האם שרירים, שנבנו על ידי המתעמל בעצמו בעמל רב בחדר הכושר, יעברו לצאצאים? האם מבנה הגוף שהשתנה יעבור לצאצאים? האם, למשל תינוקו של ארנולד שוורצנגר ייוולד שרירי במיוחד? או האם שריריו יתפתחו בהגיעו לגיל מסוים, גם אם לא ייכנס לחדר כושר לעולם? (ייתכן כי ה"כישרון" לפתח שרירים עובר בתורשה, אך מסת השרירים שנבנתה לאורך זמן לא עוברת בתורשה).
הג'ירפה מתאמצת כל חייה, ואילו ניקוב חורים הוא רגעי.	האם צביעת שיער לאורך זמן תעבור לצאצאים? האם פיתוח שרירים לאורך שנים יעבור לצאצאים?

בתום הדיון כדאי להדגיש כי למעשה לא הצדיקו התלמידים בצורה משכנעת את הטענה, שצאצאי הג'ירפות, שמתחו את צווארן, היו גם הם בעלי צוואר ארוך יותר. ראינו שצורך קיומי, מאמץ מתמשך או חזרה על השינוי לאורך זמן או במשך דורות רבים אינם משפיעים על העברת התכונה לדור הבא.

קרב לוודאי שחלק מהדוגמאות שיביאו התלמידים יהיו של תכונות תורשתיות שמושפעות מהסביבה, כגון כישרון אתלטי, כישרון נגינה, הצבע הירוק בצמחים, מחלת הסרטן, אינטליגנציה. עמדו על כך שתכונות רבות מושפעות במידה רבה מהסביבה. בהמשך נדון בכך.

לאו דווקא. יש תכונות, כמו סוג הדם, שאפשר לומר לגביהן בוודאות שהן נקבעות אך ורק על פי התורשה. תכונות אחרות, כמו נימוסי שולחן, הן תוצאה של חינוך. מרבית התכונות האחרות (למשל, הצטיינות בספורט) מושפעות הן מהגנים והן מהסביבה (במקרה שלפנינו – תזונה ואימונים).

ק בקשו מהתלמידים לתת דוגמאות נוספות מכל מיני יצורים.

ה התשובה לשתי השאלות היא שלילית. יש תכונות תורשתיות, כגון: נטייה להתקרחות, יצירת זרע בגברים והתפרצות מחלת הנטינגטון שאינן באות לידי ביטוי ברגע הלידה, אלא הרבה יותר מאוחר. לעומתן יש תכונות שאינן תורשתיות אלא נרכשות שכאות לידי ביטוי כבר ברגע הלידה, כן, למשל, תינוק לאם חולת איידס עלול להיות נגוע בנגיף כבר ברגע לידתו, כיוון שהוא נחשף לנגיף במהלך הלידה.

הורשה של תכונות מדור לדור מתאפשרת בעיקר בעזרת החומר הגנטי - ה-DNA. עם זאת, בשנים האחרונות נחקרות דרכי הורשה (כלומר, העברת תכונות מדור לדור) שאינן גנטיות אך אמינות ביותר. חשיבותן היחסית עדיין לא ברורה והן נחקרו פחות. ספר זה יעסוק בשינוי הרכב התכונות הגנטיות (תכונות שמקודדות ב-DNA) באוכלוסייה.

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 ומשופתת 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: **ק**
- ✓ 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?

8

ליחור
דיוק...

תכונה יכולה לעבור בתורשה, כלומר, מדור לדור, רק אם ה-DNA המקודד לה מצוי **בתאי המין** (ביצורים המתרבים ברבייה זוויגית). תנאי נוסף הוא שהשינוי ב-DNA ישפיע על המופע של התכונה. נקודות אלה יידונו בהרחבה בפרק ה'. במקרים שבהם תלמידים מעלים נקודות אלה בשלב זה של הלימוד, אפשר לפתח דיון קצר שיעסוק, למשל, בשאלה:

- ?** HIV, הווירוס הגורם למחלת האיידס בבני אדם, גורם לשינוי ב-DNA בתאים השייכים למערכת החיסון. האם, לדעתכם, מחלת האיידס עוברת בתורשה?
- !** HIV אמנם גורם לשינוי ב-DNA, אך לא בתאי המין שמהם מתפתח הצאצא, אלא בתאים השייכים למערכת החיסון, שאינם מועברים לצאצא. משום כך מחלת האיידס **אינה** עוברת בתורשה.

תלמידים רבים בכיתות הניסוי חשבו ש-HIV עובר בתורשה, מכיוון שחלק מהאמהות החולות או הנושאות את וירוס האיידס, יולדות תינוקות נשאי איידס (כ-35%-40% מהמקרים, באין טיפול מונע). לידת תינוק נשא נובעת מהדבקה פשוטה שמתרחשת במהלך המעבר בתעלת הלידה (או תוך כדי הנקה). בשני מצבים אלה מועברים וירוסים שנמצאים במערכת הדם או בחלב האם לתינוק. בעולם המערבי, אפשר כיום למנוע כמעט לחלוטין הדבקה של תינוקות (כלמעלה מ-99% מהמקרים) בעזרת טיפול מתאים, אם ידוע מראש שהאם נשאת HIV.

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 יראה, לדעתכם, תינוקם – בעל שרירים מפותחים או בעל שרירים רגילים?

השוו את תשובותיכם והסבירו אותן.

9

2

יהיו תלמידים שיגידו ששני התינוקות ייוולדו בעלי שרירים רגילים, מאחר ששרירים מפותחים הם תכונה נרכשת ולא תורשתית. ייתכן שיהיו תלמידים שיאמרו ששני התינוקות ייוולדו דווקא בעלי שרירים מפותחים מהרגיל, כיוון שהם חושבים שלתכונה זו יש גם בסיס גנטי (נוסף על השפעת האימון). שתי התשובות אפשריות, בתנאי שהתלמידים מנמקים את תשובתם. תשובה לא נכונה היא: התינוק הראשון ייוולד בעל שרירים מפותחים ואילו השני – בעל שרירים רגילים. תשובה זו מעידה על תפיסה המייחסת לסביבה השפעה על הורשה של תכונות.

?

מיינו את התכונות המפורטות להלן לכאלה שעוברות בתורשה, לכאלה שאינן עוברות בתורשה ולכאלה שעוברות בתורשה ומושפעות מהסביבה: סוג דם, קוצר ראייה, עור יבש בכפות הרגליים, עיניים מלוכסנות, צבע עור, אורך צוואר הג'ירפה.

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 ממתחתו (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

ייתכן שאבותיהן של הג'ירפות ניסו ואולי אף הצליחו למתוח מעט את צווארם אולם צאצאיהן לא נולדו עם צוואר "מתוח" יותר. (פרק ו יעסוק בהתאמה פיזיולוגית והתנהגותית של פרטים והקשר בינה לבין ברירה טבעית.)



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.

במהלך הפעילות יש צורך בסרגלים.

1 2

תכונות משותפות אפשריות: צבע, חספוס הקליפה, טעם, ריח. תכונות מבדילות: מספר הזרעים, הגוון המדויק, מידת החספוס, הצורה, שימו לב, תכונות שנראות במבט ראשון כמשותפות (למשל, צבע), מתגלות כמבדילות, כאשר בודקים אותן ביתר דקדקנות (למשל, גוון).

מצאו את ההבדלים

לפניכם ערמה של בוסנים בקליפתם.

- עבדו בזוגות והציעו ארבע תכונות המשותפות לכל תרמילי הבוסנים.
- הציעו ארבע תכונות המבדילות בין הפרטים.
- 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.
ד. בנו טבלה ורשמו את התוצאות במקום המתאים.

מספר הבוסן	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).



- בצעו סעיפים ד–ה גם לגבי התפלגות מספר הזרעים בכל תרמיל.
- קבצו את התוצאות הכיתתיות בטבלה (בצעו את סעיפים ד–ו על פי הנתונים של כל התלמידים).

11

אפשר לעשות את התרגיל בגיליון Excel. במידה והתלמידים אינם שולטים בתוכנת Excel אפשר לתת את ההנחיות שלהלן:

- סמנו, באמצעות העכבר, את תחום התאים (טבלת שכיחויות) שברצונכם להציג בגרף.
- בסרגל הכלים בחרו באשף הפונקציות.
- בחרו בסוג תרשים "טורים".
- לכתובת הכותרות לתרשים ולצירים: הביאו את הנתב לכל אחת מתיבות הטקסט והקלידו את הכותרות המתאימות.
- בחרו במקרא: בטלו את הצגת המקרא.
- בחרו בסיום.



את התוצאות הכיתתיות רכזו בטבלת שכיחויות.

- שרטטו גרף עמודות המתאר את התפלגות השכיחויות של אורך התרמילים בכיתה.
- שרטטו גרף עמודות המתאר את התפלגות השכיחויות של מספר הזרעים בכיתה.

1 גרף שכיחויות מציג את

השונות באוכלוסייה או במדגם. כל עמודה

מייצגת את מספר

הפרטים בעלי ערך או

טווח ערכים מסוים.

2 יש להתייחס לפיזור

הנתונים: היכן ממוקמים

מרבית הפרטים והיכן

מיעוטם. ככל שמספר

הנתונים גדול יותר הגרף

המתקבל דומה יותר

לפעמון. לגרף הפעמון

שמתקבל קוראים

התפלגות נורמלית או

עקומה נורמלית.

4 מתקבלת שונות רבה

יותר במדידת אורך

התרמיל.

5 אורך התרמיל הוא

תכונה רציפה, ולכן

יש לה אינסוף ערכים

אפשריים (2, 2.1, 2.11,

2.111...). לעומת זאת,

מספר הזרעים בכל

תרמיל הוא תכונה

בדידה - בעלת מספר

ערכים מוגבל (1, 2, 3...).

6 בהחלט ייתכן שיהיו שני

בוטנים בעלי אותו אורך

תרמיל ומספר זרעים,

אך לא סביר שיימצאו

שני זרעים זהים בכל

תכונותיהם (למשל, גם

בגוון הקליפה וגם

במידת החספוס שלה).

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 זהים זה לזה בכל תכונותיהם? מדוע?

הטבלה שלפניכם מציגה את מספר התינוקות שנולדו במרכז הרפואי "כרמל" בחיפה בשנים 2001-2002 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? א
- האם פיזור הנתונים של שנת 2002 דומה לזה של 2001? ב
- השוו בין הנתונים של משקל התינוקות לבין הנתונים ששאספתם בפעילות הבוטנים. מה המשותף ביניהם? ג

12

- תרגיל זה פשוט לביצוע, וייתכנו לו וריאציות רבות. להלן הווריאציות שנוסו בכיתות הניסוי ובמפגשים עם מורים:
- שונות בבני אדם: מדידת אורך האמה בס"מ (מהמרפק ועד מפרק כף היד) של כל אחד מתלמידי הכיתה (להפריד בין נתוני בנים ונות).
 - שונות באורך זרעי קיקיון, תורמוס או זרעים אחרים, רצוי לא להשתמש בזרעים קנויים של שעועית שכן הם אחידים מדי.

אפשר לנסות גם את הווריאציות הבאות:

- שונות בעלים: מדידת אורך עלים מחטניים או קוטר עלים מצמח רחב עלים.
- שונות באדם (להפריד בין נתוני בנים ונות): היחס בין אורך הזרוע (מהכתף למפרק כף היד) לאורך הרגל, מדידת אורך הירך, גובה, אורך "מוטת" הידיים (המרחק בין כפות הידיים, כשהידיים פרושות לרווחה לצדדים), האורך בין מפרק כף היד לקצה האצבע האמצעית.

נדאי לקחת לתשומת הלב שהתרגילים העוסקים בשונות באדם עלולים ליצור אי נוחות בקרב חלק מהתלמידים.

- א) לו היינו משרטטים גרף של מספר היילודים כפונקציה של המשקל, הייתה מתקבלת עקומה נורמלית.
- ב) התשובה חיובית. גם כאן הייתה מתקבלת עקומה נורמלית וצורתה הייתה חופפת לזו של השנה הקודמת (למשל, השיא היה מתקבל באותו טווח משקלים - 3000-3500 גר').

ג) קיימת שונות וכן התפלגות נורמלית.

חשוב להדגיש, שמדובר
בהבדלים הקיימים בין פרטים
השייכים **לאותה אוכלוסייה**
ולא בין פרטים השייכים
למינים שונים שביניהם
השונות היא בולטת ומוכנת
יותר (למשל, לתלמידים
ברור שלנחשים ממינים
שונים יש דגם עור שונה, אך
אנו רוצים להדגיש שאפילו
נחשים מאותו המין נבדלים
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 בידדות (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.

13



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 מזגן על ידי גבעות. לאלו פרטים יש יתרון באזור המוכה רוחות – לערבות בעלות הענפים הגמישים יותר או לערבות שענפיהן קשיחים יותר? נמקד.

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 כפה 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".

14



כווננו את התלמידים להשתמש במונח "יתרון". מהירות הריצה של הצבאים הקנתה יתרון רק לאחר הופעת הנמרים.



חשיבותה של תכונה מסוימת להישרדות נקבעת על ידי הסביבה.

ציוד וחומרים

- **יריעת דשא סינתטי** חתוכה לריבועים (אפשר לקנות בחנויות כמו "הום סנטר", "אייס" וכו') כמספר הקבוצות בכיתה (יריעה בגודל של 40X60 ס"מ מספיקה לקבוצה בת 5 תלמידים). אפשר לבצע את הפעילות גם בחוץ, על דשא אמיתי.
- **כלי אחסון:** כוס שתייה חד-פעמית או כל מכל אחר שמתאים בגודלו למזון שבחרתם (כמספר התלמידים בכיתה).
- **"מקורים":** כלים מסוגים שונים שישמשו לאיסוף מזון (אפשר: אטבים, שיפודים, כפיות, קשיות, מלקטות, עפרונות וכו'). מספר סוגי הכלים כמספר הקבוצות בכיתה. מספר הכלים מכל סוג כמספר התלמידים בקבוצה.
- **"מזון":** מסוגים שונים (אפשר: צימוקים, זרעי שעועית, חרוזים, טבעות של דגני בוקר, מרשמלו, עדשים, סוכריות תיק-תק וכו'). יש להתאים את ה"מקורים" לסוגי המזון, כך שבשלב הראשון של הפעילות יהיה לכל צורת מקור לפחות סוג מזון אחד מתאים (כלומר, שהמקור יכול לאסוף אותם), ובשלב השני תהיה לפחות צורת מקור אחת שתתקשה לאסוף מזון.

חוקי הצייד

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? **א**
- האם אפשר להצביע על צורת מקור מסוימת (אחת או יותר) שיש לה יתרון על פני היתר? **ב**
- על סמך מה קבעתם? **ב**
- האם תשובתכם לשאלה הקודמת תהיה זהה גם אם תנאי הסביבה ישתנו? תנו דוגמה.

15

א בשלב זה סביר להניח שיהיו הבדלים במספר פריטי המזון שנאספו על ידי כל אחד מסוגי המקורים משום שיש מקורים שקל יותר להרים מזון בעזרתם ואחרים מותאמים לסוגי מזון רבים יותר.

ב כדי לייחס יתרון לצורת מקור מסוימת, יש להסתכל על נתוני כל הקבוצות לגבי אותה צורת מקור. נתונים של קבוצה אחת בלבד עלולים להיות תוצאה של מקרה.

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? **א**
- 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. **ב** מה תוכלו להסיק מכך על השפעת הסביבה על חשיבותן של תכונות מסוימות?

עד כה ראינו, שקיימת שונות בכל אוכלוסייה, ושונות 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

16

בשלב זה יש לפזר רק מזון מסוג אחד, כזה שתפיסו בעזרת אחת (לפחות) מצורות המקור תהיה קשה. למשל אפשר לפזר זרעי שעועית שאינם יכולים להיתפס על ידי שיפודים. יש לפזר סוג מזון זה בשפע.

א

בשלב זה סביר להניח שיהיו הבדלים גדולים יותר מאשר בשלב הראשון במספר פריטי המזון שנאספו על ידי כל אחד מסוגי המקורים, משום שיש מקורים שלא יוכלו להתמודד עם סוג המזון היחיד המוצע.

ב

(למשל, אם המזון יהיה נזלי, יהיה יתרון לקשית).

בפרקים הבאים נראה כיצד השונות בצורת המקור של ציפורים אמיתיות משפיעה על הישרדותן בטבע.



א כל הגדרה של תלמיד למושג "מוצלח" תתקבל בשלב זה. כדאי להציג את הטבלה בשקף, לערוך הצבעה בין התלמידים ולבקש נימוקים בעל פה.

תלמידים חושבים ש...

ככיתות הניסוי כל אחד מארבעת האריות נבחר על ידי תלמידים. האריות השונים מייצגים תפיסות רווחות של תלמידים ביחס למושג "הצלחה":

- תלמידים רבים בוחרים בכפיר בגלל חוסנו הפיזי. הוא מייצג תפיסה שעל פיה כושר אתלטי, בריאות וחוזק פיזי מביאים להצלחה ביולוגית.
- תלמידים אחרים בוחרים בליזבה ומנמקים זאת בכך שהארץ ימים יותר מכל האריות והעמיד את מספר הצאצאים הגדול ביותר.
- תלמידים שבחרים באסאד מנמקים את בחירתם בכך שהיה בעל תושייה והצליח להסתגל לשינויים.
- תלמידים שבחרים בלאון מסתמכים על מספר הצאצאים הגבוה ביותר שהגיע לבגרות.

כ כווננו את הדין להבדל בין מאפיינים שמקנים יתרון בדור הנוכחי (כגון: גודל וחוזק) לבין מאפיינים שמשפיעים על הדורות הבאים (מספר צאצאים שהגיעו לבגרות). כפיר, ליובה ואסאד ניחנו בתכונות שהקנו יתרון לעצמם ולמשפחתם בדור שלהם: כפיר היה גדול וחזק, ולכן יש להניח שהתמודד טוב יותר בקרבות על טריטוריה. אסאד ידע להנהיג את הלהקה, וכך אפשר את המשך קיומה גם לאחר השרפה. לליובה היה מספר הנקבות הגדול ביותר בלהקתו, הוא חי מספר שנים רב ביותר ונולדו לו מספר הגורים הגדול ביותר (אבל מספרם של אלה שהגיעו לבגרות היה קטן יחסית). לעומת זאת, לאון עצמו מת בגיל צעיר יחסית, אולם העובדה שהעמיד את מספר הצאצאים הגדול ביותר שהגיעו לבגרות ולכן יכולים להעמיד צאצאים בעצמם, מציעה שמספר צאצאיו בעוד דורות רבים יהיה הגדול ביותר.

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 ולא 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?

17

**ליחור
דיוק...**

אנו עוסקים בתרגיל בהימור ולא בניבוי מכמה סיבות: ראשית, איננו יודעים מה גרם לכך שלאון העמיד את מספר הצאצאים הגדול ביותר שהגיעו לבגרות. האם זו תכונה תורשתית (או אוסף של תכונות), ואולי תכונה (תכונות) נרכשת. עוד ייתכן שמדובר בנסיבות אקראיות לחלוטין שהובילו לכך. כמו כן, איננו יודעים מה יהיו תנאי הסביבה בעוד כמה דורות, וכבר ראינו שתכונות תורשתיות המקנות יתרון בדור מסוים, אינן מקנות בהכרח יתרון בדור הבא. כמו כן, איננו יודעים מי יהיו בני הזוג שעמם יזדווגו הצאצאים. נרחיב על כך בהמשך.

ח הצלחה ביולוגית נמדדת על פי יכולתו של הפרט להעביר את הגנים שלו לדור הבא. הישרדות הפרט לא בהכרח תביא לכך.

ז התשובה היא שלילית, משום שהכשירות מושפעת באופן ישיר מתנאי הסביבה.

פ גם כאן התשובה היא שלילית, משום שלעיתים קרובות זכר (מסיבות אנטומיות, פיזיולוגיות והתנהגותיות) מעמיד הרבה יותר צאצאים מאשר נקבה.

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. **lc**

החיים על הנייר והחיים במציאות

חוקרים שונים חישובו את מספר הצאצאים שיכולים להיווצר מהורה אחד (או משניים, אם מדובר ברבייה זואוגית) 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 $10^{18} \times 191$ 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 ינבט, 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?

1 אלצהיימר: המחלה אינה משפיעה על יכולת החולה להעמיד צאצאים כיוון שהיא פורצת אחרי גיל הפריור.

2 איידס: יש לכוון את התלמידים לחשוב על טווח הגילים שבו נדבקים במחלה. היא עלולה להשפיע על כשירות פרטים שנדבקים לפני תקופת הפוריות או במהלכה, אך לא על פרטים שהם אחרי גיל הפוריות.

3 המופיליה: בעבר השפיעה המחלה כי היא פגעה ביכולתו של החולה להעמיד דור צאצאים חדש. כיום בעזרת התרופות – השפעתה על כשירות החולים פחותה.

lc בכל הלהקות מספר הצאצאים שהגיעו לבגרות היה נמוך ממספר הצאצאים שנולדו.

6 על פי החישוב, מספר הזרעים גדל באופן אקספוננציאלי (מעריכי).

8 סיבות אפשריות:
מגבלת מים, מגבלת
מזון, צפיפות, מחלות,
הימצאות טורפים.

לעתים תלמידים תוהים על
הבזבז המשווע של אנרגיה
המושקעת לשווא בייצור
מספר כה גדול של צאצאים
שאינם שורדים בסופו של
דבר. נדון בסוגיה זו,
כשנעסוק בכרירה הטבעית
בפרק הבא.

1c פוטוטקסיס שלילי



המציאות מורכבת יותר ממה
שאפשר להעלות על הדעת
במחשבה ראשונה. מתברר
שייתכנו שני תרחישים
כאשר לא נעשה שימוש
בחומרי הדברה: אם העמידות
אינה דורשת מהחרק
השקעת אנרגיה, תכונת
העמידות תהיה ניטרלית.
כלומר, לא יהיה הבדל בין
פרטים עמידים לבין פרטים
רגישים. לעומת זאת, כאשר
עמידות דורשת מערך
אנזימטי שעלותו האנרגטית
רבה, יהיה לפרטים עמידים
חיסרון דווקא בהיעדר שימוש
בחומרי הדברה. מורכבות זו
נכונה גם לגבי עמידות של
חיידקים לאנטיביוטיקה.

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 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	מהירות 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	כ

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 הייתה 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?

19

תלמידים
חושבים ש...

כ שימו לב שלעתים תלמידים חושבים שהאנשים הם המפתחים עמידות לאנטיביוטיקה ולא החיידקים.

2 אורך התרמיל אינו משפיע. מספר הזרעים – משפיע.

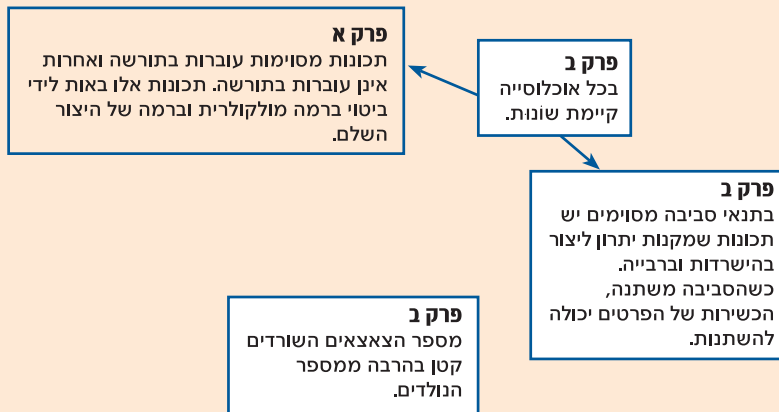
3 גם לגבי חיידקים אפשר לשאול לאיזה פרט יהיו הצאצאים הרבים ביותר כעבור זמן מסוים. כשירות בחיידקים תלויה בזמן הדור, שהוא הזמן שעובר מחלוקה לחלוקה. חיידק בעל זמן דור קצר יותר יהיה כשיר יותר, מאחר שמספר צאצאיו בפרק זמן מסוים יהיה גדול יותר. לדוגמה, חיידק שזמן הדור שלו הוא עשרים דקות, יעמיד כעבור שעה אוכלוסייה בת שמונה פרטים, ואילו חיידק בעל זמן דור של שלושים דקות יעמיד כעבור שעה אוכלוסייה של ארבעה פרטים בלבד.

4 הארכת תוחלת החיים כשלעצמה אינה משפיעה בהכרח על הכשירות כיוון שאדם שחי זמן רב יותר, לא בהכרח מעמיד צאצאים רבים יותר. לעומת זאת, הארכת גיל הפרייון, כלומר, העובדה שנשים יכולות כיום להיכנס להריון גם בגיל מאוחר, משפיעה על מספר הצאצאים שהן יכולות להביא לעולם. כמו כן, הארכת תוחלת החיים נובעת בחלקה מירידה בתמותת תינוקות, שמשפיעה כמובן על כשירות. לעיתים הארכת תוחלת החיים משפיעה בעקיפין על הכשירות, שכן סבא וסבתא פעילים יכולים לעזור בגידול הנכדים ולאפשר את הגדלת המשפחה.

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:



מונחים שנלמדו בפרק:

שונות
כשירות (fitness)

20



בשלב זה יש לתלמידים את כל הידע לגלות את מנגנון הברירה הטבעית. השאלות נועדו להנחות את הגילוי:

1 כמו בכל אוכלוסייה גם כאן יש שונות בתכונות רבות: למשל, בגודל הגוף, באורך הכנפיים, בצבע הקוטיקולה וגם בעוביה.

2 התכונה היא עובי הקוטיקולה. השונות היא עוביים שונים של קוטיקולה (תכונה רציפה).

3 בתנאי אקלים לח מאוד אין חיסרון או יתרון לקוטיקולה דקה, ולכן עובי הקוטיקולה אינו משפיע על הכשירות. לעומת זאת, בתנאי אקלים חם ויבש בעלי קוטיקולה דקה נמצאים בסכנת התייבשות גדולה בהרבה מבעלי הקוטיקולה העבה, ולכן יהיו כשירים פחות. לזבובים בעלי קוטיקולה עבה יש יתרון. סיכוייהם לשרוד בתנאים אלה גבוהים יותר, ולכן הם יהיו כשירים יותר.

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 העוספת 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 שבהם האקלים באזור ילך וייתייבש? (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 ד"רן 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 למוטאמות יותר לסביבתם העכשווית. שימו לב: **האוכלוסייה** היא שעוברת תהליך של **התאמה** ולא הפרטים.

21

4 חלק מהזבובים בעלי הקוטיקולה הדקה יותר יתייבשו וימותו. זבובים בעלי קוטיקולה עבה יחסית ישרדו, ומכיוון שעובי הקוטיקולה היא תכונה תורשתית, הם יעמידו צאצאים שגם להם קוטיקולה עבה יחסית. סיבה אפשרית לכך שלא כל הזבובים בעלי הקוטיקולה הדקה ימותו בבת אחת היא השתנות האקלים בהדרגה, באופן שבהתחלה עדיין אפשרית הישרדותו של מגוון גדול למדי של זבובים בעלי עוביים שונים של קוטיקולה. סיבה אפשרית אחרת היא הימצאות באוכלוסייה של זבובים כשירים בזכות תכונות שאינן קשורות בעובי הקוטיקולה. כך, למשל, ייתכן שיהיו זבובים בעלי קוטיקולה דקה שיהיו פעילי לילה, או פעילים בצל, או שפעילותם תתרכז ליד מקור מים (או מיקרו-אקלים לח אחר). כל אלה לא יהיו מושפעים כל כך מהתחממות האקלים.

5 במשך אלף שנה יהיו כ-26,000 דורות של זבובים. בכל דור יהיו יותר זבובים בעלי קוטיקולה עבה ופחות זבובים בעלי קוטיקולה דקה. לאחר אלף שנה יהיו הרוב המכריע של הזבובים (ואולי כולם) בעלי קוטיקולה עבה.

6 הרכב האוכלוסייה ישתנה: שכיחות הפרטים בעלי קוטיקולה עבה תעלה, וזו של פרטים בעלי קוטיקולה דקה תרד.

7 לא! לפרטים בעלי קוטיקולה דקה אין בשום אופן אפשרות לעבות את הקוטיקולה ובוודאי שלא לשנות את התכונה הזו ב-DNA. הרכב האוכלוסייה הוא שמשתנה.

8 הסביבה גורמת לשינויים בהרכב האוכלוסייה, אך לא גורמת לשונות באוכלוסייה. השונות קיימת באוכלוסיית הזבובים ללא קשר לסביבה. בתנאי סביבה שונים יבררו פרטים שונים ולכן הרכב האוכלוסייה ישתנה.



שני תלמידים ניסו לחזות מה יקרה בעוד מאתיים דורות. תלמיד א אמר: "בכל דור, לכל הזכרים תהיה קוטיקולה קצת יותר עבה מאשר לדור הקודם. לאחר מאתיים דורות הקוטיקולה של כולם תהיה עבה". תלמיד ב אמר: "בכל דור יהיו יותר ויותר זכרים בעלי קוטיקולה עבה ופחות זכרים בעלי קוטיקולה דקה. לאחר מאתיים דורות הקוטיקולה של כולם תהיה עבה". עם מי מהתלמידים אתם מסכימים? מדוע **אינכם** מסכימים עם התלמיד השני?



ודאו שהתלמידים מכינים את ההבדל בין שני ההסברים. ההבדל אינו בתוצאה – בשני המקרים בתום מאתיים דורות תהיה לכל הזכרים קוטיקולה עבה – אלא בתהליך: על פי תלמיד א, הקוטיקולה של כל הזכרים הופכת בהדרגה לעבה יותר ויותר. על פי תלמיד ב, הנותן את ההסבר הנכון, ההדרגתיות היא בשכיחות המשתנה של פרטים בעלי קוטיקולה עבה.

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 ל**תכונה עצמה** (כמו קוטיקולה עבה בקרב זבובים החיים בתנאי יובש) והן ל**תהליך** 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 לעיתים קרובות כתחרות אכזרית בין פרטים או כמלחמת קיום עקובה מדם. במלחמה כזו הבריא, החזקים ובעלי הכושר הגופני הגבוה הם ששורדים על חשבון פרטים חזקים פחות. אולם, יש לזכור שבמרבית המקרים לא מדובר בתחרות פיזית או במלחמה, ולא החוזק 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.



בעקבות הדין באוכלוסיית הזבובים התלמידים יוכלו לנסח את השערותיהם. מפרקים קודמים הם כבר יודעים שהג'ירפות לא האריכו את צווארן במתיחה (ושגם אילו יכלו לעשות זאת, ההתארכות לא הייתה עוברת לצאצאים). הם יכולים להניח שהייתה שונות באורך הצוואר של הג'ירפות ושפרטים בעלי צוואר ארוך יותר, היו כשירים יותר בסביבה שבה הידלדל היצע המזון במקומות הנמוכים. הם גם יודעים שאורך הצוואר, בניגוד למתיחתו, הוא תכונה תורשתית. הדגישו שהסבר טוב צריך לכלול:

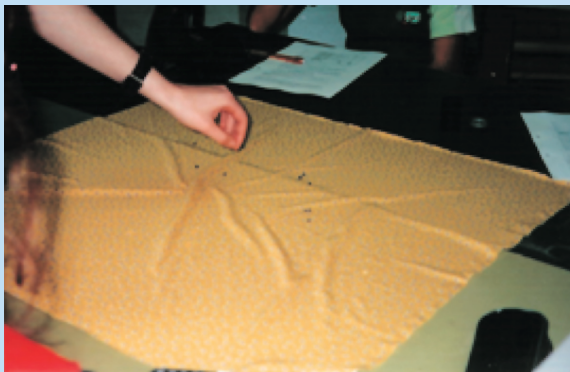
- התייחסות ל**שונות** באוכלוסייה (באוכלוסיית הג'ירפות הייתה וקיימת שונות: היו בה פרטים בעלי צוואר קצר יחסית ולצדם גם פרטים בעלי צוואר ארוך).
- התייחסות להשפעת ה**סביבה** (הסביבה לא גרמה לצוואר של פרטים להתארך. בסביבה המסוימת – בית גידול שבו הידלדל היצע המזון במקומות הנמוכים, אך נשאר בשפע במקומות הגבוהים – נבררו פרטים שהיו בעלי צוואר ארוך יחסית, משום שהיו **כשירים** יותר).
- התייחסות לכך שהתכונה הרלוונטית עוברת **בתורשה** (צאצאי הג'ירפות בעלות הצוואר הארוך יחסית היו אף הם בעלי תכונה זו).
- התייחסות מפורשת לשינוי ה**הדרגתי** בשכיחות מדור לדור (בכל דור עלתה שכיחותם היחסית של בעלי הצוואר הארוך יותר וירדה שכיחותם של בעלי הצוואר הקצר. השינוי אינו מתרחש תוך דור אחד).



תלמידים מתקשים לעיתים להבחין בין שכיחות פרטים לבין מספר פרטים. שימו לב שכאשר הסביבה משתנה, מספר הפרטים, הן הכשירים יותר והן הכשירים פחות, יכול לרדת אך מה שיקבע את הרכב האוכלוסייה בעתיד הוא השכיחות היחסית של פרטים בעלי תכונות מסוימות.



בשלב זה יש בידי התלמידים הסבר מניח את הדעת, אך הוא עדיין חלקי, מאחר שהוא מניח כי מלכתחילה היו פרטים שצווארם היה באורך של צוואר הג'ירפה המודרנית. פרק ה' יעסוק במקור השונות (מוטציות ורכייה מינית), ואז יושלם ההסבר.



פעילות החרזנים – הדמיה של תהליך הביריה 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 חרזנים צהובים, הוסיפו 7 חרזנים צהובים חדשים.
7. אספו את כל החרזנים 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 2	צבע 1		
20	20	מס' חרזנים	אוכלוסיה התחלתית
50	50	יחס מספרי באחוזים	
		מס' חרזנים שנותרו אחרי הטריפה	דור 1
		יחס מספרי באחוזים	
		מס' חרזנים שנותרו אחרי הטריפה	דור 2
		יחס מספרי באחוזים	
		מס' חרזנים שנותרו אחרי הטריפה	דור 3
		יחס מספרי באחוזים	

23

כן, בכל אוכלוסייה המתרבה ברבייה מינית קיימת שונות. השונות באה לידי ביטוי בתכונות רבות (ובכללן – באורך הצוואר).

הפעילות "אבולוציה של חרזנים" היא פעילות בקבוצות המדגימה את רעיון הביריה הטבעית בצורה כמותית. היא ממחישה כיצד משתנה הרכב האוכלוסייה במשך מספר דורות – אף כי הפרטים עצמם אינם משתנים – וכן את הדרגתיות השינוי (כלומר, מדוע על פי רוב הוא אינו מתרחש בדור אחד). הפעילות קלה לביצוע ונמשכת כשיעור אחד. גם בפרקים הבאים ביחידה נזכיר את הפעילות, כשנלמד רעיונות נוספים.

חשוב: בסיום הפעילות כדאי לשמור את הגרפים כדי להשוותם לגרפים שיתקבלו בהדמיה של סחיפה גנטית (פרק ו').

חומרים לכל קבוצה בת 2-4 תלמידים:

פיסת בד עם דגם פרחוני בגודל של כ-60x60 ס"מ (לכל הקבוצות אותו דגם בד, כדאי להשתמש בדגם עם פרחים קטנים)

מחשבון

20 חרזנים קטנים בצבע שיכלוט על הבד

20 חרזנים קטנים בצבע שיוסווה היטב בבד

חרזנים נוספים משני הצבעים

(את החרזנים כדאי לשים במבחנות או במכלים לסרטי צילום).

3 על ציר ה-X יופיע מספר הדור. על ציר ה-Y יופיע אחוז השורדים. בכל דור ישורטטו שתי עמודות – עמודה לכל אחד מצבעי החרזנים.

7 מה שחשוב הוא השיעור היחסי של שני וריאנטים המתחרים זה בזה ולא מספרם המוחלט. גודל זה נותן בסיס להשוואה, גם כאשר גודל האוכלוסייה משתנה, דבר שקורה בטבע לעתים קרובות. (בהדמיה, שמרנו בצורה מלאכותית על גודל אוכלוסייה קבוע, אך דבר זה לא קורה בטבע).

8 החרוזים אינם משנים את צבעם כתוצאה מנוכחות הטורף.

9 הרכב האוכלוסייה השתנה.

10 הברירה הטבעית פועלת על האוכלוסייה ולא על הפרטים שבה, באופן שהיא מאפשרת במידה רבה יותר לחלק מהפרטים (הכשירים יותר) לשרוד, וכך עולה שכיחותם היחסית באוכלוסייה, כלומר, הרכב האוכלוסייה משתנה. הפרטים עצמם אינם יכולים להשתנות.

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 חישבונו 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 בטיפה וברבייה כמה דורות נוספים?
13. הדמיינו 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 שכיחות 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, סיכוי 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?

11 הסביבה לא גרמה לשינוי בצבע החרזנים הבודדים, אך במשך הדורות נבררו חרזנים בעלי צבע מסוים, וכך השתנה הרכב הצבעים באוכלוסייה.

13 בהדמיה נטרפה בכל דור, לצורך הנוחות, בדיקת מחצית האוכלוסייה, הרבייה הייתה אל-זוויגית וכל פרט ששרד גם התרבה. בהדמיה עסקנו בתכונה אחת בלבד בעלת שני מופעים. בהדמיה הציפורים והסביבה לא השתנו.

16 השונות בין הפרטים לגבי תכונת הצבע מצטמצמת: השכיחות היחסית של הצבע בעל היתרון עולה ושל הצבע השני יורדת. עדיין יש שונות בין הפרטים באוכלוסייה לגבי תכונות אחרות, שאינן משפיעות על הכשירות בסביבה זו.

1c בכל המקרים, שכיחות הפרטים בעלי התכונה המקנה את היתרון הרב ביותר בהישרדות ורבייה בסביבה (הכשירים) עלתה בכל דור. לפרטים הכשירים פחות אין אפשרות לשנות את עצמם או להשפיע על ה-DNA שלהם, וסיכוי הישרדותם באזור נמוכים יותר. התוצאה היא שהשכיחות היחסית של התכונות באוכלוסייה משתנה עם הדורות.

7 חשיבות השאלה היא בכך שהיא מפנה את תשומת לבם של התלמידים למגוון הפתרונות בתנאי סביבה מסוימים. פתרונות אפשריים הם: צבע, גודל (קטנים פחות נראים), פעילות בזמן אחר מאשר זמן פעילות הציפורים, שהייה מעל פרחים רק לצורך אכילה ויתר הזמן – במקומות בולטים פחות ועוד.

יש תלמידים שמתייחסים לאוכלוסיה "התחלתית" ולאוכלוסיה "סופית", כשהם מסבירים תהליכים אבולוציוניים. התייחסות זו אפשרית רק במסגרת של ניסוי או הדמיה ולא בטבע, שכן הרכב אוכלוסייה בטבע אינו סופי, מכיוון שאוכלוסיות ממשיכות להשתנות.

תלמידים חושבים ש...

שאלות לסיכום

1

שני תלמידים מנסים להסביר איך השתנתה הג'ירפה ממין בעל צוואר קצר יחסית למין בעל צוואר 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 במעיכם שלכם
- ג. פרגים בשדה בגליל
- 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:



1

ההסבר של דני אינו נכון. הוא מתאר מנגנון שבו השתנות צוואר הג'ירפה נבעה מרצון הג'ירפות הקדומות למתוח את הצוואר. תכונה נרכשת זו עברה לצאצאים שהמשיכו להאריך את צווארם. ההסבר הנכון של ברוך מתבסס על ההנחה שיש שונות באורך הצוואר. תכונה זו עוברת בתורשה. פרטים בעלי צוואר ארוך הם בעלי סיכוי גבוה יותר לשרוד ולהעמיד צאצאים.

2

עץ האלון הוא היחיד שלא יכול לעבור שינויים אבולוציוניים בתהליך של ברירה טבעית, מאחר שמדובר בפרט בודד (כל היתר הם אוכלוסיות). פרט בודד אינו עובר אבולוציה!

3

אפשרות ג' היא הנכונה.
היא מתארת שינויים
בהרכב האוכלוסייה ולא
בפרטים עצמם. זבובים
לבנים נשארו לבנים
ושחורים נשארו
שחורים, רק מספרם
היחסי של השחורים
הלך וגדל.

כ

סביר להניח שמספר
הפרטים השחורים היה
מצטמצם (אולי
לחלוטין) ואוכלוסיית
הזבובים הייתה מכילה
כמעט רק פרטים לבנים,
המוסווים טוב יותר ולכן
גם כשירים יותר.

4

כ

כן. שכיחות העכברים
בעלי הזנב הקצר,
המקשה על תפיסתם
על ידי תנים, תלן ותגדל
וכתוצאה מכך יקטן
האורך הממוצע.

כ

האורך של זנבות
העכברים הוא תכונה
תורשתית. זנב מקוצץ
(במספריים) הוא תכונה
נרכשת שאינה עוברת
בתורשה, ולכן בניסוי של
וייסמן אורכי הזנבות של
הצאצאים היו בהתאמה
לאורכי הזנבות
המקוריים של הוריהם.
לעומת זאת, באוכלוסיית
העכברים הנטרפים,
תכונת הזנב הקצר עברה
בתורשה מהורים בעלי
זנב קצר, שהיה להם
יתרון בסביבה.

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 מהאיומים שלפניכם מראה קבוצה מייצגת של זבובים בדור השני?
הסבירו את בחירתכם.

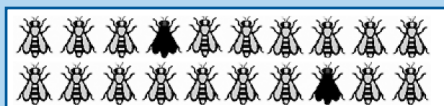
כ

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.)

בניח 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?

כ

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 מסרב לאת 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?

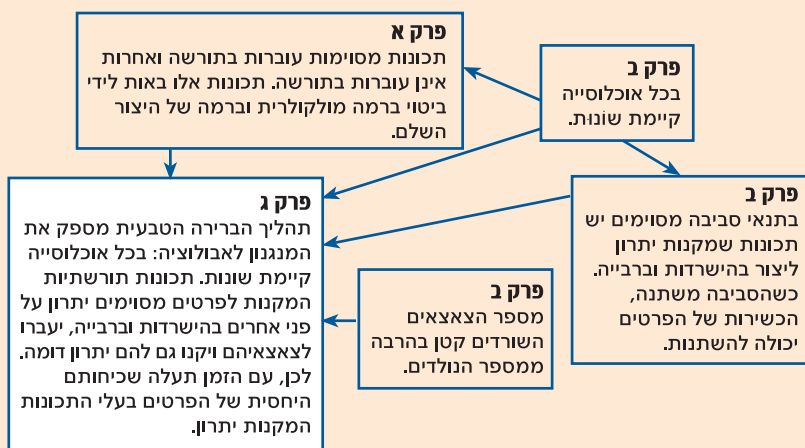
סיכום

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:

- **השונות באוכלוסייה** (באוכלוסיית הג'ירפות, למשל, הייתה שונות: היו בה פרטים בעלי צוואר קצר יחסית ולצדם גם פרטים בעלי צוואר ארוך יותר).
- **השפעת הסביבה:** 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, שמתרשמים 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. **1c**

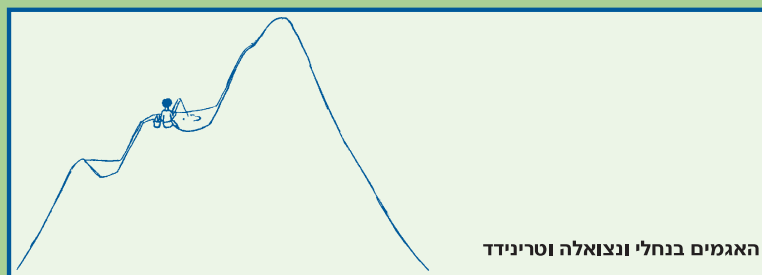
על צבעים, על טורפים ועל גופים

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 טרפיים 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, סיכויו 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.



28

בפרק זה לא יוצג רעיון חדש, אלא יבוסס רעיון הברירה הטבעית בעזרת דוגמאות. לדוגמאות אלו חשיבות רבה מאחר ובמהלך הוראת הנושא היכולת של התלמיד לבצע ניסויים באבולוציה ולאסוף נתונים היא מוגבלת. חשוב לא להסתמך רק על הדמיות כי אם להביא דוגמאות המהוות עדות לכך שתהליך הברירה הטבעית אכן מתרחש.

1c

מומלץ לעבור על הדוגמה הראשונה יחד עם כל התלמידים. על הדוגמאות האחרות אפשר לדון בקבוצות קטנות (3–4 תלמידים) בתחנות או במרכזי למידה. כל תחנה תתמקד בדוגמה מסוימת, והתלמידים יענו על שאלות על סמך המידע הרלוונטי. לסיכום הפעילות, תלמידים יענו על שאלות שיתבססו על כל התופעות.

2. בהעדר טורפים יהיה
לזכרים הצבעוניים יתרון
ברבייה על פני האחרים,
כיוון שהנקבות מעדיפות
אותם. בנוכחות טורפים,
הגופים הצבעוניים יהיו
כשירים פחות, כיוון
שהטורפים מזהים
אותם ביתר קלות.

3. כל תשובה מנומקת
תתקבל בשלב זה.

4. החוקר ביקש לבחון אם
הטורפים הם גורם
ברירה המשפיע על
שכיחות הזכרים
הצבעוניים.

5. הזכרים הצבעוניים.

6. הזכרים הצבעוניים
פחות.

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 דהויים ובורקים פחות. פחות 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 בצבעונותם, 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 צבעונותם, והם גודלו בעשר בריכות מלאכותיות, שבקרקעיתן היה חצץ צבעוני עמום (בדומה לקרקעית הנחלים). בכל בריכה 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)?

10

על מנת לראות אם תהליך זה 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.

7. בנוכחות טורפים תעלה שכיחותם היחסית של הזכרים הפחות הצבעוניים. בהיעדר טורפים תעלה שכיחותם היחסית של הזכרים הצבעוניים.

8. כדי שההבדל בין הברכות יהיה רק של משתנה אחד – נוכחות הטורפים – ולכן יהיה אפשר לייחס את התוצאות למשתנה זה.

10. את הקטע הבא (המידע והשאלות שאחריו) יש לתת לתלמידים לאחר שענו על שאלות 1-8.

לאחר חמישה חודשים, שכיחות הזכרים בעלי הצבעים הבולטים בבריכות ללא הטורפים הייתה גבוהה ביותר. בבריכות שהיו בהן טורפים, שכיחות הזכרים בעלי הצבעים הבולטים הייתה נמוכה, ולמרבית הזכרים היו דגמים דומים לצבע החצץ.

7. איזה שינוי התרחש בהרכב האוכלוסיות של הגופים בבריכות ללא הטורפים? תארו כיצד זה קרה.

8. איזה שינוי התרחש בהרכב האוכלוסיות של הגופים בבריכות שהיו בהן טורפים? תארו כיצד זה קרה. תנו דעתכם גם למידת הצבעוניות וגם לדמיון לצבע החצץ.

9. על פי התוצאות, האם, לדעתכם, השערת החוקר הופרכה או אומתה?

חשוב שהתלמידים יראו כי מדובר כאן בשני לחצים הפוכים: הנקבות מעדיפות זכרים בעלי צבעים בולטים יותר, אך צבעים בולטים מהווים חיסרון בנוכחות טורפים.

בפרק הקודם ראינו, שבקרב יצורים חיים מספר הצאצאים המגיעים 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.

תוצאה זו חיזקה את המסקנה, שהגורם לשינוי בהרכב האוכלוסייה הוא נוכחות הטורפים. בהיעדר טורפים, עלתה השכיחות היחסית של הזכרים בעלי הצבעים הבולטים באוכלוסייה.



בדוגמה זו לא עסקנו בתרומה של הרבייה הזוויגית ליצירת השונות, אולם נזכיר אותה שוב בפרק ה' שעוסק במקור השונות.

תחרות היא סוג של יחסי גומלין, והיא מתרחשת בין יצורים מאותו המין או ממינים שונים. הברירה הטבעית מטפלת בתחרות בין פרטים השייכים לאותו המין. לכן, כאשר תלמידים מציעים דוגמאות של תכונות המקנות יתרון למין כולו ביחס למינים אחרים (כמו "נמרים רצים מהר יותר מזברות ולכן יש להם יתרון"), חשוב למקד אותם.

1 בשלב זה יש לצפות שהתלמידים ידעו להשיב שכשירות פילים בעלי חטים, היא תלוית תנאי סביבה ולכן לא בכל סביבה בעלי החטים יהיו כשירים. למשל, בסביבה בה אין כמעט תחרות בין זכרים על הנקבות, התלמידים לא בהכרח יצינו סביבה שיש בה ציד מוגבר, כסביבה בה לא יהיה יתרון לפילים בעלי החטים. נתון זה יובא בהמשך.

2 בעלי החטים הם אלו שסיכוייהם להזדווג עם נקבות ולהעמיד צאצאים גבוהים לעומת פילים חסרי חטים, ולכן הם נבררו בתהליך הברירה הטבעית.

3 הפילים הניצודים הם בעיקר בעלי החטים ובעיקר בעלי חטים ארוכים. בשמורות שיש בהן ציד מוגבר, הפילים הללו יהיו כשירים פחות. באזורים שיש בהם פיקוח, פילים בעלי חטים ארוכים יהיו כשירים יותר בגלל יתרון במאבק על הנקבות.

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.

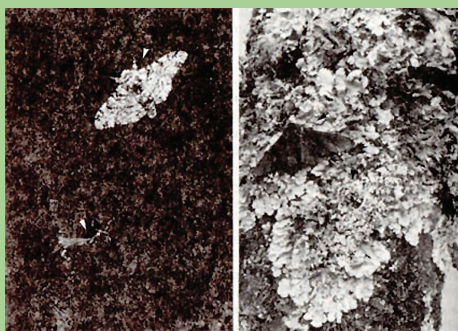
מאז הגיע האדם הלבן לאפריקה, הפכו חטי הפילים למצרך מבוקש במערב. הפופולריות של אביזרי נוי שונים העשויים שנהב (החומר שממנו עשויים החטים) העלתה מאוד את מחירו. פילים רבים ניצודים מדי שנה כדי לספק את הביקוש, וככל שהחטים ארוכים יותר, כך הם קוסמים יותר לציידים. הציד המוגבר, הנמשך כבר יותר משבעים שנה, מהווה לחץ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

31

4 בשמורות אלו סביר להניח ששכיחות הפילים חסרי החטים גבוהה יותר. משך הדור בפילים מורכב יחסית: נקבות הפילים מתעברות כבר בגיל 10-16 אבל הזכרים הפוריים ביותר הם בני 25-35 שכן אורך הנרתיק של הנקבה הוא כמטר, ורק כשהזכרים בני 25-55, הפין שלהם ארוך דיו כדי לעבר את הנקבה.

ההרכב של אוכלוסיות הפילים באפריקה כיום שונה מזה שהיה לפני כמה עשרות שנים: הפילים של היום הם בעלי חטים קטנים יותר, הם פעילי לילה וקטנים יותר. ההשערה היא שהציד הוא רק גורם ברירה אחד הקיים בשמורות, ולחצי ברירה נוספים הביאו לשינוי בהרכב תכונות נוספות באוכלוסייה.

ליתר
דיוק...

5 כן! האדם מתפקד כאן כצייד (טורף) ולכן זוהי ברירה טבעית. תלמידים רבים רואים בכל מעורבות של האדם, ברירה מלאכותית. במקרה כזה מומלץ כבר בשלב זה לדון ביחד או להפנות אותם לסוף הפרק לפעילות העוסקת בברירה מלאכותית.

חשוב גם שהתלמידים ייווכחו כי מדובר כאן בשני לחצי ברירה הפוכים: במאבק עם זכרים אחרים על נקבות יש יתרון לפילים בעלי חטים ארוכים, אך החטים הארוכים מהווים חיסרון בסביבה שיש בה ציד.

6 בשני המקרים מופעלים שני לחצי ברירה מנוגדים. ולכן היתרון שיש לתכונה מסוימת בסביבה, יכול להפוך לחיסרון, כשהסביבה משתנה.

1 הסוואה טובה.

4 הוא ניסה לבדוק אם יהיה הבדל בשכיחות הפרטים בהירים והכהים בקרב העשים שיתפוס מחדש. הבדל כזה יכול להצביע על השפעת הצבע על ההישרדות.

5 חלק נטרפו על ידי ציפורים, חלק פשוט לא נתפסו וחלק מתו מסיבות אחרות, שאינן קשורות לטריפה על ידי ציפורים (גיל, פגיעות פיזיות וכו'). לתמותה שאינה קשורה לטריפה קוראים "תמותת רקע".

6 החוקר לא התחיל ממספר זהה של פרטים כהים ובהירים, ולכן חשוב לראות אם נשמר היחס ההתחלתי. נוסף על כך, גודל האוכלוסייה השתנה (החוקר לא תפס את כל העשים ששחרר).

7 באזורים מתועשים הפרטים הכהים כשירים יותר, ולכן בעקבות תהליך של ברירה טבעית, שכיחות הכשירים עלתה במהלך הדורות. תוצאות אלו חזרו במספר ניסויים.

8 באזורים לא מתועשים יהיו מרבית העצים בהירים. לפרטים כהים לא תהיה הסוואה טובה, והם ייטרפו יותר על ידי ציפורים. עשים בהירים לעומתם, יהיו מוסווים טוב יותר וישרדו יותר. מסיבה זו נצפה שייכלדו מחדש יותר פרטים בהירים.

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 בחזיות 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 חזיות. גזעי העצים, שקודם לכן היו מכוסים בחזיות, 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: באזורים מתועשים שבהם היו גזעי העצים כהים ובאזורים לא מתועשים שבהם היו גזעי העצים בהירים.

4. מהי ההשערה שניסה החוקר לבדוק?

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

	מספר העשים ששחררו	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 ששחררו?

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 באזור דורסט (אזור לא מתועש) מופיעות בטבלה שלפניכם:

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

9. לא. הפרטים עצמם לא
שינו צבעם כתוצאה
מהסביבה המזוהמת,
אלא שכיחותם היחסית
באוכלוסיה, גדלה.

10. בעמוד הבא מובאות שתי
דוגמאות נוספות של ברירה
טבעית.

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 נכחותה 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 מיישור 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 מן של כבשים "עצלות", שההשגחה עליהן נוחה וזולה יותר. זן זה קיים עד היום.

33



תאים סרטניים וטיפול כמותרפי

הברירה הטבעית פועלת לא רק ברמה של אוכלוסיות יצורים, אלא לעתים גם ברמה התאית. במצב נורמלי נתונים תאי הגוף תחת בקרה, שמונעת מהם להתחלק ולהתרבות באופן בלתי מתואם. מחלות הסרטן השונות מתחילות בתא, ש"השתחרר" מבקרה זו כתוצאה משינויים שחלו ב-DNA שלו. התא הסרטני מתחלק בצורה בלתי מבוקרת, ותכונה זו, כיוון שהיא טבועה ב-DNA, מועברת לתאי הבת שלו, שמתחלקים אף הם וחוזר חלילה. לאחר מספר חלוקות נוצרת אוכלוסייה גדולה של תאים סרטניים שמהווה את הגידול הסרטני. הטיפולים התרופתיים (כמותרפיים) הניתנים לחולי סרטן, הם כאלו הפוגעים בתאים הנמצאים בשלבי חלוקה. מכיוון שעל פי רוב תאים סרטניים מתחלקים בקצב מהיר יותר בהשוואה לתאים נורמליים, הם הנפגעים העיקריים מהטיפול. במילים אחרות, משך הדור (הזמן שעובר מרגע שתא נוצר ועד שהוא מתחלק ויוצר שני תאים חדשים) של תאים סרטניים קצר מזה של תאים נורמליים. זמן זה נמדד, בדרך כלל, בשעות או בימים. גם תאים בריאים מתחלקים במידה מסוימת ונפגעים, ומכאן תופעות הלוואי הלא נעימות של הטיפולים הכמותרפיים. הנפגעים העיקריים מבין התאים הבריאים הם אלה שמשך הדור שלהם קצר יחסית; למשל, תאים של זקיקי השיער (ולכן השיער נשר), תאי האפיתל במעי (ולכן יש בחילות) ותאים במערכת הדם והלימפה (ולכן יש אנמיה וירידה בתפקוד של המערכת החיסונית).

בקרב אוכלוסיית התאים הסרטניים, כמו בקרב אוכלוסיות של יצורים חיים, קיימת שונות. כך קורה, שיש לעתים באוכלוסייה תא סרטני (או מספר תאים) שעמיד לטיפול התרופתי (כלומר, אינו מושפע ממנו). במקרים כאלה, גם אם מרבית התאים ייפגעו מהטיפול, אותו תא סרטני עמיד ישרוד וימשיך להתחלק.

בהרבה מסוגי הסרטן החלוקות הבלתי מבוקרות יוצרות אוכלוסייה גדולה של תאים סרטניים שמהווה את הגידול הסרטני. אך בסרטן הדם, בגלל המדיום הנוזלי, לא נוצרים גידולים.

ליחור
דיוק...

מה יקרה, לדעתכם, לשכיחות היחסית של התאים העמידים, אם ימשיכו לטפל בחולה באותה התרופה?

המשך טיפול עשוי להביא לירידה בשכיחות התאים הרגישים לטיפול ולעלייה בשכיחות התאים העמידים.

כיצד אפשר, לדעתכם, לפתור את הבעיה?

על ידי מתן תרופה אחרת שהתאים העמידים לתרופה הראשונה יהיו רגישים לה. לכן, נותנים כבר מההתחלה "קוקטיל" של תרופות.

האם במהלך טיפולים כמותרפיים מתרחש תהליך של ברירה טבעית? מהי הסביבה במקרה זה? מה יוצר במקרה זה את לחץ הברירה? הסבירו.

כן. דוגמה זו מראה כי גוף האדם יכול להוות "סביבה" בה פועלים לחצי ברירה. את לחץ הברירה יוצרות התרופות.

הביאו דוגמה נוספת לתהליך שבו נבררים פרטים עמידים.

חידקים ואנטיביוטיקה, חרקים וחומרי הדברה, כינים וקוטלי כינים.

אנמיה חרמשית

הדוגמה הבאה כרוכה בהבנת עקרונות מסוימים מתחום הגנטיקה ולכן מומלצת רק לתלמידים בעלי רקע בנושא.

אנמיה חרמשית היא מחלה תורשתית הנפוצה בעיקר בארצות מסוימות במרכז אפריקה. חולים באנמיה חרמשית סובלים ממחסור חמור בחמצן ומרביתם מתים לפני גיל הרבייה.

ההמוגלובין, המצוי בתאי הדם האדומים, שונה אצל החולים במחלה, וכאשר ריכוז החמצן ברקמות הוא נמוך, הוא יוצר מכנים מאורכים. בעקבות זאת מקבלים תאי הדם האדומים צורה של חרמש (חצי ירח) במקום צורת הכדור הפחוס האופיינית להם בדרך כלל. תאי דם חרמשיים נהרסים במהירות יחסית (ומכאן האנמיה) ואינם זורמים בצורה יעילה, בעיקר בכלי דם דקים.

בניגוד לחולים שבדמם מצויים רק תאים חרמשיים, יש אנשים שהמחלה מתבטאת אצלם באופן חלקי; רק חלק מתאי הדם שלהם בעלי צורה חרמשית, ואילו לחלק אחר - צורה עגולה רגילה. לאנשים אלו, המכונים נשאים, יכולת פחותה של קישור חמצן בתנאים מסוימים בהשוואה לבריאים, אך הם אינם סובלים מאנמיה ואינם נתונים לסכנת מוות.



תאי דם נורמליים

תאי דם חרמשיים

אצל החולים שני האללים הקשורים למחלה פגומים. הנשאים הם הטרוזיגוטיים למחלה: רק אלל אחד שלהם פגום. אנמיה חרמשית היא דוגמה מעניינת ליחסים בין אללים: כאשר בוחנים את הופעת מחלת האנמיה (כלומר, מסתכלים על רמת היצור השלם), האלל הנורמלי הוא הדומיננטי – זאת מכיוון שהטרוזיגוטיים בריאים. לעומת זאת, כאשר בוחנים את צורת תאי הדם (כלומר, מסתכלים על הרמה התאית), קיימת דומיננטיות לא שלמה – זאת מכיוון שבתנאים מסוימים נוצרים אצל הטרוזיגוטיים תאי דם חרמשיים.

אילו פרטים הם כשירים יותר – חולים, נשאים או בריאים? האם הם יהיו כשירים יותר בכל תנאי סביבה?

לחולים כשירות נמוכה ביותר בהשוואה לנשאים או לאנשים בריאים בכל סביבה, אך בעיקר כאשר ריכוז או לחץ החמצן נמוכים. בשלב זה יצפו התלמידים שגם הנשאים יהיו כשירים פחות מהבריאים בכל סביבה, מכיוון שהם סובלים מיכולת פחותה של קישור חמצן.

היכן יהיה גדול יותר הפער בכשירות בין נשאים ובריאים – במקומות גבוהים (שריכוז החמצן בהם נמוך יחסית) או במקומות אחרים?

הפער בין כשירות הנשאים של אנמיה חרמשית ובין כשירות הבריאים גדול יותר באזורים שריכוז החמצן בהם נמוך יחסית (במקומות גבוהים, למשל), מכיוון שאז הנשאים סובלים מיכולת פחותה של קישור חמצן.

במאה השבע עשרה הביאו סוחר עבדים הולנדיים אנשים מאפריקה ויישבו אותם באופן אקראי בשני מקומות באסיה. באחד המקומות האלו נפוצה מחלת המלריה, ואילו באחר – לא. מלריה היא מחלה הנגרמת על ידי טפיל התוקף את תאי הדם האדומים, אך רק בצורתם העגולה. תאים חרמשיים אינם פגיעים.

מי, לדעתכם, יהיה רגיש יותר לטפיל המלריה – אנשים בריאים, נשאים או חולים במחלת האנמיה החרמשית?

אנשים בריאים הם הרגישים ביותר.

אילו פרטים הם כשירים יותר – חולים, נשאים או בריאים – באזור מוכה מלריה?

באזור מוכה מלריה גם האנמיה וגם המלריה מהוות לחץ ברירה, אם כי לחץ הברירה שנובע מהאנמיה חזק יותר מזה שנובע מהמלריה (מרבית החולים באנמיה חרמשית מתים עוד בטרם הגיעו לגיל הפוריות). החולים יהיו, אם כן, בעלי הכשירות הנמוכה ביותר. לנשאים יהיה יתרון על פני הבריאים בגלל העמידות למלריה.

כיום, לאחר כשלוש מאות שנה, מתברר, שבקרב אנשי המקום מוכה המלריה באסיה קיימת שכיחות רבה יחסית של מחלת האנמיה החרמשית. במקום שבו לא נפוצה מחלת המלריה, האנמיה החרמשית נדירה מאוד.

העבדים שהובאו מאפריקה פוזרו בין שני המקומות באופן אקראי (לא היה אפשר להבחין בין נשאים ובין בריאים). החוקרים מניחים, ששכיחות המחלה בשתי האוכלוסיות במאה השבע עשרה הייתה שווה. כיצד מסביר מנגנון הברירה הטבעית את ההבדלים בשכיחות האנמיה החרמשית בין שני המקומות כיום?

האם תכונת האנמיה החרמשית מהווה יתרון או חיסרון?

האנמיה החרמשית היא דוגמה נוספת לכך שחיסרון בתנאים מסוימים יכול להיות יתרון בתנאים אחרים. באזורים שבהם נפוצה מחלת המלריה, יש לנשאים של האנמיה החרמשית יתרון על פני הבריאים כיוון שהם עמידים בפני טפיל המלריה. משום כך נשאים מעמידים יותר צאצאים ובחלוף הדורות שכיחות האלל לאנמיה חרמשית באזור זה גדלה. החולים (באנמיה חרמשית) הם בעלי הכשירות הנמוכה ביותר, אך כאשר שכיחות הנשאים באוכלוסייה גבוהה יחסית, עולה גם שכיחות החולים באנמיה (הסיכוי לזיווג של נשאים עולה, והסיכוי ללידת חולה בעקבות זיווג כזה הוא 25%).

לעומת זאת, באזורים ללא מלריה אין יתרון לנשאים של האנמיה החרמשית, וכשירותם פחותה ביחס לזו של הבריאים. לכן, באזורים אלה שכיחות האלל לאנמיה חרמשית יורדת במהלך הדורות.

1 תהליך הברירה המלאכותית הוא מהיר בהרבה מזה של הברירה הטבעית, שכן תהליך ההכלאה והברירה המלאכותית נעשים בעקביות ובציפיות לצורך מטרה אחת בלבד (קבלת צבע מסוים, צורה מסוימת של גוף וכו'). בסביבה הטבעית, לעומת זאת, קיימים מספר לחצי ברירה. נוסף על כך, ייתכנו, כפי שכבר הזכרנו, פתרונות שונים לאותו לחץ ברירה וכל פתרון "מושך" לכיוון שלו. הבדל נוסף: לחץ הברירה המלאכותית נשאר קבוע תמיד. הברירה הטבעית עובדת בסביבה טבעית, שהתנאים והלחצים בה יכולים להשתנות עם הזמן.

2 בשני המקרים, פרטים מסוימים מתוך האוכלוסייה מעמידים יותר צאצאים מאחרים. אלה הם הפרטים המותאמים ביותר. כתוצאה משני תהליכי הברירה מצטמצמת השונות באוכלוסייה לגבי אותה התכונה שהקנתה את ההתאמה. ההבדל העיקרי בין שני התהליכים הוא בכיוונית.

אי שם בעבר החלו בני האדם להבין, שאם יכליאו בכוונה תחילה פרטים שונים בעלי תכונות משלימות (למשל, תות מתוק עם תות שאינו נמער 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 שגיון אנדלר בודד מהטבע. בהשוואה לדגי גופי מבויתים, 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 ובעלי חיים. מינפולציות ב-DNA (הנדסה גנטית) הביאו ליצירת תכונות חדשות וליצירת זנים חקלאיים חדשים שלא היו יכולים להיווצר בדרך של הכלאות טבעיות או מכוונות.

34

בעוד שבברירה המלאכותית האדם הוא שקובע מראש מה רצוי שיהיה בסוף (התכונה המתאימה לצרכיו), לברירה הטבעית אין "שאיפה" מראש לתוצר סופי מסוים. בכל רגע נתון יש לברירה הטבעית כיוון, אך אין בה תכנון ארוך טווח. עצמת הברירה המלאכותית חזקה בדרך כלל הרבה יותר מהטבעית, ולכן התהליך הטבעי הוא הדרגתי יותר (אורך דורות רבים יותר). השבחה היא התהליך שבו מבויתים יצורים חיים מן הבר. היצורים הללו "הושבחו" רק מבחינת האדם, שכן הם הפכו למתאימים יותר עבורו. תכונות רבות שנבררו על ידי האדם, לא היו שורדות בטבע.

3 בברירה הטבעית ישרדו כל הפרטים המותאמים לאתגרים של תנאי הסביבה. פרטים אלו יכולים להיות שונים בינם לבין עצמם, שכן בסביבות רבות ייתכנו כמה "פתרונות". לעומת זאת, בברירה המלאכותית האדם בורר רק תכונה מסוימת אחת או צירוף תכונות מסוים. מסיבה זו נצפה להומוגניות רבה יותר באוכלוסייה שנבררה בברירה מלאכותית. (תלמידים עשויים לטעון כי יש סתירה לכאורה בין רעיון האחידות כתוצאה מברירה מלאכותית לבין ההטרוגניות הרבה של חיות מחמד. אולם, אין כאן כל סתירה. זני כלבים שונים, למשל, נבררו לפי "טעמים" שונים, אך כל זן אחיד מאוד).

4 חיות מבויתות כמו פרות עם תפוקת חלב רבה, זני ורדים בעלי ריח נעים ותפרחות מרובות פרחים.

5 לא מדובר בברירה מלאכותית, כיוון שהציידים לא התכוונו לברור את הפרטים חסרי החטים. הברירה הייתה תוצאת לוואי של הצייד המוגבר של בעלי החטים. העובדה שגורם הברירה הוא האדם אינה הופכת בהכרח את התהליך לברירה מלאכותית.

6 בתהליך ההשבחה (ביית) נבררו דגי גופי בעלי תכונות, שלא היו בהכרח שורדות בטבע (כמו צבעוניות).

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) מכוסה מדי מספר שבועות. לעומת זאת, באיזור הישן הדשא והצמחים אינם מכוסים. הסטודנטים קטפו את צמחי שן הארי מהמדשאות של שני האזורים. הצמחים שגדלו באיזור הלא מכוסה היו בגבהים שונים, ואילו הצמחים באיזור המכוסה 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 המכוסה לעומת אלה שהתקבלו מהזרעים של צמחי האיזור הלא מכוסה. 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 2001–2002 (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.

35

בסדרת שאלות זו יתרגלו התלמידים את רעיון הברירה הטבעית. בחלק מהתשובות לשאלות הבאות יש לצפות כי תשובה מלאה תכלול את המרכיבים הבאים:

● **התייחסות לשונות**
באוכלוסייה המקורית.

● **התייחסות להשפעת הסביבה** (הסביבה לא גרמה לשינוי בתכונה, בסביבה המסוימת – נבררו פרטים בעלי תכונה מסוימת, משום שהיו כשירים יותר).

● **התייחסות לכך שהתכונה הרלבנטית עוברת בתורשה.**

● **התייחסות לכך שהשינוי בשכיחות לאורך הדורות הוא הדרגתי** (בכל דור עלתה שכיחותם היחסית של בעלי תכונה מסוימת וירדה שכיחותם של בעלי תכונה אחרת. השינוי אינו מתרחש בבת אחת).

3 לא כל שינוי לאורך זמן באוכלוסיות הוא תוצאה של ברירה טבעית. במקרה זה, למשל, הגובה לא מקנה כפי הנראה יתרון לצאצאים. חוקרים מציעים שהגידול הוא תוצאה של שיפור בתזונה (טיב, מרכיבים, כמות וכו').

4 כן אפשר לבדוק את פוטנציאל הגובה של הצמחים משני האזורים ולא רק לראות את הצמחים הבוגרים ששרדו לאחר הכיסוח.

5 הצמחים שהתפתחו מזרעי האזור הלא מכוסה היו ארוכים יותר בממוצע מהצמחים שהתפתחו מזרעי האזור המכוסה. כיסוח הדשא מהווה לחץ ברירה לטובת צמחים שכבר בגובה נמוך מאוד מייצרים זרעים. לעומת זאת, באזור הלא מכוסה תהיה שונות גדולה מבחינת הגובה שבו מייצרים הצמחים את זרעיהם.

6 הפסקה בכיסוח עשויה להביא לכך שלא יהיה יתרון לצמחים הנמוכים באזור החדש. ייתכן אפילו שיהיה יתרון לצמחים גבוהים במיוחד הגדלים בדשא, משום שדשא גבוה עלול להציל ולכסות על צמחי שן הארי ולא לאפשר להם לבצע פוטוסינתזה כראוי. ניתן להניח שכיסוח הדשא לאורך זמן רב הביא לכך שמידת השונות בגובה הצמחים היא מועטה. אם עדיין קיימת שונות מסוימת, נצפה שגובהם הממוצע של הצמחים ידמה בחלוף הדורות לגובה הצמחים באזור הישן.

5 המשקלים משתרעים על פני טווח מסוים. המשקלים מתפלגים התפלגות נורמלית.

6 בשבטים המרוחקים מכל קדמה טכנולוגית ורפואית סיכוייו של תינוק, שנולד במשקל נמוך מ-2.5 ק"ג, לשרוד קטנים מאוד. גם תינוקות גדולים במיוחד נמצאים בסכנה, ובהיעדר ניתוחים קיסריים ואמצעים אחרים לסיוע בלידת תינוק גדול, הם מתים לעתים קרובות. לפיכך, התפלגות המשקלים בקרב יילודים חיים בחברות כאלה תהיה נורמלית אף היא, אך הטווח יהיה קטן יותר (כמעט שלא יהיו יילודים חיים במשקל נמוך מאוד או גדול מאוד).

ח הטכנולוגיה והרפואה המודרנית משפרים את סיכוייהם של פרטים בעלי משקל קיצוני לשרוד. הטכנולוגיה מקטינה במידה מסוימת את לחץ הברירה על היילודים. עם זאת, תמיד יש יילודים קטנים מדי או גדולים מדי שלא שורדים.

ז זוהי דוגמה לברירה שבה יש יתרון לא לערך הגבוה ביותר או לנמוך ביותר, אלא דווקא לממוצע. יש כאן ברירה נגד הופעת תכונות קיצוניות באוכלוסייה. ברירה זו שייכת לסוג הנקרא "ברירה מייצבת", בעוד שהדוגמאות הקודמות שייכות לסוג הנקרא "ברירה כיוונית".

6 ב הנבטים בעלי דרגת העמידות הנמוכה מייצגים פרטים שנצרים באוכלוסייה, אך בנוכחות נחושת כשירותם נמוכה, ולכן הם לא שורדים.

ח באזור ללא הנחושת כל הפרטים היו רגישים. לולא הייתה העמידות מהווה חיסרון כלשהו, היינו מצפים לשונות בתכונות העמידות.

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'רפות 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 סיכויו לשרוד.
ג. אילו ממצאים תומכים בהשערה זו?

7 בא"י 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 ואילו.
פרוש הקרקע הבינוני (medium ground finch) ניזון בעיקר מזרעים שהוא מפצח במקורו.



פרוש הקרקע הבינוני

7

7

הקשר בין גודל המקור
לגודל הזרעים הנאכלים
טיפוסי לציפורי שיר.
רק פרטים בעלי מקור
גדול יחסית יכולים
לפצח ולבלוע בהצלחה
זרעים גדולים.
בעלי מקור קטן
מפצחים טוב יותר
זרעים קטנים מאשר
בעלי מקור גדול,
שצריכים להשקיע בכך
הרבה יותר אנרגיה.

8

בתקופת הבצורת רק
פרטים בעלי מקור גדול
יכלו לפצח בהצלחה
זרעים גדולים.

9

שאלו את התלמידים:
כיצד יראה הגרף
המתאר בצורה הטובה
ביותר את שיתרחש?
הסבירו את בחירתכם.
סביר להניח כי אחרי
מספר שנים של בצורת,
נקבל שוב התפלגות
נורמלית של אוכלוסיית
הפרושים ביחס לגודל
המקור, אלא שגודל
המקורים (הגדולים
ביותר, הקטנים ביותר
וגם הממוצעים) יהיה
גבוה יותר מזה שהיה
לפני הבצורת (זאת
אומרת, גרף הפעמון
צפוי להיות דומה
בצורתו, אך מוסט ימינה
יותר על ציר ה-X).

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?

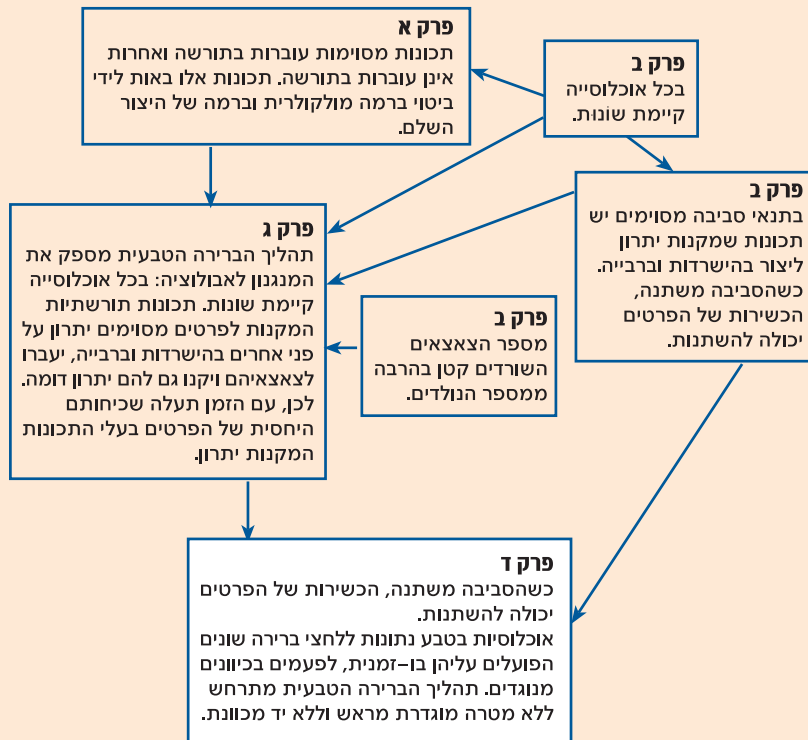
סיכום

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 חבוים מעינינו. בחלק מהשינויים המתחוללים כיום יהיה אפשר להבחין אולי בעתיד הרחוק.

מפת למידה:



מונחים שנלמדו בפרק:

לחץ ברירה
ברירה מלאכותית



1. באזור הטונדרה המושלג שבצפון קנדה חיה קבוצה של שועלים בעלי פרווה לבנה. לאזור הובאו לא מכבר שועלים חומי פרווה. לאיזו מוטציה יש סיכוי רב יותר להתרחש? נמקו.

א. מוטציה לפרוה לבנה בשועלים חומי הפרוה.

ב. מוטציה לפרוה חומה בשועלים לבני הפרוה.

ג. אי-אפשר לקבוע.

2. במשפחות רבות, לאורך הדורות, מנקבים הילדים (בנים ובנות) את תנוכי האוזניים כדי לעמוד עגילים. גנטיקאי החליט לעשות שינוי ב-DNA, באופן שהילדים ייוולדו כבר עם חור באוזן. כאילו תאים אצל ההורים, לדעתכם, צריך הגנטיקאי לעשות את השינוי: בתאי תנוך האוזן, בתאי המין, בתאי המוח או בתאי הדם? נמקו.

3. 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 אוכלוסייה זו, ארנב בעל פרווה בהירה כשיר יותר מארנב בעל פרווה כהה, שכן הוא מוסווה טוב יותר וסיכויי להיטרף על-ידי עופות דורסים קטנים יותר.

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. לא ניתן לקבוע.

הסבירו את תשובתכם.



פרק ה' כיצד נוצרת שונות?

לפניכם תיאור של כמה תופעות שלכלן מאפיינים משותפים:

בשבת 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 מאור 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 אליים 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, המחוששים 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, המחוששים המנוונים והחיידק האליים)?



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:

גְּדִי אָכַל לֶחֶם יֵבֶשׁ

למשפט זה יש משמעות ברורה. אם תשתנה אחת האותיות, למשל, האות "י" המסומנת תהפוך ל"ע", יתקבל המשפט: **גְּדִי אָכַל לֶחֶם עֵבֶשׁ**. משפט זה שונה במובנו מהמשפט המקורי, אך לא באופן ניכר. לעומת זאת, אם תשתנה האות "ל" המסומנת ובמקומה תופיע האות "פ", יתקבל המשפט **גְּדִי אָכַל פָּחַם יֵבֶשׁ**. גם משפט זה הוא בעל משמעות, אך משמעותו שונה לחלוטין מהמשפט המקורי.

39

תלמידים רבים מחזיקים בתפיסות נאיביות הקשורות להיווצרות תכונות חדשות באוכלוסייה:

הופעת מוטציות: ישנם תלמידים שמבינים את המושג מוטציה כשינוי בפנוטיפ של הפרט בו התרחשה המוטציה, אך לא בהכרח כשינוי במידע התורשתי בתאי הרבייה שמשמעותו שינוי בתכונות הצאצאים. מבחינתם של תלמידים אלה, מוטציה היא פגיעה בתא או ברקמה, אך לא ב-DNA. לעומתם, יש תלמידים שחושבים שכל מוטציה עוברת בתורשה, גם אם התרחשה בתאים סומטיים.

כיוון המוטציות: תלמידים רבים חושבים שהסביבה היא שמשרה הופעת תכונות חדשות. הופעת מוטציות אינה אקראית אלא באה להקנות יתרון בסביבה. כך למשל, תלמידים נוטים לחשוב שבקרב שועלים חומי פרווה שהובאו לאזור מושלג, סביר יותר שתתרחש מוטציה ליצירת פרווה לבנה. לעומתם, יש תלמידים המתייחסים למוטציות כאירוע שלילי שתמיד מזיק.

דווקא בקרב תלמידים רבים שלמדו את נושא האבולוציה ניתן לזהות תפיסה שגויה נוספת. תלמידים אלה סבורים כי מוטציות שמקנות יתרון, יתרחשו תמיד **לפני** הסביבה בה יש לתכונה יתרון. כך למשל, למוטציה הגורמת לשינוי בצבע הפרווה ומקנה יתרון לארנבים מפני טורפים, יש סיכוי גבוה יותר להתרחש לפני הופעת הטורף. תלמידים אלה מבינים שהסביבה אינה זו שמשרה היווצרות מוטציות "חיוביות" אך לא מבינים את המושג אקראיות.

● כשלב זה איננו מצפים שהתלמידים ידעו לתת את ההסבר הנכון שעניינו הופעת מוטציות. מטרת השאלה היא להציף את הרעיונות המוקדמים של התלמידים בנושא. רעיונות אלה יכולים להיות נכונים (למשל, שקרה שינוי ב-DNA של הפרטים יוצאי הדופן) או רעיונות נאיביים (למשל, שהפרט יוצא הדופן בא במגע עם גורם סביבתי, ולכן הפנוטיפ שלו (אך לא ה-DNA!) השתנה.

אם עולים רעיונות נאיביים,
הציגו לתלמידים את השאלה
הבאה:

בהנחה שצאצאיהם של
החיידיקים האלימים היו
אלימים אף הם, האם
תרצו לשנות את
תשובתכם לשאלה
הקודמת?

המידע החדש מצביע
על כך שתכונת
האלימות בחיידיקים היא
תורשתית, ועכשיו
התלמידים יכולים
להציע מנגנון הדורש
שינוי ב-DNA.



מוטציות אינן רק חילוף או
תוספת של נוקליאוטיד
("אות") בודד, אלא לעתים
חסר של נוקליאוטיד. פעמים
רבות מתרחשות מוטציות
שמעורבים בהן מקטעי DNA
גדולים.

נוקליאוטידים (ישנם
ארבעה סוגי
נוקליאוטידים)

מילה

גן

כלל ה-DNA של יצור
מסוים

מוטציה

אם נוסף לתוך המשפט אות חדשה, למשל, את האות "יו" 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 **גן**. 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
ה"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)	א
רצף של שלושה נוקליאוטידים	כ
משפט	ח
חוברת הוראות	ד
שינוי כתיב	פ

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 שערבנו 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 בסגריות ובעשן מכוניות ואף וירוסים מסוימים. **1c**

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 לגררי 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 שבגופן 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 משגשים 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.

41

1c בתאים קיימים מגנוני תיקון והגנה הכוללים אנזימים המזהים מוטציות שהתרחשו בזמן השכפול ומתקנים אותן. כך עולה הסיכוי שתאי הבת יקבלו העתק מדויק של ה-DNA ההורי. טעויות שאינן מתוקנות יביאו לשינוי ברצף ה-DNA.

1 הפרט הירוק יהיה כשיר יותר מפרטים כחולים וצהובים בסביבת העשב הירוק, ולכן שכיחותם היחסית של הפרטים הירוקים באוכלוסייה תלך ותעלה.

2 לפרט הלבן תהיה הכשירות הנמוכה ביותר (לו או לצאצאיו יש סיכוי גדול יחסית להיטרף). משום כך שכיחותם היחסית של הפרטים בעלי הצבע הלבן באוכלוסייה לא תעלה.

3 כשירותו של פרט זה לא תהיה שונה מזו של הפרטים הכחולים ולכן נצפה שלא תהיה עלייה בשכיחות הפרטים המנוקדים ביחס לכחולים. לעומת זאת, כשירותו תהיה גבוהה מזו של הפרטים הצהובים ולכן, תעלה שכיחותם של הפרטים המנוקדים יחסית לפרטים הצהובים. (אנחנו מניחים כי אוכלוסיית החרזנים נמצאת עדין בעיצומו של תהליך הברירה ועדין ישנם פרטים צהובים).

5 כפי שכבר ראינו, יתרון או חיסרון הם עניין יחסי. לשיבולים שגדלו אצל האדם, המוטציה הקנתה יתרון, כי רק הן נבררו על ידו והעמידו צאצאים. לעומת זאת, לו היו גדלות בטבע, היה להן חיסרון, שכן הן היו מתקשות להפיץ את זרעיהן.

ב בשלב זה תלמידים יכולים לחשוב שנוכחותה של אנטיביוטיקה חיונית להופעתן של מוטציות המקנות עמידות. זוהי תפיסה נאיבית. מוטציות מופיעות בצורה ספונטנית, ולהופעת תכונת העמידות אין קשר לנוכחותה של אנטיביוטיקה. לכן, בהחלט ייתכן שהמוטציה הופיעה גם לפני שאנטיביוטיקה נכנסה לשימוש. ואכן, המדענים בודדו מהגופות חיידקים שהיו עמידים לאנטיביוטיקות, חלקן חדישות ביותר, שהשימוש בהן החל רק שנים מעטות קודם לכן.

ג הסיפור תומך ברעיון שמוטציות מתרחשות באופן ספונטני, כלומר, ללא קשר לתנאי הסביבה ובאופן אקראי. לו היו המוטציות מופיעות רק בתגובה לנוכחות אנטיביוטיקה, לא היינו מצפים למצוא את תכונת העמידות בתקופה שקדמה לשימוש באנטיביוטיקה.

מדוע היה חשוב שבד הקטיפה יהיה סטרילי?

על בד קטיפה לא סטרילי, יכולים להימצא חיידקים שונים. חשוב היה שעל בד הקטיפה ששימש ככלי להעברת חיידקים מצלחת המקור לצלחות האנטיביוטיקה, יימצאו רק חיידקים מהמושבות שבצלחת המקור ולא חיידקים נוספים.

מרבית החיידקים לא הצליחו לגדול על צלחות האנטיביוטיקה, אך חיידקים שבהם התרחשה מוטציה המקנה עמידות גדלו ויצרו מושבות. בגלל השכיחות הנמוכה של מוטציות התקבל רק מספר קטן של מושבות בנכחות האנטיביוטיקה.

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 זיהוי 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?

42

המושבות יגדלו במקומות שונים בכל צלחת. מוטציות התרחשו רק בצלחות עם האנטיביוטיקה, אך כיוון שהמוטציות הן נדירות ביותר, בלתי סביר שהן יתרחשו בו-זמנית באופן בלתי תלוי בחיידקים שמצויים באותו מיקום. בכל צלחת אנטיביוטיקה יתרחשו המוטציות מחדש, בכל פעם במושבות אחרות במיקום אחר.

לפחות חלק מהמושבות יגדלו באותם המקומות בכל הצלחות, כי מקורן באותם חיידקים שבהם התרחשו מוטציות כבר בצלחת המקור. בנוסף, יתכן ויתרחשו מוטציות גם בכל אחת מצלחות האנטיביוטיקה, ולכן נצפה להופעת מושבות נוספות "ייחודיות" לכל צלחת.

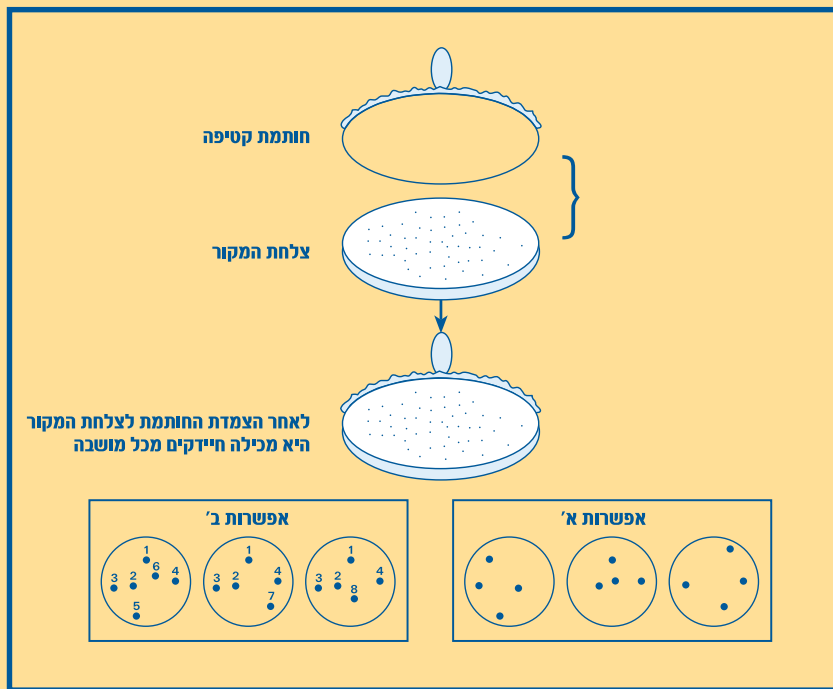
היינו מצפים שכל החיידקים שיצרו מושבות על צלחת המקור (גם חיידקים רגישים וגם אלו העמידים לאנטיביוטיקה) יתרבו ויצרו מושבות על צלחת זו.

מקורן של מושבות אלה הוא במוטציות שהתרחשו בחיידקים בכל אחת מצלחות האנטיביוטיקה בנפרד. זו הסיבה שהופיעו מושבות נוספות "ייחודיות" לכל צלחת.

הניסוי הראה שמוטציות בחיידקים מתרחשות באופן ספונטני, גם ללא חשיפה לאנטיביוטיקה.

הניסוי הראשון שהיווה עדות ישירה לכך שמוטציות הן ספונטניות ולא מכוונות על ידי הסביבה, נערך על ידי לוריה ודלברוק (Luria and Delbruck) עוד ב-1943. תרומתם של יהושע ואסתר לדרברג הייתה בפיתוח שיטת ה-replica plating, בה מועברים חיידקים מצלחת לצלחת בעזרת חותמת קטיפה, בצורה פשוטה ומהירה. יהושע לדרברג, זכה בפרס נובל בשנת 1958 על גילוי תהליך הקוויגוציה בחיידקים.

הרחבה



הניסוי של הזוג לדברג

האם מוטציות מעלות את הכשירות או מורידות אותה?

ראינו שתכונות 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.

43

למרות שהמוטציות הן אקראיות, רובן מורידות את הכשירות. שינוי ברצף ה-DNA (באחד הגנים) במקום אקראי גורם בדרך כלל לשינוי החלבון המקודד על ידו, ושינוי אקראי, כפי שאפשר לראות באנלוגיה לשפה, גורם לשיבוש התוצר.



האם כל מוטציה עוברת בתורשה?

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

- לפניהם 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 שכיהן 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 ניצור, בעזרת ממתקים וחפצים אחרים, משפחה של יצורים – זוג הורים וצאצאיהם – ונעקוב אחר התפתחות השונות במשפחה.

44

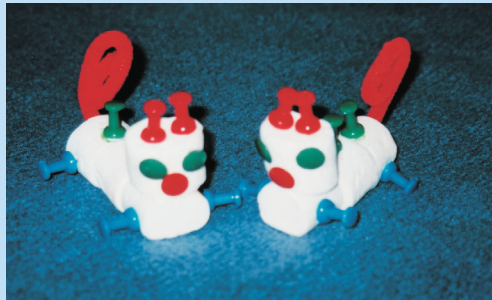
הרחבה

טאי זקס ופניל קטונוריה, הן מחלות תורשתיות מטבוליות, הנגרמות על ידי אללים אוטוזומליים רצסיביים. **טאי זקס** – הפגם הגנטי גורם לפגיעה באנזים האחראי לפירוק אחד מסוגי השומנים. כתוצאה מכך, מצטבר השומן במערכת העצבים ויכול לגרום לפיגור, שיתוק, עיוורון, ואף למוות בגיל צעיר. כיום אין טיפול במחלה, אך יש אפשרות לאבחן עובר שחולה במחלה.

פניל קטונוריה – הפגם הגנטי גורם לפגיעה באנזים ההופך את החומצה האמינית פניל אלנין לטירוזין. כתוצאה מכך, מצטבר פניל אלנין בגוף ונגרמת פגיעה במערכת העצבים ובאיברים פנימיים. יילוד המזוהה כחולה ניזון מדיאטה המכילה חלבונים נטולי פניל אלנין ויכול לחיות חיים רגילים.

מדוע לכל האחים שלי עינים חומות ולי כחולות?

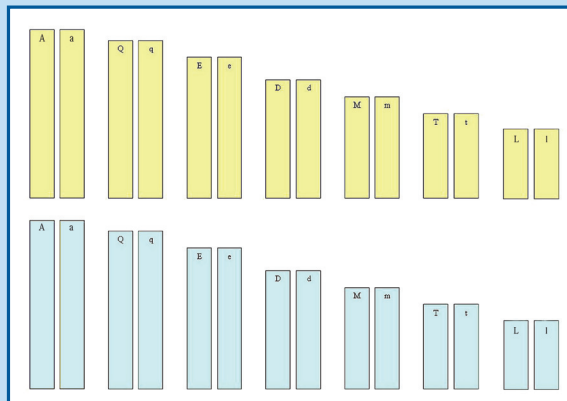
המורה יציג בפניכם זוג הורים ריבופים, גופם וראשם עשוי מחתיכות מרשמלו, שני מחושיהם – ממסמרים אדומים, שתי עיניהם עשויות מסיכות ירוקות, אף מנעץ אדום, שתי דבשות מסוכריות צבעוניות, רגליים ממסמרים כחולים, זנב מסולסל שעשוי ממנקה מקטרו.



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 באב ואחד באם. 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

45

הפעילות שלפניכם היא פעילות בזוגות (אפשר, אך פחות מומלץ, בקבוצות של 3-4 תלמידים). היא מדגימה, באמצעות מודל, את יצירת השונות במהלך הרבייה הזוויגית. בעזרת המודל מומחש הסיכוי הקלוש שהצאצאים יהיו זהים להוריהם (או זהים זה לזה). הפעילות קלה לביצוע ונמשכת כשיעור אחד.

חומרים לכל זוג (כדאי לשים את כל החומרים במרכז ולבקש מהתלמידים לקחת מה שהם צריכים):

- 5 חתיכות מרשמלו ליצירת הגוף
- 4 סיכות ללוח שעם בצבע כחול ליצירת הרגליים
- 3 סיכות ללוח שעם בצבע אדום ו-3 סיכות בצבע כחול ליצירת המחושים
- 3 נעצים ירוקים ליצירת העיניים
- 3 סיכות ללוח שעם בצבע ירוק ליצירת דבשות
- 3 נעצים בצבעים כתום, אדום, צהוב ליצירת האף
- חוט פלטינה או מנקה מקטרו ליצירת הזנב
- צנצנת מים להדבקת חתיכות המרשמלו זו לזו
- 28 רצועות בריסטול (המתפקדות ככרומוזומים) בשני צבעים על פי האיור בספר התלמיד (אחד מהאב ואחד מהאם), כל "צבע" במעטפה נפרדת.

כדאי להוציא את חתיכות המרשמלו מהשקית 24 שעות לפני הניסוי כדי שיתקשו ויהיה קל יותר לעבוד אתם. אפשר להדביק את חתיכות המרשמלו זה לזה באמצעות מעט מים.

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.
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.

1 לכל הריבופים אותן תכונות כלליות: מחושים, עיניים, אף, דבשות, זנב, רגליים וגוף. דבר זה נובע מכך שיש לכולם גנים שאחראיים למחושים, לעיניים, לאף וכו'.

2 השוני נובע מאופי התהליך של יצירת תאי המין של ההורים. הכרומוזומים ששימשו בהפריה נבחרו על ידי התלמידים בצורה אקראית ולכן, הצירוף שקבלו כל שני תלמידים היה ייחודי ויצר צאצא שונה.

רבייה זוויתית	הדמיית הריבופים
א	רצועות הנייר
ב	האותיות על רצועות הנייר
ג	יצירת תאי המין בכל הורה, שכל אחד מהם מורכב מצירוף אקראי של כרומוזומים
ד	תאי מין
ה	צירוף שתי הסדרות של רצועות הנייר
ו	בניית הריבופ על פי המפתח

6. מה הקשר בין מגוון הריבופים שקיבלתם לבין העובדה שהרבייה הייתה זוויתית?
7. לו הייתה ההדמיה מתבצעת גם בכיתה המקבילה והייתם מתבוננים בכל הריבופים הצאצאים, האם אז הייתם יכולים למצוא שני צאצאים זהים לחלוטין? למה? האם הייתם יכולים למצוא צאצא זהה לחלוטין לאחד ההורים? נסו להסביר את תשובתכם.
8. במציאות יש, כמובן, לכל יצור הרבה יותר משבע תכונות. מה תוכלו לומר על הסיכוי לקבל צאצאים זהים 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 הזוויתית?

בהדמיה ראינו שצאצאים של הורים המתרבים ברבייה זוויתית 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 זוויתית. כפי שראינו בתחילת הפרק, גם מוטציות הן מקור תמידי לשונות. אבל בעוד שהמוטציות הן נדירות יחסית, צירופים חדשים של גנים (הנוצרים רק ברבייה זוויתית) 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 זוויתית והן ברבייה אל-זוויתית. תפוח האדמה הוא צמח כזה. כאשר הוא מתרבה ברבייה זוויתית, מאביקים גרגרי האבקה הזכריים את השחלה הנקבית, וכתוצאה מכך נוצרים זרעים, שמכל אחד מתפתח צאצא בעל צירוף תכונות ייחודי. בדרך הרבייה האל-זוויתית נשלחות מתפוח האדמה (מה"עיניים") שלוחות, המתפתחות לצמחים בוגרים. אם לא חלו מוטציות, צמחים אלה יהיו זהים לחלוטין לתפוח האדמה ההורה.

47

א כרומוזומים

ב גנים

ג הבחירה האקראית ברצועות נייר, אחת מכל זוג

ד 7 רצועות הנייר שנבחרו באקראי (צהובות או כחולות – לא זוגות)

ה הפריה

ו היווצרות הצאצא על פי המידע הגנטי

9

ההבדל העיקרי הוא שבהדמיה יצרנו תא מין אחד בלבד (אחד של האם ואחד של האב, כל אחד מכיל שבע רצועות נייר), ואילו אצל יצורים המתרבים ברבייה זוויתית נוצרים תאי מין רבים. הבדל זה הוא משמעותי, שכן במציאות המגוון העצום של הצירופים האפשריים ברבייה זוויתית נובע משני גורמים: האחד, אקראיות התהליך שבו נפרדים כרומוזומים בעת יצירת תאי המין, והשני הוא צירופם האקראי של תא מין זכרי מסוים עם תא מין נקבי מסוים.

בהדמיה המחשנו רק את הגורם הראשון. שאלו את התלמידים, כיצד היה אפשר לדמות גם את הגורם השני המגדיל את מגוון הצירופים? תשובה אפשרית היא לקבץ את כל תאי המין האימהיים שבכיתה (שמכילים את הכרומוזומים הצהובים) ואת כל תאי המין האבהיים (הכרומוזומים הכחולים) ואז לבחור, לצורך ההפריה, תא מין אחד בלבד מכל הורה.

הבדלים נוספים בין ההדמיה למציאות: א. בהדמיה הנחנו שכל תכונות הריבופים נקבעות על ידי ה-DNA בלבד, ובמציאות הנחה זו אינה נכונה. ב. בהדמיה עסקנו ביצור בעל שבעה גנים בלבד ובמציאות ליצורים גנים רבים יותר.

צאצאי אוכלוסייה
המתרבה באופן זוויגי
שונים זה מזה יותר
מאשר צאצאי
האוכלוסייה שמתרבה
באופן אל-זוויגי (בגלל
מגוון הצירופים
המתקבל).

מטרת שאלה זו היא
להציג את היתרון
שיכולה השונות
להקנות לאוכלוסייה
כאשר תנאי הסביבה
משתנים. בקרב פרטים
השייכים לזן אחד
מסוים, יש פחות שונות
מאשר בקרב פרטים
השייכים לזנים שונים.
אם ישתנו התנאים
(בעקבות התפתחות
תנאי קרה, פלישה של
פתוגן וכדומה), עלולים
כל הפרטים של הזן
האחד, מוצלח ככל
שיהיה, להיכחד.

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 נכונה? 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 (הציידיים 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 ורבייה 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 כשירותם של הפרטים בעלי הצוואר הארוך יותר ואורכם הממוצע של הצווארים עלה.

48

ח פרטים באוכלוסייה המתרבה ברבייה זוויגית נבדלים ביניהם בתכונות רבות, ולכן יש סיכוי גבוה יחסית, שמישהו מהם יהיה מתאים לתנאי הסביבה החדשים, ישרוד ויעמיד צאצאים שימשיכו את הדור. לעומת זאת, באוכלוסייה המתרבה ברבייה אל-זוויגית קיימת אחידות כמעט מוחלטת; כלומר, פרטים כמעט זהים זה לזה (בגלל נדירותן של המוטציות). לכן, אם הפרטים באוכלוסייה לא יתאימו לתנאי הסביבה החדשים, הרי כל האוכלוסייה תיכחד. לא יהיה אף פרט שצירוף תכונותיו הייחודי יכול להיות מתאים.

שימו לב, שגם מנגנון יצירת השונות המאפיין את הרבייה הזוויגית (יצירת צירופים חדשים של גנים) מתבסס, למעשה, על מוטציות: לולא מוטציות שאירעו בעבר בגנים, לא היו נוצרים אללים שונים המשמשים "חומר גלם" לצירופים.

ליתר
דיוק...

תלמידים
חושבים ש...

ד תלמידים רבים סבורים כי בתהליך הברירה הטבעית (של צוואר הג'ירפה למשל) היו קיימים באוכלוסייה, **מלכתחילה**, פרטים בעלי צוואר שאורכו כאורך צוואר הג'ירפות כיום. תלמידים כאלה מבינים את מושג הברירה, אך לא מבינים שתהליך יצירת השונות מתרחש כל הזמן, בצורה הדרגתית ורציפה במקביל לתהליך הברירה.

שאלות לסיכום

קיימים חיידקים מפרקי ניילון כדוגמת הפלובוקטריום (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?



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?

- בתאי תנוך האוזן.
- בתאי המוח.
- בתאי המין (תאי זרע וביציות).

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

בחלזונות, צבע הקונכיה הוא 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.

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 זן, ארנב בעל פרווה בהירה מוסווה טוב יותר מארנב בעל פרווה כהה, ולכן יש לו יתרון בהישרדות מפני טריפה על-ידי עופות דורסים.

3 זוהי שאלה חשובה ביותר, שהתשובה עליה היא: קרוב לוודאי שלא!

ראשית, כיוון שלא בטוח שתנאי הסביבה היו משתנים באותו האופן.

שנית, השונות הנוצרת במהלך הדורות היא אקראית כיוון שמקורה הוא במוטציות

אקראיות וביצירות אקראיים של גנים. לכן, גם אם תנאי הסביבה הנוכחיים יהיו זהים לאלו שהיו פעם, לא נוכל לדעת איזו שונות הייתה נוצרת במהלך הדורות בקרב אוכלוסיית הג'ירפות.

ייתכן שלא הייתה נוצרת שונות באורך הצוואר אלא דווקא באורך הרגליים או בתכונה רלבנטית אחרת. ייתכן גם שלא הייתה נוצרת באוכלוסייה החדשה שונות שיש בה תכונה המעלה את הכשירות בתנאי הסביבה המשתנים, ואוכלוסיית הג'ירפות הייתה נכחדת.

1c לא. המוטציה שגרמה לקונכיה מפוספסת, כמו כל מוטציה, היא ספונטנית ולא מתרחשת כתוצאה משינוי בסביבה.

1b ייתכן. אבל כשירותו הייתה נמוכה וקרוב לוודאי שבתהליך הברירה הטבעית הוא לא היה שורד.

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:

- קיימת סבירות גבוהה יותר שיקרה תרחיש מס' 1.
- קיימת סבירות גבוהה יותר שיקרה תרחיש מס' 2.
- לשני התרחישים קיים סיכוי שווה לקרות.
- לא ניתן לקבוע.

הסבירו את תשובתכם.

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. **lc**

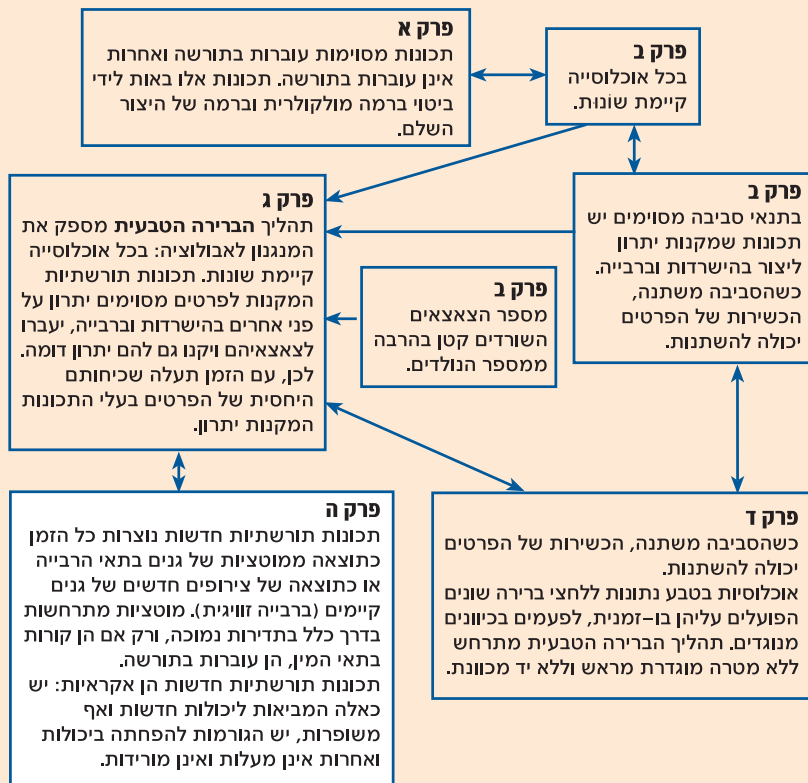
שני מנגנונים אלה הם מקור תמידי לשונות באוכלוסיות. אבל בעוד שהמוטציות הן נדירות, יחסית, צירופים חדשים של גנים מתרחשים תמיד. הברירה הטבעית פועלת על השונות ללא קשר לדרך בה היא נוצרה ובוררת את המתאימים ביותר. השונות מעלה את הסיכוי, שאם ישתנו תנאי הסביבה יהיו פרטים שיתאימו לסביבה החדשה ויעמידו צאצאים.

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.

סיכום

lc
בכיתות שלמדו גנטיקה, ניתן לדבר על תהליך השחלוף במיזזה, התורם גם הוא להגדלת השונות.

מפת למידה:



מונחים שנלמדו בפרק:

מוטציה
מוטגנים
רבייה זוויגית
רבייה אל-זוויגית



1. מדענים מעריכים שכ-150,000 מינים שונים של פרפרים חיים כיום על פני כדור הארץ. בחרו במשפט המתאר בצורה הנכונה ביותר את דעתכם ונמקו את בחירתכם.
- א. כל מיני הפרפרים שחיים כיום על פני כדור הארץ קיימים מאז הופיעו הפרפרים לראשונה.
- ב. כל מיני הפרפרים שחיים כיום על פני כדור הארץ קיימים מאז הופיעו הפרפרים לראשונה. מאז נכחדו מינים אבל לא נוצרו מיני פרפרים חדשים.
- ג. מגוון הפרפרים השתנה מאז הופיעו הפרפרים לראשונה. כיום לא נוצרים יותר מיני פרפרים חדשים, אך מינים מסוימים נכחדים.
- ד. מגוון הפרפרים השתנה מאז הופיעו הפרפרים לראשונה. כיום עדין נוצרים מינים חדשים ומינים אחרים נכחדים.
- נימוק _____
-

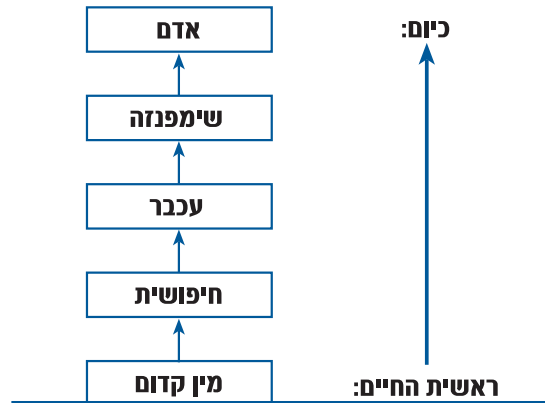
2. מדענים מצאו כי החומר התורשתי (DNA) של האדם ושל השימפנזה דומה ב-99.4%. ממה נובע דמיון זה לדעתכם?
- א. זה צרוף מקרים.
- ב. זה לא מקרי.
- הסבירו בהרחבה את דעתכם: _____
-

3. לשני אחים יש אב משותף. לבני דודים יש סב משותף. למי מהזוגות הבאים יש "אב קדום משותף" (לא משנה לפני כמה דורות חי האב הקדום הזה). ניתן לבחור יותר מתשובה אחת.
- א. חיפושית "מושית השבע" וחיפושית "זבלית פרעה". כן / לא
- ב. חיפושית ונמלה. כן / לא
- ג. חיפושית וזאב. כן / לא
- ד. חיפושית וחיידק. כן / לא
- ה. חיפושית ואדם. כן / לא
4. בתאים של אנשים ובתאים של צמחים יש אברונים דומים (מיטוכונדריה, ריבוזומים, גרעין ועוד). כיצד, לדעתכם, ניתן להסביר את הדמיון הזה?
- א. זה צרוף מקרים.
- ב. זה לא מקרי כלל.
- הסבירו בהרחבה את דעתכם: _____
-

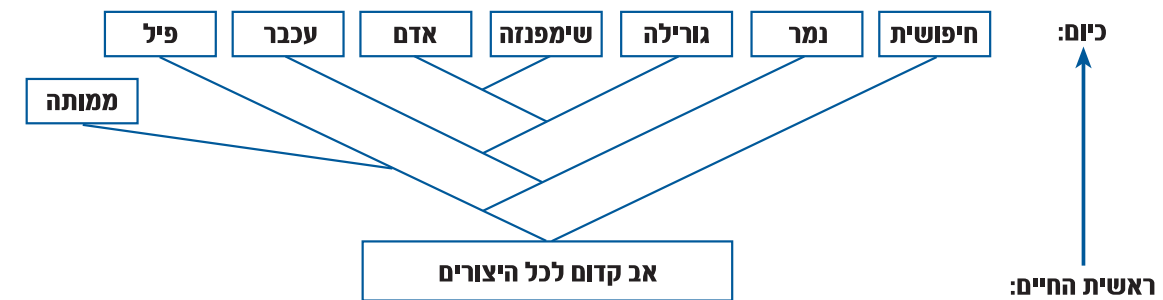
5. יצורים רבים מותאמים היטב לסביבתם. למשל, החולד, יונק מסדרת המכרסמים, מותאם באופנים רבים לסביבה התת-קרקעית שהוא חי בה. לדוגמה, אף על פי ששיניו נשחקות באופן מתמיד מכיוון שהוא חופר בעזרתן מחילות, הן אינן קטנות, מאחר שהן צומחות באופן בלתי פוסק. לחולד אף ופה הפונים כלפי מטה באופן שלא חודרת אדמה למערכת הנשימה שלו תוך כדי חפירה. שערות גופו אינן מוטות לאחור, כמו אצל מרבית היונקים, אלא ניתנות להטיה לכל כיוון. הדבר מאפשר לו לנוע גם לאחור בתוך המחילה הצרה מבלי להיתקע. מה הקשר בין ההתאמות של החולד למנגנון הברירה הטבעית?
-
-

6. נהוג לתאר כאילן יוחסין את התפתחות המינים מאז הופיעו לראשונה יצורים חיים על פני כדור הארץ. מצורפים איורים המדגימים ארבע אפשרויות לשרטוט אילן כזה. באיזה מהם תבחרו כנכון ביותר לתיאור התפתחות המינים?
- א. **"סולם"**: מין קדום אחד היווה "מוצא" (התחלה) לכל המינים. כל מין חדש התפתח ממין קודם לו.
- ב. **"שיח"**: מין קדום אחד היווה מוצא לכל המינים. היו מינים שכבר נכחדו. חלק מהמינים התפצל למינים חדשים.
- ג. **"מודל הקבוצות"**: כל קבוצה של מינים קרובים שחיה כיום (למשל, יונקים, זוחלים או עופות) התפתחה ממין קדום אחר.
- ד. **"מודל מרובה התחלות"**: כל מין שחי כיום קיים מאז הופיעו יצורים חיים לראשונה. מאז נכחדו מינים אבל לא נוצרו מינים חדשים.
- ה. **אחר** (פרט).

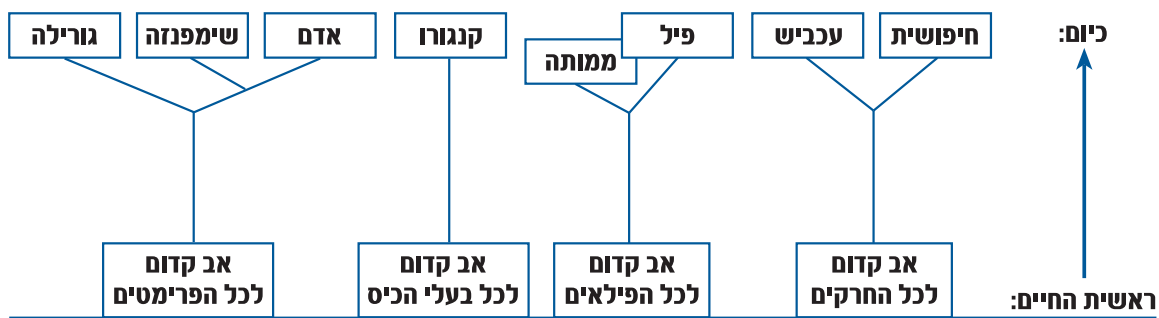
דוגמה למודל ה"סולם"



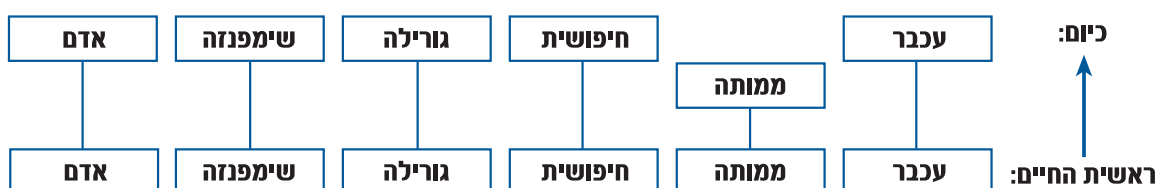
דוגמה למודל ה"שיח"



דוגמה ל"מודל הקבוצות"



דוגמה ל"מודל מרובה התחלות"



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 נדמה שושלת של יצור דמיני 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 ימדדו 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	א
העותקים השונים	ב
ההעברה של הדף	ג
השינויים החלים בציור	ד

52

הפעילות נועדה לטפל ברעיון הבא:

תכונות חדשות נוצרות כתוצאה משינויים אקראיים בחומר הגנטי. במשך הדורות השינויים, הקטנים על פי רוב, עשויים להצטבר לכדי שינוי גדול ביחס למקור.

ההדמיה דומה למשחק המוכר "טלפון שבור". התלמידים מקבלים ציור של דג, מעתיקים אותו ומעבירים את התוצר לתלמידים אחרים. במהלך ההעברות משתנה הציור באופן אקראי והדרגתי. שיבושים בהעתקה שיוצרים שינויים מדמים את המוטציות האקראיות החלות בטבע. בניגוד למה שקורה בטבע, תדירות השינויים בהדמיה היא גבוהה: בכל דור (כל העתקה) מופיעות מוטציות המשפיעות על מראה ה"שטוחדג". הסיבה העיקרית לשינויים המהירים היא גודל האוכלוסייה הקטן – פרט אחד. במילים אחרות, כמעט כל מוטציה משתלטת מיד על כל האוכלוסייה.

א

אין כאן יצירה של צירופים גנטיים חדשים (משום שמדובר ברבייה אל-זוויגית), ובכל זאת סביר שיהיה שוני בחומר התורשתי בין הצאצאים למקור בגלל הצטברות של מוטציות אקראיות החלות עם הזמן.

חומרים:

דפים שעליהם ציור הדג המופיע בעמ' 61, לצלם כמספר הטורים. דף חלק וכלי כתיבה לכל תלמיד.

ההורה הראשון

הצאצאים

דור

מוטציות

4 ככל שה"צאצא" רחוק מהמקור הוא שונה יותר מהדג המקורי, כי הצטברו בו יותר שינויים.

5 היו מצטברים יותר שינויים.

6 ככל שעוברים דורות רבים יותר, כך יכולים להצטבר שינויים רבים יותר, והצאצאים יכולים להיות שונים יותר מהדג המקורי.

7 בדרך כלל השינוי הועבר, אך יש מקרים שהוא לא הועבר לדור הבא. לא כל שינוי "מצטבר".

8 מצב זה דומה, למשל, למה שמתקבל במשחק "טלפון שבור". לעתים, המילה הנאמרת על ידי המשתתף האחרון בשורה שונה לחלוטין מהמילה המקורית. השינויים המצטברים במהלך ההעברות הם כה רבים (או גדולים), עד שהם מטשטשים את הדמיון בין הצאצאים למקור.

9

3. האם הצאצאים האחרונים שהתקבלו שונים מההורה הראשוני? במה?
4. האם יש הבדל במידת הדמיון בין צאצאים מדורות שונים (עוקב שצויר בהעברה הראשונה, עוקב 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 המקורי? 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.

10

חיידקים בכל מקום

חיידקים מספקים דוגמאות רבות להתאמות "יחודיות" 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 ומעינות מים חמים (שבהם המים רותחים!).

11

ים המלח נוצר בהדרגה על ידי אידיו 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.

12

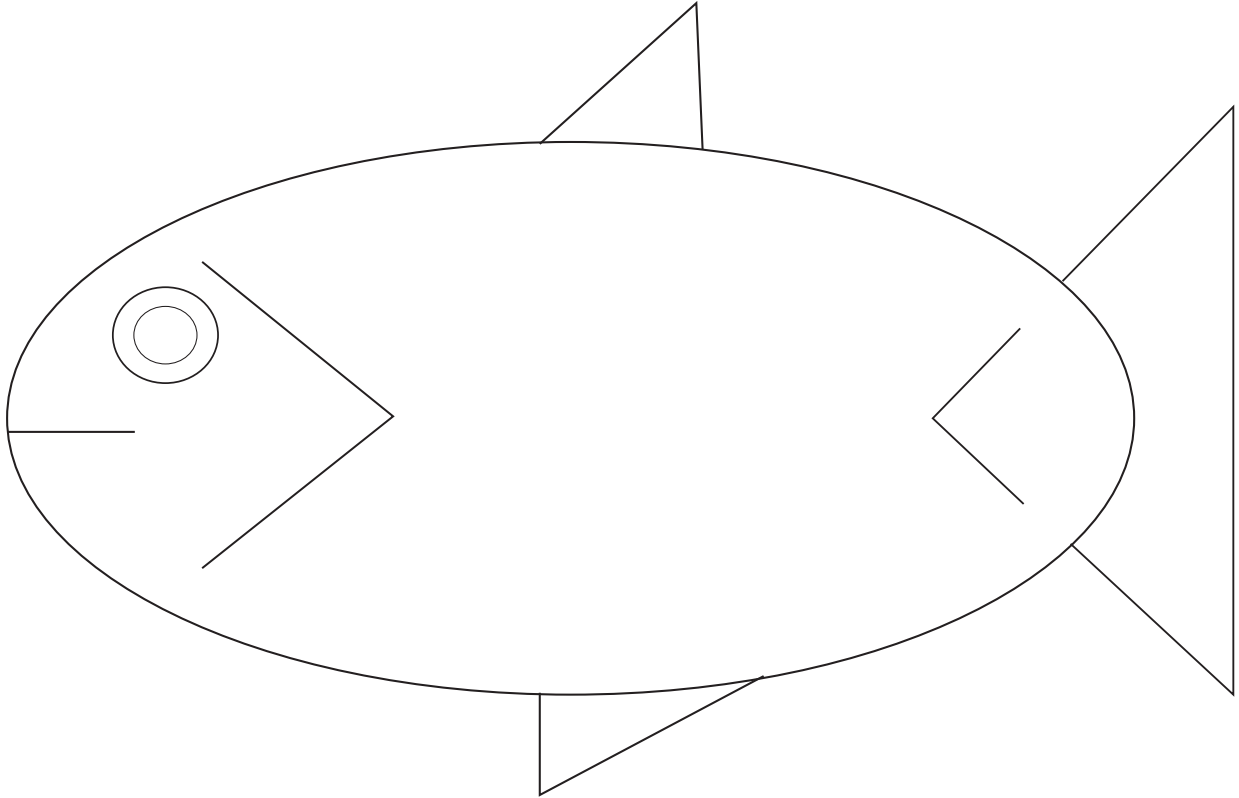
53

	ההדמיה	הטבע
שוני	השטוחדגים מתרכים רק בדרך של רבייה אל-זוויגית.	רוב המינים בטבע מתרכים גם בדרך של רבייה זוויגית, כלומר נוסף על התרחשותן של מוטציות מתקבלות תכונות חדשות גם כתוצאה של צירופי גנים שונים (אקראיים אף הם).
	תדירות השינויים גבוהה: שינויים נוצרו כמעט בכל העברה (כל דור).	תדירות המוטציות נמוכה יותר.
	השינויים שנוצרו הם שינויים חיצוניים.	נוצרים שינויים גם במבנה האיברים הפנימיים, בהתנהגות ובתהליכים ביוכימיים.
דמיון	השינויים מצטברים מהעברה להעברה.	השינויים מצטברים מדור לדור.
	לשינויים שנוצרים אין כיווניות.	לשינויים שנוצרים (המוטציות וצירופי התכונות) אין כיווניות.
	ככל שהצירור רחוק מהמקור, הוא שונה ממנו, כי הצטברו בו יותר שינויים.	ככל שהצאצא רחוק מההורה הראשוני, הוא שונה ממנו יותר, כי הצטברו בו יותר שינויים.

10 אם השינוי מעלה את כשירות בעליו, שכיחותו באוכלוסייה עולה עם הדורות, והתכונה שהוא אחראי לה הופכת לחלק מתכונות כלל הפרטים באוכלוסייה. אותו מנגנון פועל גם לגבי כל השינויים הבאים.

11 כל תכונה שבקביעתה מעורבים גנים, נתונה להשפעתן של מוטציות אקראיות, ולכן שינויים בה יכולים להצטבר באותו אופן, כפי שראינו לגבי צורתו החיצונית של השטוחדג. תכונות אלה יכולות להשפיע על מאפיינים חיצוניים, התנהגותיים וביוכימיים.

הדוגמה הראשונה של ה"שטוחדג":



12 בדוגמאות שלהלן ינסו התלמידים לשחזר את התהליכים שהובילו להתאמה הנצפית כיום בין יצורים חיים לסביבתם. כל דוגמה מדגישה היבט שונה מעט של התהליכים. הדוגמה הראשונה (חיידקים הלופיליים) מדגימה מקרה שבו תנאי הסביבה משתנים בהדרגה והאוכלוסייה משתנה בהתאמה; השנייה (פרפר העלה המת) עוסקת במצב שבו הסביבה אינה משתנה במשך דורות רבים, וההתאמה של האוכלוסייה משתכללת בחלוף הדורות ומגיעה לרמת מורכבות גבוהה ביותר; הדוגמה השלישית (פרחים ומאביקיהם) מציגה תהליכי ברירה הפועלים במקביל על יצורים שיש ביניהם יחסי גומלין.

הרחבה

13 לחלבוניים יש טווח פעילות אופטימלי של טמפרטורה, pH וריכוז מלחים. מסיבה זו רוב היצורים אינם יכולים לחיות בתנאים קיצוניים. כך, למשל, החלבוניים של רוב היצורים מתפרקים (עוברים דנטורציה) כבר ב-50 מעלות צלזיוס. קיימים חיידקים "אוהבי קור", למשל, *Polaromonas vacuolata*, שהטמפרטורה האופטימלית עבורם היא 4 מעלות צלזיוס. לא זו בלבד שהם יכולים להתקיים בקור, אלא ש ב-12 מעלות צלזיוס התרבותם נפסקת. לשם השוואה נזכיר כי הטמפרטורה במקרר הביתי נעה בין 4 ל-8 מעלות צלזיוס. הטמפרטורה האופטימלית להתרבותם של חיידקים "אוהבי חום" (תרמופיליים) מסוג *Pyrolobus fumarii* היא 105 מעלות צלזיוס. התרבותם נפסקת מתחת ל-90 מעלות.

14 סביר להניח כי בעבר הרחוק, כאשר ים המלח היה מלוח פחות, קבוצת החיידקים שאכלסה אותו הייתה עמידה לריכוזי המלח ששררו בו אז. בעקבות מוטציות אקראיות שאירעו מפעם לפעם, הופיעו תכונות חדשות באוכלוסייה. כך, למשל, הופיעו חיידקים שהיו רגישים לריכוז המלח ששרר באותו הזמן וכן חיידקים שהיו עמידים אפילו לריכוזי מלח גבוהים יותר. בכל דור, החיידקים שהיו מותאמים לתנאים ששררו באותו הזמן, התרבו בקצב המהיר ביותר והם אלה שנבררו. ככל שעלה ריכוז המלח, הופעל על האוכלוסייה לחץ ברירה לטובת חיידקים עמידים לריכוזי מלח גבוהים יותר ויותר.

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.

1 פרפרים הדומים לעלים יבשים מוסווים היטב ביערות בהם הם חיים. לכן, הם מוגנים, יחסית, מפני טורפים. באזורים פתוחים אין כמובן יתרון לדמיון זה.

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.

54

9 מטרתה של הדוגמה היא להראות שהתאמה כה משוכללת יכולה להתקבל כתוצאה מתהליך רב-שלבי. סביר להניח שההסוואה המורכבת של פרפרי העלה המת לא נוצרה בבת אחת. היא הלכה והשתכללה במהלך הדורות כתוצאה מתהליכי ברירה טבעית, שפעלו הן על תכונות ותיקות והן על תכונות חדשות, שהופיעו מדי פעם באוכלוסייה.

יתכן שבעבר הרחוק לא היו פרטים שהדמיון בינם לבין העלים המתים היה מדהים, כפי שהוא קיים אצל הפרטים כיום. בעבר היו פרטים שהיו דומים לעלים מתים רק באופן חלקי, אך גם דמיון חלקי זה הקנה להם יתרון על פני פרטים שהיה להם פחות דמיון לעלים מתים. בכל פעם שהופיע באוכלוסייה פרט שהיה דומה אפילו מעט יותר לעלה מת (כתוצאה ממנגנונים שכבר הכרנו – מוטציות ורבייה זוויגית), הוא היה כשיר יותר ולכן העמיד יותר צאצאים, שגם הם היו דומים מעט יותר לעלים מתים.

הזכירו לתלמידים, שהתכונות החדשות המופיעות באוכלוסייה הן אקראיות ואינן כוללות רק את אלה המשפרות את הדמיון לעלים המתים.

3 בכל דור ירדה שכיחות הפרטים המוסווים פחות ועלתה שכיחותם של המוסווים טוב יותר. משום כך במהלך הדורות הרבים הפכה האוכלוסייה להמוגנית יותר ויותר ביחס לתכונה זו.

4 דוגמאות אפשריות יכולות להיות: הידמות (mimicry), התפתחות מערכות העיכול, הנשימה ועוד.



שבילי הצוף של הפשתה
"מכונים" 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 הדוגמאות הקודמות עסקו בהתאמות של אוכלוסיות של יצורים חיים לסביבה שהשתנתה אך אינן מדגישות קיומם של יצורים אחרים בסביבה. בדוגמה שלפנינו אוכלוסיית הפרחים ואוכלוסיית המאביקים, עוברות התאמה זו לזו. החרקים הם חלק מהסביבה המשתנה של הפרחים, והפרחים הם חלק מהסביבה המשתנה של החרקים. המושג "סביבה" יכול לקבל צורות שונות וכולל הן גורמים א-ביוטיים והן גורמים ביוטיים. גוף האדם, למשל, מהווה סביבה לחיידקים ווירוסים.

1. במה שונה הדוגמה המתארת את ההתאמות במבנה בין פרחים למאביקים 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 למאביקים. רשמו בטבלה: אילו תכונות נבררו בכל אחת מהאוכלוסיות? האם יש לתכונה מסוימת באחת האוכלוסיות יתרון ללא התכונה המתאימה לה באוכלוסייה האחרת? הסבירו.

מאביקים	פרחים
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 המוטאמים) 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.

56

2 דוגמה זו מציגה תהליכי ברירה הפועלים במקביל על שתי אוכלוסיות – הן של המאביקים והן של הפרחים.

3

מאביקים	פרחים
צבע עז	היכולת לראות את הצבע
שבילי צוף	היכולת לראות את השבילים: רק חרקים שרואים בטווח העל-סגול, יבחינו בשבילים. (לפעמים כל הפרח הוא בצבע על-סגול, ורק השבילים אינם כאלה)
ריח עז	היכולת לחוש בריח
המבנה העמוק של הפרח	מבנה גפי הפה ("קשית" של הפרפר)

4 מובן שאי אפשר לשחזר את שלבי ההתפתחות כפי שהתרחשו, מאחר שהם מאופיינים במורכבות גדולה וכוללים, למשל, תחרות בין מינית ותחרות תוך מינית בקרב הפרפרים והפרחים. אין לנו, למשל, מידע על צורתם של הפרחים לפני הופעת הפרפרים בזירה האבולוציונית. מטרת התרגיל היא לעודד את התלמידים להשתמש בעקרונות הברירה הטבעית כדי לנסות להסביר גם תהליכים מורכבים מאוד.

5 כאשר מבנה הפרח ומבנה החרק מותאמים זה לזה, נוצרת ביניהם מעין "נאמנות" המתבטאת בכך, שהחרק אוסף את מזונו רק מתוך הפרח המתאים לו, ואילו הפרח מואבק על ידי החרק הזה בלבד. התאמה כזו עשויה ליצור תלות קיומית. לכן, אם תיעלם פתאום אוכלוסיית הפרחים המסוימים האלה, יש סכירות גבוהה שאוכלוסיית החרקים תיעלם איתה. אשר לפרחים העמוקים ולפרפרים בעלי גפי הפה הארוכים, היעלמותם של הפרחים תותיר את הפרפרים עם פרחים שאינם עמוקים, שאותם לא יוכלו להאבק. גם ההיפך הוא נכון: אם הפרפרים ייעלמו, יש סכנה גדולה לאוכלוסיית הפרחים שהאבקתם תלויה בפרפרים אלה, משום שייתכן שלא קיימים חרקים אחרים שיכולים לחדור לעומק הפרח, למקום הצוף והאבקנים. (הדבר דומה למשל השועל והחסידה. החסידה לא היתה יכולה לשתות מהקערה השטוחה שהציע לה השועל, והשועל לא היה יכול לשתות מהקערה העמוקה שהציעה לו החסידה).

6 תהליכי קו-אבולוציה מאפיינים אוכלוסיות המקיימות ביניהן יחסי גומלין. אוכלוסיות של טורפים ונטרפים עוברות קו-אבולוציה ובעקבותיה נעשות מותאמות זו לזו: למשל, באוכלוסייה של איילים שחיה בנוכחות ברדלסים יתקיים לחץ ברירה לטובת פרטים מהירים יותר. במקביל, יהיה גם לחץ ברירה לטובת ברדלסים מהירים יותר, חדי עין יותר וכו'. גם ביחסי סימביזה וביחסי טפילות מתרחשת קו-אבולוציה. למשל, הטפיל מותאם לפונדקאי שלו, והפונדקאי מותאם להתמודדות עם תכונות הטפיל כמו במקרים של וירוסים וגוף האדם.



פרח מואבק על ידי פרפר. דוגמה נוספת לקו-אבולוציה.



שועל ארקטי (Alopex lagopus) בחורף ובקיץ

1 הסוואה.

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)	
א	ה	מי עובר את ההתאמה – אוכלוסיות או פרטים
ה	ה	מה משתנה בתהליך?
ה	ה	הרכב האוכלוסייה – השכיחות היחסית של הפרטים הכשירים יותר עולה
ה	ה	באילו טווחי זמן מדובר?
ה	ה	האם ה-DNA משתנה?

א אוכלוסיות.

ה פרטים.

ה הפרטים משתנים.

ה תהליך רב-דורי.

ה מהלך חיי הפרט.

ה כן.

ה לא.

תלמידים חושבים ש...

57

בקרב תלמידים רבים קיים בלבול בין התאמה אבולוציונית של אוכלוסיות (למשל, התארכות צוואר הג'ירפה) לבין התאמה פיזיולוגית או התנהגותית של פרטים (למשל, פרוות קיץ וחורף אצל השועל). יש המשתמשים במונח "התאמה" לציון התאמה אבולוציונית לעומת המונח "הסתגלות" לציון התאמה פיזיולוגית או התנהגותית. אנו בחרנו שלא להשתמש במונחים אלה כיוון שמונחים אלה נרדפים ומשמשים בשפת היום-יום לתיאור אותם התהליכים. הבחנה ביניהם אינה טבעית ולכן מקבעת, לדעתנו, את הבלבול. במקומן בחרנו לומר מפורשות התאמה אבולוציונית לעומת התאמה פיזיולוגית או התנהגותית (על פי הקורס 'אבולוציה', האוניברסיטה הפתוחה מאת חוה יבלונקה).

התאמה אבולוציונית והתאמה פיזיולוגית או התנהגותית מתארות תופעות שונות לחלוטין זו מזו:

1. **התאמה אבולוציונית** (adaptation) מתייחסת לתכונות שהן תוצר של תהליך רב-דורי של ברירה טבעית. דוגמאות להתאמות אבולוציוניות הן: צוואר הג'ירפה, קרומי שחייה ביצורים הנעים במים, צבעי אזהרה והסוואה בבעלי חיים, הזנב המקושט של הטווס הזכר ורקמות אגרות מים בצמחי מדבר.
2. **התאמה פיזיולוגית/התנהגותית** (phenotypic plasticity) מתייחסת לתכונות שמשתנות בטווח חיי הפרט בתגובה לשינוי בתנאי הסביבה באופן צפוי. דוגמאות להתאמות פיזיולוגיות/התנהגותיות: שינוי צבע הזיקית, עלייה במספר תאי הדם האדומים בגבהים, החלפת עלוות קיץ בעלוות חורף אצל צמחים מסוימים, שינוי בצבע ובסמיכות הפרווה בעונות השונות. יכולת ההתאמה הפיזיולוגית/התנהגותית מוגבלת לטווח מסוים. הזיקית, למשל, משנה את צבעה מחום לירוק בהתאם למצע שעליו היא נמצאת, אך היא לא תוכל לשנות את צבעה לאדום, גם אם תמצא בשדה של פרחים אדומים.

4 היכולת לשנות את צבע הפרווה היא תכונה שנבררה בתהליך הברירה הטבעית. אפשר לשער, שבעבר הרחוק שועלים ארקטיים היו בעלי צבע פרווה קבוע. כאשר הופיע באוכלוסייה פרט שצבע פרוותו השתנה בהתאם לעונה, הוא היה מוסווה יותר משאר הפרטים בכל העונות, ולכן היה כשיר יותר. במהלך הדורות עלתה באוכלוסייה שכיחות הפרטים שצבע פרוותם משתנה בהתאם לעונה, עד שכיום כל הפרטים של השועל הארקטי הם בעלי יכולת זו.

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. שער, 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, נקבע 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 "יאצ'י", 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 הקובייה 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 בקובייה השנייה הוא $1/6 \times 1/6$. 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: $1/6 \times 1/6 \times 1/6 \times 1/6 \times 1/6$. סיכוי זה שווה ל- $1/6^5$, שהוא $1/7776$ (התוצאה המבוקשת אמורה להתקבל בהטלה אחת מתוך 7776 הטלות). זהו סיכוי קטן לכל הדעות.

58

6 החוקרות יכולות לקחת פרטים כהים ובהירים מאזור השרפה ולאפשר להם להתרבות במעבדה. אם הפרטים הכהים התקבלו כתוצאה של תהליך הברירה הטבעית, גם צאצאיהם יהיו כהים, וצאצאי הבהירים יהיו בהירים. לעומת זאת, אם מדובר בהתאמה פיזיולוגית, כלומר, בהשתנות של הפרטים בתגובה לשרפה, לא נצפה שיהיה הבדל בין צבע הצאצאים של הפרטים הכהים וזה של הבהירים. תלמידים יכולים להציע גם שהחוקרות יניחו פרטים כהים על גבי סלעים בהירים ויצפו בהם על מנת לבחון אם תהיה השתנות בצבע.

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 המשווער 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 צפויה לתת את המספר החסר).

1c

ומה הקשר ל"מציאות"?

בדוגמה זו קבלת הרצף על כל הקוביות דומה להופעת מבנה מסודר, לא שגרתי, "יחודי 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, שבין 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 שצינו 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 $1/28^{21}$. $1/28^{21} = 1/(28 \times 28 \times 28 \times \dots \times 28)$. סיכוי כזה הוא קלוש ביותר: הוא בערך אחד מתוך ארבעים מיליון, מיליון, מיליון, מיליון (1:40,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000). אך אם בכל הקשה האותיות ה"נכונות" יקובעו במקום ויהיו 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 המדמיה 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,

59

1c

אפשרות נוספת להציג את הפוטנציאל של שינויים קטנים ומצטברים: הסיכוי שאחת או יותר מחמש הקוביות תיפול "נכון" הוא המשלים לסיכוי שכולן תיפולנה "לא נכון". עבור כל קובייה הסיכוי ליפול "לא נכון" הוא $5/6$. הסיכוי שכל הקוביות תיפולנה "לא נכון" הוא, לכן, כ- $40\% = (5/6)^5$. כלומר, הסיכוי לקבל לפחות קובייה אחת במצב הרצוי, "הנכון" הוא כ- 60% . זהו סיכוי מאוד מרשים. באופן דומה, לאחר קיבוע קובייה אחת הסיכוי של עוד קובייה אחת כלשהי ליפול "נכון" הוא כ- 52% , השלישית 43% והרביעית 31% . רק החמישית, האחרונה, מחזירה אותנו לסיכוי המוכר – $17\% = (1/6)$. חישובים אלה מדגימים את הסיכוי הגדול לקבל שינוי גדול אם מסתמכים על הצטברות הדרגתית של שינויים קטנים.

הרחבה

ריצ'ארד דוקינס מבדיל בין ברירה הצטברותית (שבה כל שיפור, ולו גם זעום, משמש בסיס לבנייה בעתיד) לבין ברירה בשלב יחיד (שבה שינויים גדולים קורים בבת אחת).

את הרעיון מדגים דוקינס על מולקולת ההמוגלובין. מולקולה זו בנויה מארבע שרשראות. אחת השרשראות בנויה מ-146 חומצות אמינו. מספר הדרכים לסדר את 20 חומצות האמינו המצויות בטבע בשרשראות של

146 חוליות הוא גדול ביותר, ליתר דיוק 20^{146} , שהוא מספר בעל 190 אפסים.

הסיכוי ששינוי יחיד יצר את מולקולת ההמוגלובין הוא, אם כן, קלוש. קל יותר להבין את היווצרות המולקולה המורכבת הזו בעזרת הרעיון של הברירה ההצטברותית, לפיו שינויים קטנים הצטברו לאורך דורות רבים.

הדבר נכון גם לגבי תכונות מורכבות אחרות כמו צוואר הג'ירפה, חדק הפיל או העין המורכבת.

לגבי התפתחות העין, האם נכון לחשוב שייטכנו רק שני מצבים: מצב שבו אין כל יכולת ראייה, ומצב שבו יש ראייה מושלמת? האם עין שאחד מחלקיה אינו פועל כהלכה, אינה מתפקדת כלל? נראה שלא. נראה שהעין המורכבת היא תוצאה של התפתחות ממושכת והצטברות של שינויים.

אפשר לדמיין הרבה מאוד מצבי ביניים שבהם עין פשוטה השתכללה בהדרגה לאיבר מורכב יותר, בדומה להשתכללות ההסוואה של פרפר העלה המת. העין הראשונית הייתה בעלת יכולות מוגבלות מאוד, אבל היצור שזכה בעין הזאת,

שיפר לאין ערוך את סיכויו לשרוד. בין עיוורון מוחלט לבין ראייה מטושטשת יש הבדל עצום! בהמשך, בתהליך אבולוציוני ממושך של שיפורים הדרגתיים, תוך ברירת הפרטים שזכו בראייה טובה מעט יותר משל הפרטים האחרים, נוצרה העין המורכבת של היצורים בני זמננו.

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.

- לוו 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 25–30 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 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?

60

בשאלה זו אנו מצפים מהתלמידים לחבר את הרעיון של הצטברות של שינויים עם אקראיות השינויים (המוטציות). הסיכוי לכן קלוש ביותר. מוטציות הן אקראיות ולכן הסיכוי שיתרחשו אותן מוטציות בדיוק (ויצטברו באותו הסדר) קטן מאוד. במקרה של הג'ירפה, ייתכן שכנסיכות אחרות היו דווקא רגילה מתארכות או שהיא הייתה נכחדת. במקרה של הפרפר, ייתכן שהייתה מתפתחת אוכלוסייה בעלת צבע הסוואה מתאים ללא שאר קווי הדמיון לעלים או אוכלוסייה שבה הפרטים הם פעילי לילה.

מאחר שמקור השונות הוא במוטציות המתרחשות בתאי המין ובצירופים גנטיים חדשים הנובעים מתהליך הרכייה הזוויגית, נכון יותר למדוד תהליכים אבולוציוניים בדורות.

רק פרק זמן ארוך ביותר יכול היה לאפשר את הצטברותם של שינויים אקראיים עד ליצירתם של המבנים המורכבים שאנו רואים כיום, בעיקר בקרב יצורים רב תאיים שמשך הדור שלהם ארוך. 5000 שנה הן זמן קצר מדי (עבור אדם שמשך הדור שלו הוא 25 שנה או אפילו עבור פרושים שמשך הדור שלהם הוא שנה).

החיים הראשונים נוצרו מאוחר מאוד יחסית, לאחר ביליון שנה בערך.

כיצד קבעו את גילו של כדור הארץ?

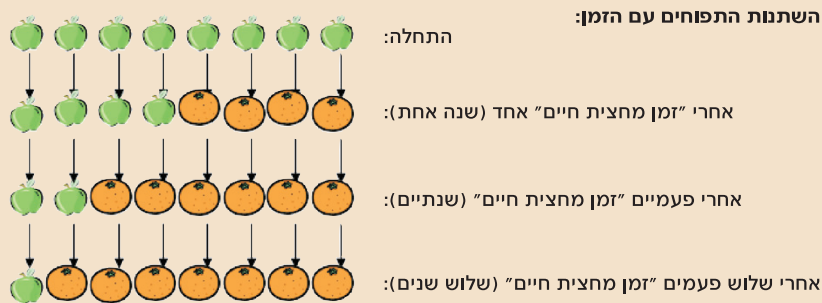
גיל כדור הארץ נקבע על ידי מדענים, שבדקו סלעים משלושה מקורות: סלעים שנלקחו ממקומות שונים על פני כדור הארץ, סלעים שהובאו לכאן מהירח ומטאוריטים שנחתו כאן מהחלל. המשותף לסלעים משלושת המקורות הוא היותם שייכים למערכת השמש ומכאן שהם נוצרו באותו הזמן.

כדי לדעת את גילו של סלע או של עצם דומה 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 סלע ובו שמונה תפוחים ותפוזים. אתם יודעים שכל התפוזים שבסלע מקורם בתפוחים, ואתם מעוניינים למדוד כמה זמן עבר מזמן שהסלע הכיל רק תפוחים. כיצד תחשבו זאת?

ראשית, יש לספור את מספר התפוחים ואת מספר התפוזים בסלע. 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 בסלע 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 הסלע רק תפוחים ועד למצב שבו הוא מכיל שני תפוחים ושישה תפוזים עברו שנתיים. אתם יכולים להיעזר באיור שלפניכם:



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"**.

מוכן שספירה לא מדויקת עלולה לשבש את התיארוך, אך כשיש בידינו שמונה מאות תפוחים שמשתינים ולא רק שמונה, אפשר להיות בטוחים יותר בתוצאות. במקרה של איזוטופים, מדובר בהתפרקות של מיליוני אטומים ולכן המדידה וקביעת הזמן שעבר מתחילת הפירוק מדויקת יותר.

המידע המובא בחלק הבא של הפרק מביא בחשבון ידע מוקדם בנושא מבנה האטום והאיזוטופים.

ומה קורה ב"עולם האמיתי"?

חומרים מסוימים בטבע הם חומרים בלתי יציבים. כזה הוא, למשל, האיזוטופ אורניום²³⁵ (^{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 באורניום²³⁴, אורניום²³⁵ ואורניום²³⁸. 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 הציווית שראינו קודם לכן, התפוחים הם האיזוטופים הרדיואקטיביים, והתפוזים הם אטומי הבת שלהם. האיזוטופ הרדיואקטיבי אורניום²³⁵ 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 אורניום²³⁵, למשל, הוא 710 מיליון שנה, ופירושן 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 זמן 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 אורניום²³⁵ (שזמן מחצית החיים שלו הוא 710 מיליון שנה) או אורניום²³⁸ (שזמן מחצית החיים שלו הוא 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 פחמן¹⁴ (שזמן מחצית החיים שלו הוא "רק" 5570 שנה).



כיצד עובדת השיטה לקביעת גילם של מאובנים צעירים?

האיזוטופ שהמדענים משתמשים בו לצורך זה הוא פחמן¹⁴. 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 פחמן¹², שהוא איזוטופ יציב, אך באוויר יש גם כמות מסוימת של פחמן¹⁴, שהוא איזוטופ רדיואקטיבי המתפרק והופך לחנקן. חנקן הוא כידוע גז שנפלט לאטמוספירה.

כל זמן שהיצור חי, קיים בגופו יחס קבוע בין כמות הפחמן¹⁴ לבין כמות הפחמן¹² (אותו יחס המצוי באופן קבוע באוויר). משום כך, מדידת כמות הפחמן¹⁴ בגופו של היצור מצביעה גם על כמות הפחמן¹² שבו. אלא שמהרגע שהיצור מת, נפסקת קליטת פחמן חדש, בעוד שהאיזוטופ פחמן¹⁴ ממשיך להתפרק לחנקן ולהיעלם לאוויר. מכאן, שההבדל בין כמות הפחמן¹⁴ המצויה במאובן כיום לבין מה שהיה בו ברגע מותו, נובע מפחמן¹⁴ שהתפרק והפך לחנקן. את כמות הפחמן¹⁴ שהייתה במאובן ברגע מותו, אפשר לדעת על ידי מדידת כמות הפחמן¹² המצויה בו כיום (שלא השתנתה מרגע מותו), וכך, ביודענו שזמן מחצית החיים של פחמן¹⁴ 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 הפחמן¹⁴ 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.¹⁴

● 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?¹⁵

14

הסלעים העתיקים ביותר שתוארו על פני היבשה (3.9 ביליון שנה) נמצאו בקנדה ובגרנילנד, והם נדירים ביותר. הערכת גילו של כדור הארץ התקבלה מסלעים שהוצאו ממעמקי הים, שתיארוך בשיטה הרדיואקטיבית קבע שהנם בני 4.5 ביליון שנה.

15

לא, מפני שמדובר בהבדל בין שני סדרי גודל: גיל כדור הארץ הוא 4.5×10^9 והטעות האפשרית היא של 4×10^7 , כלומר של פחות מאחוז אחד.

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.

3 כן.

4 כן. מורכבות פירושה שינויים הולכים ומצטברים ותהליך זה חייב, לפי המנגנון שהציע דארווין, לארוך זמן רב ביותר.

5 לא, כי השינויים שנוצרים הם אקראיים, אין להם כיוון ומטרה מוגדרת מראש.

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, ששינויים 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.

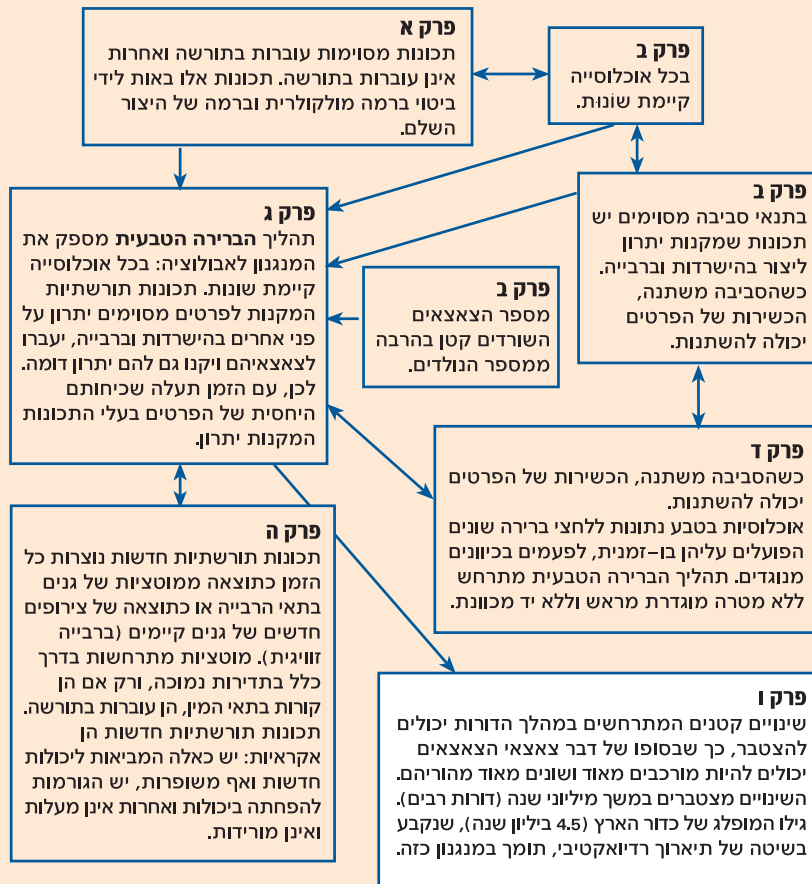
הברירה הטבעית יכולה להסביר תופעות רבות: שינוי בהרכב אוכלוסייה (כאשר מתרחש שינוי בתנאי הסביבה והאוכלוסייה אינה מותאמת) וגם חוסר שינוי (כאשר האוכלוסייה מותאמת והתנאים לא משתנים). תהליך ההתאמה מביא לירידה בשונות של אוכלוסיות וכן להתאמות המדהימות הקיימות בטבע בין יצורים חיים לסביבתם.

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.

שאלה נוספת מתוך השאלון המקדים:

יצורים רבים מותאמים היטב לסביבתם. למשל, החולד, יונק מסדרת המכרסמים, מותאם באופנים רבים לסביבה התת-קרקעית שהוא חי בה. לדוגמה, אף על פי ששיניו נשחקות באופן מתמיד מכיוון שהוא חופר בעזרתן מחילות, הן אינן קטנות, מאחר שהן צומחות באופן בלתי פוסק. לחולד אף ופה הפונים כלפי מטה באופן שלא חודרת אדמה למערכת הנשימה שלו תוך כדי חפירה. שערות גופו אינן מוטות לאחור, כמו אצל מרבית היונקים, אלא ניתנות להטיה לכל כיוון. הדבר מאפשר לו לנוע גם לאחור בתוך המחילה הצרה מבלי להיתקע. מה הקשר בין ההתאמות של החולד למנגנון הברירה הטבעית?

מפת למידה:



מונחים שנלמדו בפרק:

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



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 מצויים 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.

3

ייתכן שבעוד דורות רבים, אם תנאי הסביבה לא ישתנו, האווזים יהיו מותאמים יותר לסביבתם, וקרומיהם ייעלמו. ייתכן שמקרה זה של חוסר שלמות מעיד על אי-התאמה בין קצב השינוי המהיר יחסית של הסביבה (בעבר הסביבה שאוכלוסיית האווזים חיה בה הייתה משופעת במים) לבין קצב השתנות האוכלוסייה במהלך האבולוציה. עם זאת, אין ביטחון שהקרומים ייעלמו אי-פעם מאחר ואין ביטחון שאי פעם תיווצר מוטציה ללא קרומים. כלומר, אפשר שתמיד ההתאמה לא תהיה "מושלמת", מכיוון שהברירה פועלת על השונות הנצרת באוכלוסייה, ואין בה תכנון.

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 שמן 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? 

1c

גם במסגרת האילוצים, יש לאדם מטרה מוגדרת מראש – להכין שולחן. לעומת זאת, לאבולוציה אין מטרה סופית.

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

מהלך העבודה

במהלך ההדמיה חרוזים ייצגו את החרוזנים, 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 החרוזנים?
חשבו כך:
$$\frac{\text{מס' החרוזנים מצבע מסוים} \times 100}{\text{סך כל החרוזנים}}$$
3. רמיסת החרוזנים 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 החרוזנים 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 החרוזנים בדרך זו: הכפילו את מספר החרוזנים שנותרו על הבד בהתאם לצבעם. למשל, אם נותרו על הבד 7 חרזנים צהובים, הוסיפו 7 חרזנים צהובים חדשים.
6. אספו את כל החרוזנים 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:

68

במילים אחרות, השלב הקודם הוא פרה-אדפטציה לשלב הבא.

משערים שגם הנוצות בעופות הן דוגמה לפרה-אדפטציה: הן שימשו בתחילה לשמירת חום ורק אחר כך גם לתעופה.

התרגיל הבא הוא וריאציה של הדמיית החרוזנים ואף הוא נעשה בקבוצות. הוא ממחיש בצורה כמותית כיצד משתנה הרכב האוכלוסייה בעקבות סחיפה גנטית.

חומרים לכל קבוצה בת 2-4 תלמידים:

פיסת בד עם דגם פרחוני בגודל של כ-60X60 ס"מ (לכל הקבוצות אותו דגם בד, כדאי להשתמש בדגם עם פרחים קטנים).
20 חרוזים קטנים בצבע שיכלוט על הבד.
20 חרוזים קטנים בצבע שיוסווה היטב בבד.
חרוזים נוספים משני הצבעים (את החרוזים כדאי לשים במבחנות או במכלים לסרטי צילום).
סרט דביק (סלוטייפ).
סרט לכיסוי העיניים.
מחשבוני.

1 לאף צבע לא היה יתרון, כי הפרות אינן מבדילות בין החרזנים ורומסות כל מה שנקרה בדרך ללא קשר לצבעו.

2 על ציר ה-X יופיע מספר הדור, על ציר ה-Y יופיע אחוז השורדים. לגבי כל דור ישורטטו שתי עמודות - עמודה לכל אחד מצבעי החרזנים.

4 קבוצות מסוימות של תלמידים יגלו שההרכב השתנה בחלק מהדורות. אצל קבוצות אחרות יהיה שינוי בהרכב האוכלוסייה בכל הדורות. לפעמים יהיה בדור אחד שינוי בכיוון מסוים ובדור העוקב שינוי בכיוון ההפוך וכו'.

5 התהליך הוא אקראי לחלוטין! קבוצות שלא יראו שינוי בהרכב האוכלוסייה או שהשינוי לא יטה לכיוון מסוים לאורך הדורות יידעו, כנראה, לייחס את התוצאות לאקראיות התהליך. קבוצות שיקבלו, במקרה, שינוי כיווני לאורך שלושת הדורות, יתקשו יותר בהסבר.

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

עיבוד התוצאות

1. לאילו פרטים באוכלוסיית החרזנים היה יתרון בסביבה? מדוע?
2. שרטטו גרף עמודות שייצג 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 הבחירה 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.

69

6 סביר שכל קבוצה תקבל גרף שונה, בגלל האקראיות של תהליך הרמיסה, ולכן גם הקבוצות שקיבלו, במקרה, שינוי כיווני לאורך שלושת הדורות, יידעו כעת לתת הסבר.

7 אי אפשר לדעת (אלא אם כן, במקרה, אחד הצבעים "נעלם" תוך שלושה דורות).

8 אף על פי שהתשובה האינטואיטיבית היא שמצב זה לא ייתכן, הרי הוא בהחלט ייתכן. התהליך הוא, כאמור, אקראי, ולכן יש סיכוי לכל אפשרות שהיא. הדבר דומה לשאלת הסיכוי ללידת עשר בנות ברציפות במשפחה: הוא נמוך, אך עדיין אפשרי וקורה.

10 הראו לתלמידים שקף שמציג את התוצאות של הדמיית החרזנים מפרק ג, שעסקה בבחירה הטבעית.

1 בהדמיית הציפורים הגרפים דומים יותר אלה לאלה, מכיוון שבתהליך הטריפה נבררו באופן עקבי הפרטים שהיו מוסווים יותר. לעומת זאת, בתהליך הרמיסה האקראי שרדו בכל דור פרטים מסוגים שונים באופן לא עקבי.

2 הציפורים היו טורפות בעיקר חרזנים בעלי הצבע הכולט, והפרות היו רומסות חרזנים ללא קשר לצבעם. הייתה מתקבלת, לכן, עלייה בשכיחות החרזנים המוסווים, אך יתכן שהייתה מתונה יותר. אפשר לבקש מהתלמידים לנסות לדמיין את צורת הגרפים שהיו מתקבלים.

3 ההבדל החשוב הוא: במציאות תהליכים אקראיים ותהליכי ברירה מתרחשים במקביל. בהדמיית הפרדנו ביניהם לצורך הבהרת כל תהליך.

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 ישיפיעו 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 הרלבנטיות 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 האוכלוסייה לסביבה, בעוד שסחיפה גנטית אינה מובילה בהכרח להתאמה כזאת.

סחיפה גנטית חשובה במיוחד, כאשר האוכלוסיות קטנות. כאשר האוכלוסייה 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.

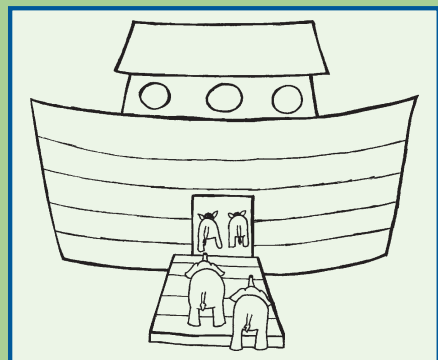
1c

סחיפה גנטית היא תהליך אקראי שאחראי לשינוי בשכיחות של תכונות (או של הגנים האחראיים לתכונות) באוכלוסייה.

הרחבה

ברבייה זוויגית סחיפה גנטית מתבטאת כבר בשלבים של יצירת תאי המין ובהפריה: לא כל האללים מיוצגים באופן שווה. בתוך תא המין שישתתף בהפריה מצוי סט מסוים של אללים שנבחרו באקראי. לאללים אלה אין בהכרח יתרון על פני אללים שלא נכללו בתא מין זה, ולכן זהו תהליך של סחיפה גנטית.

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 שנח פעל בלוח זמנים צפוף, סביר שאסף אל התיבה את הפרטים שהיה קל ופשוט ביותר לתפוס, אולי אפילו את האטיות או החלשים או את אלו שהזדמנו לאזור לגמרי במקרה. אוסף מקרי זה הוא שהיווה את הבסיס להרכב הקבוצות בדורות הבאים.



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

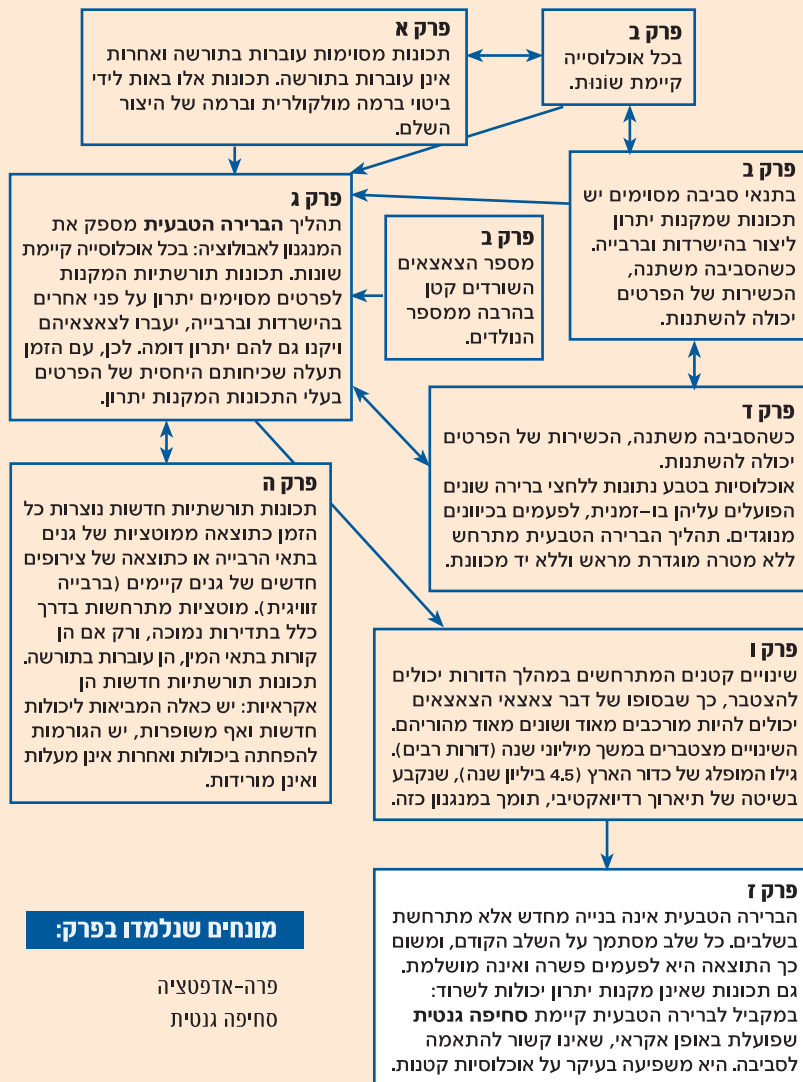
בפרק הקודם למדנו כי ברירה טבעית יכולה להביא להתאמות מופלאות בין אוכלוסיות של יצורים חיים לסביבתם. בפרק זה ראינו שלא כל היצורים מותאמים לסביבתם בצורה מושלמת מאחר שהברירה הטבעית פועלת מתוך אילוצים. ניתן אפילו לומר, שמרוב אילוצים ניתן למצוא אי-שלמויות בכל היצורים שסביבנו. תהליכי הברירה פועלים רק על התכונות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

5

ההבדל הגדול נעוץ בעובדה שהתהליכים שאנחנו עוסקים בהם קורים באוכלוסיות, ואילו הפרפר על עץ הסקוויה הוא פרט אחד על עץ אחד. הדמיון הוא ביחס הזמן בין חיי הפרפר לחיי העץ.

מפת למידה:



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.

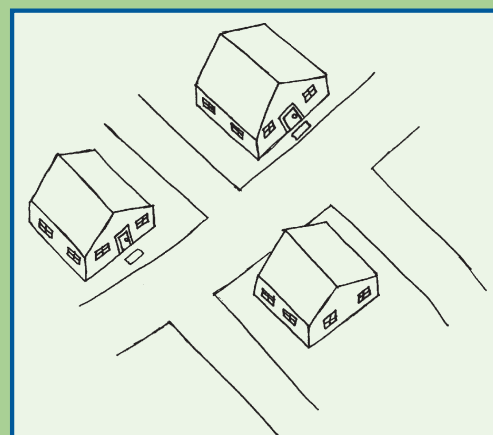
כ

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 ברין 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?

ז

במשך השנים נסללו בברין 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 ברין

74

כ

גם אם התלמידים ניסו להסביר בכתב את המגוון הגדול של מינים בטבע, כדאי לאפשר להם לבטא את רעיונותיהם גם בעל פה. מטרת הדיון בשלב זה אינה לתת את "התשובה הנכונה", אלא לחשוף את רעיונותיהם המוקדמים של התלמידים. לתלמידים רבים רעיונות אינטואיטיביים הקשורים להיווצרות המינים, שאינם עולים בקנה אחד עם התפיסות המקובלות על המדענים.

תלמידים חושבים ש...

במחקר שערכנו בקרב כ-300 תלמידי תיכון, בחרו תלמידים רבים בתשובה הנכונה על שאלה 1 בשאלון בעמ' 57 - שמגוון המינים אינו קבוע מאז ראשית החיים, וגם היום עדיין נוצרים מינים ונכחדים מינים. לעומת זאת, ההסבר של מרביתם ליצירת מינים היה שגוי. תפיסות התלמידים ביחס להיווצרות מינים מתוארות בטבלה הבאה:

הרעיון המדעי המקובל	רעיון שכיח אצל תלמידים	בעיה
הפעולה המתמשכת של תהליך הברירה הטבעית על תכונות חדשות ובתנאי סביבה שונים ומשתנים, מביאה להצטברות שינויים באוכלוסיות מבודדות מבחינה רבייתית עד כי הן עשויות להשתנות כך שפרטים מאוכלוסייה אחת לא יוכלו להעמיד צאצאים עם פרטים מאוכלוסייה שנייה. כך נוצרות אוכלוסיות של מינים חדשים. (מידת ההשפעה של האדם על יצירת מינים הנה זניחה ביחס למספר המינים הנוצרים באופן טבעי).	יצורים יכולים להיהפך למינים חדשים במהלך הזמן מתוך כוונה (השתדלות, צורך או רצון להיות מין חדש).	אין נוצר מין חדש?
	הסביבה גרמה להיווצרות מינים חדשים.	
	מינים חדשים נוצרים כתוצאה ממוטציות יחידות במינים קיימים.	
	האדם גורם ליצירת מינים חדשים.	
	מינים חדשים נוצרים כתוצאה של זיווג בין שני מינים קיימים.	

כ

בפרקים הקודמים עסקנו ברעיון ששינויים יכולים להצטבר באופן שצאצאים עשויים להיות שונים מאוד מאבותיהם. הדיון הבא עוסק ברעיון שהשינויים המצטברים עשויים להביא לכך שפרטים באוכלוסייה אחת יכולים להיות שונים מאוד מפרטים באוכלוסייה נפרדת (ולא רק מאבות אבותיהם).

ז

בשבעים שנה (משנות השלושים עד שנות האלפיים) התפתחו שלושים וחמישה דורות.

א

בשלב זה מצופה מהתלמידים שידעו כי בעקבות מוטציות ורכייה זוויגית ייתכן שהופיעו במהלך הדורות תכונות חדשות באוכלוסייה. לחצי הברירה באזור ברו בכל דור את המותאמים ביותר. משום כך צפוי שתכונות הפרטים באוכלוסייה כיום יהיו דומות אך לא זהות לתכונות הפרטים של אוכלוסיית המוצא.

א

המוטציות וצירופי הגנים הם אקראיים, ולכן הסיכוי שבשני צדי הכביש התרחשו אותן מוטציות הוא קלוש ביותר.

ב

יש להניח, שהתנאים משני צדי הכביש דומים, אך עם זאת יכולים להיות ביניהם הבדלים קלים הגורמים ללחצי ברירה לא זהים.

● 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 שלוש דורות)? הסבירו. א

● התייחסו לשתי אוכלוסיות של חלזונות החיות משני צדי הכביש:
א. האם, לדעתכם, אותן תכונות חדשות, שנוצרו במשך שלוש דורות כתוצאה ממוטציות ומצירופים חדשים של גנים, הופיעו באוכלוסיות משני צדי 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? ב

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.

75

ג

באוכלוסייה שבה הופיעה המוטציה, עלתה השכיחות היחסית של הפרטים בעלי תכונה זו במהלך הדורות. באוכלוסייה שחיה בצדו השני של הכביש, לא השתנתה השכיחות ביחס לתכונה זו, שכן פרטים משתי האוכלוסיות לא מתרבים ביניהם ואין ביניהם יחסי תחרות.

ד

בכל אוכלוסייה יכולות להופיע תכונות חדשות. משום כך בכל אוכלוסייה יכולים להצטבר שינויים בהשוואה לאוכלוסיית המוצא (כפי שכבר ראינו בפרקים הקודמים שעסקו בהצטברות של שינויים). כיוון שתכונות חדשות הן אקראיות, וייתכן גם שלחצי הברירה משני צדי הכביש אינם זהים, סביר להניח שבכל אוכלוסייה יצטברו שינויים שונים.

ה

פרטים השייכים לאותה אוכלוסייה מתרבים זה עם זה ומהווים לכן חלק מאותו מאגר גנים, ש"מתערבב" באופן מתמיד. נוסף על כך, כיוון שהם חיים באותה הסביבה, הם נתונים לאותם לחצי ברירה. משום כך קיים ביניהם דמיון ניכר. לעומת זאת, פרטים השייכים לאוכלוסיות שונות יותר זה מזה, כיוון שכל אוכלוסייה מהווה מאגר גנים נפרד, שמשנתה בעקבות מוטציות אקראיות ורכייה זוויגית השונים מאוכלוסייה לאוכלוסייה. נוסף על כך, כל אוכלוסייה נמצאת בתנאי סביבה שונים מעט ונתונה, לכן, ללחצי ברירה אחרים.

ו

השינויים יכולים להעיד על הצטברות אקראית, הדרגתית, של שינויים בכל אוכלוסייה בנפרד כתוצאה מרכייה זוויגית, ממוטציות ומלחצי ברירה שונים.

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 השטחודגים מפרק 1. 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.

76

עובדה זו חשובה לצורך ההסבר, שכן המקור המשותף מחייב להסיק, שההבדלים בין האוכלוסיות נוצרו אחרי המעבר לאזורים השונים באמריקה. לולא היה מקור אחד לכולם, היה אפשר לחשוב שכל אוכלוסייה נוצרה בנפרד.

הסבר קצר על פנילקטונוריה וטאי זקס מופיע במדריך למורה בפרק ה, עמ' 49.

השוני בפיזור המחלות נובע מהעובדה, שבכל אוכלוסייה התרחשו מוטציות אחרות. כיוון שהאוכלוסיות התקיימו בנפרד, לא התרחש ערבוב של הגנים, והמוטציות הצטברו בנפרד.

מכיוון שיהודים הקפידו להתחתן רק בינם לבין עצמם, הם יצרו בכל מקום שבו חיו אוכלוסייה בתוך אוכלוסייה. אף-על-פי שהיהודים והלא יהודים חיו באותה הסביבה, וערכוב גנים היה אפשרי ביניהם, האיסורים הדתיים והתרבותיים הפרידו בין היהודים ללא יהודים, באופן שמוטציות שהתרחשו בקרב יהודים, הצטברו בנפרד.

ליתר דיוק...

ייתכן שתלמידים יתהו, מדוע מוטציה "שליטת", כמו זו הגורמת למחלה (פנילקטונוריה או טאי זקס), הצטברה באוכלוסייה ולא נכחדה. זה איננו המקום לפרט את מנגנון התורשה של מחלות אלה לתלמידים שטרם למדו גנטיקה. נאמר רק, שהסיבה קשורה בעובדה, ששתי המחלות הן רצסיביות, ולנשאים של אלל רצסיבי (הטרוזיגוטים) אין חיסרון ביחס להומוזיגוטים.

לעתים מחסומים פיזיים ולעתים מחסומים דתיים ותרבותיים.

כל טור מייצג אוכלוסייה נפרדת, שהשינויים בה מצטברים בנפרד.

מטרת השאלה היא לחשוף את רעיונותיהם האינטואיטיביים של התלמידים לגבי השאלה, מהו מין ביולוגי ולחדד את החשיבות של מספר הדורות החולף בתהליך של הצטברות השינויים. תלמידים אמורים לדעת בשלב זה, שכלל שעוברים דורות רבים יותר, מצטברים בכל אוכלוסייה בנפרד שינויים רבים יותר, והאוכלוסיות נעשות שונות יותר ויותר זו מזו. יהיו תלמידים שיבינו כי בשלב מסוים ייתכן שהאוכלוסיות יהיו כה שונות עד שייחשבו למינים נפרדים. אחרים יכולים לטעון שמאחר שההבדלים בלחצי הברירה אינם גדולים, ושכיחות המוטציות קטנה, השינויים שיצטברו לא יהיו גדולים דיים כדי ליצור מינים חדשים. תלמידים אחרים לא יקשרו בהכרח בין הצטברות השינויים ליצירת מינים נפרדים.

שאלה זו מתמקדת במאפיין המקובל להגדרת מינים והוא – היכולת להתרבות עם פרטים אחרים. ייתכן שתלמידים יציעו שהשונות תהיה כה גדולה, עד כי פרטים משתי האוכלוסיות לא יוכלו להתרבות ביניהם. אפשר כמובן לשאול את אותן השאלות גם על דוררי הבית או על דוגמאות אחרות.

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 הזוויג 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 בברזיל. לשם כך הפגישו במעבדה בין חלזונות מאוכלוסיות החיות משני צדי הכביש. מתוצאות הניסוי הם הסיקו, שכל החלזונות בברזיל 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, למחסום 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?

א

כן, ולכן נקבע שהם בני אותו המין.

ב

במקרה זה לא חלפו די דורות מאז הופרדו האוכלוסיות כדי ששתי האוכלוסיות יצברו שינויים כה גדולים עד כדי אי יכולת להתרבות ביניהן. ייתכן שבעוד אלף דורות (אולי יותר, אולי פחות, ואולי כלל לא) האוכלוסיות הנפרדות יהפכו למינים נפרדים, שאינם יכולים להתרבות ביניהם.

ג

אי אפשר לענות בוודאות על שאלה כזאת. תשובות אפשריות: מדובר ביצורים שונים; ייתכן שלא עברו די דורות במקרה של החלזונות; ייתכן שקצב המוטציות היה שונה וכו'. למעשה, אי-אפשר לקבוע מראש אם ובאילו תנאים ישתנו אוכלוסיות עד כדי כך שיהפכו למינים נפרדים. כפי שכבר ראינו, השינויים הם אקראיים ואינם מובילים בהכרח לכיוון מסוים.

ד

תהליך של יצירת מינים בטבע צפוי להיות ממושך ביותר – מאות, אלפי ואף מיליוני שנה. במעבדה אפשר לבחור יצורים שמשך הדור שלהם קצר יחסית (במקרה של הזבובים מדובר בשבועיים לערך). כמו כן, במעבדה, בניגוד לטבע, אפשר לקבוע את התנאים באופן שיתאימו לשאלה הנשאלת. בניסוי זה, למשל, המדענים הפרידו בין האוכלוסיות הפרדה מוחלטת (מצב שלא תמיד קיים 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.



79

- 1 לא, סלמנדרות נמצאות רק בשרשרות ההרים ולא בעמק. ייתכן שהתיישבות האדם בעמק (מקומות יישוב ושטחים חקלאיים) משפיעה על הפיזור שלהן.
- 2 הדמיון הרב בגנים תומך בעובדה שלכל אוכלוסיות הסלמנדרות יש מוצא משותף. בניגוד לחוקרים של החלזונות, לא היה בידי חוקר הסלמנדרות מידע ודאי על אוכלוסיית המוצא, אך הדמיון אפשר להניח שזהו המצב גם אצל הסלמנדרות.
- 3 כפי שראינו, בכל אוכלוסייה המתקיימת בנפרד מצטברים שינויים האופייניים לה. למשל, יש סלמנדרות שהן בעלות צבע כהה ויש בעלות צבע בהיר יותר; יש שהן בעלות דגם מנוקד או מפוספס ויש - בעלות דגם חלק. החוקר אמנם עשה בדיקה כזו ומצא תכונות ייחודיות לאוכלוסיות שבתרשים.

4 אפשר לומר שקיים "סדר" בפיזור.

סלמנדרות החיות בצד המזרחי של שרשרת ההרים הן בעלות צבע כהה ודגם מנוקד או מפוספס; לסלמנדרות החיות בצד המערבי צבע בהיר יותר ודגם חלק.

5 כיוון שהאוכלוסיות חיות בנפרד, מצטברים בתוך כל אוכלוסייה שינויים קטנים ואקראיים כתוצאה מרבייה זוגית וממוטציות. אלה יוצרים את ההבדלים בין האוכלוסיות.

6 פרטים אלה הם תוצרי התרבות בין פרטים משתי אוכלוסיות סמוכות.

7 בני הכלאיים מעידים על כך שהאוכלוסיות שייכות לאותו המין, כיוון שהפרטים שלהן מתרבים אלה עם אלה.

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.

80

8 שתי האוכלוסיות מרוחקות זו מזו כמה מאות קילומטרים, וביניהן מפריד רכס הרים. מאחר שהסלמנדרות מוגבלות בשל נשימתן לתנועה למרחקים קצרים ממקוה מים אחד לאחר, סביר שפרטים רחוקים לא ייפגשו.

9 כן. בגלל השונות הגדולה ייתכן שהפרטים משתי האוכלוסיות אינם יכולים להתרבות אלה עם אלה ולהעמיד צאצאים.

10 כן, השונות הגדולה והעובדה שהפרטים בהן אינם מתרבים אלה עם אלה מציעים שמדובר בשני מינים נפרדים.

11 ככל שחולף מספר רב יותר של דורות מאז ששתי אוכלוסיות נפרדו, מצטברים יותר הבדלים בין אוכלוסיות והשונות ביניהן הולכת וגדלה.

השונות הגדולה בין האוכלוסיות הדרומיות יכולה להעיד, אם כן, שעבר זמן רב מאז ששתי אוכלוסיות אלה נפרדו. יתרה מזאת, נראה ששתי אוכלוסיות אלה נפרדו לפני זמן רב יחסית והשינויים שהצטברו בשתי האוכלוסיות בנפרד במהלך הדורות הובילו ליצירתם של שני מינים נפרדים שאינם יכולים להתרבות ביניהם.

12 בצפון, רחוק משתי האוכלוסיות הדרומיות. מיקום זה יכול להסביר את השונות הרבה ביותר שנמצאה בין האוכלוסיות הדרומיות שנפרדו זו מזו לפני משך הזמן הרב ביותר.

13 מאחר שהפרטים לא מתרבים ביניהם, ואין ביניהם ערוב גנים, יש להניח שהשונות ביניהם תלך ותגדל.

14 הכלאה במעבדה היא מניפולציה שיכולה להתגבר על המחסומים שיש בטבע. למשל, על מחסום התנהגותי (למשל, בטבע נקבות מאוכלוסייה אחת אינן מכירות את התנהגות החיזור של זכרים מהאוכלוסייה השנייה) מחסום בזמן הפעילות (בטבע אלה פעילים אחה"צ ואלה בבוקר, למשל) או מחסום אנטומי (למשל, בטבע אין רבייה מפני שאין התאמה בין איברי הרבייה). במעבדה אפשר לעשות אפילו הפריית מבחנה. היכולת לעשות הכלאה במעבדה אינה רלבנטית לקביעה אם אוכלוסיות נפרדות שייכות למין משותף. על פי ההגדרה, אם **בטבע** אוכלוסיות אינן מתרבות ביניהם, הרי שמדובר בשני מינים נפרדים.

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 גאוגרפי) ואף על פי כן הם אינם יכולים להתרבות ביניהם.

אם הפרטים שנמצאים באותו מקום גאוגרפי 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-מארכס, ואילו הדבורנית הנאה פורחת במארכס-אפריל. הבדל זה בזמני הפריחה מונע רבייה ביניהן.

אם הפרטים נמצאים באותו מקום גאוגרפי, 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 מזוהים 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).

מסלול כזה של התפצלות מעגלית של אוכלוסייה אחת, עד לנקודת המפגש של שתי אוכלוסיות שונות זו מזו, יוצר **מין טבעתי**. במסלול של יצירת מין טבעתי קיים לרוב רצף של שלבי ביניים בין כל שתי אוכלוסיות ייחודיות. בכל נקודה בטבעת, אפשר למצוא מין אחד בלבד, למעט הנקודה שבה נפגשים שני קצוות הטבעת.



מחסום התנהגותי נמצא, למשל, אצל פרושים באחד מאיי גלאפאגוס, שם נוצרו שני מינים: האחד בעל מקור גדול ושני בעל מקור קטן.

נשאלת השאלה, כיצד נוצרו מינים נפרדים של פרושים החולקים אותו אזור גאוגרפי? ההשערה היא שבמשך הזמן נוצר מחסום רבייה התנהגותי.

ייתכן שבשלב מסוים היה באזור מזון שהיה מורכב מגרגרים גדולים ומגרגרים קטנים, כך שנוצר לחץ ברירה לטובת בעלי המקורים הגדולים והקטנים (ולא הבינוניים). כיוון שנמצא קשר בין גודל המקור לבין הצלילים הבוקעים מגרונו של בעליו, נוצרו למעשה שתי קבוצות הנבדלות זו מזו בשירת החיזור. ההנחה היא שהיו נקבות שהעדיפו את שירתם של בעלי המקור הגדול בעוד שאחרות העדיפו דווקא את השירה של בעלי המקור הקטן. כך נוצרו שתי קבוצות שיש ביניהן מחסום רבייה התנהגותי ולכן הן אינן מתרבות זו עם זו בפועל. במהלך הדורות, צברה כל אוכלוסייה בנפרד שינויים, ואלה הובילו ליצירתם של שני מינים נפרדים שאינם יכולים להתרבות ביניהם.



שונות זו הייתה יכולה
להיווצר כתוצאה
מהצטברות אקראית
של שינויים בכל
אוכלוסייה בנפרד.
נוסף על כך, לחצי
הברירה על התכונה –
מספר הצאצאים,
יכולים להיות שונים
במקומות שונים.
מספר קטן מדי לא
ישרוד, אך מספר גדול
מדי יצריך השקעת
אנרגיה מיותרת.
בתנאי סביבה שונים
קיימים סיכויי
הישרדות שונים
לצאצאים (בגלל
נוכחות טורפים,
למשל).

כאשר משווים בין
אוכלוסיות נפרדות
של פרטים השייכים
לאותו המין, מוצאים,
שכל אוכלוסייה
מאופיינת על ידי
תכונות שונות.

שאלות לסיכום

1 אוכלוסיות של ציפורים (כמו בעלי חיים אחרים) יכולות להיבדל זו מזו במספר הצאצאים. ירגזים החיים בישראל מטיילים 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?

6 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?

82

3 על פי ההגדרה המקובלת כיום העז והיעל הם מינים נפרדים, על אף שהם יכולים להתרבות (וליצור את היעז), כיוון שהרבייה שלהם אינה נעשית בטבע. כך גם לגבי האפרסק והשזיף. ישנן דוגמאות נוספות בהם מתקיימת רבייה, אם כי עדיין מדובר, על פי ההגדרה, במינים נפרדים, למשל, סוסה וחמור שמעמידים פרדות ואשכולית ופומלה שיוצרות פומלית. בשתי הדוגמאות הללו הצאצאים אינם פוריים והמשמעות היא – שאין זרימת גנים חופשית שעוברת לדורות הבאים. מסיבה זו הסוס והחמור נחשבים לבני מינים שונים. כך גם האשכולית והפומלה.

4 א ב

הכביש לא יהווה מחסום לבעלי חיים מעופפים כמו ציפורים. קרוב לוודאי שהוא יהווה מחסום לבעלי חיים קטנים ואיטיים כמו צבים, ובמידה מסוימת גם לבעלי חיים אחרים כמו צבאים, שועלים ותנים. לכל אורך הכביש מתוכננים מעברים לבעלי חיים, והשאלה היא עד כמה הם יפצו על החלוקה של השטח.

ג

כן. בהקשר זה מעניין לדון עם התלמידים בסוגיה – האם העובדה שכביש יכול להוות מחסום גאוגרפי עבור מינים צריכה להוות שיקול בבנייתו.

5

ייתכן שהייתה פעם אוכלוסייה אחת שהתפצלה לשתי אוכלוסיות: פעילי יום ולילה. נוצרה הפרדה (מחסום בזמן) כיוון שהפרטים של שני המינים לא נפגשו. במהלך הדורות הצטברו בכל אוכלוסייה בנפרד שינויים, עד שנוצרו שני מינים.

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.

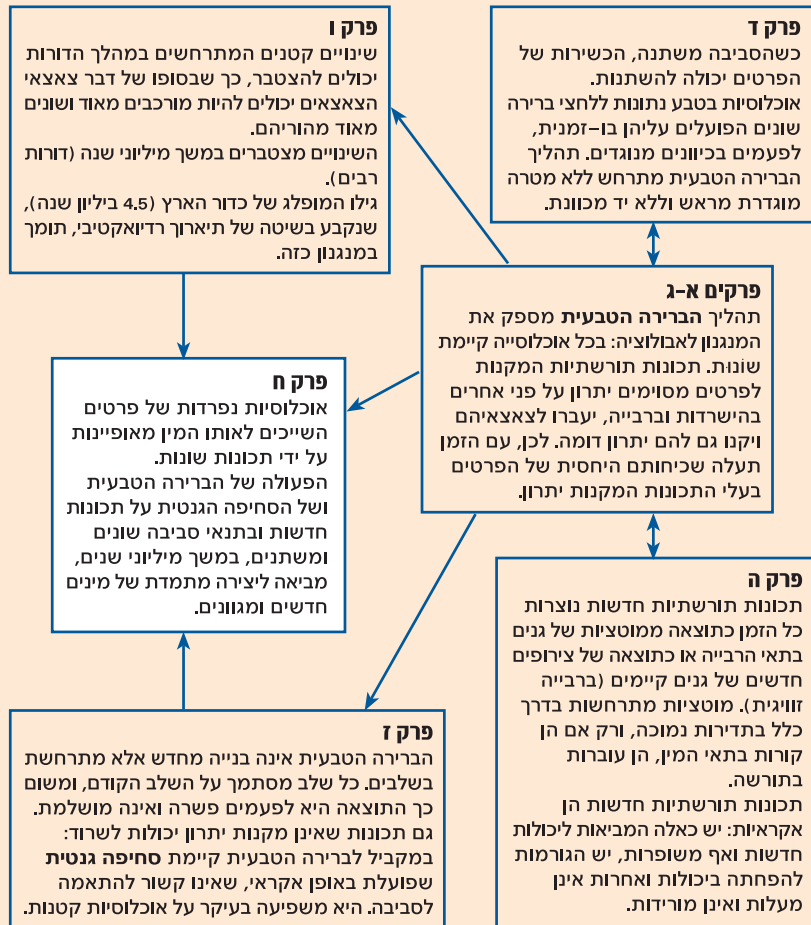
החלזונות בטקסס החלו לפני שבעים שנה כמין אחד. יתכן שבעוד דורות רבים, בעקבות הופעת תכונות חדשות ובעקבות תהליכים של ברירה טבעית ושל סחיפה גנטית, נמצא בטקסס מינים שונים של חלזונות, שמקורם באוכלוסייה אחת שהופרדה על ידי הכבישים. קרוב לוודאי שלא ניתן יהיה לזהות בדיוק את רגע הפיצול לשני מינים נפרדים. ייתכן שאם 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.

שאלה נוספת:

עם התמוטטותו של לוע הר געש בקמרון שבאפריקה נוצר אגם. כיום מוכרים בו תשעה מינים של דגי אמנון החיים במשותף. אף-על-פי שאין מחסום גיאוגרפי בין המינים, הם אינם מתרבים זה עם זה. ההבדל היחיד הנראה לעין ביניהם היא העובדה שחלק מהמינים ניזונים מגוף המים וחלק אחר מקרקעית האגם. ייתכן שההפרדה האקולוגית, שמקורה בהעדפה קלה של טמפרטורת הסביבה ושל מזון זמין, השפיעה על בחירת בני הזוג בין האוכלוסיות ובסופו של דבר הביאה לכידוד רבייתי וליצירה של מינים חדשים. נסו לשחזר את התהליכים שהביאו ליצירת תשעה מינים שונים של אמנונים באגם אחד.

במקור הייתה אוכלוסייה אחת של דגים. באוכלוסייה הייתה שונות תורשתית לגבי תכונות שונות, כגון: התאמה לטמפרטורת הסביבה, יכולת הזנה ועוד. בבתי גידול שונים באגם, היה יתרון לתכונות שונות, ולכן בכל בית גידול שרדו פרטים בעלי תכונות אחרות, ושכיחותם באותו בית גידול עלתה. כתוצאה מכך נוצרו אוכלוסיות שונות, וכל אוכלוסייה צברה שינויים אופייניים לה, עד שהצטברו השינויים הייתה משמעותית דיה כדי שפרטים מאוכלוסיות שונות לא יתרבו יותר ביניהם.

מפת למידה:



מונחים שנלמדו בפרק:

מין ביולוגי
מחסום רבייה



כיצד אפשר להסביר את הדמיון בין יצורים חיים?

פרק ט'

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



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.

85

תלמידים
חושבים ש...

במחקר שליווה את כתיבת ספר זה, ענו על השאלון שמופיע בתחילת פרק ו' יותר משלוש מאות תלמידי ביולוגיה (5 יח"ל) מכיתות י, י"א וי"ב.

כיצד מסבירים תלמידים דמיון בין יצורים?

רוב התלמידים טענו, שהדמיון העצום בין ה-DNA של האדם לזה של השימפנזה אינו מקרי. את הדמיון הם הסבירו כך:

- "האדם התפתח מהקוף בדרך של מוטציות בקוף" (תלמיד י"ב).
- "מוצאו של האדם מהקוף" (תלמידת י"ב).
- "האדם התפתח מהקוף. הקוף נשאר קוף והאדם התפתח" (תלמידת י"ב).
- "אם נחכה הרבה זמן, אז הקופים של היום יהפכו להיות אדם" (תלמיד י"ב).

תלמידים אלו חושבים, שהאדם התפתח מהשימפנזה או שהאדם הוא שלב מתקדם של השימפנזה, בניגוד לרעיון המדעי המקובל לפיו לאדם ולשימפנזה היה אב קדמון משותף. במילים אחרות, תלמידים אלו מדמיינים את התפתחות היצורים החיים כמעין "סולם", שבו שלבים מאוחרים יותר מחליפים שלבים מוקדמים.

א

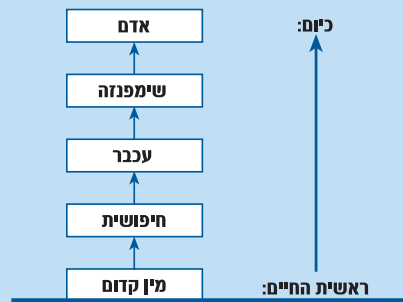
שימו לב שההבדל בין מודל ה"סולם" למודל ה"שיח" הוא בצורת התפתחות המינים מהאב הקדמון המשותף ולא בעצם קיומו של אב כזה.

ב

על מנת להקל על התלמידים אפשר להציע שינסחו משפטי תנאי שיתחילו בקשר למודל (אם המודל הזה הוא נכון...) ויסתיימו בתיאור התוצאה (אז, או: היינו מצפים ש...). מומלץ למלא את הטבלה בעמ' 90 יחד עם התלמידים (על גבי הלוח או בשקף). לגבי כל תופעה כדאי להנחות את התלמידים לבדוק איזה מודל מסביר את התופעה בצורה הטובה ביותר ואם התופעה סותרת את המודלים האחרים. לעיתים התשובה אינה חד-משמעית והמודל אינו תומך אך גם אינו סותר.

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 ה"שיח" היה אב קדום משותף אחד לכל היצורים. על פי "מודל הקבוצות" היה אב קדום משותף לכל קבוצה של יצורים קרובים. על פי המודל "מרוכה ההתחלות" אין אף אב קדום משותף ליצורים החיים: כל יצור התפתח בנפרד מאב קדום אחר. א

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. ב

88

הטבלה שלפניכם מסכמת את התפיסות הרווחות אצל תלמידים ביחס למודל האבולוציוני המתאר כיצד התפתחו היצורים על פני כדור הארץ.

בעיה	רעיון שכיח אצל תלמידים	הרעיון המדעי המקובל
כיצד התפתחו היצורים על פני כדור הארץ?	כל קבוצה של מינים קרובים שחיה כיום כמו יונקים, זוחלים או עופות, התפתחה ממין קדום אחר: היה אב קדום אחד לכל היונקים, שני לכל הזוחלים ושלישי לכל העופות (מודל הקבוצות).	התפתחות היצורים החיים דומה ל"שיח" לפיו מין קדום אחד היווה מוצא לכל המינים, וממנו התפצלו כל היצורים. במהלך האבולוציה נוצרים מינים ונכחדים מינים (מודל ה"שיח").
	התפתחות היצורים החיים דומה לשלבים בסולם, שבו מין קדום אחד היווה מוצא לכל המינים וכל מין חדש התפתח ממין שקדם לו. במהלך האבולוציה שלבים נמוכים הוחלפו בשלבים גבוהים. האדם נמצא בראש הסולם (מודל ה"סולם").	

גם הדמיון בין האברונים בתאים אנושיים לאברונים בתאים צמחיים אינו מקרי על פי מרבית התלמידים. דמיון זה מוסבר על ידם כך:

- "כל היצורים צריכים להתאים עצמם לאותם דברים כמו נשימת חמצן ושינויים בסביבה" (תלמיד י"א).
- "יש מנגנון מסוים שצריך לפעול כדי שיהיו חיים. האברונים האלו הם שמאפשרים חיים, ולכן נמצאים אצל כל היצורים החיים" (תלמידת י"ב).

- "ה-DNA עובד בצורה טובה, למה צריך משהו מסובך יותר?" (תלמידת כיתה י').

תלמידים אלו חושבים, שהאברונים הללו התפתחו באדם ובצמחים במקביל בגלל צרכים משותפים, שנובעים מתנאי סביבה דומים בכדור הארץ (כמו הצורך בנשימה בסביבה עשירה בחמצן, הצורך בהתאמה לשינויים במזג אוויר, הצורך בהתרכבות) או שזה המבנה היחיד האפשרי שיכול לתפקד בתנאים אלו. על פי תלמידים אלו דמיון אנלוגי (תפקוד או מבנה דומה למרות מוצא שונה) מסביר את הדמיון בין היצורים. (על ההבדל שבין דמיון אנלוגי לדמיון הומולוגי נעמוד בפרק הבא).

לאילו יצורים יש מוצא משותף לדעת התלמידים?

שאלה נוספת בשאלון המקדים עוסקת בשאלת ה"אב הקדום" המשותף לחיפושיות וליצורים אחרים. 95% מהתלמידים סברו כי יש אב קדום משותף בין מינים שונים של חיפושיות, 70% סברו שיש אב קדום משותף בין חיפושית ונמלה ו-43% טענו לאב קדום משותף בין חיפושית וחיידק. לעומת זאת רק 20% מהתלמידים סברו כי קיים אב קדום משותף לחיפושית וזאב ו-25% סברו שיש אב קדום לחיפושית ולאדם. לא נמצא הבדל מובהק בין התפיסות של תלמידי ביולוגיה (גם כאלה שלמדו כבר חלק מהנושאים בביולוגיה) לבין תפיסות של תלמידים ממסלולי התמחות אחרים.

איזה מודל משקף לדעת התלמידים את ההיסטוריה של היצורים החיים?

כ-29% מהתלמידים שהשתתפו במחקר בחרו במודל ה"שיח", המייצג את התפיסה המדעית המקובלת כיום. מרבית התלמידים (55%) בחרו במודל הקבוצות, 9% בחרו במודל ה"סולם" ורק 3% בחרו במודל מרובה ההתחלות (יתר התלמידים הציעו מודל משלהם).

מרבית התלמידים שבחרו במודל ה"שיח" התקשו לנמק את בחירתם:

- תלמידים מעטים בלבד נתנו הסבר מקיף כמו: "מקור כל החיים באב קדמון אחד, שעם הזמן התרחשו בו מוטציות, שגרמו להיווצרות מינים שונים. בין מינים מסוימים, כמו השימפנזה והאדם, יש יותר מן המשותף" (תלמידת י"ב).
- תלמידים אחרים נתנו הסברים חלקיים כמו: "כל צורות החיים נוצרו מחיידקים", או "בבסיס, במערכות הפנימיות, הכול אותו דבר, כלומר הכול התפתח מדבר בערך דומה" (תלמידי י"ב).

מבין התלמידים שבחרו ב"מודל הקבוצות":

תלמידים רבים ביססו את בחירתם על הדמיון בין מינים: "מכל סוג של חיה התפתחו זנים שונים. האבולוציה גרמה לכך שנוצרו זנים חדשים, אך על בסיס אב טיפוסים דומים, הגיוניים. עכבר לא יתפתח מחיפושית, כמו שעכבר לא יתפתח לאורך מיליון שנה לעכבר זהה" (תלמיד י"ב).

מבין התלמידים שבחרו במודל ה"סולם", יש תלמידים שבחרו בו בגלל שהוא מתאר כיוונית: "הסולם מתאר את ההתקדמות של האבולוציה בצורה מסודרת" (תלמיד כיתה י').

התלמידים שבחרו את המודל "מרובה ההתחלות", התבססו ברובם על אמונה דתית.

הטבלה שלפניכם מסכמת את התפיסות הרווחות אצל תלמידים ביחס להתפתחות המינים:

בעיה	רעיון שכיח אצל תלמידים	הרעיון המדעי המקובל
כיצד ניתן להסביר את הדמיון בין כל היצורים החיים?	רק המבנים הקיימים אפשריים לתפקוד בסביבת כדור הארץ. לכן הם התפתחו אצל כל היצורים החיים, במקביל. כל היצורים היו צריכים להתאים עצמם לאותה סביבת חיים ולכן פיתחו מבנים דומים.	מיליוני המינים החיים כיום על-פני כדור הארץ (וגם אלו שחיו בעבר) התפתחו מאב קדמון משותף ולכן יש ביניהם דמיון. (חלק מסוים של הדמיון בין יצורים אינו נובע ממוצא משותף - דמיון אנלוגי. מבנים אנלוגיים התפתחו באופן נפרד בקווים אבולוציוניים שונים).
כיצד ניתן להסביר את הדמיון הבולט בין האדם והשימפנזה? או כיצד נוצר האדם?	האדם התפתח מהקוף והוא שלב מתקדם שלו.	לאדם יש תכונות משותפות עם אורגניזמים אחרים ובכללם השימפנזה כיוון שהיה להם אב קדמון משותף. הדמיון בין האדם לשימפנזה גדול מזה שבין האדם ויצורים אחרים כיוון שהתפצלות שני המינים מהאב הקדמון קרתה מאוחר יחסית בסולם הזמן האבולוציוני.
לאילו יצורים יש אב קדמון משותף?	רק למינים קרובים למראית עין (כמו מינים שונים של חרקים ואף כל החרקים).	לכל המינים החיים כיום על-פני כדור הארץ וגם לאלה שכבר נכחדו.

- 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.

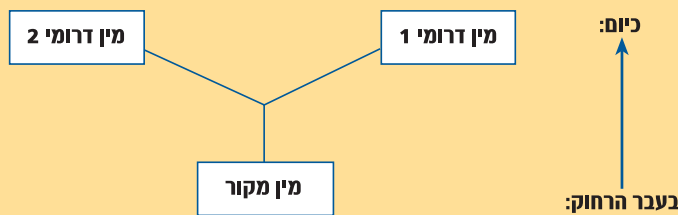
אחרים הסבירו את הדמיון כך: לחלק מהיצורים, או אפילו לכולם, היה "אב קדום" משותף. מאותו "אב קדום" משותף התפתחו יצורים רבים, ובמהלך האבולוציה שרדו חלק מהמבנים המשותפים והתפתחו חדשים. בפעילות הבאה נבחן הצעות שונות לתהליך ההתפתחות של יצורים על פני כדור הארץ מאז ראשית החיים. בעקבות הפעילות נחזור וננסה להסביר 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 יכלו 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 לדחות.

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

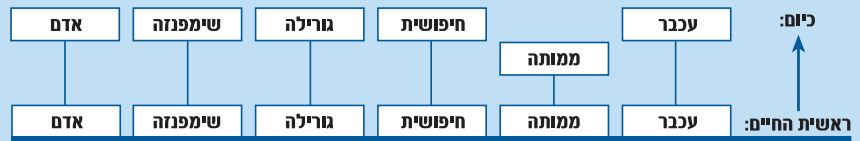
בשלב זה המטרה היא לשקף לתלמידים את הרעיונות שלהם, אך עדיין לא לומר להם את התשובה "הנכונה", אפשר לומר, למשל: "זאת

אומרת שמה שאתם אומרים זה שהדמיון בין יצורים שונים התפתח בגלל צרכים זהים?" או "אתם אומרים שרק מבנים אלו יכולים לתפקד בתנאי כדור הארץ ולכן נבררו". היעזרו בשאלות המנחות שלפניכם:

- ❓ בתגובה לתלמידים המציעים את התשובה שלפיה הצרכים המשותפים הם שמסבירים את הדמיון: לאילו צרכים משותפים אתם מתכוונים?
- ❓ אם אחד הצרכים שהוזכרו הוא הצורך בנשימה בעזרת חמצן: איך תסבירו את קיומם של יצורים הנושמים ללא עזרת חמצן (נשימה אנ-אירובית)?
- ❓ בתגובה לרעיון לפיו רק מבנים מסוימים אפשריים ולכן שורדים: האם, לדעתכם, אלו אכן המבנים היחידים ששרדו? האם תוכלו להציע דוגמאות אחרות או סותרות?
- ❓ שאלת שיקוף (בתגובה לרעיון שהתפתחות המבנים הדומים הייתה מקבילה): אז מה שאתם אומרים, למעשה, הוא שהאדם והצמחים התפתחו במקביל, ללא קשר התפתחותי ביניהם, והמבנים התפתחו להיות דומים בגלל הצרכים המשותפים?
- ❓ בתגובה לרעיון שהדמיון בין המינים נובע ממוצא משותף: האם אתם מציעים שמוצא משותף יכול להסביר את הדמיון בין כל היצורים החיים? האם אתם חושבים שהיה אב קדום משותף גם לחיפושית ולאדם? זאת אומרת שמה שאתם אומרים, שההסבר לדמיון בין שני מיני הסלמנדרות נכון גם לכל היצורים שחיים על פני כדור הארץ?

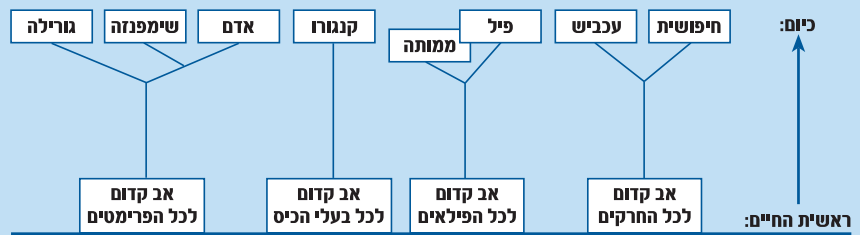
מודל מרובה התחלות

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.



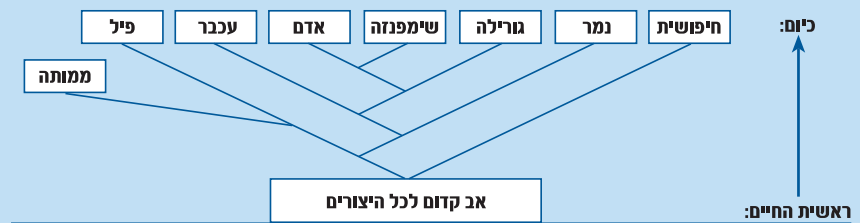
מודל הקבוצות

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.



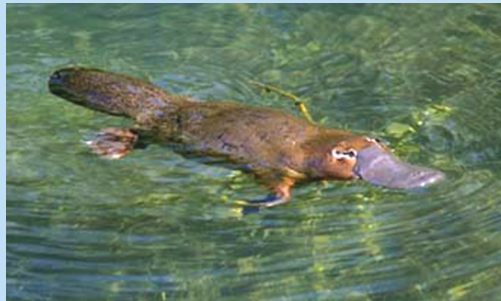
מודל ה"שיח"

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.



תלמידים עשויים להציע ש"מודל הקבוצות" יכול להסביר את הייחודיות בצורה הטובה ביותר, אך יש להדגיש בפניהם כי שאר המודלים אינם עומדים בסתירה. למשל, גם במודל "מרחבה ההתחלות" יתכן שנוצרו במקביל יצורים בעלי תכונות משותפות. מודל "הסולם" ומודל "השיח" מסבירים את הימצאותם של מאפיינים משותפים בקבוצות השונות בעובדה שיש להם מוצא משותף. (מודל השיח מסביר את הייחודיות של הקבוצות השונות בשינויים ייחודיים שחלו באב הקדמון המשותף לקבוצה (ורק לקבוצה). על פי מודל ה"סולם" תכונות שייחודיות לקבוצה מסיימת, מתחלפות על ידי הקבוצה שמתפתחת ממנה.)

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. לברוזון (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 בגוריהן נושמים אוויר חופשי בעזרת ריאות בדומה לזוחלים, לעופות וליונקים.



ברוזון



הידרה

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.

רעיון האב הקדמון המשותף לכל היצורים (מודל ה"שיח" ומודל ה"סולם") מסביר את הדמיון בין היצורים בצורה הטובה ביותר, בגלל שהוא מניח מוצא משותף **לכל** היצורים. עם זאת, תלמידים עשויים להציע, למשל, שהמבנים נוצרו בנפרד, באופן בלתי תלוי, ושהדמיון ביניהם אצל כל היצורים נובע מכך שרק המבנים המסוימים האלה התאימו לחיים ולכן שרדו. הסבר כזה תומך ב"מודל מרחבה ההתחלות" וב"מודל הקבוצות". אלא שהסבר זה הוא לאין שיעור פחות סביר, מפני שהוא טוען בעצם שדברים מורכבים ומסובכים כמו מבנה האברונים, מנגנון התורשה והמנגנון שמייצר חלבונים מהחומר התורשתי, התפתחו באופן בלתי תלוי מספר רב של פעמים. כיוון שמוטציות הן אקראיות, הסבירות שאותן המוטציות התרחשו שוב ושוב בכל קבוצה נמוכה להפליא. עם זאת, כדאי לומר שהדמיון אינו מהווה סתירה למודלים אלה ואינו מוכיח את אי נכונותם. הוא רק הרבה פחות סביר.

רעיון האב הקדמון המשותף לכל היצורים (מודל ה"שיח" ומודל ה"סולם") מסביר את ה"שלומיאליות" בטבע בכך שהביררה הטבעית פועלת על תכונות קיימות: מכיוון שליצורים יש מוצא משותף, הרי מבנים מסוימים שרדו פשוט כיוון שלא היה להם חיסרון. (ייתכן שתלמידים יטענו, שמודל ה"סולם" מסביר פחות טוב את ה"שלומיאליות" ממודל ה"שיח", כיוון שאם הוא נכון, היינו מצפים ששלבים מתקדמים יותר באבולוציה יהיו "דגמים משופרים" של השלבים הקודמים ושלא יהיו בעלי תכונות לא רצויות של השלבים הקודמים.) ה"שלומיאליות" בטבע אינה סותרת לחלוטין את מודל ה"קבוצות" ואת המודל "מרחבה ההתחלות" אך ההסבר על פי מודלים אלו בעייתי יותר. בקשו מהתלמידים להסביר את ה"שלומיאליות" על פי מודלים אלה על מנת שיראו את הבעייתיות (הם יכולים להציע, למשל, שגפיים היו בכל הקבוצות מההתחלה, אך בגלל תהליכי ברירה הן השתנו ואינן מתפקדות באופן שווה בכל הקבוצות).

באופן כללי, אפשר לדבר על שלוש רמות של דמיון בתכונות:

1. תכונות 'מועילות' או 'שימושיות' (כמו מנגנון התורשה). תכונות אלה אינן יכולות להוות ראייה למוצא משותף, מפני שאז יש חשד גדול לדמיון אנלוגי – התפתחות של איברים ממקור שונה כתוצאה מתנאים או מאילוצים דומים.
2. תכונות שאינן מועילות ואינן מזיקות (כמו עצם הזנב בבני אדם). תכונות אלה יכולות לרמז על מוצא משותף, שכן הן יכולות להיות "שיירים" ש"נסחבו" להווה מאבות קדמונים בעבר.
3. תכונות שהן 'מזיקות' בעליל (או כך, לפחות, נדמה, גם לאחר התעמקות נכרת בהן). קיומו של תוספתן באדם הוא דוגמא לכך, וכך גם ההצלבה בין קנה הנשימה ודרכי הבליעה. ההסבר הסביר ביותר למציאותן של אלה הוא המוצא המשותף.

דוגמאות נוספות של חוסר שלמות בטבע מתוארות בפרק 7 בקטע "האם הכל מושלם?" וכן בספר "צלוקות האבולוציה" מאת איליין מורגן.

4 רעיון האב הקדמון המשותף לכל היצורים מסביר בצורה הטובה ביותר את קיומם של יצורים אלה, שכן נראה שהם דומים במובנים מסוימים לאבות הקדמונים שחיו לפני ה"פיצול" לקבוצות הייחודיות. אם תלמידים סבורים שאפשר להסביר את התופעה גם בעזרת המודלים האחרים, בקשו מהם להסביר כיצד. דוגמה נוספת: **הלטימריה**, דג שנמצא באוקיינוס ההודי, שוחה במים באופן שזוחל הולך על היבשה והוא נחשב לחוליה מקשרת בין הדגים להולכי על-ארבע יבשתיים.

5 רעיון האב הקדמון המשותף לכל היצורים מסביר בצורה הטובה ביותר את קיומם של יצורים קדומים המהווים "חוליות מקשרות", שכן הם מייצגים את היצורים לפני ה"פיצול". אם תלמידים סבורים שאפשר להסביר את התופעה גם בעזרת המודלים האחרים, בקשו מהם להסביר כיצד.

6 המחסור ב"מאובני ביניים" תומך, לכאורה, במודל הקבוצות ובמודל מרובה ההתחלות. עם זאת העדר מאובנים של יצורי ביניים אינו מהווה "הוכחה" שלא היו בנמצא יצורים כאלה. ייתכן אמנם שקיימים מאובנים כאלה שטרם התגלו, אך חשוב יותר לדעת כי רק חלק קטן מאוד של היצורים החיים עובר תהליך התאבנות. התנאים הפיזיקליים (כמו לחות וטמפרטורה) השוררים במקומות ובזמנים מסוימים קובעים אם תהיה התאבנות.

גם צפיפות האוכלוסייה משפיעה: ככל שקיימים פרטים רבים יותר, עולה הסיכוי שנוציגים מתוך האוכלוסייה יתאבנו. כך גם לגבי גודל היצור והרכבו: חלקים קשים כמו קונכיות, עצמות ושיניים הם בעלי סיכוי טוב יותר להתאבן מאשר רקמות רכות. הסיכוי שיצור גדול יתאבן בשלמותו קלוש ביותר. זה המקום לציין שהוצע גם הסבר ביולוגי להעדרם של מאובני ביניים, אך אין זה המקום לפרטו בגלל מורכבותו. המעוניינים להעמיק, יכולים לקרוא על "שיווי המשקל המקוטע" (punctuated equilibrium) באחד מספריו של סטפן ג'יי גולד או בספרו של ריצ'ארד דוקינס "השען העיוור".



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 "מרבזה 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?



מהתבוננות בטבלה אפשר לראות כי גם המודל "מרבזה התחלות" וגם "מודל הקבוצות" לא מסבירים תופעות מרכזיות כמו הדמיון בין כל היצורים, חוסר השלמות בטבע ומאובני הביניים שנמצאו. מחסור במאובני ביניים עשוי לתמוך אמנם במודלים אלו, אולם אפשר להסבירו גם בדרכים אחרות. "מודל הקבוצות" נתמך בעובדה שלקבוצות יצורים יש מאפיינים ייחודיים השונים מאוד מקבוצות אחרות, אך רעיון האב הקדמון המשותף לכל היצורים מסביר טוב יותר את כל התופעות שהוצגו.

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 "מרבזה התחלות")
1. מאפיינים ייחודיים לקבוצות של יצורים	לא סותר (ואפילו תומך).	תומך.	לא סותר.
2. דמיון למרות המגוון	תומך.	לא סותר (אך בעל סבירות נמוכה).	לא סותר (אך בעל סבירות נמוכה).
3. חוסר שלמות (ואף "שלומיאליות") בטבע	תומך מאוד.	בעייתי.	בעייתי.
4. עדויות חיות	תומך מאוד.	בעייתי.	בעייתי.
5. מאובני ביניים	תומך מאוד.	בעייתי.	בעייתי.
6. מחסור במאובני ביניים	לא סותר אך בעייתי.	תומך.	תומך.

א

אם יש עדיין תלמידים שיטענו כי "חלק מהקופים עדיין בשלב מעבר ואם נחכה מספיק זמן כל הקופים יהפכו, בסופו של דבר, לבני אדם", שקפו להם שהם אומרים, למעשה, שמוטציות אינן אקראיות ואותן מוטציות יתרחשו בכל שושלת קופים מחדש (רעיון שכבר שללנו בפרקים הקודמים).

ב

אף-על-פי שהיה אב קדמון משותף לכל היצורים, בשלב מסוים, מוקדם בהיסטוריה האבולוציונית, הופרדה יבשת אוסטרליה מהיבשות האחרות, ונוצר מחסום גיאוגרפי בין היצורים ששכנו עליה לבין היצורים ביבשות האחרות. מאחר שהתפתחות המינים תלויה במוטציות אקראיות בתנאי סביבה שונים, התפתחו באוסטרליה מינים שונים.

ג

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.

א

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?

ב

מדענים סבורים, שבשלב מסוים 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?

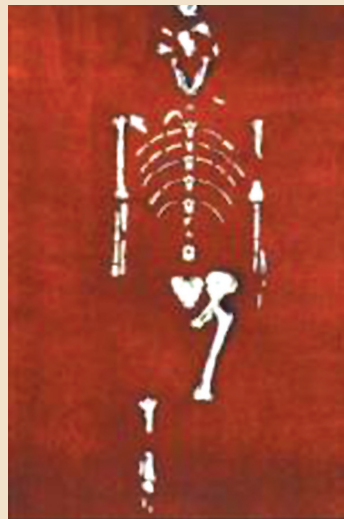
ג

תלמידים רבים סבורים שלהתפתחות המינים יש כיווניות ולכן כל היצורים שמוכרים לנו היום, היו מופיעים באותו סדר. אולם הסיכוי שכך יקרה קלוש ביותר. לאבולוציה אין שלבים קבועים מראש, והתפתחות המינים תלויה במוטציות אקראיות בתנאי סביבה שונים ומשתנים על פני כדור הארץ. עדות לכך היא העובדה שבאוסטרליה התפתחו מינים שונים מאלו שהתפתחו ביבשות האחרות.

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).



השלד של "לוסי" (מלפני 3.5 מיליון שנה)

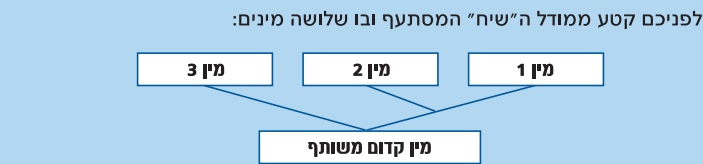


האוסטרלופיתקוס – ציור משוער על פי מאובנים

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.

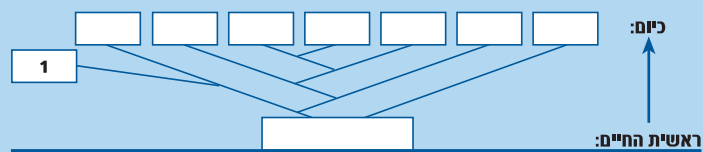


שאלות לסיכום

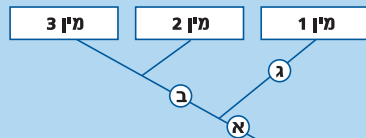


אילו מהמינים חולקים ביניהם, קרוב לודאי, יותר תכונות משותפות, 1-2, 1-3 או 2-3? הסבירו את תשובתכם.

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



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?



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)?

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



שחף שחור



שחף כספי

93

1 המינים 1-2 חולקים ביניהם יותר תכונות משותפות, כיוון שהתפצלו בשלב מאוחר יותר.

2 כל המינים שבקו העליון מסמנים מינים הקיימים כיום. מינים שאינם מגיעים לקו העליון, כדוגמת המין המסומן בספרה 1, מסמנים יצור שנכחד. דוגמאות למינים כאלה הם הממותה, הדינוזאורים, הדודו ועוד.

3 למוטציה א סיכוי טוב להופיע בשלושת המינים, כיוון שקרתה לפני שהתפצלו זה מזה. למוטציה ב יש סיכוי טוב להופיע במין 2 ובמין 3, אך לא במין 1, כיוון שקרתה לפני שהתפצלו זה מזה, אך אחרי שהתפצלו ממין 1. למוטציה ג יש סיכוי להופיע רק במין 1, כיוון שקרתה לאחר שהתפצל משני המינים האחרים.

4 על פי מודל ה"שיח", לכל היצורים היה אב קדמון יחיד משותף, ולכן קיימות תכונות מסוימות המשותפות לכולם. עם זאת, במהלך האבולוציה הצטברו שינויים והתרחשו פיצולים למינים רבים. שינוי שלאחריו יש פיצול עשוי להופיע בקרב כל היצורים שנוצרו באותו פיצול ובאלו שהתפצלו מהם. שינוי שחל אחרי פיצול, סביר שלא יופיע אצל יצורים שהתפצלו קודם לכן. מסיבה זו, יש תכונות המשותפות לכל היצורים, ויש תכונות המאפיינות קבוצות מסוימות ואינן מופיעות אצל אחרות.

5 נקודה מספר 1 מראה את נקודת הפיצול, שלאחריה נחשבים השחפים לשני מינים נפרדים. הקווים מציינים את הצטברות השינויים שחלו בכל מין בנפרד. לדוגמה, הקו הימני מציין את הצטברות השינויים אצל השחף הכספי מאז נקודת הפיצול ועד ימינו. מובן שאיננו יכולים לדעת בוודאות, אך כל דוגמה לשינוי בתכונות השחף יכולה להתקבל (כל עוד נשמרות התכונות הבסיסיות של שחף): תלמידים יכולים להציע, למשל, שהיה שינוי באורך המקור. עודדו את התלמידים להציע דוגמאות על סמך התמונות של השחפים.

6 לא. ראשית, בדרך כלל אין די מאובנים שיאפשרו למפות באופן מדויק את כל הרצף. גם כאשר נמצא מאובן ביניים (שיכול היה לשמש אב קדמון בנקודת פיצול), תמיד קיימת האפשרות שהיה לפניו או אחריו (בהיסטוריה של האבולוציה) יצור שמאובן שלו לא נמצא או שלא התאבן כלל, והוא למעשה האב הקדמון ה"אמיתי".

ככל שהיצור קרוב יותר לנקודת הפיצול, הוא דומה יותר לאב הקדמון המשותף, כיוון שהצטברו בו פחות שינויים.

כ. כל היצורים החיים התפצלו מאב קדמון משותף.

המודל העליון השמאלי. יצורים שהתפצלו זה מזה מאוחר יותר (ולכן אב קדמון משותף מתקופה מאוחרת יותר), חולקים תכונות משותפות רבות יותר. מכיוון שהשחף הכספי והשחף השחור חולקים תכונות משותפות רבות יותר, אפשר להניח שנקודת הפיצול ביניהם מאוחרת יותר. (שלושת המינים שייכים לאותו סוג: שחף. הסוג שייך למשפחת השחפיים. משפחת השחפיים שייכת לסדרת החופמאים. סדרת החופמאים שייכת למחלקת העופות).

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?

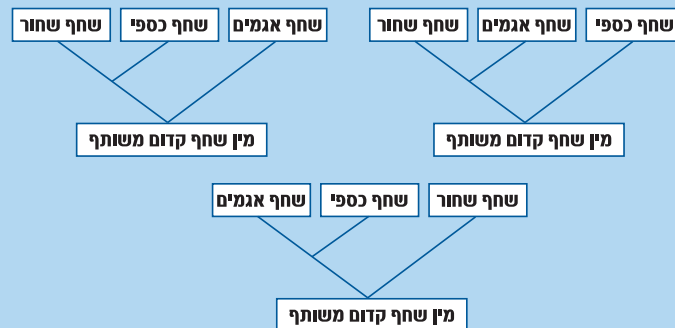
ב. מה מציינים הקווים?

ג. הביאו דוגמה לשינויים שיכולים היו לחול לאורך הקווים.

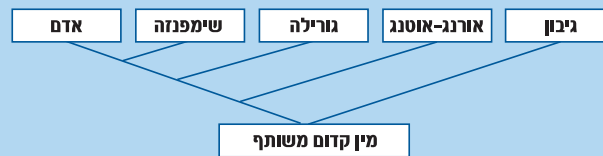
ד. האם, לדעתכם, יכולים מדענים לקבוע בוודאות מתי התרחשה נקודת הפיצול? מדוע? ה. מה ההבדל בין יצור שנמצא בקצה העליון של הקו המקשר בין המינים לבין יצור שנמצא קרוב יותר לנקודת הפיצול?

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?



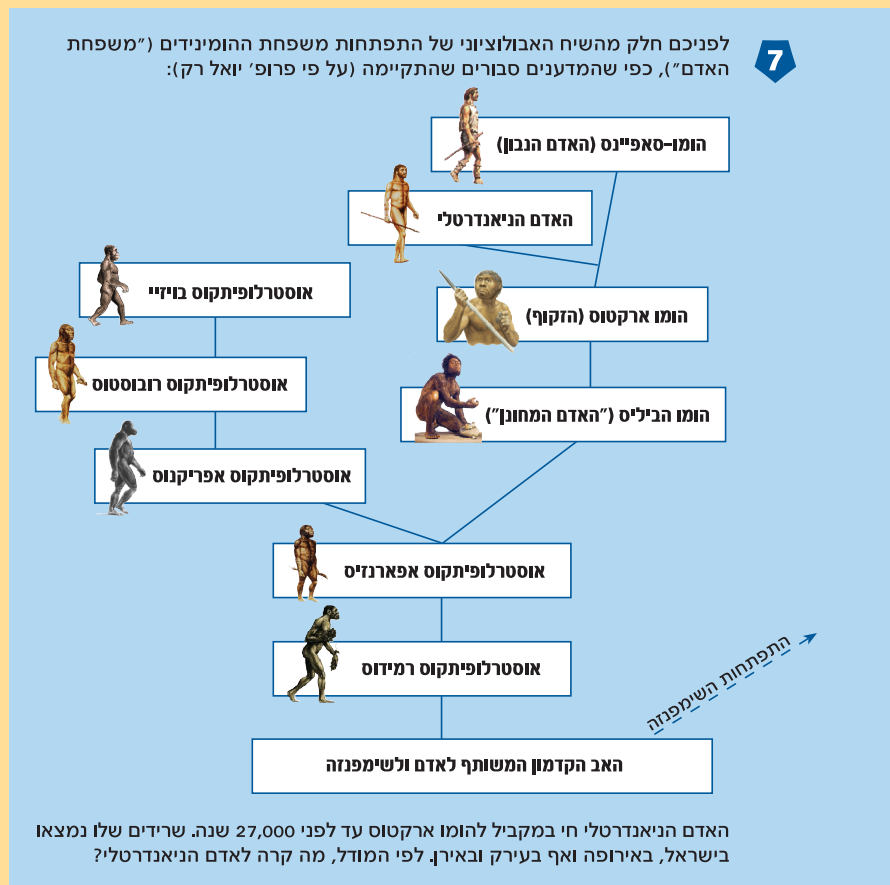
לפניכם מודל ה"שיח" האבולוציוני של התפתחות האדם וקופי האדם, כפי שהמדענים סבורים שהתרחשה. לפי מודל זה, מהו סוג הקוף הקרוב ביותר לאדם? באילו נתונים, לדעתכם, נעזרו המדענים על מנת להציע את השיח הזה?



לפי השיח, האדם והשימפנזה התפצלו מאוחר יותר משאר קופי האדם, ולכן הדמיון הגנטי ביניהם הוא הרב ביותר, והם חולקים תכונות משותפות רבות יותר. מדענים נעזרים בנתוני התאמה של חלבונים שונים ושל רצפי DNA לצורך קביעה זו. נרחיב על כך בפרק הבא.

7

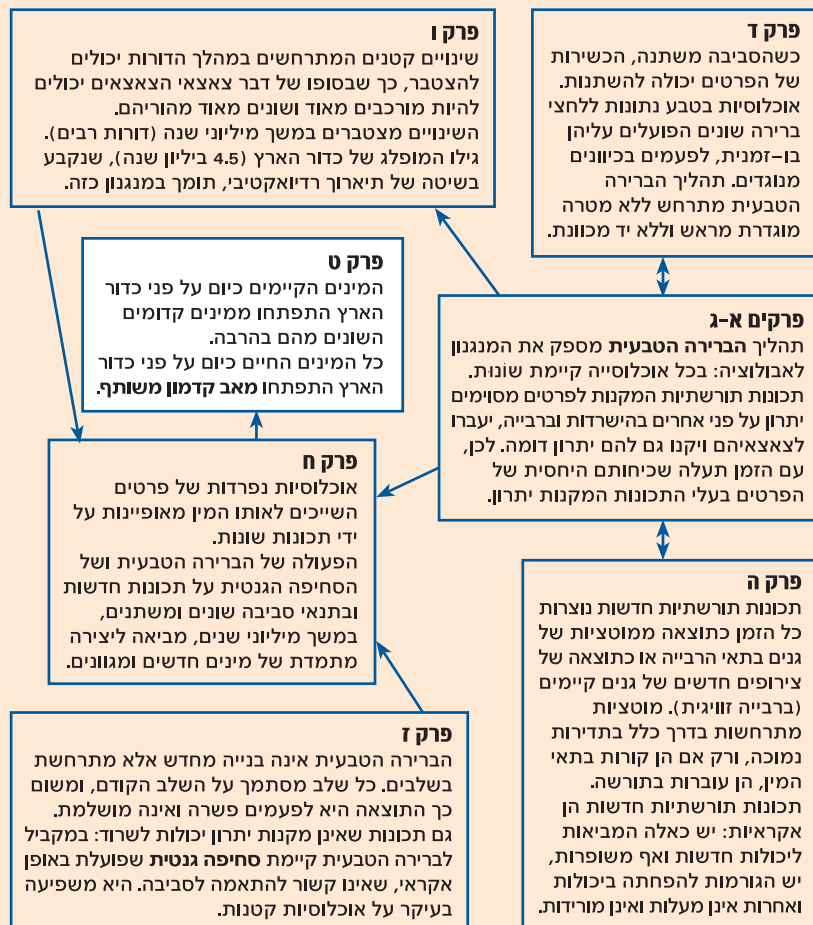
האדם הניאנדרטלי
נכחד. הסיבה לכך אינה
ידועה. האדם
הניאנדרטלי היה בעל
מוח גדול משל האדם
בן זמננו, הוא קיים חיי
חברה, ידע לצוד ונהג
לכרוסם גזעים וענפים.



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:



מונחים שנלמדו בפרק:

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



כיצד קובעים את דרגת הקרבה בין יצורים?

ראינו שלעיתים, 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 הומוולוגי**. הדמיון ההומוולוגי 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 הומוולוגיים) 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 וסדיקי 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 מתחכמות 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 **בבנק 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 אמאיל, המעורב בבניית השיניים. זאת, למרות שלעופות, בניגוד ליונקים ולזוחלים, אין שיניים.

א

על מנת לקבוע את דרגת הקרבה בין יצורים, רק דמיון הומוולוגי, שנובע ממוצא משותף, הוא שימושי. בהמשך הפרק נראה שלא כל דמיון בין יצורים הוא דמיון הומוולוגי.

הרחבה

ב

נכון ל-2005, נעשים מאמצים לקבוע את רצף ה-DNA של יתוש, דבורה, פרה, עוף, כלב, אורז, קנגורו ומינים נוספים.

ע

מכיוון שליצורים יש מוצא משותף, הרי מבנים וגנים מסוימים (כדוגמה זו, הגן לייצור אמאיל) שרדו פשוט כיוון שלא היה להם חיסרון. בהתייחס לרמות השונות של (הרחבה בעמ' 100). זוהי דוגמה לתכונה מהרמה השנייה ('לא מועילה לא מזיקה'), שמרמזת על מוצא משותף בין היצורים.

ד

דמיון מולקולרי ברצף ה-DNA.

ע

- 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?

ד

האם כל דמיון בין יצורים נובע ממוצא משותף?

עד כה עסקנו בדמיון הומוולוגי, כלומר, בדמיון הנובע ממוצא משותף. אך בניגוד לדמיון זה, קיימות דוגמאות בטבע לדמיון מורפולוגי או אנטומי בין מינים שונים שאינם 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.

ד

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

ד

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

ס



הומוולוגיה: כנפי העוף וכנפי העטלף

אנלוגיה: קוצי הוורד וקוצי הקקטוס

- 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 הומוולוגיים? הסבירו את קביעתכם.

ח

98

כ

כל תרחיש שיציעו התלמידים יכול להתקבל ובלבד שיתארו תהליכי ברירה שפעלו על מבנים קיימים. מבנים אלה היו שונים זה מזה באייל ובפרה, אך בגלל צרכים דומים נוצרו קרניים אצל שני היצורים.

ד

דמיון הומוולוגי הוא דמיון בין יצורים שונים הנובע ממוצא משותף. כשמבנים או איברים של יצורים שונים הומוולוגיים זה לזה, הם יכולים להיות בעלי תפקוד דומה או שונה אצל אותם יצורים. דמיון אנלוגי הוא דמיון במורפולוגיה ובתפקוד, אך הוא אינו נובע ממוצא משותף והתפתח בנפרד אצל כל יצור.

ס

גנים דומים מעורבים בקביעתם של מבנים הומוולוגיים. מבנים אנלוגיים התפתחו בנפרד, ולכן נצפה שייקבעו על ידי גנים שונים.

ח

קשקשי הדגים וקשקשי הזוחלים הם בעלי תפקיד דומה אך נוצרו ממוצא שונה. מאפיינים אלה מתאימים להגדרה של דמיון אנלוגי.

א

הדמיון הגנטי הרב ביותר יימצא, קרוב לוודאי, בין הנוצה לקשקשי הזוחל, כיוון שהם הומולוגיים (ממוצא משותף קרוב יותר). על סמך מידע זה אפשר לשער, שהעופות קרובים יותר מבחינה אבולוציונית לזוחלים מאשר ליונקים. עם זאת, קרבה בין יצורים מבוססת על השוואה של גנים ותכונות רבות ולא אחת בלבד.

ב

דמיון מורפולוגי או אנטומי עשוי להטעות. לדוגמה, על סמך הדמיון בין קשקשי הדגים וקשקשי הזוחלים אנחנו יכולים להסיק בטעות כי הדגים והזוחלים קרובים אבולוציונית מאוד זה לזה אלא שמדובר בדמיון אנלוגי. השוואה של רצפי DNA ביניהם תראה כי אינם כה קרובים.

- 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 בדמיון יצורים חיים על פי דמיון מורפולוגי או אנטומי (כמו זה שהציע לינאוס) לקביעת יחסי קרבה אבולוציוניים ויש לבדוק קווי דמיון נוספים?

א

ב

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 לעיתים לשינויים במודל.

מיין 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-סאפינס, 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 (מכסוי 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 לעיתים 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- 10^3 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.

99



background extinction

mass extinction

הכחדה המונית.

חשוב להדגיש כי האדם גורם להגברה של ההכחדות בטבע אבל גם בלי התערבות האדם ימשיכו מינים להיכחד בעקבות שינויים אקלימיים, מגפות ועוד.

הסיכוי לכך קלוש. לאבולוציה אין שלבים קבועים מראש, והתפתחות המינים תלויה במוטציות אקראיות ובתנאי סביבה שונים. קשה לצפות שאותן מוטציות יתרחשו ובאותן סדר, באופן שיביא להיווצרותם של אותם מינים שהוכחדו.

הברירה הטבעית הפועלת על תכונות חדשות שנוצרות כל הזמן (כתוצאה ממוטציות ורכייה מינית) בתנאי סביבה שונים ומשתנים מביאה ליצירה של מינים כך שבצד הכחדה של מינים יש יצירה מתמדת של מינים חדשים.

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? 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.

³אתר ה"ספר האדום": www.redlist.org

בעלי החיים היבשתיים (דו-חיים וחרקים) הופיעו לראשונה על פני כדור הארץ לפני כ-3.5 ביליון שנה. היונקים הראשונים (שהיו יונקים מטילי ביצים) והעופות הופיעו לפני כ-250 מיליון שנה, יונקים בעלי שליה – לפני כ-100 מיליון שנה, וקופי האדם – לפני כ-25 מיליון שנה. קופי האדם הם צעירים יחסית: אם "נכווץ" את הזמן שעבר מאז היווצרות כדור הארץ ועד היום ליממה אחת, קופי האדם היו קיימים רק בדקות האחרונות.

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 כמות: 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"), ושהסתברות שאותם המינים יתפתחו שוב באותו הסדר קלושה ביותר.

לפי השערה זו, האטמוספירה הקדומה, בניגוד למצב כיום, לא הכילה חמצן חופשי אלא הייתה עשירה בתרכובות מימן וחנקן (חמצן חופשי השתחרר לאטמוספירה, 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 שבאטמוספירה הקדומה וכללה תרכובות מתן (פחמן ומימן), אמוניה (חנקן ומימן) ומימן גזי. אדי מים שעלו מ"האוקיינוס 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"אוקיינוס", 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 גליצין ואַלאנין, 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. **א**

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. **ב**

הרחבה

א

כאן מתוארת ה"גישה החלבונית" לפיה הגופים הביולוגיים הראשוניים שנוצרו היו חלבונים ללא חומצות גרעין, אך מדענים אחרים ביקרו אותה וצידדו ב"גישה הגנטית" לפיה הגוף הראשוני היה חייב להכיל חומצות גרעין, שממנו השתכללו שאר התאים.

הוויכוח בין שתי הגישות דומה במקצת לוויכוח "מה באה קודם – הביצה או התרנגולת?": קשה לחשוב שהחלבונים לא נוצרו על סמך אינפורמציה גנטית, ובאותה מידה קשה לחשוב שהאינפורמציה הגנטית הייתה יכולה להיווצר ולהשתכפל, ללא אנזימים חלבוניים.

ב למעוניינים להרחיב על ראשית החיים מומלץ להיעזר בספרה של איריס פריי "מוצא החיים" (משרד הביטחון, ההוצאה לאור).

1 הדבר אפשרי אך קלוש ביותר. המוטציות הן אקראיות ולא נוכל להיות בטוחים שאותן מוטציות שקרו בכדור הארץ קרו גם על פני כוכב הלכת האחר ובאותו הסדר.

2 **א** מין 3
ב מין 1
ג מין 2
ד מוטציה X התרחשה לפני הפיצול לשלושת המינים שכן שלושתם נושאים אותה.

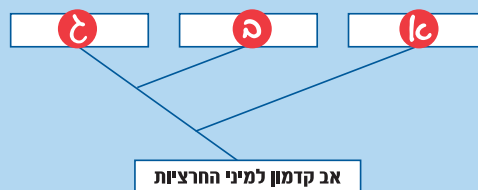
מוטציה Z התרחשה לאחר הפיצול של מין 3 מאחר והוא היחיד הנושא אותה. מוטציה Y התרחשה לפני הפיצול בין מין 1 ומין 2 (שניהם נושאים אותה).

3 הקנגורו הוא יונק כיס שמקורו הבלעדי באוסטרליה. פיענוח רצף ה-DNA שלו עשוי לשפוך אור על מוטציות ייחודיות שהתרחשו לאחר ההפרדה של יבשת פנגיאה שהביאה (בגלל היווצרות מחסומים גיאוגרפיים) להתפתחות יונקי שליה בחלק אחד של העולם ולהתפתחות יונקי כיס בחלק אחר.

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 שלפניהם:



3 הסבירו כיצד החלטתם היכן למקם את המינים ואת המוטציות.
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?

4 רעיון האב הקדמון המשותף לכל היצורים מסביר את תכונות הלטימריה. הלטימריה נחשב לחוליה מקשרת בין הדגים להולכי על ארבע יבשתיים ותכונותיו מייצגות את תכונות האב הקדמון שחי לפני ה"פיצול" בין הדגים לזוחלים.

5 מטרת השאלה לעמת את התלמידים עם ההסבר הנאיבי שבו מחזיקים תלמידים רבים לפני תהליך ההוראה לפיו "האדם נוצר מהשימפנזה".

שאלה נוספת:

בפרק ז (עמ' 68 בספר התלמיד) למדנו כי החלק הנראה כ"בוהן" או אצבע שישית אצל הפגודות ומסייע להן להחזיק את מקלות הבמבוק, אינו באמת בוהן. מבחינה אנטומית זוהי עצם בפרק כף היד. ההשערה היא שכאשר אוכלוסיות הפגודות 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. האם, לדעתכם, הדמיון בין בוהן הפגודה לבוהן האדם הוא הומולוגי או אנלוגי?

סיכום

בפרק זה למדנו כי מיין 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 המשווה 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 שאינם 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.

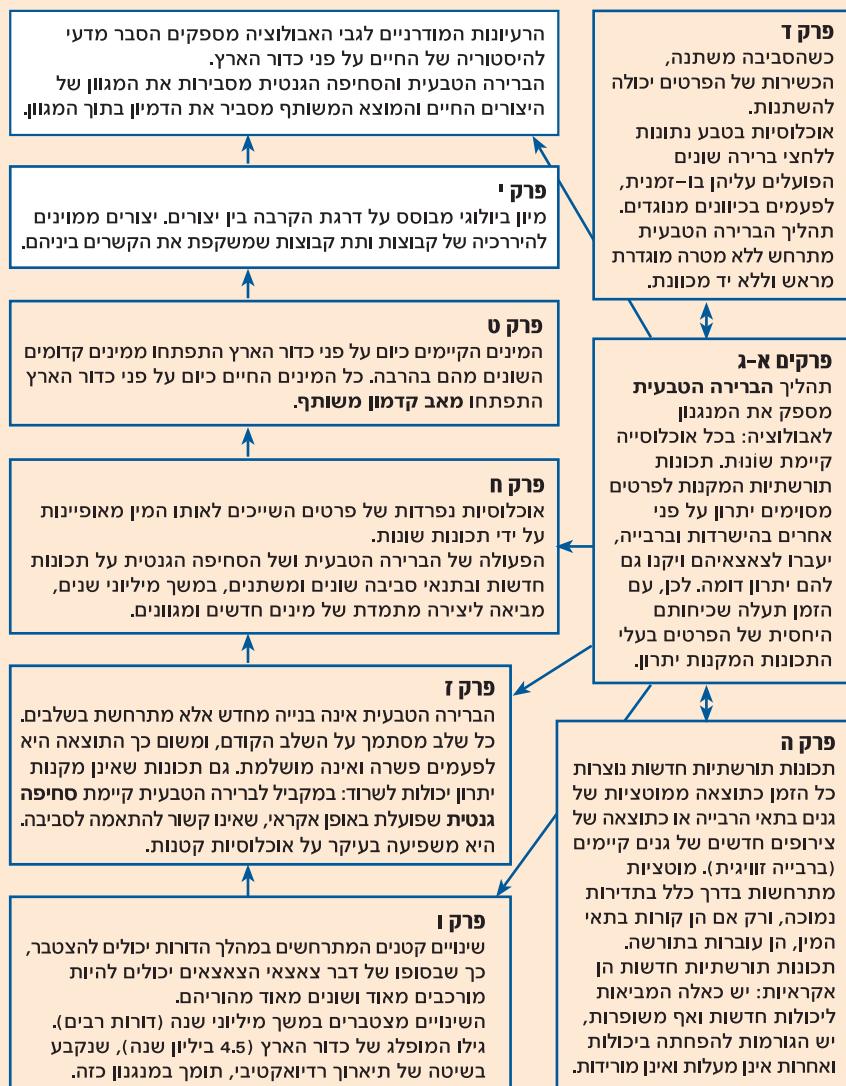
למרות שהשאלות רבות, כנראה, מהפטרונות, ומחלוקות רבות עדיין לא יושבו בין המדענים, רוב הרעיונות מוסכמים על אנשי המדע: העולם נוצר בדרך של תהליכים אבולוציוניים הכפופים לחוקים פיזיקליים; החומר החי הראשוני נוצר מרצף תהליכים שמקורם בחומר דומם; רצף זה התרחש מהר יחסית, וכלל שלבים רבים שכל אחד מהם היה מותנה בקודמו. 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 שולמדו בפרק:

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





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 בופטיסט 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.

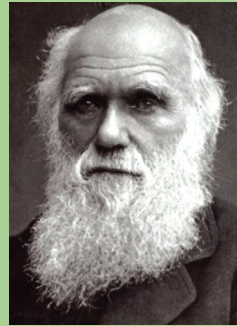
לפי למארק, יצורים משתנים בתגובה להשתנות של תנאי הסביבה. הדוגמה המפורסמת ביותר שלו עוסקת בצווארה של הג'רפה: הוא קבע כי כאשר הידלדלו מקורות המזון במקומות הנמוכים, מתחו הג'רפות את צווארן כדי להגיע לעלים שבצמרות העצים. צאצאיהן של ג'רפות אלה ירשו את הצוואר הארוך מעט יותר ומתחו אף הם את צווארם.

מנגנון זה מייחס יכולת השתנות לפרטים (ולא לאוכלוסיות), כתוצאה של כוונה ומטרה: ג'רפות 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.

 הסיבה לכך שלמארק מצא עושר של מאובנים ימיים הייתה שלרוב חסרי החוליות הימיים יש חלקי גוף קשים שיכולים להתאבן (למשל, קונכיות), והתנאים במעמקי האוקיינוסים נוחים להתאבנות ולשימור.

צ'ארלס דארווין (1809–1882) הכיר את עבודתו של למארק ואת רעיון האבולוציה. כשהיה בן 22 יצא למסע בן חמש שנים על סיפונה של האונייה האנגלית "ביגל". בכל הזדמנות הוא ירד מהסיפנה 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 הציג, מהפכניים ככל שהיו, הוצגו בצורה פשוטה ומובנת. שנית, כל אחד מטיעונו התבסס על שפע של עדויות מיצורים חיים ומאובנים. 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 הציג, 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 שכיחות 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 וואלאס מהרעיון שלאדם יש מוצא משותף 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.

במילותיו של מאלתוס:
אוכלוסייה, אם אין עליה
בקרה, גדלה בטור גיאומטרי.
אמצעי הקיום גדלים בטור
חשבוני.

למארק	דארווין	
קיים	קיים	רעיון השתנות המינים
פרט	אוכלוסייה	הרמה בה מתרחשים שינויים
יש	אין	קיומה של מטרה סופית
קצר יחסית - דור	ארוך מאוד (הצטברות של שינויים קטנים, ותהליכי ברירה טבעית חוזרים ונשנים)	זמן נדרש לשינויים באוכלוסייה

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 קיומן 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.

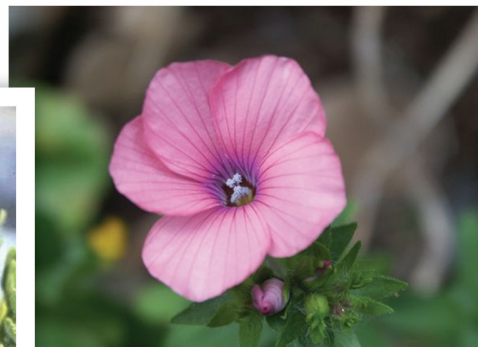
דארווין, שהיה אדם נאור ביותר והומניסט אמיתי (הוא התנגד, למשל, לעבדות שהייתה מקובלת מאוד בזמנו), היה מתקומם בוודאי נגד הפרשנות המעוותת שניתנה לתורתו. ראשית, כפי שראינו, הרעיון שהחזק הוא ששורד אינו עולה מתורתו של דארווין. המתאים, ולא דווקא החזק, הוא ששורד בטבע.

נוסף על כך, אין ספק שהאדם שונה משאר היצורים החיים בהיותו יצור חושב ומוסרי. חיון 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

לאורך הספר מוזכרים תופעות ורעיונות הקשורים לדארווין. לדוגמה, דארווין חישב את מספר הצאצאים האפשרי של מינים מסויימים בטבע כשהציג את הרעיון שבכל מין מספר הצאצאים גדול בהרבה ממספר השורדים (פרק ב). התארכות צוואר הג'ירפה הוסברה גם על ידי למארק וגם על ידי דארווין (פרקים א-ו). דארווין חקר את הפרושים בגאלאפגוס (המוזכרים גם בפרק ד) ורעיונותיו הושפעו גם מברירה מלאכותית (פרק ד).



תודתנו לצלמים ולמוסדות שהרשו לנו באדיבותם להשתמש בתצלומיהם:

- נגה לנגר (עצי הסקוויה, ג'רפות, 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 מבלבל ובשלת, 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 ברין, 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'רפות 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)

