



דגם הוראה לשילוב תקשוב בהוראת מדעים בחט"ב

שימוש בהדמיה וסימולציה מתוקשבת ללימוד עקרונות באבולוציה

מיועד לתלמידי כיתות ח', ט'

פיתוח הדגם: ד"ר ליאורה ביאלר

תשע"ד (עדכון תשע"ח)

א. מבוא

פתח דבר

דגם ההוראה "שימוש בהדמיה וסימולציה מתוקשבת ללימוד עקרונות באבולוציה" מאפשר להבין תהליך מרכזי באבולוציה והוא תהליך הברירה הטבעית והשפעתו על התפלגות תכונות באוכלוסיות יצורים חיים תוך התנסות פעילה בסימולציה מתוקשבת.

בלמידה מרחיבים התלמידים את היכרותם עם פרפרים ועשים על הדמיון והשוני ביניהם תוך דגש על התאמתם לפעילות בשעות שונות של היום.

עיקר הלמידה מתייחס למקרה פרטי ידוע מאוד בחקר האבולוציה והוא סיפורם של עשי הפלפל באנגליה לפני המהפכה התעשייתית, במהלכה וכיום. הלמידה נעשית בגישה קונסטרוקטיביסטית בה נבנה הידע מהשערות התלמידים על בסיס ידע קודם, התנסות בסימולציה והסקת מסקנות. ההתנסות בסימולציה מספקת חוויה משחקית ומסייעת בהבנייה של רעיון הקשר בין התאמה לסיכויי הישרדות, והשפעת התהליך על התפלגות תכונות באוכלוסייה של העשים. רק לאחר ההתנסות נעשית המשגה של עיקרון הברירה הטבעית ובשלב האחרון נדרשים הלומדים ליישמו במצבים אחרים.

מטרות

1. תחום תוכן

פיתוח הבנה של תהליכים אבולוציוניים:

- הבנת הקשר בין שינויים גנטיים אקראיים לשונות באוכלוסייה
- הבנת תהליך הברירה הטבעית
- הבנת הקשר בין השינויים הגנטיים ותהליך הברירה הטבעית לבין התפלגות תכונות באוכלוסייה בבית גידול מסוים
- הבנת הקשר בין השינויים הגנטיים ותהליך הברירה הטבעית לבין מגוון הביולוגי

2. תחום מיומנויות למידה

- הפקת מידע מתמונה
- הפעלת מיומנויות חקר (ניסוח שאלת חקר, העלאת השערות, זיהוי משתנים, תיאור תוצאות והסקת מסקנות)¹

3. תחום התקשוב

- הפעלת סימולציה בהתאם להנחיות, איסוף נתונים והסקת מסקנות
- איתור מידע מונחה ועצמאי ברשת.

¹ פעילות זו בשלמותה היא לבחירה. יש חובה להסיק מסקנות מן הסימולציה.



משרד החינוך
המזכירות הפדגוגית
אגף מדעים



המחלקה להוראת המדעים



מרכז מורים ארצי
למ"ט בחטי"ב

מינהלת מל"מ
המרכז הישראלי לחינוך מדעי וטכנולוגי
על-שם עמוס דה-שליט



משרד החינוך
המינהל למדע ולטכנולוגיה
הפיקוח על הוראת מדע וטכנולוגיה

היבטים דידקטיים

קישור לסילבוס- ריכוז התייחסות לנושא האבולוציה בתוכנית הלימודים במדעי החיים

רעיונות מרכזיים השייכים לאבולוציה:
רעיון 17- רבייה זוויגית יוצרת שונות גנטית.
רעיון 24 - לפי התיאוריות המקובלות כיום מגוון המינים הקיים בעולמנו הינו תוצאה של תהליכים אבולוציוניים.

מטרות, ציוני דרך והערות דידקטיות				
מדעי החיים לכיתה ט - עמוד 13, 14		מדעי החיים לכיתה ח - עמוד 13, 15		מיקום בתוכנית
מערכות אקולוגיות		מערכות אקולוגיות		נושא מרכזי:
נושאי משנה ב. יחסי גומלין בין יצורים ובינם לבין סביבתם	נושאי משנה א. המגוון הביולוגי	נושא משנה ב. יחסי גומלין בין יצורים ובינם לבין סביבתם	נושא משנה א. המגוון הביולוגי	
התלמידים יבינו כי שינויים בגודל האוכלוסייה כמו גם במאפייניה הם תוצאה של תהליכי שינוי גנטיים המאפשרים לפרטים המתאימים ביותר לשרוד וכי שינויים אלו הם תהליכים אבולוציוניים.	התלמידים יבינו כי המגוון הגנטי ומגוון המינים הם תוצאה של תהליכים אבולוציוניים (שינויים במהלך הזמן).	התלמידים יבינו כי שינויים בגודל האוכלוסייה כמו גם במאפייניה הנם תוצאה של השפעת גורמים סביבתיים ותכונות תורשתיות.	התלמידים יבינו כי מגוון המינים הוא תוצאה של תהליכים אבולוציוניים (שינויים במהלך הזמן).	מטרות

מערכות אקולוגיות		מערכות אקולוגיות		נושא מרכזי:
<p>יחסי גומלין יצורים-סביבה</p> <p>▪ גורמים המשפיעים על גודל אוכלוסייה</p> <ul style="list-style-type: none"> - גורמים סביבתיים, כגון: תנאי אקלים, משאבים וטורפים. - גורמים תורשתיים, כגון: כושר התרבות, עמידות למחלות. - הגירה - מעורבות האדם 	<p>המגוון הביולוגי:</p> <p>יצורים וסביבות חיים</p> <p>▪ המגוון הביולוגי</p> <ul style="list-style-type: none"> - מגוון גנטי בין פרטים באוכלוסייה, מגוון מינים ומגוון מערכות אקולוגיות. 	<p>גורמים המשפיעים על גודל אוכלוסייה</p> <ul style="list-style-type: none"> - גורמים סביבתיים, כגון: תנאי אקלים, משאבים וטורפים. - כושר התרבות - עמידות למחלות. - הגירה 	<p>המגוון הביולוגי</p> <ul style="list-style-type: none"> - מגוון מינים וחשיבותו -מגוון בתי גידול וחשיבותו 	ציוני דרך
<p>הנושא גורמים המשפיעים על גודל האוכלוסייה נלמד בכיתה ח' וכאן יש לחזור עליו לצורך הבנה טובה יותר של השפעת גורמים תורשתיים על גודל אוכלוסייה ועל המגוון הגנטי ומגוון המינים.</p>	<p>בכיתה ט' (לאחר שלמדו תורשה בכיתה ט' ומערכות אקולוגיות בכיתה ח') ניתנת ההזדמנות להסביר כי הרעיון של קיום תהליכי אבולוציוניים מאפשר להסביר את התופעה של המגוון הגנטי ומגוון המינים העצום המוכר לנו כיום. שינויים גנטיים (אקראיים בהשפעת גורמים סביבתיים ו/או גורמים פנימיים) ותהליכים של ברירה טבעית משפיעים על המגוון הגנטי ומגוון המינים.</p>	<p>בסעיפים הדנים בגורמים המשפיעים על גודל אוכלוסייה. יש להתייחס לסיכוי ההישרדות של פרטים בסביבה. פרטים בעלי תכונות התאמה טובה לסביבה שיעבירו תכונות אלו לצאצאים הם בעלי סיכויים טובים יותר לשרוד. תופעות אלו הן חלק מתופעות המהות בסיס לתיאוריית האבולוציה המציעה הסברים אפשריים למינים שאנו מוצאים כיום על פני כדור הארץ בהשוואה למינים שהתקיימו בו בעבר.</p>	<p>בכיתה ח' יש להדגיש את חשיבות מגוון המינים לקיום חיים על פני כדור הארץ, לדוגמה במארגי מזון, בתנאים בבתי גידול. יש להוביל להבנת הרעיון כי שינויים בסביבה או שינויים בחומר התורשתי הובילו למגוון המינים העצום הקיים בביוספירה.</p>	הערות דידיקטיות

תרומת כלי התקשוב לפדגוגיה

תהליכים אבולוציוניים הם ארוכי טווח ולא ניתן להדגים במשך לימודיו של התלמיד תוך שימוש ביצורים חיים. השימוש בחיידקים שעשו להדגים תהליכים אלו אסור מבחינה בטיחותית במערכת החינוך.

לפיכך, הדרך היחידה "לקצר את משך התהליך" הוא להדגים תהליכים אלו בסרטים וסימולציות בהן ניתן לקבוע את משך חייו של דור.

סימולציה היא הדמיה אינטראקטיבית מתוקשבת שיכולה להתחקות אחר תהליך חקר או שינויים באוכלוסייה של דמויות של יצורים חיים. הסימולציה תוכנתה כך שתזן במידע על ערכים של משתנה בלתי תלוי (למשל סוג בית הגידול) ומשתנים קבועים (למשל, גודל האוכלוסייה), ובהתאם תפעיל אלגוריתם שייציג תוצאות של משתנה תלוי כלשהו (למשל מספר פרטים מסוג מסוים). בסימולציה ניתן לבצע את התהליך כמה וכמה פעמים (לעשות חזרות) ולבחון בתשומת לב את המתרחש בה. כמו כן ניתן לשנות משתנה בלתי תלוי, לשוב להפעיל את הסימולציה ולהשוות את התוצאות בין המצבים השונים.

סימולציה מתוקשבת טובה למספקת ייצוג מגוון של המשתנים השונים: ייצוג מילולי, חזותי ומספרי ומסייעת בכך ללומדים שונים להתמקד בערוצי קליטת המידע היעילים שלהם.

בסימולציה שבדגם זה מפעיל התלמיד הדמיה של יער שבו חיים עשי פלפל. התנאים הקבועים הם:

- סוג היצור החי- עש הפלפל
- מספר העשים הלבנים והשחורים בתחילת כל דור
- גורם הסלקציה – ציפור הניזונה מחרקים אותה "משחק" התלמיד עצמו.

המשתנה הבלתי תלוי: סוג הסביבה בה חיים העשים וניצודים- יער שגזעיו "לבנים" (מכיסוי בחזזיות) ויער שחור (כהה מפוח). על התלמיד לבחור את סוג היער בו הוא מפעיל את הסימולציה.

המשתנה התלוי: מספר העשים הלבנים והכהים בכל רגע במהלך הפעלת הסימולציה ובתום דקת הפעלה.

במהלך הפעלת הסימולציה התלמיד משחק בתפקיד של ציפור הצדה חרקים. לחיצת עכבר על העש מאפשרת את לכידת העש. הדבר מלווה בצליל המזכיר כרסום של השלד החיצוני של החרק. במידה והתלמיד הצד פספס נשמע צליל קריאה של הציפור.

התלמיד עוקב באופן חזותי אחר הפרטים הלבנים והכהים באוכלוסייה ולוכד אותם. מובן שלתלמיד "הציפור" בדומה לציפור אמיתית, קל להבחין יותר בפרטים הבולטים על רקע היער (אינם מוסווים) ולצוד אותם יותר.

בתחתית מסך הסימולציה יש ייצוג חזותי גרפי וטבלאי של מספרי הפרטים של העשים הלבנים והכהים באוכלוסייה בכל רגע נתון. מעקב אחר הגרפים או הטבלה מאפשר לעקוב אחר גודל הקבוצה של כל מופע באוכלוסייה.

רישום הנתונים בכל הפעלה וריכוזם בטבלה מארגנת שיתופית יאפשר לתלמידים להשוות בין תוצאות "הציד" בסביבות יער שונות ולהסיק מסקנות על היתרונות של כל מופע של עש ואף להכליל לעיקרון את הסלקציה בביררה הטבעית.

ידע קודם

א. תחום התוכן

- הכרות עם מושג ההתאמה וסוגי התאמה: מבנית, פיסולוגית והתנהגותית
- הכרות עם מושג האוכלוסייה

ב. תחום מיומנויות הלמידה

- השוואה
- ארגון מידע בטבלה והפקת מידע מנתונים בטבלה
- הפקת מידע מגרף עמודות
- ניסוח השערה
- הסקת מסקנות
- כתיבת טיעון

ג. תחום התקשוב

- שליטה בתפעול מחשב ועכבר ביעילות
- שליטה בגלישה באינטרנט

מושגים ורעיונות מרכזיים בדגם זה

המושגים הם: ברירה טבעית, גודל אוכלוסייה, התאמה, הסוואה, הישרדות

רעיונות להטמעת נושא האבולוציה:

1. שינויים בסביבה ושינויים בחומר התורשתי (אקראיים) הובילו בתהליכים של ברירה טבעית למגוון הגנטי ומגוון המינים העצום המוכר לנו כיום בביוספירה.
2. פרטים בעלי תכונות המאפשרות התאמה טובה לסביבה הם בעלי סיכויים טובים יותר לשרוד.

3. פרטים בעלי תכונות המאפשרות התאמה טובה לסביבה הם בעלי סיכוי גדול להעביר תכונות אלו לצאצאיהם בתורשה ובכך להשפיע על התפלגות התכונות באוכלוסייה.
4. תיאוריית האבולוציה מציעה הסברים אפשריים לשונות הנוצרת בתוך אוכלוסיות ולמגוון המינים שאנו מוצאים כיום על פני כדור הארץ.
5. הרחבה- מלבד הברירה הטבעית, סחיפה גנטית של שנויים בתכונות יכולה להביא לשינויים אקראיים בהתפלגות התכונות באוכלוסייה.

מבנה הדגם

פתיחה - גירוי ללמידה

[חלק I – "בוא אלי פרפר נחמד"](#)

[חלק II- "מכירים את עש הפלפל"](#)

התנסות

[חלק III – "לו הייתי ציפור"](#)

המשגה

[חלק iv- מקרה שהיה כך היה.....](#)

הרחבה

[חלק V - מתחקים אחר המחקר אודות האבולוציה של עש הפלפל](#)

סיכום ורפלקציה

[חלק VI – דיון מסכם ורפלקטיבי](#)

ב. יחידת הוראה (התשובות לעזרת המורה כתובות בכחול)

שימוש בסימולציה מתקשבת ללימוד עקרונות באבולוציה

סיפורו של עש הפלפל (Peppered moth) שיש שמכנים "מודד מפולפל".

חלק I – "בוא אלי פרפר נחמד"

עשים הם פרפרים שרובם פעילים בלילה ונחים בשעות היום. התבוננו במספר תמונות של עשים [באתר הטבע הישראלי](#). הגדילו את התמונות והתבוננו בדגמי הצבע, במראה המחושבים ובתנוחה האופיינית במצב מנוחה. (כיצד ניצבות הכנפיים יחסית למשטח עליו עומד הפרפר). מה מאפיין את כולם?

צפו גם בכמה **תמונות** של פרפרי יום. הגדילו את התמונות והתבוננו בדגמי הצבע, במראה המחושבים ובתנוחה האופיינית במצב מנוחה (כיצד ניצבות הכנפיים יחסית למשטח עליו עומד הפרפר).. במה שונים העשים מפרפרי היום? ארגנו את המידע בטבלה.

נסו להסביר כיצד מותאמת כל תכונה לשעות הפעילות של הפרפר (ביום ובלילה).

תכונות	פרפרי יום	עשים – פרפרי לילה
צבעים	צבעוניים	כהים ובגווני חום ואפור
צורת מחושים	דמויי אלה	מנוצים
עמדת כנפיים בעת מנוחה	עומדות וצמודות זו לזו	פרושות לצדדים במנח אופקי

פרפרי היום צבעוניים יותר מפרפרי הלילה, מחושיהם דמויי אלה ועיניהם מפותחות מאוד. תכונות אלה מאפשרות תפקוד גבוה של חוש הראיה האפשרי באור ותפקוד סביר של החושים הכימיים. בעת מנוחה, נוהגים פרפרי היום להרים את כנפיהם כך שהם נצבים במאונך למשטח עליו הם עומדים. הצמדה זו של הכנפיים זו לזו מצמצמת את שטח המגע של הכנפיים עם האוויר ומפחיתה את איבוד המים שעלול להביא להתייבשות בעונות בהן מרביתם פעילים (אביב וקיץ).

לעשים כפרפרי לילה, צבעים כהים המסווים אותם בלילה ודגמיהם דומים למרקם של גזע עץ לרוב. מחושיהם מנוצים ובעלי שטח פנים גדול. עובדה זו מגבירה את היעילות של החושים הכימיים שלהם ומפצה בכך על הקושי הנובע מתפקוד חוש הראיה בחשיכה. במנוחה נוהגים פרפרי הלילה לעמוד כשכנפיהם פרושות לצדדים והם נטמעים במשטח עליו הם עומדים.

חלק II - "מכירים את עש הפלפל"

באזורים נרחבים באנגליה, אירופה וצפון אמריקה נפוץ מאוד עש הפלפל שגודלו בין 3-6 ס"מ. עש הפלפל פעיל בלילה ובשעות היום נוהג לנוח על גבי גזעי עצים של אלון, ליבנה וערבה שפעמים רבות מכוסים ב**חזזיות** הנותנות לגזע מראה בהיר.²

ערכו חיפוש **תמונות** באינטרנט של עש הפלפל וצפו בכמה מהן:

א. תארו אלו צבעים יש לעשים אלו, האם המראה שלהם חלק או מנוקד ומה תנוחת הכנפיים שלהם במצב מנוחה.

- לאיזו קבוצה שייך עש הפלפל, לפרפרי יום או לילה?
- מדוע לדעתכם, הוא קרוי עש הפלפל או Peppered moth?

ב. מהן הסכנות האורבות, לדעתכם, לעשים ניחים הנחים על גזע עץ?

ג. אלו התאמות יכולות לצמצם סכנות אלו ולהגביר את סיכויי ההישרדות של העשים?

² מבוסס על אתר העוסק בנושא שירד מהרשת <http://www.techapps.net/interactives/pepperMoths.swf>

ד. האם לדעתכם, יש לעש הפלפל התאמה כזו? תארו אותה וציינו איזה סוג התאמה זו.

באוכלוסיות של עש הפלפל ניתן לראות כמה מופעי צבע: בהיר מנוקד בנקודות כהות (מכאן השם מפולפל או פלפל), אפור מנוקד ואף כהה מאוד. עמידתם על הגזע במנוחה הולמת את האופייני לשאר העשים, כנפיים פרושות לצדדים. בשעות היום העשים הנחים על הגזעים נתונים לטריפה על ידי אוכלי חרקים יומיים כמו אדום חזה, חטפיות, סיטות ועוד. ככל שהעשים יהיו מוסווים יותר על גזע העץ וימעיטו בתנועה פוחת הסיכוי להתגלותם אל ידי הציפורים הטורפות ועולה סיכויי הישרדות שלהם וסיכויי העמדת צאצאים לדור הבא.

חלק III – "לו הייתי ציפור"

1. הכנסו לכתבה "[אבולוציה במהפכה התעשייתית](#)" מאת ד"ר ארז גרטי וקראו את שתי הפסקאות הראשונות.
2. לחצו על הציור והכנסו ל[הדמיה](#) של ציד "מודד מפולפל" (עש הפלפל) על ידי ציפורים שבאתר מכון דוידסון.



א. הנחיות

בהדמיה תדרשו להיות "הציפורים" ו"לצוד" כמה שיותר עשים. שימו לב לפרטים הבאים:

1. המסך שלפניכם יציג אפשרות לבחור יער ובו עצים בעלי גזע בהיר או בעלי גזע כהה. בחרו באחת מן האפשרויות.



אל המסך שלפניכם תשחרר אוכלוסיית עשי פלפל. בתחילת ההדמיה אוכלוסיית העשים תורכב מ- 50% עשים בהירים ו- 50% עשים כהים.

2. הובילו את הציפור אל העשים בעזרת העכבר ונסו "לצוד" כמה שיותר עשים על ידי לחיצה על הכפתור השמאלי של העכבר.



- לרשותכם 20 שניות לציד.
- בהדמיה נערך מעקב אחר מספר העשים בהירים והכהים שנותרו לאחר פרק הזמן הנתון.
- 3. בתום 20 השניות מופיע סיכום של גודל כל תת אוכלוסייה (של העשים הבהירים ושל העשים הכהים) לפני "הציד" ואחריו. שרטטו טבלה להצגת התוצאות וארגנו את המידע בטבלה.

ב. תיעוד, סיכום וניתוח תוצאות ההדמיה

- איזה סוג יער בחרתם?
- איזה צבע של עש קל היה לכם לצוד ואיזה קשה יותר? מדוע?
- מה סייע לכם לצוד את העשים שקשה לראותם?

למורה: תשובות אפשריות סעיף ג':

- קל יותר לצוד עשים הבולטים על רקע הסביבה. כלומר קל לצוד עשים כהים כשהיער בהיר וקל לצוד עשים בהירים כשהיער כהה.
- תוכלו לבקש את התלמידים להזין את הנתונים שלהם בקובץ שיתופי בגוגל דרייב כמו זה שכתבתם להלן (מאפשר להגדיל את המדגם)
https://docs.google.com/spreadsheets/d/15YzoPolkAyZAaF7yL-6c0cqDB1AdcdduXQNI1i_t3cg/edit?usp=sharing

קובץ זה הוא דוגמה לקובץ שכדאי שתכינו לתלמידים. תוכלו ליצור ממנו עותק משלכם, להוסיף כותרת מתאימה לכיתה ולהכין די טבלאות נתונים לכל קבוצות התלמידים.

ג. ביצוע חזרות

- חזרו על ההדמיה בעצמכם באותו סוג יער פעמיים נוספות ורשמו את התוצאות שקבלתם בטבלה שארגנתם בסעיף א'
- מדוע חשוב להפעיל את ההדמיה כמה פעמים? למה הדבר דומה במציאות?

ד. המשך ההדמיה: הפעלה ביער האחר

- בחרו ביער בעל צבע גזעים שונה (בהיר/ כהה) ובצעו בו שלושה מסעות ציד. רשמו תוצאות בטבלה.
- איזה סוג יער בחרתם?
- איזה צבע של עש קל היה לכם לצוד ואיזה קשה? מדוע?
- מה סייע לכם לצוד את העשים שקשה לראותם?
- רשמו את התוצאות של אחוז העשים מכל מופע (הבהיר והכהה) שנותרו אחרי פעילות הציפור בטבלה המשותפת אליה תופנו על ידי המורה

ה. ניסוח שאלת החקר

- מהו הגורם המשפיע (משתנה בלתי תלוי) שאת השפעתו בדקתם בסימולציה?
- מהם הגורמים המושפעים שנבדקו בסימולציה (משתנים תלויים)?

ו. הסקת מסקנות

- מה קרה לגודל תת האוכלוסייה של העשים המוסווים בעקבות הצייד? מה קרה לגודל תת האוכלוסייה של העשים הבולטים בעקבות הצייד?

ז. דיון בממצאים ובהשלכות על עתיד אוכלוסיית העשים

- בהנחה כי העשים שלא צדתם נשארו בחיים והעמידו צאצאים. האם גם בדור הבא יהיו 50% עשים בהירים ו-50% עשים כהים? הסבירו תשובתכם.

למורה:

בדור הבא יהיו יותר עשים עם הצבע שמקנה להם הסוואה ביער. עשים אלו נטרפו פחות שרדו יותר זמן והתרבו ולכן יש לצפות כי אחוז העשים המוסווים יעלה ואילו אחוז העשים הבולטים ירד.

- מה היה קורה, לדעתכם, לשתי אוכלוסיות העשים, לו המשכתם את מסע הצייד בהדמיה עוד דקה? ועוד חמש דקות? הסבירו.

למורה:
 מספר העשים הבולטים היה הולך ויורד אולי אפילו עד להכחדה מוחלטת ואילו אוכלוסיית העשים המוסווים היתה משגשגת. אחוז העשים המוסווים היה הולך ועולה כי הם שורדים ומעמידים יותר צאצאים באוכלוסייה לעומת העשים הבולטים.

- מה לדעתכם, יהיה צבע העשים בדור של הצאצאים של העשים שנותרו אחרי 5 דקות של ציד? הסבירו.

למורה:
 ככל הנראה רוב רובם של העשים באוכלוסייה יהיו בעלי צבע מוסווה ומיעוט קטן ביותר יהיו בולטים. מדור לדור פחת מספר העשים הבולטים עקב טריפתם ואילו העשים המוסווים שרדו ברובם והתרבו. לפיכך, יהיו באוכלוסייה בעיקר עשים מוסווים.

- השלימו את הטבלה הבאה:

סוג היער	צבע העש שמהווה התאמה המעניקה יתרון	צבע העש שמהווה התאמה שגורמת לחיסרון
עצים בעלי גזע בהיר		
עצים בעלי גזע כהה		

למורה:
סוג היער

צבע העש שמהווה התאמה המעניקה יתרון	צבע העש שמהווה התאמה שגורמת לחיסרון	סוג היער
עש בהיר	עש כהה	עצים בעלי גזע בהיר
עש כהה	עש בהיר	עצים בעלי גזע כהה

ההדמיה והמסקנות שהסקתם ממנה הדגימו תהליך באבולוציה הנקרא "**ברירה טבעית**" שמסביר כיצד משפיעה השתנות תכונות של יצורים חיים על סיכויי השרדותם והתרבותם באוכלוסיות של יצורים חיים והיווצרות של מינים חדשים.

הסבירו במלים שלכם מהי הברירה הטבעית.

עוד על הברירה הטבעית ועל מפתח התיאוריה צארלס דארווין תוכלו לקרוא [בגלים](#).

ועל [דוגמאות נוספות](#) לברירה טבעית באתר דוידסון.

למורה

- בכיתה ניתן להקרין את הקובץ עם תוצאות ההדמיה של כלל התלמידים ולחשב ממוצע בין הקבוצות. הדבר מדמה אוכלוסיית של ציפורים אוכלות עשים שבה כל פרט ניזון וצד עשים ובכך כל הפרטים משפיעים על התפלגות התכונות של העשים באוכלוסייה.

השוואה בין הסימולציה למציאות

חשוב להשוות בין הסימולציה להתרחשות בטבע ביער שבמערכת האקולוגית שלו חיים עשי פלפל וציפורים אוכלות חרקים כמו אדום חזה, חטפיות, סיטות וכדומה. כדאי לבנות טבלת השוואה על הלוח.

להלן טבלה לדוגמא.

יער	סימולציה	קריטריונים להשוואה	
		טורפים	נטרפים
ציפורים אוכלות חרקים	התלמיד	טורפים	נטרפים
עשי פלפל	דמויות של עשים		
טריפה: לכידה של העש בעזרת המקור	פעולה: לחיצה על העכבר מעל דמות העש	הטריפה	
טריפה חוזרת: כל ציפור בטבע אוכלת עשים רבים בפרק זמן נתון	פעולה חוזרת: ניתן ללחוץ על העכבר כמה פעמים שרוצים במהלך דקה		
כל ציפור באוכלוסיות המינים אוכלי החרקים צדה עשים ומשפיעה בכך על התכונות השכיחות אצל השורדים.	כל תלמיד בכיתה משתתף בסימולציה ולכן ניתן להתייחס לתוצאות גם ברמה כיתתית	אוכלוסייה של הטורף	
ירידה גדולה יותר במספר העשים בעלי צבע בולט על רקע היער לעומת מספר העשים המוסווים.	ירידה גדולה יותר במספר דמויות העשים בעלות צבע בולט על רקע המסך לעומת מספר דמויות העשים המוסווים.	תוצאות הטריפה	

המשגה (מעט מן ההיסטוריה המדעית)

חלק IV

מקרה שהיה כך היה.....

א. ההדמיה שבצעתם מדגימה תהליך אמיתי שנצפה באנגליה החל מאמצע המאה התשע עשרה.

ב-1848 דווח חובב טבע, בשם אדלסטון כי לכד ברשת הפרפרים שלו עש פלפל שחור בלב מנצ'סטר. זה היה הדיווח הראשון על עשי פלפל כהים באזור. עד אז, הכירו חוקרים וחובבי טבע אוכלוסיית עשי הפלפל בעלי כנפים בהירות ומנוקדות בשחור.

שאלה למחשבה: מהיכן הגיעו, לדעתכם, העשים הכהים?

עד שנת 1900 הפכו 98% מן הפרפרים באוכלוסיית עשי הפלפל לבעלי מופע כהה באזור מנצ'סטר. **מה, לדעתכם, הסיבה לכך?** רמז תמצאו בחידת הציורים הבאה: **(מהפכה תעשייתית) (למה +משפך +מטה, תעלה +גרשיים + תיק +ת)**



מקרה שהיה כך היה..... המשך

ב. השפעת המהפכה התעשייתית על אוכלוסיית עשי הפלפל

- איזה חידוש אפיין את המהפכה התעשייתית? (בניית מפעלים רבים שבהם פועלות מכונות עם מנועי קיטור השורפים דלק להפקת קיטור. קיימים עוד שינויים רבים חברתיים וכלכליים שנבעו מבניית המפעלים)
- איזה שינוי חל לדעתכם, באיכות האוויר, בעקבות המהפכה התעשייתית? (זיהום אוויר שנבע מפליטת פיח רבה משריפת הדלק במנועים באזורים הסמוכים למפעלים)

- כיצד השפיע השינוי באיכות האוויר על צבע גזעי העצים? (גזעי העצים באזור הסמוך למפעלים התכסו בפיח והשחירו, החזזיות שעל פני הגזעים מתו)
- בהתבסס על ניסיונכם בסימולציה, מה קרה לדעתכם, לאוכלוסיית עשי הפלפל הבהירים? (העשים הבהירים שהיו נפוצים באוכלוסיית עשי הפלפל הפכו בולטים על רקע העצים מכוסי הפיח ונטרפו יותר)
- מה קרה לדעתכם, לפרטים הכהים של עשי הפלפל? (העשים הכהים שהיו נדירים באוכלוסיית עשי הפלפל הפכו מוסווים על רקע הגזעים מכוסי הפיח, פחות נטרפו, שרדו והעמידו צאצאים דומים להם)

בהמשך נמצאו ראיות רבות התומכות בתיאוריית הברירה הטבעית כמסבירה את השתנות צבע העשים באוכלוסייה.

עוד על הברירה הטבעית ועל מפתח התיאוריה צארלס דרווין תוכלו לקרוא ב**גלים**.

חלק V

הרחבה- מתחקים אחר המחקר אודות האבולוציה של עש הפלפל

חלק זה של הפעילות הוא רשות ומאפשר לעסוק במיומנויות חקר באמצעות מעקב אחר סיפורי חקר. סיפורי החקר מתארים את התהליך המחקרי שהביא להסבר של השינוי שחל באוכלוסיית עשי הפלפל באמצעות התיאוריה של הברירה הטבעית.

בשלב הראשון אנו מציעים לתלמידים לחשוב כמו מדענים:

- א. לנסח בעיה- מה גרם לשינוי בצבע אוכלוסיית העשים באזורים התעשייתיים באנגליה?
- ב. לבחון השערות- לתלמידים מוצגות השערות שונות המנסות לתת מענה לבעיה. התלמידים צריכים לעיין ולהבין את משמעותה של כל השערה.
- ג. לבחון דרכים לבדיקת כל השערה- לתלמידים מוצגות דרכים שונות לבדיקת ההשערות ועליהם להתאים לכל השערה את דרך הבדיקה המתאימה לה.

מדענים שהבחינו בשינוי בצבע אוכלוסיית העשים, רצו להבין מה גרם לשינוי.

הם העלו כמה השערות שיסבירו את השינוי ואף תכננו ובצעו תצפיות ופעולות מסוגים שונים על מנת לבחון איזו מבין ההשערות נכונה.

מיפוי הידע שהוכן באתר Mindomo מציג את ההשערות ואת דרכי הפעולה לבדוק אותן.

- א. היכנסו למיפוי ועיינו בכתוב בצד ימין ובצד שמאל.
- ב. תנו כותרת לכל אחת מקבוצות המשפטים על ידי מחיקת מילים מיותרות בתיבות המתאימות לכך.
- ג. התאימו בין התצפית/פעולה לבין השערה שאותה תסייע לבדוק. עשו זאת על ידי כתיבה ליד המשפטים בצד שמאל. שימו לב, כי דרך בדיקה מסוימת יכולה לסייע בבדיקה של כמה השערות.
- ד. לחצו על כפתור SHARE ושתפו את חבריכם לקבוצה או את המורה בהתאם להנחיות שתקבלו.

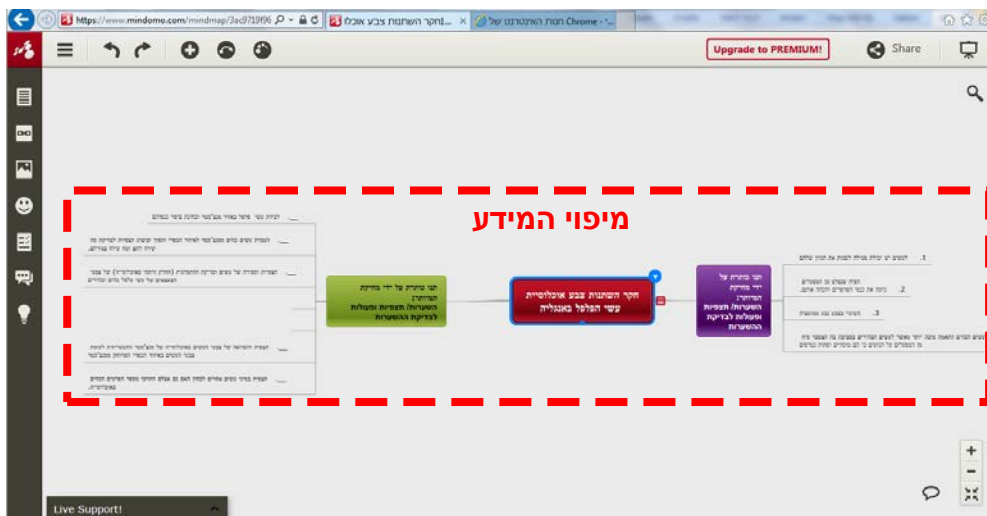
למורה

הסביבה המתקשבת Mindomo היא סביבה חינוכית המאפשרת לבנות מיפויי ידע ולשתף אותם עם אנשים אחרים. הסביבה פשוטה ביותר לתפעול. היא מאפשרת לבנות עץ של נושאים, לקשר למולטימדיה, לרשת ועוד. היא מאפשרת לכתוב בעברית ובכיוון מימין לשמאל (יש ללחוץ עם כפתור העכבר הימני מעל שם נושא או תת נושא ולבחור את כיוון הכתיבה. יש עדיין בעיה בפיסוק בעברית)

בסביבה זו נבנה מיפוי ידע של ההשערות ודרכי הפעולה לבדיקתן הנוגעות לסוגיית שינוי הצבע באוכלוסיית עש הפלפל.

פעילות התלמידים

א. התלמידים נדרשים לזהות על פי ניסוח המשפטים האם הם מתארים השערות או תצפיות ודרכי פעולה לבדיקת ההשערות ולבחור בכותרת המתאימה לכל קבוצת משפטים.

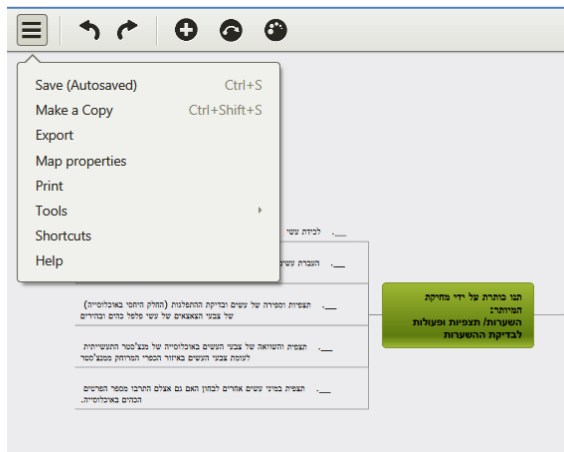


להלן הכותרות הנכונות ומיקום ההנחיות בתרשים. על התלמיד ללחוץ על הריבוע המפוספס לקבלת ההנחיות:

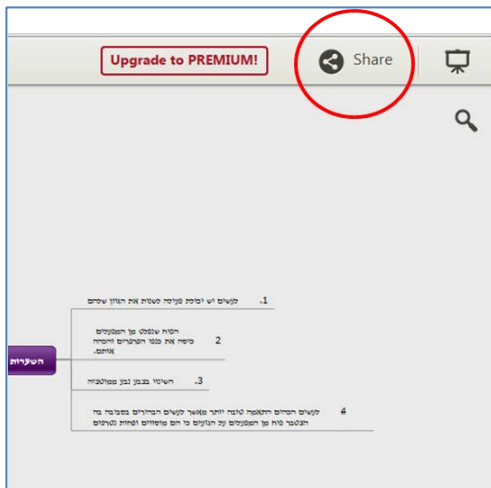
ב. התלמידים מתבקשים לאתר איזו תצפית או פעילות מתאימה לבדיקת איזו השערה. עליהם לכתוב את המספר המתאים להשערות על הקו בתחילת התיאור של דרך הפעולה. להלן הפתרון:

השערה	תצפית ופעילות לבדיקת ההשערות
2	לכידת עשי פלפל במנצ'סטר ובחינת ציפוי כנפיהם.
1	העברת עשים כהים ממנצ'סטר לאיזור הכפרי והפוך ובדיקת מה קורה להם ומה עולה בגורלם.
3	תצפיות וספירה של עשים ובדיקת ההתפלגות (החלק היחסי באוכלוסייה) של צבעי הצאצאים של עשי פלפל כהים ובהירים.
4,3	תצפית והשוואה של צבעי העשים באוכלוסייה של מנצ'סטר התעשייתית לעומת צבעי העשים באיזור הכפרי המרוחק ממנצ'סטר (נעשה בשיתוף חובבי חרקים)
4	תצפית במיני עשים אחרים לבחון האם גם אצלם התרבו מספר הפרטים הכהים באוכלוסייה.

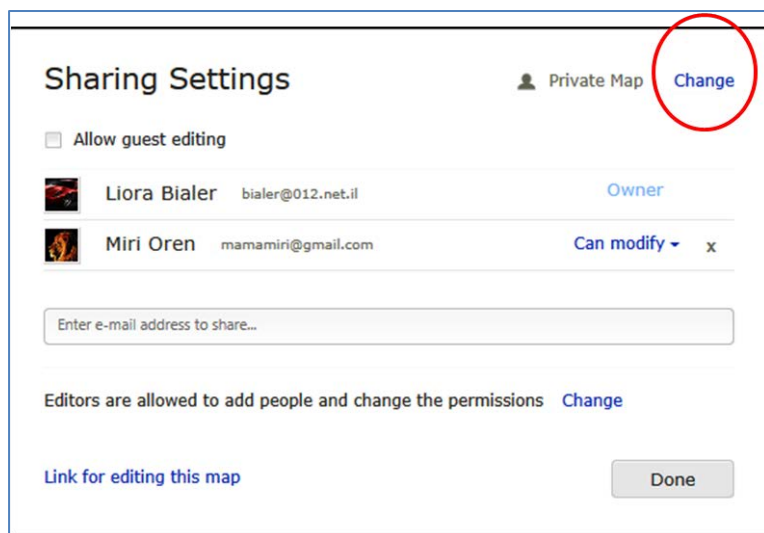
פעילות הערכות לשימוש במיפוי המתקשב- למורה



ג. על מנת להשתמש במיפוי הידע יש ליצור עותק של הקובץ לכל קבוצת תלמידים שברצונכם להפעיל. לחיצה על הכפתור הנראה בתמונה מאפשר לבחור ב *Make a copy* ולתת לו שם מתאים.



ד. עליכם לשתף את המפה המיועדת לקבוצה עם חברי הקבוצה. לחצו על כפתור *Share* שבסרגל העליון (ראו תמונה).



ה. יפתח החלון הבא. לחצו על כפתו *Change*.
ו. בחרו ב- *Public map* ושמרו (לחיצה על *Save*).
ז. העתיקו את כתובת המיפוי בכדי לשלוח לתלמידכם.

עבור מורים שאין להם גישה לאינטרנט עם תלמידיהם מצויות ההשערות ודרכי הפעולה בהמשך.

השערות

1. לעשי הפלפל יש יכולת פעילה [לשנות את הגוון שלהם](#)³ כמו שיש לזחלי העשים או לזיקיות. לפיכך, עשים יתכוו על גזעים המכוסים בפיח ויתבררו על גזעים המכוסים חזזיות בהירות.
2. הפיח שנפלט מן המפעלים שהתרבו בעקבות המהפכה התעשייתית כיסה את כנפי העשים והכהה אותם.
3. השינוי בצבע נבע ממוטציה שהיא שינוי מקרי שחל בחומר התורשתי של העשים.
4. לעשים הכהים התאמה טובה יותר מאשר לעשים הבהירים בסביבה בה הצטבר פיח מן המפעלים על הגזעים כי הם מוסווים ופחות נטרפים. העשים ששרדו הטילו ביצים שרבות מהן נושאות את תכונת הצבע הכהה ומהם בקעו בתום הגלגול עשים כהים וכך גדל מספרם באוכלוסייה.

תצפיות ודרכי פעולה

- A. תצפית והשוואה של צבעי העשים באוכלוסייה של מנצ'סטר התעשייתית לעומת צבעי העשים באיזור הכפרי המרוחק ממנצ'סטר (נעשה בשיתוף חובבי חרקים)
- B. העברת עשים כהים ממנצ'סטר לאיזור הכפרי והפוך ובדיקת שינוי צבע מידי וכן מה קורה להם ומה עולה בגורלם.
- C. לכידת עשי פלפל ממנצ'סטר ובחינת ציפוי כנפיהם.

³ (חפשו את המושג כרומטופורים)

- D. תצפיות וספירה של עשים ובדיקת ההתפלגות (החלק היחסי באוכלוסייה) של צבעי הצאצאים של עשי פלפל כהים ובהירים.
- E. תצפית במיני עשים אחרים לבחון האם גם אצלם התרבו מספר הפרטים הכהים באוכלוסייה.

למורים

חומר רקע על המחקר שעליו מבוססת הפעילות הקודמת- חקר של תופעת ההתכהות (מלאניזם) של עשי הפלפל.

בהתאמה לכיתה, החליטו אם לשתף אותם בסיפור המחקר של הנושא ובאיזה אופן לעשות זאת.

המידע מבוסס על:

<http://faculty.virginia.edu/evolutionlabs/PepperedMothsBioscenev19-3p3-9.pdf>

ב-1896 טען J.W.Tutt שהשינוי בצבע העשים הוא גנטי. הוא הסביר את השינוי בצבע העשים באוכלוסייה בתהליך הברירה הטבעית. הוא טען שעם התכהות העצים בגלל פליטת פחמן המפעלים בעקבות המהפכה התעשייתית, העשים הבהירים הפכו בולטים ונטרפו יותר מן הכהים. במצב זה הצבע הבהיר של העשים היה חסרון ומספר מצומצם מהם העמיד צאצאים בעוד העשים הכהים היו מסוויים טוב יותר, נטרפו פחות, חיו יותר ורבים מהם העמידו צאצאים דומים להם.

בשנות החמישים של המאה הקודמת פעל מדען מאוניברסיטת אוקספורד בשם הנרי ברנרד דוויס קטלוויל על מנת לבדוק את ההשערה של Tutt. כלומר לבדוק האם אכן תהליך הברירה הטבעית הוא הגורם לשינוי באחוז העשים הכהים באוכלוסיית עשי הפלפל. הוא העלה מספר תחזיות שצריכות להתקיים אם השערה זו נכונה ובהן:

- ביערות באזורים בעלי זיהום אוויר כבד, ימצאו בעיקר עשי פלפל כהים.
- ביערות באזורים עם אוויר נקי, ימצאו בעיקר עשי פלפל בהירים.
- עשי פלפל בהירים שניצבים על גזעי עצים כהים יטרפו יותר מעשי הפלפל הכהים ואילו עשי פלפל כהים יטרפו יותר על גזעי עצים מכוסים חזזיות ובהירים.
- עשי פלפל כהים שישוחררו ליערות באזור עם זיהום אוויר כבד, יחיו יותר מאשר הבהירים והבהירים יחיו יותר ביערות בהירים.

בשיתוף עם חובבי חרקים בכל האזור שערכו תצפיות ודווחו על עשי פלפל שראו, נמצא כי ביערות בקרבת אזורי תעשייה בעלי זיהום אוויר נמצאו אוכלוסיות גדולות של עשי פלפל כהים ואילו באזור הכפרי כמעט ולא נמצאו עשי פלפל כהים. ממצאים אלו עלו בקנה אחד עם הדיווחים על אוכלוסיות עשי הפלפל מלפני המהפכה התעשייתית בהם כמעט ולא דווח על עשים כהים.

קטלוגיל סבר שלעשים יכולת מולדת לבחור את צבע הרקע עליו יעמדו במנוחה. הוא חשב שאין להם די זמן ללמוד זאת בטרם יטרפו. הוא ערך מספר ניסויים כדי לבדוק את התהליך של התפלגות צבעי העשים באוכלוסיות השונות.

ניסוי 1

קטלוגיל לקח חבית עץ וכיסה את צידה הפנימי ברצועות בד שחורות ולבנות. בערב הוא שחרר אל תוך החבית מספר שווה של עשים כהים ובהירים וכזה את החבית בזכוכית ובד לבן. בבוקר הוא ערך תצפית ורשם היכן עומד כל עש. הטבלה הבאה מראה את תוצאות הניסוי.

טבלה 1⁴: מספר עשים שנמצאו עומדים על פסי בד שחורים או לבנים בתוך חבית

צבע הרקע של פס הבד בתוך החבית	עשים בעלי כנפיים כהות	עשים בעלי כנפיים בהירות
שחור	38	20
לבן	21	39

ניסוי 2

קטלוגיל שחרר מספר זהה של עשים כהים ובהירים בתוך כלוב ציפורים גדול שבו גדלו עצים בעלי גזע כהה ועצים בעלי גזע בהיר. משנחו העשים על הגזעים, שחרר קטלוגיל לתוך הכלוב זוג [ירגזים](#).

קטלוגיל ערך תצפיות בהן ספר כמה פעמים לכדו הציפורים עשים על כל אחד מן הגזעים. הוא מצא שעל גבי עצים כהים, הציפורים טרפו פי שניים עשים בהירים מאשר עשים כהים ועל עצים בעלי גזע בהיר, לכדו הציפורים פי שנים עשים כהים מאשר בהירים.

ניסוי 3

קטלוגיל לכד עשים בהירים וכהים וסימן את הזכרים שביניהם בסימן בצד הפנימי של הכנף כך שניתן יהיה לזהותם בלכידה חוזרת. הוא שחרר עשים ביער בעל גזעים כהים וביער בעל גזעים בהירים. מדי ערב בשבוע שאחר כך נלכדו במלכודות פרומון⁵ זכרי עשים. טבלה 2 מציגה את תוצאות הלכידה החוזרת.

טבלה 2: מספר זכרי העשים שנלכדו בלכידה חוזרת בשני ניסויי שדה

מספר זכרי העשים שנלכדו לכידה חוזרת בסביבה		תכונות אוכלוסיית העשים
יער באזור ללא זיהום אוויר (דורסט)	יער באזור עם זיהום אוויר (בירמינגהם)	

⁴ $\chi^2=10.0, p=0.001$

⁵ מידע על מלכודות פרומון ניתן למצוא בסעיף "יישום פרומונים בהדברת מזיקים" [במאמר](#) בספריה הוירטואלית.

בהירי כנפיים	18/137 (13%)	62/496 (12.5%)
כהי כנפיים	136/447 (27.5%)	34/488 (7%)

בבדיקת זכרי העשים שנלכדו נמצא שביער בהיר נלכדו מחדש בערך פי שניים עשים בהירים מכהים כלומר הבהירים חיו יותר זמן מן הכהים שנטרפו. ביער בעל גזעים כהים מזהום אוויר, הוא הצליח בלכידה חוזרת לתפוס רק כמחצית מן העשים הבהירים ששוחררו.

מסקנתו היתה שעשים מסוויים נטרפו פחות, חיו יותר זמן והעמידו יותר צאצאים. את מחקרו פרסם בשנת 1959 בעיתון המקצועי Scientific American

בחמישים השנים האחרונות, בעקבות פעולות של הארגונים למען איכות הסביבה, הפחיתו המפעלים את כמות זיהום האוויר שנפלט מהם והעצים החלו להתנקות והופיעו על חלקם שוב חזזיות.

- מה לדעתכם, קורה לאוכלוסיית עשי הפלפל החיים באזורים אלו?

יישום

למורה

את שלב היישום יכולים התלמידים לבצע תוך שימוש בסימולציה נוספת המדגימה תהליך אבולוציוני.

לתלמיד

בפעילות זו תפעילו סימולציה של אתר PheT בנושא הברירה הטבעית. (הפעילות מחייבת התקנת תוכנת Java במחשב).

הסימולציה מדגימה בעזרתכם תהליך אבולוציוני של שינוי בתכונות ובגודל אוכלוסייה של ארנבים החיים בסביבות חיים שתבחרו. הארנבים נטרפים על ידי זאבים החיים באותה סביבה.

בסימולציה ניתן לשנות כמה תכונות של הארנבים: צבע הפרווה (חום/לבן), אורך הזנב (קצר/ארוך) ואורך השיניים (קצרות/ארוכות) וכן לבחור את סביבת החיים ולראות הן באנימציה והן בגרף את השינויים באוכלוסייה של הארנבים ושל הזאבים.

א. הכנסו [לאתר הסימולציה](#) ועצרו את פעולתה (כפתור Pause). התבוננו בחלקי המסך וזהו את תפקידם. אתרו את כל הכפתורים הפעילים.

ב. לפני שאתם מתחילים כל שלב בסימולציה, **כתבו השערה**: האם התכונות של הארנבים יהוו התאמה לסביבה של הסימולציה ויהוו יתרון אבולוציוני ושיגביר את סיכויי ההישרדות והעמדת הצאצאים של הארנבים או שיהוו חסרון אבולוציוני שיגרום להכחדתם? נמקו את תשובתכם.

ג. הפעילו את הסימולציה בהתאם ל**הנחיות** [באתר דוידסון](#) או ל**ליין**.



מינהלת מל"מ
המרכז הישראלי לחינוך מדעי וטכנולוגי
על-שם עמוס דה-שליט



מרכז מורים ארצי
למו"ט בחט"ב



המחלקה להוראת המדעים

- ד. הקפידו לנהל רישום מסודר של מספר הארנבים מכל סוג בתחילת כל הפעלה של הסימולציה ולאחר כמה דורות.
- ה. האם השערתכם אוששה או הופרכה? לאיזו מסקנה הגעתם על ההסבר לשינוי באוכלוסיית הארנבים.
- ו. אלו גורמים תורשתיים וסביבתיים משפיעים על סיכויי ההישרדות של הארנבים בכל סביבה?

חלק VI - סיכום ורפלקציה

למורה

מומלץ לערוך דיון קצר כדי לבחון מה הושג ולבסס את חשיבות למידת הנושא. תוכלו להיעזר בשאלות הבאות

- א. אלו מושגים חדשים למדתם בנושא האבולוציה?
- ב. מה הרשמים אתכם במיוחד בפעילויות שבצעתם?
- ג. האם יתכן והאבולוציה מתקיימת גם היום? תנו דוגמא.
- ד. מדוע חשוב להבין כיצד פועלת האבולוציה?
- ה. האם לפעילות האדם יש השפעה על תהליכים באבולוציה?

הרחבה

לתלמידי כיתות ט' לאחר או תוך כדי למידת נושא התורשה

גנטיקה ואבולוציה בדגי עוקצן

דגי [העוקצן](#) הם דגים קטנים יחסית (4-6 ס"מ בממוצע) החיים בחצי הכדור הצפוני, הן באוקיינוס והן באגמים של מים מתוקים. בקרב אוכלוסיות דגי העוקצן החיות באוקיינוסים מוצאים דגים רבים בעלי "שריון" של קוצים מעצם בבטן (שמחוברים לעמוד השידרה באזור האגן) ומעט דגי עוקצן חסרי קוצים אלו. לעומת זאת, בקרב אוכלוסיות הדגים החיות באגמי מים מתוקים מוצאים דגי עוקצן רבים ללא קוצים בבטן ומעט דגים בעלי קוצים.

מדענים סבורים כי ככל הנראה יש יתרון לכל טיפוס של דג בבית הגידול בו הוא נפוץ. ככל הנראה הקוצים מקשים על בליעת הדגים על ידי דגים טורפים באוקיינוס.

כאשר עוברת קבוצת דגים מן האוקיינוס למים מתוקים, שורדים יותר הדגים ללא קוצים ומתרבים בקצב גבוה מאשר הדגים בעלי הקוצים מכמה סיבות:

- א. לדגים ללא הקוצים יש תנועה זריזה יותר משל בעלי הקוצים וזה מעניק להם יכולת בריחה טובה יותר אל מול הטריפה על ידי זחלי חרקים החיים במים מתוקים.
- ב. נמצא שדגים ללא קוצים גדלים מהר יותר מבעלי קוצים ולכן הם הופכים מהר גדולים מדי לטורפים החרקים שלהם.
- ג. נמצא שדגים ללא קוצים מגיעים לבגרות מינית מוקדם יותר ולכן מעמידים יותר צאצאים בחייהם.
- ד. נמצא שדגים אלו מסוגלים לאגור יותר חומרים המספקים אנרגיה ומגדילים בכך את סיכויים לשרוד את תקופת החורף.

ניתן לצפות ב[הדמיה](#) של אבולוציה באגם באלסקה (באנגלית) של האבולוציה של דגי העוקצן .

להתקדמות, לחצו על החץ כל פעם שנגמר הסבר קולי (באנגלית).

בקבוצות תלמידים טובות המסוגלות להתמודד עם סרטון באנגלית כדאי להראות את הסרט הבא: <https://www.youtube.com/watch?v=Pv4Ca-f4W9Q&feature=youtu.be>

להלן התקציר שלו בעברית:

כדי לחקור יותר ממה נובע ההבדל, דיוויד קינגסלי ממעבדות בסטנפורד ניסה למצוא מהו השינוי הגנטי המבחין בין שני הטיפוסים של הדגים. לצורך כך הכליאו המדענים דגי עוקצן בעלי קוצים עם דגי עוקצן חסרי קוצים במשך כמה דורות. הם ניסו למצוא איזה קטע DNA המקודד לחלבון יעבור מהורה לצאצא ויביא בעקבותיו פנוטיפ עם קוצים או ללא קוצים.

המדענים אתרו את הגן האחראי לייצור החלבון של הקוצים אך לא נמצא כל הבדל ברצף DNA של הגן אצל בעלי קוצים וחסרי קוצים. כמו כן התברר כי הגן מופיע בגנום של הדג בכמה עותקים. כל עותק אחראי לביטוי הגן באזור אחר של גוף הדג (בשפתיים, בראש, בקוצי הבטן) וזוהה מקטע ה-DNA האחראי לביטוי הקוצים בבטן.

בהמשך, חפשו המדענים הבדלים בקטע DNA האחראי לוויסות פעולת הגן ("מתג" מפעיל). הם לקחו DNA מן האזור שבו אמור היה להיות ה"מתג" וקטעו אותו למקטעים. לכל מקטע הוסיפו קטע DNA שגורם להופעת צבע זוהר במקום בגוף כאשר הוא מתבטא ביצור החי. את המקטעים השונים הזריקו לתאי ביצה מופרים של דגי העוקצן ועקבו אחר הצאצאים. לאחר 5 שנים של מחקר הצליחו לזהות בשיטה זו את מקטע ה-DNA המהווה "מתג" מפעיל לגן שאחראי לביטוי של הקוצים. השוואה של איזור זה בין הדגים בעלי קוצים והדגים חסרי הקוצים הראתה כי אצל הדגים חסרי הקוצים חסר חלק גדול ממקטע ה-DNA של ה"מתג". חסר זה הוא תוצאה של מוטציה אקראית שאירעה במהלך הדורות של העוקצנים.

חסר זה של "המתג" שגרם לכך שלא התפתחו קוצים בבטן הדג העניקו לו יתרון בברירה הטבעית באגמי מים מתוקים שם הוא ניצוד בדר"כ על ידי לרוות של חרקי מים שהתקשו

לתפוש אותו ללא הקוץ הבולט וזריזותו בעקבות השלד הקל יותר. עקב כך, הדג חסר הקוצים ניצוד פחות, התרבה יותר ואחוז הדגים חסרי הקוצים באוכלוסייה עלה.

האלל לחסר ה"מתג" הוא רצסיבי. בקרב האוכלוסייה באוקיינוס רק כ- 1% נושאים את האלל הרצסיבי להיעדר קוצים בעוד באגמים מתוקים יש יתרון לבעל האלל הרצסיבי.

עוד הראה המחקר כי בשכבות גיאולוגיות שונות במדבר נבדה נמצאו שלדים של דגי עוקצן מטיפוסים שונים. בשכבות מתקופות מסוימות נמצאו שלדים חסרי קוצים בבטן המעידים כי באותה תקופה היה המקום מוצף אגם מים מתוקים. בשכבות גיאולוגיות אחרות נמצאו שלדים רבים של עוקצן בעלי קוצים. הדבר מלמד על אירוע גיאולוגי שחבר את האגם לאוקיינוס.

היות ודגי העוקצן נפוצים באגמים רבים בחצי הכדור הצפוני, בדקו המדענים דגים מאגמים באיזורים גיאוגרפים ואף יבשות שונות ובכולם נמצאה מוטציה דומה שהביא לדגים חסרי קוצי בטן. הדבר מלמד על האופן בו פועלת האבולוציה.

למורים: יש אפשרות להתחקות אחר חלק משלבי המחקר במעבדה וירטואלית (באנגלית)

<https://www.hhmi.org/biointeractive/stickleback-evolution-virtual-lab>