



יודע חקלאי פיקח

עלון מורי מדעי החקלאות | גיליון מס' 2 | מאי 2019 תשע"ט



המרכז הארצי למורי מדעי החקלאות
المركز القطري لمعلمي علم الزراعة

דבר העורכות

המרכז הארצי למורי מדעי החקלאות שמח להציג בפניכם את הגיליון השני של העלון למורי החקלאות. בעלון הנוכחי תמצאו מגוון של מאמרים בתחומים המשיקים לתוכנית הלימודים החדשה במדעי החקלאות. בין היתר תוכלו לקרוא על עקרונות בטיפול בעלי חיים, על גידול צמח הקנאביס כתרופה, כמו גם על שימוש בחומרים צמחיים כמקור לתרופות. כמו כן נעסוק בננוטכנולוגיה בחקלאות ובמזון ובצמחים שונים בתולדות החקלאות, ונציג מודל לתכנון חווה חקלאית. האם לצמחים יש חושים? גם על כך ננסה לענות. אנו תקווה כי תיהנו מקריאת המאמרים וכי תעשירו דרכם את הידע שלכם בתחומים השונים, ותיישמו אותו בהוראה. אנו מודות לכל כותבי המאמרים.
קריאה נעימה!

ד"ר ג'אנט טלמון - עורכת העלון למורי מדעי החקלאות

ד"ר נירית ברנשטיין - עורכת מדעית לעלון

ד"ר הדר הלר - מנהלת מרכז המורים למדעי החקלאות

דבר המפמ"ר

מורים ומנהלים יקרים,

החקלאות מהווה נקודת השקה של מגוון תחומים מדעיים וטכנולוגיים וקשורה לכל תחומי החיים. בעלון זה תמצאו מאמרים המבטאים מציאות זאת: התפתחות החקלאות כמשפיעה על התפתחות התרבות האנושית; המרוץ למציאת פתרונות לבעיית הרעב וחוסר הביטחון התזונתי, על ידי טיפוח בעלי חיים ופיתוח טכנולוגיות המשמשות לאחסון תוצרת חקלאית; ושימוש בצמחים לבריאות ולרווחת האדם. כמו כן מודגשת בעלון זה תרומת החוות החקלאיות לקירוב תלמידים, בני כל הגילים, לחקלאות.

אני בטוח שתמצאו בעלון מידע מדעי עכשווי, שתוכלו להיעזר בו גם בהוראה השוטפת.

מאחל לכם קריאה מהנה ומועילה!

יואל אבני
מפמ"ר חקלאות



תוכן עניינים

14 - 2



18 - 15



23 - 19



32 - 24

34 - 33

38 - 35

45 - 39



צמתים בתולדות החקלאות

פרופ' (אמריטוס) אברהם בלום

הפקולטה למדעי הסביבה, המזון והחקלאות, האוניברסיטה העברית

כללי התנהגות חדשים ולשנות במהירות יחסית את התנהגויותיהם הישנות.

אני רוצה להוסיף עוד תכונה המאפיינת ומייחדת את האנושות, שהייתה קיימת גם היא טרם המהפכה החקלאית, והיא היכולת לבטא רגשות באמצעות ציורים. בין היתר תיארו ציורים אלו את חוויית הציד על קירות המערות ועל סלעים, ובכך יצרו היבט חשוב של התרבות האנושית. גם היום יש חברות של לקטים וציידים, דוגמת האבוריגינים באוסטרליה, שמשתמשים בציורי קיר מקודשים שציירו אבותיהם



ציור קיר במערה באוסטרליה

ה מהפכות בהתפתחות האנושות

מקובל לראות במהפכה החקלאית ובמהפכה התעשייתית כצמתים החשובים ביותר בהתפתחות האנושות, ולראות בעידן הלקט והציד שקדם להן כשלב שבו לא נבדל האדם, עקרונית, מבעלי חיים אחרים; גם אלה וגם אלה ניזונים מהמקורות שמספק להם הטבע - צמחים או בעלי חיים חלשים מהם. עם זאת, ההיסטוריון יובל נח הררי מציין בספרו "קיצור תולדות האנושות" שתי תכונות, שאותן רכש האדם זמן רב קודם למהפכה החקלאית, ואשר מייחדות אותו מיתר היצורים על פני כדור הארץ - (1) **ביות האש** (2) **והתפתחות השפה הפיסיבית**.

(1) **היכולת להדליק אש ולשומרה** אפשרו לאדם הקדמון לבשל מזונות רבים שמערכת העיכול האנושית אינה מסוגלת לעכל בצורתם הטבעית. מרבית המזונות הבסיסיים של היום הם כאלה: חיטה, אורז, תירס ותפוחי אדמה, והם מספקים חלק גדול מצורכי האנרגיה של בני האדם ביבשות השונות. האש סיפקה גם אור בלילה והגנה מפני טורפים מסוכנים.

(2) לקבוצות רבות של בעלי חיים יש דרכים שונות **לתקשורת בין הפרטים**, בין שבקולם ובין שבאמצעים אחרים. אבל השפות של האדם מאפשרות להפיץ ידע רחב יותר, גם על מה שמתרחש במרחקי העולם. יתר על כן - ואנחנו יכולים לדבר על דברים שאינם קיימים באופן קונקרטי - בעניין אמונות ורעיונות. יכולות אלו מאפשרות לאדם להתארגן בחברות גדולות ומגובשות יותר. הודות לפיתוח הלשוניות יכלו בני אדם לקבוע

לפני 40,000 שנה כדי ללמד את ילדיהם. איזה בעל חיים אחר יכול לעשות זאת?

המהפכה החקלאית

מומחים מעריכים שבני האדם הזינו עצמם במשך למעלה משני מיליון שנה מהמצוי בטבע, מבלי שיצרו מזון מותאם יותר בעצמם. הגברים יצאו לצוד בעלי חיים והנשים ליקטו פירות, עלים ושורשים של צמחים אכילים. רק לפני כ-10,000 שנה החלו בני האדם לשנות את כל אורחות חייהם מן היסוד. איך זה התחיל?

הפירות ביריחו

עשרים קילומטר צפונית מיריחו נמצא התל של העיר הקדומה. הארכיאולוגים אומנם טרם גילו את חומתה, אבל מתחת ל-25 שכבות של שאריות ארכיאולוגיות מצאו את השאריות של אחד הכפרים החקלאיים המוקדמים ביותר בעולם; מעריכים שגילו מעל 10,000 שנה. מתחת לכפר זה מצאו החופרים מחנה קטן של קבוצת אנשים, שלפי הנמצאים (יסודות של כמה בתים עגולים ושאריות מחיות בר וזרעי בר) עסקו בלקט ובצייד. ככל הנראה הם חנו שם בגלל הבאר שמצאו בקרבת המקום. המחנה שלהם השתרע על שטח של לא יותר מדונם אחד.

כפר החקלאים שזיהו מעל כפר הלקטים והציידים השתרע על שטח של 60 דונם. לפי מספר הבתים הגדולים והשרידים שנשארו, משערים ארכיאולוגים כי גרו בכפר כ-300 איש לפחות. כמו כן נמצאו שאריות של שעורה מבויתת. מרשימים עוד יותר היו הסימנים של ההתארגנות לשם הקמת מפעלים משותפים, וכן יכולת הבנייה; החקלאים במקום בנו מערכת תעלות וקירות. הארכיאולוג עופר בן-יוסף חושב שזה לא היה לשם הגנה, אלא כדי להגן מפני הצפת המים. בקצה הכפר הקימו המתישבים מגדל עגול שמטרתו לא ברורה, וכללו בו שלד של ראש אדם. כאן יש כבר עדויות ראשונות לקהילת קבע מאורגנת.

לומדים להגדיל את היבולים

קיימת טענה שלא רק האדם ביית את הצמחים, אלא שגם אלה בייתו את האדם. מהרגע שבו זרע האדם זרעים והמתין ליבולם, הוא נקשר לאותו בית. גידול צמחים מבויתים כגון חיטה העניק לאדם יתרון על איסוף צורות הבר של היבולים, שכן בדרך זו הצליח לייצר מזון רב יותר ליחידת שטח - "מחיר" של עבודה קשה יותר. למעשה, המהפכה החקלאית נמשכה אלפי שנים שבמהלכן למדו בני האדם כיצד להגדיל את היבול. הם למדו שהתוצאות הטובות מושגות אם מטמינים את הזרעים באדמה ולא מסתפקים בפיזורם על פני השטח. לכן התחילו לעדר, להשקות, לזבל ולגרש מזיקים מהחלקות שבהם גידלו את צמחייהם. במשך הזמן למדו לקחת זרעים לריבוי מצמחים שהצטיינו

ביבולם ובתכונות רצויות אחרות, ולברור זנים וגזעים שבלטו בתכונות רצויות שונות. בעלי עין חדה שמו לב לשינויים לא רגילים בצמחים (שהיום קוראים להם מוטציות) ולטפח את צאצאיו של הצמח ש"השתנה".

גם חברות של לקטים וציידים, שעדיין קיימות בעולם, משתדלות לאגור לשנים הבאות עודפים של מזון שהשיגו, או לחלופין משנות את תנאי הסביבה לטובתן. כך, למשל, באוסטרליה, היכן שחיו קבוצות של לקטים וציידים במשך כ-40,000 שנה, האבוריגינים עודם שורפים שטחי יער כדי לעודד את הצמיחה של עשבים שהם אוהבים לאכול. מכאן הדרך לא רחוקה לשלב הראשוני של חקלאות באזורים טרופיים - לכרות עצים ולשרוף אותם (slash and burn) לקראת הגידול הבא. בינתיים היער מתחדש, ואם ממתינים מספיק זמן (כי היער עדיין ענק) הוא יחזור למצבו הקודם.

הביות משנה את היחס בין האדם למינים שבייתו. עכשיו הוא מטפל בהם. גם הצמחים שבויתו השתנו. רבים מהם אינם מסוגלים עוד להתקיים בתנאי בר. התירס מהווה אחד הגידולים המוצלחים ותופס שטחים ענקיים בעולם, אבל אם שומטים שדה תירס במשך כמה שנים, נעלם התירס מן השדה.

ביות בעלי חיים

כמו אצל צמחים, גם בין בעלי חיים יש כאלה שניתנים יותר לביות מאחרים. במהפכה החקלאית בחר האדם לבית בעיקר מינים שהיו מראש ידידותיים יותר לו, או שנראו מתאימים לתפקיד מסוים; בעלי חיים שהיו חסונים, נוחים לטיפול ומתרבים בקלות. בעלי חיים שיש להם ארגון סוציאלי עם מנהיג בולט, למשל, יתאימו יותר מאחרים לשליטת רועה.



המגדל שבחפירות יריחו

למינים אחרים של בעלי חיים תכונות שאינן מאפשרות ביות. כך למשל הם בעלי חיים שחיים כבודדים ומגינים חזק על הטריטוריה שלהם, וכאלה שבורחים מהר, כגון אנטילופות. גם בעלי חיים שניזונים ממזון מסוים בלבד אינם מתאימים לביות.

בני האדם לא הסתפקו בביות בעלי חיים כמקור למזונם. הם ניצלו כמה מינים גם כחיות עבודה בשדה, בהובלה, בטחינה, בשמירה, כספקי צמר ועורות, אך גם (סוסים) למלחמה - ולהפך - לספורט ולשעשוע גרידא. האימוץ של צמחי בר ובעלי חיים מבויתים הביא בצד השלילי להתרופפות הקשר בין האדם והסביבה הטבעית.

שינויים חברתיים בעקבות המהפכה החקלאית

עם הופעתם של יישובי קבע והייצור של כמויות מזון לשיווק החלה האוכלוסייה להתרבות. המעבר מחלב אם כמזון תינוקות בלעדי לחלב בעלי חיים אפשר לנשים ללדת מדי שנה. הידיים הנוספות היו נחוצות לעבודה בשדות, והפיות החדשים חיסלו לעיתים גם את עודפי המזון שנשארו.

בגלל העונתיות של הגידולים, אבל גם בגלל חוסר הוודאות הבסיסי האופייני לחקלאות, האיכרים



סוס בר מונגולי

זריעה בעזרת מקל מחודד



המפה של ניקולאי ואווילוב

חייבים לתכנן את עבודתם זמן רב מראש. מאותה סיבה הם צריכים לייצר גם יותר מזון ממה שנחוץ לקיום ולשמור היטב על עודפים אלה. ואל נשכח את השותפים של החקלאי - השליטים והאליטות - שנהגו לאורך ההיסטוריה לקחת את חלקם. הדאגה לעתיד לעולם לא עוזבת את האיכר.

כמויות המזון שהצליחו בני אדם לייצר אפשרו ליותר ויותר אנשים להצטופף יחד בשטח קטן. כך גדלו ערים, כך גדל גם הצורך בשירותים, ובני האדם נאלצו לפתח מקורות פרנסה חדשים.

ממקל כמעדר למחרשה על טרקטור

הכלי הראשון ששימש את האדם לעיבוד הקרקע היה מוט עץ מחודד בקצהו. בעידן הברזל, ואולי כבר בעידן הברונזה, הוסיפו "יזמים" לקצה המקל חוד ממתכת. לחלק מהכלים הוסיפו ידית ישרה ולאחרים ידית מכופפת. כך נוצרו **אתי חפירה ומעדרים**, בהתאמה. במשך אלפי שנים עיבד האדם את שדותיו באמצעות מעדרים ואתים, עד שלפני כ-6,000 שנה הומצאה במסופוטמיה **המחרשה**, שהייתה מורכבת ממוט עץ מחודד לחדירה לקרקע וממוט שני (או חבל) מחובר אליו, למשיכה. את המחרשה הראשונה הפעילו שני אנשים: אחד החזיק את המוט שחודר לקרקע ואדם נוסף (או שניים) משכו את המחרשה.

המצאת **העול** אפשרה רתימה של בעלי חיים; קודם שוורים ומאוחר יותר סוסים. המצאה גאונית נוספת באה לאזורנו מסין בערך 200 שנה לפני הספירה - **מחרשת הכנף**, ההופכת את הקרקע תוך שהיא קוברת את העשבייה, את שיירי הגידול הקודם ואת הזבל שמפזרים קודם על פני השטח. באירופה נכנסה מחרשת הכנף לשימוש רק לפני כ-1,000 שנה.

המהפכה החקלאית הראשונה התחילה באזורנו, כאשר בני האדם בייתו וטיפחו בהדרגה דגניים כמו **שעורה ואם החיטה** (שאהרון אהרונסון מצא ב-1906 בטורקיה). קדמונינו באזור בייתו גם קטניות כגון **עדשים ואפונה**, עצי פרי כגון **התאנה**, וכמה מיני בעלי חיים כגון **כבשים, עיזים ובקר**. מהפכות חקלאיות התרחשו באופן עצמאי בכל היבשות (חוץ מאוסטרליה), אם כי בהפרש של אלפי שנים.

ניקולאי ואווילוב (1887-1943)
 וחקר המהפכות החקלאיות



ניקולאי ואווילוב (Nikolai Vavilov) היה הבן של סוחר רוסי שעלה ממעמד האיכרים. הוא למד אגרונומיה, פיזיולוגיה של צמחים וגנטיקה. ב-1922 הוא נבחר לעמוד בראש המכון לאגרונומיה ניסויית של ברה"מ, שבעבור כמה שנים הפך לאקדמיה הלאומית לחקלאות על שם לנין. הוא הקים יותר מ-400 תחנות מחקר במדינה הענקית, שהעסיקו מעל 20,000 חוקרים. ניקולאי ואווילוב נחשב לחוקר הידוע ביותר בעולם בתחום של ביות צמחים במהפכה החקלאית. ב-115 מסעות הוא ביקר ב-64 מדינות כדי לחקור ולמפות את צמחי הבר ששימשו כמקור לביות צמחי התרבות החשובים. במסעות אלה רכב בעיקר על פרדות. הוא הגיע לאוסף של 250,000 זרעים ממיני בר ותרבות.

על סמך מחקריו מצא ואווילוב שהגידולים התרבותיים בויתו באזורים שבהם נמצאת השונות הגנטית הגדולה ביותר של מיני בר מאותו גידול. הוא זכה לכבוד רב על מחקריו, ובין היתר נבחר כחבר זר של החברה המלכותית של לונדון - כיבוד שבו זכו רק מעט מדענים. בברה"מ נערץ כגיבור תרבות - עד שבאה הנפילה והסוף הטרגי בעקבות פרשת ליסנקו. כיוון שמדובר במקרא המפורסם ביותר של התערבות הפוליטיקה האידאולוגית במדע המודרני, ראוי לציין אותו כאן, לפחות בקיצור: אגרונום מפוקפק בשם ליסנקו טען בכנס סובייטי-רוסי ב-1929 שמטפח הצמחים מיצ'ורין, שלא היה מדען, "הוכיח" שאכן תכונות נרכשות בחיטה עוברות בזרעים (כפי שהאמין למארק) ושה"מנדליזם-מורגניזם היא תיאוריה ריאקציונית, בורגנית וקפיטליסטית". ליסנקו זכה לתמיכתו של סטלין, ואווילוב פוטר מתפקידו וגנטיקאים רבים, שנשארו נאמנים לאמת המדעית, נעצרו. גם ואווילוב לא שתק והכריז עם רמז לפעולות האינוויזציה בימי הביניים: "נעלה על המוקד, נישרף, אבל לא נחזור מהשקפותינו". הוא נעצר, הואשם בתכנון קונספירציה ובריגול, עונה ונידון למוות. הוא מת בבית סוהר, שבור ומורעב בתא מבודד. אחרי מות סטלין טוהר שמו של ואווילוב, והוציאו בולי דואר על שמו.

אזורי הפיתוח החקלאי העיקריים

לפי מחקריו של ואווילוב ומדענים אחרים בעשרות השנים האחרונות, קיימים על פני כדור הארץ כמה אזורים ראשיים שבהם אירעו מהפכות חקלאיות עצמאיות - ולא רק פעם אחת - ולידם מרכזים קטנים יותר, מפוזרים על מפת כדור הארץ. מפה 1 (מימין) היא המפה שצייר ואווילוב ב-1940.

במפה מסומנים האזורים העיקריים שבהם מצא ואווילוב מרכזים של ביות צמחים.

בינתיים נערכו מחקרים נוספים רבים. המדענים מצאו עוד קושי: ייתכן שצמח תרבותי בוית קודם במקום אחד, אבל פותח אחר כך במקום אחר, אפילו כזה שמרוחק. המחקרים החדשים יותר השפיעו על הרכב הלוח הבא:

המינים העיקריים שבויתו	הזמן	האזור
שעורה, חיטה*; כבש, עז, בקר, חזיר, חמור, כלב	10,000	המזרח התיכון (הסהר הפורה)
אורז, דוחן; תאו, חזיר, תרנגולת, כלב	8,500	סין עם ריכוזים בדרום ובצפון
תירס, שעועית, קשות	4,800	מקסיקו המרכזית
תפו"א, בטטה; למה, אלפקה	4,500	דרום-מרכז האנדים
דלעת, קינואה	4,500	ארה"ב המזרחית
סורגוס, דוחן; בקר	4,000	אפריקה דרומית מהסהרה
טארו, ים, קוקוס, בננה, הדסים, תבלינים רבים		**דרום-מזרח אסיה

* באזור הסהר הפורה בייתו שני מינים: Einkorn=Triticum monococcum (diploid)

וגם Emmer = Triticum dicococum (tetraploid)

** אזור דרום-מזרח-אסיה תרם הרבה צמחי מאכל חשובים, אבל בגלל המחסור במחקרים ארכיאולוגיים אין אפשרות לקבוע מתי התרחשה המהפכה החקלאית בדרום מזרח אסיה. לאזורים הלא מרכזיים שייכת הערבה האירו-אסייתית (קזחסטן). בה נמצאה רק לפני כמה שנים הוכחה שהסוס בוית על ידי בני השבט בוטאי, לפני כ-6,000 שנה.

שתי הגישות לחקר המהפכה החקלאית - הגישה הביולוגית של ואווילוב והגישה הארכיאולוגית, כפי שתוארה במקרה של יריחו - משלימות זו את זו. הארכיאולוגים למדו אחרי מלחמת העולם השנייה לשפר את השיטות לחקר שאריות של הצמחים ובעלי החיים שגילו בחפירות. זה התחיל עם שכלול הטכניקות של הפרדת השאריות מהאדמה במגשי מים שונים, עבר לקביעת גיל השאריות בעזרת פחמן רדיואקטיבי וסריקה במיקרוסקופ אלקטרוני והגיע עד לשימוש בשיטות ביוכימיות לקביעת הרכב הדנ"א (DNA). עד היום יותר מ-90% מהקלוריות שבני האדם ניזונים מהן מופקות ממינים שהוזכרו כאן. שום צמח או בעל חיים חשוב אחר לא בוית באלפיים השנים האחרונות!

המהפכה המדעית והמהפכה התעשייתית

ברוב ספרי היסטוריה מתוארת המהפכה התעשייתית בהקשר לגידול הערים והאוכלוסייה הצפופה שלהן. יובל נח הררי מזכיר לנו שלמעשה קדמה למהפכה התעשייתית מהפכה עוד יותר בסיסית – התפתחות המדע. אחרי התקופה הארוכה של ימי הביניים, שבה כמעט שום דבר חדש לא הומצא, התחיל סביב תחילת המאה ה-16 עידן חדש שבו החלו פני האנושות להשתנות לגמרי. קראו לתקופה רנסנס ("לידה מחדש" של תקופת הפילוסופים היוונים והרומים), או תקופת ההארה וההשכלה (enlightenment). המהפכה המדעית הביאה לשינויים טכנולוגיים עצומים שקודם לכן לא עלו על מחשבתם של החולמים הגדולים ביותר, וכיום היא נראית מובנת מאליה. היא מבוססת על שלושה שינויים מהפכניים בדפוסי החשיבה האנושית (כפי שניסח הררי):

1. הנכונות להודות בבורות. המדע המודרני נוטה להכיר בכך שהוא לא יודע הכול, ונוטה להטיל ספק אפילו בתיאוריות החשובות ביותר שלו.
2. ההתבססות על תצפית ומתמטיקה. המדע שואף להשיג ידע חדש על ידי כך שמדענים אוספים תצפיות על העולם, ומשתמשים בכלים מתמטיים כדי לחבר את התצפיות זו לזו וליצור מהן תיאוריות.
3. השגת כוחות חדשים. המדע המודרני אינו מסתפק ביצירת תיאוריות. הוא שואף להשתמש בתיאוריות כדי להשיג כוחות חדשים, ובפרט כדי לפתח טכנולוגיות חדשות.

במהפכה המדעית תרמו גם אנשים משכילים, שלא תמיד היו מדענים, לקידום הטכנולוגיה החקלאית, ומן הראוי שניזכר גם את תרומתם.

במהלך המאה ה-18 פותחו במערב אירופה מחרשות כנף, עשויות ברזל. ב-1837 ייצר לראשונה המסגר ג'ון

ג'תרו טאל (1741-1674)
ו"הממשק סוס-מעדר"



Jethro Tull היה עורך דין באנגליה הוויקטוריאנית שגדל במשק חקלאי. בעקבות מחלת ריאות הוא ביקר בצרפת ובאיטליה. כיאה למשכיל בתקופת

"המהפכה החקלאית השנייה", הוא

אסף מידע על השיטות החקלאיות הנהוגות בה. טאל התרשם במיוחד מהעידורים הרבים שהיו נהוגים אצל מגדלי הגפנים. הוא חזר למשק אביו והמציא **מכשיר לעידור שנתמך בסיועו של סוס, וכן המציא מחרשה משופרת וגם מכונת זריעה**, שבאמצעותה הוא הטמין את הזרעים בעומקים וברוחים אחידים ורצויים, שלוש שורות במקביל ועם משדדה לכיסוי הזרעים.

טאל נחשב כאחד האבות של החקלאות המדעית-אמפירית. הוא תיאר את רעיונותיו בספרו "ממשק סוס-מעדר" (Horse-hoe husbandry). טאל חשב, בטעות, שכל המזון שקולטים הצמחים, מקורו בחלקיקי הקרקע. לכן הדגיש את החשיבות של אוורור הקרקע במקום זיבולה. בניגוד להבנתו את מבנה הקרקע, ידיעותיו (ואלו של בני דורו) על הזנת הצמחים היו עדיין פרימיטיביות.



מכונת הזריעה של טאל

דיר כנף מפלדה, ולקראת סוף המאה ה-19 הומצאו בארה"ב מחרשות דיסק גדולות.

אחרי אלפי שנים של עבודת אדמה ידנית שנתמכה בבעלי חיים, הביאה המהפכה התעשייתית את החקלאות הממוכנת. בעקבות הפיתוח של מכונת הקיטור, עדיין במאה ה-19, הוכנסו לשימוש לוקומובילים, קטרים שמשכו מחרשה. הלוקומובילים היו כבדים מאוד ותנועתם בשדות הייתה מגושמת. בהמשך הם הוחלפו על ידי טרקטורים שנעו על גלגלים בלי צמיגים.

בתחילת המאה ה-20 פיתחו טרקטורי זחל (במקביל לטנקים). הפעלת הטרקטור שוכללה כאשר המהנדס האירי הארי פרגוסון המציא מערכת להרמה הידראולית של כלים רתומים לטרקטורים. בכך הפך את הגורר והנגרר ליחידה אחת, דבר שהקל מאוד על תמרוני הטרקטור בסוף השורה.

התפתחות המחרשה מדגימה כיצד טכנולוגיות תעשייתיות השפיעו בכל הזמנים גם על הגברת היעילות של העבודה בחקלאות.



מחרשות שונות

יוסטוס ליביג (1803-1873) - מייסד הכימיה החקלאית



Justus von Liebig ידוע בין מדעני הטבע בעיקר כאחד האבות של הכימיה האורגנית ובין הצרכנים כממציא תמצית מיץ הבשר. קברניטי האוניברסיטאות זוכרים אותו כמי שהחדיר הכשרה מקצועית ברמה גבוהה לקודשי האקדמיה. הביולוגים מעריכים אותו כחוקר הזנת הצמחים, ולחקלאים הוא זכור כמייסד הכימיה החקלאית, תורת הדישון וההדברה הכימית. בספרו "הכימיה האורגנית ביישומה בחקלאות" קידם ליביג את הרעיון שהכימיה עשויה להביא לשינויים מהפכניים בחקלאות, להגברת היבולים ולצמצום ההוצאות. הספר תורגם לשפות שונות, הותקף בשצף קצף, ובסוף השפיע מאוד על קידום תחום הדישון הכימי. מחקריו על סינתזה ופירוק בעולם הצומח הביאו אותו לאחד החוקרים הראשונים שקידם את הרעיונות של שימור ומיחזור.

בזמנו של ליביג עוד התווכחו אם הצמחים קולטים את הפחמן והחנקן מן האוויר או מן הקרקע. ליביג תמך בסברה שהצמחים מפיקים את הפחמן מן האוויר ואת החנקן מן הקרקע. הוא פיתח את הרעיון שתרכובות אי-אורגניות יכולות לספק לצמחים חומרי מזון באותה יעילות כמו חומרים אורגניים (קרי זבל מן החי). כמרצה דגול הוא עזר להפיץ את "חוק המינימום" של שפרנגל (Sprengel), שלפיו התפתחות הצמח מוגבלת על ידי המינרל הנמצא בכמות יחסית הקטנה ביותר. כך קיבל הדגם הפופולרי את השם "החבית של ליביג".

ליביג טעה כאשר חשב שהצמחים יקבלו מספיק אמוניה מהאטמוספירה וכי החומר חודר לקרקע כך שאין צורך בדישון חנקני. במהדורה השביעית (בגרמנית) של ספרו "הכימיה החקלאית" הוא תיקן את דעתו הקודמת ואף המליץ על דישון חנקני.

תחנת הניסיונות רותמסטד השיגה תקציבים ממשלתיים, ומאוחר יותר גם תמיכה פיננסית מארגונים כלכליים וממקורות פרטיים. כך יכלה להמשיך במחקרים חקלאיים לטווח ארוך ולשמש כמודל לאחרים. ספק אם יש היום מדינה שאין בה תחנת ניסיונות חקלאית, שבה חוקרים את הבעיות הספציפיות המתעוררות בחקלאות המקומית. תחנת הניסיונות החקלאית הראשונה בארץ ישראל הוקמה על יד אהרון אהרונסון ב-1910 בעתלית.

הדברת מזיקים ומחלות בחקלאות

חרקים, פטריות, וירוסים ואורגניזמים נוספים מתחרים

בהשפעת הפריחה של החשיבה החופשית התפתחו במאה ה-17 מגמות פוליטיות, דתיות וטכנולוגיות חדשות, שהשפיעו גם על החקלאות, אחרי זמן הדמדומים של ימי הביניים וגילוי "העולם החדש". הרפורמה התחילה בבריטניה ועברה בעיקר לאירופה המערבית וממנה למזרח אירופה ולקולוניות החדשות. לאווירה של ההתחדשות תרמו התפתחויות פוליטיות כגון **פירוק שאריות הפיאודליזם והתפשטות הקולוניאליזם**.

בחקלאות השתנו הרבה דברים:

- * איכרים רבים הפכו לבעלים על אדמותיהם ומספר המשקים המשפחתיים גדל.
- * הכניסו גידולים חדשים למחזור הזרעים - כגון לפת וקטניות, בדרך כלל תלתן. כך מוצה הצורך בשמיטת השדות כל שנה שלישית והשטח המעובד גדל ב-33%.
- * לאחר גילוי הגואנו בדרום-אמריקה, הוא הועבר לאירופה כזבל אורגני.
- * התחילו לגדל צמחי תרבות חדשים כמו תפוחי אדמה, וכן יבולים שונים לתעשייה.
- * הקפידו להשתמש יותר בזרעים משופרים ובבעלי חיים מגזעים ששיבחו.
- * נפתחו שווקים וכבישים חדשים, ואמצעי התחבורה השתפרו.

יש הקוראים לרפורמה החקלאית "**מהפכה חקלאית שנייה**", אבל בספק אם הביטוי מוצדק. השינויים בתקופה זו אומנם היו ניכרים, אבל לא בקנה מידה של המהפכה החקלאית המקורית, שנמשכה במשך עידן של עשרות אלפי שנה.

תחנת הניסיונות החקלאית ברותמסטד (Rothamsted)

צעד חשוב נוסף בפיתוח החקלאות המודרנית נעשה באנגליה ב-1843, כאשר ג'ון לוז (John Bennet Lawes) ייסד את תחנת הניסיונות החקלאית הראשונה בעולם ברותמסטד. כמו ג'תרו טאל 150 שנה לפניו, גם לוז ערך את הניסויים בחוותו; וכמו ליביג, הוא היה בעצמו מדען - אם כי לא באותו פורמט. יחד עם Joseph Henry Gilbert, כימאי צעיר שהצטרף אליו, התחיל לוז לערוך ניסויי שדה על ההשפעה לטווח ארוך של הדישון הכימי האי-אורגני והאורגני על חיטת חורף. ניסויים אלה נערכים באותו שטח גם כיום!

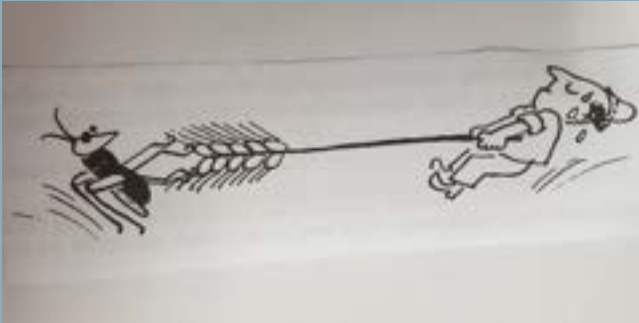
במשך הזמן הוסיפו ברותמסטד מחקרים על צמחים ונושאים חקלאיים חדשים רבים, והקימו מחלקות שונות שבהן חקרו מדענים שהתמחו במדעי החקלאות השונים. אולי החוקר הבולט ביותר שהצטרף לרותמסטד היה רונלד פישר הסטטיסטיקאי. תפקידו היה למצוא מה ניתן לדלות ולתמצת מהכמות הענקית של נתונים שהצטברו מניסויי השדה. במסגרת זו פישר פיתח את כללי היסוד של תכנון ניסויי שדה, ורותמסטד התפרסם בכל העולם כמרכז למחקר הסטטיסטיקה והגנטיקה.

הדברה ביולוגית ומשולבת

החסרונות של ההדברה הכימית הובילו את המדענים לבדוק באיזו מידה אפשר להשיג תוצרת חקלאית נקייה שפגיעתה בסביבה תהיה מזערית. זאת הם מצאו בהדברה ביולוגית. העיקרון של ההדברה הביולוגית מבוסס על העובדה שאין יצור חי שאין לו אויבים טבעיים. כשרוצים להיעזר באויב הטבעי צריכים לדאוג שיהיו לו תנאים אופטימליים לפעולה. הדבר לגמרי לא פשוט, אבל חייבים לבדוק את האפשרויות.

כפתרון לסבך הבעיות הקשורות בהדברת מזיקים ומחלות הוצעה ההדברה המשולבת. משמעה היא שמוותרים על ריסוסים רק "ליתר ביטחון", לפי לוח

עם החקלאי על היבול בשדה ובמטע. כבר הנביא יואל (יואל ב' א-ב) תיאר בלשון דרמטית את הנזק העצום שגורם הארבה. כאשר התרחשו פלישות של ארבה, בזמן שהטורקים היו בארץ, נדרשה כל משפחה לאסוף לפחות פח שלם של ארבה ולמסור אותו לשלטונות. בשנים 6-1845 השמידה מחלת הכימשון באירלנד את כל יבול תפוחי האדמה - המזון העיקרי של האוכלוסייה. מאות אלפי אנשים מתו ושני מיליון נוספים נאלצו להגר, רובם לארה"ב. עד למאה ה-20 עמדו לרשות החקלאים כהגנת הצומח רק שמנים מינרליים, ואלה יעילים בהדברה של מזיקים חקלאיים מעטים בלבד.



הדי-די-טי מצטבר בשומן של בעלי חיים וכך עובר לחלב.

לבני אדם (למשל מלריה, קדחת צהובה וטיפוס). הבריטים הבריחו את ה-די-די-טי משווייץ לאנגליה ולחיילים ביערות דרום-מזרח אסיה, ובעזרתו הדבירו את החרקים שהעבירו את גורמי המחלות. לאחר המלחמה ניצלו מיליוני אנשים ממוות הודות לדי-די-טי. גם העולים שהגיעו ארצה מיד לאחר קום המדינה עברו טיפול בדי-די-טי מחשש שהם נושאים חרקים מעבירי מחלות.

ב-1948 קיבל מילר פרס נובל לרפואה עבור פיתוח הדי-די-טי. לא עברו שנים רבות עד שגילו שדווקא לאותן תכונות של הדי-די-טי, שעבורן קיבל מילר את הפרס, יש השפעה גרועה מאוד על הסביבה. אומנם הדי-די-טי קוטל מינים רבים של מזיקים, אך הוא משמיד גם הרבה חרקים מועילים. נכון, החומר נשאר פעיל זמן רב וכמעט אינו מתפרק, אך דווקא בשל כך הוא מהווה סכנה עצומה לסביבה. התברר שהדי-די-טי מצטבר בגופם של בעלי חיים וגורם לשלל נזקים. בין היתר הוא גורם לקליפות הביצים של ציפורים ממינים רבים להיעשות חלשות, עד שהן נשברות בקלות; בשל כך נכחדו מינים שלמים של ציפורים. כמו כן, כאשר מרססים די-די-טי על מרעה, הפרות אוכלות את העשב עם הדי-די-טי והוא עובר לחלב, שאחר כך מגיע לתינוק. ויש עוד דוגמות רבות של נזקים סביבתיים כבדים שגורם הדי-די-טי. לכן נאסר השימוש בו ברוב המדינות, כולל ישראל.

DDT - החומר שנאסר בגלל התכונות שבגינן זכה ממציאו בפרס נובל

ב-1874 סינתז סטודנט יהודי בגרמניה במסגרת עבודת הדוקטור שלו חומר שלא קיים בטבע - דיכלורו-דימתיל-טריכלורו-מתאן, או בקיצור די-די-טי. הוא תיאר את התכונות הכימיות והפיזיקליות של החומר בכמה שורות, וכסיכום כתב: "לחומר הזה אין שום שימוש מעשי". באותו זמן אף אדם לא חשב שניתן ליצור במעבדה חומרים שאינם קיימים בטבע, והמסוגלים לקטול חרקים מזיקים.

ב-1939 חיפשה קבוצת מחקר בחברת גייגי (היום חלק של נוברטיס) בבזל, בראשות פאול מילר (Paul Muller), חומר נגד עש הצמר. הקבוצה סינתזה חומרים שונים וביניהם גם די-די-טי, ובחנה השפעתו על המזיק הספציפי. ההצלחה הייתה מוגבלת. בדרך מקרה גילתה הקבוצה שכבר אין זבובים במעבדה ושהחומר החדש קוטל חרקים ממינים שונים. החוקרים מצאו שהחומר החדש פועל במשך זמן רב ואינו מתפרק. יתר על כן, ייצורו היה זול והוא לא רעיל לאדם. מצוין! - חשבו המייצרים - כך נוכל לחסוך ריסוסים או איבוקים, וגם חקלאים עניים, למשל בארצות מתפתחות, יוכלו להשתמש בו.

במלחמת העולם השנייה לחמו הבריטים והאמריקאים באזורים הטרופיים של האוקיינוס השקט הדרומי. רבים מהם נפטרו ממחלות שהועברו על ידי חרקים

רודולף שטיינר (1861-1925) - מייסד החקלאות הביו-דינמית



Rudolf Steiner היה יהודי הונגרי שחי בגרמניה ובשווייץ. הוא היה פילוסוף, תיאוסוף, ארכיטקט, מבקר ספרותי ומייסד התנועה האנתרופוסופית. ב-1924 פנו אליו חקלאים ששמו לב שהקרקע במשקם התדרדרה וכי חלה פגיעה באיכות הגידולים ובבריאות בעלי החיים אחרי השימוש בדשן כימי. הם ביקשו מרודולף שטיינר עצות כיצד לשפר את המצב. הוא נתן להם שמונה הרצאות שבהן הסביר את שיטתו, שקרא לה ביו-דינמית. זאת הייתה התנועה הראשונה שדגלה בחקלאות אורגנית. היא רואה בטיפול בפוריות הקרקע, בגידול צמחים ובעלי חיים תפקידים הקשורים ביניהם באופן אקולוגי. אבל החקלאים הביו-דינמיים מוסיפים היבטים רוחניים ומיסטיים. יש להם לוח שנה אסטרולוגי לקביעת המועד הרצוי לזריעה, ולשם הכנת הקומפוסט והריסוסים בשדות הם משתמשים בתוספות צמחיות ומינרליות, אותן הם מכינים בשיטות הנראות יותר מאגיות מאגרונומיות, כמו קוורץ טחון המיועד לקליטת "כוחות קוסמיים בקרקע".

לפתח **שיטות גידול צמחים אינטנסיביות** יותר. כך עברו רבים בעולם **מגידולי בעל לשלחין**; אבל בהרבה מקומות התנאים הטופוגרפיים אינם מאפשרים זאת.

המצאת **הממטרה** עזרה להתגבר על הקושי. אבל בשיטה זו, מתאדים מים יקרים בדרכם מהממטרה לקרקע. זאת בעיה חריפה בארצנו, שבה מקורות מי ההשקיה מוגבלים מאוד, ומהווים סעיף הוצאה ניכר בייצור. פיתוח שיטת **ההשקיה בטפטוף** תרם רבות לצמצום הקשיים. בעקבות ההצלחה של הטפטפת ושל הצידוד החדש, התפתח הידע בתחום רבות. הצורך להתגבר על המחסור במי השקיה בארץ הביא לשימוש רחב **במים ממוחזרים**.

בתי גידול

הצורך באינטנסיפיקציה של החקלאות בארצות מתועשות הביא לשימוש רב יותר **בבתי גידול מזכוכית** (בארצות בעלות אקלים קר יותר), **ומפלסטיק** (בישראל). הרעיון לא חדש, בתי גידול היו כבר אצל הרומים; כך תיעד ההיסטוריון פליניוס, שכתב כי הקיסר טיבריוס אכל מדי יום ביומו, במשך כל השנה, מלפפון. המלפפונים גודלו על גבי עגלות, שעמדו במשך היום בשמש ובלילה הוכנסו לתוך מבנה מבד משומן. באנגליה ובהולנד השתמשו מהמאה ה-17 בבתי זכוכית לגידול צמחים מארצות חמות יותר. בניית בתי הזכוכית הגיעה שם לשיא בתקופת מלכת ויקטוריה, ובארמון ורסאי קיים בית זכוכית באורך 150 מטר מאותה תקופה.

קבוע מראש, ולחלופין מרססים רק לאחר שבדיקה בשטח מראה שצפיפות האוכלוסייה של המזיק עולה מעל סף מסוים, שבו היא עלולה לגרום נזק כלכלי. מקפידים לבחור בחומרי הדברה שפגיעתם באויב הטבעי מעטה יחסית.

חקלאות אורגנית

המושג של חקלאות אורגנית נכנס לשפה בתחילת המאה ה-20 עבור משקים חקלאיים אינטגרטיביים שבעליהם שואפים לקיימות, להגדלת פוריות הקרקע ולרבגוניות ביולוגית. הם מוותרים על השימוש בחומרי הדברה סינתטיים, אנטיביוטיקה, דשנים סינתטיים, הורמוני גידול ואורגניזמים שהונדסו גנטית. מגמה זו מתרחבת, והמשוכנעים שזו הדרך הנכונה ליצור מזון התארגנו באגודות הקובעות גם מה מותר ומה אסור, נותנים אישורי "כשרות" לתוצרת, והרבה פעמים מארגנים גם את השיווק. התארגנות זו החלה כמקומית, אך לאחרונה מתרבות חברות שיווק המספקות סחורה אורגנית גם לסופרמרקטים. הארגונים הארציים מאוגדים בפדרציה הבינלאומית של תנועות לחקלאות אורגנית (IFOAM) שהוקמה ב-1972. בעשור 2001-2011 גדל שטח הקרקע המעובדת אורגנית בקצב של 8.9% בשנה, ובשנת 2012 הגיע ערך התוצרת בעולם ל-63 ביליון דולר.

ב-2016 גידלו לפי השיטה הביו-דינמית מעל 1.6 מיליון דונם. אלה מפוזרים ב-60 ארצות, 45% מהם בגרמניה. גם כמה יצרני יין ידועים עברו לגידול ביו-דינמי. יש לתנועה מערכת סטנדרטים בשם דימטר (Demeter). בהשוואות מדעיות לא נמצאו הבדלים בין התוצרת של משקים ביו-דינמיים ומשקים "סתם" אורגניים, ומבקרי התיאוריה מכנים אותה בשם "מדע מדומה", בגלל ההסתמכות היתרה על ידע אזורי ועל אמונות מיסטיות.

האינטנסיפיקציה בחקלאות במאה ה-20

תקופה זו נקראת גם "מהפכה חקלאית שלישית", אם כי היא לא הייתה מהפכנית אלא המשך ההשפעה של המהפכות המדעית והתעשייתית על החקלאות. אם הייתה מהפכה חקלאית בתקופה זו, זאת הייתה "המהפכה הירוקה" בארצות המתפתחות, שעליה נדון בהמשך.

במאה ה-20 המשיכו טכנולוגים לשכלל את **המיכון החקלאי**, ואגרונומים המשיכו לפתח זנים וגזעים המבוקשים בשוק. במקביל התרחשה גם חזרה (חלקית בלבד) לחקלאות אורגנית, כפי שהייתה נהוגה לפני המצאת הדשנים וחומרי ההדברה הסינתטיים.

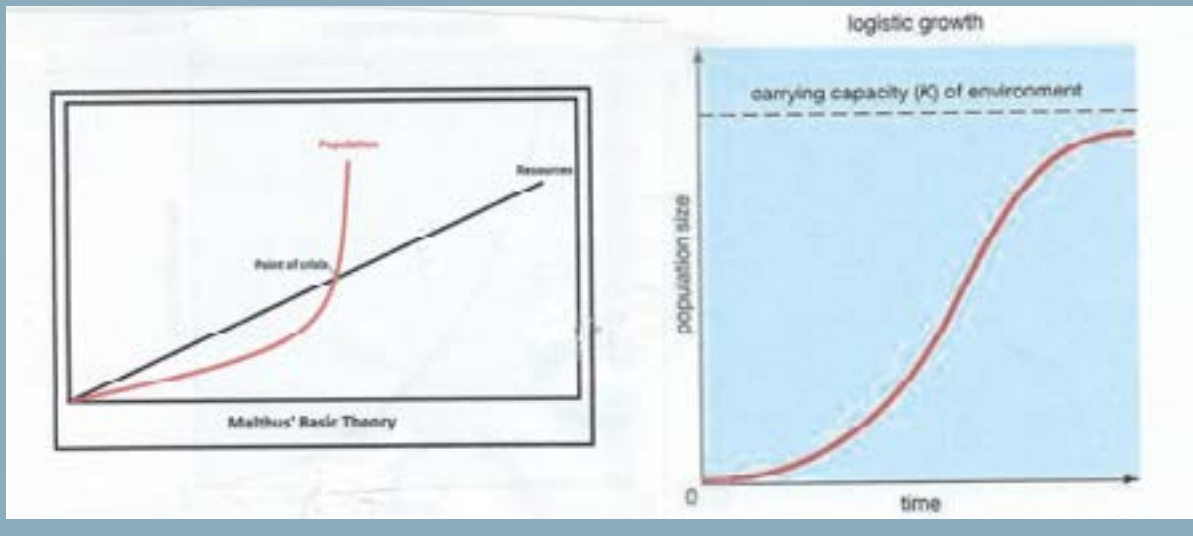
הרחבת ההשקיה

המשך גידול האוכלוסייה והאורבניזציה המזורזת הקשורה בה, צמצמו את השטחים העומדים לרשות החקלאים בארצות צפופות האוכלוסין. הדבר חייב

האם תומאס מלתוס צדק או לא?

Thomas R. Malthus היה פרופסור לכלכלה פוליטית שחי באנגליה בין השנים 1766-1834. הוויכוח אם תורתו ומסקנותיה נכונות מעולם לא היה חריף כבימינו. זה התחיל ב-1798, כאשר פרסם מלתוס את הספרון **"עיקרון האוכלוסייה"**. בבסיס העיקרון עומדת ההנחה שאוכלוסיית העולם גדלה בטור גיאומטרי ואילו ייצור המזון גדל בטור חשבוני. הוא חזה שבמוקדם או במאוחר האוכלוסייה תגדל בקצב מהיר יותר מצמיחת כמות המזון. הדבר ייצור מחסור במזון שיביא לתמותה טבעית של המוני אנשים. (ראה איורים 1, 2)

לפי התיאוריה של מלתוס, התמותה הטבעית, מרעב, מחסור במשאבים, מלחמות או אסונות טבע כמו רעידות אדמה, תאזן את המצב. הוא הציע למנוע את גידול האוכלוסייה על ידי תכנון המשפחה, נישואים מאוחרים או רוקות.



איורים 2,1

הארץ. כיום חיים עליו מעל 7 מיליארד. **אלה מהווים כ-7% מכל האנשים שנולדו מעולם!** אבל קצב הגידול של האוכלוסייה לא היה אחיד. אפשר להבחין בין שלוש תקופות, שבהן קצב הגידול היה שונה. בתקופה הראשונה, עד למהפכה המדעית, היה קצב ההתרבות נמוך. עם תחילת "הזמן המודרני" והשיפור שחל באיכות החיים, עלה קצב הגידול, בעיקר במאה ה-20, והגיע לשיא ב-1962. מאז ירד הקצב באופן דרסטי (ראה איור 3).

אבל, **מספר** האנשים שיש להזין ממשיך לעלות. הדבר יוצר **עקום סיגמואיד**, השואף לתקרה.

מומחים משערים שהאוכלוסייה תמשיך לצמוח עד שנת 2050 לערך, ותגיע לכ-10 מיליארד איש. השאלה הגדולה היא: האם נצליח ליצור מספיק מזון (ואת המשאבים המשלימים) כדי להתגבר על הפער הקיים, כאשר בו בזמן עומדים לפנינו אתגרים נוספים כמו הקטנת פליטת גזי החממה, החלפת האנרגיה הפוסילית במקורות אנרגיה שאינם מתכלים, שמירה על אקוטופים שבסכנה ופיתוח העולם השלישי?

אצלנו כבשו בתי הגידול שטחים ניכרים גם בחלק החם ביותר של הארץ, בערבה, לא רק להקדים את התוצרת, אלא גם כדי לשמור אותה מפני מזיקים ומחלות ומפני הרוח והחול המורידים מאיכות הירקות והפירות.

תולדות ההידרופוניקה

אנשים טובים חשבו שאת ההידרופוניקה המציאו בזמן "המהפכה החקלאית השלישית", אך לא כך הדבר. פרנסיס בייקון (Francis Bacon) כתב כבר ב-1627 על גידול צמחים ללא קרקע, וג'ון וודווארד (John Woodward) פרסם בשנת 1699 את ניסיונותיו לגדל נענע כגידול מים. הכינוי הידרופוניקה חדש, עם זאת. הוא נטבע ב-1927, עם התפשטותה של השיטה לגדל צמחים בתמיסות עשירות במינרלים מזינים ובמערכת המאפשרת את מיחזור המים, בעיקר בבתי גידול.

האם מלתוס צדק? לפני שנוכל לדון בשאלה זו, נצטרך לבדוק באיזה קצב אוכלוסיית העולם גדלה וכיצד השפיעה המהפכה הירוקה על ייצור המזון.

הגידול באוכלוסיית העולם

לפני 200 שנה היו פחות ממיליארד בני אדם על כדור

שבו אספקת המים מובטחת. שם הניבה החיטה ממקסיקו בלי דיֶשון 500 ק"ג לדונם, ועם דיֶשון - טון שלם; פי 10 מהיבול של הזנים המקומיים. היבול הממוצע של אורז בשנות ה-60 בהודו היה 200 ק"ג לדונם, וכעבור 30 שנה הגיע ל-600 ק"ג. בשנות ה-70 עמד מחיר כל טון על 550 דולר, ואילו בשנת 2001 על 200 דולר בלבד. הודו הפכה ליצואנית תבואה מובילה. הצמיחה ביבול נבעה - כך מאמינים - במידה שווה מקליטת הזנים החדשים, מפיתוח מפעלי השקיה ומהשימוש המוגבר בדשנים. לזן IR8 הייתה באסיה הצלחה כבירה והוא קיבל את השם "אורז פלא"; ועל בורלוג אמרו שהציל מיליארד אנשים מרעב.

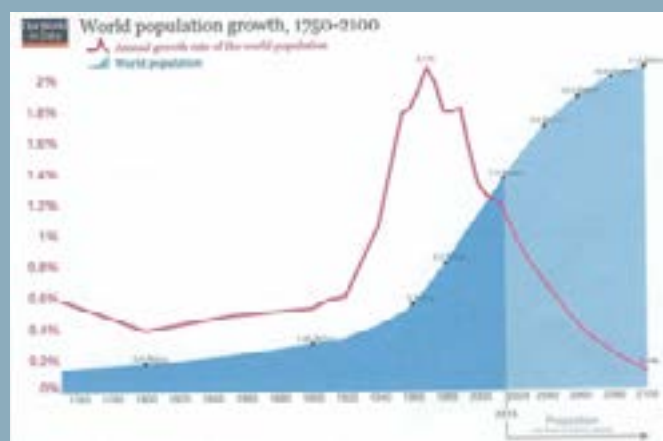
ניסו כמה פעמים להחדיר את ה-HYV גם לאפריקה, אבל שם ההצלחה הייתה הרבה יותר נמוכה. הסיבות לכך היו השחיתות שנגפה כמעט בכל מקום, חוסר הביטחון הכללי, תשתיות לקויות והיעדר רצון מצד הממשלות להירתם למאמץ. אבל גם גורמים סביבתיים הקשו על העברת המהפכה הירוקה לאפריקה.

• ביקורת על המהפכה הירוקה

המהפכה הירוקה צלחה ברוב היבשות, אך התגלו בה גם מספר בעיות, ביניהן: המעבר ממשק מעורב שמספק למשפחות את כל הדרוש לקיומן ולגידול חיטה, תירס או אורז (ליצוא או למזון עבור בעלי החיים), הוביל לתלות של האיכרים העניים בשוק גם ביחס לתזונה המסורתית שלהם, ובכפועל יוצא לפגיעה בביטחון התזונתי שלהם. האיכרים פסקו מלגדל קטניות (עדשים) המהוות מרכיב בסיסי בתפריט המסורתי שלהם. פחות מהם אומנם מתו ממחסור במזון, אך רבים סבלו מתזונה בלתי מאוזנת וממחסור בברזל ובוויטמינים שונים. החקלאות משתמשת ב-70% מן המים הנשאבים מנהרות, מאגמים ומאקוויפרים. חלק מזה נובע מהמהפכה הירוקה. חקלאים קטנים רבים נאלצו לקחת הלוואות כדי לרכוש את התשומות, וכאשר לא הצליחו לעמוד בהחזרים, הם איבדו את משקם. בגלל המיכון המוגבר הפסידו עובדים פשוטים רבים, שעבדו כסחירים, את הפרנסה שלהם. טענו גם שהעבודות לשיפור התשתיות והמיכון בחקלאות פגעו באיכות הסביבה.



נורמן בורלוג



איור 3

המהפכה הירוקה - מקסיקו כדוגמה

במקסיקו התרחשה בין השנים 1910 ל-1920 מהפכה, שבמרכזה עמדה הדרישה לרפורמה אגררית (רפורמה חקלאית). למרות השיפורים שהונהגו באזורים הכפריים, לא הספיקו לייצר מספיק מזון לאוכלוסייה המקומית. כדי להתגבר על הבעיה הקימו קרן רוקפלר, ארגון המזון והחקלאות של האו"ם (FAO), עזרת החוץ של ארה"ב והממשלה המקומית ב-1943 את המרכז הבינלאומי לשיפור התירס והחיטה (CIMMYT). בראש המרכז עמד האגרונום האמריקאי **נורמן בורלוג** (Norman Borlaug). בורלוג נחשב ל"אבי המהפכה הירוקה" וקיבל בשנת 1970 פרס נובל לשלום על עבודתו. הוא פיתח זני חיטה עמידים לחילדון, שיש להם קנה חצי ננסי וחזק המונע מהצמחים הבשלים ליפול ולאבד את הגרעינים, גם בתנאי מזג אוויר קיצוניים ובדישון חנקני מוגבר. זנים אלה מוכרים תחת השם HYV (זנים בעלי יבולים גבוהים). בתנאי השקיה, דישון והדברה אופטימליים הם נותנים יבול כפול מהזנים שקדמו להם ושנטו להישבר. בתנאי בעל וללא דישון יתרונותיהם של ה-HYV מוגבלים מאוד.

בעזרת מערכת מדריכים חקלאים שהוכשרו ונשלחו לכפרים ובעזרת פיתוח של מערכות השקיה ואספקת דשנים לחקלאים, הגיעה מקסיקו במהרה לעצמאות בייצור החיטה, ואף החלה לייצא עודפים.

הבשורה עוברת לארצות מתפתחות רבות

ב-1960 הקימו בעזרת הקרנות של רוקפלר ופורד **בפיליפינים את המכון הבינלאומי למחקר האורז (IRRI)**, שבו הכליאו זני אורז במטרה ליצור גם לאורז זנים חצי ננסיים ובעלי קנה חזק. המוצלח ביותר היה הזן IR8 ששחררו ב-1966 והניב יבול הגדול פי 10 מהזנים המסורתיים.

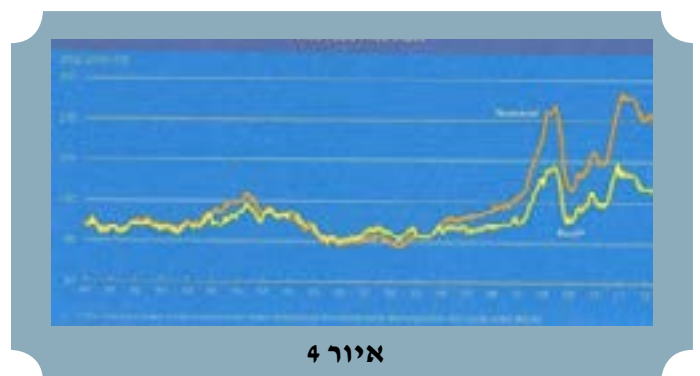
ב-1961 שרר בהודו רעב קטלני. הממשלה הזמינה את בורלוג לארצה כדי שייסייע לחולל בה מהפכה ירוקה. היבוא של זני HYV מ-CIMMYT ו-IR8 מ-IRRI נקלט בהצלחה. את הזנים ניסו ההודים לקלוט באזור פנג'אב,

· חקלאים קטנים הצליחו פחות מבעלי משקים גדולים, וכתוצאה העמיקו הפערים הסוציו-אקונומיים בין העשירים והעניים.

· העיתונאי האמריקאי מארק דאואי (Mark Dowie) טען שהמטרה העיקרית של התמיכה הכספית הרבה במהפכה הירוקה הייתה בכלל גיאופוליטית - לספק לאוכלוסייה בארצות מתפתחות מזון כדי להביא לסטביליות סוציאלית ולמנוע את הצמיחה של הקומוניזם. הוא האשים בעיקר את קרן פורד כדוגלת במטרה זו.

האם מלתוס צדק או לא?

ב-1968 פרסם פול ר. ארליך (Paul R. Ehrlich) ספר בשם "פצצת האוכלוסין" (The Population Bomb). ספרו עשה רעש גדול, ובו כתב בין היתר "...הודו לא תהיה מסוגלת ליצור אוכל למאתיים מיליון בני אדם נוספים ב-1980... מאות מיליון אנשים ימותו מרעב, למרות כל תוכניות החירום". שש שנים מאוחר יותר הודו הצליחה ליצור את כל כמות הדגניים שהייתה זקוקה להם. אבל, בשנים 2007 ו-2008 התרחשה עלייה דרמטית במחירי המזון בעולם, מה שחולל משבר מזון גלובלי, בעיקר באפריקה המייבאת תבואות, וכן הוביל להטלת מגבלות על היצוא של תבואה מארצות שבהן היה מספיק מזון, ולחוסר יציבות פוליטית. הביטחון התזונתי נפגע קשה, במיוחד לאחר העלייה הנוספת במחירי המזון שחלה ב-2011. (איור 4)



עליית המחירים נבעה מכמה סיבות:

· מחיר הנפט עלה לשיא חדש. כפועל יוצא התייקרו עלויות הייצור של דשנים כימיים וחומרי הדברה.

· עלייה בביקוש למזון מעובד, ולבשר וחלב בשווקים המתעוררים למוצרים אלה בהודו ובסין. הדבר הוביל לעלייה במחיר הדגנים שבהם הזינו את הבקר.

· פגיעה בגידולים החקלאיים עקב סופות ובצורות, שמהן סבלו בעיקר בהודו ובאוסטרליה.

· מעבר מגידול תבואות לגידול של ביו-דלק לשם אספקת דלק זול, בעיקר בארה"ב.

· ספקולציות של חברות ייצור ושיווק אשר "גוזרות קופון" מעליות המחירים, קרנות גידור המשתמשות בכוחן הפיננסי כדי לקנות כמויות גדולות של סחורות או של חוזים עתידיים במטרה להעלות את המחיר.

· מדינות המייצרות תבואות נקטו צעדים להגנה על אוכלוסייתן. בהודו, למשל, נאסר היצוא של אורז רגיל והוטל מס של 200 דולר על כל טון של אורז בסמטי, דבר שלא מנע את ההתייקרות הגדולה גם בהודו עצמה.

אחרי כמה שנים שבהן ירדו המחירים במקצת, באה ב-2011 עלייה נוספת, הפעם גדולה יותר. מעריכים שהתייקרות זו חיממה את "האביב הערבי", שממילא כבר היה בהתהוות.

נאו-מלתואיזם

כל ההתפתחויות שתוארו לעיל הביאו לרביזיה מסוימת בתיאוריה של מלתוס. לפי הניסוח החדש, "השימוש במשאבי הטבע ובעזרת דשנים וחומרי הדברה יביא להפרת המאזן האקולוגי, ובעקבותיו צפוי מחסור כללי של קרקע פורייה, מים מתוקים, מזון וחומרי גלם. יתר על כן, הפיתוח התעשייתי המוגבר גורם לזיהומים של האוויר, המים והקרקע, ולאפקט החממה. האחרון, מצידו, מגביר את ההשפעות של שינוי האקלים ואת ההופעה של בצורות".

כל שרשרת הסיבות האלה, לצד גידול האוכלוסייה בעולם השלישי, יביא להתגברות הרעב ולהתגשמות של תאוריית מלתוס.

מה אפשר לעשות כדי למנוע את ה"קטסטרופה של מלתוס"?

הוצעו כמה פתרונות חלקיים:

· צמצום כמות המזון שנאבד במעבר מהשדה לצלחת, או שנזרק לאחר אכילה. לפי הערכות, הדבר עשוי לצמצם בכ-20% את הפער בין הצורך במזון לייצור.

· מעבר מאכילת בקר לעוף המייצר פי שישה פחות גזי חממה מפרות, או ויתור על אכילת בשר.

· המשך המחקר החקלאי שאפשר את המהפכה הירוקה, והעמקתו.

· הדרכה חקלאית מוגברת, בעיקר בארצות מתפתחות, בתחום שיטות גידול ידידותיות לסביבה, דישון ושימוש בחומרי הדברה.

· העברת עודפי מזון מארצות שיש להן עודפים למדינות בהן יש מחסור במזון.

· הרחבת צורות חקלאות מתאימות לשטחים ירודים (degraded lands).

· ניצול מסודר של המזון הימי העשיר בחלבונים, כולל אצות כ-aquaculture.

· חינוך מוגבר להתנהגות אקולוגית נכונה.

האם הזנים שהונדסו גנטית יהוו צומת נוסף במהפכה הירוקה המתמשכת?

האם הייצור של מזון על ידי צמחים הנקראים טרנסגניים (transgenic) יהווה את השלב הבא במרוץ למנוע את הקטסטרופה של מלתוס? או שמא יסכנו את הבריאות

שלנו וגם את הסביבה? ישנם חוגים דתיים הרואים ביצירת אורגניזמים חדשים שאינם קיימים בטבע התערבות בכוונות האלוהים.

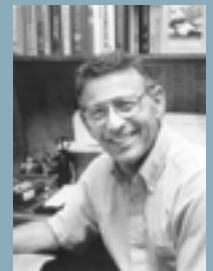
מה בין אורגניזמים גנטיים, GMO "כלליים" ואורגניזמים טרנסגניים?

הנדסה גנטית היא שיטה ביוטכנולוגית שבה מעבירים גן ספציפי שתפקידו באורגניזם ידוע, מהדנ"א של אורגניזם אחד ישירות לגנום של אורגניזם אחר. בכך משנים את ההרכב הגנטי של האורגניזם המקבל וזה משנה את תכונותיו. לתוצאה קוראים אורגניזם ששונה גנטית (Genetically Modified Organism), ובקיצור - GMO. ל-GMO יש יתרון על יצירת הכלאות "קלאסיות" בכך שיודעים מראש איזו תכונה חדשה מעבירים, בו בזמן שבטיפול הקלאסי על ידי העברת אבקה מפרח של זן אחד למשנהו לא יכולים לדעת אילו גנים עוברים לזרעים שיווצרו.

כאשר מעבירים בתהליך זה גן מאורגניזם אחד לשני שאינו שייך לאותו מין טקסונומי, קוראים לאורגניזם שקיבל את הגן טרנסגני (transgenic).

התחלת היצירה של GMO

זה התחיל בתחילת שנות ה-70. הביוטכנולוג **פול ברג (Paul Berg)** פרסם ב-1972 כיצד הצליח לבודד גנים מהדנ"א של וירוס אחד ולאחד אותו עם הדנ"א של וירוס אחר. על הישגמדהים זה קיבל כבר ב-1980 פרס נובל לכימיה. מהירות כזו של הכרה של חידוש מדעי על ידי האקדמיה השבדית השמרנית, המחלקת את פרס נובל, היה לא ייאמן.



באותה שנה נפגשו החוקרים **הרבט בויאר (Herbert Boyer)** ו**סטנלי כהן (Stanley Cohen)** בכנס מדעי והחליטו לפתח ביחד מפעל ביוטכנולוגי. שם הצליחו כראשונים לבודד גן מחיידק שהיה עמיד מפני חומר אנטיביוטי מסוים, להעביר אותו לדנ"א של וירוס ולהחדירו לגנום של חיידק ממין אחר, שהיה רגיש לאותו אנטיביוטיקה! הם גידלו את החיידק, שהכיל את הגן החדש - והוא נעשה עמיד!

כעבור שנה יצר הגרמני **רודולף יאנינג (Rudolf Jaenig)** את העכבר **הטרנסגני הראשון**. הוא עשה זאת כאשר שהה בארה"ב כפוסט דוקטורנט צעיר. הוא התעניין בחקר הסרטן והצליח להחדיר את הדנ"א של טומור שהוציא מקוף חולה סרטן לתוך עובר של עכבר, וזה אכן חלה בסרטן.

ב-1983 נוצר **הצמח הטרנסגני הראשון**, אחרי שקבוצת ביוטכנולוגים הצליחה להחדיר אגרובקטריום לתוך תא של צמח טבק ולהפוך אותו לטרנסגני - עמיד לקוטל עשבים. עכשיו אפשר לרסס את העשבים שליד צמחי הטבק בהרביציד מבלי לפגוע בצמחי הטבק.

בעייתית עוד יותר הייתה העבודה של קרייג ונטר (Craig Venter) וחבריו, שבמאי 2010 יצרו בפעם הראשונה מה שנקרא "**חיים מלאכותיים**". הם סנתזו מולקולת דנ"א ארוכה מאוד שכללה את הגנום השלם של חיידק, והחדירו אותה לתוך תא אחר. במרץ 2016 דווח על הישג מדהים עוד יותר - הסינתזה של גנום שיש לו הכי פחות גנים (473 גנים) מכל אורגניזם חי. מחקרים אלה עוררו שאלות אתיות קשות. האם המדענים משחקים כאן בלהיות אלוהים?

זה היה "להוכיח שאפשר" (בעיקר מסגרת מסחרית). אין זו הפעם הראשונה שהטכנולוגיה מפתחת יכולות המעוררות שאלות אתיות.

ממה חוששים?

הגידול הטרנסגני הנפוץ ביותר הוא הסויה. 92% מהסויה בשוק העולמי הם טרנסגניים. אחרי הסויה באים תירס, קנולה וכותנה כגידולי GMO הנפוצים ביותר. גרינפיס וארגונים דומים מתנגדים עקרונית לכל GMO כהתערבות בלתי אחראית בשיווי המשקל האקולוגי. אנשים רבים חוששים לאכול מזון "מלאכותי", במיוחד כאשר שומעים שייצורו נעשה באמצעות חיידקים. חלק מהמתנגדים לגידול זנים טרנסגניים חוששים מכך שהזנים הטרנסגניים יהיו פחות יציבים, ויטעו ליצור מוטציות שליליות. חקלאים המגדלים רק בשיטה האורגנית מתלוננים שזרעים של זנים טרנסגניים מגיעים לשדות שלהם וגורמים לנזקים כלכליים.

חיידקים (bacteria) שימשו במשך אלפי שנים ליצירת מזון כגון גבינות ומשקאות אלכוהוליים. גזעים מיוחדים פותחו לתעשייה. משתמשים בהם ליצירה של אנזימים, חומצות אמינו, טעמים מלאכותיים ומוצרי צריכה אחרים. חיידקים הם זולים, קל לגדלם, הם מתרבים מהר ויחסית קל לשנות אותם. יש להם עכשיו גם תפקיד חשוב ביצירת GMO.

איפה מותר ואיפה אסור לגדל או לייבא זני GMO?

בארה"ב, בהודו ובארצות רבות השימוש בזנים טרנסגניים ובתוצריהם מותר.

באירופה הגידול אסור, עם כמה יוצאים מן הכלל, אבל ברוב הארצות בה המזון הטרנסגני מותר לאכילה. למעשה, אין אפשרות לבדוק אם המזון הוכן מצמח טרנסגני או לא, ואין חובה לרשום אם הוא נוצר מצמח טרנסגני. למרות זאת מעדיפים מעבדי מזון רבים להדפיס על עטיפת התוצרת שהיא GMO free.

גם באפריקה התיירו את היבוא של מזון מהונדס גנטית,

הבטא-קרוטן באורז אכן מספק מספיק ויטמין A, וכמה זמן נשמר הוויטמין באורז באחסון.

לסיכום

נראה שכיום השאלה האם להמליץ על טיפוח זנים טרנסגניים למזון או לאסור זאת היא הנושא המדעי-אתי המרכזי, והיא עשויה להשפיע על עתיד החקלאות ועל הזנת האדם. אנחנו עומדים בפני מעבר מעידן תעשייתי לעידן דיגיטלי, שבו הטכנולוגיה של המידע ושל הביוטכנולוגיה (כולל הנדסה גנטית) מחליפות את מנוע הקיטור ואת יתר הכלים המכניים. וכמו שהמהפכה התעשייתית שינתה את פני החקלאות, ישנו אותה גם טכנולוגיות המידע והביוטכנולוגיה. לכן יש להניח שההנדסה הגנטית תישאר ותתפתח - נקווה שתוך שמירה על האתיקה ועל בריאות הציבור.

מקורות

בר יוסף, עופר; גרפינקל, יוסף (2008) *הפריהיסטוריה של ארץ ישראל*. ירושלים: אריאל ויקיפדיה: *מחרשה*
הררי, יובל נח (2013) *קיצור תולדות האנושות*, הוצאת כנרת
הררי, יובל נח (2018) *21 מחשבות על המאה ה-21*, הוצאת כנרת
מגר, יהושע (2017): *התפתחות החריש. נושאון מס' 123*, ע' 10-3
פרויקט יח"ס (א. בלום, עורך) (1999) *הדברה כימית או הדברה ביולוגית? בתוך: הטכנולוגיה מתקדמת, ואיכות הסביבה נשמרת*. האוניברסיטה העברית ומשרד החינוך.
אקו-ויקי: *משבר המזון העולמי*

Brock, W. H. (1997) Justus von Liebig: *The chemical gatekeeper*. Cambridge U.K.: Cambridge University Press.

Janick, J. (2015) Nikolai Ivanowich Vavilov: Plant Geographer, Genetist, *Martyr of Science*. *HortScience* 50 (6) pg 722

Smith, B. (1995) The emergence of agriculture. New York: *Scientific American Library*
The GMO Controversy: What you need to know. (2008) Whole Foods Magazine (retrieve from the internet)

Stein, G. (2010) *Domestication of plants and animals in global perspectives*. Chicago: University of Chicago.

Wikipedia:

Biodynamic agriculture

Green revolution

Jethro Tull - inventor of the plough and Jethro Tull (agriculturist)

Justus von Liebig

Organic farming

Rothamste Research Stati

אבל אסרו תחילה לגדל זנים טרנסגניים, וזאת בעיקר בעקבות ייעוץ מגורמים אירופאים. אחרי כמה מגפות רעב הרשו לחברות אמריקאיות לייבא זנים טרנסגניים גם אליהם.

בארץ נוהגים לפי חוקי אירופה, והגידול של זנים טרנסגניים אסור.

עד כה לא נמצאו שום הוכחות לפגיעה בבריאות של בני אדם שאכלו מזון שבו מרכיבים טרנסגניים.

האורז הזהוב כדוגמה לתבואה טרנסגנית חדשה

התכונות של הזנים המהונדסים החדשים לרוב טובות מהזנים הקודמים. בין היתר הם עמידים יותר מפני מזיקים ומחלות, וערכם התזונתי גבוה יותר. ב-IRRI, המכון הבינלאומי לחקר האורז, שיצר את ה-IR8 האגדי של המהפכה הירוקה, ממשיכים את הפיתוח של זנים חדשים, עכשיו תוך שימוש בטכניקות של הנדסה גנטית. אבל הפעם יש לפיתוח תכלית, דוגמת מציאת פתרון למחסור בוויטמין A. ב-2005 סבלו 190 מיליון ילדים ו-19 מיליון נשים הרות ב-122 ארצות ממחסור בוויטמין A. מחסור בוויטמין A נפוץ במיוחד באפריקה, דרומית מהסהרה, ובהודו, והוא עלול להביא לעיוורון ולמוות. מצד שני, אורז עומד בבסיס תזונתם של למעלה ממחצית מאוכלוסיית העולם, ומספק בין 30% ל-72% מהאנרגיה במזון שנאכל בארצות אסיה שונות. באופן זה, מסייע האורז לצמצם את המחסור בוויטמין.



לאורז הזהוב הכניסו שני גנים העושים ביוסינתזה של בטא-קרוטן. גנים אלה נלקחו מנרקיס ומ-*Erwinia* (חיידק קרקע). ב-2005 שיפרו את יכולת האורז הזהוב ליצור פי 23 בטא-קרוטן לעומת הזן המקורי. החברה האמריקאית לתזונה בדעה שכוס אורז זהוב מדי יום מספקת את הצורך בוויטמין A.

הוויכוח סביב האורז הזהוב

פעילים אנטי-GMO בהודו טוענים שהאורז הזהוב מקטין את השימוש במזונות מסורתיים שבהם יש מספיק וויטמינים, ומסיט את תשומת הלב מבעיית העוני. אחרים הציעו להעדיף גידול ירקות אחרות כמו בטטה, צמחי עלים ופירות כספקי ויטמין A. אחרים מצביעים על חששות שטרם נבדקו מספיק, כגון האם

צמח הקנאביס - גידול חדש לרפואה מודרנית

ד"ר נירית ברנשטיין

המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מכון וולקני

שונות בין שלושת תתי-המין יצרו אלפי טיפוסים/זנים/קווים של צמחי קנאביס הנבדלים זה מזה במופע הצמח (מורפולוגיה) ובהרכב הכימי, באופן שכיום אי אפשר לדעת בוודאות לגבי כל אחד מהם מה מקורו הגנטי.

מה בין HEMP לקנאביס רפואי?

קיימים שני טיפוסים עיקריים של קנאביס שהאנושות משתמשת בהם משחר ההיסטוריה: הֶמֶפ (HEMP) וקנאביס רפואי. שלושת תתי-המין, וכל טיפוס קנאביס המוכרים היום, הם צאצאי אב קדמון של קנאביס סאטיבה אשר מקורו במזרח אסיה. במקביל להתפתחות הטיפוסים הרפואיים (Drug-type) המכילים בד"כ ריכוזים גבוהים יחסית של קנבינואידים וביניהם החומר הפסיכואקטיבי THC, התפתח מהאב הקדמון גם טיפוס שונה המכונה המפ. צמחי ההמפ מכילים כמות

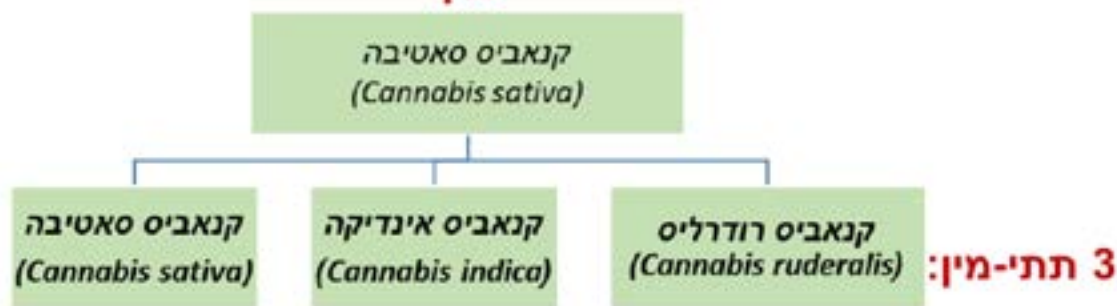
י אני?

מ

הקנאביס הוא צמח חד-שנתי דו-ביתי, אשר ההאבקה בו מתרחשת ע"י רוח. מין הקנאביס (*Cannabis sativa*) שייד למשפחת הקנאביים (*Cannabaceae*) המסתייכת לסדרת הוורדנאים (*Rosales*). הגישה הרווחת כיום לגבי הטקסונומיה של הקנאביס היא שהמין קנאביס סאטיבה (*Cannabis sativa*) כולל שלושה תתי-מין: קנאביס סאטיבה (*Cannabis sativa*), קנאביס אינדיקה (*Cannabis indica*) וקנאביס רודרליס (*Cannabis ruderalis*) (איור 1). זה מעט מבלבל מכיוון ששם המין זהה לשמו של אחד מתתי-המין. קיימות גישות שונות לגבי הטקסונומיה של הקנאביס וייתכן שמידע חדש ממחקרים גנטיים עדכניים יסייע להבהיר את העניין.

שלושת תתי-המין נבדלים במופע הצמח ובצורת העלים, הבדלים הנובעים כנראה ממקורם הגאוגרפי. הכלאות

מין:



איור 1: המין קנאביס סאטיבה נחלק לשלושה תתי-מין: קנאביס סאטיבה, קנאביס אינדיקה וקנאביס רודרליס

גדולה של סיבים בגבעול, וחלקים חיצוניים ופנימיים של הגבעול יכולים להיות מנוצלים ליצירת חבלים, בדים, ביופלסטיק וחומרים דמויי בטון המשמשים לבנייה ירוקה ועוד. הם מכילים אך כמות קטנה של THC. בגלל תכולת הסיבים הגבוהה והשימושים התעשייתיים של ההמפ, הוא מכונה גם קנאביס לסיבים (Fiber-type) או קנאביס תעשייתי (Industrial type) (Tourangeau, 2015; Keller, 2013). נמצאו עדויות ארכאולוגיות מלפני למעלה מ-10,000 שנה לשימוש בהמפ ליצירת חבלים.

על אף שצמח הקנאביס הוא גידול ותיק שהאנושות עושה בו שימוש זה אלפי שנים, מגבלות חוקיות החלות על גידולו ועל המחקר בו מקשות על איסוף ידע חדש. ישראל מובילה בעולם בחקיקה בתחום הקנאביס הרפואי, וכפועל יוצא גם במחקר ובפיתוח.

הפוטנציאל הרפואי של הקנאביס הרפואי מקורו בהרכב הכימי

הפוטנציאל הרפואי של צמח הקנאביס מקורו במגוון הרב של חומרים כימיים המצויים בו. הקנאביס מכיל כ-500 חומרים כימיים בעלי פוטנציאל להשפעה רפואית. מרבית החומרים האלו משויכים לשלוש קבוצות כימיות: **קנבינוואידים, טרפנים, ופלבנוואידים** (איור 2). **הקנבינוואידים** ייחודיים כמעט אך ורק לצמח הקנאביס. שני הקנבינוואידים הראשיים הם Δ^9 -THC (tetrahydrocannabinol), המכונה בקיצור THC, ו-CBD (cannabidiol), המכונה בקיצור CBD. THC הוא החומר היחיד בעל פעילות פסיכואקטיבית בקנאביס ובלעדיו לא היו לצמח הקנאביס השפעות פסיכואקטיביות. הקנבינואיד הראשי השני, CBD, מעורר לאחרונה עניין רב בגלל ההשפעות הרפואיות שלו אשר אינן מלוות בפעילות פסיכואקטיבית. קנבינוואידים ראשיים נוספים מצמח הקנאביס נחקרים כיום רבות, ועימם נמנים tetrahydrocannabivarin (THCV), cannabigerol (CBG), cannabichromen (CBC) ו-cannabinol (CBN). עד היום זהו בקנאביס כ-150 קנבינוואידים (Andre et al., 2016).

מרבית הפעילות הביולוגית של הקנבינוואידים מקורה בקשר למערכת האנדוקנבינוואידית בגוף האדם. חלק מהקנבינוואידים נקשרים לקולטנים של מערכת זו ובאמצעותה מחוללים את השפעתם. הקנבינוואידים הנוצרים בצמח הקנאביס מכונים פייטוקנבינוואידים (פייטו=צמח), ובגוף האדם נוצרים אנדוקנבינוואידים (אנדו=פנימי). הפייטוקנבינוואידים שונים מבחינה כימית מהאנדוקנבינוואידים, אך לשתי קבוצות החומרים הללו יש יכולת להיקשר לקולטנים של המערכת האנדוקנבינוואידית בגופנו. המערכת האנדוקנבינוואידית מעורבת בתהליכים פיזיולוגיים רבים בגוף האדם, ביניהם תאבון, תחושת כאב, מצב רוח, זיכרון, דלקת, ומטבוליזם של אנרגיה (Di Marzo and Piscitelli, 2015).

טרפנים ופלבנוואידים הם חומרים נדיפים, ארומטיים, המצויים בצמחים רבים. הם הגורמים לריח האופייני של פירות ופרחים, וגם לריח האופייני של זני הקנאביס השונים. בעולם הצמחים מוכרים אלפי טרפנים ופלבנוואידים, ובקנאביס זהו מספר מאות. גם לטרפנים ולפלבנוואידים פעילות רפואית, ולחלקם השפעה אנטגוניסטית (מעכבת) או סינרגיסטית (מגבירה) על פעולת הקנבינוואידים. לחומרים בודדים בקנאביס יש השפעה רפואית שונה או פחותה מאשר למיצוי מהחומר הצמחי, זאת עקב יחסי הגומלין בין החומרים הפעילים השונים בצמח. תופעה זו מכונה "אפקט הפמליה" (Entourage Effect). לכן, מאפשרים לחולים להשתמש בחומר הצמחי עצמו, או במיצויים ממנו, ולא בתרופות המכילות חומר יחיד או חומרים בודדים מרכיבי הקנאביס. עם התפתחות הידע הרפואי בדבר השפעות הקנאביס ייתכן שניתן יהיה לזהות פעילות מועילה של צירופי מרכיבים שונים בקנאביס הרפואי למחלות שונות, ולנצל את הידע הזה לפיתוח תרופות ייעודיות למחלות ספציפיות המורכבות רק ממרכיבים אלו.

הפעילות הביולוגית של קנאביס רפואי נובעת מהשחקנים העיקריים

(מטבוליטים משניים)

פלבנוואידים
(מספר מאות)

טרפנים
(מספר מאות)

קנבינוואידים
(150)

איור 2: החומרים בעלי הפוטנציאל הרפואי בקנאביס שייכים לשלוש קבוצות כימיות עיקריות: קנבינוואידים, טרפנים ופלבנוואידים. בניגוד למטבוליטים הראשוניים כדוגמת סוכרים וחלבונים אשר הצמח אינו יכול להתקיים בלעדיהם, חומרים אלו הם מטבוליטים משניים. אלו הן תרכובות בעלות תפקידים תומכים בצמח, דוגמת חומרי הגנה מפני מזיקים. חומרים אלה בדרך כלל אינם חיוניים; במקרים רבים הם נוצרים כתוצאה מחשיפה של הצמח לעקה, ועשויים להיות להם תפקידים אקולוגיים או פיזיולוגיים המשפיעים על האופן בו הצמח מתנהג עם סביבתו. מכיוון שכך, יצירתם בצמח מושפעת מתנאי הסביבה להם נחשף הצמח.

חשיבות האחידות הכימית (הסטנדרטיזציה) ביבול הפרחים

בניגוד לתרופות קונבנציונליות, שבהן כמות החומר הפעיל רפואית קבועה וידועה עבור כל טבליה הניתנת לחולה, בקנאביס רפואי כמויות החומרים התרופתיים בחומר הצמחי (תפרחות) שצורך החולה אינן בהכרח קבועות. סוגי הקנבינואידים, הטרפנים והפלבנואידים וכמותם עשויים להשתנות בין תפרחות שונות על אותו הצמח, בין צמחים שגדלו באזורים שונים בחממה, ובעונות שונות של השנה. זאת מכיוון שיצירת המטבוליטים המשניים בצמחים ובקנאביס מושפעת מאוד מתנאי גידול כגון טמפרטורה, עוצמת התאורה ואיכותה, לחות האוויר, משטר הדישון וכן תנאי עקה כמו יובש ומליחות (Gorelick and Bernstein, 2017; Gorelick and Bernstein, 2014). לכן, שימוש מוסדר בקנאביס לצרכים רפואיים מחייב התמודדות עם אתגר השונות וחוסר ההדירות בפרופיל הכימי של החומר הצמחי המשווק לחולים. סטנדרטיזציה וייצוב של ריכוזי החומרים הפעילים בצמח דורשים הבנה של הגורמים המשפיעים על ייצורם וצבירתם ברקמה הצמחית וזהו אתגר מרכזי העומד כיום בפני חוקרי ומגדלי הקנאביס הרפואי.

במעבדתנו מתקיימים מחקרים ללימוד השפעת תנאי סביבה ותנאי גידול כגון תאורה, דישון, השקיה וטמפרטורה על צמח הקנאביס, זאת לשם פיתוח ממשק גידול מיטבי. בנוסף, מתבצע טיפוח זנים לאחידות ולפעילות מיטבית למחלות שונות.

גידול מסחרי של קנאביס - צמח יום קצר

קנאביס הוא צמח יום קצר. כלומר, הוא פורח כאשר מספר שעות האור ביממה נמוך ממספר מירבי מסוים. או, אפשר לומר, כאשר מספר שעות החושך ביממה גדול יותר ממינימום מסוים. לכן, גידול מסחרי של קנאביס מחייב שליטה בשעות האור אליהן נחשף הצמח. אפשר לחלק את הגידול המסחרי לשתי תקופות עיקריות - תקופת הצימוח ותקופת ההפרחה. **בתקופת הצימוח** נוהגים לגדל את הצמחים הצעירים במשטר של שש שעות אור ושמונה עשרה שעות חושך, ובתנאים אלו הצמחים מתפתחים וגטטיבית ולא מפתחים תפרחות, אשר הן היבול המסחרי בקנאביס. כאשר הצמח מגיע לגודל רצוי - בהתאם לזן ולנוהג הגידול של המגדל - מתחילים את **תקופת ההפרחה**. לשם כך מעבירים את הצמח למשטר של יום קצר בן שתיים עשרה שעות אור ושתיים עשרה שעות חושך, לצורך השראת פריחה עד להבשלת התפרחות והקטיף. כשבועיים לאחר תחילת שלב הפריחה מתפתחות תפרחות באזורי ה"מפרקים" של הענפים והעלים. בשלב זה ניתן להבדיל בין שני הזווגים - צמחי הזכר מצמיחים שקי האבקה על מנת להפרות את הנקבות, וצמחי הנקבה מפתחים פרחים ששטח פניהם מכוסה בשערות בלוטיות (טריכומות), המפרישות וצוברות את החומרים הפעילים (קנבינואידים, טרפנים ופלבנואידים) (איור 3). מכיוון שהחומרים הפעילים בצמח הקנאביס נוצרים בעיקר בטריכומות הנוצרות על

המטבוליטים המשניים נוצרים ונצברים בראש הכדורי של **שערות בלוטיות (טריכומות)** המתפתחות מהאפידרמיס (אשר היא שכבת התאים החיצונית המכסה את פני הצמח) בחלקים שונים של צמח הקנאביס: על הגבעול, על העלים, אך בעיקר **בפרחים לא מופרים על צמחי נקבה** ובעלי התפרחת (איור 3). קיימים בקנאביס סוגים שונים של טריכומות. הטריכומות היוצרות את המטבוליטים המשניים מורכבות מגבעול ומראש בלוטה (איור 3).



איור 3: שערות בלוטיות (טריכומות) בקנאביס רפואי. החומרים הפעילים בקנאביס נוצרים ונצברים בראש הכדורי של שערות בלוטיות המצויות בעיקר על פרחים בצמחי נקבה לא מופרים. צבע הנוזל בראש הבלוטה מרמז על מצב ההבשלה הכימית של המטבוליטים המשניים בטריכומה. ההבשלה מתחילה מראש שקוף (צעיר ביותר), וממשיכה ל-חלבי ← ענברי. הקטיף מתבצע בד"כ כאשר ראש הבלוטה הוא בצבע ענבר בכ- 50% מהטריכומות.

שונות כימית בקנאביס רפואי

לא בכל צמח קנאביס רפואי, ולא בכל זן או טיפוס של קנאביס נמצאים כל מאות המטבוליטים המשניים. מספר וכמות החומרים הפעילים משתנה בין זני וטיפוסי הקנאביס, וקיים מגוון רב בהרכב הפרופיל הכימי, ולכן גם בהתאמתם לטיפול בהתוויות רפואיות שונות. המגוון הקיים מקורו בסלקציה שחלה במשך אלפי שנות תירבות וכתוצאה מגידול באזורים שונים בעולם. צמח הקנאביס גודל ע"י האדם כמעט בכל רחבי כדור הארץ, מאזורים טרופיים ועד למורדות האלפים (Zuardi 2006). זהו אחד מהצמחים הראשונים ששימשו את האדם לרפואה, כמקור לזרעי שמן, לסיבים ולהנאה. על פי עדויות ארכאולוגיות, הקיסר הסיני שנאנג עשה בקנאביס שימוש לרפואה כבר במאה ה-12 לפני הספירה (Schultes et al. 1974). גידול הקנאביס למטרות שונות ובאזורים שונים בעולם תרם להתפתחות המגוון הגנטי הנרחב הקיים כיום בקנאביס. ניתן לנצל את המגוון הקיים לשם טיפוח תכונות כימיות (רפואיות) וחקלאיות רצויות.

לסיכום

הקנאביס נמצא בשימוש הרפואה המסורתית משחר האנושות, והוא משמש גם מקור לסיבים. לאחרונה חלה עלייה חדה בעניין בקנאביס עקב הפוטנציאל הרב הטמון בו לרפואה מודרנית. שינויים ברגולציה, המאפשרים בארץ ובמקומות שונים בעולם מחקר וגידול של צמח הקנאביס, מעלים גם את הפוטנציאל לפתח ולנצל אותו למגוון שימושים נוספים, ביניהם כתוסף מזון, כמקור לסיבים, ואף לבנייה ירוקה. צמח הקנאביס הרפואי מכיל מאות חומרים כימיים בעלי פוטנציאל רפואי, וטיפול המפ של קנאביס מכילים כמות גדולה של סיבים. חשוב ללמוד את תגובת ההרכב הכימי של הצמח לתנאי סביבה, לפתח שיטות גידול מיטביות לבקרה וייצוב של ריכוזי החומרים הפעילים בצמח, ולזהות זנים והרכבים כימיים המתאימים לטיפול באינדיקציות רפואיות שונות.

פרחים בצמחי נקבה לא מופרים, הגידול החקלאי כולו מבוסס על צמחי נקבה, ומדירים מחוות הגידול צמחי זכר כדי למנוע קיום הפריה. משכך, בגידול המסחרי נוהגים לרבות את הצמחים בריבוי וגטטיבי מייחורים, המיוצרים מצמחי אם (צמחי נקבה). זאת על מנת להבטיח שכל הצמחים הנוצרים יהיו צמחי נקבה. ריבוי מייחורים, בהשוואה לריבוי רפרודוקטיבי, מזרעים, מבטיח גם כן כי הצמחים הנוצרים יהיו אחידים מבחינה גנטית. לאחידות גנטית של הצמחים במערך הייצור החקלאי חשיבות רבה להגברת אחידות הפרופיל הכימי של יכול הפרחים המשמשים כמוצר רפואי.

משרד החקלאות של מדינת ישראל היה הראשון בעולם שהכריז, בשנת 2017, על הקנאביס כגידול חקלאי. זאת, בשילוב עם הובלה של ישראל בעולם בתחום החקיקה לשימוש בקנאביס רפואי, הביא לפריצת דרך בארץ במחקר החקלאי, הביולוגי, הרפואי והטכנולוגי בתחום.



ג

ב

א

איור 4: שלבי הגידול המסחרי של קנאביס רפואי: א. ייחור מושרש ב. שלב הגידול הווגטטיבי (שלב הצימוח), ג. שלב הגידול הרפרודוקטיבי (תקופת הפריחה) (צילום: א. סלונר)

מקורות

- Di Marzo, V., and Piscitelli, F. (2015). The endocannabinoid system and its modulation by Phytocannabinoids. *Neurotherapeutics*. 12: 692-698.
- Gorelick, J., Bernstein, N. (2014). Elicitation: An underutilized tool for the development of medicinal plants as a source for therapeutic secondary metabolites. *Advances in Agronomy*. 124: 201-230.
- Gorelick, J., Bernstein, N. (2017). Chemical and physical elicitation for enhanced cannabinoid production in cannabis. In: Chandra S., Lata H., ElSohly M. (eds) *Cannabis sativa L. - Botany and Biotechnology*. Springer, Cham. Switzerland. pp 439-456.
- Keller, NM. (2013). The Legalization of Industrial Hemp and what it could mean for Indiana's biofuel industry. *Indiana International & Comparative Law Review*. 23: 555,
- Schultes, R.E., Klein, W.E., Plowman, T. & Lockwood, T.E. (1974). Cannabis: An example of taxonomic neglect, p. 21-38. In: Rubin, V. (Ed.). *Cannabis and culture*. Chicago, Mouton Publishers, 598 p.
- Tourangeau, W., (2015). Re-defining Environmental Harms: Green Criminology and the State of Canada's Hemp Industry. *Canadian Journal of Criminology & Criminal Justice*, 57 (4): 528-554.
- Zuardi, A.W. (2006). History of Cannabis as a medicine: a review. *Braz J Psychiatry*. 28: 153-157.

טיפול בעלי חיים – שיחה עם תלמידים

ד"ר אלישע גוטויין

המכון לחקר בעלי חיים, מרכז וולקני



צאתי, כי הוראה לטיפול בעלי חיים מאתגרת במיוחד. קל יחסית להנגיש לתלמידים תחומי ידע אחרים כגון הזנה, רבייה, בריאות או ייצור חלב, מאחר שהם עוסקים בנושאים מוחשיים הנוגעים לביצועי כל פרט ופרט באוכלוסייה. לא כך טיפוח בעלי חיים; עיסוקו בביצועי האוכלוסייה כולה, והוא מושתת לא על טיפול בחיות המשק, אלא על טיפול במידע וניתוחו בכלים סטטיסטיים. בנוסף, בניגוד לתוצאות בתחומים המנויים מעלה, תוצאות עבודת הטיפול ניכרות לעיתים רק לאחר מספר רב של שנים. ניתן לומר כי בהשוואה לתזונאי, לוטרין או לאיש רבייה, המטפח הוא רץ למרחקים ארוכים.

עיסוקי בגנטיקה, טיפוח ורבייה של צאן. במהלך השנים יזמתי וביצעתי מספר תוכניות טיפוח צאן בארץ ובחו"ל. לא אחת נתבקשתי על ידי "היחידה לנוער שוחר מדע, מרכז וולקני" להרצות בפני תלמידי תיכון על עבודתי. כיתות התלמידים אותן פגשתי היו בדרך כלל ממגמות נבחרות כגון מדעים או ביוטכנולוגיה. ניסיתי בשיחות עם התלמידים להעביר נוסף לידע גם את תחושת הסיפוק מהעיסוק בנושא הטיפול.

אנו פועלים, כך פתחתי כל מפגש, כדי שחיות המשק ייצרו יותר: יותר חלב, יותר ביצים, יותר בשר. בנוסף, אנו מעוניינים כי הייצור יהיה יעיל ורווחי, מבלי לפגוע, במידת האפשר, ברווחת בעלי החיים. עובדה היא, כך טענתי, כי פרטים באוכלוסייה נבדלים זה מזה בתכונות הייצור. כך למשל, בצד כבשה שהמליטה טלה אחד עומדת כבשה שהמליטה שלושה טלאים. אנו נעדיף כמובן לגדל את הכבשה הוולדנית. האם באמצעות

שמירה על הגידול של טלאי הכבשה הוולדנית נבטיח כי עם הזמן תעלה הוולדנות הממוצעת באוכלוסייה? ייתכן, כך טענתי, שלידת השלישייה נגרמה עקב טיפול הורמונלי שניתן לאם, ושהטלאים אינם נושאים כל מטען גנטי הקשור לוולדנות גבוהה.

מהפך התאורטי, כך הסברתי, אנו יודעים כי באופן כללי, הפנוטיפ (P) בכל תכונה נקבע על ידי שני גורמים עיקריים: הגורם הגנטי - (G - genotype) והגורם הסביבתי (E - environment). האחרון מייצג את מכלול תנאי הסביבה להם חשוף הפרט. כניסה לתחום התיאורטי, כבר בתחילת השיחה, גרמה לאיבוד הקשב. כדי לצלוח מכשול זה שאלתי: האם תבונה או חוכמה הן תכונות המושפעות ממטען גנטי או מתנאי הסביבה? ומה ההשלכה של התשובה לשאלה זו על בית הספר? (הנה כאן שילוב של טיפוח בעלי חיים ומדעי החברה). התלמידים ניעורו, והתעורר ויכוח סוער אותו סיכמתי תוך שאני מקצין: אם תבונה היא תכונה גנטית, הרי צאצאים להורים נבונים יהיו תמיד נבונים, ואין כל צורך לבזבז את זמנם בבית ספר. את המידע הם ילקטו בעצמם. מאידך, צאצאים להורים לא נבונים, תמיד יהיו לא נבונים, והליכה לבית ספר ממילא לא תעזור להם. חבל על זמנם בבית הספר. מוטב שילכו לים. כך או כך, אין צורך בבית הספר (המורים בשורה האחרונה נדרכו בכיסאותיהם). אך, אם תבונה היא תכונה המושפעת רק מהסביבה, הרי שכלל שהתלמיד ילמד יותר, כך ירכוש תבונה רבה יותר. במצב זה לבית הספר תפקיד חשוב.

הנה, נושא משעמם לכאורה של יחס גנטיקה-סביבה הצליח להלהיט את הרוחות בכיתה. הדיון בשאלה

שטופח בישראל לייצור חלב (איור 1.3). אנו סוברים כי כבשי הבית טופחו במהלך הדורות מכבשי הבר. אם כך, שאלתי, מה טיבו של התהליך בו נוצרו מכבש הבר זנים שונים כל כך של כבש הבית? השתררה דממה בכיתה. שאלה לכאורה פשוטה. אולם, התשובה לה מצריכה חשיבה ולא רק ידע.

רגעי המבוכה תמו בדרך כלל כשאחד מהתלמידים פרש את משנתו וטען כי בעניין המרינו הצמרי, לכבשים היה קר, הם גידלו צמר, הטלאים נולדו צמריים, וכך, העניין חזר ונשנה מדי דור, עד שהתקבל גזע המרינו. המורים המלווים, שישבו בדרך כלל בשורה האחרונה, נעו בכיסאותיהם בחוסר נחת למשמע התשובה.

מספר שאלות הביאו למסקנה כי ההסבר לא מתקבל על הדעת. השתררה דממה. לתלמידים לא הייתה תשובה לשאלה "חקלאית" פשוטה. את המצב הציל בדרך כלל תלמיד אחר אשר הציע כי בקרב אוכלוסיית כבשי הבר הופיעו לפתע פרטים צמריים ואלה המקור למרינו. תוך דיון והבאה לחקר, נחלץ סוף סוף מפי התלמידים המונח "מוטציה". מכאן, התלמידים כבר הרגישו על קרקע בטוחה. דנ"א (DNA), רנ"א (RNA), הקוד הגנטי, מוטציות, חלבונים, כל אלה הרי מוכרים להם משיעורי גנטיקה. לא עבר זמן רב עד שאחד התלמידים (או התלמידות) בנה בהתלהבות תרחיש חדש בו מוטציות שאירעו באוכלוסיית כבשי הבר בגנים המבקרים גדילת צמר הביאו להופעת כבשים בעלי צמר ארוך יותר.

הביא למסקנה כי תבונה היא תכונה המושפעת הן מגורמים גנטיים והן מגורמים סביבתיים. כדי לחזור לענייני הטיפוח ציינתי כי המטפחים משתמשים במדד הנקרא "תורשתיות". מדד זה מבטא את התרומה היחסית של המרכיב הגנטי לשונות בתכונה. כאשר ערך התורשתיות הוא 0.0, המגוון בין הפרטים באוכלוסייה יהיה מוכתב רק על ידי גורמים סביבתיים. כאשר ערך התורשתיות הוא 1.0, המגוון באוכלוסייה מקורו בהבדלים גנטיים בין הפרטים.

חלק מהתכונות - כאן חזרנו לחקלאות - כמו נשיאת קרניים, מבוקרות על ידי גן אחד, או גן עיקרי. אלה מכונות "תכונות איכותיות", והתורשתיות שלהן גבוהה. בחירת פרטים כהורים לדור הבא על סמך ביצועיהם תביא אכן לשינוי מהיר במראה או בביצועי האוכלוסייה. תכונות אחרות כמו ולדנות או ייצור החלב מכונות "תכונות כמותיות". אלה מבוקרות על ידי מספר גנים, כאשר השפעת כל גן על התכונה היא מזערית באופן יחסי. תנאי הסביבה משפיעים על התבטאות תכונות כמותיות. משום כך, תורשתיות של תכונות אלו נמוכה בדרך כלל, ובחירת פרטים מצטיינים בתכונה תביא אך לשינוי זעיר בביצועי האוכלוסייה בדור הבא.

במהלך ההרצאה נעזרתי במצגת. השקופית הראשונה הציגה תמונה של "מופלון" - כבש בר (איור 1.1). רוב התלמידים טעו וחשבו כי מדובר בתמונת יעל, צבי או עז. ידועים למעלה מאלף גזעים של כבש הבית. בפגישה הצגתי תמונות של פרטים משני גזעים: גזע המרינו שטופח לייצור צמר (איור 1.2), וגזע האוסי המשופר



איור 1.3: כבשת אווסי משובח - גזע שטופח לייצור חלב



איור 1.2: איל מרינו - גזע שטופח לייצור צמר



איור 1.1: מופלון - כבש בר

צינתי לשבח את כושר הניתוח של אותו תלמיד אולם הקשתי ושאלתי: מדוע המוטציות החדשות, שהופעתן הייתה באקראי, התפשטו באוכלוסייה? שוב רגע של מבוכה. לא ויתרתי! עוד כמה שאלות ואחד התלמידים מעלה השערה כי ייתכן שמדי דור בחר האדם לגידול כהורים לדור הבא את אותם פרטים שנשאו את המוטציות המיטיבות. זו הדרך בה התכונה הלכה והתפשטה באוכלוסייה. חס, חס, חס, אני אומר, ושואל: מה עניין זה מזכיר לכם? כאן כבר התשובות זורמות מכל עבר - "המותאם שורד", אבולוציה, דרווין. פעם נוספת התלמידים על קרקע מוצקה. על תורת האבולוציה כבר למדו, ותהליך הסלקציה מוכר להם. אלא שכאן, בטיפוח כבשים, לחץ הסלקציה נוצר לא על ידי כוחות הטבע אלא על ידי האדם, בעבור תכונות מועילות לו. הנה, מבלי משים, תוך בחינת שלוש תמונות של כבשים, החומר העיוני שאותו למדו התלמידים בשיעורי גנטיקה קיבל משמעות חדשה. נושא טיפוח צאן הוא כבר לא כל כך זר, כך מתברר, ואפילו מעניין.

כשם שפותחו כבשי "צמר" מכבש הבר כן פותחו כבשי אליה כדוגמת האוסי. שומן הכבש היה מקור חשוב לשומן מן החי בעולם העתיק, הסברתי. היה יתרון רב בכבשים אשר חלק משומן גופם התרכז בחלק האחורי של הגוף כגוש אחד. נשיאת אליה ושומן כבש נראו מרוחקים מהתלמידים. אולם, כאשר ציינתי כי שומן הכבש נמצא בראש כל מתקן שווארמה, העניין נעשה מוכר.

התלמיד אשר ענה לראשונה את התשובה השגויה נותר מבוש. כדי לצרף גם אותו לשמחה הכללית ציינתי כי הוא למעשה כיוון לנושא המצוי היום בחזית המחקר המדעי - האם וכיצד תנאי סביבה יכולים לגרום לשינויים העוברים בתורשה - "אפיגנטיקה" (התלמיד כבר בעננים). הוספתי כי נושא השפעת הסביבה על תכונות מורשות היה סלע מחלוקת במאה הקודמת בין המדע המערבי למדע ה"קומוניסטי". כמה מילים על סטלין, מיצ'ורין, ליסנקו, המלחמה הקרה והנה נחשפו התלמידים גם לפרק בהיסטוריה. כאן המקום לציין כי מצאתי לנכון לשלב בהרצאות בנושא טיפוח גם נושאים מתחומים אחרים כגון אומנות, ספרות, היסטוריה, תנ"ך וכמובן - ידיעת הארץ. הסתכלות כללית כזו על מאגר הידע האנושי מלבה בתלמיד עניין, וקושרת אותו לנושא הנלמד.

מספר הגנים בגנום הכבש הוא כ-25,000. כדי להמחיש כיצד אירוע של מוטציה בגן מסוים עשוי להשפיע על ביצועי פרטים באוכלוסייה, הצגתי בפני התלמידים את המקרה המעניין של הופעת כבשים עיוורים יום, מאורע ייחודי שנתגלה עד כה רק בצאן בישראל. מאחר שתגליות בנושא זה נעשו על ידי יחד עם חבריי, מצאו התלמידים בסיפור המובא מכלי ראשון עניין רב. גזע הכבשים המקומי בישראל, כמו ברוב ארצות המזרח התיכון, הוא האוסי. בשנות השלושים של המאה הקודמת (תקופת העלייה השלישית; הנה

קישרנו טיפוח צאן לתולדות הציונות והיסטוריה של עם ישראל), החלו נוקדי קיבוץ עין חרוד אשר בבקעת בית שאן, ונוקדים במקומות אחרים, לטפח את האוסי לייצור מוגבר של חלב. היכן ממוקמת בקעת בית שאן, או בשמה החדש, "עמק המעינות"? חיפוש בגוגל בסמארטפון על ידי תלמידה בירכתי הכיתה לימד כי מדובר באזור בצפון הארץ (הנה גם תרמנו לידיעת הארץ). בשנת 1993 דווח לנו לראשונה על ידי נוקדי עין חרוד על לידת טלאים עיוורים, תופעה שלא נצפתה מעולם בעדר זה. מספר הטלאים שנולדו עיוורים הלך וגדל מדי שנה, והדבר הדאיג מאוד את הנוקדים.

הופעת המחלה יכולה הייתה לנבוע, כפי שלמדנו קודם, מהשפעת גורם סביבתי-ממשקי (למשל, מחסור ברכיב מזון מסוים), או מסיבה גנטית. טלאים עיוורים נולדו גם לכבשי אוסי שיוצאו מעין חרוד לשני מקומות: לירדן ולקזחסטן (היכן זה? התשובה התקבלה מתלמידה בעלת מבטא רוסי - מרכז אסיה). עובדה זו, שהליקוי נתגלה בסביבות שונות, רימזה כי מדובר בעניין גנטי ולא סביבתי. ניתוח קשרים משפחתיים בין הכבשים בעדר עין חרוד לימד כי אכן מדובר במחלה גנטית חדשה בכבשים - עיוורון יום: הכבשים עיוורים ביום, כאשר עוצמת האור גבוהה, אך רואות בלילה, עת עוצמת האור נמוכה.

מצאנו כי העיוורון נגרם כתוצאה ממוטציה בגן שסימונו CNGA3, המקדד לאחד מחלבונים תאי המדוכים שברשתית העין. שיעור קצר בביולוגיה: ראיית היום וראיית הלילה מתווכות בהתאמה על ידי סוגים שונים של קולטנים (רצפטורים) ברשתית: מדוכים (Cones) וקנים (Rods). החלפת הבסיס C לבסיס T בעמדה הראשונה באחד הקודונים ברצף הדנ"א של הגן CNGA3 הביאה לכך כי במקום שבחלבון המיוצר בתאי המדוכים תוצב החומצה האמינית ארגינין, המקום הפך לאות סיום (Stop codon), דבר שגרם ליצירת מולקולת חלבון קטועה, שאין לה הפעילות הביולוגית הדרושה (איור 2).

העיוורון פגע בזכרים ובנקבות. הורשתו, כך נמצא, רצסיבית: נשאים (הטרוזיגוטים) של המוטציה הם בעלי ראייה תקינה, בעוד הומוזיגוטים למוטציה עיוורים. המוטציה אירעה באחד הפרטים בעדר בעבר, במועד לא ידוע. מסיבה לא ברורה, שכוחות המוטציה בעדר הלכה ועלתה, תוך שמספר הפרטים ההטרוזיגוטים לתכונה הלך ועלה. הדבר לא הורגש, כי לנשאי המוטציה פנוטיפ תקין. בשנת 1993 נולד הפרט העיוור הראשון כתוצאה מזיווג אקראי בין שני נשאים. מאחר ששכיחות הנשאים בעדר עלתה מדי שנה, גם מספר הטלאים העיוורים הלך ועלה מדי שנה. סיפור זה, המוצג כאן בקצרה, המחיש לתלמידים כי הידע אותו הם רוכשים בבית הספר בשיעורי גנטיקה הוא כלי עבודה בעולם אמיתי. יכולתם לעקוב אחר הדרך בה המוטציה נוצרה והתפשטה באוכלוסייה ולהבינה, נסכה בהם סיפוק רב. השאלה הבאה כבר העמידה את התלמידים כשותפים של ממש לעבודת הטיפוח: כיצד להתגבר על הבעיה?

חדשני של ריפוי גנטי לעיוורון יום בו לוקים גם בני אדם. נושא זה הוא עניינה של הרצאה אחרת, כך ציינתי, אך די להזכיר כי בעדר בית דגן יש כבשים אשר נולדו עיוורים, ולאחר טיפול אחד רואות כבר למעלה משבע שנים. בקרוב, ייבחן הטיפול בבני אדם באחד מבתי החולים הקרוב (איור 4).

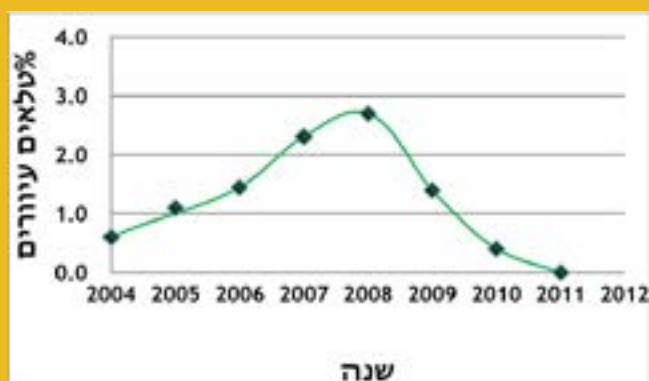
למדנו כי עיוורון יום בכבשים היא תכונה רצסיבית הנשלטת על ידי גן אחד. האם קיימות דוגמות נוספות בטיפוח צאן בארץ לתכונות הנשלטות על ידי גן אחד? מתברר שכן. הדוגמה הבאה שהבאתי בפני התלמידים הייתה של מוטציית ה"בורולה" והשפעתה על ולדנות בכבשים. במסגרת תוכנית טיפוח שארכה כ-15 שנים הוחזרה מוטציה זו, שנמצאה בגזע המרינו-בורולה האוסטרלי, לגזעים האווסי והאסף בארץ, תוך שהיא מביאה לשינוי ניכר בוולדנות הכבשים בארץ.

ידוע כי שיעור הוולדנות (מספר הטלאים הנולדים בהמלטה) שונה בין גזעי צאן שונים. בגזעים בעלי ולדנות נמוכה ממליטות הכבשים בעיקר יחידים ולעיתים רחוקות תאומים, ואילו בגזעים ולדניים בהם הוולדנות

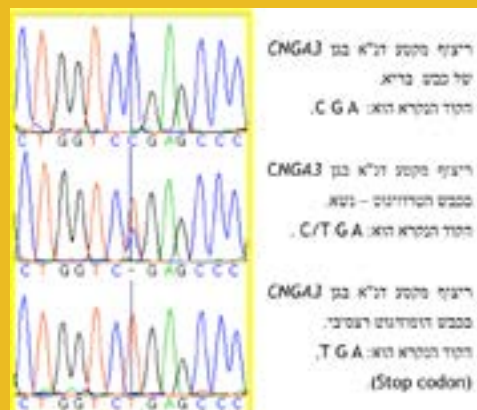
במאמץ משותף הם הגיעו למסקנה כי איתור נשאים דרך בדיקות גנטיות וסילוקם מקרב אוכלוסיית האילים היא הדרך היעילה למניעת לידת טלאים עיוורים. תשובה נכונה בהחלט. כך אגב, פעלנו. ואכן, בעקבות ביצוע בדיקות גנטיות לטלאים ובחירה לגידול החל משנת 2008 רק של אלה שאינם נשאים, תדירות אירועי לידת טלאים עיוורים, שהייתה אמורה בשנת 2008 להגיע לכ-10%, הלכה ופחתה, עד שהתופעה נעלמה כעבור מספר שנים (איור 3).

הנה, דרך לימוד האירוע של הופעת כבשים עיוורים הודגמה הופעה של מוטציה, התלמידים תרגלו את הידע שלהם בנושא הקוד הגנטי וחוקי מנדל, פיתחו במהלך ההרצאה תוכנית טיפוח, וטעמו את טעם המקצוע. כדי להשלים את התמונה יש לציין כי אירוע נוסף של מוטציה בכבשי אווסי בגן *CNGA3* אותר על ידינו בעדר אווסי מקומי בצפון הנגב.

העניין בכבשים העיוורים לא פוסק, כך סיפרתי. לאחר שייסדנו אוכלוסייה של כבשים עיוורים בעדר בית דגן במרכז וולקני, אנו נעזרים בכבשים אלו בפיתוח טיפול



איור 3: תדירות לידת טלאים עיוורים בעדר עין חרוד בשנים 2004 עד 2011



איור 2: מולקולת חלבון קטועה, שאין לה הפעילות הביולוגית הדרושה



איור 4: שער גיליון דצמבר 2018 של עיתון מדעי העוסק בריפוי גנטי באדם. בשער מוצג ראש של איל אווסי-גזע הכבשים המשמש על ידינו לבחינת ריפוי גנטי של מחלת עיוורון יום

בעל עדר בן אלף כבשים, אשר בעזרת תוכנית טיפוח נכונה החליף את גנוטיפ כבשים בעדרו מ++ ל-B? זאת, בהנחה כי הוא מוכר 1000 טלאים נוספים בשנה. התלמידים שלפו מיד את הסמארטפונים והחישבו הראה תוספת הכנסה של 700,000 שקלים לשנה. תוצאה זו שכנעה גם את אחרון התלמידים כי בכל מה שקשור לטיפוח, כדאי להקשיב.

שעת ההרצאה חלפה, ואני נפרד מהתלמידים מבלי שדיברתי על נושאים חשובים אחרים - הכלאות, סלקציה, מבחן צאצאים ועוד. אולם, נראה היה כי די ב"טעימות" שחוו התלמידים במהלך הפגישה כדי לפתוח את סקרנותם לנושא הטיפוח, ובכך באתי על שכרי.



איור 5: איל בורולה-מרינו ולידו איל אווסי



איור 6: כבשת אפק אסף ושישיית טלאים שאך נולדו

מקורות

גוטוויין א. (2005), טיפוח בעלי חיים. הלכה ומעשה בגידול בעלי חיים במשק החקלאי, עורך א. גוטוויין. כרך א. הוצאת מערכת.

Gootwine E, et al. (2008) Prolificacy and lamb survival at birth in Awassi and Assaf sheep carrying the FecB (Booroola) mutation. *Anim. Reprod. Sci.*;108: 402-411.
Gootwine E, et al. (2017) Mutation at the CNGA3 GMP binding domain is associated with novel day blindness in local Awassi sheep. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*;58: 1577-1584.
Gootwine E. et al. (2017) Safety and Efficacy Evaluation of rAAV2tYF-PR1.7-hCNGA3 Vector Delivered by Subretinal Injection in CNGA3 Mutant Achromatopsia Sheep. *Human Gene Therapy Clinical Development*;28:96-107.

הממוצעת גבוהה, כ-2.5 טלאים להמלטה, רבים המקרים של לידת תאומים, שלישיות ורביעיות, ואף שגרים גדולים יותר. תכונת הוולדנות הגבוהה הוכרה בעולם כתכונה כמותית הנשלטת על ידי מספר גנים. הנה נמצא, למרבה ההפתעה, כי הוולדנות הגבוהה של הגזע מרינו-בורולה האוסטרלי (ממוצע של כ-2.5 טלאים להמלטה) נובעת מנשיאה של מוטציה בגן BMPR-1B, הנקראת בלשון העם "מוטציית הבורולה". נשיאת מוטציה זו בנקבות גורמת למספר ביוצים גדול יותר בכל מחזור הרבייה, ומכאן לריבוי במספר הוולדות. הוולדנות הממוצעת של כבשים הומוזיגוטיים למוטציה (BB) היא כ-2.8 טלאים להמלטה; זו של כבשים הטרוזיגוטיים B+ היא כ-2.2 טלאים להמלטה, וזו של כבשים שאינם נשאים של המוטציה (++) כ-1.2 טלאים להמלטה. בניגוד למוטציית עיוורון היום, הוולדנות הגבוהה במרינו-בורולה היא תכונה סמי-דומיננטית. ציינתי, כי הבורולה-מרינו הוא גזע קטן גוף, בעל צמר רב ותנובת חלב מועטה (איור 5). למעט תכונת הוולדנות הגבוהה, תכונות של אחרות של גזע זה לא עניינו אותנו.

כדי להשביח את ולדנות הגזעים המקומיים - האווסי (כ-1.2 טלאים להמלטה בממוצע) והאסף (כ-1.6 טלאים להמלטה בממוצע) - החלטנו להחדיר בדרך של הכלאות את מוטציית הבורולה לגזעים המקומיים. לשם כך הטסנו לארץ אילי בורולה-מרינו הומוזיגוטיים BB מניו זילנד. בשלב ראשון הזרענו בזרמה שנלקחה מאילים אלה כבשי אווסי ואסף מקומיות. המבנה הגנטי של הדור הראשון של כבשי מכלוא היה 50% גזע מקומי ו-50% מרינו-בורולה, כאשר כל הפרטים, זכרים ונקבות, היו הטרוזיגוטיים למוטציית הבורולה. בשלב שני, ביצענו הכלאה חוזרת, בה הרבענו כבשות בנות דור ההכלאה הראשון עם אילים מקומיים. דור ההכלאה החוזרת הראשונה היה קרוב בממוצע ב-75% לגזעים המקומיים, וגנוטיפ הפרטים באתר גן הבורולה היה B+ או ++. לאחר שזיהינו נקבות B+ בדור המכלוא הראשון (לא פירטתי כיצד עשינו זאת) הכלאנו אותן עם אילים מקומיים, וחוזר חלילה, עד שכעבור כמה דורות הכלאה קיבלנו למעשה חזרה את הגזע המקומי כשהוא נושא את מוטציית הבורולה. לגזעים הוולדניים החדשים ניתן השם "אפק". כך יש לנו כיום "אפק אווסי" ו"אפק אסף" (איור 6).

הכבשה המתאימה לגידול בעדר המסחרי היא הטרוזיגוטיית B+. כבשה ++ אינה ולדנית, וכבשה BB ולדנית מעבר לרצוי במשק מסחרי. כדי לזהות טליות B+ מבין השגר הנולד נעזרים כיום המגדלים בבדיקות גנטיות מולקולריות הנערכות בטרם הטליות נבחרות לגידול.

כדי לסבר את אופן התלמידים ציינתי כי הרווח מטלה נוסף, לאחר הפחתת הוצאות הגידול, הוא כ-700 שקלים. שאלתי: מה תוספת ההכנסה השנתית למגדל

האם לצמחים יש חושים?

פרופ' (אמריטוס) אלי זמסקי

המכללה האקדמית לחינוך חמדת הדרום;
הפקולטה למדעי הסביבה, המזון והחקלאות, האוניברסיטה העברית



מכילים צבענים (פיגמנטים) ירוקים (כלורופילים), כתומים (קרואנואידים) וצהובים (קסנתופילים). הללו משתפים פעולה בתהליך האור של ההטמעה. הם קולטים אנרגיה של אור - בעיקר אור אדום ואור כחול - ואינם קולטים אור ירוק. לכן הצמחים נראים ירוקים; עליהם הם למעשה מסננים (פילטרים) ירוקים (איור 1). המסקנה: האיברים הירוקים של הצמחים מבחינים בין הצבעים השונים, הם קולטים אור אדום ואור כחול ואינם קולטים אור ירוק המוחזר מן העלה לכל הכיוונים.

2. האם הצמחים רואים אור?

כן! תופעות רבות המתרחשות בצמחים תלויות בעוצמת האור ובכיוון האור. תנועות של חלקי צמח בתגובה לאור מכונות תנועות פוטורופיות או פוטורופיזם. לצמחים יש חיישנים לאור על קרומי התאים. הם חשים בכיוון האור ובעוצמת האור ומתכוופים או גדלים לכיוון האור (תגובה פוטורופית חיובית) או בניגוד לכיוון האור (תגובה פוטורופית שלילית). הצמיחה לכיוון האור היא בעלת חשיבות עצומה לצמחים כי היא מבטיחה שהעלים יוכלו לקלוט את מירב אנרגיית האור. אפשר לבדוק את הצמיחה לכיוון האור גם עם מנורת שולחן (איור 2). נבטים של צמחים יגדלו תמיד לכיוון האור. גם אתם יכולים לחזור על הניסוי שרואים בתמונה. מומלץ לקחת זרעים של עדשים, אפונה או שעועית, לשטוף אותם במים במשך שעותיים ולהניח אותם על מצע של צמר גפן רטוב בתוך צלחת ולהקפיד שהמצע יישאר רטוב. הצמיחה לכיוון האור מושגת בעזרת הורמון הנקרא אוקסין. ההורמון נוצר בקודקודים של הענפים, זורם כלפי מטה וגורם

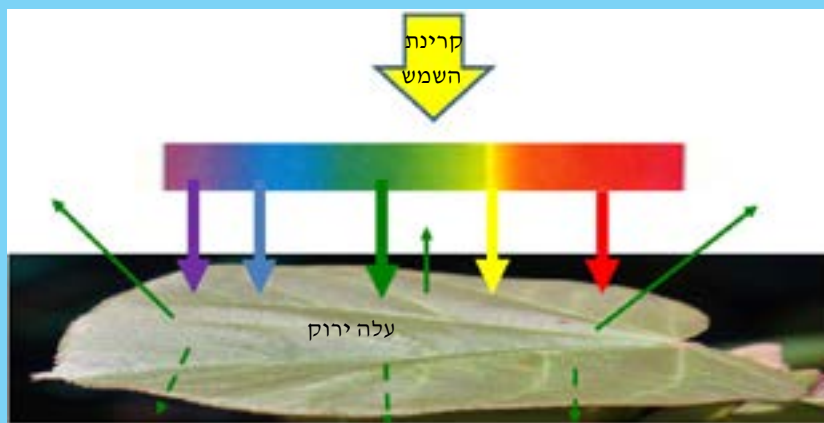
מושג "חושים" הגדרות רבות. בוויקיפדיה הגדרה כללית האומרת כך: "החושים הם היכולות של יצורים חיים לקלוט מידע מהסביבה או מהגוף, ולהמירו לקוד חשמלי-כימי כדי שהמוח יוכל לעבד אותו". ההתייחסות היא כמובן לבעלי חיים. האם לצמחים יש חושים? אם כן, אולי מן הראוי להרחיב את ההגדרה. זאת תשפטו אתם לאחר קריאת המאמר שלהלן.

במאמר זה תיווכחו שלצמחים יש חושים. אומנם אין להם עיניים, אין להם אף, אין להם פה והם אינם יכולים למשש, אבל יש להם תכונות שבעזרתן הם חשים את הסביבה ואת הכיוון שממנו מגיע אליהם הגירוי. מפני שהצמחים אינם ניידים, ואינם יכולים לנוע ממקום שבו התנאים אינם נוחים לצמיחה אל מקום נוח יותר, הם חייבים להתמודד עם התנאים השוררים בסביבה כדי לשרוד. מכאן אנו למדים שהם חייבים לחוש ולהתמודד עם הסובב אותם.

נבדוק, האם הצמחים "רואים" צבעים? האם הצמחים "רואים" אור? האם הצמחים "חשים" במחזוריות של היום והלילה? האם הצמחים "חשים" בכוח הכבידה? האם הצמחים "חשים" במגע? האם הצמחים "חשים" בשינויי טמפרטורה ואורך יום? האם הצמחים "חשים" כאשר פוצעים אותם? האם הצמחים "מריחים"?

1. האם הצמחים רואים צבעים?

כן! צמחים מכילים בעליהם ובענפים הירוקים הצעירים אברונים המכונים כלורופלסטים. הכלורופלסטים



איור 1: קרינת השמש המכילה את כל הצבעים הנראים פוגעת בעלה. העלה קולט בעיקר את צבעי האדום והכחול המשמשים אותו בתהליך ההטמעה ואינו קולט את האור הירוק הנפוץ לכל עבר. לכן הצמחים נראים ירוקים.



איור 2: נבטים של עדשים שנבטו על צמר גפן רטוב בתוך צלחת והונחו על השולחן בחושך. מן הצד מאירה עליהם מנורה. כל הנבטים התכופפו לכיוון של האור.



איור 3: התכופפות איבר של צמח בכיוון האור בהשפעת ההורמון אוקסין (עיגולים) הנע לרוחב האיבר מהצד המואר לצד החשוך וגורם שם להתארכות תאים.

הצמחים היא חייבת להיות רציפה. יש להבחין בין התגובה לכיוון האור, כפי שהוסברה בפרק הקודם (פוטורופיזם), לבין התגובה היומית המחזורית ("השעון הביולוגי") שמתרחשת בלי כל קשר לכיוון של הגירוי החיצוני. תנועה יומית של איברי צמח, עלים, פרחים ותפרחות, מכונה תנועה נסגית או תנועה לקראת שינה (ניקטינסיטית). ניתן להבחין בקלות בתנועה כזו איורים 4, 5).

העלים אומנם מחוברים לגבעול, אך במהלך היום הם נעים באיטיות במטרה להיות באווית המתאימה

להתארכות תאים ולחלוקות תאים. הוא גם נע לרוחב מהצד המואר לצד החשוך, ושם גורם להתארכות תאים. כתוצאה מכך מתכופף הגבעול לכיוון האור (איור 3).

3. האם הצמחים חשים במחזור יומי של יום ולילה?

כן! צמחים מבחינים בשעות היום והלילה במחזור של 24 שעות והם מגיבים לכך בהתאם. לדוגמה, צמחים מקבלים גירוי לפריחה על פי משך שעות האור או החושך. אך כדי שהתגובה לחושך תיקלט על ידי

כן! הצמח באמת יודע היכן למעלה והיכן למטה. היכן השמים והיכן האדמה. הגבעולים של הצמחים צומחים למעלה והשורשים למטה. יש גם גבעולים שצומחים שטוח על פני הקרקע; גבעולי הדשא, למשל, צומחים שטוח על פני הקרקע, אך עליהם גדלים כלפי מעלה. הגבעולים, ובייחוד העלים שעל הגבעולים, זקוקים לאור השמש כדי ליצור סוכרים, כמו שראינו בסעיפים הקודמים. לכן הגבעולים צומחים זקוף כלפי מעלה, והעלים צומחים הצידה כדי לקלוט את אור השמש. השורשים לעומת זאת צריכים לינוק מים מהקרקע; צמחים ובעלי חיים תלויים במים כדי לשרוד. יחד עם המים, קולטים השורשים מהאדמה גם כל מיני חומרי מזון שמתמוססים במים. כל חלק של הצמח מרגיש

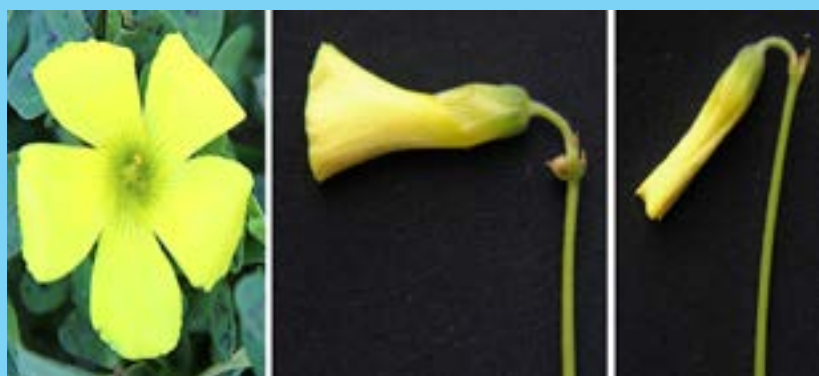
לקליטת מירב קרינת השמש, או במקרה של פרחים - לזווית שתאפשר להם להיות פתוחים במהלך היום. התנועה הזו מושגת בעזרת אזור מיוחד המכונה **פולבינוס** שממוקם בבסיס **הפטוטר** ("הגבעול" של העלה) וגם בין הפטוטר ל**טרף** (החלק הפרוש של העלה) לעלה (איור 6). הפולבינוס נראה כאזור תפוח במקצת.

מנגנון התנועה של הפולבינוס מבוסס על קליטה או פליטה של יונים (אטומים בעלי מטען חשמלי) של אשלגן וכלור ובעקבותיהם תנועה של מים לתוך התאים או החוצה מהתאים (איור 7).

4. האם הצמחים חשים בכוח הכבידה?



איור 4: עלים פרושים של חמציץ ביום (משמאל) וכפופים בשעה חמש בערב (מימין). לפנות בוקר העלים ייפרשו בחזרה. התנועה היומית הזו אינה קשורה לעוצמת האור או לכיוונו.



איור 5: תנועה לקראת שינה של פרח חמציץ. פרח פתוח (משמאל), פרח סגור אחר הצהריים (באמצע) ופרח כפוף בערב (מימין).



איור 6: פולבינוס בעלה. הפולבינוס היא רקמה שמניעה ומסובבת את העלה במהלך היום כדי שיהיה ניצב לשמש. הפולבינוס נמצא בין הפטוטר ("הגבעול" של העלה) ובין הפטוטר ל**טרף** (החלק הפרוש של העלה).

היכן השמים והיכן האדמה. התגובה של צמחים לכוח הכבידה מכונה **גרוויטרופיזם**. גרוויטרופיזם יכול להיות שלילי במקרה של גבעולים או חיובי במקרה של שורשים.

צמחים, בניגוד לבעלי חיים, גדלים (מוסיפים תאים על ידי חלוקות) בקצוות של הגבעולים ובקצוות של השורשים באזורים המכונים **קודקודי צמיחה**.

הקודקודים האלה מפרישים הורמונים הזורמים לאורך הצמח ומשפיעים על התמיינות הרקמות. כאשר ההורמונים הללו עוברים דרך תאי הצמח, מלמעלה למטה (מהגבעולים לכיוון השורשים), או מלמטה למעלה (מהשורשים לכיוון הגבעולים), הם גורמים לקוטביות בתאים כך שכל תא חש מהו צידו העליון ומהו צידו התחתון.

בחקלאות מוכרת הטכניקה של ריבוי על ידי **ייחורים**. ייחורים הם קטעי ענפים ששותלים בקרקע והצמח הגדל מהם שומר על התכונות של צמח האם ממנו נלקחו הייחורים. כל חקלאי יודע שעליו לשתול את הייחורים בכיוון הנכון, כלומר לשמור שהחלק שהיה כלפי מעלה בצמח האם יישאר כלפי מעלה בייחור הנשתל בקרקע (איור 8).

אם ניקח עציץ שיש בו צמח שעומד ישר ונשכיב את העציץ, אז תוך כמה שעות הצמח יתכופף כלפי מעלה כמו שרואים באיור 9.

ניסוי: קחו כמה זרעים יבשים של שעועית והשרו אותם בכוס מים למשך כשעתיים. לאחר מכן קחו עציץ עם אדמה וזרעו בתוכו את הזרעים של השעועית. יש לטמון את הזרעים באדמה בצורה שרק מעט אדמה מכסה אותם. השקו את האדמה; הקפידו להשקותה במעט מים כל יום. המתינו מספר ימים עד שהשעועית תגדל קצת לגובה. אחר כך השכיבו את העציץ על צידו ועקבו אחרי מה שקורה לו אחרי יום.

5. האם הצמחים חשים במגע?

כן! צמחים חשים כאשר נוגעים בהם או כאשר הם נוגעים בגוף זר. התגובה למגע מכונה **תיגמוטרופיזם**. ישנם צמחים המגיבים למגע במהירות רבה. כך הם הצמחים הטורפים, וכך גם מגיבה המימוזה הביישנית, הסוגרת את עליה במהירות כאשר חרק נוחת עליהם. המגע מפעיל מנגנון המעביר את הגירוי, בדומה לתגובה עצבית דרך קרומי התאים כפי שמתרחש אצל בעלי חיים. הגירוי גורם לשינוי מהיר של **לחץ הטורגור** (הלחץ שמפעיל התא המלא מים על הדופן העוטפת אותו) בפולבינוס (ראו בפרק הקודם). תאי הפולבינוס מפרישים יונים ומים, מתכווצים במהירות והמלכודת נסגרת על החרק שנחת על העלה.

לעומת התגובה המהירה בצמחים טורפים, שהיא איננה תגובה של צמיחה, צמחים רבים מגיבים למגע על ידי

צמיחה. ישנם צמחים שמסוגלים להיצמד לקירות וגם לגזעים של עצים אחרים. הם עושים זאת בעזרת שורשי אחיזה מיוחדים שמדביקים אותם אל הקיר, כמו למשל אצל הקיסוס (איור 10) והגפנית (איור 11), או שהם נכרכים סביב המצע (איורים 12, 13). מעניין לראות שהצמחים היוצרים שורשי אחיזה מיוחדים מתפתחים רק בצד של המקום אליו הם נדבקים ולא בצד החשוף לשמש. כאשר ענף של צמח כזה גדל באוויר, רחוק מהקיר, הוא לא מצמיח שורשי אחיזה.

כיצד יודע הצמח היכן הקיר? מדוע רק שם הוא מצמיח את שורשי האחיזה?

לבעלי חיים ולצמחים יש חומרים שמכונים הורמונים. ההורמונים נוצרים במקומות מסוימים בגוף, כמו בבלוטות של בעלי חיים או בקודקודים של הצמחים (בקצוות של הענפים והשורשים) ומשם הם זורמים בתוך הגוף ומשפיעים במקומות רחוקים מהמקום שבו הם נוצרו. בצמחים ובבעלי חיים ישנם הורמונים שמשפיעים על צמיחה וגדילה. אחד מההורמונים של צמחים, אוקסין, נוצר בקודקודים העליונים של הענפים ונודד לאורכו כלפי מטה. בגבעולים ההורמון הזה נודד גם הצידה ממקום מואר למקום חשוך או למקום בלי אור חזק. כך זה בקיסוס. ההורמון נודד בגבעול מהצד החשוף לשמש אל הצד המוצל שפונה אל הקיר ושם הוא גורם להתפתחות שורשי אחיזה. נמצא שספקטרום האור הכחול הוא שגורם לתנועה הטרלית של האוקסין. גבעול שצומח באוויר, לא ליד קיר או גזע של עץ, מקבל אור חזק מכל הכיוונים ולכן לא נוצרים שם שורשי אחיזה.

התגובה למגע נראית היטב בצמחים מטפסים שגבעולם נוגע במצע כלשהו (תמונות 10, 11) או נכרך על צמחים אחרים (איור 12), או בצמחים בעלי קנוקנות (הסתעפות דמוית חוט של ענף או עלה) שנאחזים בכל גוף שבו הם נוגעים (איור 12). התגובה למגע נוצרת על ידי עיכוב צמיחה באזור המגע וזירוז צמיחה בצד הנגדי שאינו בא במגע עם המצע. התגובה למגע אצל הצמחים רגישה פי עשר מהתגובה למגע בעור של בעלי החיים. כאשר השכבה החיצונית של תאי הצמח, האפידרמיס, באה במגע עם מצע כלשהו, היא שולחת אות שגורם להורמון אוקסין לנוע מהצד הנוגע לצד הנגדי. כתוצאה מכך מעוכבת התארכות התאים באזור המגע ומזורזת התארכותם של תאי הקליפה בצד הנגדי. במצב זה האיבר הצומח (גבעול או קנוקנת) נצמד למצע בו נוגע האיבר המטפס. שורשים מגיבים באופן הפוך; הם צומחים כדי להתרחק ממצע קשה בו הם נוגעים.

6. האם הצמחים חשים בשינויי טמפרטורה ואורך יום?

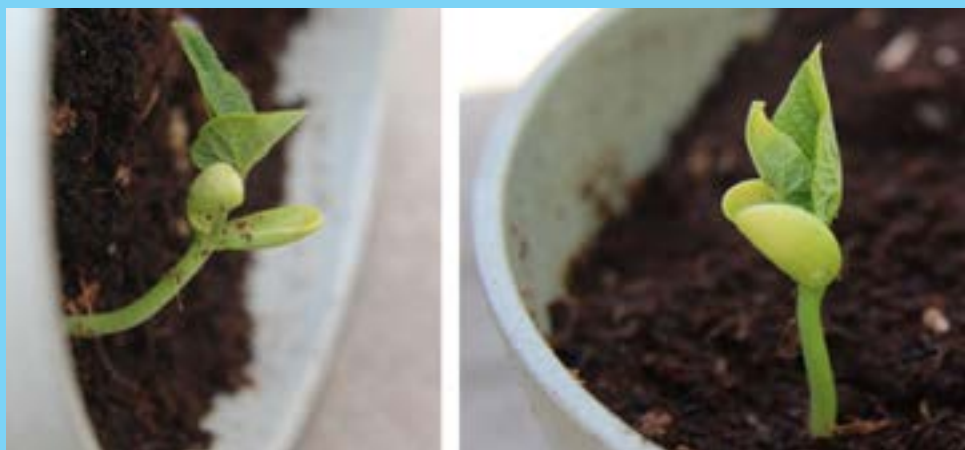
כן! צמחים חשים בשינויים במזג האוויר, בשינויים באורך היום (**פוטופריודיזם**) ובשינויים בטמפרטורה (**טרמופריודיזם**). גם בעלי חיים חשים בשינויים הללו של מזג האוויר.



איור 7: תרשים המדגים את תנועת כיפוף העלה לכיוון השמש בעזרת הפולבינוס הממוקם בבסיס פטוטרית העלה. התאים מתכווצים בצד הפונה אל השמש ותופחים בצד הנגדי של הפולבינוס.



איור 8: שני ייחורים שהועמדו בכלי עם מים למשך שלושה שבועות (ראו את הקטע הרטוב בתחתית הייחורים). הייחור שמשמאל הועמד בכיוון הנכון והייחור שממימין הועמד הפוך. בייחור שהועמד בכיוון הנכון פונה הניצן המלבב ישר כלפי מעלה ואילו בייחור שהועמד הפוך צומח הניצן המלבב הצידה ומתיישר כלפי מעלה לכיוון הנכון. השורשים (מסומנים לדוגמה בצבע חום) יצמחו כלפי מטה מהחלק הבסיסי של הענף.



איור 9: עציץ עם נבט של שעועית. בצד ימין עומד העציץ ישר ובצד שמאל אותו עציץ, שצולם אחרי שש שעות, שוכב. הנבט (הצמח הצעיר) מתכופף כלפי מעלה. השורשים ששוכבים על הצד בתוך העציץ ירגישו שהם על הצד ויתחילו לגדול כלפי מטה.

ישנם צמחים שפורחים באביב או בסתיו כאשר אורך היום מתקצר (צמחי יום קצר) וישנם אחרים שפורחים רק כאשר אורך היום מתארך (צמחי יום ארוך), או כאלה שפורחים ללא קשר לאורך היום. חקלאים יודעים לנצל את התכונות הללו ויכולים לזרז או לעכב את הפריחה על ידי בקרת התאורה בחממות הגידול.

צמחים חשים גם בשינויי טמפרטורה. מרבית הצמחים הרב-שנתיים צריכים מחזוריות של תקופות קור וחום על מנת לבלב או לפרוח. תכונה זו בולטת במיוחד אצל עצים המשירים את עליהם לקראת החורף ונמצאים במצב של **שלכת** ומלבלבים שוב כאשר הטמפרטורה עולה באביב. גיל העלים אם כן הוא שנה אחת. גם עצים שאינם נראים בשלכת חשים בשינויי אורך היום והטמפרטורה ונכנסים לתקופת תרדמה בחורף. הללו משירים גם כן את עליהם אך הדבר מתרחש במשך השנה ולא בבת אחת. הרגישות לטמפרטורה בולטת בקבוצת צמחים המכונה **גיאופיטים**, שהם צמחי בצל ופקעת, המאבדים את כל איבריהם העל-קרקעיים לקראת החורף ומלבלבים שוב באביב. ישנם צמחים שיש להם דרישה מיוחדת לכמות שעות הקור שהם צריכים לקבל בתקופת התרדמה כדי שיוכלו לפרוח ולהניב פירות. תאי הצמחים קולטים את השינויים באורך היום ובטמפרטורה בעזרת חיישנים מיוחדים הממוקמים על קרומי התאים ומעבירים אותות לתוך התא כדי לזרז תהליכים או להאטם. הפעילות העונתית של צמחים רב-שנתיים הכרוכה במחזוריות של פעילות ותרדמה, נותנת את אותותיה בתוך הגזע של העץ. העץ מאט את פעילותו בהדרגה לתקופת תרדמה. הוא יוצר תאים קטנים עם דופן עבה שנראים בעין כאזור כהה, עד אשר נפסקת הפעילות לחלוטין. עם זאת, היקיצה אינה הדרגתית אלא מתרחשת בבת אחת. העץ יוצר מיד תאים גדולים עם דופן דקה שנראים בעין כאזור בהיר. אפשר להבחין בשינוי בגודל התאים בעזרת מיקרוסקופ (איור 13). השינויים הללו בתוך גזע העץ נראים לנו כ**טבעות שנתיות** (איור 14). זו אולי ההוכחה שהצמחים חשים במחזוריות של שינויי אורך היום והטמפרטורה. אפשר לקבל גם תמיכה להוכחה זו אצל צמחים הגדלים באזור קו המשווה. שם אורך היום והטמפרטורה כמעט שאינם משתנים במהלך השנה, ולכן הצמחים פעילים באופן רצוף וללא הפסקה במהלך השנה והם חסרי טבעות שנתיות! במהלך השנים נאטמות הטבעות הפנימיות של העץ בחומרים שמנוניים והחלק הפנימי של הגזע נראה כולו כהה (איור 14).

7. האם הצמחים חשים כאשר פוצעים אותם?

כן! צמחים אומנם אינם חשים בכאב כפי שאנו חשים בו כי אין להם מערכת עצבים ומוח, אבל הם בהחלט חשים כאשר חרק מכרסם את העלה או כאשר החקלאי גוזם את ענפיהם. בצמחים יש מדרג של שליטה. הקודקוד הראשי, זה שנמצא בעמדה הכי גבוהה, שולט על הצמיחה של הניצנים והענפים הנמצאים תחתיו. התופעה הזו מכונה שלטון קודקודי. התופעה הזו בולטת במיוחד בעצים רב-שנתיים ולכן לעץ יש מבנה של פירמידה עם קצה מחודד למעלה ונוף רחב כלפי מטה. הקודקוד הראשי, בעזרת הורמונים שהוא מפריש, גורם לעיכוב בהתפתחותם של

הניצנים הנמצאים מתחתיו ולכן הוא תמיד נמצא בעמדה עליונה, חשוף לשמש (אלא אם כן הוא הופך לפרח או מתנוון וניצן אחר תופס את מקומו). אפשר להוכיח את קיומו של השלטון הקודקודי אם נגזום את הקצה העליון של הצמח. במקרה כזה שיוסר העיכוב, יבלבלו הניצנים הצדדיים הנמצאים בחיקי העלים לאורך הגזע (איור 15). באופן טבעי, כאשר הענף הראשי גדל והקודקוד שלו מתרחק מהניצנים שמתחתיו, פוחתת ההשפעה המעכבת שלו עליהם והם מלבלבים.

8. האם צמחים מריחים?

כן! צמחים, כמו בעלי חיים, קולטים חומרים נדיפים מהאוויר. מולקולות של ריח מתפשטות באוויר ונקלטות על ידי בעלי חיים למיניהם. אומנם אין לצמחים איברי הריח כמו לבעלי חיים, אך אין ספק שהם קולטים ריחות. הם קולטים דו-תחמוצת הפחמן לשם ביצוע הפוטוסינתזה, הם קולטים חמצן לשם ביצוע הנשימה התאית, וישנן עוד דוגמות, שיובאו בהמשך. צמחים קולטים, קרוב לוודאי, את מולקולות הריח בקרומי התאים ומעבירים לתוך התא את האות של הריח המסוים כדי לבצע תהליכים שונים.

בני האדם חושפים פירות (שנקטפו לפני הבשלתם על העץ) לגזים שונים, בעיקר אתילן שהוא הורמון צמחי, או אצטילן, בתהליך המכונה הבחלה, כדי לרכך אותם ולזרז הבשלתם. בתורם, הפירות אכן קולטים את הגזים הללו ומגיבים בהתאם. הוכח שפירות המבשילים על צמחים בטבע מפרישים אתילן ומזרזים הבשלתם של פירות בעצים שכנים.

צמחים חשים כאשר זחל של חרק אוכל את עליהם והם מגיבים בתגובת הגנה. בתחילה התגובה היא מקומית בעלה הנאכל, אך בהמשך היא מתפשטת לעלים השכנים וגם לכל הצמח. צמחים הסובלים מהתקפה של מזיקים שונים, פטריות וחרקים, מגיבים ביצירת שלל חומרים שנועדו לדחות את המזיקים. הם מייצרים חומרים מרים (מכונים טנינים), חומרים מחמצנים (ביניהם מי חמצן) וגם הורמונים נדיפים (מתיל חומצה ג'סמונית ואתילן). שלל החומרים הנוצרים בתגובת ההגנה של הצמח מעכבים את האכילה של זחלי החרקים. יתר על כן, הצמחים הנאכלים "משדרים" קריאות SOS (על ידי ההורמונים הנדיפים שהם מייצרים) לצמחים שכנים ומודיעים שהם הותקפו, ואז מתחילה תגובת הגנה גם אצל צמחים שכנים עוד בטרם הותקפו. תופעה דומה נמצאה גם כאשר גירפות אוכלות עלי אקציות באפריקה. העצים הנאכלים מייצרים מערכת הגנה וגם "משדרים" לעצי אקציות שכנים להתחיל לייצר את מנגנון ההגנה הדוחה עוד בטרם נאכלו על ידי הגירפות. המשמעות של הדבר היא שקרומי התאים של הצמחים מצוידים בקולטנים של ריח! אולי עוד יותר מסקרנת התופעה הבאה: לאחרונה נמצא שכאשר השמיעו לצמחים את קול הכרסום של זחלי חרקים, הם החלו, תוך מספר דקות, להגיב בהפרשת חומרי המנגנון הדוחה את הזחלים על אף שלא היו זחלים כלל!



איור 10: הצמח המטפס קיסוס יוצר שורשי אחיזה במגע עם גזע של עץ (מימין). שורשי האחיזה אינם נוצרים בצד המואר.



איור 11: כריות הדבקה של צמח הגפנית נוצרות במקום המגע של הגבעול עם הקיר ולא בצד הנגדי.



איור 12: 1. גבעולים נכרכים של הצמח תונברגיה גרגורי (Thunbergia Gregorii) 2. קנוקנת של הצמח המטפס אורנית לוחבת נכרכת על ענף יבש.

אינם יכולים לבזבז אנרגיה על ידי צמיחה באקראי עד אשר הם יפגשו צמח פונדקאי. הם קולטים מולקולות המשתחררות אל האוויר מצמחים שונים, משנים את כיוון הצמיחה וגדלים אל עבר הפונדקאי (איור 17). תנועה של גוף אל עבר גירוי כימי, או ממנו והלאה, מכונה **כמוטקסיס**. קצה השלוחה של הכשות "טועם" את המולקולות שבאוויר כמו לשונו של נחש.

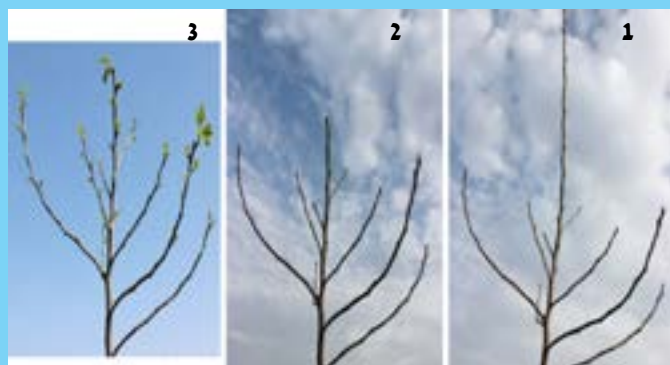
תופעה מעניינת נוספת המוכיחה כי צמחים מסוגלים לקלוט ריחות מסוימים קיימת בצמח הטפיל כשות (איור 16). צמח הכשות אינו מסוגל לבצע את תהליך הפוטוסינתזה ולכן הוא טפיל מוחלט שחייב להיצמד לצמח פונדקאי ולנצל אותו. הזרעים של הכשות נובטים על הקרקע ומצמיחים שלוחות הגדלות ותרות אחר צמחים שונים היכולים לשמש כפונדקאים. נבטי הכשות



איור 13: חתך רוחב מיקרוסקופי בגבול שבין שתי טבעות שנתיות בעץ של אורן. מבחינים בתאים ההולכים ונעשים קטנים עם דופן עבה בצבע כהה לקראת התרדמה (סוף שנה קודמת) והתעוררות בבת אחת על ידי יצירת תאים גדולים עם דופן דקה (תחילת שנה חדשה). שלושת העיגולים הגדולים הם ביבי שרף שבהם האורן יוצר את השרף בתוך העץ.



איור 14: חתך רוחב בגזע של עץ. מבחינים בטבעות השנתיות ובאזור כהה בתוך הגזע שנוצר מהצטברות של חומרים שמנוניים בתוך העץ.



איור 15: החלק העליון של עץ התאנה. 1. הקודקוד העליון עיכב התפתחות ענפים צדדיים מתחתיו. 2. לאחר שהוסר הענף העליון. 3. שלושה שבועות לאחר הגיזום מתחילים כל הניצנים לבלב עד אשר העליון מביניהם יבסס את השלטון הקודקודי שלו על היתר.



איור 16: צמח הכשות שהוא טפיל מוחלט (גבעולים צהובים), גדל על צמח פונדקאי.



איור 17: שלוחה של כשות גדלה על הקרקע ומחפשת פונדקאי. קצה השלוחה "הריח" את מיקומו של פונדקאי במרחק של 30 ס"מ ושינה את כיוון צמיחתו (מודגש בעיגול) לעבר הפונדקאי.

מקורות

חיימוביץ, ד. (2014), *צמח מה הוא יודע? הוצאת מטר*.
 זמסקי, א., (2015), *חשיבה יצירתית בהוראת מדעי הטבע*. בהוצאת מכון מופ"ת.
 זמסקי, א. (2017), *תהליכים ומנגנונים בעולם הצמחים*. הוצאת מגנס, האוניברסיטה העברית.

Zamski, E. (2018), *Plants, The Fascinated Organisms. An Intriguing Insight Into The World Of Plants*. Amazon

נווטכנולוגיה בחקלאות ובמזון

ד"ר מירי קליין וד"ר ילנה פוברנוב

המרכז לאגרו-נווטכנולוגיה, מנהל המחקר החקלאי, מכון וולקני



מזון פונקציונלי, לחיישנים, להדברה ירוקה, להנדסה חקלאית ועוד.

יישום הנווטכנולוגיות בחקלאות יביא לשימור טוב יותר של המזון והארכת חיי המדף, להפחתה משמעותית בכמות החומרים הסינתטיים שמטרתם למנוע מזיקים ומחלות בצמח, לשיפור הזנים, להגדלת הפרודוקטיביות ע"י ניהול תזונתי ושימוש במים ממוטבים והפחתה באיבוד התוצרת (Berger, 2014).

הפוטנציאל של נווטכנולוגיה בחקלאות הוא גדול, אך יש עדיין להתגבר על מספר אתגרים, ביניהם הגדלת היקף תהליכי הייצור והורדת עלויות, ובעיות הערכת סיכונים. מבחינה זו, חלקיקים המבוססים על ביו-פולימרים טבעיים כגון חלבונים ופחמימות הינם אטרקטיביים במיוחד. לאחרונה נעשה שימוש בננו-צינוריות פחמן, ננו-סיבים ופולרנים לחיישנים ביו-כימיים רגישים ביותר. חיישנים אלו יכולים לשמש כחיישני חישה ושליטה בחקלאות לניתוח הקרקע, לניהול מים ולאספקתם, וכן לאספקת חומרי הדברה וחומרים מזינים לצומח. בנוסף, נעשה מחקר רב בתחום ניצול הפסולת החקלאית כחומר גלם מתחדש ליצירת חומרי ננו. ננו-חומרים אלו, המבוססים על חומרי גלם ממקור טבעי, הינם בטיחותיים יותר, יעילים ומבוססים על מקור בר-קיימא (Berger, 2014).

כיום מזינים את האדמה, את הצמחים ואת בעלי החיים בדשנים חקלאיים, בחומרי הדברה, באנטיביוטיקה ובחומרים מזינים באמצעות תרסיס, מערכות הזנה או הזרקות שונות. חומרי ההדברה והתרופות משמשים כטיפול "מונע" או מרפא מחלות. השימוש בנווטכנולוגיה יכול להציע הזדמנות לפתח מוצרים חדשים נגד מזיקים וגורמי מחלה בצמחים אשר יגבירו את היעילות והבטיחות, יחד עם צמצום עלויות הטיפול.

נווטכנולוגיה היא שם כולל למחקרים ולטכנולוגיות העוסקים במערכות שגודלן האופייני נע בין ננומטרים בודדים ל-100 ננומטר. מחקרים וטכנולוגיות אלו הם בתחומי מדעים והנדסה מגוונים, ועוסקים בעיצוב, באפיון, בייצור וביישום של מבנים, התקנים ומערכות על ידי שליטה על הצורה והגודל בקנה מידה ננומטרי. למשל, מחקרים בפיזיקה ובהנדסת חשמל (התקנים מוליכים למחצה), מחקרים ופיתוחים הקשורים לביולוגיה מולקולרית ולרפואה (ריצוף מהיר של דנ"א (DNA) או שיטות מחקר וניטור חדשות של תהליכים ביולוגיים) ומחקרים הקשורים לכימיה (הנדסה של חומרים חדשים בעלי תכונות רצויות כגון חוזק) (Shanti et al., 2011). חומרים ננומטריים הינם חומרים אשר לפחות אחד משלושת ממדיהם הוא בסדר גודל ננומטרי, הגורם לשינוי בתכונות פיזיקליות שונות של החומר. ננו-חומרים מתאפיינים הודות לגודלם בתכונות מסוימות, דוגמת מוליכות חשמלית, ריאקטיביות כימית, מגנטיות, אפקטים אופטיים וחוזק פיזיקלי. למשל, בהרכבת ננו-מולקולות לקבלת המבנה הרצוי, פני השטח גדלים. הגידול בפני השטח מגדיל את הריאקטיביות של החומר, היות שהיא פונקציה של פני השטח. באופן זה, מפחית השימוש בחומר בגודל ננומטרי את כמות החומר הדרושה עבור אותה מידה של ריאקטיביות. שטח הנווטכנולוגיה ויישומיו הרפואיים מפותח מאוד בארץ ובעולם וההשקעה הכספית בתחום נמצאת במגמת עלייה מתמדת. במדינת ישראל קיימים שישה מרכזי נווטכנולוגיה באוניברסיטאות השונות, שהמדינה תמכה והשקיעה בהם בעשור האחרון משאבים וכסף רב.

ההתפתחויות הנווטכנולוגיות נוגעות גם לתחום החקלאות. הודות להתגברות האתגרים ושינויי האקלים בעולם, חוקרים בעולם מחפשים בנווטכנולוגיה מקור חדש לשיפורים בתחום. כיום משתמשים בנווטכנולוגיות לעיבוד מזון, להפצה של מרכיבים פעילים, לאריזות

הטבלה הבאה מציגה שימושים אפשריים של ננוטכנולוגיה בחקלאות (Parisi et al., 2015)

שימושים	הננוטכנולוגיה	דוגמה
מוצרי הגנה על צמחים	ננו-קפסולות, ננו-אמולסיות, מערכות שחרור מבוקר של חומרים פעילים כנגד מחלות וחומרי הדברה.	ננו-אמולסיות הטיילות שמן Neem כמערכת לשחרור מבוקר.
דשנים	ננו-קפסולות וננו-חלקיקים עבור שיפור הקליטה של חומרים מזינים בצמחים ושחרור של חומרים מזינים לאתרים ספציפיים בצמח.	דשנים מצומים בחלקיקי אבץ.
שיפור הקרקע ע"י שימור המים או הנזלים בקרקע	ננו-חומרים כגון זאוליטים וחומרים קרמיים השומרים את הנזלים בקרקע וגורמים לשחרור איטי שלהם לצמחים.	מוצרים משפרי קרקע המבוססים על ננו-טיט, לשמירת מים ולשחרורם.
טיהור מים	ננו-חומרים כמו ננו-חומרים קרמיים, חומרי סינון, וחומרים היכולים לקשור חומרים רעילים, לטיהור המים והסביבה.	מסננים מצופים חלקיקי TiO_2 עבור התפלה פוטוקטליטית של מזהמים במים.
חיישנים	ננו-חומרים כגון צינורות מחנן פעילות, וננו-פייברים המשמשים כחיישנים ביו-כימיים רגישים ביותר, למעקב מקרוב אחרי התנאים הסביבתיים בקרקע.	זיהוי חומרי הדברה ע"י לימוזום המבוסס על ננו-חיישן.
מודיפיקציות גנטיות בצמחים	ננו-חלקיקים הנושאים דנ"א או רנ"א שיועברו לתאי צמחים לצורך שינוי גנטי או הפעלת תוכנות הגנה.	חלקיקים של סיליקה (מזמורות) המשמשים להעברת דנ"א לתאי הצמח.
ננו-חומרים מצמחים	הפקה של ננו-חומרים מפסולת חקלאית באמצעות צמחים מהונדסים, חיידקים וטכנולוגיות נוספות.	ננו-סיבים מהיטה ומסויה ליצירת ננו-הרכבים.



מקורות

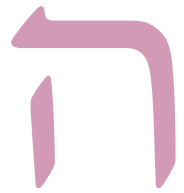
- Berger M. (2014) Nanotechnology in agriculture , <https://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=37064.php>
<https://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=37064.php>
 Parisi, C. , M. Vigani and E. Rodríguez-Cerezo. Agricultural nanotechnologies: what are the current possibilities? *Nano Today*. 2015 (10) 124-127.
 Shanti, B. Vijaya T. Mrudula and C.H. S.V. Naga Deepth. Novel applications of nanotechnology in life sciences. *J Bioanal Biomed*. 2011 (11) 1-4.

למרות הפוטנציאל הרב הגלום ביישום ננוטכנולוגיה בחקלאות, בתעשייה כמעט שלא נעשה שימוש בטכנולוגיות אלו. הסיבה העיקרית לכך היא חוסר אינטרס כלכלי מספיק אשר דורש השקעות ראשוניות גבוהות. עם זאת, לצד התפתחות הננוטכנולוגיה בתחומים השונים, מתפתח בקצב מהיר גם השימוש בננוטכנולוגיה בחקלאות. נראה שיישום הטכנולוגיה בחקלאות יתרום באופן משמעותי לתחום, הן מבחינת ניצולות והפחתת איבודים, הן בהיבטים סביבתיים ובריאותיים שונים והן ביתרון כלכלי.

חומרים צמחיים כמקור לתרופות

ד"ר ענת אלמן

המכון למדעי המזון, מכון וולקני



צמחייה העשירה על פני כדור הארץ תורמת לאדם מבחינות רבות, ביניהן תזונה ורפואה.

את ההשפעה הרפואית של הצמחים גילו הקדמונים ביבשות שונות כבר לפני עשרות אלפי שנים. על אף שבתקופות הקדומות לא הייתה החלפת ידע דרך אינטרנט, טלוויזיה, רדיו או אמצעים טכנולוגיים אחרים, ותנועת האוכלוסייה בין מדינות ויבשות הייתה מוגבלת, התגבש רעיון דומה בתרבויות השונות: ישנם צמחים המכילים חומרים המיטיבים עם בריאות האדם. צמחים אלו הוגדרו כצמחי מרפא, ושימשו את האנושות עוד לפני עידן תעשיית התרופות - התעשייה הפרמצבטית. מרשמים שנכתבו לפני אלפי שנים מתעדים טיפול בצמחי מרפא על פפירוסים ולוחות אבן ממצרים הקדומה, מסין העתיקה וממקומות נוספים.

עם התקדמות הטכנולוגיה המדעית הופנה הזרקור לעבר תרופות שהמדען יכול לייצר במעבדה, ו"תרופות הסבתא" נזנחו. מסיבות שונות, ההכרה בחשיבותה של בחינה מחודשת של יכולתן של תרופות הסבתא להשפיע על בריאותנו גברה בעשורים האחרונים, וכך התפתחו ענפי מחקר הקרויים אתנובוטניקה ואתנופרמקולוגיה. ענפים אלה חוקרים את השימוש בצמחי המרפא בתרבויות השונות ואת השפעתם של החומרים הצמחיים במודלים המקובלים במדע המודרני והמחקרים מצבי חולי בניסויי מעבדה. כדי לקדם את הידע האתנובוטני ואת תרופות הסבתא בכל יבשת ובכל מדינה פועלים כיום מדענים הבוחנים במעבדותיהם, בעזרת כלים מדעיים מודרניים, את צמחי המרפא של אותה מדינה או יבשת. תוצאות מחקרים אלו מעידות כי החומרים הצמחיים משפרים את בריאותנו, את איכות חיינו,

מקטינים תחלואה, ומשפרים את רמת ההתמודדות שלנו עם תחלואה.

מעניין לציין כי חומרים צמחיים יכולים לחקות באופן חלקי את פעולתם הביולוגית של חומרים המצויים בגופנו באופן טבעי. לדוגמה, הסויה מכילה פיטואסטרונים, שהם אסטרונים ממקור צמחי, ופעילותם דומה לפעילותו של ההורמון הנשי אסטרון (Bennetau-Pelissero, 2016); פעילות הקנבינואידים שבצמח הקנאביס דומה לפעילות האנדוקנבינואידים הנוצרים בגוף האדם (Mechoulam et al., 2014); והמורפין, המופק מצמח הפרג, מחקה את פעילותם של האופיאטים שבגופנו (Laux-Biehlmann et al., 2013).

תרופות קונבנציונליות שפותחו מצמחים

חומרים צמחיים שימשו השראה לפיתוח תרופות קונבנציונליות, וכיום ישנן תרופות במרשם רופא שהחומרים הפעילים בהן הופקו במקור מצמחים. בחלק מהמקרים, למדה תעשיית התרופות לייצר חומרים פעילים אלו או נגזרות פעילות שלהם באופן מלאכותי במעבדות. התהליך לגילוי חומר צמחי בעל פעילות רפואית הוא ארוך ורב שלבי, ותוכלו לקרוא עליו במאמר הסקירה (Sharma and Gupta, 2015). ישנן שתי דרכים עיקריות בעזרתן מקבלים החלטה האם לפתח תרופה מצמח מסוים. האחת קשורה לידע האתנובוטני, כאשר החוקרים מעוניינים לבדוק אם יש אמת בהשפעה הרפואית המיוחסת לצמח מסוים ברפואה העממית. הדרך השנייה היא ביצוע סריקה של מיצויים צמחיים רבים במערכת מודל למחלה מסוימת, ואיתור צמח שישפיע באופן הרצוי על הפרמטר עליו אנו רוצים

התרופות האמריקאי (FDA) לטיפול בחולי סרטן, וניתנה לחולים רבים ברחבי העולם (Wani and Horwitz, 2014). וינקריסטיין ווינבלסטיין - שני אלקלואידים מצמח הווינקה, המשמשים גם הם כטיפולים אנטי-סרטניים ופועלים כנגד תאים סרטניים במנגנון השונה ממנגנון הפעולה של טאקסול (Moudi et al., 2013).

4. תרופה לסוכרת מטיפוס 2

מטפורמין (Metformin) היא נגזרת של החומר שבודד מהצמח (*Galega officinalis* Thomas, 2017). הצמח תועד במאה ה-17 כמתאים לטיפול בסימפטומים של מחלה המוכרת כיום כמחלת הסוכרת. התרכובת המסוימת של מטפורמין יוצרה לראשונה ב-1922, אולם פיתוחה לא התקדם בשל ייצור האינסולין שהתקדם באותה תקופה. בשנות ה-50 של המאה הקודמת פורסמו תכונותיה של המולקולה, היא קיבלה את השם גלוקופאג' (*Glucophage*) שמשמעו "אוכלת גלוקוז", החלה לשמש לטיפול בסוכרת, ואושרה לשימוש בארה"ב בשנת 1994. מאז צורכים אותה עשרות מיליוני חולים.

5. תרופה לטיפול באי-ספיקת לב ובהפרעות בקצב הלב

החומר הפעיל בתרופה זו הוא דיגוקסין, המופק מהעלים של הצמח אצבעונית (*Digitalis Purpurea*). הדיגוקסין משמש לטיפול זה 230 שנים. מנגנון הפעולה העיקרי שלו הוא עיכוב משאבת נתרן-אשלגן בשריר הלב (Ziff et al., 2016).

האיור בעמוד הבא מציג את המבנה הכימי המסובך של המולקולות הצמחיות מורפין, מטפורמין, ארטמיסינין, דיגוקסין וטאקסול. למולקולות אלה יש מסלולי ייצור (סינתזה) מיוחדים, שלעיתים אף חברות התרופות מתקשות לחקות אותם במעבדותיהן.



להשפיע ולמצוא תרופה בעבורו. כלי המחקר המצויים בידי המדען ומשמשים להערכת הפעילות הרפואית של החומר הצמחי הם חישובים בעזרת תוכנות מחשב ייעודיות, ניסויים כימיים וביוכימיים, ניסויים בתרבויות תאים, ניסויים בבעלי חיים, ובשלב הסופי - ניסויים בבני אדם.

במקור, כמובן, הצמחים לא מייצרים חומרים אלו לתועלתנו אלא לתועלתם. לחומרים אלו תפקידים שונים בצמח, כגון הגנה מפני חרקים מזיקים, הגנה מפני נזקי קרינה, הגנה מפני חומרים מחמצנים, ולפעמים אלו חומרים הנותנים לצמח את צבעו. להלן דוגמות לתרופות שפותחו מצמחים, והניתנות לחולה באמצעות מרשם רופא:

1. תרופה למלריה

בשנת 2015 הוענק פרס נובל לפיזיולוגיה ורפואה למדענית הסינית פרופסור טו יויו על פיתוח תרופה למחלת המלריה מחומר המצוי בצמח המרפא לענה חד שנתית (*Artemisia annua*). פרופסור טו יויו וצוות המחקר שלה נעזרו במרשמים סיניים קדומים, ובדקו את יעילותם של מאות מיצויים צמחיים כנגד הטפילים הגורמים למחלת המלריה (Milhous and Weina, 2010; Zhang, 2016). הם גילו את החומר הפעיל - ארטמיסינין, בידדו אותו, ופיתחו אותו כתרופה לטיפול במלריה. תרופה זו הצילה חולים רבים ממוות באזורים מוכי מלריה.

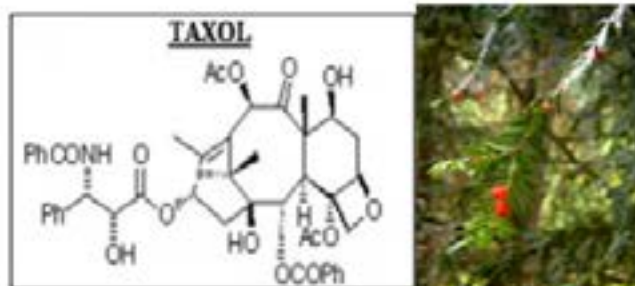
2. תרופה לשיכוך כאבים והרדמה

המורפין התגלה בשנת 1804 וכוונה "מורפיום" על שם אל החלומות היווני מורפיאוס. המורפין הינו אופיאט המופק מצמח הפרג (*Papaver somniferum* Laux-Biehlmann et al., 2013). בדומה לאופיאטים אחרים, המורפין פועל על הקולטנים (רצפטורים) האופיואידים שבמערכת העצבים המרכזית ויש לו אפקט משכך כאבים. עם זאת, חשוב לציין כי למורפין אפקט ממכר. מעניין לציין כי גופנו מייצר חומרים בעלי מבנה דומה - אופיאטים, המשפיעים על מערכת העצבים לאחר קישורם לקולטן על תאי העצב.

3. תרופות לטיפול בסרטן:

טאקסול - צמח המשמש כתרופה אנטי-סרטנית.

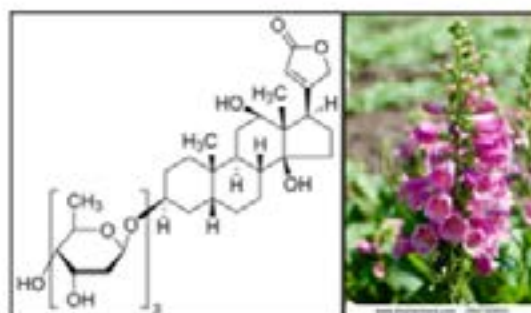
בשנות ה-60 של המאה הקודמת נערך מיזם במסגרתו חיפשו חומרים צמחיים שיכולים להתפתח לתרופות אנטי-סרטניות. לצורך זה נסקרו בארה"ב מאות מיצויים צמחיים לפעילות אנטי-סרטנית. המיצוי שהראה את הפעילות האנטי-סרטנית הטובה ביותר הופק מקליפת העץ *Taxus brevifolia* הגדל בארה"ב. מיצוי זה הראה יעילות בעיכוב חלוקת תאי סרטן, בעיכוב נדידת תאי הסרטן, בעיכוב התפתחותם של גידולים סרטניים בחיות מעבדה, ובהארכת חייהן של החיות החולות. מהמיצוי בודד החומר האנטי-סרטני וקיבל את השם Taxol. התרופה אושרה ע"י מינהל



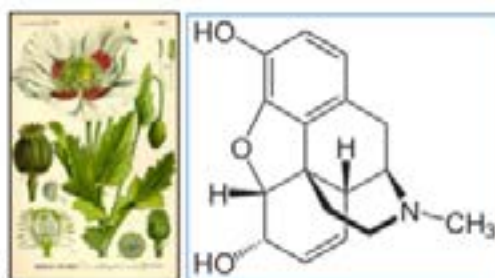
טקסול לטיפול בסרטן.



ארטמיסינין מלענה חד זרעית לטיפול במלריה.



דיגוקסין מאצבעונית לטיפול בלב.



מורפין מ- *Papaver somniferum* פרג כנגד כאב.



מטפורמין מ- *Galega officinalis*.

דוגמות לתרופות שהטבע מייצר

- Bennetau-Pelissero, C., (2016) Risks and benefits of phytoestrogens: where are we now? *Curr Opin Clin Nutr*, 19 (6), 477-483.
- Chikara, S.; Nagaprashantha, L. D.; Singhal, J.; Horne, D.; Awasthi, S.; Singhal, S. S., (2018) Oxidative stress and dietary phytochemicals: Role in cancer chemoprevention and treatment. *Cancer Lett*, 413, 122-134.
- Laux-Biehlmann, A.; Mouheiche, J.; Veriepe, J.; Goumon, Y., (2013) Endogenous Morphine and Its Metabolites in Mammals: History, Synthesis, Localization and Perspectives. *Neuroscience*, 233, 95-117.
- Mechoulam, R.; Hanus, L. O.; Pertwee, R.; Howlett, A. C., (2014) Early phytocannabinoid chemistry to endocannabinoids and beyond. *Nat Rev Neurosci*, 15 (11), 757-764.
- Milhou, W. K.; Weina, P. J., (2010) The Botanical Solution for Malaria. *Science*, 327 (5963), 279-280.
- Moudi, M.; Go, R.; Yien, C. Y.; Nazre, M., (2013) Vinca alkaloids. *Int J Prev Med*, 4 (11), 1231-5.
- Sharma, S. B.; Gupta, R., (2015) Drug Development from Natural Resource: A Systematic Approach. *Mini-Rev Med Chem*, 15 (1), 52-57.
- Thomas, I.; Gregg, B., (2017) Metformin; a review of its history and future: from lilac to longevity. *Pediatr Diabetes*, 18 (1), 10-16.
- Wani, M. C.; Horwitz, S. B., (2014) Nature as a remarkable chemist: a personal story of the discovery and development of Taxol. *Anti-Cancer Drug*, 25 (5), 482-487.
- Zhang, R. W., (2016) Artemisinin (Qinghaosu) Nobel Prize, anti-malaria, and beyond. *Chin J Nat Med*, 14 (1), 1-2.
- Zhu, F. M.; Du, B.; Xu, B. J., (2018) Anti-inflammatory effects of phytochemicals from fruits, vegetables, and food legumes: A review. *Crit Rev Food Sci*, 58 (8), 1260-1270.
- Ziff, O. J.; Kotecha, D., (2016) Digoxin: The good and the bad. *Trends Cardiovas Med*, 26 (7), 585-595

היכולת של חומרים מהצמחים לסייע לגוף להתגבר על מחלות שונות נובעת מיכולתם לעכב או להגביר תהליכים ביולוגיים המעורבים בהתפתחותן של מחלות שונות, ולמנוע תהליכים הרסניים. להלן שתי דוגמות לכך:

1. **פעילויות אנטי-דלקתיות של חומרים צמחיים.**
מצבי דלקת לוקחים חלק במחלות רבות בגופנו. אין הכוונה רק למחלות זיהומיות הנגרמות על ידי חיידקים יוצרי דלקת אלא למצבים בגוף בהם מתלקחים תהליכים בעלי מנגנון הדומה לתהליכי הדלקת שמפעילים החיידקים. במצבים אלו מופרשים מתאי מערכת החיסון ומתאי הרקמה החולה חלבונים קטנים המעבירים מידע לתאים אחרים ומניעים אותם לתהליך דלקתי. בתהליך הדלקת מופרשים חומרים שתפקידם המקורי הוא להרוג חיידקים, אולם על אף שהמצב הדלקתי אינו נובע מדלקת זיהומית, מופרשים חומרים מזיקים אלו והורגים את תאי הרקמה. מחקרים רבים הראו כי חומרים שמקורם בצמחים מפחיתים תהליכים כאלו, וכפועל יוצא מסייעים בהפחתת התהליך הדלקתי, בהפחתת עוצמת המחלה ובהחלמת הרקמה (Zhu et al., 2018).

2. **פעילויות נוגדות חימצון (אנטי-אוקסידנטיות) של חומרים צמחיים.** בתנאים פיזיולוגיים ישנו שיווי משקל בין ייצור נגזרות חמצן פעילות reactive oxygen species (ROS) ופירוקן. חשוב לציין כי ה-ROS חיוניות לתפקודם הנורמלי של התאים. אולם, במחלות רבות ישנה עלייה משמעותית ברמות ה-ROS ובעקבותיה חמיצונית (oxidative stress). לרבים מהחומרים הצמחיים פעילויות נוגדות חימצון, כלומר פעילויות המנטרלות את השפעתן השלילית של ROS התוקפות מולקולות ביולוגיות דוגמת הדנ"א (DNA), חלבונים התא, ומרכיבים שונים בקרום התא. כתוצאה מכך מתפתח מצב הקרוי עקה חימצונית, ומחקרים רבים מראים כי לעקה החמיצונית תפקיד חשוב בהתפתחותן של מחלות רבות ושונות. לגוף יש אומנם מנגנונים אנזימטיים להתמודדות עם העלייה ב-ROS ולהפחתת העקה החמיצונית, אולם קיימת חלופה להפחתת העקה החמיצונית בגוף, והיא צריכה של חומרים נוגדי חימצון ממקורות חיצוניים. אפשרות אחת היא צריכה של תוספי תזונה בעלי פעילות נוגדת חימצון, ואפשרות שנייה, זולה יותר, היא צריכה של מולקולות נוגדות חימצון מאכילת ירקות ופירות המכילים חומרים בעלי פעילות מסוג זה, היכולים להגן על התאים מעקה חימצונית. לכן, כדי למנוע היווצרות עקה חימצונית, ובכך לסייע לגוף למנוע התפתחות מחלות דוגמת סרטן, מומלץ לצרוך תוצרת חקלאית מגוונת המכילה נוגדי חימצון מקבוצות כימיות שונות (Chikara et al., 2018).

תכנון מודל לחווה חקלאית לימודית על פי עקרונות הקיימות

גלעד בן מאיר

(מבוסס על עבודת תזה בפקולטה לניהול, החוג למשאבי טבע וסביבה, אוניברסיטת חיפה,
בהנחיית פרופסור אברהם חיים - אברהמלה ודר' מיכל גרוס - מוקי)

התכנון המקיים של החוות יביא למודעות סביבתית גבוהה בקרב צוות החווה ותלמידי החקלאות. המחקר מציע מודל למבנה הפיזי של חווה חקלאית לימודית הייחודית לישראל. המודל המוצע שונה למדי מהחווה הקיימות כיום, בשני תחומים: 1. החווה



תלמידים בפעילות בחווה

חוקרים רבים מסבירים את המשבר הסביבתי בו אנו שרויים כתוצאה של ניכור בין האדם לטבע. ניכור זה נובע מהתפיסה שהאדם הוא "נזר הבריאה" ושליט על הטבע ועל בעלי החיים, וכתוצאה מכך יחס האדם לטבע ולברואיו הוא נצלני. החינוך הסביבתי מבקש לשקם את יחס האדם לטבע (גולדברג, 2003). לכן יש לחנך לפיתוח בר-קיימא (Sustainable development). בראשית שנות המדינה ועוד לפני כן לימודי הטבע והחקלאות היו הפרספקטיבה העיקרית של החינוך (Sauvé, 2005). להיות חקלאי באותם זמנים היה האידיאל העליון עבור "היהודי החדש" וסימל את המעבר מחיים בגולה, בה לא ניתנה ליהודים האפשרות לרכוש קרקע, למדינה שבה הם בעלי הקרקע.

על פי דו"ח ברוטלנד ("עתידנו המשותף"), פיתוח בר-קיימא הוא פיתוח העונה על צורכי הדור הנוכחי, מבלי להתפשר על יכולתם של הדורות הבאים לספק את צורכיהם (United-Nations-General-Assembly, 1987). רוב החוקרים מסכימים ששינויי האקלים ישפיעו לרעה על היבולים ועל הייצור החקלאי המוצלח ועקב כך גם על האטת הגידול המואץ של האוכלוסייה (Kirschenmann, 2009).

השערות המחקר

אם חוות חקלאיות לימודיות יתוכננו לפי עקרונות של קיימות, אזי הפגיעה בסביבה תהיה מזערית, ועל כל פעולה חקלאית שתעשה בחווה להתחשב בשלושת גורמי הקיימות: כלכלה, חברה וסביבה. בנוסף

תהיה מתוכננת. 2. החווה המתוכננת תהיה אקולוגית והפעילות בה תתבסס על עקרונות הקיימות בחקלאות וקיימות כללית.

שיטות וחומרים

המחקר משלב מחקר כמותי ואיכותני (Quantitative and Qualitative research) הכולל:

1. סקר על נתוני החוות החקלאיות לימודיות (צילום מצב קיים), השוואה וניתוח. N=19 מתוך 26 חוות רלוונטיות של הזרם המרכזי.
2. ניתוח סטטיסטי באמצעות שאלון למנהלי החוות.
3. ניתוח איכותני של השאלות הפתוחות שבשאלונים.
4. סקר שבוחן את ההתנהלות החקלאית-אקולוגית-חינוכית של החוות החקלאיות לימודיות בישראל, הממוקמות בערים ובמועצות אזוריות ברחבי הארץ. הדגם המוצע במחקר מיועד להוות בבסיס התוכנית למתכנן.

תוצאות

חוות חקלאיות חינוכיות בישראל החלו לפעול כבר בשנות החמישים. מאחר שלימודי החקלאות בבתי הספר בזמנו לא ענו על הציפיות - דבר הנכון גם היום - הוחלט שבחוות החקלאיות לימודיות ילמדו חקלאות ויישמו את הלימודים בעבודה מעשית. היות שאין ביכולתן של החוות הקיימות לקלוט את כל ילדי העיר, מאפשרים לכל בית ספר המעוניין בכך לשלוח לחווה מדי שבוע עד שלוש כיתות.

ניתוח ממצאי המחקר בחוות משלב את כל אוסף הנתונים מכל חמשת כלי המחקר המפורטים לעיל ומשווה בין התוצאות. הערכים בטבלאות הם ממוצעים וסטיות תקן.

ממצאים אינפורמטיביים על החוות החקלאיות לימודיות

להלן הנתונים הפיזיים הממוצעים של החוות משנת 2015:

טבלה 1: השטח הכולל (בדונם), אחוז השטח החקלאי, מספר הכיתות והיחס לגודל החווה בחוות החקלאיות לימודיות בישראל

שטח ממוצע של חווה (דונם)	השטח החקלאי מכלל שטח החווה (באחוזים)	מספר הכיתות המגיעות לחווה בשבוע	היחס בין מספר הכיתות לשטח החווה (מספר הכיתות/השטח בדונם)
22±15.4	84±13.3	46±15.6	2.95±1.7
טווח: מקסימום 60	96	88	5.75
מינימום 7.5	50	30	0.75

הלימוד וחדרי המורים מהווים עד 5% מכלל השטח והשאר מוקצה לנוי ולפעילות סביבתית. נמצאו גם שטחים ריקים לא מנוצלים. מספר הכיתות המגיעות לכל חווה מדי שבוע מכתוב את מערכת השעות שלה.

טבלה 1 מצביעה על פער גדול בין שטחי החוות השונות, לדוגמה שתי חוות מסוימות קולטות 44 כיתות בשבוע, כאשר באחת 60 דונם, בעוד בשנייה רק 7.5 דונם. האזור החקלאי בחווה מחושב כ-5% מכלל השטח ועומד על ממוצע של 84% (מקסימום 96%, מינימום 50%). כיתות

טבלה 2: הרכב השטח החקלאי והפעילות הלימודית האופיינית בחוות השונות

הגידול/ הפעילות	השטח המוקצה בחוות מהשטח הכולל (באחוזים)	אחוז החוות בהן יש הגידול/הפעילות	הזמן המוקצה (באחוזים) לפעילות האופיינית
גן ירק	60 ± 22	100	63
חממות ירקות	6.7 ± 7.0	48	10
ירקות אורגניים	50	5	5
חממות צמחי בית	17 ± 11	89	47
ריבוי צמחי בית	0.5 ± 12	63	5
עצי פרי	18 ± 18.1	63	5
פרחי שדה	7.2 ± 3.7	26	5
פינת חי	5 ± 5.0	26	21
פינת בישול	-	17	5
גינות נוי לטיסוח	25 ± 25.0	10	13
גינה אקולוגית	0.25	5	10
סביבה טבעית	17	5	5
פעילות סביבתית	23 ± 21.0	10	17
עבודות חקר	-	100%	10
מחזור פסולת רטובה	4 ± 3.9	10	5
מחזור פסולת יבשה	1 ± 0.75	10	5
אזור התכנסות	8	5	
שדה חיטה	9	5	
מכורות ורדיה	1	5	
מורשת ישראל	-	5	5
חלקה לעולים מאתיופיה	6	5	5

הוא שטחי נוי ופעילות סביבתית. ישנם גם שטחים ריקים לא מנוצלים. מספר הכיתות המגיעות לכל חווה מדי שבוע מכתוב את מערכת השעות של החווה. גן הירק הוא הגידול היחיד שמופיע בכל החוות (100% מהחוות) ותופס בממוצע 60% מהשטח החקלאי. שאר הגידולים מופיעים רק בחלק החוות.

בטבלה 2 מפורטים הרכב השטחים החקלאיים השונים של כל חווה והפעילות הלימודית בה. האזור החקלאי מחושב כאחוז מכלל השטח. גם כאן יש פערים עצומים, והשטח החקלאי מכלל שטח החווה נע מ-50% ועד 96%. הממוצע הוא 84% שטח חקלאי. הכיתות וחדרי המורים מהווים עד 5% מכלל השטח. מעבר ל-5% אלה שאר השטח

ממצאים מהסקר החקלאי אקולוגי בחוות חקלאיות לימודיות, בנושא פיתוח חקלאי בר-קיימא

ההיבט הסביבתי

טבלה 3: ההיבט הסביבתי בפיתוח חקלאי בר-קיימא בחוות החקלאיות לימודיות

קטגוריה	הפרטים שנבדקו	יישום ממוצע בחוות דירוג בין 5 ל 1
פיתוח חקלאי בר-קיימא שילוח בחשבון את הסביבה	- בפיתוח החווה מתחשבים בסביבה. - מתחשבים במחזור הביו-גאו-כימי של הטבע. - מתחשבים ביוחסי הגומלין בין הגורמים הבינטיים והאנטיים במערכות חקלאיות.	2.17±0.96
יחס למושאבי מים	- ויסות צריכת מים באופן קבוע להשקיה. - מנצלים את טוח המים להשקיה. - ניסו תקין של הקרקע בחוות. - דאגה למי תהום (ריסוס ארצני 1.5 מתוך 5). - חיבור למערכת ביוב 4 מתוך 15.	2.08±1.36
היחס לפסולת מוצקה	- מחזור פסולת אורגנית, שימוש בובל מעלי חיים. - מחזור מתכות, מחזור נייר, פלסטיק, גומי וכימיקלים. שימוש חוזר בנייר, פלסטיק, גומי ומתכת.	2.79±1.25
שימור קרקע	- הקרקע נשמרת על מרחיקת תנך כדי השימוש החקלאי. - לוקחים בחשבון את הידוק הקרקע. - מניחים את הקרקע בקומפוסט באופן יעיל. - הניקוז בוסדר ואין סתף קרקע. - אדמת החווה נשמרת מפני זיהום בכימיקלים.	2.27±1.71
השימוש בתומרי הדברה	- מריססים את מיקי הצמח והמחלות בתומרים שאינם מזיקים לסביבה. - האדם המריס מתחשב בתזוית הראות שימוש. - ריסוס המגיבייה מתחשב בכיוול וכעצמה הרות. - אין שימוש בריסוס מוגן נביטה.	2.87±0.64
שימוש מושכל באנרגיה	הפיתוח בחווה מביא בחשבון מחזור במקורות אנרגיה.	0.69±0.25
מחזור נוזלי	- השטח החקלאי מוגדל ביצילות. - מתייחסים בכבוד ראש למרווחים בין הצמחים ובין השורות. - התלמיד לומד את מגבלות מושאבי הטבע. - דלק, מים, קרקע.	2.84±0.89

מיובא לחוות על ידי מורים ותלמידים לפעילות סביבתית, מה שבגמר השימוש עשוי ליצור מפגע סביבתי. רוב החוות מדשנות בקומפוסט בכמות אקראית ובמרווחי זמן אקראיים. דישון כימי דרך מערכת ההשקיה כמעט לא קיים. רק בחמישית מהחוות הקרקע נשמרת מפני זיהום בריסוסים קוטלי מגע ומונעי נביטה. כושר הנשיאה של שטח חקלאי עובד לשני הכיוונים. מצד אחד ניצול יעיל של השטח ומצד שני מניעת צפיפות יתר. ב-28% מהחוות השטח לא מנוצל כראוי בגלל מרווחים גדולים מדי בין שורות הגידולים וכן גם בין הצמחים בשורה. כמו כן קיימים אזורי עיבוד לא מנוצלים, ואף הקרקע נלטשות עיניים נדל"ניות.

טבלה 3: בהקמת החוות ובפיתוחן, אז וגם היום, מתבססים על בתי גידול טבעיים קיימים, או שמסלקים אותם בזמן הכנת התשתיות. חסרה בחוות התחשבות במחזור הביו-גאו-כימי הטבעי ולכן אין מחזור זרעים מסודר ואין התחשבות בגורמים הביוטיים והאביוטיים. בחוות החקלאיות אין מעקב אחרי צריכת המים של כל גידול וגידול ואין הפקת לקחים מצטברת לגבי השימוש במים. הניקוז לא נלקח בחשבון, ובחממות ההשקיה לא יעילה ואין מחזור מים. בממוצע רק מחצית מהפסולת האורגנית בחוות ממוחזרת לקומפוסט. קומפוסט מיוצר בהצלחה ב-5% מהחוות שיש להן פינת חי. ערימות גזם רבות לא מנוצלות ומתפרקות עם הזמן. פלסטיק וגומי

16% מהחוות המתנהלות אקולוגית בדרגות שונות, יש את מספר הכיתות הגבוה ביותר ביחס לשטח, וחיסכון יחסי במשאבים.

ניהול חווה חקלאית לימודית דורש ניהול של שני תחומים: ניהול בית ספר וכל הכרוך בכך, ובמקביל ניהול חווה חקלאית על כל המורכבות והגידולים שבה. כפילות התפקידים גורמת למתן תשומת לב פחותה לניהול החקלאי שדורש ידע רב בסוגיות גידוליות, דוגמת נושאי מים, קרקע, הדברה וקיימות. מן השאלון ניכר שהמנהלים היו רוצים לשלב קיימות בחקלאות, אבל באופן מעשי הדבר מתקיים רק ב-16% מהחוות, בדרגות שונות של קיימות. זה לא קורה מפני שהמורים והמנהלים בחוות לא מגיעים מרקע חקלאי אקולוגי אלא מרקע של לימודי מדעים בלבד. המחסור במורים עם רקע חקלאי מחלחל גם לתלמידים, וזה בא לידי ביטוי בהתעניינות מעטה בחקלאות אקולוגית והרגלי צריכה לא אקולוגיים (Hill, 1992). במחקר של קרמן ומילס (Kremen and Miles, 2012) נמצאו 12 שירותים של המערכת האקולוגית שמצמצמים השפעות חיצוניות ואקלימיות על החקלאות, מה שמחזק את ההנחה בדבר חשיבותן של החוות הלימודיות אקולוגיות.

ברוב החוות (80%) החקלאות לא נחשבת כחלק מהסביבה, אלא כנושא נפרד ממנה. כלומר, יש נתק בין הנאמר לבין הנעשה בשטח. 80% מהמנהלים תומכים במצב הקיים שבו העבודות החקלאיות מתבצעות לפי המצב בשטח ברגע מסוים ("חקלאות מגיבה"). חייבים לשנות תפיסה ולעבור בהדרגה לחינוך חקלאי אקולוגי.

למען הצלחת המעבר לחינוך החקלאי אקולוגי, יש בשלב ההתחלתי לשלב בין חקלאות קונבנציונלית וחקלאות אקולוגית (Gliessman and Rosemeyer, 2009), להיוועץ באנשי מקצוע, וללמוד בהדרגה כיצד לעבור לאגרואקולוגיה (חקלאות אקולוגית), תוך שמירה על הדברה זהירה ומתונה. הרעיון הציוני הכל מראשית ימיו גם חקלאות וגם אקולוגיה, מה שאמור להשתלב באופן טבעי בעשייה בחוות. מאמרו של אהרון דוד גורדון (גורדון, 1913) מתווה כיוון חשיבה חינוכי ציוני: "...עם אשר נקרע כולו מעל הטבע, אשר במשך אלפיים שנה היה כלוא בתוך החומות, עם אשר הורגל לכל מיני חיים רק לא לחיי טבע, רק לא חיי עבודה, עם כזה לא יוכל מבלי התאמצות כל כוח רצונו לשוב ולהיות עם חי, טבעי...". קירשנמן (Kirschenmann, F. 2009) משוכנע שללימודי האגרואקולוגיה יש חשיבות ברורה בהקשר לכך שחלק מהתלמידים הם אלה שיעצבו בעתיד את פני החקלאות.

מסקנות

השערת המחקר **אומתה שכן** מבנה החוות החקלאיות לימודיות בארץ מאז ראשית הקמתן, כמו גם הפעולות החקלאיות המתבצעות בהן, אינן מובילות לפעולות חקלאיות ואחרות **שמתחשבות בסביבה**. אין בתוכנית העבודה לחוות הנחיות חקלאיות בתחומים של שיטות עיבוד קרקע והכנה לזריעה, אופן טיפול בעשבייה ובמזיקים, מחלות צמחים, ניקוז, השקיה, דישון, קומפוסט, פינת חי ודרך השימוש בכלים חקלאיים. יש לקדם ולפתח את התלמיד הצעיר, בקרוב אזרח

חווה חקלאית היא בית ספר לכל דבר ולכן אין מצפים ממנה להיות רווחית. עם זאת, את הגידולים החקלאיים יש לגדל כאילו היו גידולים כלכליים. כלומר, יש למדוד ולשקול יבול, לחשב ולחסוך בהוצאות ולהגדיל יבול והכנסה, כל זאת תוך שמירה על דרך הקיימות. התעלמות מהפן הכלכלי של הגידול הופכת את העיסוק לסוג של גינון - וגינון אינו חקלאות. נמצא במחקר ש-16% מהחוות מגדילות את הכנסתן ב-20% עד 30% על ידי מכירת יבול ופעילות אחרי הלימודים. שאר החוות מכניסות רק 5%, נוסף לתקציבי תמיכה.

ההיבט הקהילתי

רוב החוות משמשות כריאות ירוקות באזור העירוני (3.8 מתוך 5), ובכך מממשות את אחת המטרות היסודיות שבהקמתן. מטרה אחרת שלא הושגה עד היום היא פעילות למען הקהילה אחרי שעות הלימודים, וחווה מעטות בלבד יוזמות פעילות לקהילה אחרי שעות הלימודים. מטרה מוצהרת נוספת בהקמת החוות היא להתקדם לכיוון של פתרון בעיות סביבה באמצעות ידע הנלקח מתחומי חקלאות ומדעי החיים - ומנתוני הסקר עולה שהדבר לא מתקיים, לפחות לא בשלב הנוכחי.

דיון

בעולם הרחב לא קיימות חוות חקלאיות לימודיות כמו אלה שבישראל, שקשורות בטבורן לרשות המקומית ולמשרד החינוך. מה שכן, בעולם הרחב יש חוות פרטיות כלכליות, המאפשרות בין השאר פעילות לימודית של בתי ספר על בסיס כלכלי, דוגמת החווה לחינוך חקלאי בארה"ב, Lewise Educational Agriculture Farm (<http://leafct.com>). מכאן, שהתוכנית המוצעת כאן לתכנון חווה חקלאית לימודית, לא הייתה יכולה להיעזר בחוות דוגמת אלה הקיימות בחו"ל. מחקר זה בא לבחון את המבנה הפיזי של החוות החקלאיות לימודיות הקיימות בישראל ואת השפעתו על המטרות החינוכיות שלהן.

בקביעת גודל חווה מיטבי יש להתבסס על מספר קריטריונים, שאינם מתקיימים כיום: 1. התאמה לתוכנית לימודים ותוכנית עבודה עבור 80 כיתות בשבוע. הגודל הנוכחי מותאם לשלושה עשר אנשי צוות. 2. שטח חקלאי המניב ומספק יבול לכל התלמידים בחווה עם עודף של 50%. חלק מן העודף ימכר לשם הכנסה כספית לחווה, וחלקו ייתרם כפעולה חינוכית סביבתית. 3. מיקום החווה בתוך העיר או בשוליה כדי לשמש בה ריאה ירוקה. 4. שטח חווה גדול מדי עלול להיחשב כבזבז קרקע וחוסר יעילות ולעודד גורמים המתנגדים לחוות ולוטשים עיניים לשטח הנדל"ני. 5. התאמת גודל החלקות החקלאיות ליכולת התלמידים. אחרת, על המורים להשלים את העבודות שלא נעשו.

השערת המחקר הייתה שבחוות עם פעילות חקלאית-אקולוגית יהיה חיסכון במשאבים. נמצא שרק באותן

בהסתמך על בדיקות קרקע, מעקב ואיסוף נתוני השקיה והסקת מסקנות לטווח קצר וארוך.

11) בחווה תופעל מערכת לאיסוף מי גשם ושימוש בהם.

12) יתבצעו בדיקות עלים לחוסרים/עודפים של יסודות הזנה. תוצאות הבדיקות יתורגמו לתוכנית דישון.

13) יתבצע טיפול אינטנסיבי בעשבייה ולעולם לא יהיה שימוש בריסוסים מונעי נביטה והצצה.

14) בחווה תתקיים הדברת מחלות ומזיקים בצומח ובחי בטכנולוגיות ביולוגיות ובחומרים מורשים על ידי הארגון לחקלאות אורגנית. כן גם בחומרי הדברה חדשים וכאלה שבפיתוח שאינם פוגעים בסביבה.

15) הכניסה למתחם הכיתות, לחדר המורים, למעבדה ולמשרדים תהיה דרך חממת צמחי בית ומשתלה.

כניסה כזו מכניסה אותך לאווירה טובה וגם משמשת כווסת לאקלים החיצוני. הבניין המרכזי יקורר ויחומם באמצעים טבעיים (כיוון שמש ורוח, בידוד קירות, פתחי אוורור ואמצעים חדשניים נוספים שיוכנסו בעתיד לשימוש). על גג הבניין חממת ריבוי שאיננה מעמיסה יתר על המידה מבחינת משקל ומהווה בידוד לגג. שרטוט בדף האחרון.

ההיבט הכלכלי

16. החווה תופעל כערך חינוכי תוך קיום כדאיות כלכלית. אין הדבר אומר כי האתר החינוכי לימודי יתיימר להיות כלכלי או רווחי, אלא כי יחושבו רק ההוצאות וההכנסות השוטפות של הגידולים החקלאיים עצמם, תוך השוואה לגידול במגזר החקלאי. התלמיד יראה שכמות היבול ואיכות היבול תלויים ביחס לעבודה. ליחס זה יש משמעות כלכלית עבור המגדל, וכל פעולה חקלאית, קטנה כגדולה, תתחשב תמיד בסביבה. עודפי יבול ייתרמו כערך חינוכי וגם יימכרו ויהוו הכנסה לחווה.

ההיבט החברתי

17. החווה כולה תותאם, נוסף ליעדים המקוריים שלה, גם כאתר לסיוורים לימודיים, לכנסים, לתיירות וכמקום לאירועים.

18. יש לשתף את התלמיד בעבודה ויצירה בחווה ולתת לו הרגשת שייכות. העבודה מעוררת יוזמה והעיסוק והטיפול בחומר מולידים במוחו של התלמיד רעיונות חדשים אשר נקלטים כערך קיים וקבוע. לכל כיתה תוקצה חלקה/ות עלה היא תהיה אחראית, ובה תקפיד לקבל תוצאות טובות, בהשוואה לתוצאות המקובלות אצל חקלאים בארץ. לאחר ההשוואה יחשבו התלמידים על דרכים לשפר ולהשתפר ויבדקו את עצמם על ידי ניסויי חקר.

19. בחווה תוקם פינת חי על פי עקרונות הקיימות, האחזקה תהיה נוחה ובעלת גישה נוחה לתלמידים ומבקרים.

20. כל תלמיד יהיה שותף לחקר, נוסף לעבודה וללימוד השוטפים. המורים ינחו את התלמידים בעבודות החקר ויהיו גם אחראים לכתיבת הדו"חות המסכמים על ידי

התלמידים. לצורך כך מומלץ מאוד שהמורים יעזרו בייעוץ והדרכה חיצוניים.

21. האזור החקלאי ינוהל ע"י אגרונום בכפופות ובגיבוי מנהל החווה.

22. היבול ייבדק במעבדה לשאריות חומרי הדברה, חרקים ומחלות. עדיף כמובן לא לרסס לקראת קטיף בהתאם להנחיות מדריך להגנת הצומח ממשרד החקלאות (לא קיים מדריך כזה במשרד החינוך).

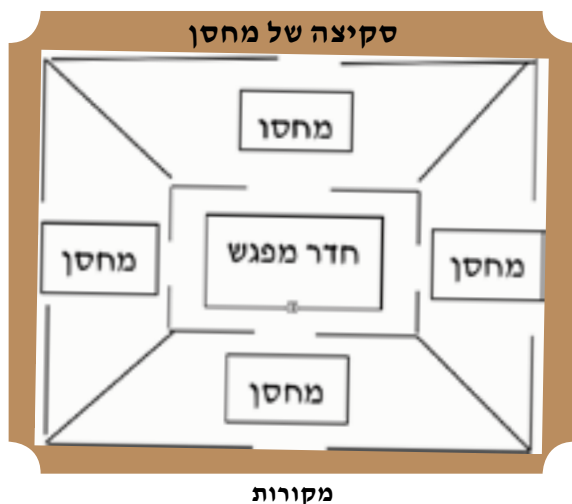
23. כל מרכיבי החווה בתוכנית האב יתוכננו תכנון שניוני ושלישוני. [כבר קיים אצל כותב המחקר].

24. מנהל החווה וצוות החווה יבואו מרקע חקלאי.

25. בחווה תהיינה ארבע כיתות לימוד מאובזרות שתאפשרנה הוראה של ארבע כיתות תלמידים הנמצאות בחווה בזמנית.

26. יוקצו שני שטחי התכנסות, אחד חיצוני באזור מדעי הצמח, ואחד פנימי בבניין המרכזי.

27. מחסן מרכזי יותקן באמצע החווה, ולו ארבע כניסות מסביב ובתוכו ארבעה חדרים פתוחים זה לזה. מחסן במרכז החווה יהיה קרוב יחסית לכל מרכיבי החווה, ויחסוך קיומם של מספר מחסנים קטנים ולרוב לא מסודרים.



גורדון, א' ד' (1913). הקונגרס. חשבון הנפש של ציר במקום דין-וחשבון על הקונגרס. לפני הקונגרס. פרויקט בן יהודה. מסות ומאמרים. http://benyehuda.org/gordon_ad

נגולדברג, ג' (2003). שיקולים בבחירת מקצוע ההוראה: דו"ח השוואתי תשנ"ח-תשס"ב, שנתון המכללה.

Glissman, S. R. and M. Rosemeyer (2009). The Conversion to Sustainable Agriculture: *Principles, Processes, and Practices*, CRC Press.

Hill, B. Stuart 1992. Environmental Sustainability and the Redesign of Agroecosystems. *Ecological Agriculture Projects* (EAP), McGill University, 1992.

Kirschenmann, F. 2009. Farming in the middle: An ethical imperative. In: *Organic Farming: The Ecological System*. pp. 325-342. Francis, C. A. Ed., T., Guivant, J., Lee, D. R., Orr, D., Pfeffer, M. and Ward, H., Eds. Sage Publ., London.

Kremen, C., and A. Miles. 2012. Ecosystem services in biologically diversified versus conventional farming systems: benefits, externalities, and trade-offs *Ecology and Society* 17(4):40

Sauvé, L. 2005. Currents in environmental education: Mapping a complex and evolving pedagogical field. *Canadian Journal of Environmental Education* 10:11-37

United-Nations-General-Assembly (1987). *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future*. <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm> (Accessed 10/02/US Census Bureau, <http://www.census.gov/ipc/www/idb/worldpopinfo.php> Retrieved: 10.2.2011.

<http://noshem.org.il/>



היחידה לנוער שוחר מדע מכון וולקני



להצטרפות לקהילת המורים ולקבלת עדכונים
אנו מזמינים אתכם לאתר המרכז הארצי למורי מדעי החקלאות

<https://agriteach.org.il>



המרכז הארצי למורי מדעי החקלאות
מרכז חקלאות
דרכי חקלאות 88, תל אביב 6102000
רמז לנייד 7520000



חברות מייק
noshem@volcani.agri.gov.il



צור קשר
03-9463400 / 03-9463401

