

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

מהפכות בהתפתחות האנושות

ה

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 הפיקטיבית**.

(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

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, האבוריגינינים 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 ממתנינים מספיק זמן (כי היער עדיין ענק) הוא יחזור למצבו הקודם.

הביות משנה את היחס בין האדם למינים שביית. עכשיו הוא **מטפל** בהם. גם הצמחים שביתו 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

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?

החפירות 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 המתיישבים 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 - ב"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 בפזורים על פני השטח. לכן התחילו לעדר, להשקות, לזבל ולגרש מזיקים מהחלקות שבהם גידלו את צמחיהם. במשך הזמן למדו לקחת זרעים לריבוי מצמחים שהצטיינו



המפה של ניקולאי ואווילוב

למינים אחרים של בעלי חיים תכונות שאינן מאפשרות כדור הארץ. כד 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

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.

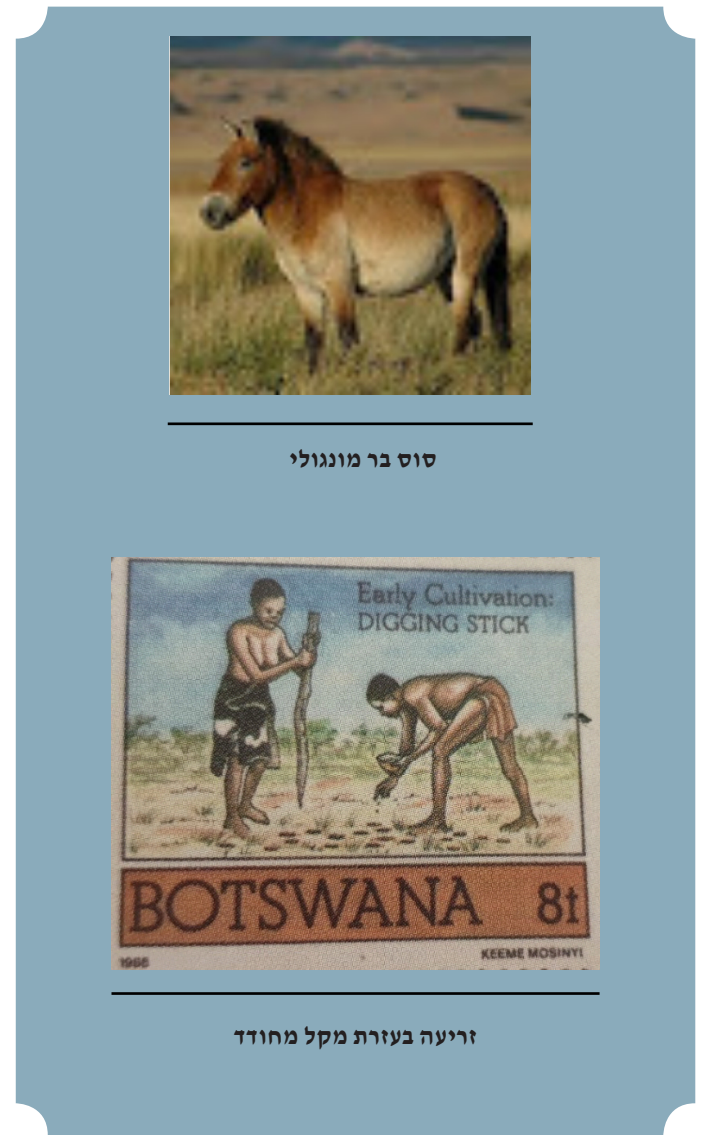
ממקל כמעדר למחרשה על טרקטור

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.

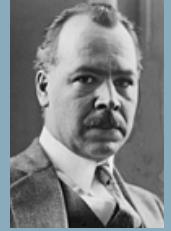


סוס בר מונגולי

זריעה בעזרת מקל מחודד

ניקולאי ואווילוב (1887-1943)

חוקר 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, שכעבור 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 חבר זר של החברה המלכותית של לונדון - כיבוד שבו זכו רק מעט מדענים. בברה"מ נערך כגיבור תרבות - עד שבאה הנפילה והסוף הטרגי בעקבות פרשת ליסנקו. כיוון שמדובר במקרא המפורסם ביותר של התערבות הפוליטיקה האידיאולוגית במדע המודרני, ראוי לציין אותו כאן, לפחות בקיצור: אגרונום מפוקפק בשם ליסנקו טען בכנס סובייטי-רוסי ב-1929 שמטפח הצמחים מיצורין, שלא היה מדען, "הוכיח" שאכן תכונות נרכשות בחיטה עוברות בזרעים (כפי שהאמין למארק) ושה"מנדליים-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 האינקוויזיציה בימי הביניים: "נעלה על המוקד, נשרף, 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 שביותו	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 שנזכור 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

הרפורמות החקלאיות בזמן החדש

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 ובעלי חיים מגזעים ששיבחו.
- * נפתחו שווקים וכבישים חדשים, ואמצעי התחבורה השתפרו.

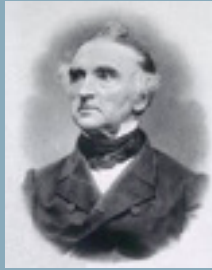
יש הקוראים לרפורמה החקלאית "מהפכה חקלאית שנייה", אבל בספק אם הביטוי מוצדק. השינויים בתקופה זו אומנם היו ניכרים, אבל לא בקנה מידה של המהפכה החקלאית המקורית, שנמשכה במשך עידן של עשרות אלפי שנה.

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 חיסת 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.

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

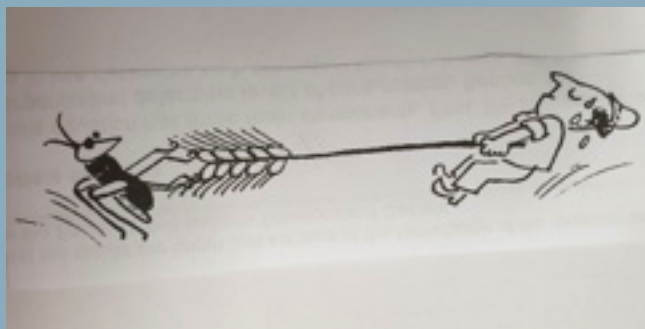
חרקים, פטריות, וירוסים ואורגניזמים נוספים מתחרים

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 1845-6 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.



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 ממצאו 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 משטיינר 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 אסטרוולוגי 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 הציוד 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 ורסאיקיים 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 ולרבגונות 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, ומבקר התיאוריה מכנים אותה בשם "מדע מדומה", בגלל ההסתמכות היתרה על ידע אזוטרי ועל אמונות מיסטיקות.

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.

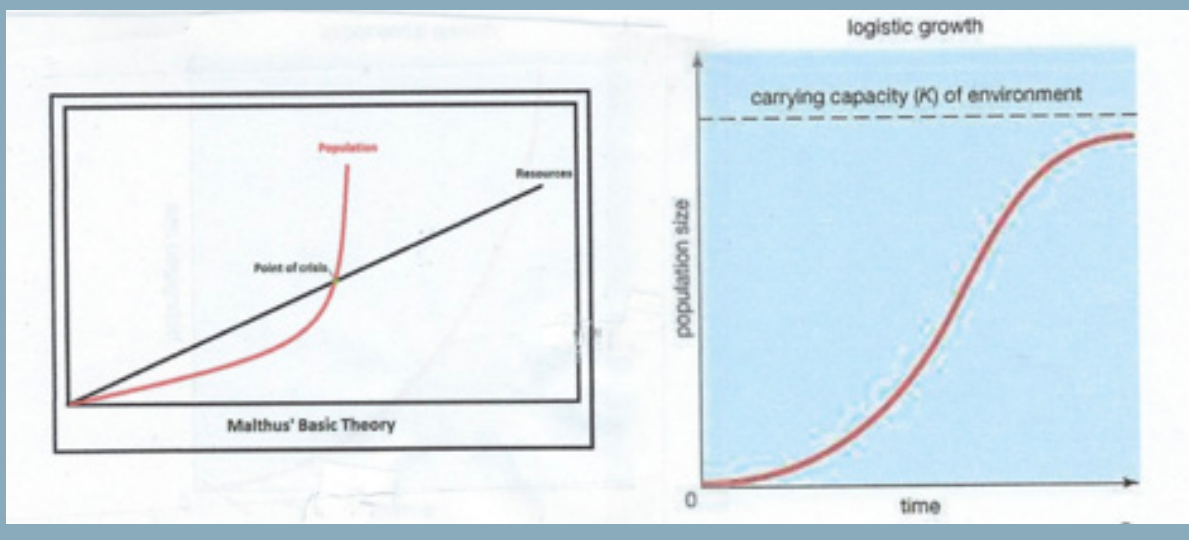
הרחבת ההשקיה

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 אס 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 רווקות.



איורים 1, 2

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 סיגמואידי**, 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 והפריים.

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 דיֶשׁוֹן 500 ק"ג לדונם, ועם דיֶשׁוֹן - 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 8IR הייתה באסיה הצלחה כבירה והוא קיבל את השם "אורז פלא"; ועל בורלוג אמרו שהציל מיליארד אנשים מרעב.

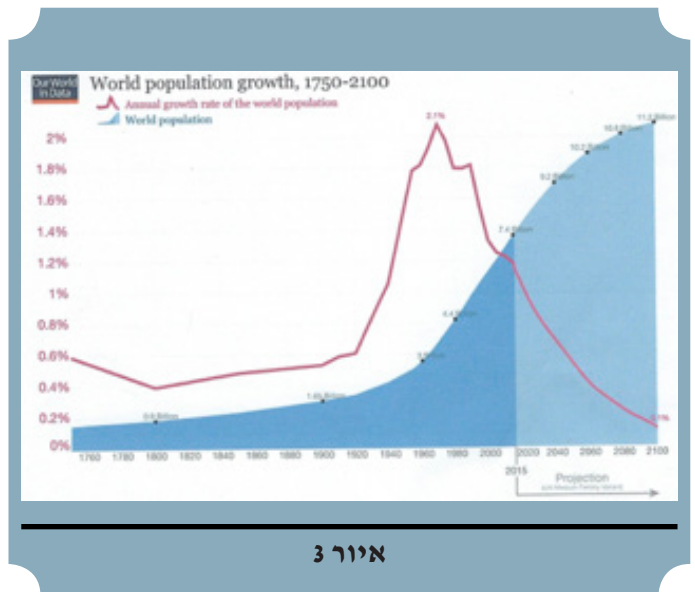
ניסו כמה פעמים להחדיר את ה-HYV גם לאפריקה, אבל שם ההצלחה הייתה הרבה יותר נמוכה. הסיבות לכך היו השחיתות שנגפה כמעט בכל מקום, חוסר הביטחון הכללי, תשתיות לקויות והיעדר רצון מצד הממשלות להירתם למאמץ. אבל גם גורמים סביבתיים הקשו על העברת המהפכה הירוקה לאפריקה.

• 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 יתרונויהם 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 8IR ששחררו ב-1966 והניב יבול הגדול פי 10 מהזנים המסורתיים.

ב-1961 שרר בהודו רעב קטלני. הממשלה הזמינה את בורלוג לארצה כדי שיייע לחולל בה מהפכה ירוקה. היבוא של זני HYV מ-CIMMYT ו-8IR מ-IRRI נקלט בהצלחה. את הזנים ניסו ההודים לקלוט באזור פנג'אב,

. 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?

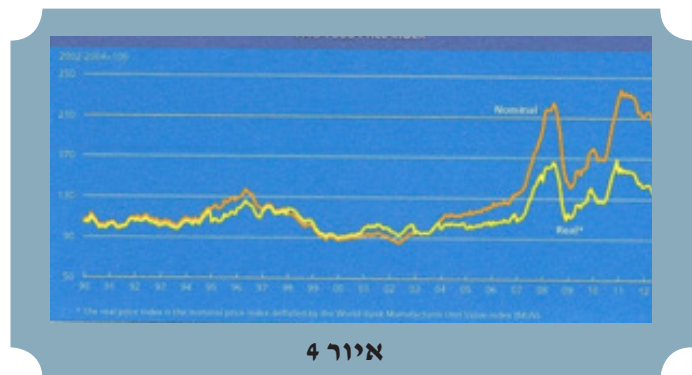
האם הייצור של מזון על ידי צמחים הנקראים טרנסגניים (transgenic) יהווה את השלב הבא במרוץ למנוע את הקטסטרופה של מלתוס? או שמא יסכנו את הבריאות

. 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.

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

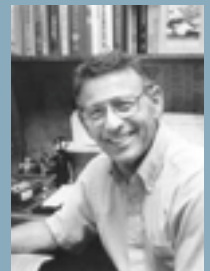
מה בין אורגניזמים גנטיים, GMO "כלליים" ואורגניזמים טרנסגניים?

הנדסה גנטית היא שיטה ביוטכנולוגית שבה מעבירים גן ספציפי שתפקידו באורגניזם ידוע, מהדני"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 שבטיפוח 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 מהדני"א של וירוס אחד ולאחד אותו עם הדני"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 לדני"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 הדני"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 דני"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 התירו 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' 3-10
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-8IR 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* (חידק 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