

פרדוכס האדמה הירוקה

עמינדב ברנשטין¹נוף ירוק²

אביב. המטוס הקל ריחף בגובה נמוך, בדרכו צפונה. בתוכו יושבה משפחה, שיצאה לבלות חופשה בגליל העליון. הם הביטו כלפי מטה והתפלאו מהיופי המבהיק: שדות חקלאיים, שטחי מרעה, חורשים ויערות, ועוד. "תראו איך הכל ירוק!" – אמר האב. הבן הבכור, שלמד ביולוגיה 5 יחידות בכתה י"ב, שב והסתכל על הנוף, קימט את מצחו, ואמר: "מוזר. זה לא כל כך מתקבל על הדעת". "מה פתאום?" – שאלה האם.

"למדתי על מארגי המזון במערכות אקולוגיות, שלפיהם הגידול של הצמחים הירוקים (היצרנים) מוגבל על-ידי בעלי החיים הצמחוניים. עם שפע כזה של מזון כמו למטה, הצמחוניים אמורים היו להתרבות ללא גבול, ולבסוף לחסל את הצומח! זה לא קורה, נכון?" "טוב" – התערבה הבת הצעירה, שגם היא למדה ביולוגיה. "ישנם טורפים האוכלים את הצמחוניים, ומגבילים את ריבויים".

"ומה עם הטורפים האוכלים את הטורפים?" – שאלה האם. שקט שרר זמן מה במטוס. "יש כאן בכל זאת בעיה" – חזר ואמר הבן. "אם ניקח את סך הכל הצרכנים (הצמחוניים, הטורפים, וטורפי הטורפים) – מזונם בא בסופו של דבר כולו מהצומח. אם יש הרבה אוכל, הציבור הזה יתרבה ויחסל את כל הירוק. שוב מוזר, נכון?"

המטוס נחת בשלום, ובני המשפחה ניגשו לצימר שחיכה להם. למחרת, החלו הביולויים. באחד הימים, המשפחה טיילה בתוך חורשה רעננה של עצי אלון התבור. לעצים אלה, היחידים בחורשה הזאת, היה כיסוי

¹ עמינדב ברנשטין מורה במחלקה, nadavami@netvision.net.il

ברצוני להודות לבתי אפרת הנדלסמן על עזרתה המועילה

² Google English, green landscape, images page 9, Free green landscape – wallpaper
http://www.scenicreflections.com/files/Green_landscape_Wallpaper_yvt2.jpg

מלא של עלים ירוקים. הם גם פרחו בשפע: על אותו עץ נמצאו פרחים זכריים וגם נקביים. גרגרי האבקה עפו עם הרוח, כך שחלק מהם הגיע גם אל הצלקות, מה שיגרם ליצירת פירות וזרעים. הקרקע הייתה מכוסה כולה בשכבה של עלים מתים. בתוך שכבה זאת נראו לא מעט יצורים זעירים: חרקים, שבלולים, תולעים ועוד. בעומק, העלים היו לגמרי מכוסים עובש.

מסביב השתרעו עד האופק מטעים מוריקים. התברר שהחורשה הייתה אי מוגן בתוך ים של גידולים חקלאיים. מדריך הטיול סיפר שהפירות (אגוזים המכונים בלוטים) מבשילים בסתיו ונושרים על הקרקע. חזירי-בר באים לבילה לנגוס בבלוטים. חרקים קטנים נוגסים בעלים שעל העצים או מוצצים את לשדם, אך הפגיעות הן בדרך כלל מזעריות, כך שהעלים נשארים ירוקים במשך כל הקיץ. עם בוא החורף, כל העלים נושרים והעץ נישאר ערום ועריה – עד לאביב הבא. באביב אלון התבור מצמיח שוב עלים ופרחים רעננים, והכל מתחדש.

הנער שאל את המדריך, האם חלו שינויים רציניים בחורשה לאורך השנים. התשובה הייתה שלילית: "אני חי בסביבה, ומכיר חורשה זאת מילדותי. לא שמתי לב לשינוי של ממש: בכל עונה ועונה היא נראית בערך אותו דבר."

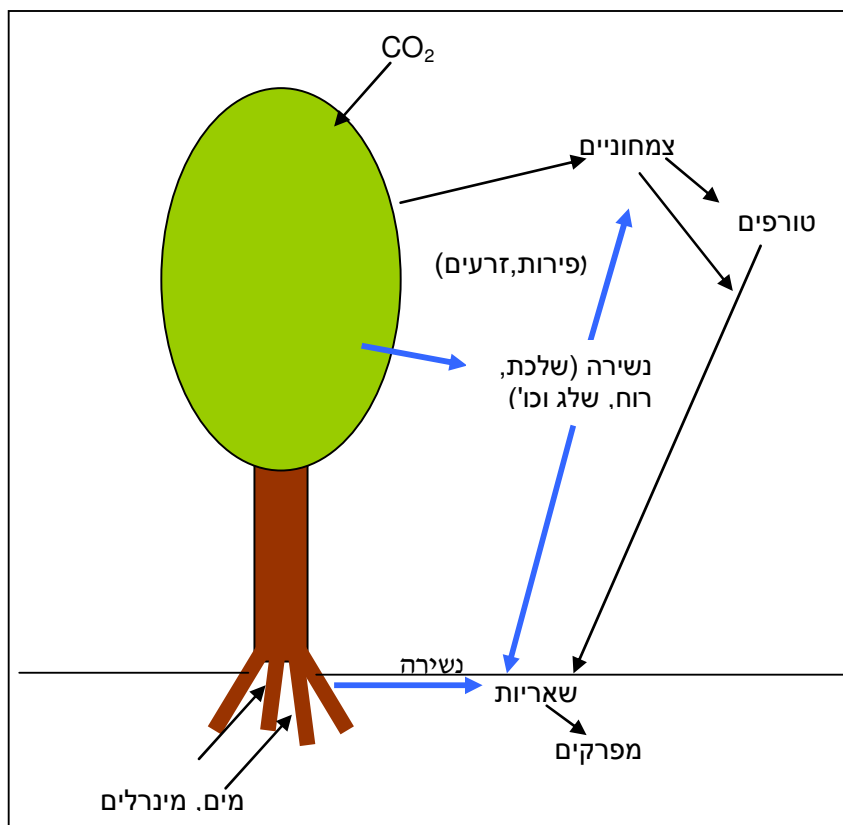
הבעיה שהתעוררה בנוגע לצמחייה הירוקה בכלל, ולחורשת אלוני התבור הזאת בפרט, מכונה **"פרדוקס האדמה הירוקה"**. בקיצור, כפי שאמר הנער החכם, אם הצומח מוגבל אך ורק על-ידי כלל הצרכנים למיניהם, כי אז היינו מצפים להשמדה טוטלית של היצרנים בעולם. זה לא כל כך קורה, ומאיזה סיבה?

בהמשך שרטוט סכמאטי של **גורל תוצרי היצרנות של עץ**.

החיצים הכחולים מצביעים על גורל תוצרי היצרנות, שאינו נובע מפעילות ישירה של אורגניזמים על הצמח עצמו. לדוגמה: אלון התבור משיר, עם בוא החורף, את כל העלים שלו – ללא כל קשר עם הצמחוניים למיניהם. הבלוטים ורוב חלקי הפרחים נושרים גם הם בעצמם. גורמי מזג אוויר, כמו רוחות למשל, שוברים ענפים ומעופים עלים. וכל הנשורת הזאת מפרנסת, בסופו של דבר, ערב רב של יצורים (המכונים לעיל בשם הכולל "מפרקים") – אך היא הייתה מתרחשת גם בלעדיהם.

מחקרים רבים הצביעו על כך שבבתי גידול לא מעטים (אך לא בכולם), חלק ניכר (לעיתים קרוב למאה אחוזים) של היצרנות הראשונית לא מגיע אל הצרכנים הישר מהיצרן, אלא רק אחרי נשירה או מוות. גם עצים ירוקי-עד משירים עלים, אך לא בבת אחת. עשבים חד שנתיים רבים, למשל, משמשים רק אחרי מותם כמזון לצרכנים למיניהם. הצרכנים עצמם מפרישים שתן וצואה, וגם מתים מסיבות שונות – ההפרשות והפגרים משמשים כמזון ל-"מפרקים". ברור שבמקרים אלה, פעילות ה-"מפרקים" אינה משפיעה ישירות על אוכלוסיות היצורים המספקים להם מזון. אך תוך פירוק החומר האורגני של השאריות, הם משחררים מינרלים החיוניים לקיום הצמחים.

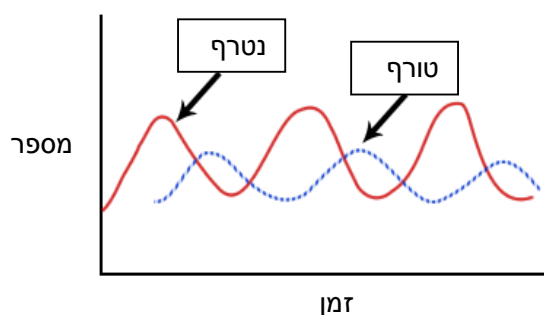
גורל תוצרי היצרנות של עץ:



מובן שגם לטמפרטורה, לאספקת המים והמינרלים, לריכוז הפחמן הדו-חמצני באוויר וכו' – השפעה ניכרת על הביומסה של הצמחייה. ואל לנו לשכוח את התורשה. מועד השלכת מושפע למשל מאורך היום ומהטמפרטורה, אך עצם העובדה שצמח מסוים משיר את כל העלים ביחד היא תכונה תורשתית. גם אצל צמחים חד-שנתיים, למשל, התורשה היא המכתיבה את החיים קצרים. בקיצור: במקרים רבים, לא הצרכנים בלבד קובעים את גורל היצרנים. האם זה פותר את בעיית "פרדוקס האדמה הירוקה"? נמשיך הלאה.

פרדוקס הפלנקטון

בשכבות המוארות של האוקיינוסים, נמצאת כרגיל ערבוביה מתמדת של יצורים פלנקטוניים: פוטוסינתטים יחד עם שרשרת של טורפים למיניהם. לפי העיקרון המקובל, כל מין אמור לתפוס גומחה אחרת, כדי להמשיך להתקיים, אבל איך הם מסתדרים יחדיו – איך הצמחוניים והטורפים למשל אינם מחסלים לגמרי את היצרנים. קשה לבדוק זאת, אם ניקח בחשבון למשל תנועה מתמדת של זרמי מים לכל הכיוונים – גם כלפי מטה.



להלן מובא אחד ההסברים האפשריים. נא להציץ בגרף משמאל

מדובר על היחס המספרי בין טורף ונטרף, חד-שנתיים למשל. כאשר הטרף (אדום) הולך ומתרבה, גם הטורף

(כחול) יתרבה אך זמן מה אחריו. ריבוי הטורף פוגע באוכלוסיית הנטרף, וזאת הולכת וקטנה. התוצאה: אין

מזון מספיק לטורף, וגם הוא מתדלדל. תהליך כזה הולך וחוזר שוב ושוב. האם זה קיים במציאות? סביר שכן. מצב דומה נתגלה בטבע היבשתי וגם במעבדה.

נגסו, נגסו בי! זה דווקא עושה לי טוב!

בתום החופשה, המשפחה חזרה הביתה. תלמיד הביולוגיה הסקרן קרא משהו מדהים באינטרנט: "נקבה של פרפר מגיעה אל עץ מסוים, ומטילה ביצים על העלים. כעבור זמן קצר, בוקעים מהביצים זחלים קטנים המתחילים לנגוס בתיאבון בעלים.

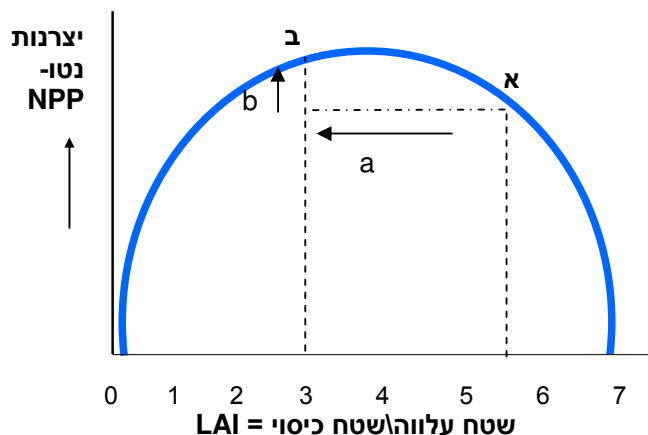
הנגיסה מסתיימת רק כאשר הזחלים מתגלמים. האם זה הזיק לעץ? להיפך, זה היטיב עמו!" הנער אמנם פיקפק בנכונות הסיפור, אך בכל זאת הוא פנה בעניין זה למורתו. זאת, מצידה, התקשרה לאקולוג מומחה, וקבלה את ההסבר הבא:

כדי להבין את האפשרות המוזרה הזאת, נקח בחשבון שלעץ שפע של עלים רחבים, לא מחטניים. נניח שאנו מודדים את השטח העליון של כל העלים (נקרא לתוצאה "שטח העלווה"), וגם את השטח הקרקע הנמצא בדיוק מתחת לעלווה (נקרא לו "שטח הכיסוי") – ראו בעמוד הבא את הציור העץ וצילו. אם נחלק את שטח העלווה בשטח הכיסוי, נקבל את "מדד שטח העלים" (Leaf Area Index – LAI).

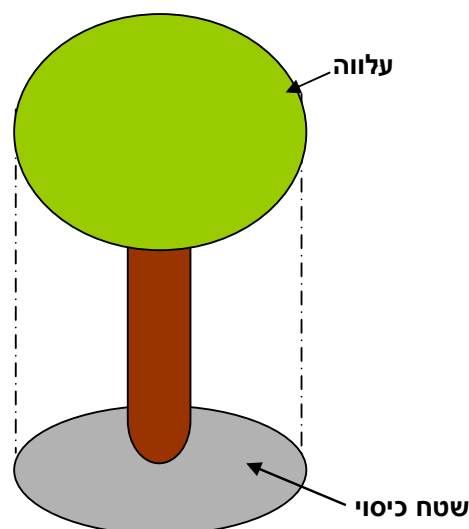
נניח שה-LAI של עץ מסוים הוא 1. המצב הוא כאילו כל העלים מסודרים בשכבה צפופה אחת, ששטחה שווה לשטח הכיסוי. עם LAI = 2, כאילו קיימות שתי שכבות עלים, עם LAI = 3 ישנן שלוש שכבות, וכן הלאה. לאמיתו של דבר, העלים של עץ לא מסודרים שכבות-שכבות, אך התיאור הנ"ל יאפשר להבין את משמעות ערך ה-LAI.

בשעות האור, העלים מבצעים גם פוטוסינתזה וגם נשימה: **היצרנות נטו** (Net Photosynthesis **NPP - Production**) היא ההפרש ביניהן. היצרנות נטו של העץ כולו, הולכת וגדלה ככל שיש יותר עלים – אך רק עד לגבול מסוים. העלים מהשכבה העליונה מקבלים אור במלוא עוצמתו, ושיעור הפוטוסינתזה הוא מרבי. השכבה העליונה מצלה על השכבה התחתונה, ולכן זו מבצעת פחות פוטוסינתזה; לעומת זאת שיעור הנשימה נשאר בערך כמו בשכבה העליונה: היצרנות נטו של השכבה השנייה פחותה מזאת של העליונה. ככל שמעמיקים בתוך העלווה, פוחתת היצרנות נטו של העלים.

יצרנות נטו (NPP) כפונקציה של ה-LAI



העץ וצילו



נעיף עתה מבט אל הגרף לעיל, **יצרנות נטו NPP כפונקציה של ה-LAI**. עד ל- $LAI = 3$ בערך, היצרנות עולה, אך שעור העלייה הולך ומתמתן. ככל שה- LAI גדל, מתווספים אמנם עלים נוספים, הנמצאים בשכבות עמוקות יותר, אך התרומה שלהם ליצרנות נטו הולכת ופוחתת. לפי הגרף הנידון, המבוסס על ניסוי מסוים, כאשר ה- LAI מגיע ל- 3 בערך, היצרנות נטו מפסיקה לעלות. בעלים של השכבה הרביעית בעומקה, הנשימה כבר גוברת על הפוטוסינתזה, ועל-כן היצרנות נטו שלהם שלילית, והם הפכו למעשה לצרכנים המפחיתים מהיצרנות נטו של העץ כולו: העקומה מתחילה לרדת. בגרף, כאשר ערך ה- LAI גדול מ- 7, היצרנות נטו של העץ כולו מגיעה לאפס!

השאלה הנשאלת היא: האם יש יתרון לעץ בעל LAI גבוה? לפי הגרף הנידון, האם יש יתרון ל- LAI הגבוה מ- 3? התשובה היא חיובית, עד למידת מה כמובן.

נתבונן שוב בגרף, ונניח שלעץ מסוים LAI של 5.6, עם יצרנות נטו α . עתה מגיעה נקבת הפרפר, מטילה את ביציה, והזחלים הבוקעים מתחילים לנגוס בעלים. ה- LAI יורד (חץ a), ומגיע למשל עד ל- 3 בערך. מה קורה ליצרנות של העץ כולו? היא הולכת וגדלה (חץ b), מ- α עד β . העץ יתאושש במהרה, ויצימח שפע של עלים חדשים. פירוש הדבר שפעילות האכילה של הזחלים לא הזיקה לעץ. נהפוך הוא, היא הועילה לו: העלתה את יצרנותו נטו! מהלך כזה לא חייב להתרחש עם כל צמח ובכל מצב, אך הוא בהחלט אפשרי. כדאי לציין שפגיעה מגורם פיזי, כמו רוח התולשת עלים, גם היא מורידה את ה- LAI . ועל-כן עשויה גם היא להועיל לצמח! ברור שלו המצב ההתחלתי היה למשל LAI קרוב ל- 3, עם יצרנות מרבית, כרסום כלשהו היה מזיק לעץ!

הנער הבין את ההסבר, ותפס ששינוי ה- LAI יכולים להסביר, לפחות חלקית, את "פרדוקס האדמה הירוקה".
תלמיד חכם!

ישנם גם עצים אחרים

ברור ששינוי ה- LAI הנ"ל אינם בהכרח מתאימים לכל צורות העץ. נתבונן בשני הצילומים הבאים:

***Picea abies* אשוחית נורווגית**
עץ מחטני



***Tilia* טיליה**
עץ רחב עלים



צורת הטיליה מתאימה למה שהוסבר לעיל על שינוי ה-LAI. ומה עם האשוחית, הנפוצה בצפון אירופה ואסיה?

אצל עץ האשוחית העלים העליונים לא מפריעים כמעט להארת העלים התחתונים, גם בגלל היותם מחטניים וגם לפי צורת הפירמידה של העץ.

בימים האלה ממש פורסם מחקר על צמח זה.³

גם כאשר השמיים מעוננים, לעתים קרובות חודר מבעד לעננים אור אלכסוני פנימה אל תוך העלווה של האשוחית.

כל זה "פנטז" טוב, המאפשר לעץ כזה ביצוע מוגבר של פוטוסינתזה.

גם צ'רלס דרווין היה חכם

הוא היה ער, כמובן, לבעיות ריבוי האוכלוסין של המינים השונים, כפי שמודגם בציטוטים הבאים:
 "הפיל נחשב כמתרבה האיטי ביותר מבין כל בעלי החיים הידועים, ואני התאמצתי לאמוד את שיעור הגידול הטבעי המינימאלי הסביר שלו; זה יהיה בטוח להניח שהוא מתחיל להתרבות בגיל שלושים שנה, וממשיך להתרבות עד לגיל תשעים, תוך הולדת שישה צעירים במשך הזמן הזה, ושהוא נשאר בחיים עד לגיל מאה; אם זה באמת כך, כי אז לאחר תקופה של 740-750 שנים יהיו קיימים קרוב לתשעה עשר מיליוני פילים חיים, כולם צאצאים של הזוג הראשון."

"הסיבות המווסתות את הנטייה הטבעית של כל מין ומין להתרבות ללא גבול, הן לרוב סתומות".

מוצא המינים, פרק 3 (תרגום חופשי)

ברור שאוכלוסיית הפילים אינה מוגבלת על-ידי טורפים. אמנם כעת האדם פוגע קשות בחיות אלה, על-ידי ציד והשמדת בתי הגידול, אך במשך מיליוני שנים סכנות אלה לא היו בנמצא. ובכן, מה הגביל את מספר הפילים? המזון? הרי הם צמחוניים מובהקים והיו בוודאי מתרבים (בקצב שדרוין חישב . .) עד שכל נבט וציץ היה נאכל מיד, והאדמה הייתה נותרת חרוכה. ובכן, לפנינו שוב פרדוקס האדמה הירוקה (והפיל האפור!).

לסיים: הנה איור מופלא של מעט מאד ממגוון הפלנקטון. השאלה היא: איך וכיצד הם מסתדרים יחדיו?

³ Urban O. et al. (2011) - Impact of clear and cloudy sky conditions on the vertical distribution of photosynthetic CO₂ uptake within a spruce canopy. *Functional Ecology*, 2011; DOI: 10.1111/j.1365-2435.2011.01934.x

שטרגליים 1904 Ernst Haeckel

