

המירוץ לפענוח עמידות ליובש בעצים – ד"ר תמיר קליין

הרצאה במסגרת "זמן מדע", 16.5.2019

שלום לכולם, ברוכים הבאים. אני עומד לספר על עמידות ליובש בעצים. אני חוקר קרוב ל-12 שנה, ובמעבדה שלי כאן כבר כמעט 3 שנים, במחלקה למדעי הצמח והסביבה. אבל אני מרגיש בבית כי את התואר עשיתי פה – תואר ראשון, שני ושלישי. אתחיל לספר.

אנחנו מדברים על כמה דברים. קודם כל אנחנו רוצים להבין למה זה חשוב לקדם את הנושא של עמידות ליובש בעצים. אנחנו שואלים כמה יובש עצים מסוגלים לסבול. בארץ יש מעבדה טבעית הכי טובה לזה. כמה מים עצים צריכים, זו גם שאלה חשובה. ומה קורה בזמן שעצים כן מתייבשים, האם אפשר לשקם, מה ההשלכות הפיזיולוגיות. ברמה מולקולרית איזה תהליכים במדע מעורבים בעמידות ליובש.

אנחנו גם חוקרים את צד הפחמן בעצים, ואני רוצה להביא דוגמאות למה פחמן בעצים הוא מאוד חשוב לנושא זה. יש לנו מעבדה, מעבדת עצים, לא סתם. אתם יכולים לראות בשקף את החברים הצעירים, ואת נושא העמידות ליובש במרכז הפעילות שלנו. אנחנו מסתכלים על מעברי פחמן בין ובתוך עצים, גם הובלה של מים בצינורות הובלה בעצה של העצים. זה התיאור של מי אנחנו ומה אנחנו עושים.

נושא ראשון, למה חשוב לקדם את הנושא של עמידות ליובש בעצים? כמו שרואים בשקף, בדוגמא של תמונה מיער בקליפורניה, תמותת עצים זה תהליך שמחריף בכל רחבי העולם בשנים האחרונות. לנו היה חשוב להביא את זה לתשומת לב המדענים בעולם כולו. עשינו את זה בשנה שעברה, דיברנו על האופי המיוחד של התופעה. בתמונה הזאת רואים, בניגוד לתמותה של שריפת יער, תמותה נרחבת כתוצאה מיובש, כאשר יש עצים מנצחים ויש מפסידים. אם יש יערות מרוחקים כמו באמריקה, בסין, קשה לזהות ולדעת אם מתו עצים וכמה. הדפוס הזה הוא דיפוזיבי, לכן יש בעיות של חישה ושל כימות, למעשה זה גורם לכך שאנחנו עדיין לא יודעים בדיוק להגדיר את התופעה.

כמו שרואים פה במפה, אספנו דיווחים מהמון מקומות בעולם על תמותת עצים, שזה כל הנקודות על המפה. עשינו על זה ניתוחים ותרגילים כדי להבין – אם יודעים איפה זה קרה, אז להבין למה זה קרה. עדיין כל הדיווחים האלה זה case studies, מקרים ולא סקירה שנותנת לנו הבנה של השטח וההיסטוריה של השטח. אז השאלה היא מאיפה להמשיך מכאן.

יש מדינה ראשונה בעולם שנעשה בה סקר מקיף כזה, ואני שמח לספר לכם שזו מדינת ישראל. זאת העבודה שלנו, מה שרואים פה בשקף. יש לכם פה את כל ההיסטוריה של תמותת עצים מקום המדינה עד לפני שנתיים. אפשר לראות את התמותה של עצים; כדי לכמת את זה, לא סופרים עצים אלא שטח יער או שטח חורשה בהקטאר, שזה 10 דונם, כאשר לכל אורך הטבלה אפשר לראות את הסיבות השונות לתמותה. בולטת חזק העמודה הצהובה כאן, תמותה כתוצאה מיובש התרחשה בסוף האלף הקודם, כשהיה רצף של שנות בצורת. ככל שהקווים כאן ארוכים יותר, הם מראים את הבצורת. בעשור האחרון היתה הרבה תמותה מבצורת, ויש גם אירועי שריפות גדולים, תיכף נרחיב. יש תמותה גם כתוצאה מסופות שלג – בהר מירון והרי ירושלים – וגם עקב חרקים כמו חיפושיות קליפה. רק בישראל הצלחנו לכמת את זה, שזה כבוד מקומי. מדינה שנייה שעשתה את זה זו שווייץ; ככל שיותר מדינות יעשו זאת, נוכל להבין איפה התמותה, למה היא מתרחשת, האם היא מתקדמת.

במפה כאן רואים שבעשורים האחרונים, בשנים יבשות במיוחד, יש יותר תמותה. דיברנו על השריפות כגורם עיקרי, ואפשר לראות פה בתמונה שימוש בליווינים. מה שאתם רואים כאן, כל השטח הירוק הזה

במפה, זה יערות הכרמל בארץ. השטח בוורוד זה שטח שהלך לאיבוד, שנשרף ב-2010, ויש כאן גם תמונה מהשריפה בכרמל. אבל מי שזוכר, ב-2010 היה גם רקע של בצורת, תקופה של כמעט 10 חודשים בלי גשם. ומה שגילינו בניתוח שלנו, זה שמשהו כמו 60 אחוז או יותר מהשריפות היו על רקע בצורת לפני כן. כלומר גם אם הבצורת לא הורגת את העצים מיידית, היא יוצרת מצב שנותן לשריפה להתפשט בקלות ובסופו של דבר מאבדים את היער.

אז הנה מוטיבציה ראשונה ללמוד את הנושא לעומק. חשוב להביא את תשומת לב הציבור לנושא, לכן פנינו לעיתון "הארץ" ופירסמנו ידיעה שרואים פה: "הבצורת מספקת קרקע פורה לשריפות ולמזיקים, והעצים בישראל מתים". זו לא רק הסיבה היחידה, אנחנו יודעים שיש תחזיות של אקלים שאומרות שיהיו לנו יותר אירועי יובש בעתיד. קודם כל, כבר עכשיו יש לנו מאמצים, בארץ ובעוד מקומות, של ייעור באזורים צחיחים, וזה מה שרואים פה בתמונות. אביא דוגמאות בהמשך.

הבתים שרואים פה באופק זה באר שבע. זה יער יתיר, בדרום הר חברון. יש נושא נוסף חשוב, שזה גידול של עצים בחקלאות, מטעי פרי, כמו שרואים פה את מטע הזיתים או כרם זיתים בנגב, זה נושא מחקר עדכני של הדס ויעל במעבדה שלנו, אראה דוגמאות.

שאלנו מה הגבול, מה המקום הכי יבש שעץ יכול לחיות בו. בואו נלך לאזורים הכי קיצוניים, אתם רואים פה עץ שיטה, אנחנו חוקרים שני מינים של עצי שיטה, שיטת הסוכך ושיטה סילנית, בתחנת מחקר שאנחנו שותפים לה בערבה ומובילים אותה, לא רחוק מנחל שיזף. ואנחנו לוקחים את זה בתור מודל ללמוד את התהליכים המעורבים בעמידות ליובש. קודם כל צריך לעמוד ולהסתכל, זה מה שאנחנו עושים. ניתן לכם לראות סרטון של שנה בחיי עץ שיטה בערבה, התאריך 23.5.2015. רואים מבקרים נחמדים של העץ במהלך השנה (בני אדם ובעלי חיים), תנסו להתמקד בעץ לראות מה רואים מבחינת הדינמיקה שלו. עכשיו אנחנו בספטמבר 2015, סתיו, אוקטובר כבר, מתחיל נובמבר, חילופי עונות שהעץ עובר, רואים את זה. העצים האלה, בסביבה צחיחה כל כך, מהווים אקוסיסטמה שלמה, רוב בעלי החיים והצמחים תלויים בהם. עדיין לא יודעים בני כמה העצים, יודעים את הגיל לפי הטבעות. עצי שיטה ממוצא טרופי אין להם טבעות, אז משתמשים בפחמן 14 כדי לקבוע את גיל העץ, יש עצים שהם בני 100-200 שנים יותר מזה.

ראינו חילופי עונות. מי ששם לב, יש פה דבר מדהים – למרות התנאים הקשים, העץ היה ירוק כמעט כל הזמן. היה שבוע וחצי שהיו פחות עלים, אבל העץ הזה כמעט ירוק עד. זה מפתיע. דפי אצלנו חוקרת את זה מקרוב בדוקטורט שלה. מה התנאים שם? יש תחנה מטאורולוגית, הקווים הכחולים מראים טמפרטורות. אנשים באירופה לא מכירים את הטמפרטורות האלה, הם חושבים שהתבלבלנו עם הגשם. הם רגילים לראות הרבה קווי גשם שחורים, ושם זה 50 מילימטר לשנה. קשהתקנו על הגזע חיישנים שבודקים את התרחבות הגזע עד רמת מיקרון, עד מאי לא קורה כלום; במאי יש צמיחה, גם ביוני, עצירה ביולי, באוגוסט בשיא החום, 45 מעלות, העץ גדל מהר וכך לאורך כל הסתיו, ונעצר שוב בחורף דווקא. זה הפוך מהציפייה; היינו בטוחים שהעצים שחשופים לתנאים קשים אבל יש להם שיטפונות לפעמים, יכולים לנצל את המים בשיטפון. אבל הם מחכים לקיץ, לתנאי אור, ואז הם גדלים. זה הפתיע אותנו; חשבנו שאם זה גידול, אולי יש מצב שהעץ מקבע את הפחמן בתנאים מיטביים ורק אז גדל. בדקנו אם זה גידול אמיתי, ואתם רואים פה עקומות יומיות של תנועת המים בעצים האלה. במהלך כל השנה יש תנועת מים בגזע, בקיץ אפילו יותר, אבל האחידות הזאת מסבירה שמדובר בגידול אמיתי. העץ פעיל כל השנה, והוא גדל בעיקר בתקופה החמה.

אנחנו מנסים להבין לעומק את המנגנונים של עמידות לטמפרטורות גבוהות. הבאנו את הנושא הזה גם לתשומת לב מדעית בכתב עת נחשב, *Oecologia*, כך שכרגע רואים את השיטים שלנו בכל העולם. פירסמנו גם כתבה ב"הארץ" כדי להביא לידיעת הציבור הכללי שמצאנו פה משהו מיוחד.

שאלנו שאלה שלישית, כמה מים עצים צריכים. יש כמה כלים למדוד את זה. קודם ראיתם את תנועת המים בגזע, הנתונים האלה מגיעים מחיישנים מודדי זרימה. החיישנים האלה עובדים בשיטה שהם מנטרים את כמות המים. למים יש קיבול חום יותר מאשר דברים אחרים בסביבה, לכן מוליכים את המים מהשורש לעלווה, כך שהם מקררים את החיישן ונותנים תמונה מהימנה של מה שקורה בשטח. מחברים הרבה עצים לחיישנים, כדי לראות תמונה מהימנה. שיטה אחרת, בודקים את ההתאדות מהעלים – פה בשקף זה ביער יתיר. תנסו לדמיין כמה עלים צריך לבדוק כדי למדוד התאדות וניצול מים של עצים. חשבנו על דרך יעילה יותר, וכאן בא לעזרנו עיקרון פיזיקלי – כל אחד שיוצא מהמקלחת רוצה להתנגב. רואים על העור מה קורה כשאנחנו רטובים, יש התאדות, ולכן חל קירור מיידי של פני השטח. אותו הדבר קורה גם בעלה, העלה מקבל חימום על ידי שמש, החום הזה יכול להיפלט בקרינה, הסעה, אבל חלק גדול שלו יוצא דרך תהליך של אידוי מפני העלה. אידוי מפני עלה נקרא דיוט, דיוט מתוך פיוניות שעל פני העלה.

איך אפשר לנצל את זה? כאן בשקף רואים את הנוף שיש לנו מבניין בנוזיו החדש והיפה במכון ויצמן. כולם מזהים את העצים, את הדקלים, יש פה עצים שנקראים מכנף נאה, חורשה יפה. מאחורה, מי שאוהב לקטוף הדר, זה הפרדס. ברקע אורנים, פיקוסים. כל זה טוב ויפה, אבל זה רק מה שרואים בעין. דרך נוספת לראות זאת זה דרך תרמית; יש לנו מצלמה שרואה טמפרטורות ואז רואים מיד הבדלים בין העצים. הדקלים בולטים, כי רואים שהם קרירים יותר מעצי הלימון והתפוז שנמצאים בפרדס. האורנים גם כן הרבה יותר קרירים מההדרים. יש הבדלים בין מינים, הבדלים שנובעים משני גורמים – צורת העלה שונה; וקצב הדיוט, ניצול המים של העצים, שונה גם כן.

הנה עוד דוגמא מיער שלנו. ביער ליד בית שמש, יש תחנת מחקר שהקמנו. רואים פה כל מיני עצים, קדימה יש עץ אלון, מאחור עצי אורן גבוהים יותר, קצת קשה להבחין בהבדלי הטמפרטורה, אבל עומרי שמפעיל את המצלמה רואה את זה כך (כמו שרואים בשקף), ואז יותר קל להבחין. אלון – כמו עצים רחבי עלים, חרוב ואלה – הוא הרבה יותר חם מהרקע. עצים מחטניים כמו ברוש ואורן הם קרירים הרבה יותר. זה בגלל מבנה העלים; עלי האורן הם כמו נברשת והרוח מקררת אותם מהר. יש הבדלים גדולים בין מינים – אורן, ברוש, חרוב, אלון ואלה; אלה מינים מקומיים הכי חשובים. גם ההתפלגות צרה יותר במחטניים וגם הטמפרטורה נמוכה יותר. מעבר לכך, כשמחשבים את היחס בין הפרש הטמפרטורה של העלה מהאוויר לבין קצב הדיוט, מקבלים את אותו קירור; כמעט בכל המינים יש קירור ככל שקצב הדיוט עולה.

מה שאנחנו רוצים להמשיך להסיק מזה, שפיר מין נוכל לעשות משוואה שבה בתצולם אחד נוכל לדעת את קצב הדיוט בלי שנצטרך להתקין המון חיישנים על העצים; במצלמה תרמית נוכל להחליף מדידות, בגלל הקשר של הקירור והדיוט.

שאלה רביעית היא מה קורה בזמן יובש מבחינת הצמח בענפים, בגזע, איך הוא חוץ את הדברים. יש לנו כלי יפה, מי שהיה בבית חולים מתישהו יודע שיש CT – אני מקווה שלא הצרכתם – שזה כמו מכשיר קרני רנטגן בתלת מימד. לנו יש מכשיר כזה לצמחים, הלכנו לחברה בצרפת שייצרה במיוחד

בשבילנו מכשיר כזה לעציצים ולצמחים. זה נותן הסתכלות של עד 3 מיקרון לצינורות ההובלה של עצים בלי לפגוע בהם, בלי לחתוך. בזמן שהצמח חי, המכשיר סורק ונותן תמונה. נצלול ביחד לצינורות ההובלה של אלת המסטיק. הרבה תודות לעבודה של וֶלְד ברומפלד שעובד איתנו והצוות של מיקרו CT, אנחנו מסוגלים להסתכל פנימה לרקמה, אחר כך גם להתקרב, תיכף תראו. למעלה זה הליבה, אמצע הגזע; מדובר בגזע של עץ צעיר, סנטימטר או שניים, יכולים גם לסמן אזורים שמעניינים אותנו לפי קטגוריות וקריטריונים שאנחנו נותנים, שוב להיכנס פנימה, לבדוק את הנושא. את כל העבודה הזאת ביצעה יעל, דוקטורנטית בצוות. ובעצם נראה מה ראינו? כך נראה המכשיר (בשקף), ופה רואים בונסאי קטן של עץ זית. המכשיר מספיק כדי להכניס לתוכו שתילים. מה שלא רואים פה, זה שהתקנו בו תאורה, בקרת לחות, טמפרטורה, כדי שתהיה לעץ אפשרות לחיות שם. זה גם חדר גידול לעציצים הללו, כאשר מדי פעם יכולים לסרוק ולראות מה המצב בצינורות ההובלה. והנה דוגמא של הזית. נסתכל על האלה יותר מקרוב. כל נקודה שרואים פה בהסתכלות מלמעלה, זה כאילו חתכנו את העץ ואנחנו מסתכלים פנימה, תדמיינו שאנחנו בעלים, מסתכלים לכיוון השורש. כל נקודה שחורה דומה לשחור שמקיף את הגזע, האוויר; צינורות ההובלה של העץ אמורים להיות מים, כל שטח האפור רובו מים, הנקודות השחורות מצביעות על צינורות שהופיעו בהם בועות אוויר, שזה תהליך שקורה בזמן התייבשות של עצים; הצינורות נהיים חלולים בגלל היובש באוויר, מספיק שתהיה בצינור בועה אחת כדי לסתום ולעכב את כל ההובלה של המים. אם כל הצינורות חלולים, אין סיכוי להוביל מים לעלווה והעץ מת מצמא. מי שנסע לחול ושכח עציץ בלי השקיה, יודע את זה מהבית. בהסתכלות פנימה רואים שהעץ סובל, חלק מהעלים מתו, ועדיין יש עלים ירוקים. אתם שואלים איך זה? פה יעל סימנה בוורוד אזור שרואים בו צינורות אבל באפור, הן לא שחורות. הצינורות בקצה הכי רחוק, מיד מתחת לקליפת העץ, אותה שכבה דקה מספיקה להוביל מים כדי לתת מים לעלים האלה. האם זה מקרי? לא ממש. פה למשל אנחנו מסתכלים על זית צעיר שסרקנו – יש לו מבנה שונה, הצינורות שלו דקות יותר, רואים פה הרבה נקודות קטנות, מאוד מלאות באוויר, הכל שחור, ומתחת לירוק זה הצינורות הפעילות. כלומר הצינורות החדשות ביותר, הצעירות ביותר שהעץ ייצר, כי הצמח מגדל כל הזמן עוד ועוד שכבות, עוד טבעות גידול, כאשר הצינורות הצעירות הן הכשירות ביותר שניזוקות אחרונות. גילינו פה תופעה חדשה שלא ידעו עליה. חשבו שברגע שמופיעות בועות, מה שנקרא אמבוליזם, זה סוף הדרך. אבל עצים בארץ מסוגלים לחיות עם הבועות האלה, עם הטבעות החדשות הם מסוגלים להמשיך לחיות; ככל שיגדלו הם יכולים להתגבר על כך, למרות שרוב הצינורות בפנים כבר חלולות. אמרנו: יופי של דבר. לגבי חרוב אנחנו יודעים שהוא עמיד מאוד ליובש, הוא היה אפילו עוד יותר עמיד בגלל שכאשר חשפנו אותו ליובש, הפסקנו השקיה, היה קשה לגרום להופעה של הבועות האלה. בהתחלה היו מעט בועות, אחרי שבוע שלם היו עוד קצת בועות בחלקים מסוימים של העץ אבל הוא היה מאוד עמיד, היה קשה לגרום לו הצמאה. אמרנו: זה מה שאפשר, החרוב עמיד מאוד, ואז השקינו מחדש. דווקא אחרי שהשקינו ראינו את זה (בשקף), אחרי עוד שבוע היו עוד צינורות חלולים, אחרי שבועיים הכל אבוד, בסוף העץ התייבש. יש מינים שהאסטרטגיה שלהם היא מאפשרת להם לחיות עם אמבוליזם; מינים אחרים, כמו חרוב, קשה להכניע אותם אבל כאשר מכניעים הם כבר בתהליך בלתי הפיך. זה המצב עם החרוב, זה מעיד על אסטרטגיות שונות של עצים שכנים בחורש הטבעי וביער בארץ.

עד עכשיו דיברנו הרבה על צינורות הובלה, בשקף יש תמונה מיקרוסקופית של צינורות הובלה בצלף. כל ההתעסקות בצינורות הובלה לא נותנת תמונה מלאה. זה כאילו מסתכלים על האוטוסטרודות שבהן המים נעים, ומתעלמים מדרכים צדדיות יפות שמגיעות לתאים עצמם. אמרנו שנסתכל איך זה נראה שם. לכן מה שעשינו, ירדנו לרמה התאית והמולקולרית, ונעזרנו בידע קודם. ידוע שכניסת מים לתאים – אפילו בצמח – איננה אקראית, יש פה בקרה. מה שרואים פה מוגדל זה אותן התעלות שנותנות למים להיכנס או נותנות להן לצאת, רואים פה תא צמחי. התעלות נקראות אקוואפורנים, הן נמצאות על הממברנה של התא, יש להן מבנה שהוא כבר ידוע ומפוענח, העבודה של אינדירה והדס מעמיקה את זה. בשקף רואים את המבנה מקרוב. תיאור המבנה מדויק על בסיס חומצות אמינו, נעשה בשיתוף פעולה עם אדוארד יחזקאל מאוניברסיטת תל אביב. מדובר על טטרמר, יש 6 סלילים כאלה שעוברים דרך כל ממברנה של התא. זו יחידה אחת אבל בטטרמר – כמו שמתבקש מהשם – מדובר על 4 יחידות עובדות. אנחנו יודעים שמים יכולים לעבור במרווחים האלה, שבדיק לוקחים את המולקולות של המים ומעבירים אותן הלאה. לא ברור אם באמצע יכולה לעבור מולקולה נוספת, אבל זה תהליך מבוקר. קודם כל שילבנו את זה במחקר קיים אצלנו על השוואה בין מיני בר ומיני מתורבתים. יש בארץ דבר מדהים ויפה. ליד המטעים של שזף, של אגס ושל שקד – אם יוצאים קצת, רואים עצי בר מאותם מינים. יש לנו אגס סורי, יש לנו בצפון מין שנקרא שזף הדב, בדרום שקד הרמון. אלה מיני בר שהם אבות של אותם מינים שאנחנו מגדלים וכל כך נהנים מפירות שלהם.

למה רצינו להתמקד בְּמִינֵי בר? כי בזמן שכל החברה האלה [עצי תרבות] מקבלים השקיה כדי לקבל פרי עסיסי, העצים אלה גדלים בבר, מייצרים פירות קטנים שהם בקושי אכילים, אבל שורדים בתנאים קיצוניים של הארץ בלי השקיה. אפשר למצוא אותם בכל מיני מקומות בארץ. הסתכלנו ורצינו לראות את מעבר מים בעצים האלה [עצי הבר], ולהסתכל במקביל על אותן תעלות, קוראים להן Plasma membrane Intrinsic Protein – בגרפים פה יש השוואה בין אגס תרבותי (עקומה כחולה) לבין אגס הבר הסורי (עקומה כתומה). בציר ה-X בשני הגרפים רואים את פוטנציאל המים, זה אומר עד כמה המים מוחזקים חזק, ובציר ה-Y רואים את האמבולוזם, שזה כמו ספירה של אותן בועיות, הכתמים השחורים. רואים שכדי להביא את האגס הסורי לרמה של 50% סתימה של בועות בצינוריות, צריך להביא אותו לתנאים יותר קיצוניים כי הוא יותר עמיד. מבחינת מוליכות בפיוניות, כמה פיוניות פתוחות, רואים שבכל פוטנציאל מים, האגס הסורי יכול לתפקד עם פיוניות יותר פתוחות, הוא מסוגל להיות פעיל ביובש גבוה מאשר אגס שמגדלים במטעים ואוכלים אותו.

ראינו שיש עדיפות לאגס הבר, כפי ששיערנו. ירדנו לרמת מולקולות, עשינו בדיקה של רמת ביטוי mRNA של אותם בני משפחה של PIP. יש תעלות מים ידועות, PIP1 ו-PIP2, יש כמה חברים באותה משפחה. לא ידוע מה התפקיד כל אחד, למה יש כל כך הרבה חלבונים עם תפקידים דומים. מה שכן רואים מיד – שימו לב שהגרף פה לוגריתמי. כשמסתכלים על רמות ביטוי של אחד מחברי המשפחה, למשל PIP1:5 שמופיע פה, זה מגיע למאות, משהו כמו פי 600 מאשר הביטוי של אקטין שזה החלבון שאנחנו מתייחסים אליו בתור ייחוס, שנמצא בכל תא כמעט. כלומר, חלק גדול מאותן תעלות שייכות לגן מסוים, זה דבר ראשון. רואים שיש לפעמים הבדלים בין האגס הסורי לבין שני מינים של אגסי תרבות, גם פה יש הבדלים. בגדול, המון מהמשפחה הזאת זה גן ספציפי שנקרא PIP1:5.

עד עכשיו ראינו מה שקורה בחורף או במצב מיטבי שיש מים. מה שרואים פה (בשקף) זה מה קורה כאשר הפסקנו השקיה במטע או כאשר באנו בקיץ לעצים בטבע. ראינו שיש פה כמה גנים שדווקא

מתנהגים הפוך מהצפוי. אם החלבונים האלה מעבירים מים, אנחנו מצפים בתנאי עקה, תנאי יובש, הם ייסגרו ולא יתנו למים לברוח. אבל יש פה שני גנים שדווקא עשו דבר הפוך. אם תשימו לב, יש עלייה דווקא ב-PIP1;4 ובחלבון שנקרא PIP2;5, אלו חלבונים שעוברים אפרגולציה בתנאי יובש ולכן הם מעניינים אותנו. בספרות בדקנו ניסויים שעשו גם בטבק וגם באַרְבִּידוֹפְסִיס שהסתכלו על אותם גנים, עשו להם ביטוי מוגבר, מוטציות. בעצים קשה לעשות מוטציות, אבל בצמחי מודל כמו טבק וארבידופסיס זה קל. יש הרבה פחות נביטה תחת עקה, יותר בזבז מים, הטבק סובל אחרי שאיבד מים. ראינו עדויות חיצוניות לכך שבאמת אלו חלבונים חשובים ביובש; אם מבטאים אותם ביתר בצמחים, זה יכול לסכן אותם. אם נשלוט בדרך שמבטאים אותם, אולי הם ישלטו במעבר מים לרקמות חשובות שצריך לשמור עליהן. זה הסיפור של האקוואפורינים.

לסיום אעבור למשהו אחר לגמרי, למה חשוב בכלל לדעת על הפחמן דווקא כאשר מתעניינים בעמידות ליובש? תמיד חושבים על מים, תעלות מים, צינורות מים, אבל פחמן לא פחות חשוב ממים. יש פה דוגמא. רואים פה עצי לימון צעירים בחממה, עשינו להם ניסוי של יובש. בדרך כלל כשאני מראה את הניסוי הזה לאנשים, הם אומרים: הצמאת את העץ הזה, נתת לו 25% מהמים הדרושים, זה קיבל 50%, רואים שהוא סובל, זה קיבל מה שהוא צריך – 100%. זה בכלל לא נכון, זו הטעיה גמורה. בפיוניות, למה עצים מאבדים מים? למה צמחים מאבדים מים? האינטרס שלהם הוא לקבל פחמן דו חמצני מהסביבה, שנמצא סביבנו בריכוזים נמוכים והם צריכים "לשלם" את זה במים שיוצאים, שבורחים. העלים הם במאה אחוז לחות, בסביבה שלנו מעט מאוד זמן יש 100% לחות, מספיק פתח קטן והמים בורחים. מה קרה עם הצמחים אלה? זה לא מים, זה פחמן. תראו מה קרה. העצים האלה קיבלו אותו יובש אבל הם גדלו בריכוזי CO2 שונים סביבם. העץ הזה גדל בריכוז שיש היום בחוץ בכל העולם, 403 PPM (Parts Per Million), חלקים למיליון; מה שיהיה עוד 100 שנה זה 650 PPM; בהמשך, אם נמשיך ככה לפלוט גזים לאוויר, זה יגיע גם ל-850 PPM. לא שזה טוב לזהם, זה גרוע, אבל אנחנו מראים שיכול להיות שבעתיד, דווקא מבחינת יובש לעצים, יהיה קל יותר. למה? כי הם מקבלים מספיק פחמן דו חמצני, יש יותר ממנו באוויר. מדובר רק על דיפוזיה, הם יכולים לסגור את הפיוניות ולאבד פחות מים. יש פה משחק של יחסי גומלין בין חילופי גזים של פחמן ומים. וזו עבודה של פוסט דוקטורנטית אצלנו, אינדירה מנפאל.

הראינו שה-CO2 גבוה באופן מלאכותי כתוצאה מפעילות האדם, וזה יכול לפצות על השפעות של יובש על עצים. זה נושא מחקר פעיל במעבדה, עמית ודר ממשיכים את הקו הזה. עוד דוגמא למה פחמן הוא לא פחות חשוב ממים. דיברנו על כך שבפיוניות נסגרות; ואם הן סגורות הרבה זמן, העץ לא מאבד מים, הכל טוב ויפה. אבל מתישהו העץ מתחיל להרגיש בחוסר פחמן דו חמצני שהוא צריך. לשמחתנו ולשמחתו הוא ערוך למצב הזה, אוגר פחמן כל הזמן, בדרך כלל בצורה טעימה לנו מאוד, עמילן. כשבאים לאכול משהו, לקטוף משהו מהטבע, רוצים סוכר ועמילן. עמילן זה חומר תשמורת של עצים, יכולים לראות את החשיבות שלו אם מסתכלים בגרף הזה (בשקף). רואים פה את חודשי השנה, רואים מה עושה עץ אורן ביער ישראלי רגיל מבחינת המעברים של פחמן בתוכו, במונחים של גרם לעץ ליום. הצבע הכחול בגרף זה רוב מה שהעץ הוא מטמיע ומקבל, כל הפוטוסינתזה זה הקו, מה שנכנס. מה שנכנס מתחיל להתפזר בין כל צרכי העץ. מה שכחול בורח מיד לאטמוספירה, כי העץ נושם ופעיל כמו חיות, אבל נעשית פוטוסינתזה. הכתום משמש לצמיחה, השאר זה פליטות דרך שורשים; העצים יכולים להשיר עלים, להפיל ענפים, לאבד חלקים, זה בסגול. מעבר לזה, רואים

שיש חוסר התאמה בין הקו (הגרף) של מה שנכנס לבין העמודות של מה שיוצא. בסופו של דבר מקבלים מאזן מדויק, השטח שמתחת לעמודות והשטח שמתחת לגרף שווים, הם אינטגרלים שווים, אבל זה מה שרואים. ביוני למשל, יש פער ענק בין מה שהעץ מוציא לבין מה שנכנס. איך הוא יכול להוציא יותר ממה שיש לו? באותה מידה אפשר ללכת לאירופה, לראות עצים נשירים שכל החורף עומדים עירומים, פתאום מבלבלים. מאיפה העלים? אם עלים זה הדבר היחיד שיכול לעשות פוטוסינתזה, מאיפה מגיע פחמן שמייצר את העלים? הסוד הוא עמילן, פה רואים גרנוולות עמילן בתוך תא צמחי. לא ניכנס לכל האנזימים שמעורבים בפירוק ויצירה של עמילן, מה שידוע פה זה מה שידוע בעלה של צמח קטן; לגבי עצים ועלים, לא יודעים מה קורה, מה קורה ברקמה מעוצה ששונה מעלה. זה מה שמור מהמעבדה שלנו בודקת עכשיו.

דוגמא נוספת, הזכרתי שהשורשים פולטים לקרקע פחמן. הם יכולים לפלוט חומצות וסוכרים ועוד, ובעצם אנחנו יודעים שיש בקרקע גם פטריות. חלק מהפטריות עושות סימביוזה עם שורשי העץ, מה שנקרא מיקוריזה – בדוגמא שבסקף זה באדום וכחול, השורשים באפור. בגלל שהמיקוריזות הן סיבים, קורים דקים, הן יכולות לשפר את קליטת המים על ידי הצמח. הן יוצרות רשת סבוכה עם המון שטח פנים ויותר מים מגיעים. אבל הפטריות לא פראיירות, הן רוצות מהעץ את הפחמן שלו. איך הן מתחברות לעץ? חושבים שיש חשיבות גדולה לאותם אַקסוֹדִיטִים (תפליטים), חומרים שיוצאים מהשורש כלפי חוץ; הם מושכים פטריות לבוא ומראים שהעץ יכול להזין אותן.

בנוסף, מה שרואים פה זו עבודה של יערה שהיא עוזרת מחקר בצוות, מיקרוביולוגית מנוסה מאוד. היא מראה לנו פה, על גבי שורש של אורן, חיידקים שהם דבוקים ממש לשורש; מדובר בחיידקי קרקע, בצילוס, וההידבקות מראה על קשר ספציפי שמתקיים בין השורשים של העץ לבין החיידק. החיידק מסתמך על פחמן שמגיע מהעץ, גם החיידק יכול לשפר את התנאים שהעץ חי בהם, הוא יכול לספק לעץ מינרלים וזה כמובן קשור לעמידות שלו.

אז איך אנחנו באמת יכולים למדוד את השורשים? זה דבר שאנשים בדרך כלל לא עושים, במיוחד אם חושבים על יער שיש שם כל החיות בעולם, מלא חיידקים וחרקים ופטריות. בעצם מצאנו שיטה שיכולים לאסוף בטבע את אותם אקסודטים, הפרשות מהשורש, ללא הפרעה. הנה גלעד עושה את זה ביער, באתר שלנו ליד בית שמש.

רואים סרטון שבו גלעד אומר: עם היד שלך אתה ממש לוקח מעץ, צריך לדעת את השפה של העץ, ואז צריך להבין מה הוא אומר, יש המון דברים להבין. אנחנו רק בהתחלה.

צוות טלוויזיה דני בא לתעד את זה. תראו את החפירה שגלעד עשה עד השורשים, שם נייר אלומיניום, שטף את השורש, הטמין במבחנה עם תמיסה. כעבור יומיים חוזרים לאתרים, שואבים את התמיסה, התמיסה שהיתה מים טהורים מכילה את החומרים שהעץ העביר, מתחילים להבין איזה חומרים אלה, איך העץ מתקשר באמצעותם עם חיידקים ופטריות סביבו. אבל זה לא כל הסיפור. העץ לא חי לבדו. כמו שראיתם ביער, יש תמיד עצים שכנים ויכול להיות מצב שפטרייה אחת יכולה לשלוח קורים ולהתחבר לשורשים של שני עצים שכנים. נתנו עדות לדבר הזה; במחקר שעשיתי ביער במסגרת פוסט דוקטורט בשווייץ, בעזרת סימון איזוטופי של פחמן הראינו שיש שחלוף פחמן בין שורשי עצים קרובים. סימנו עץ אחד בפחמן מסומן, ראינו אותו בצורה לא צפויה בשורשי העץ שליידו. עצים שכנים יכולים להעביר פחמן, אבל לא ממש השורשים מחוברים אלא פטרייה מחברת ביניהם.

עכשיו חוזרים לארץ (בשקף). באותו אתר ליד בית שמש, יכולים לראות לא רק כמה מינים אלא כל המינים הנפוצים - אורן, ברוש, אלון, חרוב ואלה. נראה מה עושים עכשיו.

בסרט נאמר: כשאנחנו חושבים על פטריות, אנחנו חושבים על לאסוף פטריות ביער. אבל אנחנו מסתכלים על הקורים, שנראים כמו קווים דקים שהולכים לכל מקום באדמה. בכל חורשה בכל ארץ יש הפונקציה הזאת, ברוב החורשות רואים את זה. אפשר להגיד שזו רשת האינטרנט של העצים... שחר עושה מדידות קבועות באותו אתר יער, ראיתם מדידות שבהן יכולים לחבר מכשיר שמודד פליטת פחמן דו חמצני, גם השורשים נושמים כמו כל איבר אחר. אם יש לנו חלקת יער, רואים פה עצים ממינים שונים, אנחנו יכולים להסתכל על השורשים ולספור כמה שורשים מאוכלסים בקורי פטריות. רואים את זה פה לפי עוצמות הצבע. אחר כך מזהים אותם לפי ה-DNA שיש על השורש של קורים דקים, כך אפשר לראות איפה הם נמצאים.

יש לנו פה המון גרפים קטנים, כל גרף קטן זה מין של פטרייה, ויש מין של פטרייה שמצליח לקשר את כל העצים בחלקה. שימו לב שהוא עובר ויכול ליצור רשת של כולם. זה מין שהוא מאוד שתפן. יש מינים שהם ספציפיים לעץ מסוים, לא משתפים את כולם. יש מינים שספציפיים לשני עצים, לשלושה, זה משפיע על חלוקת המשאבים ביער. כשיש עץ במצוקה, ועץ מאותו מין יכול להעביר לו פחמן דרך העץ או הפטרייה, זה יכול לשפר את סיכויי לשרוד. לכן, במיוחד בעקה של יובש, יש חשיבות גדולה לרשתות האלה, ואנחנו רק מתחילים להבין איך זה פועל ומי מניע את זה.

זו עבודה של הדוקטורנט עידו, שחוקר את זה ממש עכשיו. שאלנו למה חשוב לקדם עמידות ליובש של עצים. הראינו שיש המון תמותה של עצים בהמון מקומות בעולם, וגם אם אין תמותה יש השפעה על הגידול והצימוח של עצים שזה חשוב לנו.

מה המקום היבש ביותר שעצים מסוגלים לגדול? הראינו שעצי השיטה שלנו גדלים ב-45 מעלות, 50 מילימטר גשם מספיק להם. כמה מים עצים צורכים? אנחנו מבינים את המצלמה התרמית עם IR, אינפרא אדום, כפתרון הרבה יותר משמעותי ממה שיש היום. מה קורה לעצים בזמן היובש? מבחינת צינורות הובלה, דיברנו על אמבוליזם, על בועות שנוצרות, אנחנו מבינים שיש אסטרטגיות שונות. דיברנו, ברמה תאית ומולקולרית, על תעלות אקוואפורינים. דוגמאות למה פחמן חשוב מבחינת חילופי גזים בעלים, דיברנו על עמילן ופטריות וחיידקים. לסיום אני מודה לכל גופים המממנים, לחברי המעבדה שראיתם במהלך המצגת. תודה שהקשבתם. מחיאות כפיים.

שאלה: האם לדעתך אפשר להקיש על מנגנונים דומים בעצי פרי שחשובים לחקלאות, עצי נוי? תמיר: השאלה שעלתה היא כמה מזה תקף ואפשר להקיש ממנו לגבי עץ נוי ופרי. אז חלק גדול ממה שהראינו זה לגבי עצי יער. הרבה מנגנונים עובדים ברמה פיזיולוגית, לכן הם מאוד גנרלים. הראינו השוואה, היה חשוב להראות השוואה בין עצי פרי לעצי בר שגם יש להם פירות. קודם כל אנחנו מבינים שיש הבדלים גדולים בין עצי מחט, שהם חשובים במיוחד בצפון, לבין רחבי עלים. בארץ יש את שניהם. באזור הטרופי יש רק רחבי עלים. לנו יש מזל להתגורר בארץ שיש בה מגוון. יש הבדלים בין מחטניים לבין רחבי עלים. בעצי פרי רחבי עלים, אין הרבה הבדלים בין עצי פרי מסחריים לבין עצי בר. כל מה שאנחנו מגלים פה, לגמרי תקף לעצים מסחריים. לדוגמא אני יכול לומר שעכשיו יש לנו סטודנטית חדשה שעובדת על עצי צפצפה, גידול מסחרי חשוב בתור עץ לנייר, זה עץ מודל שהוא גם גדל בבר וגם נעשה בו שימוש מסחרי, אין הבדל.

קריאה: עצי פרי יותר מפונקים?

תמיר: הראינו את הפינוק, זו המוטיבציה. נאמר כאן שעצי פרי הם מפונקים, ואנחנו עובדים כדי להכין את עצי הפרי למצב קשה יותר בעתיד. בעקבות מה שמצאנו לגבי אגס, אנחנו מתחילים ניסוי של הרכבת העץ התרבותי על שורשי אגס סורי. זה בבדיקה כרגע.

שאלה: הראית תמונה של תמותת עצים ביער בקליפורניה, ברור ששם זה לא נובע דווקא מבעיה של מחסור במים. יכולה להיות גם בעיה של מזיקים.

תמיר: השאלה שנשאלה היא לגבי התמותה של עצים מקליפורניה. יש לעשות הפרדה בין יובש שהוא מצטבר עם הזמן, לבין מזיקים. קודם כל תמותה מיובש זה לא תהליך שקורה רק בארץ אלא בהרבה מקומות. העניין הוא לא עד כמה אפשר לחשוף את העץ לתנאים קשים, כי עצים באירופה – מספיק שתיתן להם יום אחד בתנאי הארץ והם יתמוטטו. לכן בקמפוס יש המון מינים טרופיים שאנחנו משקים אותם אבל לא מינים צפוניים, הם לא מסוגלים לעמוד בקיץ כאן. עצים שמתו זה לא ממזיקים אלא מיובש, המינים שם רגישים יותר מאלה שיש בארץ. הרבה פעמים עץ שנחלש כתוצאה מהתקפת מזיקים יכול להיות רגיש לכל עקה נוספות ולהיפך. עץ שכבר מתייבש ולא מת, המזיקים מזהים שיש לו פחות מנגנוני הגנה, מתבייתים עליו והורגים אותו.

שאלה: איך נוכחות של חיידקים ופטטריות בקרקע, משפיעה על התמודדות בתנאי יובש בארצות אחרות? תמיר: הקורים של הפטריות שנמצאים בקרקע, ברגע שקור מחובר לשורש, יש מעבר פתוח כל הזמן. השורש מעביר סוכרים וחומרים שאין לפטרייה, הפטרייה מעבירה מינרלים ומים. שורש הוא מבנה של הצמח, הוא חייב להיות מורכב, יש לו המון תאים, הוא חייב להיות לפחות בעובי של מילימטר. קורי פטריה נמדדים במיקרונים. אפשר למלא קופסה של קרקע, קובייה מאוד קטנה, בקורים שפשוט ישאבו את המים מהר מאוד, זה יותר יעיל בהרבה. זה מבחינת פטריות וקורים. מבחינת חיידקים דיברנו על נוטריינטים שהשפעה שלהם היא עקיפה. ברגע שיבש, במיוחד בקיץ הישראלי שמתחיל עוד מעט, היובש מיד גורם לעקה של הזנה, כי החיידקים משפרים את התזונה של העץ ומאפשרים לו לצמוח למרות היובש. לגבי רשתות, אנחנו לא מבינים עדיין עד הסוף, אבל יש מצב של גילדות, קלאבים שיוצרות פטריות. אורן ואלון מחוברים יותר, בגלל זה הם יכולים לשרוד תקופה יותר ארוכה ממי שלא נמצא בקלאב הזה, למשל חרוב שהוא לעצמו, ולא יהיה לו מעבר מעץ יותר עמיד. בנושא של רשתות אנחנו עדיין בהתחלה.

שאלה: יש מספיק ידע כדי לעזור ליער להתמודד עם יובש?

תמיר: האם יש מספיק ידע לעשות אפליקציה של זה? זה נעשה. יש חברות שמוכרות נבגים של מיקוריזה. מבחינה מסחרית, עכשיו יש מספר מועט של מינים, טיפה בים. אנחנו רוצים להתחיל לבנות את הים הזה, להבין מה היתרונות של כל מין, להבין מינים חדשים שלא יודעים עליהם עדיין. יש ניצול, יש אפליקציות אבל מאוד בקטן.

עוד שאלות? תודה רבה.