

לקרן המדען הראשי

קוד זיהוי	א. נושא המחקר (בעברית)
	חיזוי פוטנציאל המים בגזע במטעים כתחליף לשימוש בתא לחץ לצורכי בקרת השקיה

ג. כללי					
מוסד מחקר של החוקר הראשי					
מו"פ צפון					
סוג הדו"ח			תאריכים		
שנתי	תקופת המחקר		עבורה מוגש הדו"ח		
	התחלה		סיום		
	שנה	חודש	שנה	חודש	תאריך משלוח הדו"ח למקורות המימון
	16	01	16	12	שנה 17 חודש 2

ב. צוות החוקרים		
שם פרטי	שם משפחה	חוקר ראשי
עמוס	נאור	
חוקרים משניים		
1	פרידמן	שמוליק
2	כהן	שבתאי

ד. מקורות מימון עבור מועד הדו"ח		
שם מקור המימון	קוד מקור מימון	סכום שאושר למחקר בשנת תיקצוב הדו"ח בשקלים
ייעול השימוש במים	02-0382	120000

ה. תקציר שים לב - על התקציר להיכתב בעברית לפי סעיף ה' שבהנחיות לכתיבת דיווחים
<p>הבעיה החקלאית – היכולת לחסוך במי השקיה תלויה בצורה הדוקה ביכולת שלנו להעריך את מצב המים בעץ. ככל שהערכה זו תהיה טובה יותר כך תיקטן תוספת מי ההשקיה המשמשת כמקדם ביטחון. לרשות החקלאי עומד השימוש בתא לחץ למדידת פוטנציאל המים בגזע המאפשר קביעת ספים על בסיס אזורי לעומת חיישנים רציפים (קרקעים וצמחים) המחייבים קביעת ספים לכל חישן/חלקה. החסרון של תא הלחץ הוא הסירבול של המדידה והעדר נתונים רציפים המונע שימוש נרחב על ידי החקלאים.</p> <p>מטרות המחקר – לבחון חיזוי פוטנציאל המים בגזע באמצעות מודלים של תנועת מים ברצף קרקע-צמח-אטמוספירה בהתבסס על מדידות פשוטות ואנלוגיות של מתח המים בקרקע, קצב זרימת מים בגזע, שינויים בעובי הגזע ונתונים מטאורולוגיים.</p> <p>תכנית המחקר – הניסוי מבוצע בנקטרינה בוגרת בחוות המטעים של מו"פ צפון בעמק החולה. הוקמה תשתית לניסוי השקיה עם ארבעה טיפולים. הותקנו דנדרומטרים, חיישני זרימת מים, טנסיומטרים ב-12 עצים. נבחנה התגובה למחזור ייבוש, נבחנו המהלכים היומיים והעונתיים של הפוטנציאל האוסמוטי כולל השפעת חגור על הפוטנציאל האוסמוטי.</p> <p>תוצאות עיקריות – מודל הדנדרומטריה נראה מבטיח אך לא הצלחנו להגיע למודל שחזה בצורה פשוטה את פוטנציאל המים. יש צורך להרחיב את המודל שיכלול גם את השפעת הפוטנציאל האוסמוטי וגידול הגזע אך מדובר בסיבוך שיחייב לכייל פרמטרים נוספים. המודל הקושר את פוטנציאל המים להתנגדות חופת העץ לתנועת מים הראה חיזוי טוב במשך כל התקופה בה בוצע כיוול בעונה הקודמת אך מעבר אליה התגלו סטיות. קיימת אפשרות שיידרש כיוול שונה לתקופות שונות לאורך העונה. מודל תנועת קרקע-גזע לא ניתן היה לבחון כיוון שקצב הטרנספירציה היומית המדודה היה גבוה ממנת ההשקיה (מצב בלתי אפשרי בתנאים של העדר עקה)</p> <p>מסקנות והמלצות לגבי יישום התוצאות – מודל הדנדרומטריה נראה מבטיח אך יידרש להרחיבו כך שיכלול גם את הפוטנציאל האוסמוטי וקצב גידול הגזע. כיוון שסיבוך המודל ידרוש כיוול פרמטרים נוספים מוצע לבחון אפשרות של איפיון אמפירי של המהלכים היומיים והעונתיים של הפוטנציאל האוסמוטי והגידול היומי של הגזע. במידה וניתן יהיה להכליל את האיפיונים הנ"ל ניתן יהיה להמליץ על כיוון זה לחיזוי פוטנציאל המים.</p>

1. אישורים

הנני מאשר שקראתי את ההנחיות להגשת דיווחים לקרן המדען הראשי והדו"ח המצ"ב מוגש לפיהן

חוקר ראשי	מנהל המחלקה	מנהל המכון (פקולטה)	אמרכלות (רשות המחקר)	רשות המחקר	תאריך (שנה) (חודש) (יום)
-----------	-------------	---------------------	----------------------	------------	--------------------------

חיזוי פוטנציאל המים בגזע במטעים כתחליף לשימוש בתא לחץ לצורכי בקרת השקיה

Prediction of midday stem water potential to eliminate the required use of the pressure chamber for irrigation scheduling

דו"ח סופי

שמות החוקרים

שם החוקר	כתובת החוקר	תפקיד במחקר
חוקר ראשי: עמוס נאור Amosnaor51@gmail.com	מו"פ צפון. מועצה איזורית גליל עליון	אחראי על ביצוע המחקר וכתובת הדו"ח
שמוליק פרידמן vwsfried@volcani.agri.gov.il	המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מרכז וולקני, בית דגן	אחראי על בניית המודלים והרצתם ופיתוח אלגוריתם לחיזוי פוטנציאל המים בגזע
שבתאי כהן vwshep@volcani.agri.gov.il	המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מרכז וולקני, בית דגן	אחראי על בניית מערכות המדידה ואיסוף הנתונים

פברואר 2018

שבת תשע"ח

הממצאים בדו"ח זה הינם תוצאות ניסויים.

הניסויים מהווים המלצות לחקלאים: לא

מבוא - גידול עצי פרי באקלים הים תיכוני המתאפיין בקיץ חם ויבש ובחורף קצר וגשום עם כמות משקעים ממוצעת של 500 מ"מ מצריך שימוש בהשקיה במשך עונת האביב והקיץ היבשות. תפקידה של ההשקיה החקלאית היא לספק לצמחים את כמות המים הנדרשת הן מבחינת הכמות והן מבחינת העיתוי על מנת להבטיח את תפקודו הפיזיולוגי התקין של הצמח מחד ועל מנת לקבל פריון חקלאי גבוה מאידך.

על מנת לנהל את ההשקיה בצורה יעילה יש צורך במערכת בקרה שתאפיין את דרישת המים של הצמחים ותנהל את ההשקיה בהתאם למצב המים במערכת קרקע – צמח – אטמוספירה. לפיכך בקרת השקיה צריכה להיות מבוססת על ניטור מצב המים בקרקע או על ניטור משק המים בצמח או על ניטור של ההשפעה האקלימית על משק המים במערכת – או על ניטור של שלושתם יחד.

בעשורים האחרונים נעשה מחקר רב בחיפוש אחר מדד השקיה אולטימטיבי בעצי פרי נשירים, מדד שיאפיין בצורה אמינה את משק המים של העצים ושיהיה קשור באופן יציב לאומדני יבול כמו כמות פרי וגודל פרי. בעשרים השנה האחרונות נמצא כי מדד פוטנציאל המים של הגזע הינו המדד המתאים ביותר לאפיון משק המים של העצים ולכן ניתן באמצעותו לבקר ולנהל את ההשקיה (Naor, 2006). למרות יתרונותיו מדד זה מבוסס על מדידות ידניות מסורבלות דבר שמצמצם את מספר החקלאים המשתמשים בו לבקרת השקיה. בכדי להחליף את השימוש בתא לחץ למדידת פוטנציאל המים בגזע באומדנים המבוססים על מדידות פשוטות ונוחות יותר יש לפתח מודל/מודלים לחיזוי פוטנציאל המים המבוססים על מדידות מטאורולוגיות, צמחיות וקרקעיות. מודלים אלו יאפשרו לקבל הערכה רציפה של פוטנציאל המים של הגזע. שימוש במדידות פשוטות יאפשר ביצוע מספר גדול של מדידות כך שאומדני פוטנציאל המים בגזע יהיו מייצגים.

מטרות המחקר הן לבחון אפשרות שימוש בשלושה מודלים בלתי תלויים לחיזוי פוטנציאל המים בעצה (גזע): מודל המתבסס על תנועה רדיאלית של מים בין העצה לקליפה בגזע; מודל המתבסס על תנועת מים בקרקע ומהקרקע אל העצה; מודל אמפירי הקושר בין שטף הטרנספירציה והגרעון בלחץ האדים לבין פוטנציאל המים בגזע.

תאור מהלך המחקר:

מודל דנדרומטריה	מודל התנגדות נוף	מודל קרקע
2015	כיוול המכשור, התקנת המכשור במטע ובדיקת המודלים במהלך מחזור ייבוש	
2016	פיתוח המודל. כיוול המודל על ידי השוואה לתא לחץ. פיתוח מודל גזילת גזע.	כיוול המודל
2017	מדידות ישירות של פוטנציאל אוסמוטי בקליפה. מדידות ישירות של מודולוס האלסטיות של הקליפה. הוספת מדידות על העצה. ביצוע מניפולציית חגור לצורך אימות השפעת המרכיב האוסמוטי על המודל.	אימות המודל, והשוואת מוליכות נוף למדידות ישירות על ידי מערכת למדידת חילוף גזים. קביעת התכונות ההידראוליות של הקרקע. בדיקת התכונות של המודל.

מודל דנדרומטריה

המודל מבוסס על חיזוי פוטנציאל המים בעצה ממדידת השינויים המתרחשים בעובי הגזע. בסקאלה היומית ניתן להבחין בהתכווצות, התרחבות וגדילה. אנו מניחים כי הדינמיקה של ההתכווצות קשורה בעיקר בתנועת מים רדיאלית בין קליפת הגזע (Bark) וצינורות העצה (Xylem), כתגובה להפרש בפוטנציאל המים בין שתי הרקמות.

שינויים בקוטר הגזע משקפים סופרפוזיציה של ארבעה תהליכים פיזיולוגים ופיזיקליים המתרחשים בגזע. 1. שינויים פלסטיים (בלתי הפיכים) הקשורים בצימוח רדיאלי שכולל הוספת תאים חדשים על ידי הקמביום

וגדילה בלתי הפיכה של תאים קיימים; II. שינויים אלסטיים (הפיכים) הנובעים מהידרציה ודהידרציה של התאים החיים ברקמות הרכות כתוצאה משטפי מים רדיאליים אל העצה וממנה; III. שינויים תרמיים (הפיכים) הגורמים להתפשטות והתכווצות הרקמות השונות IV. השינויים הנגרמים בעובי העצה כתוצאה ממאמצי מתיחה על ידי הלחצים השלילים השוררים ברקמה זו.

המהלך היומי של עובי הגזע נובע משינויים יומיים בפוטנציאל המים בעצה. השטפים הציריים בעצה הם גדולים בסדר גודל לפחות בהשוואה לשטפים הרדיאליים כך שניתן להניח שפוטנציאל המים בעצה לא מושפע מהשטפים הרדיאליים. המהלך היומי של השינויים בעובי הגזע נמצא בהסחה של כשעתיים בהשוואה למהלך היומי בפוטנציאל המים בגזע כך שלא ניתן להניח שיווי משקל מדי.

המודל המכניסטי הנוכחי מבטא את הקשר בין השינויים בעובי הגזע לבין פוטנציאל המים בגזע. גישת המחקר היא בניית מודל פשוט ככל האפשר ולהתבסס ככל שניתן רק על פרמטרים שניתן למדוד באופן בלתי תלוי.

תיאור המודל:

השינוי הכללי בעובי הקליפה הוא סכום של תהליך הגדילה הפלסטי והשינויים האלסטיים ועם הזנחת השינויים הטרמליים נקבל:

$dR_{total}/dt = dR_{growth}/dt + dR_{elastic}/dt$	(1)
--	-----

אנחנו מפרידים בין השינויים האלסטיים לשינויים הפלסטיים על פי הגישה של Lockhart, המגדירה כי הגדילה הפלסטית תלויה בהפרש בין לחץ הטורגור p_b ללחץ סף Y ובמקדם התפשטות התא \emptyset . יש גידול רק כאשר $p_b > Y$:

$dR_{growth}/dt = R_{total}\emptyset(P_b - Y)$	(2)
--	-----

על פי הערכת הגדילה ניתן לקבל את הרכיב האלסטי באות הדנדרומטר עבור כל צעד זמן t :

$dR_{elastic}(t) = dR_{total}(t) - dR_{growth}(t)$	(3)
--	-----

לשם הנוחות נגדיר $R = R_{elastic}$.

מודל האלסטיות מוגדר כשינוי בלחץ ביחס לשינוי העובי היחסי:

$\varepsilon_b = \frac{dp_b}{dR} R$	(4)
-------------------------------------	-----

נניח שבמקסימום היומי של עובי הקליפה מתקיים שוויון פוטנציאלים בין העצה לקליפה ועבור רגע זה נוכל להגדיר את העובי היומי המקסימלי R_o . נחשב את לחץ הטורגור בקליפה $p_b(R_o)$ מתוך שוויון הפוטנציאלים (עבור הרגע הראשון להרצת המודל נשתמש בערך של פוטנציאל מים בעצה כפי שנמדד על ידי תא לחץ). בהתאם לחוק הוק נקבל את לחץ הטורגור בקליפה עבור כל צעד זמן t :

$p_b(t) = p_b(R_o) + \varepsilon_b \frac{dR}{R(t)}$	(5)
---	-----

שטף המים הרדיאלי ($q - m/s$) (3) הוא מכפלה של התולכה ההידרולית של הממברנה החצי חדירה ($L - m^3 m^{-1} Pa^{-1} s^{-1}$) בהפרש הלחצים בין העצה (ψ_x) לקליפה ($p_b + \pi_b$), אם נניח שריכוז המומסים במוהל העצה זניח (הפוטנציאל האוסמוטי בקליפה π_b) נקבל:

$q = L(p_b + \pi_b - \psi_x)$	(6)
-------------------------------	-----

שטף המים מוגדר גם כקצב השינויים בעובי הקליפה (4) עם הזמן (t) בהנחה של נקבוביות שווה לאחת.

$q = \frac{dR}{dt}$	(7)
---------------------	-----

נשווה בין (6) ל- (7) נציב את (5) ונבודד את פוטנציאל המים בעצה:

$\psi_x = -\frac{dR}{Ldt} + p_b(R_o) + \varepsilon_b \frac{dR}{R(t)} + \pi_b(t)$	(8)
--	-----

מודולוס האלסטיות של הקליפה (ε_b) באמצעות הקשר הבא:

$$\varepsilon_b = \frac{d\psi_b}{dRWC} RWC \quad (9)$$

כאשר RWC הוא תכולת הרטיבות היחסית ו- ψ_b הוא פוטנציאל המים בקליפה.

ההנחות העיקריות במודל:

- ניתן לתאר את הגזע כשני מדורים - צילינדר פנימי (עצה) וטבעת חיצונית (קליפה) ובין שני המדורים מתקיימת קישוריות הידראולית.
- נניח ממברנה וירטואלית בציר האקסיאלי בין שני המדורים ולכן אין תנועת מומסים בין הקליפה לעצה ולהיפך.
- לא מתרחש אמבוליזם במערכת ההידראולית הנידונה.
- ניתן לתאר את הקשר בין שינויי הנפח לשינויי הלחץ ברקמות באמצעות חוק הוק - השינויים הפיכים (ללא היסטריזה).
- ריכוז המומסים במוהל העצה זניח ולכן הפוטנציאל האוסמוטי מתאפס.

ההיפותזות העיקריות במודל:

- שינויים מכניים בעובי הגזע נובעים מתנועת מים רדיאלית המתרחשת בין שני מדורים - העצה והקליפה.
- פעמיים במשך היום המדורים נמצאים בשיווי משקל פיזיקלי מבחינת פוטנציאל המים – במקסימום היומי ובמינימום היומי בקוטר הגזע.

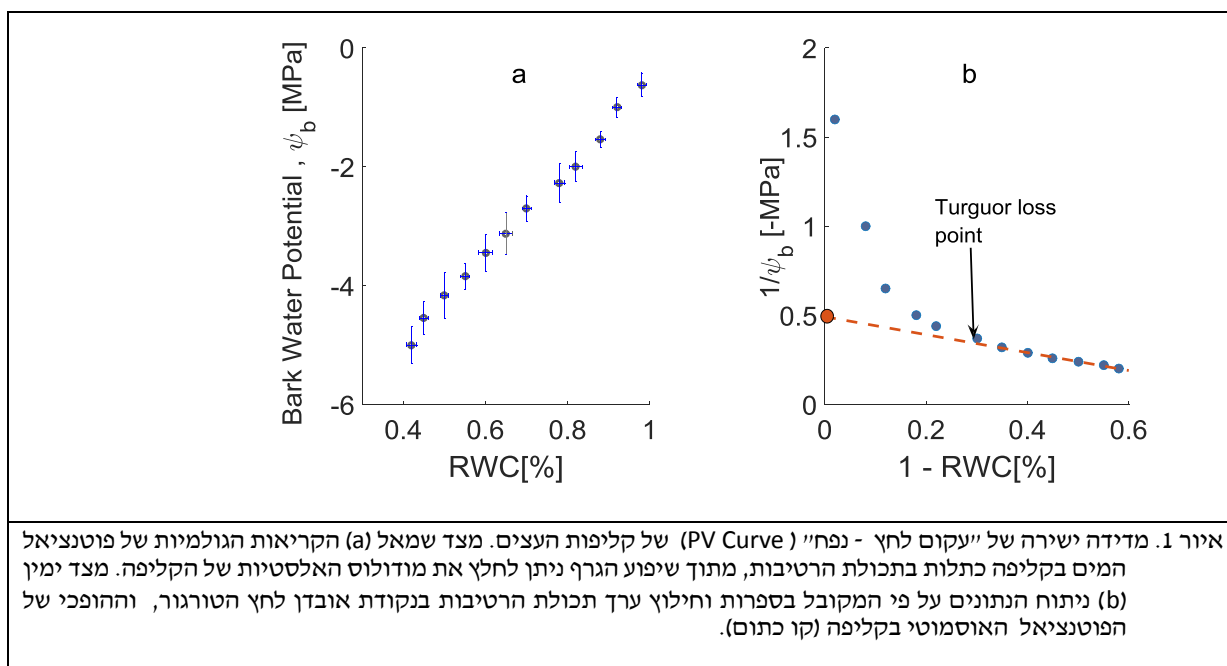
תוצאות ודיון (לנוחיות הקורא מתוארים החומרים והשיטות בכל נושא בנפרד)

במהלך עונת 2016 הוצבו 16 דנדרומטרים מסוג LVDT על גזעי עצי המדידה בניסוי. במהלך העונה נמדדו 11 עקומים יומיים מפורטים של פוטנציאל מים בגזע על ידי תא לחץ ונעשה כיוול למודל בהתבסס על הנחה של פוטנציאל אוסמוטי קבוע בקליפה והזנחת שינויי העובי בעצה. הכיוול אפשר לחלץ באופן אמפירי את מודולוס האלסטיות של הקליפה, ואת מקדם התולכה הרדיאלי שבין הקליפה לעצה. בשנת 2017 מדידנו באופן ישיר שינויים יומיים של פוטנציאל אוסמוטי בקליפה לאורך העונה ובצענו מדידות ישירות של מודולוס האלסטיות שלה. בנוסף, בצענו מדידות ישירות של שינויי עובי בעצה, ופיתחנו מודל גדילת גזע שיאפשר לנכות מאות הדנדרומטר את מרכיב הגדילה הפלסטי ועל ידי כך יאפשר שימוש במודל לאורך זמן מבלי שיהיה צורך לתקן אותו על ידי קריאות תא לחץ.

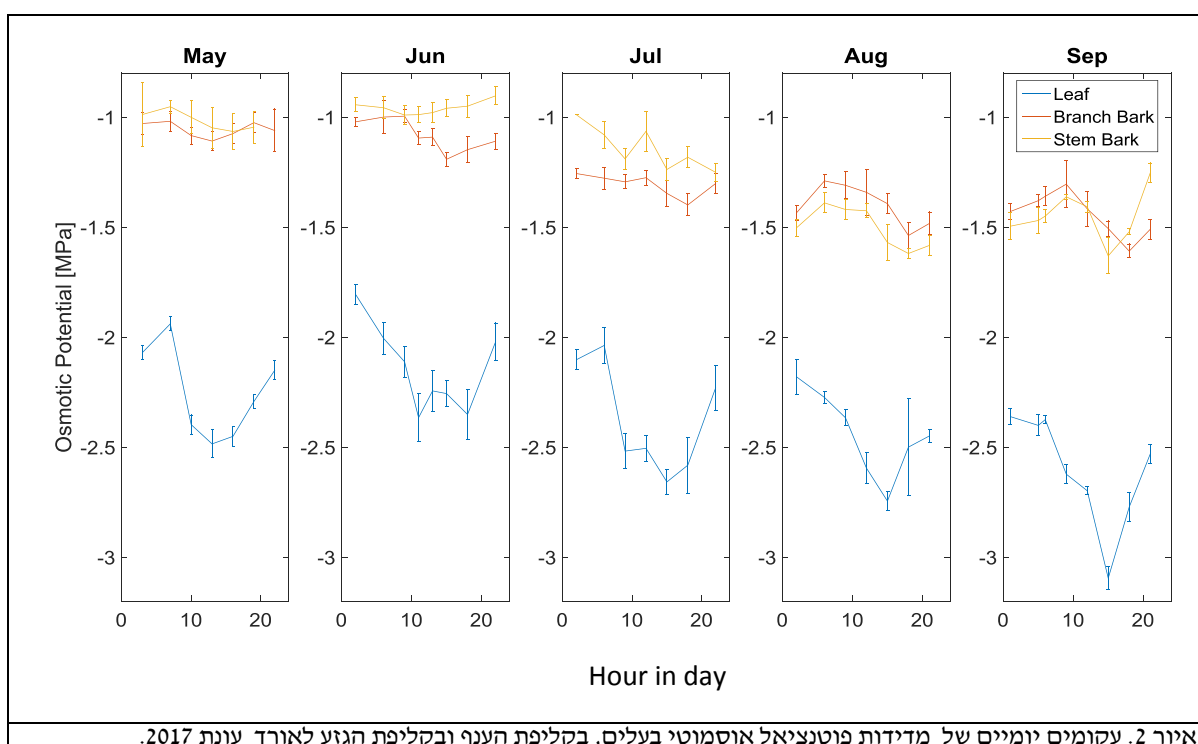
מדידה של מודולוס האלסטיות - כ- 10 מדגמי קליפה הוסרו מגזע העצים באוקטובר 2017, הקליפות הוכנסו למבחנות אטומות בתוך צידנית מקוררת ונשמרו בקירור עד לביצוע האנליזה. לאחר מכן במעבדה הן נשקלו במאזניים אנליטיים, הוטבלו במים לרה-הידרציה של הרקמה ונשקלו שוב לקבלת המשקל הרווי. לאחר מכן נמדד פוטנציאל המים של הדוגמאות באמצעות פסיכרומטר ולאורך תהליך ייבוש באוויר בתנאי החדר נשקלו הדגימות ונמדדו בפסיכרומטר כל כמה שעות עד הגעה לתחום פוטנציאלי המים שחורגים מהתחום הפיזיולוגי שמעניין אותנו. בסוף המדידות הוכנסו הדגימות לייבוש בתנור ב- 60° למשך שלושה ימים ונקבע המשקל היבש של הדוגמה.

על בסיס המדידות המוצגות באיור 1.a ומשוואה (9) חשבנו את מודולוס האלסטיות של הקליפה, הערך המתקבל הינו 7.8MPa . ערך זה מתאים לתחום הערכים המקובלים בספרות אך קצת יותר גבוה מהערך האמפירי שהתקבל מהניסוי משנת 2016 (5MPa). מעניין לציין שעל פי איור 1.b התקבל שהפוטנציאל האוסמוטי בקליפה הינו 1.8MPa כאשר הקליפה רוויה, באופן דומה לערכים שהתקבלו מהמדידות הישירות בקליפה (בסעיף הבא).

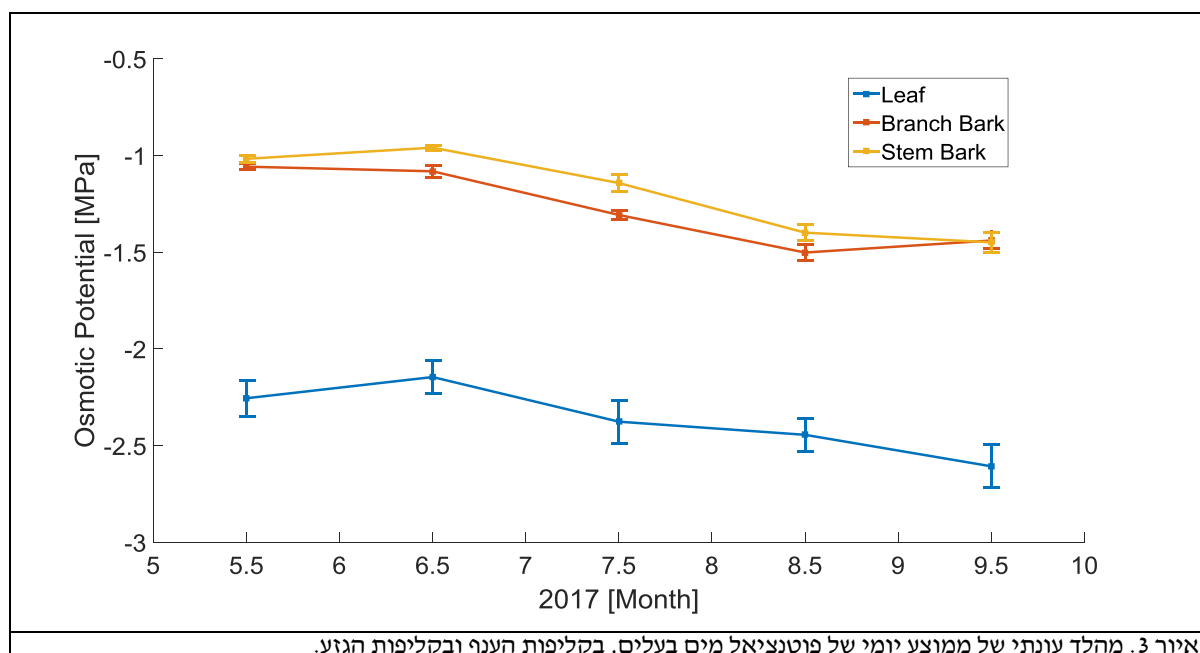
מדידה של הפוטנציאל האוסמוטי בקליפה: בכול שעת דיגום הוסרו קליפות מהענף ומהגזע ועלים צעירים חשופים לשמש והוכנסו למבחנות בתוך חנקן נוזלי לאחר מכן במעבדה הועברו הדגימות לקירור בטמפ' - 20°C . בשלב המיצוי הוכנסו הדגימות לצנטריפוגה מקוררת (בטמפ' 5°C) במהירות של 7000 סיבובים לדקה למשך 5 דקות. בתום המיצוי הועברו כ- 50 מיקרוליטר מוהל למדידת ריכוז מומסים על ידי אוסמומטר לחץ אדים של חברת Wescor (Wescor, Logan, Utah).



התמקדות בשינויים היומיים בפוטנציאל האוסמוטי בקליפת הגזע (איור 2) מראה כי קיים מהלך יומי מחזורי ברור רק בחלק מהחודשים (מאי, אוגוסט, ספטמבר), וכי המהלך בקליפות בחודשים הללו עוקב אחר המהלך בעלים. מאחר והדמיון בין החודשים הוא נמוך והשינויים היומיים קטנים בהשוואה לשינויים בפוטנציאל המים בגזע החלטנו להזניח את השינויים היומיים בפוטנציאל האוסמוטי אך לא להזניח את השינויים העונתיים.



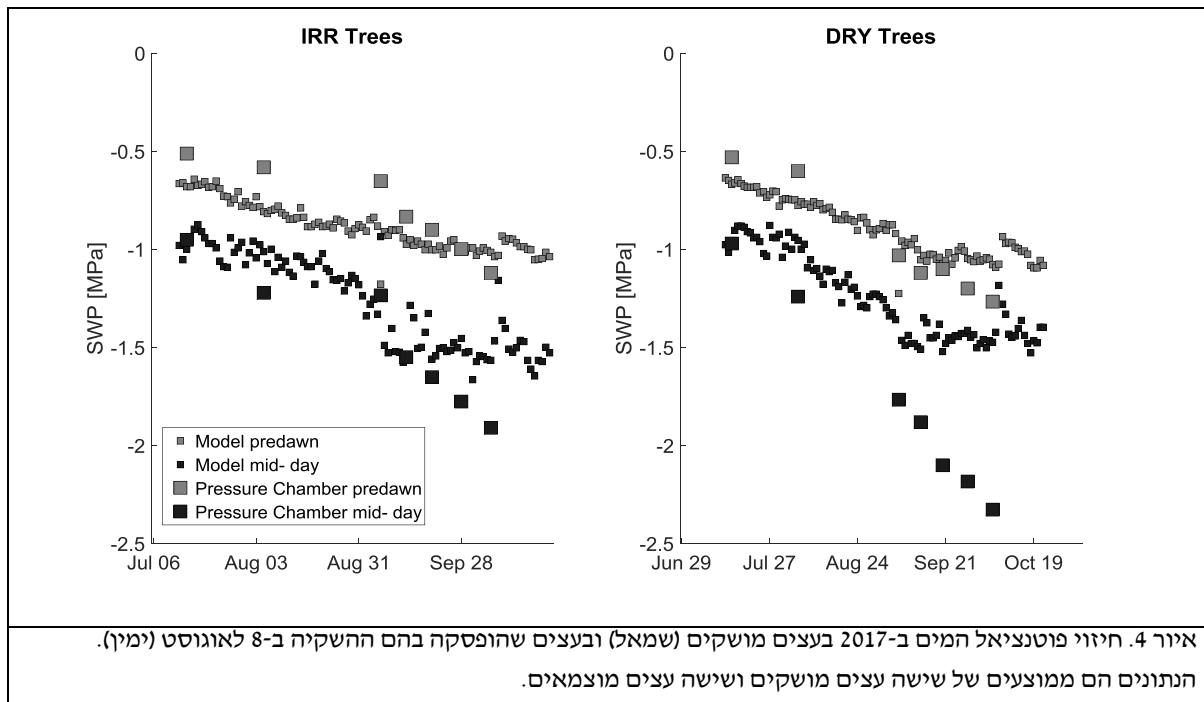
נבנה עקום עונתי (איור 3) שמבטא את הירידה הניכרת שבאה לידי ביטוי בין יוני לספטמבר באמצעות אינטרפולציה בין הימים המדודים :



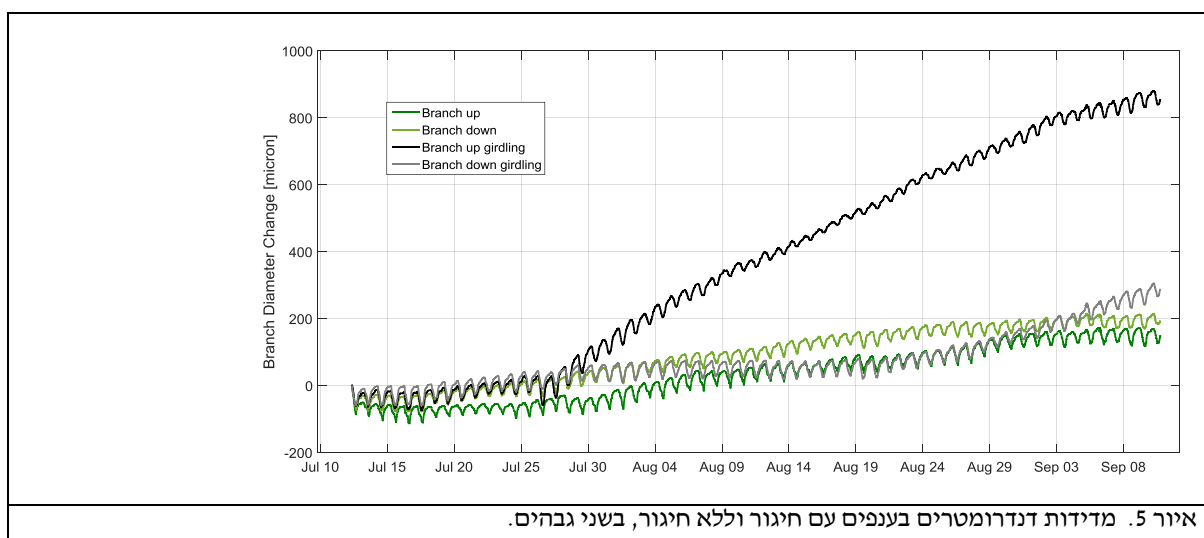
על בסיס העקומים היומיים של מדידות תא הלחץ מעונת 2016 והמידע שהתווסף ממדידות 2017 בצענו אנליזה המסכמת את המודל באופן הבא :

- (א) על בסיס מדידות 2016 : חילוץ אומדן אמפירי לערך Y , ערך הסף לגדילה הרדיאלית בגזע.
 (ב) על בסיס מדידות 2016 : חילוץ אומדן אמפירי לערך \emptyset מקדם המתיחה של הקליפה.
 (ג) על בסיס העקומים היומיים של 2016 חילוץ מקדם התולכה הרדיאלי L .
 (ד) הרצת המודל בעונת 2017 על בסיס אומדן כל הפרמטרים והמשתנים המדודים.
 התאמה של המודל למדידות תא הלחץ הניבה את ערך הסף $Y = 0.35 \pm 0.07$ MPa, מקדם התפשטות הקליפה $L = 0.011 \pm 0.006 \mu m$ ומקדם התולכה הרדיאלי $\emptyset = 0.0012 \pm 0.0004 MPa^{-1} s^{-1}$
 על בסיס הפרמטרים הקבועים הללו, ועל בסיס מדידות הדנדרומטרים והפוטנציאל האוסמוטי בקליפה נעשתה אנליזה לאפיון אומדן פוטנציאל המים בטרם שחר ובצהרי יום לאורך עונת הניסוי בשנת 2017 באמצעות המודל ובהשוואה למדידות הישירות באמצעות תא לחץ.

השפעת החיגור על הגדילה : במהלך עונת 2017 נבחנו נקודה זו באמצעות מערך מדידות על ענפים מחוגרים. על כל ענף הותקנו שני דנדרומטרים – אחד מעל החיגור ואחד מתחת לחיגור. התקנת הדנדרומטרים נעשתה על גבי 8 ענפים (ארבעה ביקורת ללא חיגור וארבעה עם חיגור) ב- 13 ליולי 2017 והחיגור נעשה ב- 26 ליולי 2017.

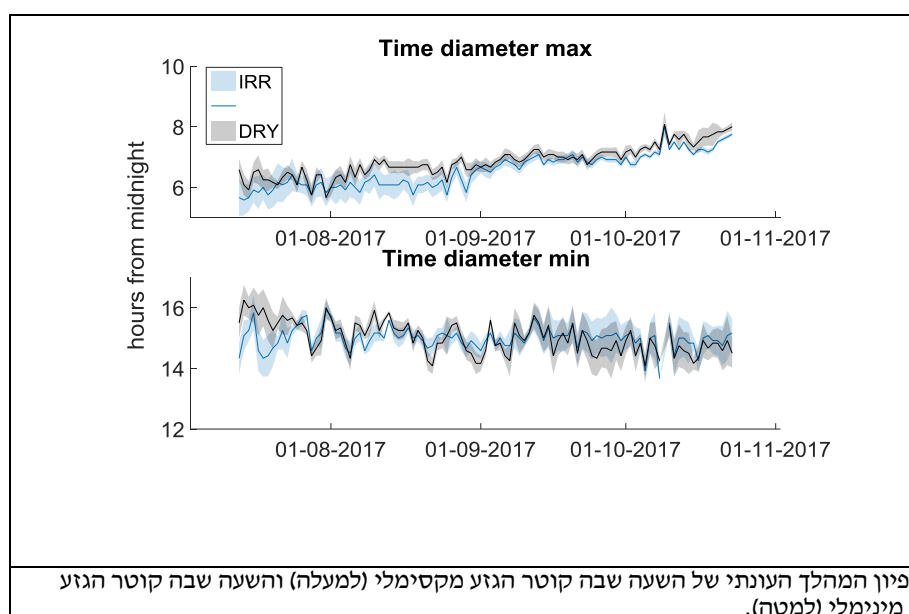


ההשפעה העיקרית של החיגור (איור 5) באה לידי ביטוי בגדילה אינטנסיבית (קו שחור) שחלה מיד לאחר החיגור מעל נקודת החיתוך, כנראה שבשל הצטברות סוכרים בסביבה זו התרחשה גדילה אינטנסיבית. מתחת לחיגור (קו אפור) ישנה האטה בקצב הגדילה מיד לאחר החיגור. ההאטה נמשכת עד לצמיחת הרקמה מחדש בשלהי חודש אוגוסט וחידוש תנועת הסוכרים כלפי מטה. השפעה נוספת של החיגור היא על שינויים בריכוז הסוכרים מעל ומתחת לחיגור (לא נמדד). על פי המודל הצטברות סוכרים צריכה להקטין את ההתכווצויות היומיות בקליפה, וירידה בריכוז הסוכר צריכה להגדיל אותה. על פי המדידות בענף המחוגר ניתן לראות שמעל החיגור במידה והייתה הצטברות סוכרים היא אכן גרמה להקטנת ההתכווצות היומית. אך לא ניכרת השפעה על שינויי דפוס התכווצות הקליפה מתחת לחיגור. ייתכן שמתחת לחיגור לא חל שינוי משמעותי בריכוז הסוכרים ולכן לא ניכרת שם ההשפעה על דגם ההתכווצות היומית.



מקדם התולכה הרדיאלי :

בכדי לבדוק האם מקדם התולכה הרדיאלי משתנה לאורך העונה נעשתה אנליזה של שינויי עובי הגזע היומיים במטרה לבדוק האם המינימום היומי או המקסימום היומי מוסחים בזמן כאשר משווים בין העצים היבשים למוצמאים. על פי המודל ככל שהתולכה הרדיאלית קטנה כך גדלה ההסחה בין פוטנציאל המים בגזע לשינויי העובי בגזע. מאחר ומדידות תא הלחץ נעשו באינטרוואלים ארוכים - לא ניתן לקבל תמונה מהימנה של תזוזת העקום היומי של פוטנציאל המים לאורך העונה, ולכן נעשתה השוואה בין הטיפולים בהנחה שאם יש שינוי עונתי בתולכה הרדיאלית הוא יגרום להבדלים בשעות המקסימום והמינימום היומי בקוטר הגזע בין הטיפולים, שכן התולכה תלויה ברטיבות הקליפה. לא נמצא הבדל בין הטיפולים, ולכן ניתן להניח כי לא חלים שינויים עונתיים במקדם התולכה.



הפיון המהלך העונתי של השעה שבה קוטר הגזע מקסימלי (למעלה) והשעה שבה קוטר הגזע מינימלי (למטה).

סיכום המודל :

אומדן פוטנציאל המים בעצים המושקים מניב תוצאות טובות בחודשים יולי אוגוסט אך בהמשך העונה פוטנציאל המים המדוד יורד יותר מהר מהאומדן של המודל. ההסבר לכך קשור בעובדה שהמהלך השנתי של עובי הגזע מראה הפסקת גדילה החל מחודש ספטמבר, הפסקת הגדילה לא בהכרח קשורה למצב המים בעץ אלא קשורה במחזור העונתי שלו. המודל הנוכחי נוקט בגישה מכניסטית ולא מביא בחשבון שינויי עובי שלא על ידי שינויים במשק המים ולכן אי ההתאמה בין המודל למדידות גדלה על רקע שינויי עובי שאינם קשורים במשק המים של העץ. המודל לא מצליח לאמוד את פוטנציאל המים בעצים המוצמאים כשעקת המים מחמירה, הסיבה הטכנית לאי ההתאמה קשורה בכך שעם הירידה בפוטנציאל המים לאורך הניסוי השינויים היומיים בעובי הגזע קטנו ולא גדלו בהשוואה לשינויים בעצים המושקים. ההשפעה הניכרת של ההצמאה על תגובת הדנדרומטר באה לידי ביטוי בהקטנת הגדילה היומית, אך המודל הנוכחי לא משקלל את ההפחתה בגדילה בהשוואה לעצים המושקים אלא רק מנכה את הגדילה הקיימת מהאות המקורי. באופן פרדוקסלי דווקא העצים שגדלו יותר עוברים תיקון משמעותי יותר ולפיכך השינויים

האלסטיים גדלים, לעומת זאת חילוץ האות האלסטי מהמדידות של העצים שגדלו פחות מניב אות אלסטי בעל שינויים מינוריים יותר.

בדיקת השפעת החיגור על תגובת הדנדרומטר מניבה מספר מסקנות:

- (א) ניתן לצמצם גדילה רדיאלית בענף באזור שנמצא מתחת לנקודת החיגור.
- (ב) כנראה שההשפעה של החיגור על ריכוז הסוכרים מתחת לנקודת החיתוך אינה מתרחשת בפרקי זמן של ימים ושבועות בודדים.
- מגבלות המודל: אחת ההנחות המרכזיות במודל מבססת את השינויים הרדיאליים בעובי הגזע על תנועת מים בכיוון מפל פוטנציאל המים ולפיכך קובעת שוויון פוטנציאלים בין שני המדורים פעמיים לאורך היממה- במקסימום ובמינימום היומי של עובי הגזע. מאחר וגישה זו מאלצת שוויון בפוטנציאל המים היא מהווה חסם תחתון לשינויים האפשריים בפוטנציאל המים בגזע שכן במקרה הקיצוני של אובדן טורגור מוחלט בקליפה, פוטנציאל המים בעצה צריך להשתוות לפוטנציאל האוסמוטי בקליפה כאשר הנגזרת של שינויי העובי שווה לאפס. אך מאחר שמדידות ריכוז הסוכרים בקליפה מראות ערכי מינימום בין -1.1MPa בתחילת העונה ו- -1.5MPa בסוף העונה לא ניתן באמצעות המודל לאמוד ערכי פוטנציאל מים בעצה נמוכים מהערך המינימלי של המרכיב האוסמוטי בקליפה – וזה בסתירה למדידות הישירות באמצעות תא לחץ שמראות ערכים נמוכים יותר בצהרי היום בחלק מהמדידות.

ההבדל בין הערך המדוד של מודולוס האלסטיות (7.5 MPa) לעומת הערך האמפירי (5.5MPa) יכול להיות קשור בעובדה שהמודל מזניח את השינויים היומיים בעובי העצה. מעט הממצאים שהצלחנו למדוד בנושא מראים כי השינויים היומיים בעובי הקליפה נמוכים בפועל ב- $\sim 10\%$ מהערך הנמדד, ואילו היינו מקזזים את השינויים בעצה מהמדידות ומציבים במודל שינויי עובי נמוכים מהערך בו השתמשנו - הערך האמפירי של מודולוס האלסטיות היה גדל.

הצעות לתיקון המודל: ייתכן שתיאור פוטנציאל המים הכולל בקליפת הגזע רק על ידי סכום אלגברי של מרכיב לחץ הידרוסטטי ומרכיב אוסמוטי מזניח השפעה אפשרית של הטווח הנקבובי שמאפיין את רקמת הקליפה בצמח ולפיכך מתעלם ממרכיב מטרי שיכול לגרום לשינויי פוטנציאל מים גדולים במידה והרטיבות ברקמה פוחתת מתחת לרוויה.

המדידות הישירות של פוטנציאל המים במדגמי קליפה מאששות שאם הקליפה מתייבשת וחלה הפחתה בתכולת הרטיבות שלה, פוטנציאל המים יכול לרדת מתחת לערך הנמוך האפשרי שחסום על ידי המרכיב האוסמוטי במודל הקיים. החלפת פוטנציאל המים הכולל בקליפה $(p_b + \pi_b)$ באמצעות הקשר האמפירי $\psi_b = aRWC + b$ (איור 1.a) וההנחה שמתרחשים שינויים יומיים ועונתיים בתכולת הרטיבות של הקליפה (והשינויים בפוטנציאל האוסמוטי נגרמים בגלל שינויי רטיבות ולא בגלל כמות המומסים ברקמה), מאפשרת לנסח מודל חדש שיכול להבחן במחקר המשך.

מודל אמפירי הקושר את פוטנציאל המים להתנגדות חופת לתנועת מים

בעצים רבים נמצאה נטייה לייצב את קצב הדיות בצהרי היום באמצעות בקרה על פתיחת פיוניות הנעשית בהתאם למצב היובש האטמוספרי מחד ולפוטנציאל המים בעץ מאידך (Granier et al., 1996; Phillips & Oren 1998).

(Oren et al. 2001). לפיכך ניתן לטעון שבמידה ולעצים יש שליטה חזקה על הפיוניות שמוכתבת בהתאם לפוטנציאל המים ניתן באמצעות הקשר שבין שטף הדיות והיובש האטמוספרי לחלץ את פוטנציאל המים בגזע.

התנגדות למעבר מים בין העלה הבודד לאטמוספירה ניתנת למדידה ישירה באמצעות מכשור מתאים, אפיון התנגדות כלל הנוף ברמת העץ השלם דורשת שימוש במדידות ובמודלים. באמצעות מדידות זרימה בגזע (SF) ושימוש במודל פנמן – מונטית ניתן להעריך את התנגדות כלל הנוף $R_c [s^{-1} mm]$ (Cohen and Naor 2003) הראו שהתנגדות הנוף בשעות הצהריים, כאשר ההתנגדות לא מושפעת מהאור, קשורה באופן ליניארי עם גרעון לחץ אדי המים באוויר (VPD [kPa]). המודל החדש שאנו מציעים מבוסס על הקשר האמפירי שבין שיפוע הקשר של התנגדות הנוף ולחץ אדי המים באוויר ופוטנציאל המים בגזע (Paudel et al., 2015).

למרות שהמודל מבוסס על ממצא אמפירי, כלומר על הקשר הליניארי בין התנגדות הנוף ל-VPD, ניתוח פשטני של קשרים בסיסיים מוביל להבנה של הקשרים הנ"ל. ניתן לתאר את צריכת המים של העץ F , בשני דרכים:

$$F = \frac{VPD}{r_c} = \frac{\varphi_s - \varphi_{stem}}{r_h} \quad (10)$$

כאשר r_c ו- r_h הם התנגדות נוף והתנגדות הידראולית של העץ, בהתאמה, ו- φ_s ו- φ_{stem} הם פוטנציאל מים של הקרקע והגזע בהתאמה. באמצע היום מוליכות הידראולית ופוטנציאלי המים קבועים כאשר VPD משתנה ו- r_c משתנה כדי לווסת את השטף. נמצא ש- r_c משתנה באופן ליניארי עם VPD כאשר השיפוע הוא a ונקודת החיתוך הינו קרוב ל-0 (ראה במאמרים הנ"ל). אזי ניתן לרשום

$$F_{constant} = \frac{VPD}{a \cdot VPD} = \frac{\varphi_s - \varphi_{stem}}{r_h} \quad (11)$$

ו-

$$F_{constant} = \frac{1}{a} = \frac{\varphi_s - \varphi_{stem}}{r_h} \quad (12)$$

ומכיוון שבטווח רחב של פוטנציאלי מים המוליכות ההידראולית r_h כמעט ואינו משתנה, הרי $1/a$ הוא פרופורציונאלי להפרש פוטנציאל מים בין הקרקע לגזע, ולפוטנציאל המים בגזע שאנו מחפשים. מימוש המודל: מדידות SF ומטאורולוגיה (קרינה נטו, טמפרטורת אוויר, לחות אוויר ומהירות רוח) מאפשרות לחלץ ממודל פנמן – מונטית, את מוליכות הנוף g_c .

$$g_c = \frac{\lambda E_T \gamma g_a}{\Delta(Rn - G) + \rho_a C_p VPD g_a - \Delta \lambda E_T} \quad (13)$$

λ זה החום הכמוס של המים $[J m^{-3}]$, E_T זה הדיות מהעצים $[m s^{-1}]$, γ הינו הקבוע הפסיכרומטרי $(0.066 kPa C^{-1})$, g_a זו המוליכות האווירודינמית של האוויר (ms^{-1}) (ראה נספח א'), Δ זה השיפוע של עקום לחץ האדים ברוויה

והוא תלוי בטמפרטורת האוויר, R_a זו הקרינה נטו G , $[Wm^{-2}]$ זה שטף החום לקרקע ρ_a , $[Wm^{-2}]$ זו צפיפות האוויר C_p , $[Kgm^{-3}]$ זה קיבול החום של האוויר VPD , $[JKg^{-1} - 1^\circ C^{-1}]$ זה גרעון בלחץ אדי המים באוויר $[KPa]$.
 התנגדות הנוף $[s m^{-1}]$ מוגדרת כהופכי של מוליכות הנוף:

$$R_c = \frac{1}{g_c} \quad (14)$$

שיפוע הקשר הלינארי בין R_c ל- VPD :

$$R_c = Slope \times VPD \quad (15)$$

באמצעות מדידות פוטנציאל מים בגזע בצהרי היום ניתן לכייל את הקשר האמפירי בין פוטנציאל המים בגזע (SWP) לשיפוע (Slope) ממשוואה (8):

$$Slope = a \times SWP + b \quad (16)$$

ובהתאם לפרמטרים a , b המתקבלים מכיול המודל ניתן יהיה לחזות את SWP על בסיס מדידות SF ומטאורולוגיה בלבד:

$$SWP = \frac{R_c/VPD - b}{a} \quad (17)$$

סיכום ההנחות העיקריות במודל:

- אין שינוי יומי משמעותי בקיבול המים בעץ ולכן הזרימה בגזע שווה לטרנספירציה.
- מודל פנמן מונטני מתאר את שטף הדיות כתלות בתנאים המטאורולוגיים ומוליכות הנוף.
- מוליכות הידראולית של העץ (כלומר של מערכת קרקע-שורש-עץ) אינה משתנה בתקופת יישום המודל או שהוא משתנה באופן ליניארי עם השינוי בפוטנציאל מים במערכת.

סיכום ההיפותזות העיקריות במודל:

- הוויסות במהלך צהרי היום מבטא את התנגדות הנוף למעבר אדי מים לאטמוספירה (בקרת פיוניות).
- התנגדות הנוף בשעות שאין מיגבלת אור בנוף עולה באופן לינארי כאשר ה- VPD גדל, שיפוע הקשר הזה תלוי בפוטנציאל המים בגזע (SWP).
- עצמת הוויסות תלויה בפוטנציאל המים בגזע ותפקידה העיקרי להגן על העץ מפני מתחים שליליים חריפים שיכולים להידרדר לאמבוליום.
- העץ מווסת את הטרנספירציה בהתאם למגבלת זמינות המים בקרקע, פוטנציאל המים בגזע והדרישה האטמוספירית

חומרים ושיטות

בכול אחד מבין 12 עצי המדידה הותקנו בכל אחד מהגזעים שלושה חיישני זרימה מסוג דיסיפציית חום ("גרנייה") בשלושה אזימוטים – 270, 180, 90. החיישנים נבנו בייצור עצמי במעבדה במכון וולקני, קוטר החיישן 2 מ"מ ואורך 20 מ"מ, מעגל החימום של החיישן המחומם מווסת את הזרם לקבלת הספק קבוע של 0.2 וואט.

בניסוי הנוכחי נמדדה הטמפרטורה האבסולוטית של שני החיישנים - חיישן הרפרנס וחיישן החימום. ועל בסיס הביטוי האמפירי הבא חושב שטף המים בגזע:

$$J = aK^b \quad (15)$$

כאשר J הינו שטף המים ($l\ hr^{-1}\ dm^{-2}$), a ו- b הינם קבועים אמפיריים שכולו עבור נקטרינה (Paudel et al. 2013) וערכם 1.157, 4.86. בהתאמה K הינו הפרש הטמפרטורה המנורמל בין החיישן המחומום לחיישן הרפרנס:

$$K = \frac{\Delta T_m - \Delta T}{\Delta T} \quad (16)$$

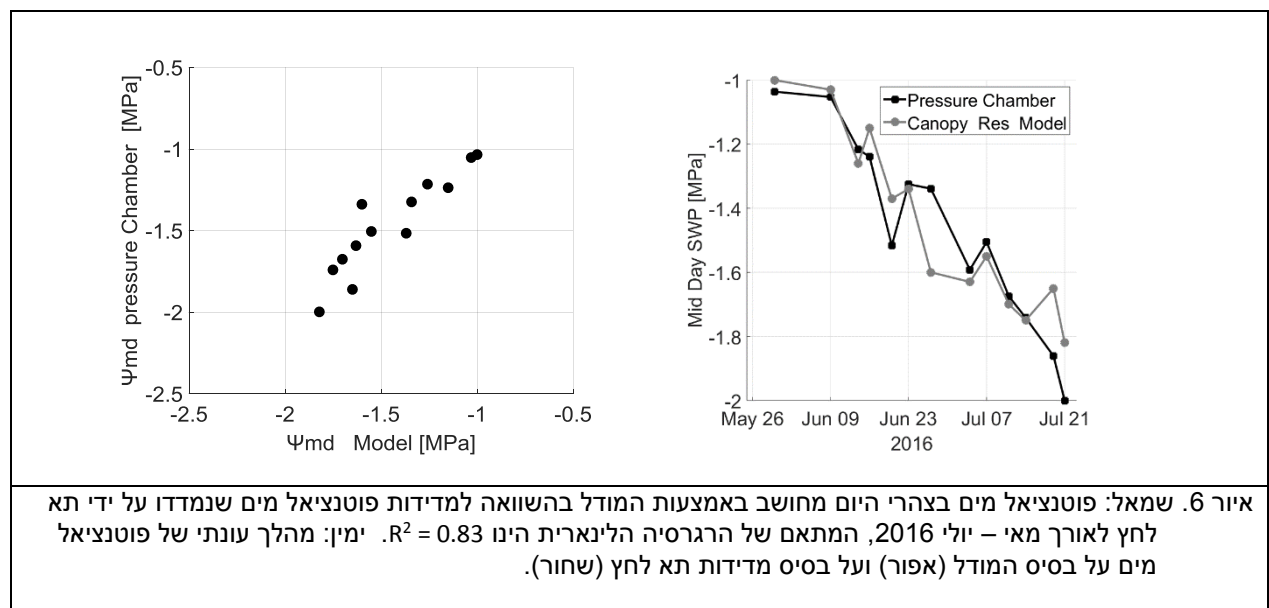
ΔT_m , הינו ההפרש המקסימלי היומי בין החיישנים המבטא את ההפרש כאשר הזרימה שווה לאפס והוא נקבע עבור כול יום בנפרד. ΔT הפרש הטמפרטורה הרגעי בין שני החיישנים. שטף המים הכולל $SF(l\ Tree^{-1}\ hr^{-1})$ מכול שטח העץ מחושב על ידי:

$$SF = JA \quad (17)$$

כאשר A הינו שטח העצה הפעילה (dm^2) מתוקן בגורם המבטא את הפרופיל הרדיאלי של הזרימה – על בסיס עבודתם של Paudel et al (2013).

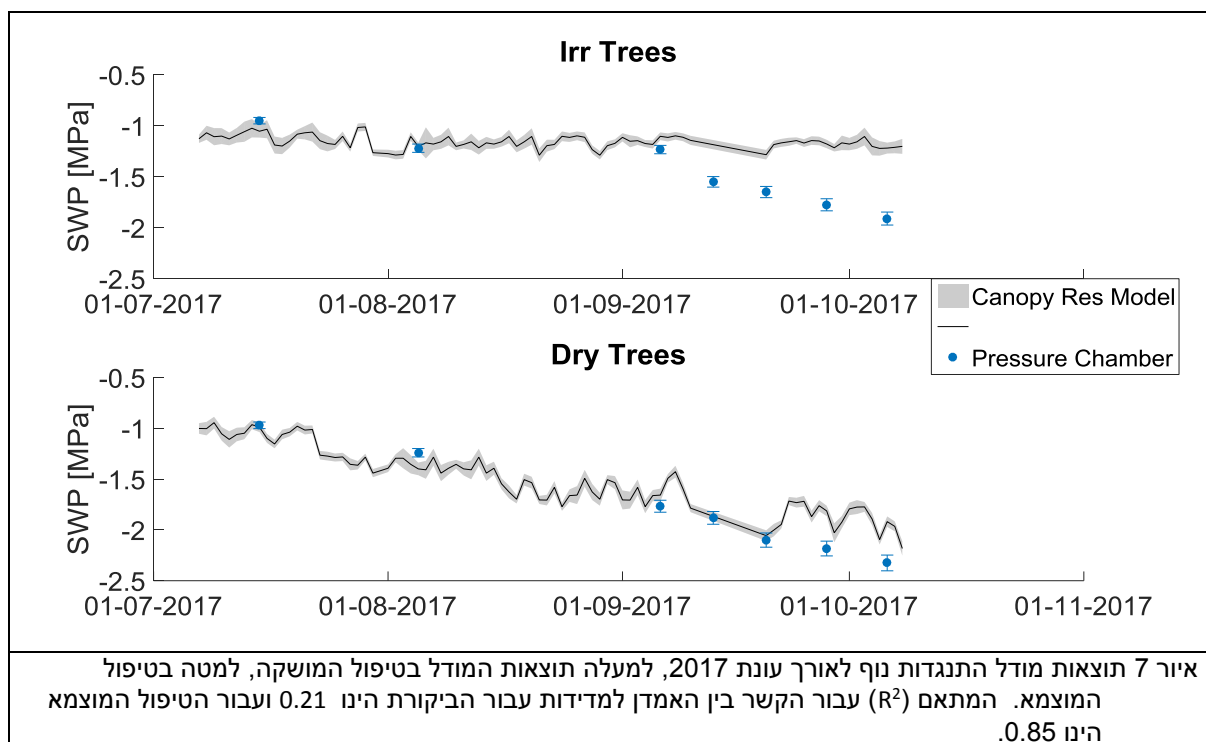
תוצאות ודיון

במהלך עונת 2016 נבחנו ההיפותזות העיקריות של המודל: (1) נבחן הקשר הלינארי בין התנגדות הנוף למעבר אדים לבין הגרעון בלחץ האדים באוויר. (2) נבחן האם שיפוע הקשר הנ"ל תלוי בפוטנציאל המים בגזע. על בסיס אימות ההנחות ושימוש במדידות תא לחץ נעשה כיוול למודל ונמצאו הפרמטרים האמפיריים שלו. על בסיס עונה זו התקבלו ערכי הפרמטרים של המודל: $a = -1.4\ s\ mm^{-1}\ KPa^{-1}\ MPa^{-1}$, $b = -0.11\ s\ mm^{-1}\ KPa^{-1}$. באיור 6 מוצג פוטנציאל המים המדוד והחזוי על פי המודל ב-2016 (כיוול הפרמטרים נעשה גם הוא מנתוני 2016. ב-2016 (איור 6) נמצא קשר לינארי חזק ($R^2=0.83$)



במהלך עונת 2017 נעשה אימות למודל באמצעות הקבועים האמפיריים שהתקבלו מעונת 2016. אומדן המודל מתאר היטב את המהלך התקופתי של פוטנציאל המים בטיפול הצמא לאורך תקופת הניסוי (איור 7). בטיפול הביקורת שמושקה היטב המודל מצליח לתאר את מצב המים בעץ עד חודש ספטמבר.

החל מחודש ספטמבר בטיפול המושקה נוצר פער שהלך וגדל בין הערך המדוד לאומדן המודל. עונה זאת מאופיינת בירידות ב-VPD וירידה בפוטנציאל מים בגזע אפילו כאשר ההשקיה המשיכה. הפער נובע מכך שהירידות בזרימת המים בגזע לא תאמו את הצפוי במודל עבור פוטנציאלי המים ו-VPD הנמוכים שנמדדו. לפיכך נראה שהקשרים האמפיריים לא תקפים עבור עונה זאת. ייתכן כי הקשרים האמפיריים במודל משתנים בתקופה זו של העונה ולא ניתן באמצעות הערכים שהתקבלו מעונת הכיול (יוני – יולי) לשקף את הקשרים בכול שלבי העונה. הרקע לירידה בפוטנציאל המים בגזע במהלך חודש ספטמבר בטיפול המושקה לא נובע מירידה במשטר הרטיבות בקרקע שכן ההשקיה המשיכה גם בשלב זה. לפיכך ייתכן שהקשרים האמפיריים לא תקפים עבור ירידת פוטנציאל מים בגזע שלא על רקע של עקת מים שנובעת מיובש קרקע.



מודל תנועת מים מהקרקע אל הגזע

עקרונית, המודל הקרקעי יכול לקבוע את פוטנציאל המים בגזע על בסיס הערכת התנגדות הקרקע והתנגדות מערכת השורשים לקליטת מים, ומדידות של פוטנציאל המים בקרקע וזרימת המים בגזע. המודל מתאר את תנועת המים ברצף קרקע – צמח על פי הגישה המקובלת של זרימת מים במורד פוטנציאל המים לאורך מסלול התנגדויות טורי של הקרקע והצמח. אולם, המודל הקרקעי אינו חלופה טובה לאמידת פוטנציאל הגזע מפני שהערכים של פוטנציאל המים בקרקע קטנים מאד (קרובים ל-0) לעומת הערכים הנמדדים בגזע (אטמוספרות), ומפני שאין אפשרות מעשית לאמוד את התנגדות השורשים

(ויכול להיות שהתיאור של זרימת המים לתוך השורשים והעצה כזרימה פוטנציאלית - מכפלה של תולכה במפל לחצים - אינו מספיק מציאותי).

אנחנו מנסים להשתמש במודל הקרקעי לצורך אחר: לקביעת ההתנגדות היחסית (לעומת הקרקע) של הצמח לקליטת מים, ζ , על-פי גישת DIDAS (Friedman et al., 2016, <https://app.agri.gov.il/didas>), מדד שיכול להיות לעזר בהכוונת השקיה. כדי לאמוד את ζ צריכים: א. לדעת את תכונות הקרקע; ב. ואת התנגדות הקרקע לקליטת מים; ג. ולמדוד את קצב קליטת המים היחסי (לקצב ההשקיה).
שלב א':

הערכנו את תכונות הקרקע ההידראוליות הדרושות בשיטת ההשקיה המחזורית (Communar and Friedman, 2014). התכונות הנאמדות בשיטה זאת הן: ההופכי של האורך הקפילרי של הקרקע (α ; cm^{-1}), המוליכות ההידראולית של הקרקע ברוויה, (K_{sat} , cm hour^{-1}), וקצב השינוי של המוליכות ההידראולית (K) עם תכולת הרטיבות הנפחית של הקרקע (θ) בתחום הרטיבות הרלוונטי ($k = dK/d\theta$). על-פי שיטה זו אומדים את התכונות ההידראוליות של הקרקע באמצעות השקיה מחזורית על ידי טפטפת בודדת בפני הקרקע ומדידה רציפה של העומד המטריצי (על ידי טנסיומטר) בעומק ידוע מתחת לטפטפת. התכונות המתקבלות בשיטה זו מאפיינות את נפח הקרקע שבין פני השטח לעומק בו טמון הטנסיומטר. המדידות נעשו במטע הנקטרינה שבחוות המטעים בין שתי שורות עצים במרחק מספיק גדול מהעצים תוך הנחה שבמרכז השביל אין קליטת מים על ידי שורשי העצים. במרכז השביל נפרס קו טפטוף עם 9 טפטפות מווסתות (2 ליטר לשעה) במרחקים קבועים של 2 מטר. מתחת לכל טפטפת הותקן טנסיומטר (Irrometer Co. Inc., Riverside, CA) ונמדדה קריאה כל 10 שניות וממוצע כל דקה. הטנסיומטרים הותקנו ב- 3 עומקים של 15, 30, 45 cm, שלוש חזרות לכל עומק. במהלך הניסוי נבחן מחזור השקיה של 16 שעות (כלומר, 8 שעות השקיה ו-8 שעות הפסקה). התוצאות הבאות מבוססות על המחזור האחרון הנמדד לאחר 5 מחזורים, הנתונים עובדו באמצעות תכנת DIDAS ובטבלה להלן מוצגות התוצאות עבור שלושת העומקים הנבחנו:

זמן מחזור 16 שעות			
עומק (ס"מ)	α cm^{-1}	K_{sat} cm hour^{-1}	$k = dK/d\theta$ cm hour^{-1}
15	0.043	0.649	2.341
30	0.0674	0.465	10.3
45	0.089	0.537	8.556

שלב ב':

על פי הגישה של מקור-מבלע מצומדים שמיושמת בתוכנת DIDAS, התנגדות הקרקע לזרימת המים ברצף קרקע-צמח תלויה בתכונות הקרקע (בזרימה תמידית רק ב- α ובזרימה עתית גם ב- k), בהצבת הטפטפות ובגודל מערכת השורשים. DIDAS מחשבת את ההתנגדות הקרקע. כדי להעריך את התנגדות

הקרקע לקליטת מים השתמשנו במודל התכנון של DIDAS (המניח שזרימה תמידית), עם ערך α של 0.065 cm^{-1} ורדיוס מערכת שורשים של 20 ס"מ, והנחנו שלצמח (-אטמוספירה) אין התנגדות לקליטת מים, וקבלנו קצב קליטת מים יחסי (לקצב השקיה) של 75.5%. כלומר לא יתכן שהצמח יקלוט יותר מ-75.5% ממנת ההשקיה היומית.

שלב ג':

ההתנגדות היחסית לזרימת המים בצמח – אטמוספירה, ζ , ניתנת לאמידה על-ידי הכנסת ערך של קצב קליטת מים יחסי (להשקיה) נמוך מ-75.5%. אולם על פי מדידות הזרימה בגזע לאורך עונות הניסוי שיעור קליטת המים היומי היה 105% מסך כמות המים המושקית, ולכן לא ניתן בתנאים הללו להתקדם במימוש המודל ולחשב את הצמח-אטמוספירה לקליטת מים, ובשל כך לא נעשתה התקדמות מעשית בבדיקת התכנות המודל.

Communar, G and Friedman, S.P. 2014. Determination of soil hydraulic parameters with cyclic irrigation tests. *Vadose Zone J.*, doi: 10.2136/vzj2013.09.168.

Friedman, S.P., Communar, G., and Gamliel, A. 2016. DIDAS – User-friendly software package for assisting drip irrigation design and scheduling. *Comput. Elect. Agric.*, 120:36-52.

דיון כללי

מודל דנדרומטרים – המחקר הצביע על מספר נקודות המחייבות הרחבת המודל:

השינויים היומיים בפוטנציאל האוסמוטי היו חזקים בתחילת העונה אך דעכו בהמשך. בנוסף יש מגמה ברורה של השתנות הפוטנציאל האוסמוטי לאורך העונה. לתקופה בה יש שינויים יומיים בפוטנציאל האוסמוטי והשינויים לאורך העונה מחייבים להכניס את הפוטנציאל האוסמוטי למודל. חיזוי מכניסטי של הפוטנציאל האוסמוטי אמור להיות מורכב כיוון שהוא קשור למאזן הסוכרים בעץ המושפע מקצב ייצורם ופרוס המבלעים. בנוסף יש להכניס רכיב של גידול יומי של הגזע למודל או לחילופין לבצע כיוול מול תא לחץ מידי פעם. יחד עם זאת יכול להיות שניתן לאפיין בצורה אמפירית את המהלכים היומיים וההשתנות לאורך העונה, אך זה מחייב בחינה רחבה בתנאים שונים כמו עומסי יבול, מועדי קטיף ועוד. ייתכן שניתור מסודר של שינויים אלה יוביל למודל פנולוגי (אמפירי) המתאר את המהלך העונתי של השינויים ברמת הסוכרים בשיפה והפוטנציאל האוסמוטי בתנאים רגילים ובתנאי עקת מים.

חיגור באזור הדנדרומטר מיתן את השינויים בטווח הקצר בו נמדד וגם זה כיוון שיוכל לעקוף את בעיית השינויים בפוטנציאל האוסמוטי. גם נושא זה מחייב בחינה מעמיקה. יש שונות בין דנדרומטרים (לא מוצג) ובשלב הבא יהיה צורך לתת לנקודה זו את הדעת). על מנת לקבל חיזויים טובים של פוטנציאל המים יש לנקות את הגידול בגזע. זה מחייב הכנסת מודל גידול גזע או לחילופין לאפיין את המהלכים העונתיים של עובי הגזע. גם כאן ידרש מחקר רחב שייבחן השפעת גורמים כמו עומס יבול ומועד קטיף על המהלכים היומיים.

מודל אמפירי הקושר את פוטנציאל המים להתנגדות חופת העץ לתנועת מים – המודל הראה מתאם גבוה בשנת הכיול וחיזוי טוב במשך כל התקופה. ב-2017 החיזוי היה טוב בתקופה בה בוצע כיוול בעונה הקודמת

אך מעבר אליה התגלו סטיות. כיוון שמדובר במודל אמפירי יש צורך לבצע את הכיולים באותה תקופה בה ייבחנו המודל. קיימת אפשרות שיידרש כיוול שונה לתקופות שונות לאורך העונה. יש צורך לבחון במחקר המשך את מידת הכלליות של הפרמטרים האמפירים וככל שהם יהיו כלליים כך תיגדל הישימות של המודל.

מודל תנועת קרקע-גזע – נתוני קצב הטרנספירציה היומיים ממדידות זרימה בגזע היו גבוהים ממנת ההשקיה למרות שנעשה כיוול הזרימה בגזע לעצי נקטרינה. מצב זה הוא בלתי אפשרי בעצים ללא התנגדות לקליטת מים, כיוון שהדיות אמורה להיות קטנה מההשקיה כיוון שהאחרונה אמורה לפצות גם על התאדות מפני הקרקע ותצרוכת שטיפה. יש צורך לברר נקודה זו במדידת קצב הטרנספירציה.

לסיכום - מודל הדנדרומטריה נראה המבטיח וגם בו לא הצלחנו להגיע למודל שחוזר בצורה פשוטה את פוטנציאל המים. המחקר הצביע על דרכים לשיפור החיזוי אך מדובר בהרחבת המודל וסיבוכו בצורך לכייל פרמטרים נוספים. הפשטות של מדידת הדנדרומטרים מצדיקה גם בחינת הנתיב של אומדן אמפירי של השינויים בפוטנציאל האוסמוטי וגידול הגזע שיחסכו את הצורך בשימוש במודל מורכב. הצלחת נתיב זה מותנית בקבלת פרוטוקול פשוט לאומדן הדינמיקה של הפוטנציאל האוסמוטי וגידול הגזע.

נספח א'

במודל התנגדות הנוף, נעשה שימוש בפרמטר ההתנגדות האווירודינמית R_a . להלן המשוואות המתארות את חישוב ההתנגדות הזו על בסיס מדידות מהירות הרוח ושימוש בהנחות התיאורטיות שמתארות את פרופיל הרוח הלוגריתמי:

ההתנגדות האווירודינמית מחושבת עבור גובה z :

$$R_a = \frac{\ln \left[\frac{z_m - d}{z_{om}} \right] * \ln \left[\frac{z_h - d}{z_{oh}} \right]}{k^2 u_z} \quad (1)$$

z_m זה גובה מדידת הרוח, d זה גובה סטיית האפס מחושב באמצעות גובה העצים H : $d = 0.7H$. z_{om} זה אורך החספוס למעבר תנע מחושב על ידי $z_{om} = 0.123H$. z_h זה גובה מדידת טמפרטורת ולחות האוויר, z_{oh} זה אורך החספוס למעבר חום ואדים מחושב על ידי $z_{oh} = 0.0123k$. k זה קבוע פון קרמן וערכו 0.41. u_z זו מהירות הרוח הנמדדת.

סיכום עם שאלות מנחות

מטרות המחקר תוך התייחסות לתוכנית העבודה.
לבחון חיזוי פוטנציאל המים בגזע באמצעות מודלים של תנועת מים ברצף קרקע-צמח-אטמוספירה בהתבסס על מדידות פשוטות ואנלוגיות של מתח המים בקרקע, קצב זרימת מים בגזע, שינויים בעובי הגזע ונתונים מטאורולוגיים.
עיקרי הניסויים והתוצאות.
<p>תכנית המחקר – הניסוי בוצע בנקטרינה בוגרת בחוות המטעים של מו"פ צפון בעמק החולה. הוקמה תשתית לניסוי השקיה עם ארבעה טיפולים. הותקנו דנדרומטרים, חיישני זרימת מים, טנסיומטרים ב-12 עצים. נבחנה התגובה למחזורי ייבוש, נבחנו המהלכים היומיים והעונתיים של הפוטנציאל האוסמוטי כולל השפעת חיגור על הפוטנציאל האוסמוטי. נמדדו התכונות הידרוליות של הקרקע.</p> <p>תוצאות עיקריות – מודל הדנדרומטריה נראה מבטיח אך לא הצלחנו להגיע למודל שחווה בצורה פשוטה את פוטנציאל המים. יש צורך להרחיב את המודל שיכלול גם את השפעת הפוטנציאל האוסמוטי וגידול הגזע אך מדובר בסיבוך שיחייב לכייל פרמטרים נוספים. המודל הקושר את פוטנציאל המים להתנגדות חופת העץ לתנועת מים הראה חיזוי טוב במשך כל התקופה בה בוצע כיול בעונה הקודמת אך מעבר אליה התגלו סטיות. קיימת אפשרות שידרש כיול שונה לתקופות שונות לאורך העונה. מודל תנועת קרקע-גזע לא ניתן היה לבחון כיוון שקצב הטרנספירציה היומית המדודה היה גבוה ממנת ההשקיה (מצב בלתי אפשרי בתנאים של העדר עקה).</p>
מסקנות מדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו. האם הושגו מטרות המחקר לתקופת הדוח?
מודל הדנדרומטריה נראה מבטיח אך יידרש להרחיבו כך שיכלול גם את הפוטנציאל האוסמוטי וקצב גידול הגזע. כיוון שסיבוך המודל ידרוש כיול פרמטרים נוספים מוצע לבחון אפשרות של איפיון אמפירי של המהלכים היומיים והעונתיים של הפוטנציאל האוסמוטי והגידול היומי של הגזע. במידה וניתן יהיה להכליל את האיפיונים הנ"ל ניתן יהיה להמליץ על כיוון זה לחיזוי פוטנציאל המים.
בעיות שנתרו לפתרון ו/או שינויים (טכנולוגיים, שיווקיים ואחרים) שחלו במהלך העבודה; התייחסות המשך המחקר לגביהן, האם יושגו מטרות המחקר בתקופה שנתורה לביצוע תוכנית המחקר?
המחקר הסתיים
הפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח: פרסומים בכתב - ציטט ביבליוגרפי כמקובל בפרסום מאמר מדעי; פנטטים - יש לציין שם ומס' פטנט; הרצאות וימי עיון - יש לפרט מקום, תאריך, ציטוט ביבליוגרפי של התקציר כמקובל בפרסום מאמר מדעי.
לא נעשה כל פירסום של המחקר עדיין.
פרסום הדוח: אני ממליץ לפרסם את הדוח: (סמן אחת מהאופציות)
➤
➤ ללא הגבלה (בספריות ובאינטרנט)
➤
האם בכוונתך להגיש תוכנית המשך בתום תקופת המחקר הנוכחי? לא* -