

כימות המתאם בין השתנות מוליכות חשמלית של הגזע למנות ומועדי השקיה המיטביים

**Evaluating the relations between the variation of stem electrical conductivity and irrigation requirements of the trees**

מוגש לקרן מדען ראשי – יעול השמוש במים שפירים באזורים נטולי חלופה (300,000 ש"ח) ע"י

אריה נדלר, המחלקה לפיסיקה של הקרקע, מינהל המחקר חקלאי <vwnad@agri.gov.il>  
ערן רוח, המכון למדעי הצמח, מנהל המחקר, חוות גילת <eran@agri.gov.il>  
ניצן רוטמן - שה"מ- משרד החקלאות, מוטי פרס - שה"מ - משרד החקלאות, זמיר עשור - מו"פ צפון

**תוכן העינים**

2	תקציר
3	מבוא, רקע מדעי ומטרות המחקר לתקופת הדו"ח
3	מטרות המחקר
4	פירוט הניסויים שבוצעו והתוצאות שהתקבלו לתקופת הדו"ח
5	נתוח הממצאים והדיונים בהם
12	ביבליוגרפיה
13	סיכום עם שאלות מנחות

**תקציר**

בנוסף למחסור במים לחקלאות בכל הארץ הבעיה חמורה במיוחד באזורים דלי אוכלוסין שנעדרת מהם חלופה של קולחים מטוהרים. מצב כזה מחייב שמוש יעיל במיוחד במי ההשקיה תוך מזעור הפגיעה בעץ וביבול. הצעתנו נותנת תשובה על ידי אתור העתוי האופטימלי של ההשקיה על פי מדד צמחי. בהנחה שהשקיה 'אינטואיטיבית' או על פי מדדים עקיפים היא פחות מדויקת – אנחנו מעריכים שניעל את ההשקיה בלפחות 30% לעומת המצב הנוכחי, ומבלי לפגוע ביבול. העקרון המבסס את המחקר: המוליכות החשמלית של הגזע, פרמטר פשוט וזול למדידה, תלוי כמעט אך ורק ברטיבות הגזע, שכשלעצמה מיצגת נאמנה את מצב המים בצמח ודרגת עקת המים. עקרון העבודה הוא: על בסיס מילוני מדידות של מוליכות חשמלית ורטיבות שנאספו במשך 10 שנים בגזעים של 15 עצים שונים נבנה אלגוריתם שמנתח את המדידות במחזורים של 24 שעות ומקבל החלטה אם להשקות. מטרת המחקר היא לבחון את האלגוריתם על ידי כך שכל אחד משלושת הפרמטרים המרכזיים שלו יופעלו בנפרד בכל טפול, ובטפול הרביעי יופעל המדד המשולב. המטרות שהוגדרו לשנת המחקר השניה כללו התקנת מערך חישני IR, ובחינה ראשונית של המערכת. מאחר ובשנת המחקר הראשונה נמצא כי יש שונות רבה בין העצים, בשלב זה עדיין הופעל על העצים האלגוריתם המלא תוך שאנו בוחנים את רמת השונות והדיוק של המשתנים אותם אנו מודדים. המדידות כללו מעקב אחר נתוני טמפרטורת נוף, פוטנציאל מים, קצב גדילת הפרי, ואיפיון הפרי בזמן הקטיפ. התוצאות מורות על כך שנתוני ה IR רגישות מספיק לאתר את ההבדלים הצפויים בין הטפולים. מתן ההשקיה על פי מדד הגזע אפשר לקבל בעצי הניטור רמת יבול דומה או גבוהה מזו של עצי הביקורת וזאת למרות שמנת המים שקיבלו היתה נמוכה בכ- 30 אחוז. עקב השונות בחלקה בהמשך יש לעבוד על ארבע העצים המנוטרים כיחידת טיפול עצמאית בת ארבע חזרות.

הצהרת החוקר הראשי: הממצאים בדו"ח זה הינם תוצאות ניסויים. ניסויים מהווים המלצות לחקלאים: לא

תאריך: 10/5/12\_ חתימת החוקר 

## מבוא, רקע מדעי ומטרות המחקר לתקופת הדו"ח

עם העליה התלולה במחסור ובמחיר המים להשקית מטעים יש למצוא דרך ליעול השמוש במים. הצורך הזה מתחזק כיון שכיום רוב השיטות מבוססות על מדידות עקיפות: רטיבות קרקע (מחושי גבס, מפזר נאוטרונים, טנסיומטרים), דנדרומטרים (רגישות נמוכה, קשיים באינטרפרטציה של הממצאים), התנגדות פיוניות (יקר), צלומים טרמיים (IR), מושפעים אנושות מתרומת הקרקע שבין השורות, תלויים בשונות העננות, המדידה איננה רציפה, והמחיר גבוה) או פוטנציאל האופטרנספירציה כתלות בתנאים אקלימיים. קימות גם שיטות המקשרות בין פרמטרים צמחיים ורמת עקת המים ובין ממשק ההשקיה (טורגור עלים-עדין בשלבי פתוח, מדידות TDR בגזע (יקר מאד). אבל שיטות אלו (תא לחץ) ידניות, מסורבלות, דורשות מומחיות, או שאינן נתנות לאוטומציה.

אנחנו פתחנו שיטה לקביעת מועד אופטימלי לעתוי השקיה על סמך מדידות גזע פשוטות, זולות ומדויקות. לשיטה המוצעת יש פוטנציאל להיות מעשית/ישומית/כלכלית. אם נצליח נוכל לתת בידי החקלאי שיטה פשוטה להפעלה, רציפה, אמינה, אוטומטית, זולה, אוניברסאלית (שאינה דורשת כיוול). נכון לכתיבת שורות אלו ישנה בארץ חלקה מסחרית אחת בה ההשקיה מנוהלת על ידי הבקר והאלגוריתם הצמוד אליו. מדובר בחלקת אור על חושש הנמצאת בחידה אשר רמת היבולים בה נעה בין ארבע לשש וחצי טון, וזאת למרות שמנות המים המיושמות בא נמוכות בשלושים אחוז מאלו של הטיפולים המשקיים. למרות ההצלחה, אנו מודעים לכך שישנם פרקים באלגוריתם שעדיין ניתן לשפר, ואנו מקווים לעשות זאת על בסיס הפלטפורמה הנוכחית.

## מטרות המחקר

### המטרה כפולה ומשולבת:

א. בחינת תלות רכיבי הכלי למדידות המוליכות החשמלית בגזע הדרושות לאלגוריתם: שונות, רגישות, והקשר לממשק ההשקיה. ב. נתוח התוצאות:

מדידות ההולכה החשמלית של גזע העץ המתקבלות במהלך המדידה הרצופה תלויות ישירות וכמעט בלעדית ברטיבות הגזע (1, 2, 3) אבל הרטיבות עצמה איננה נמדדת ולכן יש צורך לפתח בטוי מתמטי (שנקרא אלגוריתם) שיודע לנתח את השינויים הנמדדים במוליכות החשמלית של הגזע בהתאם לפרמטרים שנבחרו על סמך עשרות מליוני מדידות דומות בלפחות עשרה מיני עצים שונים.



## פירוט הניסויים שבוצעו והתוצאות שהתקבלו לתקופת הדו"ח

השנה הנוכחית היא השנה השנייה למחקר. במהלך שנה זו הושלם שלב הקמת החלקה (התקנת חישני IR), נעשתה הרצה של האלגוריתם כאשר מועדי ההשקיה בחלקה נקבעו על בסיס ניתוח האלגוריתם את נתוני הגזע, כאשר בסוף העונה נקטף ואופיין הפרי תוך בחינת רמת השונות בין העצים (נתון בסיס שישמש בהמשך לדיגום נכון יותר של החלקה). כביקורת בלתי תלויה למדד רטיבות הגזע נערכו על העצים מדידות תא לחץ ונאספו נתוני טמפרטורת הנוף של העצים.

### 1. השלמת תהליך הקמת החלקה-הוספת חישני אינפרא רד

במהלך השנה השנייה מתקנו בחלקה חישני אינפרא רד מעל עצי המדידה אשר נועדו לשמש ביקורת בלתי תלויה למצב משק המים של העצים. החישנים מותקנו על תרנים ומוקמו כמטר מעל לגובה צמרת העצים. בנוסף הותקנו בשטח שלושה חישנים נוספים על פי הפרוט הבא: א. חישן מעל עץ אשר הושקע ב- 50% יותר מאשר עצי המדידה (ביקורת המושקה בעודף). ב, חישן המודד טמפרטורה של בד רטוב המנדף מים לאוויר ללא מגבלות (ראה תמונה); האמבט הוצב בגובה נוף העצים), ג, חישן המודד את טמפרטורת העלווה הנמצאת בתוך הנוף -בצל.



### 2. הפעלת האלגוריתם לבקרת ההשקיה במטע

במהלך השנה נעשה מעקב רציף אחר נתוני רטיבות הגזע ונתוני ההולכה החשמלית של הגזע (לכל עץ מארבעת עצי הליזימטר בנפרד). על נתוני ההולכה החשמלית של הגזע הופעל האלגוריתם באופן מלא ותוצאות הניתוח שמשו לבקרת ההשקיה של העץ הנמדד והשורות המלוות אותם (כל עץ מעצי הליזימטר לווה בשורת עצים אשר הושקתה על פי). כביקורת שמשו עצים משורות מקבילות אשר הושקו על פי המקובל באזור. על מנת ללמוד לעומק את רמת השונות הקיימת בחלקה וההשלכות של הדבר לגבי כמות העצים אותם יש לדגום על מנת לאפיין את ביצועי המטע. עונת ההשקיה לוותה במעקב אחרי פוטנציאל המים של הגזע (מדידות שנעשו על בסיס שבועי בשעה שש בבוקר, תוך מעקב רציף אחר טמפרטורת נוף העצים. בסוף העונה העצים נקטפו ויבולם אופיין.

**נתוחי ממצאים והדיונים בהם:**

**השקיה**

מהלך העונה (החל מ 13 לחודש מאי 2011, ועד הפסקת עונת ההשקיה, 11 בנובמבר 2011) העצים הושקו על בסיס האלגוריתם המלא וללא התערבותנו. כמויות המים שישומו עמדו על 710, 788, 793, ו- 832 קוב לדונם לעצים שלוו על ידי עץ ניטור מספר 1, 2, 3, ו-4 בהתאמה (הכמות המקובלת באזור עומדת על 1200 קוב). במהלך תחילת נובמבר ירדו בחלקה 33 מ"מ של גשם כאשר ההשקיה האחרונה ניתנה ב- 11 לנובמבר.

**נתוני ההשקיה היומית בחלקה במהלך שנת 2011. הנתונים הינם ביחידות של קוב לדונם ליום.**

ממוצע - יוני	4.0	4.4	4.9	4.9
ממוצע - יולי	3.8	4.1	4.1	5.1
ממוצע - אוגוסט	4.6	5.0	5.0	5.0
ממוצע - ספטמבר	4.8	5.5	4.9	4.9
ממוצע - אוקטובר	3.7	5.0	4.4	4.4
ממוצע - נובמבר*	2.1	1.5	2.1	3.0

\*נתוני נובמבר הינם עבור הימים 1 עד 11 לחודש

**נתוני IR**

במהלך השנה נאספו נתוני IR מארבעת העצים שבליזימטר, מעץ המושקה בעודף (50% מעל הטיפול המשקי), מבד רטוב הממוקם בגובה הנוף, ומפנים חופת הנוף של העץ. נתוני הבד הרטוב היו אמורים לשמש לצרכי חישוב של ה- Crop water stress index של העצים הנמדדים מאחר ואמורים לשקף את ערך הטמפרטורה הכי נמוך אליו יכולים לשאוף העצים. בפועל נמצא כי במהלך החורף, נתוני הטמפרטורה של הבד היו גבוהים מאלו של העצים ורק לאחר יום התהפכו פני הדברים.

**טמפרטורה נמדדת של עצי הליזימטר והעץ המושקה בעודף (150%) ביחס לטמפרטורת הבד הרטוב (ממוצע יומי וסטיית תקן)**

עץ 1	עץ 2	עץ 3	עץ 4	עץ המושקה 150%	
0.916±0.10	0.923±0.010	0.899±0.11	0.932±0.010	0.886±0.013	ימים 152 עד 186 של השנה
1.093±0.017	1.096±0.018	1.077±0.18	1.099±0.017	1.064±0.18	ימים 187 עד 234 של שנה

היות והמטרה היתה לראות עד כמה מצב המים של העצים היה במיטבו, כל הנתונים של ארבעת עצי המדידה הושווה לנתוני העץ שהושקע בעודף (150%). ניתוח שכזה אפשר יחוס יותר מדויק של הנתונים כאשר הערך שנתקבל מייחוס שכזה תאם את המצופה.

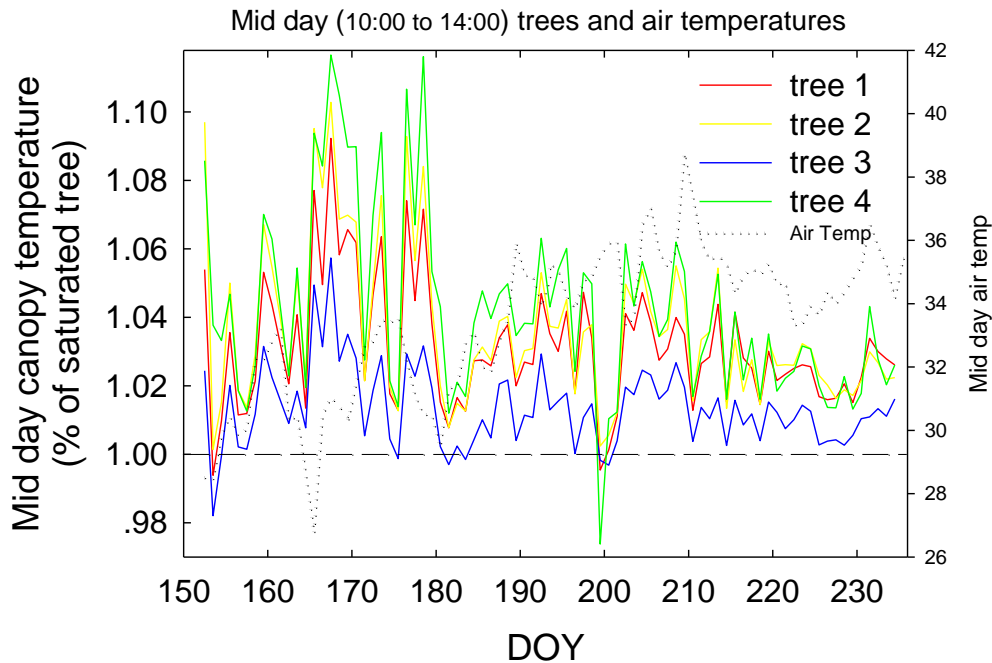
**טמפרטורה נמדדת של עצי הליזימטר ביחס לעץ המושקה בעודף (150%); הערכים הינם ממוצע יומי וסטיית תקן)**

עץ 4	עץ 3	עץ 2	עץ 1	ימים 152 עד 234
1.047±0.003	1.015±0.001	1.039±0.002	1.033±0.002	

לצורך המדידה, ההשוואה נעשתה לערכים הנמדדים בצהרי היום, בין השעות עשר בבוקר לשתיים בצהריים. ניתן לראות כי לאורך השנה (מלבד שתי חריגות) העצים מהליזימטרים היו חמים מהעץ שקיבל מנת השקיה המוגברת (150%). עץ 3 היה חם מעץ הרוייה ב- 1.5 אחוז ואלו עץ 4 ב- 3% (כלומר, לאורך העונה מצב המים בעץ 3 היה הטוב ביותר ואילו של עץ 4 הגרוע ביותר. חשוב לציין כי עריכת יחוס שכזה הינה הרבה יותר מדייקת מהשימוש שנעשה בבד רטוב מאחר שנתוני העץ המושקה ברוייה הרבה יותר רלוונטיים ליחוס (בד רטוב אינו מכיל פיוניות, צבעו שונה מזה של עץ בשטח ולכן אינו יכול ליצג את הטמפרטורה המינימאלית אליה יכול להגיע עץ הנמצא בתנאי מיום מיטביים).

היתרון הגדול של מדידת האנפרא רד נובע מעצם העובדה שהיא איננה תלויה או מושפעת מגורם אנושי, ונעשית באופן אוטומטי, ובתדירות גבוהה של אחת לעשר דקות.

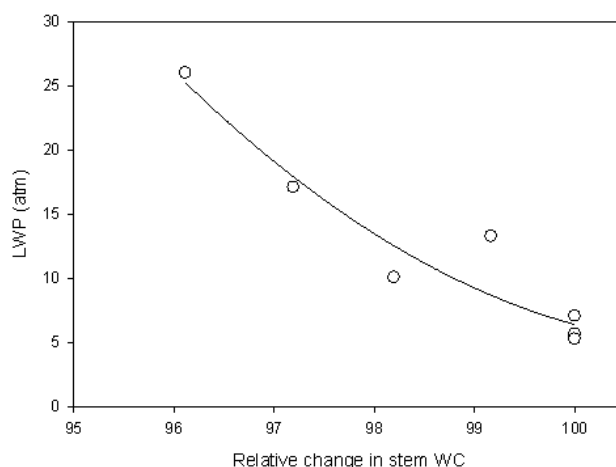
**טמפרטורה נמדדת של עצי הליזימטר ביחס לעץ המושקה בעודף (150%) וטמפרטורת האוויר במהלך ימי המדידה. הערכים הינם ממוצע של הנתונים שנאספו בכל יום מימי המדידה במהלך שעות הצהריים (בין עשר לשתיים).**



## נתוני תא לחץ

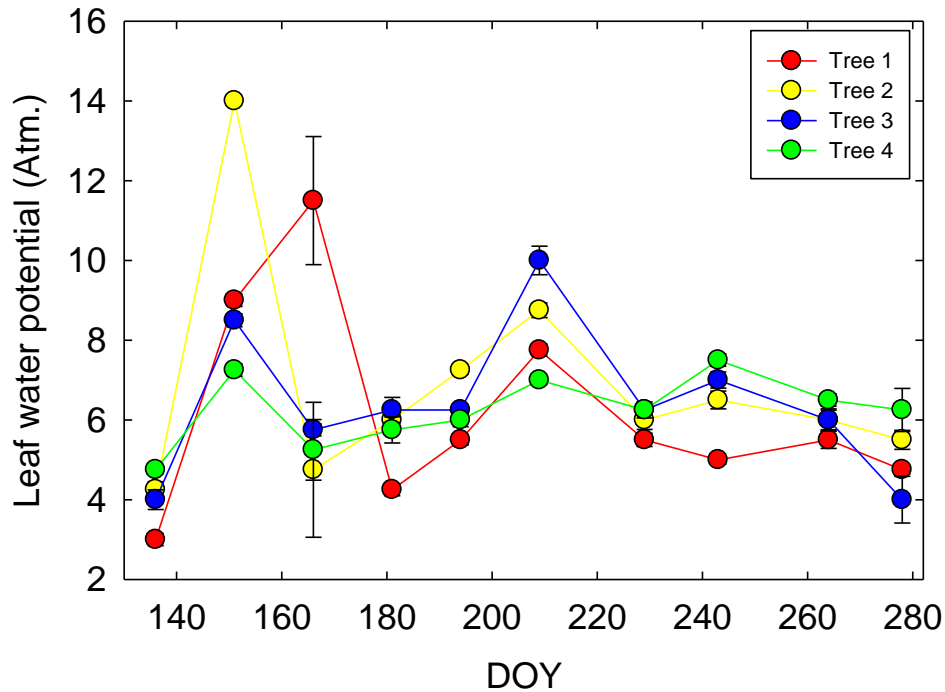
נתוני תא הלחץ נמדדו אחת לשבועיים בשש בבוקר, שעה בו מצב המים בעץ נמצא סביב ערכו המיטבי בהתייחסות לתנאי הסביבה (ערכים מינמאליים). לכל עץ נמדדו 6 עלים. בדומה לחלקות המחקר האחרות, גם בדפנה נמצא מתאם בין ערכי פוטנציאל המים של הגזע וערכי רטיבות הגזע. הדבר חיזק את חשיבות ליווי המחקר במדידות תא לחץ. יחד עם זאת על ציר הזמן, במהלך העונה חלה ירידה במידת המתאם (נתונים אינם מובאים), ויתכן והדבר קשור בדיוק המדידה של נתוני תא הלחץ (נושא הנדון בהמשך)

**הקשר בין רטיבות הגזע (מדודה על ידי TDR) ופוטנציאל המים של עלה (כפי שנמדד על ידי תא לחץ) הנמצא בשיווי משקל עם הגזע כפי שנמדד בחלקת המחקר בדפנה).**



מהסתכלות על הערכים שנמדדו לאורך השנה ניתן לראות כי בחלק ניכר מהימים מצב המים בעץ מס 1 היה הטוב ביותר (ערך פוטנציאל מים ממוצע של 5.5 אטמוספרות עבור ימים 180-280 כאשר בשאר העצים הערך הממוצע בתקופה הנ"ל עמד על 6.5 אטמוספרות). כמו כן בחלק ניכר מהימים היה הבדל מובהק בין כל אחד מארבעת העצים. נתונים אלו נמצאים בסתירה לנתוני הטמפרטורה שעל פיהם מצב המים הטוב ביותר נמדדו עבור עץ מספר 3. ברור שבניגוד למדידת האינפרא רד, מדידת תא הלחץ מגלמת בתוכה השפעות רבות של הגורם האנושי (החל מהעלים אותם אנו בוחרים לצורך ביצוע המדידה, דרך קצב העלאת הלחץ בתא המדידה ועד השלב בו מחליט המודד כי המים מתחילים לצאת מהפטוטרת, וזמן התגובה שלו). לפיכך באם עלינו להחליט מי מהנתונים מיצגים נאמנה יותר את אשר מתרחש בעצים, מדד האינפרא רד המגלם בתוכו פחות השפעות אנוש, וממצע תדירות גבוהה של מדידות, ולכן יחשב כהרבה יותר מהימן.

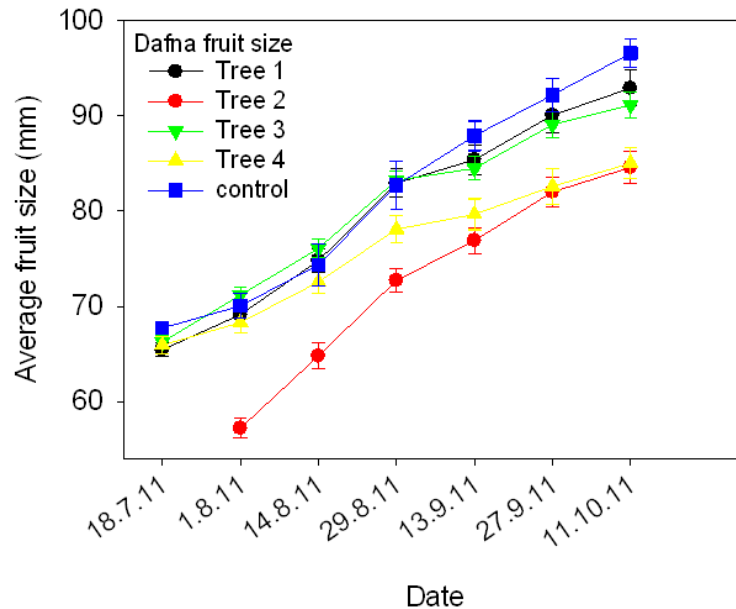
מידות תא הלחץ של עצי הליזימטר לאורך עונת הגידול. כל נקודה מייצגת ערך ממוצע וסטיית תקן של שישה עלים.



#### התפתחות הפרי והיבולים

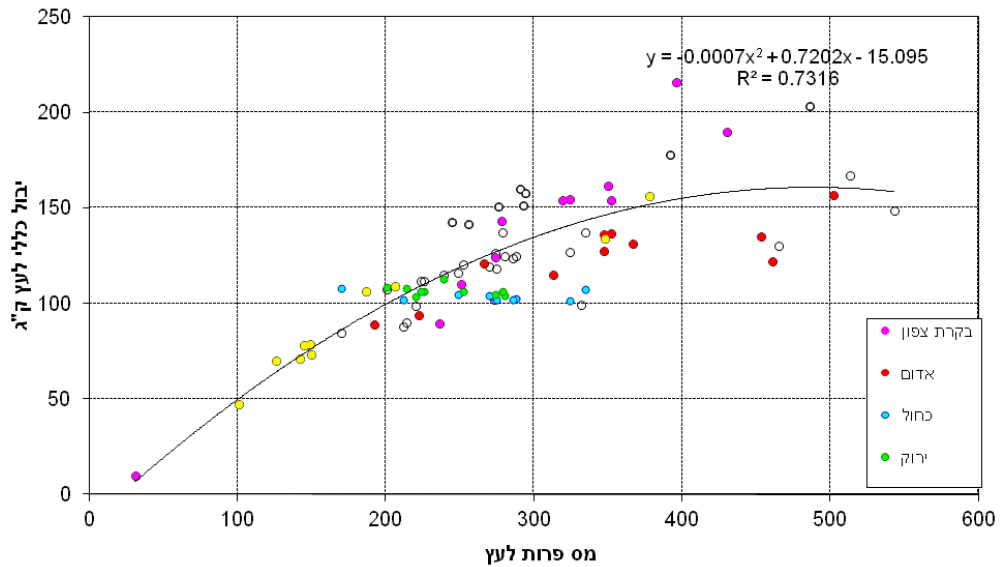
לאורך העונה נעשה מעקב אחר קצב גדילת הפרי בחלקה. המדידות נעשו לעצי הליזימטר ולפירות מהחלקה המקבלת השקיה משקית (טיפול ביקורת). הפירות שעץ 2 ו-4 הגיעו לגודל הסופי הקטן ביותר ביחס לפרי מעצים 1, 3, ופירות עצי הביקורת המשקית. מבחינת קצב גידול הפרי (שיפוע הקווים שבין הנקודות המרכיבות את הגרף) עולה שקצב גדילת הפרי היה האיטי ביותר בעץ 4. הדבר תואם את נתוני הטמפרטורה שהראו כי היה החם ביותר מבין ארבעת עצי הליזימטר.

נתוני קצב גדילת הפירות בעצי הליזימטר אל מול נתונים מפירות של הטיפול המשקי. הערכים הינם ממוצע וסטיית תקן.

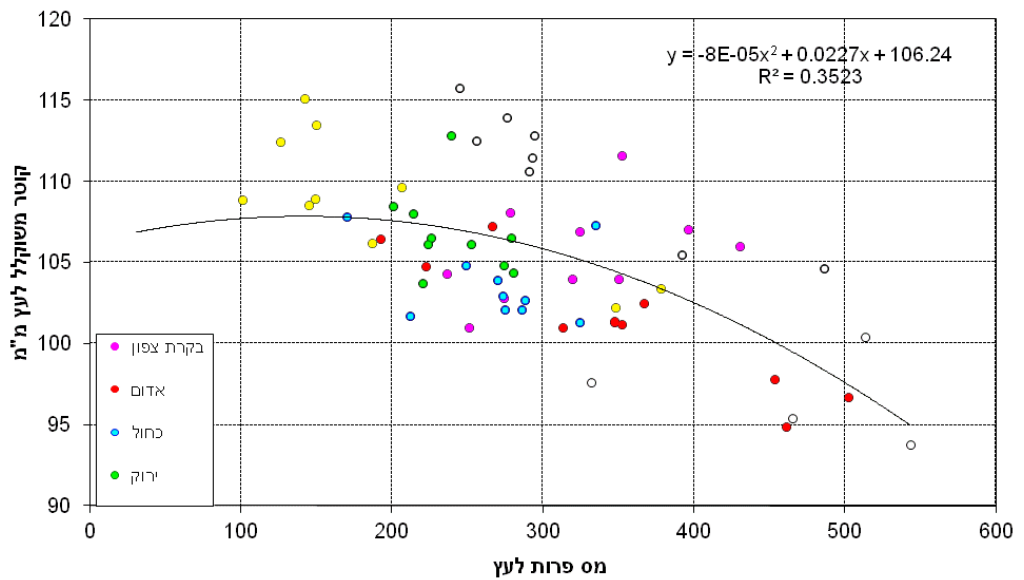


במהלך הקטיפים (היו שני מועדי קטיפה) נאספו נתונים לגבי כמות היבול, קוטר הפרי והתפלגות קוטר הפרי. באופן כללי היה קשר ישיר בחלקה בין מספר הפירות לעץ והיבול הכללי לעץ. כמו כן היה קשר חיובי בין מספר הפירות לעץ וקוטר הפרי (אך המתאם היה חלש יותר מזה הקיים בין היבול למספר הפירות)

### הקשר בין מספר הפירות ליבול הכללי לעץ



### הקשר בין מספר הפירות לקוטר הפירות בעץ

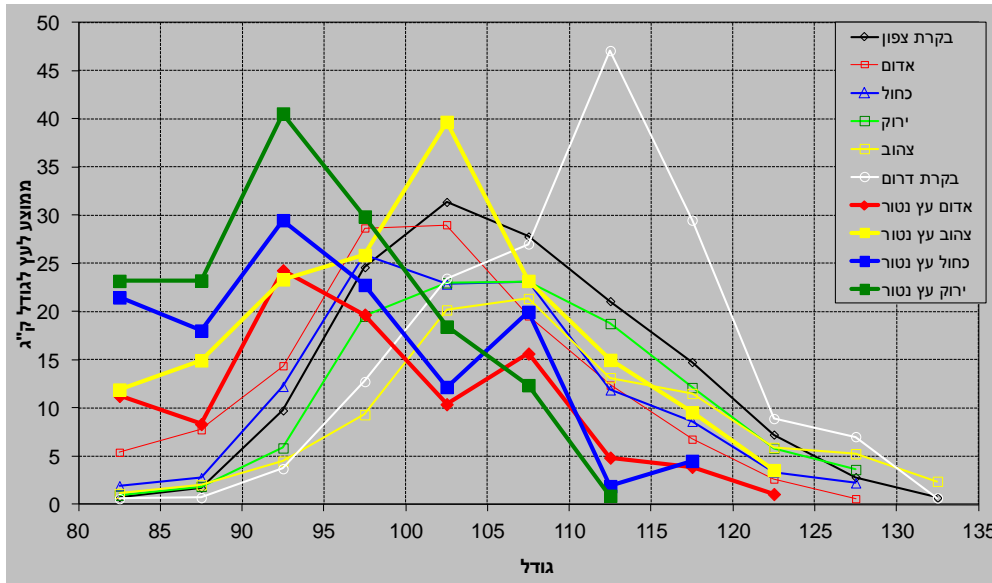


למרות כל המתאמים היפים הללו היה חוסר קשר זועק בין הנתונים שנמדדו מעצי המדידה (עצי הניטור) לבין אלו שנתקבלו מהעצים המלווים אותם. עצי הניטור התאפיינו בפרי. לדוגמה התפלגות היבול של עץ הניטור הצהוב (קו



צהוב עבה המלווה בריבועים צהובים מלאים) הראהשכלל היבול (השטח מתחת לקו) ונקודת השיא של היבול לא תאמו את אלו שנמדדו עבור השורה המלווה (קו צהוב דק המלווה בריבועים צהובים ריקים). כמו כן התפלגות הפירות מהביקורת הדרומית היתה שונה מזו של הפרי הביקורת הצפונית (קווים לבן ושחור בהתאמה).

**גרף הקשר בין גודל הפרי ומשקל הפרי שנתקבל מאותו גודל בעצי הניטור, העצים המלווים של עצי הניטור ועצי הביקורת הצפונית והדרומית**



חוסר המתאם בין עצי הניטור לעצים המלווים אותם בלט גם בחישובי היבול הממוצע. עצי הניטור 2, 3, ו-4 היו בעלי רמת יבול הדומה או גבוהה מזו של עצי הביקורת הצפונית והדרומית כאשר רמת היבולים של השורות שליוו את אותם עצי ניטור היו נמוכות מאלו של עצי הביקורת. רמת היבול של עץ ניטור מספר 1 שהיתה הנמוכה ביותר לזותה בעצים של השורה המלווה שהתאפיינו ביבול הגבוה ביותר מבין כל החלקות המלוות את עצי הניטור.

**השוואת יבול ממוצע לעץ (ק"ג לעץ) עבור עצי הביקורת, עצי הניטור והשורות הנלוות לעצי הניטור (אותיות שונות עבור ערכים מאותה עמודה מציינות שוני מובהק בין הערכים).**

טיפול	עצי הניטור	עצים מלווים וביקורת
Control North		136.9 ab
Control south		160.7 a
Red 1	99.5	124.0 b
Yellow 2	167.14	92.4 c
Blue 3	130.4	114.0 bc
Green 4	148.6	114.3 bc

גם נושא גודל הפרי היה בעייתי. הפרי בעצי הניטור תמיד היה נמוך מגודל הפרי שנמדד בשורה שליוותה את אותו עץ ניטור. בנוסף היה הבדל מובהק בגודל הפרי של שתי קבוצות הביקורת. גם נתוני משקל הפרי של עצי הניטור

היו שונים משל אלו של השורות המלוות אותם, ושוב היה שוני מובהק בין הערכים שנמדדו בשתי קבוצות הביקורת.

**השוואת גודל פרי ממוצע (מ"מ) עבור עצי הביקורת, עצי הניטור והשורות הנלוות לעצי הניטור (אותיות שונות עבור ערכים מאותה עמודה מציינות שוני מובהק בין הערכים).**

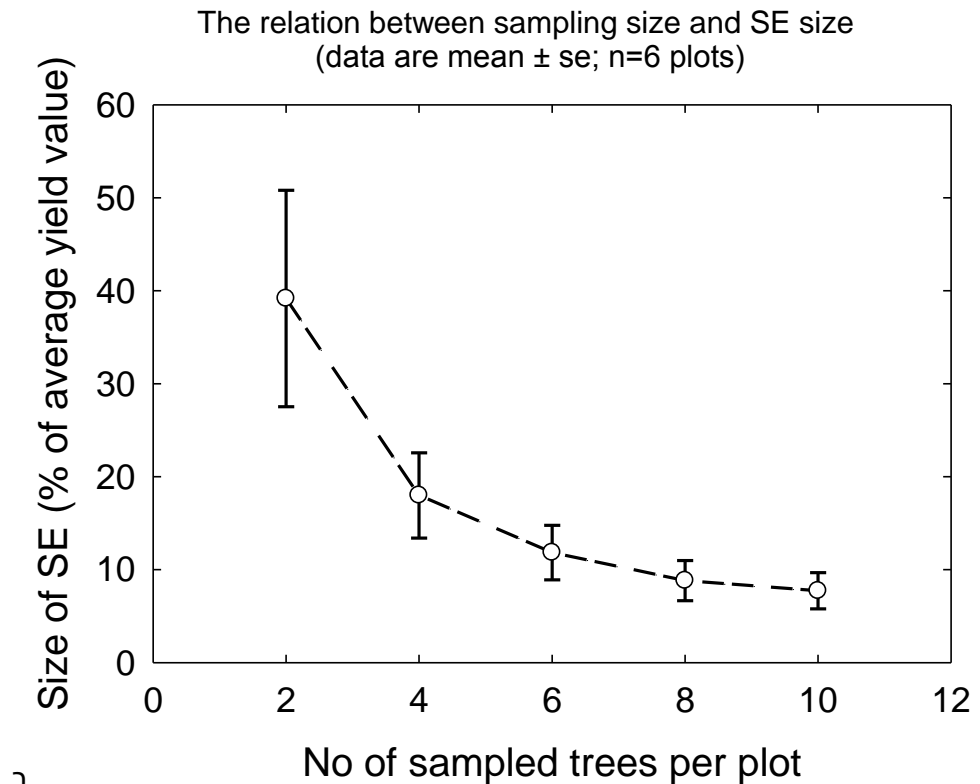
טיפול	עצי הניטור	עצים מלווים וביקורת
Control North		105.0 c
Control south		110.9 a
Red 1	97.6	101.4 d
Yellow 2	100.4	108.9 ab
Blue 3	95.4	103.7 cd
Green 4	93.8	106.8 bc

**השוואת משקל פרי ממוצע (גרם) עבור עצי הביקורת, עצי הניטור והשורות הנלוות לעצי הניטור (אותיות שונות עבור ערכים מאותה עמודה מציינות שוני מובהק בין הערכים).**

טיפול	עצי הניטור	עצים מלווים וביקורת
Control North		450 b
Control south		520 a
Red 1	300	372 c
Yellow 2	326	497 a
Blue 3	280	429 b
Green 4	274	475 ab

לאור הממצאים הללו בחנו את רמת השונות של החלקה. בפועל בחנו את גודל השונות של המדגם (מחושב כאחוז מהערך הממוצע של המדגם) כתלות במספר העצים ששמשו לחישוב השונות (בין 2 ל- 10 עצים). החישוב נעשה עבור 6 חלקות בלתי תלויות (שתי חלקות הביקורת וארבעת החלקות המלוות את עצי הליזימטרים), כאשר בגרף מובאים נתוני הממוצע וסטיית התקן של ששת החלקות המדוברות. ניתן לראות שכאשר מדובר במדגם של 6 חלקות, יש למדוד לפחות 6 עצים או יותר על מנת לקבל ערך שונות של כ-12 אחוז ומטה. כמו כן ניתן לראות שערך השונות המינימאלי נע סביב ה- 8 אחוז.

הקשר בין רמת שונות המדגם לכמות העצים ליחידת מדגם בעצים. רמת השונות מבוטאת כאחוז מהערך הממוצע. הערכים הינם ממוצע וסטיית תקן של 6 חלקות. כמות העצים ששימשו לחישוב מכל חלקה נע בין 2 ל- 10 על פי המצוין בציר ה-X.



ב

## ביבליוגרפיה

1. Arie Nadler. 2006. Stress induced water content variations in mango stem by Time Domain Reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 510-520.
2. Arie Nadler and Melvin T. Tyree. 2008. Substituting Stem's water content by electrical conductivity for monitoring water status changes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72: 1006-1013.
3. Arie Nadler, Raveh E., Yermiyahoo U., Lado M., Nasser A., Barak M., and Green S. 2008. Detecting water stress in trees using stem electrical conductivity measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 510-520.

