

פיתוח מערכת חישה מרחוק המבוססת על צילום תרמי לניטור מצב

המים בעצי תמר להכוונת השקיה ולזיהוי עקות

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות ופיתוח הכפר

על-ידי

ויקטור אלחנטי, יפית כהן, המכון להנדסה חקלאית, מנהל המחקר החקלאי

יובל כהן, המכון למדעי הצמח, מנהל המחקר החקלאי

ויקטוריה סורוקר, המכון להגנת הצומח, מנהל המחקר החקלאי

שבתאי כהן, המכון לקרקע, מים וסביבה, מנהל המחקר החקלאי

אפרים טריפלר, הפקולטה לחקלאות ברחובות, האוני' העברית בירושלים

בשיתוף: עדי פריגוז'ין, אשר לוי, רומן בריקמן, קלרה שנדריי, יוסי קשתי ואוהליאב קיסר

המכון להנדסה חקלאית, מנהל המחקר החקלאי

אור שפירא, אבנר גולן, מו"פ צפון

Final Report for Research Project # 458-0476-11

Detection of palm trees water status using thermal remote sensing for irrigation management and stress detection

Submitted to the Chief Scientist of the Ministry of Agriculture and Rural Development

By

Victor Alchanatis, Yafit Cohen, Agricultural Engineering Institute, ARO, Volcani Center

Yuval Cohen, Plant Science Institute, ARO, Volcani Center

Victoria Soroker, Plant Protection Institute, ARO, Volcani Center

Shabtai Cohen, Soil, water and Environmental Sciences Institute, ARO, Volcani Center

Ephraim Tripler, Faculty of Agriculture, Rehovot, The Hebrew University of Jerusalem

with: **Adi Prigojin, Asher Levi, Roman Brikman, Calra Shendrey, Yossi Kashti. Oholiav**

Keisar, Agricultural Engineering Institute, ARO, Volcani Center

Or Shapira, Avner Golan, North R&D

הממצאים בד"ר זה הינם תוצאות ניסויים.

הניסויים לא מהווים המלצות לחקלאים.

חתימת החוקר

א. תקציר

מטרת המחקר הכללית היתה ליצור את הבסיס המדעי והטכנולוגי של מערכת חישה מרחוק תרמית לניטור מוקדם של מצב וצריכת המים בעצי תמר להכוונת השקיה וזיהוי עקות. למימוש המטרה הוצבו ניסויי השקיה בשלושה אזורים מעליהם בוצעו צילומים קרקעיים ו/או צילומים מוטסים. על בסיס הניסויים הללו נבחנה היכולת של הצילומים התרמיים לזהות מצבי מים בהשוואה למוליכות פיוניות, פוטנציאל מים בסנסן ופעילות פוטוסינטטית. בחלק מן הניסויים בוצעו הצילומים הקרקעיים והמדידות הפיזיולוגיות בשעות שונות ביום על מנת לקבוע את הזמן המיטבי לצילום. תוצאות המחקר מלמדות כי למדדים תרמיים יכולת להבחין בין מצבי מים שונים ברמה דומה למדדים הפיזיולוגיים וכן הם מגלים קשר טוב עם מדדים אלו. מתוצאות הניסוי בצמח נראה כי לשעת הצילום יש השפעה על כושר ההבחנה בין מצבי מים ולקשר עם מדדים פיזיולוגיים אך יש לבצע ניסויים נוספים באזורים אחרים על מנת לוודא כי זו לא תוצאה מקומית הקשורה בתנאים המטאורולוגיים באזור. במסגרת המחקר פותח הליך לניתוח אוטומטי של צילומים מוטסים להערכת ולמיפוי מצב מים בתמרים. כעיקרון, ניתן ליישם את ההליך על כל צילום תרמי מעל חלקות תמרים אך כדאי לנסות אותו עם צילומים מוטסים נוספים וגם מעל זנים שונים ולבחון את הדיוק שלו לפני יישום מסחרי. התוצאות הראשוניות מיטבתה מעידות על היכולת להבחין בין עצים המושקים (לאורך שנים) ברמות מליחות שונות באמצעות צילומים תרמיים ויש להעמיק בנושא במחקר נוסף. במסגרת שנות המחקר לא הספקנו לממש את מטרה ג' - זיהוי של פגיעה המדמה פגיעה של חדקונית הדקל אך יש לציין כי בימים אלו מתנהל מחקר בנושא והתוצאות הראשוניות מעודדות.

ב. מבוא

ענף התמר הינו מענפי המטע החשובים בישראל. זהו ענף רווחי ביותר, המהווה אחד מענפי החקלאות העיקריים מהכנסת לאורך כל בקעת הירדן והערבה ועד אילת. עץ התמר מסוגל באופן יחסי לעמוד בתנאי יובש אך דורש השקיה רבה לקבלת יבול איכותי רב. בתנאי הערבה בקיץ תצרוכת המים של עץ בודד יכולה לעלות על 1000 ליטר מים ליום. מחסור במים, אפילו לתקופה קצרה יכולה להביא לנזק ניכר ביבול. בשיטות ההשקיה הנהוגות היום במטעי התמרים, המים מסופקים בצורה אחידה לכל החלקה, ללא התחשבות בשונות הצריכה בין השורות והעצים במטע או בתנאי המיקרו-אקלים, דבר המוריד את יעילות השימוש במים להשקיה ובמקרים רבים גורם לבזבז מים. שיטת ההשקיה המקובלת כיום היא לפי מדדי התאדות מגיגית בפקטור משתנה שבין 0.9 לבין 0.7 (יש גם משקים המשקים בפחות). שיטה זו אינה מוכחת או מהימנה. שיטות ההשקיה הבחונות בפועל את מצב המים בצמח, כגון פוטנציאל מים בעלה או בגזע, מדידת היקף גזע, sap-flow בהן משתמשים לגידולים חקלאיים אחרים הוכחו כזולים, יעילים ואמינים. אולם, גם בשיטות אלו לא נלקחת בחשבון השונות הקיימת במטע או בשדה. לפיכך ניתן לשער כי פעמים רבות העצים שנבחרו למדידה אינם מאפיינים בצורה ראויה את מצב המטע או השדה כולו. בנוסף, חלק משיטות אלו אינן ישימות בגידולי תמרים עקב גובהו הרב של העץ ועקב גודל עליו. גם היותו של התמר עץ חד פסיגי מוסיף נדבך נוסף של מורכבות.

לייצוג השונות במטע שלושה יתרונות: 1. הערכת המצב במטע כולו בצורה אמינה ומדויקת יותר ובכך ניתן לקבל החלטות לכמויות ולעיתוי השקיה מתאימות יותר; 2. איתור אזורים חריגים הדורשים טיפול מיוחד- כמו זיהוי תקלות השקיה ופגיעה של מזיקים ומחלות; 3. יכולת לחלק את המטע לאזורי ממשק השקיה שונים אשר בעתיד יוכלו לקבל טיפול שונה באמצעות טכנולוגיות השקיה מתקדמות.

חישה מרחוק מהווה אמצעי למיפוי מצב הצמח בשטחים חקלאיים נרחבים. השיטה העיקרית לחישה מרחוק של מצב המים מתבצעת באמצעות החלק התרמי של הספקטרום. טמפרטורת העלה מהווה,

בעקיפין, אינדיקציה על מצב המים בצמח. בעת עקת מים הפיוניות נסגרות וכתוצאה מכך, טמפרטורת העלה עולה. באמצעות צילום תרמי ניתן לאמוד את טמפרטורת הנוף במרחב מטעים ושדות של גידולים שונים, במדויק ובזמן קצר במרחב גדול וברזולוציה מרחבית גבוהה. לטמפרטורת הנוף מיתאם טוב עם פוטנציאל המים בעלה ועם מצב המים בצמח.

יתרון נוסף לכלי החישה מרחוק ומיפוי צילומים תרמיים קשור במיפוי התפרושת המרחבית של מצב המים בשדה. כך ניתן לזהות אזורים ועצים חריגים המצריכים משטר השקיה שונה מזה של יתר חלקי המטע ולטפל בהם על-פי גישה המכונה "חקלאות מדייקת". התאמת משטר ההשקיה באופן ייחודי לכל אזור ולכל עץ עשויה לייעל במידה רבה את אחידות הגידול וכמות היבול מחד, ולמניעת עקות מים מאידך. יישום ממשק של השקיה מדייקת המותאמת לכל אזור או עץ תלוי בין השאר ביכולת למפות את מצב המים במטע בצורה מדויקת, בעלות נמוכה, וביכולת העדכון לפי הצורך.

מטרת המחקר הכללית היא ליצור את הבסיס המדעי והטכנולוגי של מערכת חישה מרחוק תרמית לניטור מוקדם של מצב וצריכת המים בעצי תמר להכוונת השקיה וזיהוי עקות. ממנה נגזרו שלוש מטרות משנה:

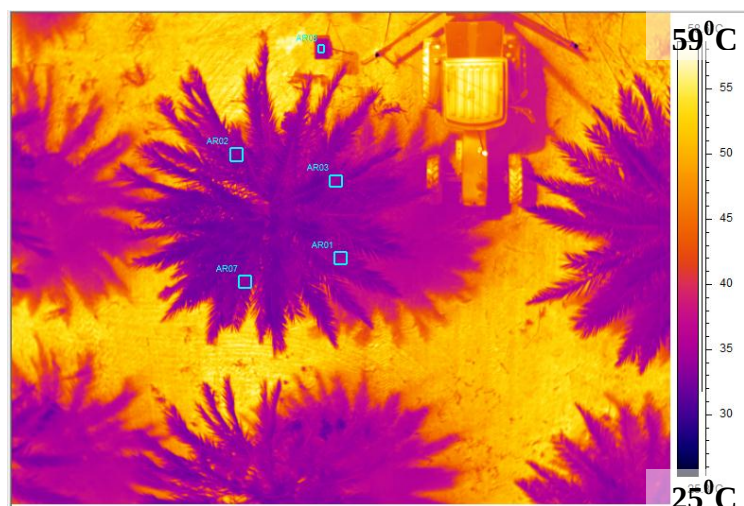
1. לימוד ההשפעה של מצב וצריכת המים של העץ על טמפרטורת הנוף.
2. פיתוח מודל להערכת מצב וצריכת המים בעץ על סמך צילום תרמי של הנוף.
3. לימוד השפעת פגיעה בגזע על צריכת המים בעץ וטמפרטורת הנוף.

ג. שיטות

בשלוש שנות המחקר בוצעו צילומים תרמיים קרקעיים ומוטסים מעל ניסויים מבוקרים מהם נלמדה ההשפעה של מצב המים של עץ התמר על טמפרטורת הנוף. סיכום הניסויים והצילומים מובא בטבלה 1.

חילוץ טמפרטורות מתוך הצילומים התרמיים

צילומים קרקעיים: צילומים קרקעיים בוצעו מגובה של 2-7 מ' מעל נוף העצים. במרחב התמונה הונח משטח ייחוס למדידה של טמפרטורות מינימום (Twet) [1] ובסמוך לחלקת הניסוי הועמדה תחנה מטאורולוגית למדידה של טמפרטורת אוויר, קרינה, לחות יחסית ומהירות רוח. חילוץ הטמפרטורות מהתמונות התרמיות נעשה על ידי שימוש בכלי AR של תוכנת ThermaCAMResearcher (FLIR, Ltd.). עבור כל תמונה נבחרו ארבעה פוליגונים מנוף העץ תוך הקפדה על בחירת פיקסלים של עלים מוארים, הנמצאים בדרגת ביניים בצמיחת העץ, ללא עירוב של פיקסלים מהקרקע (איור 1). לשם כך, בחירת הפוליגונים נעשתה תוך הסתכלות מקבילה בתמונות ה-RGB. עבור משטח הייחוס נבחר פוליגון אחד (איור 1). לכל תמונה תרמית הוזנו הלחות היחסית וטמפרטורת האויר על פי אותו זמן של צילום התמונה וכן המרחק של המצלמה מהעצים על מנת לחלץ טמפרטורה מכוילת. הנתונים הוכנסו לבסיס נתונים (Excel) לניתוחים סטטיסטיים.



איור 1: צילום תרמי קרקעי של עץ תמר בצמח (ניסוי 6) וסימון 4 פוליגונים של נוף העץ ופוליגון אחד של משטח הייחוס להפקת טמפרטורות. טמפרטורות מינימום ומקסימום: 25 ו-59 מעלות בהתאמה.

טבלה 1: סיכום הניסויים והצילומים בשלוש שנות המחקר

מס'	מיקום	תאריך	תיאור כללי של הניסוי	סוג הצילום	מצלמה	מדידות פיזיולוגיות
1	בקעת המלח	9.4.08*	3 חלקות מסחריות בקלייה, אלמוג ובית הערבה בהן הוצבו שני טיפולים : השקיה רגילה - 100% והשקיה בחוסר - 20% במשך חודשי החורף	מוטס	FLIR, SC2000 240X320 ^{a,b}	
2א	צמח	5.8.09	5 עצים - 100% השקיה	קרקעי, מהלך יומי כל שעה 10-16		מוליכות פיוניות ^{d,f,**} , פוטנציאל מים בסנסן, פעילות פוטוסינטטית ^d
2ב	צמח	16.8.09	5 עצים בהצמאה של יומיים ושל שבועיים לפני התאריכים הראשון והשני של הצילומים בהתאמה			
3	יטבתה	22-26.11.09	20 לזימטרים, רמות מליחות ובורון שונות. מהיום השני צולמו 4 לזימטרים בעלי רמות המליחות הנמוכות ביותר תחת שני טיפולים : הפסקת השקיה ב-2 לזימטרים והשקיה רגילה ב-2 האחרים.	קרקעי, מהלך יומי כל שעה 7-17		מוליכות פיוניות ^d
4	יטבתה	25-28.4.10	צולמו 4 לזימטרים בעלי רמות המליחות הנמוכות ביותר תחת שני טיפולים : הפסקת השקיה ב-2 לזימטרים והשקיה רגילה ב-2 האחרים.	קרקעי, מהלך יומי כל שעותיים 12-16		לא נמדדו מדדי צמח בגלל בעיות טכניות
5	צמח	5.9.10	6 טיפולי השקיה : 0,20,40,60,80 ו-100% מהשקיה מסחרית, 6 עצים לטיפול. התחלת השקיה לפי טיפולים : 17.5.10	קרקעי, בוקר, צהריים ואחה"צ		מוליכות פיוניות ^d ופעילות פוטוסינטטית ^d - צהריים
6	צמח	13.9.11†	6 טיפולי השקיה : 0,20,40,60,80 ו-100% מהשקיה מסחרית, 6 עצים לטיפול. התחלת השקיה לפי טיפולים : 17.5.10	קרקעי - צהריים	FLIR, SC655 480X640 ^{a,b}	מוליכות פיוניות ^e
7	צמח	22.9.11†	6 טיפולי השקיה לפי טיפולים : 0,20,40,60,80 ו-100% מהשקיה מסחרית, 6 עצים לטיפול. התחלת השקיה לפי טיפולים : 17.5.10	מוטס	FLIR, SC655 480X640 ^{a,c}	מוליכות פיוניות ^e , פוטנציאל מים בסנסן

* הצילום בוצע לפני התחלת המחקר אך סיום הניתוח בוצע במהלך השנה הראשונה של המחקר; † מדידת מוליכות פיוניות ופוטנציאל מים ב-21.9.11; a - טווח ספקטראלי: 7.5-14µm, דיוק: 2°C, FOV: 45°; b - רגישות: 0.1°C; c - רגישות: 0.05°C; d - באמצעות Licor-6400; e - באמצעות Licor-1600; f** - באמצעות SC-1 Leaf Porometer, Decagon ב-5.8.09 בלבד

צילומים מוטסים: לצילומים המוטסים רזולוציה מרחבית גסה והם סובלים מפיקסלים מוערבים של צמחיה וקרקע. לחילוץ טמפרטורת העלווה מצילומים מוטסים פותח הליך עיבוד תמונה חצי-אוטומטי בסביבת Matlab המבוסס על המרת watershed (יצירת מיתאר של אגנים). פרטים ניתן למצוא ב-[2]. שיפור ההליך כלל אופטימיזציה של בחירת הפיקסלים בתוך האגן [3]. בתום הרצת ה-watershed מתקבלת רשימה של מיקומי כל נקודות השפל שזוהו. לאחר מכן בעזרת רשימה זאת נבנתה תמונה של נקודות השפל כפי שהם ממוקמים בתמונה המקורית. במידה וישנם מספר זיהויים ברדיוס מוגדר של גודל עץ התמונה, הם מאוחדים לנקודה אחת שמיקומה נקבע באמצעות ממוצע משוקלל של המיקום ושל ערכי הבהירות של השיאים המאוחדים על מנת לצמצם ככל האפשר זיהוי כפול של עץ בתמונה. זיהוי הפיקסלים אשר מייצגים את העלווה התבסס על ההנחות שהנקודות שהתקבלו בשלב הקודם מייצגות מיקומים של עצים, ושעלוות העץ בתצלום היא פחות או יותר עגולה. לכן השלב השני כולל הרחבה הדרגתית של רדיוס העץ מהנקודה המייצגת אותו. את גודל העץ המיטבי (אשר בהליך הקודם - [2] נקבע דינמי) מחפשים בצורה איטרטיבית תוך ניסיון למקסם את הערך הסטטיסטי המייצג את ההומוגניות של העץ ביחס לסביבתו הקרובה. ערך סטטיסטי זה מחושב באמצעות השוואה בין שתי קבוצות: קבוצת הפיקסלים שבתוך עץ

וקבוצת הפיקסלים אשר מקיפים את העץ ברדיוס הגדול בשני פיקסלים מגודלו הנוכחי של העץ. לאחר זיהוי העצים והטמפרטורה שלהם, מחולק המטע לאזורים לפי הפרשי טמפרטורה (מצבי מים תוך שימוש באלגוריתם סגמנטציה מבוססת גרף על טמפרטורת העלווה. פרטים ניתן למצוא ב-[3]).

מציאת הקשר בין טמפרטורת הנוף ומצב המים בעץ

לאחר חילוץ הטמפרטורות חושב מדד העקה התרמי (CWSI) crop water stress index :

$$CWSI = \frac{Tl - Twet}{Tdry - Twet}$$

כאשר Tl הינה טמפ' הנוף שנמדדה באמצעות הצילומים התרמיים, ו- $Twet$ ו- $Tdry$

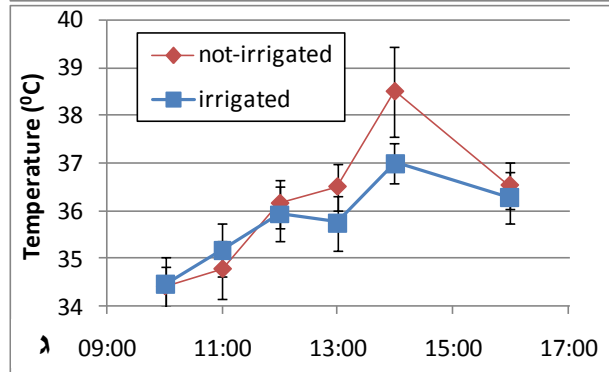
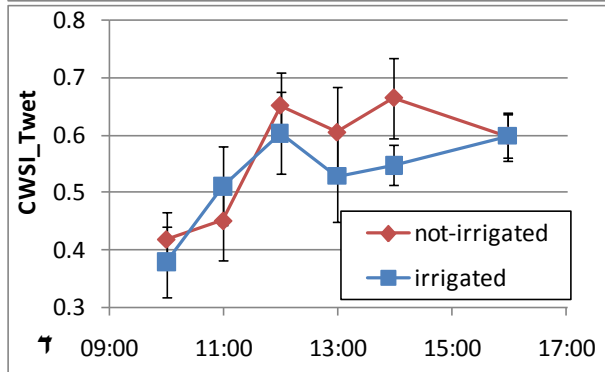
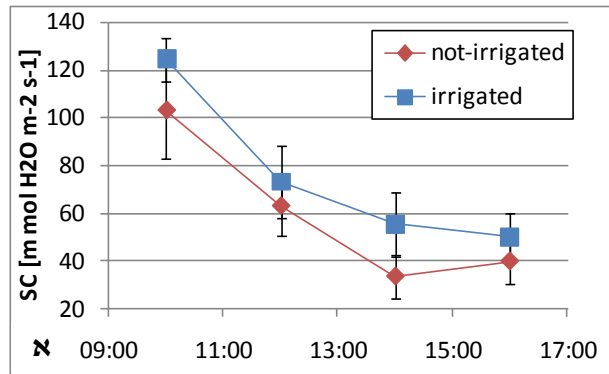
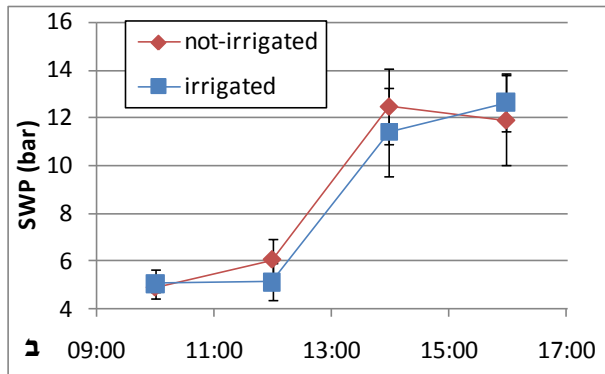
הינן טמפ' מינימום (עלה מאדה חופשי) ומקסימום (עלה בעקת מים שאינו מאדה) של עלווה תחת אותם תנאים מטאורולוגיים. טמפ' מינימום נקבעה בשני אופנים: מדידה של משטח הייחוס מתוך הצילומים התרמיים וחישוב תיאורטי שניתן למצוא ב-[4]. טמפ' המקסימום נקבעה כטמפ' האוויר + 5 מעלות [2], [4]. לאחר חילוץ הטמפ' וחישוב מדד העקה הם הושו עם המדדים הפיזיולוגיים שנמדדו במקביל לצילומים (טבלה 1). מתוך הצילומים הקרקעיים גם נבחנו המהלכים היומיים על מנת למצוא את הזמן המיטבי בו ניתן להבחין בין עצים במצבי מים שונים.

ד. תוצאות

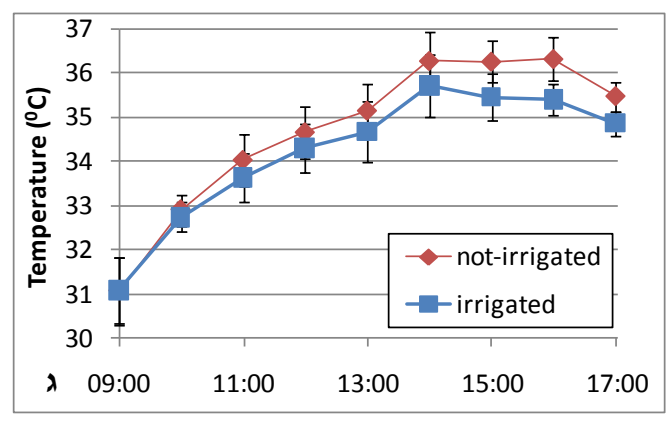
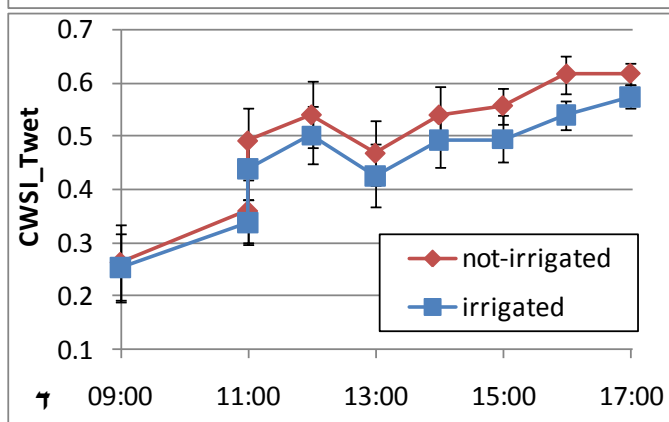
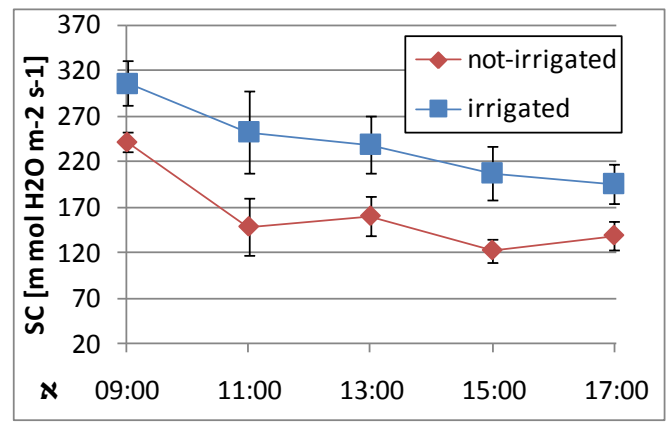
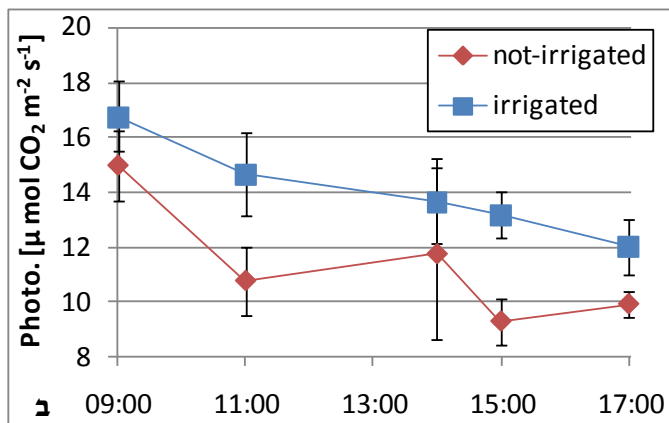
מהלך יומי של טמפרטורות נוף ושל מוליכות פיוניות

בניסוי 2 (טבלה 1) בוצעו צילומים תרמיים במהלך היום ובמקביל אליהם (בתדירות נמוכה יותר) בוצעו מהלכים יומיים של מדדים פיזיולוגיים שונים. מכל טיפול בכל סבב נמדדו 5 עצים (מכל עץ נלקחו 4 דגימות). איור 2 מציג את המהלכים היומיים של המדדים השונים בתאריך הראשון של הניסוי בו העצים הוצמאו במשך יומיים בלבד. ניתן לראות כי מוליכות הפיוניות (SC) של העצים תחת השקיה רגילה ושל המוצמאים הולכת ויורדת משעות הבוקר ומתייצבת על ערך נמוך יחסית בשעות אחה"צ. לאורך כל שעות המדידה ה-SC של העצים המושקים גבוהה יותר מזו של המוצמאים אך לא נמצאו הבדלים מובהקים ביניהם. במקביל פוטנציאל מים בסנסן (פמ"ס) הולך ועולה ומתייצב על ערך גבוה יחסי בשעות אחה"צ. הפמ"ס של העצים המוצמאים גבוה יותר מזה של המושקים ברב שעות המדידה אך ההבדלים אינם מובהקים. טמפ' העלווה ומדד העקה $CWSI_Twet$ הולכים ועולים משעות הבוקר, כאשר הטמפ' מגיעה לשיא בשעה 14:00 ולאחר מכן יורדת ומדד העקה מתייצב כבר מהשעה 12:00. ערכי שני המדדים גבוהים יותר בעצים המוצמאים מהמושקים מהשעה 12:00 אך הבדלים מובהקים בין שני הטיפולים נמצאו בשעה 14:00 בלבד. מדד העקה התרמי שמתבסס על משטח הייחוס נמצא לא מתאים לייצג את מצב המים בתמרים.

בתאריך השני של הניסוי לאחר כשבועיים של הצמאה נמדדו מוליכות פיוניות ופעילות פוטסינטטית במהלך היום כל שעתיים. בדומה למגמה שהצטיירה מהיום הראשון של הניסוי ישנה ירידה במוליכות הפיוניות מהבוקר ועד אחה"צ ומגמה דומה מתקבלת גם בפעילות הפוטסינטטית. בשונה מהתאריך הראשון נמצאו הבדלים ברורים כמעט בכל שעות המדידה כאשר הערכים שנמדדו לעצים מוצמאים גבוהים יותר מאלו של המושקים (איור 3א-ב). בהתאם לכך, המדדים התרמיים מציגים מגמה של עליה מהבוקר ועד אחה"צ עם ירידה בטמפ' ויציבות במדד העקה (איור 3ג-ד). למרות שערכי שני המדדים גבוהים יותר בעצים המוצמאים, הבדלים מובהקים התקבלו רק בשעות 16:00 ו-17:00.



איור 2: מהלך יומי של ניסוי בצמח בתאריך 5.8.09 (ניסוי 2). א. מוליכות פיוניות, ב. פוטנציאל מים בסנסן, ג. טמפרטורה, ד. $CWSI_{Twet}$. היתדות סביב הממוצעים הינם ערכי $p=0.05$, confidence.



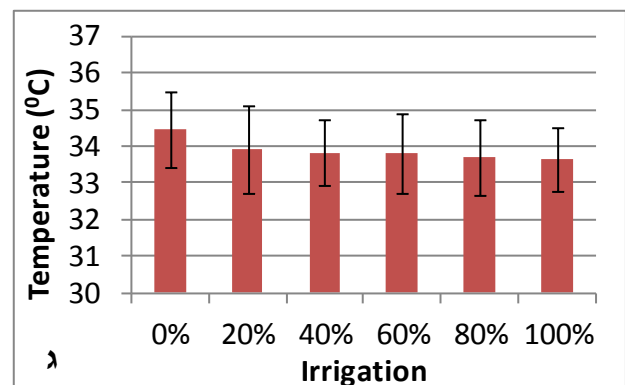
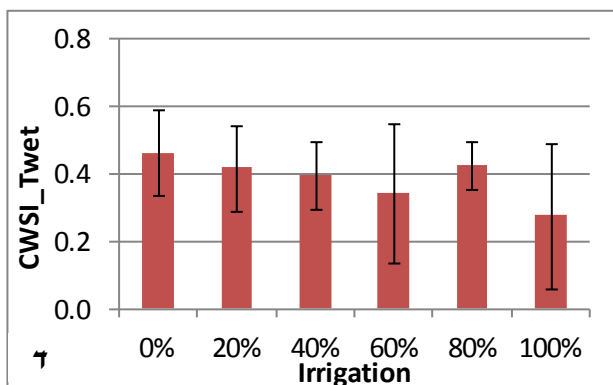
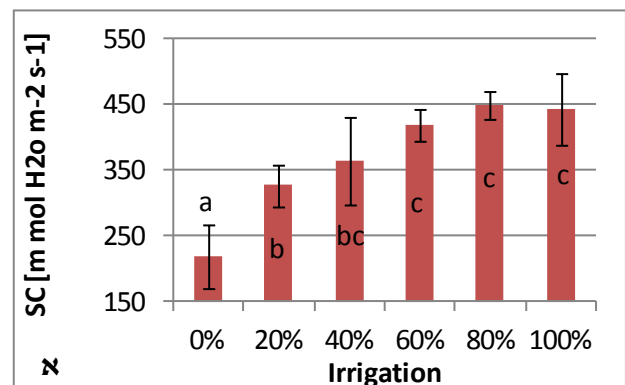
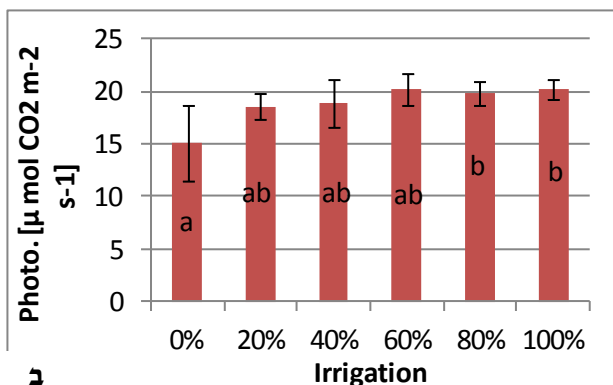
איור 3: מהלך יומי של ניסוי בצמח בתאריך 16.8.09 (ניסוי 2). א. מוליכות פיוניות, ב. פעילות פוטוסינתטית, ג. טמפרטורה, ד. $CWSI_{Twet}$. היתדות סביב הממוצעים הינם ערכי $p=0.05$, confidence.

המהלכים היומיים שנמדדו ביטבתה (ניסויים 3 ו-4). של 2 עצים מוצמאים ו-2 עצים לא מוצמאים לא הראו מגמות ברורות וגם לא הבדלים בין הטיפולים באף אחד מן המדדים. נראה כי ההבדלים ברמות המליחות והמיעוט בחזרות לא היוו בסיס טוב לבחינת הקשר בין טמפ' ובין מצב מים.

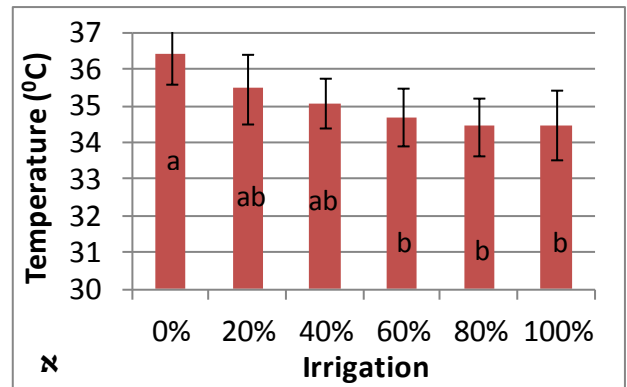
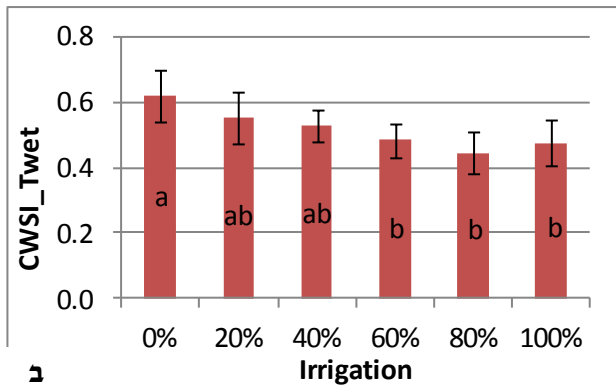
קשר בין מדדים תרמיים ומדדים פיזיולוגיים

הניסויים 5 ו-6 בצמח כללו טווח גדול יותר של מצבי מים (6 טיפולים) ואפשרו לבחון את הקשר בין המדדים התרמיים ובין המדדים הפיזיולוגיים ואת ההבדלים ברגישות בין שני סוגי המדדים באבחנה בין טיפולים. צילומים תרמיים בוצעו בשלושה סבבים: בוקר (10:00), צהריים (13:00) ואחה"צ (16:00) ואילו מוליכות פיוניות ופעילות פוטוסינטטית בוצעו רק בצהריים. למרות שישנה מגמה ברורה במערכי מוליכות הפיוניות, מתוך שש הטיפולים, ניתן להבחין ב-3 מצבי מים בלבד (איור 4א). הפעילות הפוטו' מציגה מגמה פחות ברורה והטיפולים מקובצים לשני מצבי מים (איור 4ב). באמצעות המדדים התרמיים בשעות הצהריים לא ניתן להבחין בין הטיפולים כלל (איור 4ג-ד). עם זאת, באמצעות המדדים התרמיים שנמדדו אחה"צ ניתן להבחין במגמה ברורה של ירידה מ-0% השקיה ל-100% השקיה אך בדומה לערכי פעילות פוטו' הטיפולים מקובצים לשתי קבוצות של מצבי מים בלבד (איור 5).

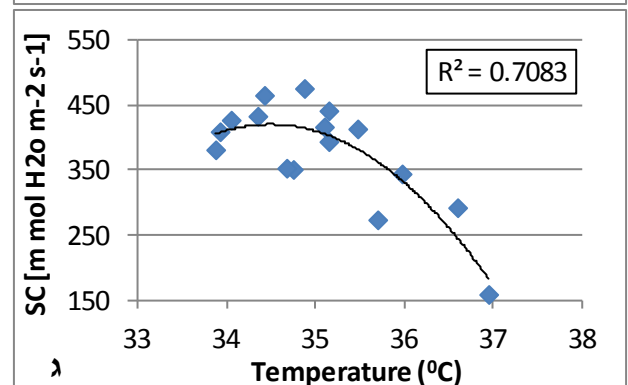
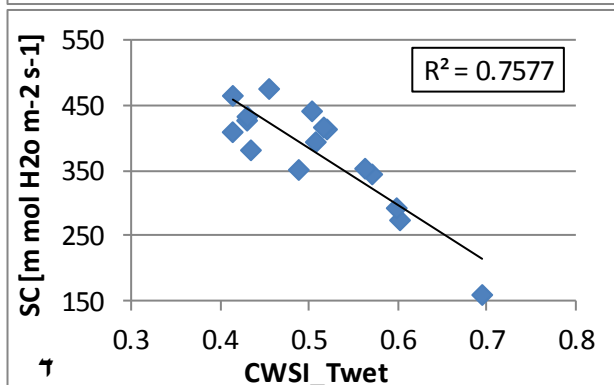
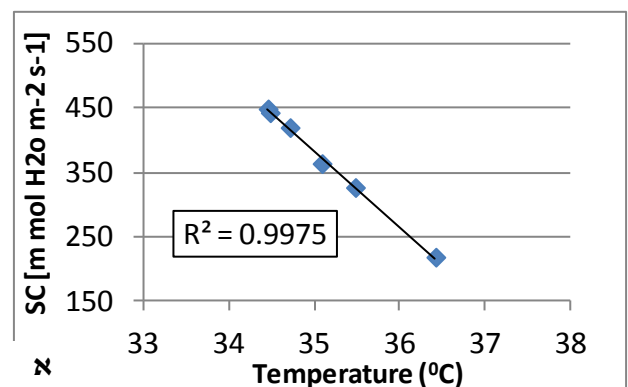
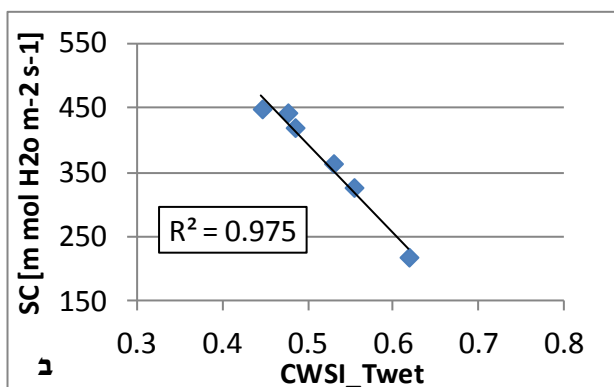
כאשר בוחנים את הקשר בין המדדים הפיזיולוגיים ובין המדדים התרמיים אזי בצהריים הקשרים אינם טובים אבל אם משלבים בין הזמנים המיטביים של כל אחד מן המדדים לייצוג מצב המים (קרי מדדים פיזיולוגיים בצהריים ומדדים תרמיים אחה"צ) הקשרים הם טובים מאוד ברמת הטיפול (5) ובינוניים ברמת העצים (16) כאשר מדד העקה מציג שיפור משני היבטים: מתקבל קשר ליניארי ומתקבל מיתאם גבוה יותר (איור 6).



איור 4: מדדים פיזיולוגיים ותרמיים של עצים תחת טיפולי ההשקיה שונים בצמח בתאריך 5.9.2010 בשעה 13:00 (ניסוי 5). א. מוליכות פיוניות, ב. פעילות פוטוסינטטית ג. טמפרטורה, ד. $\text{CWSI}_{\text{Twet}}$. היתדות סביב הממוצעים הינם ערכי $p=0.05$, confidence



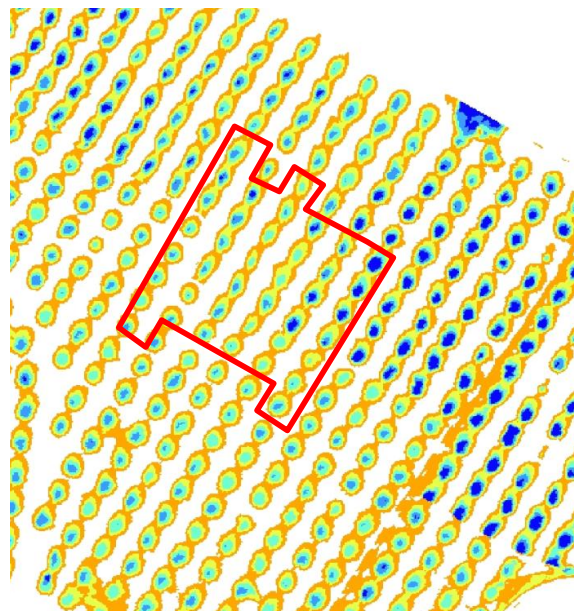
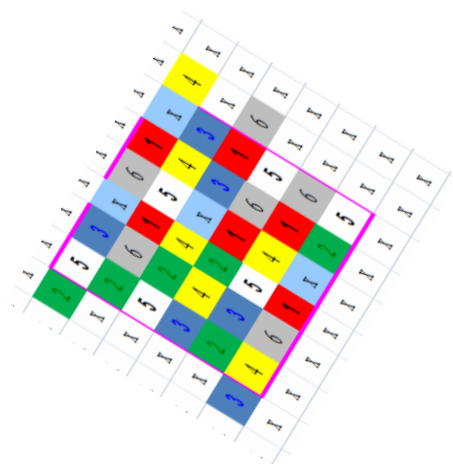
איור 5: מדדים תרמיים של עצים תחת טיפולי ההשקיה שונים בצמח בתאריך 5.9.2010 בשעה 16:00 (ניסוי 5). א. טמפרטורה, ב. $CWSI_{Twet}$. היתדות סביב הממוצעים הינם ערכי $p=0.05$, confidence.



איור 6: קשרים בין מדדים תרמיים בשעה 16:00 ומוליכות פיוניות בשעה 13:00 בצמח בתאריך 5.9.2010 (ניסוי 5). א ו-ג טמפרטורה - מוליכות פיוניות ברמת הטיפולים וברמת העצים, בהתאמה; ב ו-ד $CWSI_{Twet}$.

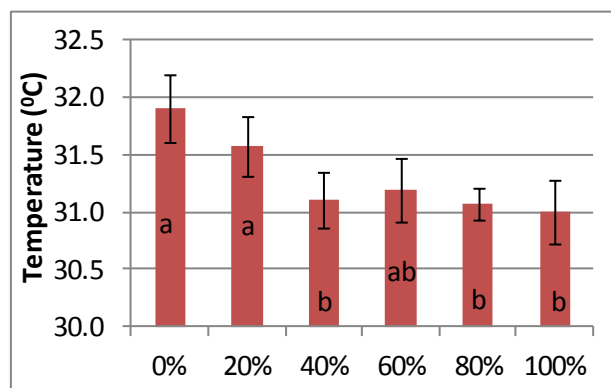
מעל אותה חלקה נרכשו צילום קרקעי וצילום מוטס כשנה לאחר מכן (ניסוי 6). איור 7 מציג את הצילום התרמי המוטס ולצידו איור 8 מציג את מפת הטיפולים. שלא כמו הצילום הקרקעי ב-2010 שבו צולמו רק שלושה עצים מתוך השישה (כדי לקבל מהלך יומי) בשנה זו כל שש העצים צולמו והצילום הקרקעי נמשך שלוש שעות וחצי (12:00-15:30). לעומת זאת, המדידות פיזיולוגיות נמשכו כשעה וחצי (12:50-14:20). מהצילומים הקרקעיים התקבל קשר טוב בין טמפ' נוף ובין מוליכות פיוניות (שנמדדו ב-21.9.11) ($R^2=0.85$) וקשר בינוני בין טמפ' נוף ובין פמ"ס ($R^2=0.7$) ברמת הטיפולים. קשרים דומים נמצאו עם מדד העקה התרמי. לא נמצאו הבדלים מובהקים בין הטיפולים באמצעות מוליכות פיוניות, טמפ' הנוף ומדד העקה התרמי אך באמצעות פוטנציאל מים בסנסן ניתן היה להבחין בין השקיה של 100% ובין השקיה של 0%. נמצאה שונות גדולה בטמפרטורות הנוף ויכול להיות שיש לייחס זאת לטווח השעות הגדול שבו בוצעו הצילומים. שלא כמצופה, טמפרטורות נוף שהופקו מהצילומים המוטסים נמצאו בעלות כושר הפרדה טוב

יותר מאשר הצילומים הקרקעיים וניתן היה להבחין בין שני מצבי מים (איור 9). כמו כן נמצאו קשרים בינוניים עם מוליכות הפיוניות ($R^2=0.75$) ועם פמ"ס ($R^2=0.66$). הצילום המוטס נרכש בשעה 13:30 בערך ולאור המימצאים הקודמים יכול להיות שצריך היה לבצע את הצילום המוטס בשעה מאוחרת יותר. יכול להיות שניתן היה לקבל תוצאות טובות עוד יותר אם הצילום היה מתבצע בשעה מיטבית.



איור 7: צילום תרמי מוטס מעל חלקת התמרים וסימון גבולות הניסוי. כתום - טמפ' גבוהות וכחול טמפרטורות נמוכות.
איור 8: מפת הטיפולים. 1-5 השקיה ב--20% 100% השקיה בקפיצות של 20%; 6 - 0% השקיה

איור 9: טמפרטורה של עצים תחת טיפולי ההשקיה שונים בצמח בתאריך 5.9.2010 בשעה 16:00 (ניסוי 5). היתדות סביב הממוצעים הינם ערכי $p=0.05$, confidence



תוצאות ניתוח צילומים מוטסים בקלי"ה למיפוי מצב מים בחלקות מסחריות

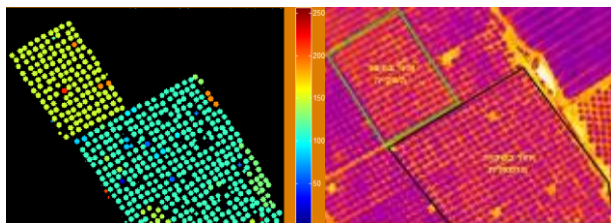
תוצאות ניתוח הצילומים התרמיים מעל חלקות ניסוי הראו כי הצילומים התרמיים יכולים להוות כלי להערכת מצב המים של עצי תמר. הסעיף הזה מתייחס לשלב נוסף בו אנו מתמקדים בפיתוח הליך לניתוח אוטומטי של צילומים מוטסים להערכה ולמיפוי מצב מים בעצי תמר בודדים בקנה מידה של מטעים. חלקו הראשון של האלגוריתם הינו לזהות תחילה את העצים במטע, ולהשאיר בתמונה רק את הפיקסלים שמייצגים את עלוות העצים. טבלה 2 מציגה את היכולת של האלגוריתם לזהות ולדקור את עצים בתמונת המטע עבור שלושת ניסויי השקיה שבוצעו במטעי תמרים בקלי"ה (ניסוי 1 בטבלה 1).

טבלה 2: דיוק ואמינות של זיהוי עצי תמר מתוך צילומים תרמיים מוטסים

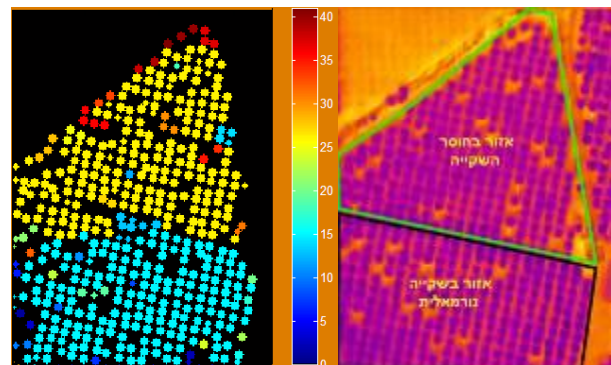
שם המטע	מספר עצים במטע	מס' עצים שזוהו	עצים שלא זוהו	זיהויים שגויים	איתורים עם התרחבות חלקית	זיהויים תקינים	אחוזי הצלחה
קליה	498	475	24	0	1	474	95%
בית ערבה	568	563	18	4	9	550	97%
אלמוג	268	250	20	2	0	248	93%

תוצאות האלגוריתם נבחנו בעזרת שימוש בתצלומים של מטעים אשר בהם נעשו ניסוי השקיה מתאימים. בניסויים אלו חלקים מהמטע הושקו בחודשי החורף באופן רגיל עם כמות מים של 100% מכמות המים של השקיה המסחרית של מטעים מסוג זה. כמו כן חלקים אחרים הושקו בכמות מים שקטנה ב- 20% ביחס לכמות ההשקיה המסחרית של מטעים אלו.

כפי שניתן לראות מהתוצאות עבור אתר "קליה", האזור שנמצא בחוסר השקיה של 20% הופרד בבירור מהאזור שקיבל השקיה רגילה. כמו כן ניתן לראות שאזור זה חם יותר לפי מפת הצבע בצד שמאל של התמונה (איור 10א). זאת בהתאם לצפיותינו. מהתוצאות עבור אתר "בית ערבה" ניתן לראות שהאזור שנמצא בחוסר השקיה של 20% הופרד בבירור מהאזור שזכה למים בכמות נורמאלית, וגם שאזור זה חם יותר (איור 10ב). זאת לפי מפת הצבע בצד שמאל של התמונה. מהתוצאות עבור אתר "אלמוג" ניתן לראות שהאזור שנמצא בחוסר השקיה של 20% ביחס להשקיה נורמאלית, הופרד מהאזור שקיבל השקיה בכמות נורמאלית. אף ניתן להבחין כי אזור זה חם יותר לפי מפת הצבע בצד שמאל של התמונה (איור 10ג). אך עם זאת בניסוי זה ההפרדה הינה פחות ברורה, ביחס למטעים הקודמים, בעיקר בין שתי הקבוצות שבצידו המערבי של המטע. ניתן לייחס את ההבדל לכך שמדובר בעצים הם מזן אחר ובעלי עלים גדולים יותר. עובדה זו מצביעה על הצורך ללמוד את ההבדלים בין זנים בצורה מעמיקה יותר.

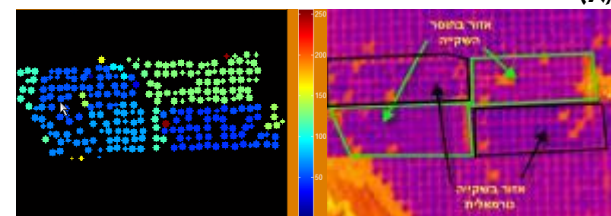


(ב)



(א)

איור 10: תוצאות מיון מטעי תמרים. א. קליה; ב. בית ערבה; ג. אלמוג. (מימין כל לוח - אזורי הניסוי במטע כאשר הגבולות בירוק תוחמים את האזור שהושקה ב-20%, ובשחור את האזור שהושקה ב-100%; משמאל – תוצאת המיון שהתקבלה מהתוכנית).



(ג)

קשר בין מדדים תרמיים לרמת מליחות מיי ההשקיה בתמרים

הצילומים מעל הליזימטרים ביטבתה היוו את הבסיס למציאת קשר בין רמת מליחות ובין מדדים תרמיים. מכיוון שלא היתה זו אחת ממטרות המחקר ניתנת כאן התייחסות קצרה. טבלה 3 מציגה את המדדים התרמיים והפיזיולוגיים לפי רמות מליחות של העצים שנמדדו וכן את החלוקה לקבוצות על-פי ניתוח

סטטיסטי (Anova). ניתן לראות כי שני המדדים הפיזיולוגיים מאפשרים הבחנה בין שלוש קבוצות מתוך ארבע רמות המליחות, הטמפ' מאפשרת הבחנה רק בין שתי קבוצות ומדד העקה בין שלוש קבוצות. נראה כי הצילומים התרמיים יכולים לשמש ככלי נוסף ללימוד השפעת המליחות על משק המים של עץ התמר.

טבלה 3: הצגת ממוצעי מדדים תרמיים ופיזיולוגיים על פי רמות מליחות שונות ביטבתה בתאריך 22.11.2009 בשעה 12:00 בצהריים

רמת מליחות [ds m ⁻¹]	מוליכות פיוניות [m mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹]	פעילות פוטוסינתטית [μ mol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹]	טמפרטורה [°C]	CWSI _{Twet}
0.5	154 a	12 a	24.9 a	0.67 b c
4	145 a	12 a	24 b	0.62 c
8	121 b	11 b	25.1 a	0.7 a b
12	73 c	8 c	25.5 a	0.73 a

* קבוצות בעלות אות שונה ליד ערך ממוצע מסמן הפרש משמעותי בין ממוצע הקבוצות.

ה. מסקנות והשלכותיהן על המשך ביצוע המחקר

במסגרת המחקר בוצעו צילומים תרמיים קרקעיים ומוטסים מעל חלקות תמרים תחת טיפולי השקיה שונים. תוצאות המחקר מלמדות כי למדדים תרמיים יכולת להבחין בין מצבי מים שונים ברמה דומה למדדים פיזיולוגיים כמו מוליכות פיוניות, פוטנציאל מים בסנסן ופעילות פוטוסינתטית וכן הם מגלים קשר טוב עם מדדים אלו. מתוצאות הניסוי בצמח נראה כי לשעת הצילום יש משמעות וכנראה שלשינויים החלים בשעות האחה"צ באזור מבחינת התנאים המטאורולוגיים (למשל, ירידה בלחות ועליה במהירות הרוח אחרי השעה 13:00) יש השפעה ויש ללמוד אותה בצורה מעמיקה יותר ולבצע ניסויים נוספים באזורים אחרים. במסגרת המחקר פותח הליך לניתוח אוטומטי של צילומים מוטסים להערכת ולמיפוי מצב מים בתמרים. כעיקרון, ניתן ליישם את ההליך על כל צילום תרמי מעל חלקות תמרים אך כדאי לנסות אותו עם צילומים מוטסים נוספים וגם מעל זנים שונים ולבחון את הדיוק שלו לפני יישום מסחרי. התוצאות הראשוניות מיטבתה מעידות על היכולת להבחין בין עצים המושקים (לאורך שנים) ברמות מליחות שונות באמצעות צילומים תרמיים ויש להעמיק בנושא במחקר נוסף. במסגרת שנות המחקר לא הספקנו לממש את מטרה ג' - זיהוי של פגיעה המדמה פגיעה של חדקונית הדקל אך יש לציין כי בימים אלו מתנהל מחקר בנושא והתוצאות הראשוניות מעודדות.

ו. רשימה ביבליוגרפית

- [1] Cohen, Y., Alchanatis, V., Meron, M. and Saranga, Y. 2005. Estimation of leaf water potential by thermal imagery and spatial analysis. International Journal of Experimental Botany, 56: (417), 1843-1852.
- [2] Cohen Y., Alchanatis V., Prigojin, A., Levi, A., Soroker V. and Cohen Y. 2011. Use of aerial thermal imaging to estimate water status of palm trees. Precision Agriculture, 13:123-140.
- [3] גולדנברג, ר., פיינגולד, י. (2011). פיתוח אלגוריתם לאיתור תקלות השקיה במטעים באמצעות צילומים תרמיים מהאוויר. דו"ח פרויקט גמר, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב, המחלקה להנדסת תעשייה וניהול.
- [4] Möller M., Alchanatis V., Cohen Y., Meron M., Tsipris J., Naor A., Ostrovsky V., Sprintsin M. and Cohen S. 2007. Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. Journal of Experimental Botany, 58(4):827-838.

3. סיכום עם שאלות מנחות

מטרות המחקר לתקופת הדו"ח תוך התייחסות לתוכנית העבודה.
מטרת המחקר הכללית היא ליצור את הבסיס המדעי והטכנולוגי של מערכת חישה מרחוק תרמית לניטור מוקדם של מצב וצריכת המים בעצי תמר להכוונת השקיה וזיהוי עקות. ממנה נגזרו שלוש מטרות משנה: 1. לימוד ההשפעה של מצב וצריכת המים של העץ על טמפרטורת הנוף. 2. פיתוח מודל להערכת מצב וצריכת המים בעץ על סמך צילום תרמי של הנוף. 3. לימוד השפעת פגיעה בגזע על צריכת המים בעץ וטמפרטורת הנוף. עיקרי הניסויים והתוצאות שהושגו בתקופה אליה מתייחס הדו"ח:
במסגרת המחקר בוצעו צילומים תרמיים קרקעיים ומוטסים מעל חלקות תמרים תחת טיפולי השקיה שונים. בוצעו סה"כ 7 סדרות של צילומים מעל ניסויים שונים בקלי"ח, צמח ויטבתה. מדדים תרמיים אפשרו הבחנה בין מצבי מים שונים. מדדים אלו נמצאו בקשר טוב עם מדדים פיזיולוגיים. פותח הליך לניתוח אוטומטי של צילומים תרמיים מוטסים להערכה ולמיפוי מצב המים של עצים בודדים בקנה מידה של המטע השלם. המסקנות המדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו. האם הושגו מטרות המחקר בתקופת הדו"ח:
תוצאות המחקר מלמדות כי למדדים תרמיים יכולת דומה להבחנה בין מצבי מים שונים וכן הם מגלים קשר טוב עם מדדים פיזיולוגיים. ניתן להעריך ולמפות מצבי מים של עצי תמר בודדים באמצעות צילומים תרמיים. כל המטרות הושגו למעט מטרה 3 - הערכה של נזק של חדקונית הדקל. הבעיות שונתרו לפתרון ו/או השינויים שחלו במהלך העבודה (טכנולוגיים, שיווקיים ואחרים); התייחסות המשך המחקר לגביהן, האם יושגו מטרות המחקר בתקופה שונתרה לביצוע תוכנית המחקר:
למרות ההצלחה המשותפת מן התוצאות, יש לבצע צילומים תרמיים מוטסים מעל חלקות נוספות עם טיפולי השקיה שונים בשעות שונות של היום ולבחון את רמת הרגישות של הצילומים והיעילות של האלגוריתמים. יש לבצע ניסויים מעל חלקות המושקות ברמות מליחות שונה.
האם הוחל כבר בהפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח: לא כולו. תוצאות חלקיות הוצגו במאמרים הבאים:
Cohen Y., Alchanatis V., Levi, A., Soroker V., Prigojin, A. and Cohen Y. Evaluation of palm trees water availability using remote thermal imaging. 2009. In: E.J. van Henten, D. Goense and C. Lokhorst (eds.), European Conference in Precision Agriculture 2009, Wageningen, Netherland. Wageningen Acad. Publ. The Netherlands. Pages:159-166. Prigojin, A., Cohen Y., Alchanatis V., Levi, A., Soroker V. and Cohen Y. 2010. Evaluation of palm trees water availability using remote thermal imaging. Alon Ha'Norea, January, 2010, 64:38-42. Alchanatis V., Cohen Y., Prigojin, A., Levi, A., Soroker V. and Cohen Y. 2010. Aerial thermal imaging to monitor relative water status of palm trees. International Conference on Agricultural Engineering, AgEng2010, Clermont-Ferrand, France. pp.301 Cohen Y., Alchanatis V., Prigojin, A., Levi, A., Soroker V. and Cohen Y. 2011. Use of aerial thermal imaging to estimate water status of palm trees. Precision Agriculture, 13:123-140.
פרסום הדו"ח: אני ממליץ לפרסם את הדו"ח: (סמן אחת מהאופציות)
רק בספריות
ללא הגבלה (בספריות ובאינטרנט)
חסוי לא לפרסם