

מערכת צילום תרמי קרקעית לזיהוי ואיתור תקלות השקייה

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות ופיתוח הכפר

על-ידי

ויקטור אלחננטי, יפית כהן, אשר לוי, סלבה אוסטרובסקי, רומן בריקמן, יוסף גרינשפון,
המכון להנדסה חקלאית, מנהל המחקר החקלאי

עמוס נאור ומשה מרון, מו"פ צפון

בשיתוף: מיכאל ספרינצין, יוסי קשתי, אוהליאב קיסר, דניאל לוין המכון להנדסה חקלאית,
מנהל המחקר החקלאי

Final Report for Research Project # 458-0523-10

Ground based thermal imaging system to detect irrigation malfunctions

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

By

**Victor Alchanatis, Yafit Cohen, Asher Levi, Slava Ostrovski, Roman Brikman, Yosseph
Grinshpun, Agricultural Engineering Institute, ARO, the Volcani Center**

Amos Naor, Moshe Meron, Northern R&D

with: **Michael Sprintsin, Yossi Kashti, Oholiav Keisar, Daniel Levin, Agricultural
Engineering Institute, ARO, Volcani Center**

הממצאים בדו"ח זה הינם תוצאות ניסויים.

הניסויים לא מהווים המלצות לחקלאים.

חתימת החוקר

א. תקציר

הצגת הבעיה: תקלות השקיה גורמות לבזבז ישיר ועקיף של מים. החקלאים מנטרים ומתקנים את הליקויים במערכות ההשקיה באופן תדיר, אך חוץ מתצפיות מזדמנות, אין היום דרך שיטתית לזיהוי ואיתור של תקלות ההשקיה. ניתן לחסוך ולייעל את השימוש במי ההשקיה באמצעות מערכת המאפשרת זיהוי ואיתור יעיל ושיטתי של התקלות במערכות ההשקיה. הצעה זו מתבססת על מדידת תגובת הצמחים לשינויים מקומיים במתן המים. **מטרת המחקר** הכללית היא לפתח מערך לצילום תרמי קרקעי לניטור של תקלות במערכת ההשקיה ולאופטימיזציה של ניהול ההשקיה.

בחרנו מטעי תפוחים ונקטרינות בחוות מתיתיהו וביקבוץ ברעם ויצרנו בהם תקלות מכוונות לדמות פריצה וסתימה של טפטפות. התקלות היוזמות הופעלו למשכי זמן משתנים לפני מועד הצילום התרמי לבחינת הרגישות של הצילום התרמי באיתור התקלות. במהלך שתי עונת הקיץ בוצעו 3 צילומים אלכסוניים מעל כל סוג מטע. פותחה תוכנה ליישור גיאומטרי חצי-אוטומטי והופקו טמפרטורות העלווה של התקלות. הממצאים מראים כי הצילומים התרמיים מעל מטעי תפוחים ונקטרינות מאפשרים זיהוי של טיפולים המדמים סתימות לאורך זמן (לפחות שבועיים). זוהי תוצאה מעודדת מכיוון שעצים הסובלים ממחסור במשך שבועיים עדיין לא מראים סימנים חזותיים ברורים מספיק לזיהוי על-ידי הצוות הסורק בשטח. כמו כן מדובר בזיהוי של תקלות בגדלים של שלושה עצים בלבד. למרות פיתוח התוכנות המאפשרות יישור גיאומטרי של הצילומים וזיהוי מיקומי התקלות בדיוק סביר לא הצלחנו במסגרת השנתיים של המחקר לפתח מימשק יחיד המורכב מכלל ההליכים.

לאור תוצאות המחקר המקביל הבוחן את השימוש בצילומים מוטסים אנו מאמינים כי מערכת מוטסת טומנת בחובה פוטנציאל גבוה יותר למימוש מערכת לאיתור תקלות באמצעות צילומים תרמיים. לכן, באזורים בהם לא ניתן לבצע טיסות רגילות מעל המטעים בגלל נושאים של ביטחון יש לבחון בעתיד את היכולת להשתמש בכלי טיס בלתי מאויישים (כטב"מ) ולבצע טיסות נמוכות.

מסקנות והמלצות: להשתמש במה שפותח עד כה לפיתוח ממשק יחיד לניתוח צילומים תרמיים אלכסוניים לאיתור תקלות.

ב. מבוא

תקלות השקיה גורמות לבזבז ישיר ועקיף של מים. באופן ישיר, פריצות במערכת ההשקיה גורמות, לדליפת מים אל מי התהום או כזרימה עילית אל מקומות לא רצויים. באופן עקיף, ירידה בערך היבול מניהול השקיה לקוי גורם לניצול לא אופטימאלי של המים שכבר הושקו. סתימות במערכת ההשקיה אמנם לא גורמות לאיבוד מים, אך הנזק שנגרם לגידול משיבוש בהשקיה מביא להקטנת יעילות השימוש במים עד לאיתור התקלה. החקלאים מנטרים ומתקנים את הליקויים במערכות ההשקיה באופן תדיר, אך חוץ מתצפיות מזדמנות, אין היום דרך שיטתית לזיהוי ואיתור של תקלות ההשקיה.

אחת מתגובות הצמח למחסור במים היא סגירה חלקית של הפיוניות, המגבילה את איבוד המים מהצמח. סגירה זו מגבילה גם את המעבר של דו-תחמוצת הפחמן לתוך העלה וכך מורידה את קצב הפוטוסינתזה ובסופו של דבר את ייצור המוטמעים של הצמח. השינוי בפתיחת פיוניות מתבטא גם בירידה במוליכות העלים של אדי מים, מנגנון אשר בין השאר גורם להתקררות של העלים. השינויים הללו במוליכות גורמים להתחממות של העלים. במקרים רבים בהשקיה אופטימלית הפיוניות אינן פתוחות במלואן ובמקרים אלו עודף מים מביא לירידה בטמפרטורות העלים. טמפרטורת העלה נמצאה במתאם עם מוליכות הפיוניות והיוותה, בעקיפין, אינדיקציה על מצב המים בצמח ([2]; [1]). קיימות עבודות רבות המציעות דרכים (בעזרת מודלים תיאורטיים או אמפיריים יותר) להעריך את מצב עקת המים באמצעות מדידת טמפרטורת הנוף ([1]).

חישה מרחוק מהווה אמצעי למיפוי מצב הצמח בשטחים חקלאיים נרחבים. השיטה העיקרית לחישה מרחוק של מצב המים מתבצעת באמצעות החלק התרמי של הספקטרום ([3]). צילומים באמצעות מצלמות תרמיות מאפשרים מיפוי של התפרושת המרחבית של טמפרטורות הנוף ועל-כן יכולים להוות כלי באיתור תקלות השקיה. צוות החוקרים הראה במחקרים קודמים כי ניתן להשתמש בצילומים תרמיים להערכה ולמיפוי אמינים של מצב המים בשדות כותנה ([6]; [5]; [4]), בכרמי יין ([7]; [8]) ובכרמי זיתים ([9]; [10]). מחקרים אלו התמקדו במיפוי ערכי פוטנציאל מים בעלה או מוליכות פיוניות להכוונת השקיה בזמן ובמרחב.

לעומת המורכבות היחסית הן בעלות והן בעיבוד הנדרשת למיפוי ערכים מוחלטים של מצב מים להכוונת השקיה, איתור תקלות בהשקיה יכול להתבסס על הבדלים יחסיים בטמפרטורה בלבד. הבדלים יחסיים בטמפרטורה יכולים להתקבל באמצעות מצלמות תרמיות לא-רדיומטריות. כמו-כן בגלל האופי האיכותי הנדרש באיתור תקלות הצורך בצילומים בתחום הנראה להפרדה בין קרקע ונוף של צומח איננו קריטי. [11] פיתחו שיטה סטטיסטית המבודדת את טמפרטורות הנוף בצורה מספקת ללא צורך בתמונות בתחום הנראה. איתור תקלות בהשקיה בקנה-מידה של המטע יכול בין השאר להתבצע באמצעות צילומים אלכסוניים מגובה ([12]). הצילום האלכסוני הינו זול יחסית ויכול להתקבל באמצעות שירות קבלני **מטרת המחקר הכללית** היא לפתח מערך לצילום תרמי קרקעי לניטור של תקלות במערכת ההשקיה ולאופטימיזציה של ניהול ההשקיה.

ג. שיטות

בשתי שנות המחקר רכשנו צילומים אלכסוניים תרמיים ובאור-הנראה מתורן מעל תפוחי עץ ונקטרינות בהם העמדנו ניסויים מבוקרים המדמים תקלות השקיה ובחנו היבטים שונים של היכולת לזהות תקלות.

יצירה מכוונת של תקלות ובדיקת מצב המים בעץ

לצורך דימוי תקלות השקיה ברמות שונות הועמדו ניסויים מבוקרים במטעי נקטרינות ותפוחי-עץ לפי הטיפולים הבאים:

1. השקיה רגילה כאשר ערך היעד של פוטנציאל מים בגזע הינו 10bar (מסומנת ב-control),
 2. הדמיית רפיצה: השקיה בעודף של 400% למשך 21 ימים לפני הצילום לדמות פריצה בטפטפת (מסומנת ב-400%),
 3. הדמיית סתימה בעוצמה מתונה: הפסקת מים שלושה שבועות לפני יום הצילומים עד הגעה לסף של 18bar ומתן מים מצומצם במידת הצורך בכדי לשמר אותו (מסומנת ב-MedStress), ו-
 4. הדמיית סתימה בעוצמה מתונה: הפסקת מים שלושה שבועות לפני יום הצילומים עד הגעה לסף של 24bar ומתן מים מצומצם במידת הצורך בכדי לשמר אותו (מסומנת ב-HighStress)
- בשנה הראשונה מכל סוג תקלה מדומה מכל גודל הוצבו 6-8 חזרות. בשנה השניה כל סוג תקלה מדומה הועמדה ב-2 חזרות בכל שורה. היקפי העמדת התקלות והמרחקים שלהן מנקודת הצילום נבדלו בכמה מאפיינים על מנת שנוכל להעריך עד כמה הרזולוציה של הצילום מאפשרת זיהוי של תקלות עד לרמה של העץ בודד (טבלה 1):

טבלה 1: היקף העמדת התקלות ומרחקים מנקודת הצילום

שנת המחקר	גידול	מספר שורות	היקף התקלות	מרחק מנקודת הצילום
שנה ראשונה	נקטרינות	6	1-4 עצים צמודים בשורה	3-140 מ'
	תפוחי עץ	22		3-140 מ'
שנה שניה	נקטרינות	9	5 עצים צמודים בשורה	100 מ'
	תפוחי עץ	9	3 עצים צמודים בשורה (5 מ')	30-100 מ'

במקביל לצילומים שיתוארו בסעיפי הבאים נמדדו ערכי פוטנציאל מים בגזע (stem water potential-SWP). בשנה הראשונה מכל אתר תקלה נלקחו שתי מדידות של SWP בעץ מרכזי. בשנה השניה נלקחו שתי מדידות מכל עץ ב-4 חזרות (2 חזרות בשורה ב-2 שורות מתוך ה-9, סה"כ 96 מדידות).

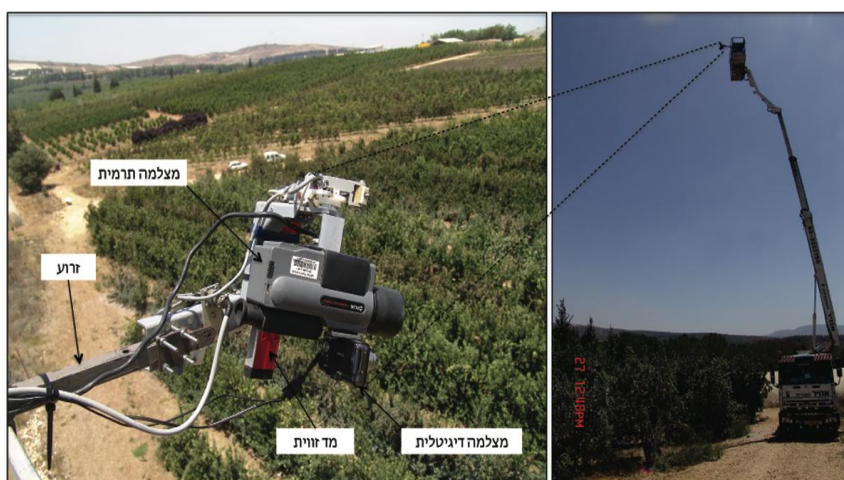
רכישת צילומים אלכסוניים

בראשית הפרויקט אפינו את המפרט הטכני של מערכת צילום מגובה מההיבט של חוזק, כושר נשיאה, יציבות ותפעול. לפי מפרט זה הוזמן תורן טלסקופי אשר הגיע רק בשנה השניה כאשר בשנה הראשונה הצילומים בוצעו ממנוף. בנוסף, רכשנו מצלמה תרמית חדשה SC655 של חברת FLIR בנוסף על המצלמה שהיתה (וישנה) ברשותנו, SC2000 (FLIR). גם היא הגיעה רק לקראת הצילומים של השנה השניה. בשתי שנות המחקר צולמו שישה צילומים אלכסוניים של מטעי נקטרינות ותפוחים כאשר בכל שנה נעשה שימוש במערכות צילום שונות (טבלה 2 ואיורים 1 ו-2). לראש המנוף או התורן חוברו מצלמה תרמית ומצלמה רגילה אשר היו מחוברות למערכת צידוד עם שליטה מרחוק לסריקת המטע מזוויות של 35-55 מעלות ביחס לאופק. לזרוע אליה היו מחוברות המצלמות חובר מד-זווית כדי לאפשר יישור של הצילום. הצילומים נרכשו מגובה של 20 מטר פעם בניצב לשורות הנטיעה (נקטרינה) ופעם במקביל לשורות הנטיעה (תפוחי עץ). צורת הצילום נקבעה על פי תווי שטח בלבד ונוחות הצבת המערכת (דוגמה באיור 3).

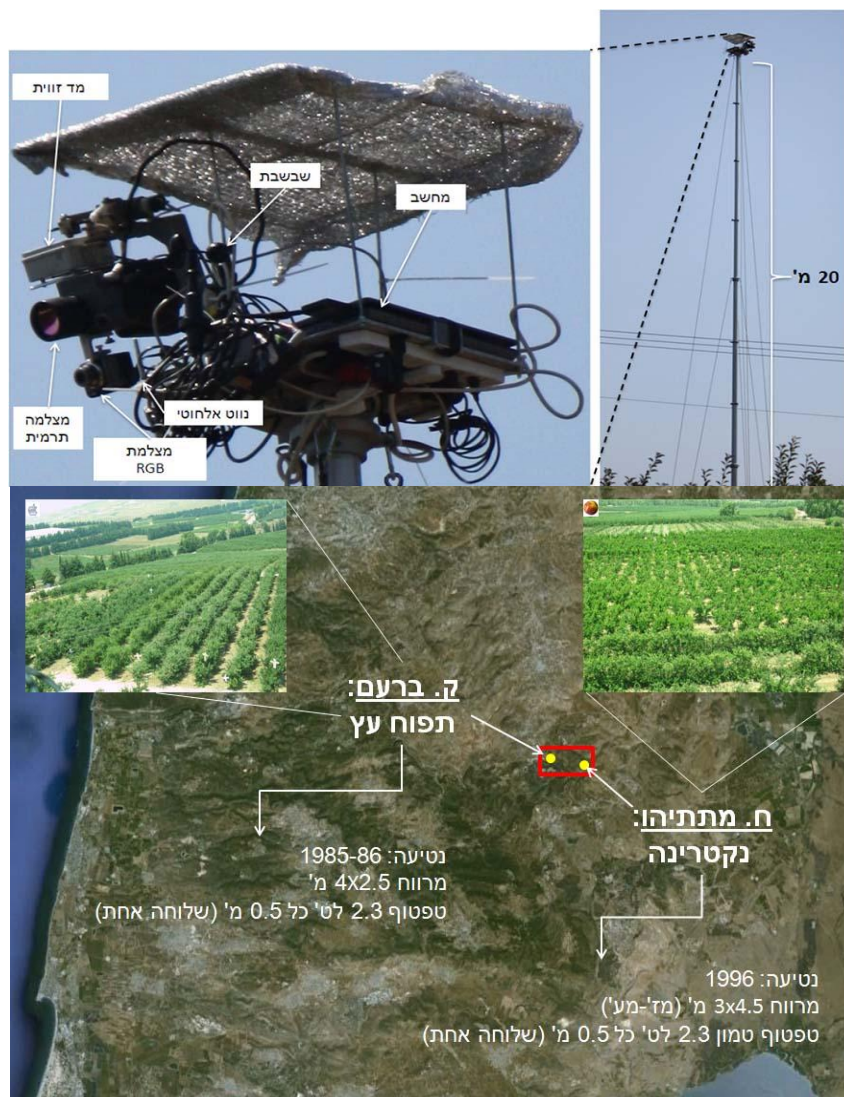
טבלה 2: מאפייני הצילומים

שנת מחקר	תאריך	גידול	מיקום	מתקן הרמה	מצלמה תרמית	רזולוציה מרחבית	כיוון הצילום
ראשונה	26.07.10	נקטרינות	חוות מתיתיהו	מנוף, 20 מ'	SC2000	320X240	עם כיוון השורות
	23.08.10						
	27.07.10	תפוחי עץ					בניצב לכיוון השורות
	22.08.10						
שניה	18.07.11	נקטרינות	חוות מתיתיהו	תורן טלסקופי, 20 מ'	SC655	640X480	עם כיוון השורות
	19.07.11	תפוחי עץ	קיבוץ ברעם				בניצב לכיוון השורות

איור 1: מערכת צילום קרקעית 2010 (מימין מעל מטע נקטרינות: כיוון צילום עם כיוון השורות ומשמאל מעל מטע תפוחים: כיוון צילום אנכי לכיוון השורות)



**איור 2: מערכת צילום
קרקעית 2011**



**איור 3: דוגמא לצילומים
באור הנראה מעל מטעי
נקטרינות ותפוחי עץ.
מאפייני המטעים הם שנת
2011.**

בנית מערכת לצילום תרמי קרקעי: לקראת הצילומים של השנה השניה תוכננה ונבנתה מערכת הכוללת תורן פנוימאטי הנפתח לגובה מירבי של 20 מ', מתקן מכאני להובלה, ייצוב והפעלה של התורן (איור 4א), (איור 4ב), מערכת פנוימאטית לפריסה והורדה של התורן (איור 4ג), מערכת צילום (איור 2) הכוללת זרוע מבוקרת מחשב, מצלמה תרמית, מצלמה צבעונית, מחשב הפעלה, מערכת בקרה אל חוטית לבקרת והפעלת המערכת מרחוק, חיישן זווית בעל שלושה צירים, חיישן למדידת מהירות רוח, ומערכת להספקת אנרגיה לרכיבים השונים. באיור 5 מובאים שרטוטי התכנון של המערכת.



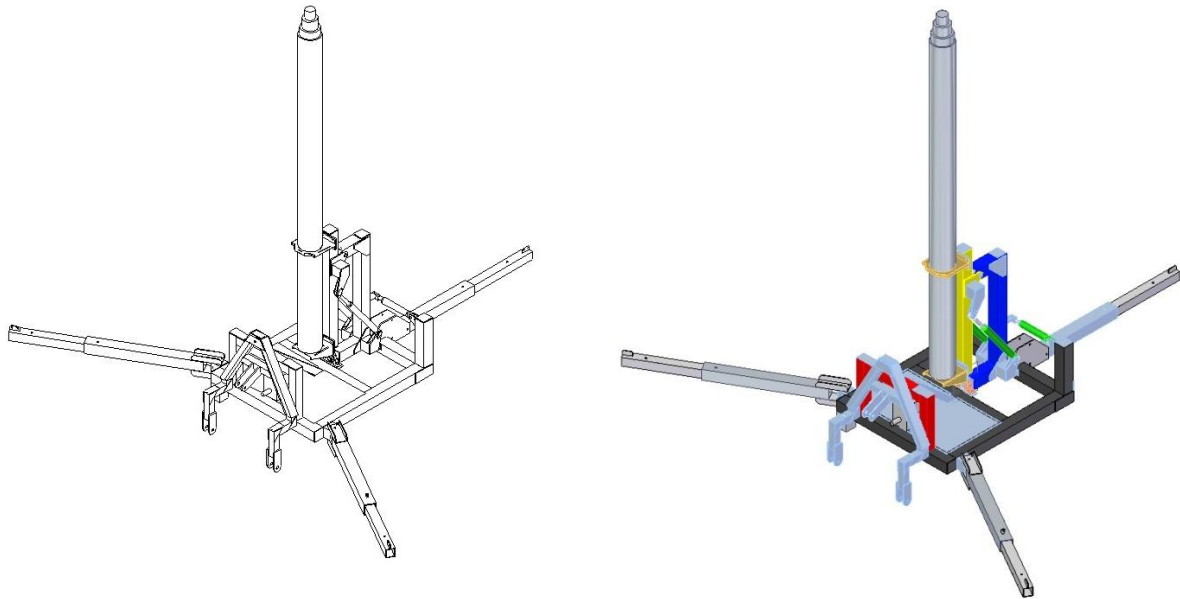
**איור 4ג: מערכת פנוימאטית
לפריסה והורדה של התורן**



**איור 4ב: מערכת הידראולית
לאיזון התורן**



**איור 4א: מתקן מכאני להובלה,
ייצוב והפעלה של התורן**



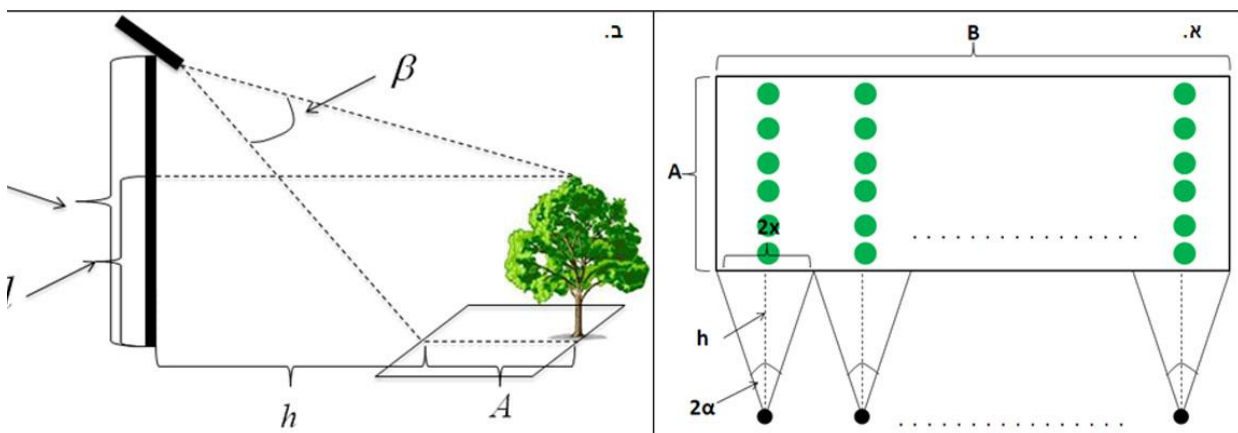
איור 5: שרטוטים לתכנון ולבניה של מתקן להובלה והפעלה של התורן

בחירת מיקום הצילום וחישוב מספר הצילומים הנדרש

אחד האתגרים בזיהוי תקלות השקיה בזמן אמת באמצעות מערכת קרקעית הוא הצורך בלכסות את מירב מרחב השדה במספר צילומים קטן ככל האפשר. אתגר זה מכתוב את הצורך בביצוע צילום אלכסוני הנלקח מנקודה מרוחקת יחסית מהשורות הקיצוניות של אזור העניין. לפיכך לפני כל צילום (בשנה השניה) השתמשנו בחישובים הבאים על מנת לקבוע את שני המשתנים הבאים: מרחק מיטבי מקצה המטע ומספר הצילומים המזערי שיש לבצע לאורך המטע על מנת לכסות את המטע כולו.

אם נסמן את שדה הראיה האופקי של המצלמה ב- 2α ואת המרחק בין נקודת הצילום לעץ או שורה חיצונית של מטע ב- h (איור 6א) אזי הרוחב המכוסה על-ידי כל צילום ($2x$) יחושב בצורה הבאה: $2x = 2(h * \tan \alpha)$. אם נסמן את אורך המטע ב- B והצילומים מתבצעים בקו מקביל לאורך המטע (איור 6ב) אזי על מנת לחשב את מספר הצילומים הנדרש לכיסוי מלא של המטע N ישנו צורך בקיום התנאי הבא

$$2x * N \geq B \quad \text{ומכאן ש} \quad N = \frac{B}{2x} + 1$$



איור 6: איור סכמתי של מיקומי המערכת לצילום המכסה את כל המטע: א. ממבט על המראה את זווית הראיה האופקית (2α), ב. מבט צד המראה את המרחק של מערכת הצילום מקצה המטע, h , ואת זווית הראיה האנכית (β). A - רוחב המטע, B - אורך המטע, H - גובה התורן, ו- l גובה העצים.

עדיין נותר לחשב את המרחק המזערי מנקודת הצילום לקצה המטע h על-מנת לכסות את המטע גם לרוחבו, A . לשם כך, צריך להתקיים התנאי הבא:

$$\arctan\left(\frac{A+h}{H-l}\right) - \arctan\left(\frac{h}{H}\right) \leq \beta \quad (1)$$

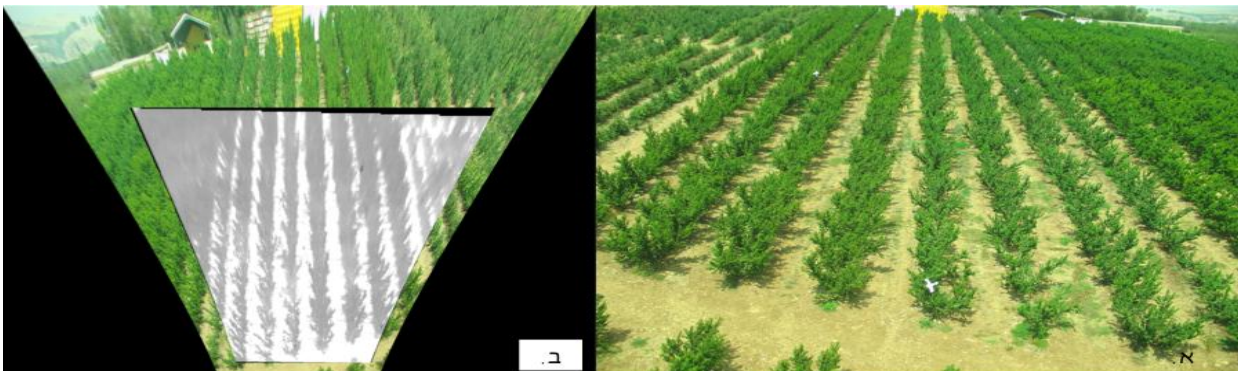
כאשר, H היא גובה התורן, l היא גובה העצים ו- β היא זווית הראיה האנכית (איור 6ב).

מכיוון שהפונקציה $f(h) = \arctan\left(\frac{A+h}{H-l}\right) - \arctan\left(\frac{h}{H}\right)$ היא מונוטונית עולה, לכן קיים ערך יחיד של h עבורו מתקיים אי-השוויון (1) והערך של h ניתן לחישוב בצורה נומרית.

ניתוח צילומים תרמיים אלכסוניים

ניתוח מקדים: הצילומים התרמיים הומרו מהפורמט הגולמי של מצלמת FLIR לערכי אפור כאשר כל סיבית (bit) מייצגת 0.1 מעלות (הרגישות התרמית של המצלמה). תהליך ההמרה נעשה בשלושה שלבים: (א) פתיחת הקבצים הגולמיים בתוכנת ThermoCamResearch ושמירתם בפורמט *.BMP; (ב) המרת התצלום לתמונת 8 ביט לא דחוסה בפורמט *.tiff באמצעות תוכנת Adobe Photoshop; ו- (ג) חישוב ערכי טמפרטורת הפיקסלים מתמונת 8 ביט בעזרת נוסחת המרה [4]: $T_{(x,y)} = T_{\min} + \frac{T_{\text{span}}}{255} GL_{(x,y)}$ כאשר GL מייצג את ערך הפיקסל בתמונת 8 ביט; $T_{\min}=19$; $T_{\text{span}}=25.5$.

יישור גיאומטרי ועיגון יחסי: בצילום אלכסוני המצלמה קולטת את ההיטל של המרחב הגיאומטרי על החיישן (פרספקטיבה). בצילום הגולמי המידות הגיאומטריות מעוותות לפי המיקום והאוריינטציה היחסיים של המצלמה והעצם המצולם. התמצאות במרחב השדה והצבעה על מיקום התקלה בשדה מחייבים יישור גיאומטרי של הצילום לביטול הפרספקטיבה ויצירת תמונה מיושרת. לצורך ביטול הפרספקטיבה פיתחנו תוכנה יעודית בשם "Perspective" המתבססת לזווית הראיה של המצלמה ביחס לשיפוע פני השטח הן במישור האופקי והן במישור האנכי. על בסיס זוויות אלו והטופוגרפיה של מרחב הצילום תיקנו את הפרספקטיבה (איור 7). תיקון הפרספקטיבה מאפשר חישוב של המרחק לכל נקודה בתמונה מנק' הצילום וגם בין הנקודות השונות בתמונה. עיגון יחסי של צילומים תרמיים ובתחום הנראה נעשה על ידי חיפוש נקודות זהות בין שתי התמונות על פיהן ניתן להזיז, לשנות גודל ולסובב את אחד הצילומים (תרמי) ביחס לשני (בתחום הנראה). לצורך זיהוי נקודות כאלה הועמדו במרחב הצילום צלבים גדולים. בנוסף לאלו זהו נקודות משותפות נוספות בצילום כמו התחלה וסוף של שורות. דיוק התיקון הגיאומטרי נבדק על בסיס חישוב המרחקים שבין הנקודות ידועות (עצים בהם נמדד SWP) בתצלום המיושר והשוואתם למרחקים ידועים בין אותם עצים ו/או על-פי נקודות GPS של העצים.



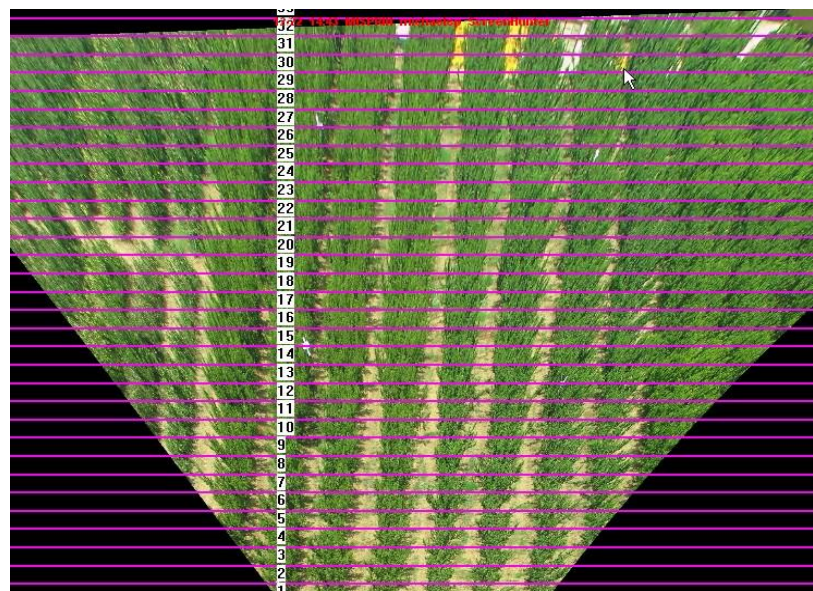
איור 7: צילום רגיל של מטע אפרסקים בחוות מתיתיהו לפני יישור גיאומטרי (מימין) וצילומים תרמי ורגיל מיוחסים אחד לשני לאחר יישור גיאומטרי (משמאל)

חילוץ טמפרטורות ומציאת הקשר בין טמפרטורת הנוף ומצב המים בעץ: בשנה הראשונה נעשה שימוש בעיגון היחסי לצורך זיהוי פיקסלים של נוף. בשנה השניה השתמשנו רק במיקום היחסי על-גבי הצילום התרמי לחילוץ טמפרטורות של נוף העצים. שורות ועצי עניין זוהו במרחב הצילום. על-פי הציקום חולצו הפיקסלים של כל חזרה בנפרד וחושבו הממוצע, השכיח, ממוצע של 33% הנמוכים ביותר [11], וממוצע לאחר מיסוך של הקרקע [11]. ערכים אלו הושוו לערכי SWP על מנת לבדוק את הקשר בין מצב המים של הצמח לטמפרטורה ולבחון את היכולת של הצילום התרמי האלכסוני לזהות מצבי מים שונים לאורך מרחב הצילום ביחס ליכולת ההפרדה המתקבל מערכי SWP.

ד. תוצאות

דיוק היישור הגיאומטרי

ההשוואה בין נקודות שהמיקום הגיאוגרפי שלהם ידוע במרחב הצילום מראה כי הטעות עולה עם המרחק בין כל שתי נקודות. באופן כללי טווח הטעויות הוא בין סנטימטרים בודדים ועד למטר וחצי עם ממוצע של 0.6 מ' (פירוט בדו"ח שנה ראשונה).

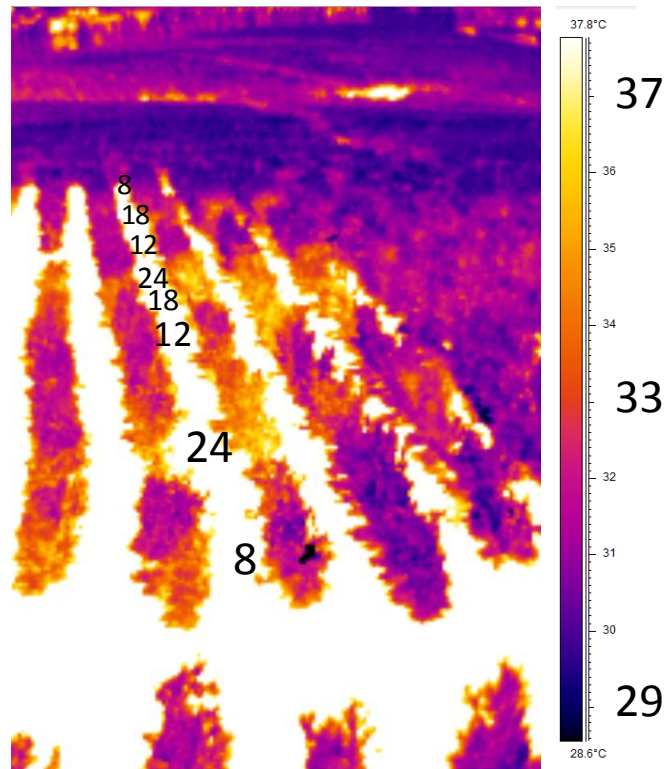


איור 8: סימון מספרי עצים במרחב התמונה

באמצעות היישור הגיאומטרי פותח מודול בתוכנה אשר באמצעות המרחקים בין העצים מסמן את מספרי העצים מן העץ הראשון הקרוב לנקודת הצילום (איור 8). המודול הזה סייע באיתור העצים שהיו תחת הטיפולים השונים ושימש להפקת הטמפרטורה שלהם. המודול הזה יכול גם להוות את הבסיס לדו"ח לחקלאי.

השוואה בין טמפרטורות נוף ובין SWP :

בשנה הראשונה התוצאות שהתקבלו הראו על התאמה חלקית בלבד בין הטמפרטורות ובין SWP. הנחנו כי מדובר בזיהוי לא נכון של אתרי התקלות על-גבי הצילום. הנחה זו הסתמכה על מאפייני המערכת והתוכנה המבצעת את היישור. בשנה השניה שיפרנו את המערכת (למשל, השתמשנו במד זוויות אלקטרוני שסיפק לנו את כלל זוויות הצילום בעוד שבשנה הראשונה לא כל הזוויות היו זמינות לנו) ואת התוכנה ליישור גיאומטרי. לפיכך, התוצאות בדו"ח הנוכחי מתייחסות לצילומים והמידות של השנה השניה בלבד. איור 9 מציג צילום אחד מהעצים המטופלים של התפוח. ניתן לזהות חזותית את הטיפולים שדימו סתימות 18, ו-24 ברים ואלו שקבלו השקיה משקית או עודפת 12, ו-8 ברים.



איור 9: צילום תרמי של השורות בהן בוצעו הטיפולים. במספרים מסומנים הטיפולים, מימין מקרא של הטמפרטורות

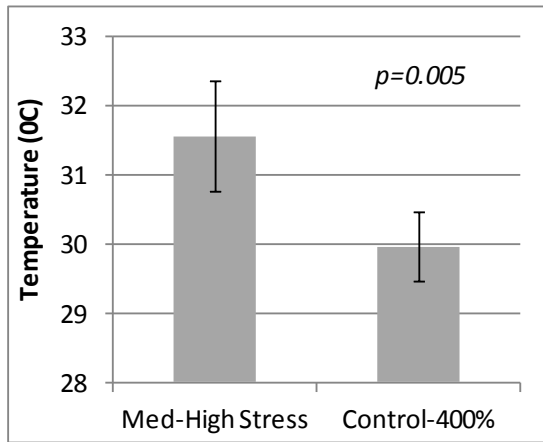
תפוחי עץ: בהשוואת ערכי SWP בין הטיפולים נמצא כי הטיפולים מתחלקים לשתי קבוצות הנבדלות זו מזו בצורה מובהקת: (1) השקיה רגילה והדמיה של פריצה; (2) שני הטיפולים שדימו סתימות בעוצמות שונות (איור 10). לפיכך, כאשר מקבצים את הטיפולים לשתי קבוצות, הקבוצות נבדלות ביניהן גם בטמפרטורה ($p=0.005$; איור 11). עדיין יש לציין כי המדד SWP נמצא רגיש יותר מאשר מדד הטמפרטורה: בעוד ההפרש בערכי SWP בין שתי הקבוצות עומד על כ-14 ברים שהם 66% מטווח הערכים, ההבדל בין הטמפרטורות הינו 1.5 מעלות בלבד שהינו 37% מטווח ערכי הטמפרטורות. כאשר מחשבים את מדד העקה (טמפ' מיני' ומקס' שוות לטמפ' של ההשקיה בעודף וטמפ' האוויר+5 מעלות, בהתאמה) הרגישות עולה וההפרש בין שתי הקבוצות עולה ל-45%.

נקודות נוספות: כל המדדים הסטטיסטיים של הטמפ' שחושבו (ממוצע, שכית, ממוצע של 33% נמוכים ביותר וממוצע לאחר מיסוך של קרקע) סיפקו תוצאות דומות, לא נמצא הבדל בין חילוץ הטמפרטורות מתוך הצילומים המיושרים ומתוך אלו שלא עברו יישור ($R^2=0.87$; $slope=1$), לא נמצאה השפעה של המרחק על הרגישות בהפרדה בין הקבוצות, אך נמצא הבדל בכושר ההפרדה בין הטיפולים בין שתי השורות. ההבדלים שנמצאו בין השורות מצביעים על הצורך לעבוד עם הליך של עיבוד תמונה המזהה חריגים בקנה מידה של השורה. תוכנה כזו פותחה במסגרת מחקר מקביל ויושמה על צילומים מוטסים וכושר הגילוי שלה נמצא עדיין בבדיקה.

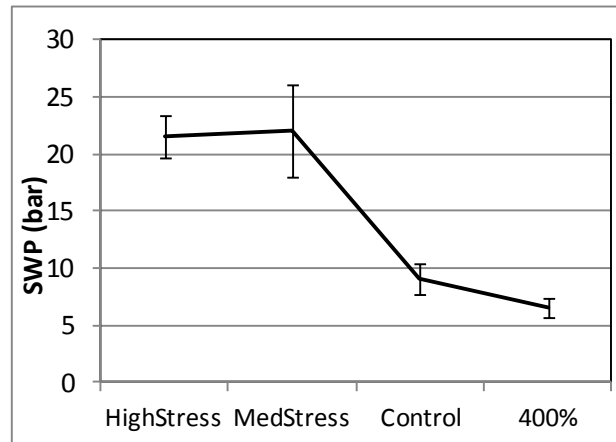
נקטרינות: בהשוואת ערכי SWP בין הטיפולים נמצא כי הטיפולים מחלקים לשלוש קבוצות: (1) השקיה בעודף; (2) השקיה רגילה; (2) שני הטיפולים שדימו סתימות (איור 12). לעומת זאת, בדומה לתפוחים לפי הטמפ' נמצאו שתי קבוצות בלבד (איור 13). גם במקרה של הנקטרינות המדד SWP נמצא רגיש יותר מאשר מדד הטמפרטורה: בעוד ההפרש בערכי SWP בין שתי הקבוצות עומד על כ-15 ברים שהם 71% מטווח הערכים, ההבדל בין הטמפרטורות הינו 1.3 מעלות בלבד שהינו 42% מטווח ערכי הטמפרטורות. כאשר מחשבים את מדד העקה הרגישות אינה משתנה. כמו כן נמצא הבדל בין חילוץ הטמפרטורות מתוך

הצילומים המיושרים ומתוך אלו שלא עברו יישור ($R^2=0.35$; $slope=0.99$) אבל בהוצאת שני חריגים בלבד ($R^2=0.87$; $slope=1$). בכל שאר ההיבטים התוצאות דומות לתוצאות שהתקבלו בתפוחים.

מטע תפוחים

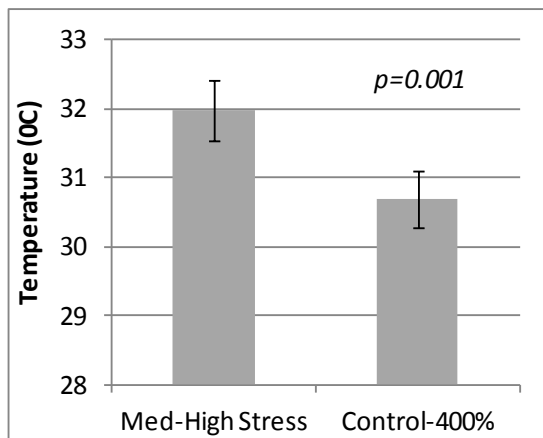


איור 11: ממוצע טמפרטורות של 33% הפיקסלים הנמוכים ביותר לשתי קבוצות הטיפול המובדלות (8 חזרות), סביב הממוצעים מוצגים ערכי confidence ($p=0.05$).

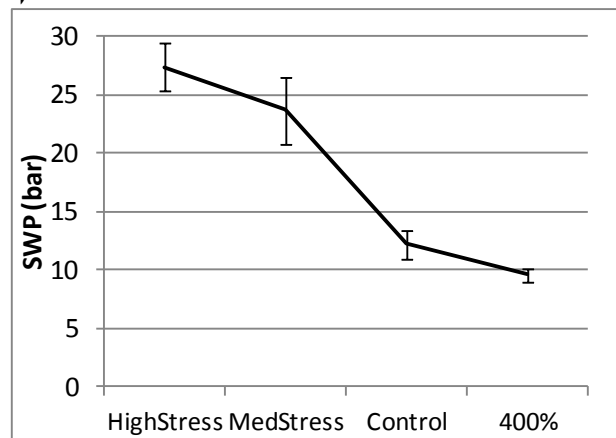


איור 10: ממוצעי SWP לטיפול (4 חזרות), סביב הממוצעים מוצגים ערכי confidence ($p=0.05$).

מטע נקטרינות



איור 13: שכיח טמפרטורות לשתי קבוצות טיפולים (8 חזרות), סביב הממוצעים מוצגים ערכי confidence ($p=0.05$).



איור 12: ממוצעי SWP לטיפול (4 חזרות), סביב הממוצעים מוצגים ערכי confidence ($p=0.05$).

ה. מסקנות והשלכותיהן על המשך ביצוע המחקר

במסגרת המחקר בוצעו צילומים מעל מטעים של תפוחים ונקטרינות הנהנים מהשקיה עודפת יחסית. תוצאות המחקר מראות כי צילומים תרמיים אלכסוניים מעל מטעים אלו יכולים לשמש לאיתור סתימות שקורות לאורך זמן (שלושה שבועות). במחקר מקביל (שעדיין מתנהל) אנו מראים כי צילומים תרמיים מוטסים מעל זיתים מזהים פריצות טוב יותר מאשר סתימות. הסיבה להבדל נובעת ממשטר השקיה שונה: בעוד שבתפוחים ובנקטרינות מנסים להגיע למינימום עקת מים בזיתים ההשקיה המיטבית היא בעקה מתונה. מכל מקום, היכולת לזהות סתימות בקנה מידה קטן יחסית (של מספר עצים בודדים בשורה) באמצעות צילומים תרמיים יכולה לתרום במידה רבה לתהליך של זיהוי תקלות מכיוון שבסקירת המטע ניתן לאתר בעיקר פריצות גלויות אך איתור של סתימות קורה רק כאשר העץ מראה סימנים מתקדמים של חוסר במים. בצורה כזו ניתן לבצע תיקונים של מערכת ההשקיה וליעל את השימוש במים. היתרון של

המערכת הוא ביכולת לכסות שטח נרחב יחסית בזמן קצר אך עם ההצלחה יש לציין את הרגישות הנמוכה יחסית של הצילומים התרמיים בהשוואה למדד ה-SWP.

במסגרת המחקר פותחו תוכנות שיכולות להוות את הבסיס לשימוש בצילומים אלכסוניים לאיתור מיקום התקלות אך עדיין לא יישמו את התוכנה שפיתחנו לאיתור אנומליות על צילומים אלכסוניים. כאמור, יישמנו אותה על צילומים מוטסים והביצועים שלה נבחנים בעונה זו. למרות ההצלחה היחסית המשתקפת מן התוצאות, השימוש בצילומים אלכסוניים למטרה זו עדיין נשאר בגדר אתגר. יש לפתח מימשק יחיד אשר יאפשר לבצע את כלל הניתוחים של הצילומים: יצירת תמונת רצף (פנורמה), יישור גיאומטרי, איתור שורה ועץ ואיתור אנומליות. למרות שזו היתה אחת ממטרות המחקר המערכת במצבה הנוכחי אינה אחודה אלא מורכבת מרכיבים עצמאיים. לאור תוצאות המחקר המקביל הבוחן את השימוש בצילומים מוטסים אנו מאמינים כי מערכת מוטסת טומנת בחובה פוטנציאל גבוה יותר למימוש מערכת לאיתור תקלות באמצעות צילומים תרמיים. לכן, באזורים בהם לא ניתן לבצע טיסות רגילות מעל המטעים בגלל נושאים של ביטחון יש לבחון בעתיד את היכולת להשתמש בכלי טיס בלתי מאויישים (כטב"מ) ולבצע טיסות נמוכות.

1. רשימה ביבליוגרפית

- [1] Fuchs, M., Y. Cohen, and S. Moreshet. 1987. Determining transpiration from meteorological data and crop characteristics for irrigation management. *Irrigation Science*, 8:91-99.
- [2] Evett, S. R., T. A. Howell, A. D. Schneider, D. R. Upchurch and D. F. Wanjura (1996). Canopy temperature based automatic irrigation control: C.R. Camp, E.J. Sadler and R. E. Yoder (eds) *Evaporation and irrigation scheduling, Proceedings of the international conference, San Antonio, Texas*. pp. 207-213.
- [3] Jones, H. G. and Leinonen, I. 2003. Thermal Imaging for study of plant water relations. *Journal of Agricultural Meteorology*, 59(3): 205-217.
- [4] 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.
- [5] Sela, E., Y. Cohen, V. Alchanatis, Y. Saranga, S. Cohen, M. Möller, M. Meron, A. Bosak, J. Tsipris and V. Orollov. 2007. Thermal imaging for estimating and mapping crop water stress in cotton. In: J. V. Stafford (ed.), *European Conference in Precision Agriculture 2007, Skiathos, Greece. Wageningen Acad. Publ. The Netherlands*. Pages: 365-371.
- [6] Alchanatis V., Cohen Y., Cohen S., Moller M., Sprinstin M., Meron M., Tsipris J., Saranga Y., and Sela E. 2009. Evaluation of different approaches for estimating and mapping crop water status in cotton with thermal imaging. *Precision Agriculture*, 11:27-41
- [7] 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.
- [8] אלחנתי, ו. וכהן, י. 2009. צילומים תרמיים ליעול ההשקיה בגפן. *ניר ותלם, גיליון יולי 2009*, 17: 42-44.
- [9] בן-גל, א., אגם, נ., אלחנתי, ו., כהן, י., ירמיהו, א., ציפורי, י., פרסנוב, י., ודג, א. 2008. ניטור עקת מים במטע זיתים: ייתכנות השימוש בצילומים תרמיים. *עלון הנוטע, גיליון אוגוסט-ספטמבר, 2009*, 62: 28-32.
- [10] Ben-Gal A., Agam N., Alchanatis V., Cohen Y., Yermiyahu U., Zipori I., Presnov E., Sprintsin M., and Dag A. 2009. Evaluating water stress in irrigated olives: correlation of soil water status, tree water status, and thermal imagery. *Irrigation Science*, 27:367-376.
- [11] Meron M., Alchanatis, V., Cohen Y., and Tsipris J. 2009. Canopy temperature interpretation of thermal imagery for crop water stress determination. 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: 63-70.
- [12] Lam, Y., Slaughter, D. C., Wallender, W. W., Upadhyaya, S. K. 2007. Machine vision monitoring for control Of water advance in furrow irrigation. *Transactions of the ASABE*, 50(2): 371-378.

- [13] Wachs, J., Stern, H., Burks, T. and Alchanatis, V. 2009. Multi-modal Registration Using a Combined Similarity Measure. In *Applications of Soft Computing: Recent Trends*, Series: *Advances in Soft Computing*, Tiwari, A.; Knowls, J.; Avineri, E.; Dahal, K.; Roy, R. (Eds.), Springer Verlag, Germany, Vol. 36, 2006, pp. 153-163.

3. סיכום עם שאלות מנחות

מטרות המחקר לתקופת הדו"ח תוך התייחסות לתוכנית העבודה.
1. בחינת היכולת להשתמש בצילומים תרמיים לא-רדיומטרים לאיתור תקלות; 2. פיתוח ומימוש הליכים לעיבוד חצי-אוטומטי מהיר ליישור גיאומטרי ולעיון יחסי של הצילום האלכסוני לפי פרמטרים של המטע; עיקרי הניסויים והתוצאות שהושגו בתקופה אליה מתייחס הדו"ח.:
נעשו ניסיונות במטעים של נקטריונות ותפוחים, בהם שובשה אספקת המים לעצים מסוימים לתקופות וכמויות מים משתנות. מטעים אלה צולמו באלכסון באמצעות מצלמות תרמית ורגילה שהותקנו בגובה 20 מ'. פותחה שיטה ליישור גיאומטרי של התמונות התרמיות והתמונות הרגילות. בנוסף לכך, פותחה שיטה להתאמה בין מיקום העצים במטע, לבין מספר השורה ומספר העץ בשורה במטע. ניתוח של טמפרטורת העלווה של העצים הראה שניתן להבדיל בין הטיפולים אשר דימו סתימות ובין ההשקיה המשקית. המסקנות המדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו. האם הושגו מטרות המחקר בתקופת הדו"ח.:
כל המטרות הושגו למעט הפיתוח של מימשק אחד של כלל הליכים בפותחו לאיתור תקלות.
הבעיות שונתרו לפתרון ו/או השינויים שחלו במהלך העבודה (טכנולוגיים, שיווקיים ואחרים); התייחסות המשך המחקר לגביהן, האם יושגו מטרות המחקר בתקופה שנתורה לביצוע תוכנית המחקר.:
מרות ההצלחה היחסית המשתקפת מן התוצאות, השימוש בצילומים אלכסוניים למטרה זו עדיין נשאר בגדר אתגר. לאור תוצאות המחקר המקביל הבוחן את השימוש בצילומים מוטסים אנו מאמינים כי מערכת מוטסת טומנת בחובה פוטנציאל גבוה יותר למימוש מערכת לאיתור תקלות באמצעות צילומים תרמיים. לכן, באזורים בהם לא ניתן לבצע טיסות רגילות מעל המטעים בגלל נושאים של ביטחון יש לבחון בעתיד את היכולת להשתמש בכלי טיס בלתי מאוישים (כטב"מ) ולבצע טיסות נמוכות.
האם הוחל כבר בהפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח:
לא, אנו נציג את התוצאות ביום דיווחים של המיזם.
פרסום הדו"ח: אני ממליץ לפרסם את הדו"ח: (סמן אחת מהאופציות)
רק בספרייה
ללא הגבלה (בספריות ובאינטרנט)
חסוי לא לפרסם