

מערכת צילום-תרמי מוטסת לניטור אוטומטי של תקלות השקיה

AERIAL THERMAL IMAGING FOR AUTOMATIC DETECTION OF IRRIGATION MALFUNCTIONS

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות ופיתוח הכפר

על-ידי

יפית כהן, ויקטור אלחנתי, אשר לוי, סלבה אוסטרובסקי, רומן בריקמן, אלכסנדר קצמן, המכון להנדסה

חקלאית, מנהל המחקר החקלאי, yafitush@volcani.agri.gov.il

ארנון דג, מרכז מחקר גילת, מרכז וולקני, מנהל המחקר החקלאי

יובל כהן, המכון למדעי הצמח, מנהל המחקר החקלאי

עמוס נאור, משה מרון, מו"פ צפון

בשיתוף עם: **אבי כהן, מיכאל ספרינצין, המכון להנדסה חקלאית, מנהל המחקר החקלאי**

יצחק ציפורי, מרכז מחקר גילת, מרכז וולקני, מנהל המחקר החקלאי

Yafit Cohen, Victor Alchanatis, Asher Levi, Slava Ostrovski, Roman Brikman, Alexander Katsman, Agricultural Engineering Institute, ARO, Volcani Center

Arnon Dag, Gilat, ARO, Volcani Center

Yuval Cohen, Plant Science, ARO, Volcani Center

Amos Naor, Moshe Meron, Northern R&D

with: **Avi Cohen, Michael Sprintsin, Agricultural Engineering Institute, ARO, Volcani Center**

Isaac Zipori, Gilat, ARO, Volcani Center

1 תקציר

אין היום דרך שיטתית לזיהוי ואיתור של תקלות ההשקיה בעיקר בגלל עלויות של כח-אדם. מטרת המחקר הכללית היתה לפתח מערך לצילום תרמי מוטס לניטור חצי-אוטומטי של תקלות במערכת ההשקיה.

זיהוי תקלות מדומות: בשנה א' וב' העמדנו ניסויים מבוקרים להדמיה של תקלות השקיה בכרם לענבי מאכל ובמטע זיתים. בוצעו צילומים מוטסים מעל החלקות. הטמפרטורות של העצים תחת הטיפולים השונים הושוו מול ערכי פוטנציאל מים בגזע (פמ"ג) שנמדדו בימי הצילום. התוצאות העיקריות הראו כי ניתן לזהות חריגות של כ-11 ברים בזיתים ושל 3 ברים בגפנים לענבי-מאכל.

זיהוי תקלות אמיתיות: פותח אלגוריתם ראשוני המתבסס על התפלגות הטמפרטורות של החופה לזיהוי אזורים חריגים (חשודים כתקלות). לצורך בחינת הדיוק והאמינות של האלגוריתם נבחרו חמישה אתרים של ריכוזי מטעי זיתים (גשור ורביבים), גפנים (לכיש), תמרים (קליה ואלמוג) ושקדים (לביא). הערכת הדיוק והאמינות של האלגוריתם בשילוב עם הערכת החיסכון הפוטנציאלי בכח אדם מצביעות על הדברים הבאים: 1. על-פי המפה שמייצר האלגוריתם יש לסרוק 14-20% מהשטח, כאשר השטח היחסי מתורגם לחיסכון זמן סריקה של כ-60%; 2. בסריקה של האזורים החשודים יימצאו בד"כ 80% מהפריצות הגלויות לעין; 3. ברב המוחלט של השטח שעל החקלאי לסרוק לא תימצאנה תקלות גלויות לעין. עם זאת, נמצא כי ב-70% מהשטח של אזורים חשודים כפריצות יימצאו עצים שמקבלים עודף מים יחסית לסביבתם וב-90% מהשטח של אזורים חשודים כסתימות יימצאו עצים שסובלים מחוסר מים יחסית לסביבתם. **כלומר, המפה המיוצרת באמצעות האלגוריתם מאפשרת לחסוך כ-60% מזמן הסריקה, לאתר כ-80% מהפריצות הגלויות לעין ולאתר פריצות וסתימות נוספות שאינן גלויות לעין באמינות של 70% ו-90% בהתאמה.**

למרות היתרונות יש להתייחס לאופי החצי-אוטומטי של האלגוריתם שמחייב הכנסה של 4 פרמטרים אמפיריים ויכולים לשנות את ביצועיו מלטע למטע לחד או לשבט: מרחק מזערי לבחירת פיקסלים ליצירת התפלגות, גודל מיקבץ של פריצות וסתימות, גודל שחיקה ודיוק במיקום התקלה. בנוסף, האלגוריתם טרם נבדק על תמרים ובכוונתנו לבדוק אותו בחודשים הקרובים. האמינות של האלגוריתם באיתור תקלות לא גלויות לעין נבחנה על כלל חלקות הזיתים בגשור בטיסה השניה בלבד והחיסכון בכח-אדם נבחן על חלקה אחת. יש לבחון את שניהם על בסיס רחב יותר.

הממצאים בדו"ח זה הינם תוצאות ניסויים.

הניסויים לא מהווים המלצות לחקלאים.

חתימת החוקר _____

אוקטובר 2013

חשוון התשע"ד

2 מבוא

תקלות השקיה (פריצות או סתימות) גורמות לבזבוז ישיר (דליפה למי תהום, למשל) ועקיף (ירידה בערך היבול מניהול השקיה לקוי) של מים. 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 (הדרגתית) של הפיוניות בעוצמות שונות מתבטאת בירידה במוליכות העלים של אדי מים, וזו גורמת בין היתר להתחממות של העלים. במקרים רבים בהשקייה מיטבית 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) להעריך את מצב המים על ידי מדידת טמפרטורת הנוף [1]. חישה מרחוק מהווה אמצעי למיפוי מצב הצמח בשטחים חקלאיים נרחבים. השיטה העיקרית לחישה מרחוק לניטור 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 בעבר כי ניתן להשתמש בצילומים תרמיים להערכה ולמיפוי אמינים של מצב המים בשדות כותנה [5; 4] בכרמי יין [7; 6], בכרמי זיתים [8; 9] ובתמרים [10]. מרבית מחקרים אלו התמקדו במיפוי ערכי פוטנציאל מים בעלה או מוליכות פיוניות. 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 שעלותם קטנה יחסית. כמו-כן בגלל האופי האיכותי הנדרש באיתור תקלות הצורך בצילומים בתחום הנראה להפרדה בין קרקע ונוף של צומח איננו קריטי. Meron et al. [11] פיתחו שיטה סטטיסטית המבודדת טווח טמפרטורות של הנוף בצורה מספקת ללא צורך בתמונות בתחום הנראה. איתור תקלות בהשקיה בקנה-מידה של המטע יכול בין השאר להתבצע באמצעות צילומים תרמיים מוטסים.

3 מטרות המחקר

מטרת המחקר הכללית לפתח מערך לצילום תרמי מוטס לניטור אוטומטי של תקלות במערכת ההשקיה. המטרה הכללית תושג באמצעות השלבים הבאים:

1. בחינת היכולת להשתמש בצילומים תרמיים לא-רדיומטרים לאיתור תקלות;
2. פיתוח ומימוש הליך לעיבוד חצי-אוטומטי מהיר ליצירת פסיפס של צילומים מוטסים לתמונה יחידה של המטע;
3. פיתוח אלגוריתמים חצי-אוטומטיים לעיבוד תמונה לאיתור חריגות ולזיהוי סוגים שונים של תקלות;
4. פיתוח ומימוש אלגוריתמים חצי-אוטומטיים לעיגון יחסי וייחוס גיאוגרפי של הפסיפס לפי פרמטרים של המטע;
5. פיתוח אלגוריתמים אוטומטיים למיפוי סוגי תקלות ולהפקת דו"ח;
6. פיתוח ומימוש מימשק משתמש לחקלאי ככלי עזר ממוחשב לקבלת החלטות באחזקת מערכת ההשקיה.

4 שיטות המחקר

שיטות המחקר התחלקו לשניים: יצירה מכוונת של תקלות השקיה וזיהוי תקלות אמיתיות בשטח במטעים מסחריים.

4.1 יצירה מכוונת של תקלות (שנה א' וב')

במטע זיתים בקיבוץ רביבים וב-6 כרמים סמוכים של ענבי מאכל באזור לכיש יצרנו תקלות מכוונות לדמות פריצות וסתימות של טפטפות. התקלות היוזמות שדימו סתימות הופעלו למשכי זמן משתנים של 2-10 ימים לפני מועד הצילום התרמי לבחינת הרגישות של הצילום באיתור התקלות. לעומתם הטיפול שדימה פריצה הופעל למשך מספר ימים לפני הצילום. במטע הזיתים כל סוג תקלה בוצע בשש חזרות לעומת זאת בלכיש בכל כרם הועמדו כל הטיפולים (כל כרם נחשב חזרה), למעט הצמאה במשך 10 ימים שהועמדה רק בשני כרמים בגלל הסיכון הכרוך בה. כל סוג תקלה הועמד על 3 שורות באורך של 20 מטר.

4.2 יצירת בסיס נתונים של תקלות אמיתיות במטעים מסחריים (שנה ב' וג')

מפת התקלות שנבנית על בסיס האלגוריתם לזיהוי תקלות (מכאן והלאה – אזורים חשודים) צריכה להיות מדויקת ואמינה. המפה צריכה להצביע על מירב התקלות שמצויות בשטח (דיוק) עם מינימום של זיהוי שוא (אמינות). בצורה כזו מתקבלת תוכנית ניטור ותיקון יעילה. לפיתוח ובחינה של אלגוריתם לזיהוי אזורים חשודים נבנה בסיס נתונים באמצעותו ניתן היה לבחון את שני המדדים: דיוק ואמינות. לצורך בחינת הדיוק והאמינות של האלגוריתם נבחרו חמישה אתרים של ריכוזי מטעי זיתים (גשור ורביבים), גפנים (לכיש), תמרים (קליה ואלמוג) ושקדים (לביא).

4.2.1 נקודות אימות לבחינת הדיוק (שנה ג'):

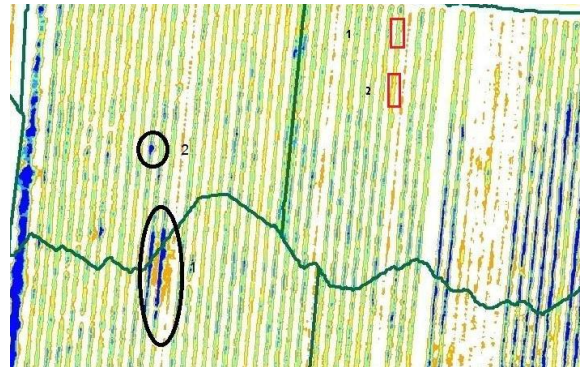
בחינה מקיפה של הדיוק בוצעה בשנה השלישית בענבי מאכל בלכיש, בזיתים בגשור וברביבים ובתמרים בקליה ובאלמוג. ביום הצילום וברב המקרים גם ביום למחרת הצילום (טבלה 1) יצאו סוקרים מצונותים לזוגות ועברו לאורך השורות ובדקו את התפקוד של כל הטפטפות ליד כל עץ. בתיאום עם החקלאים הסוקרים סקרו כל חלקה בשעות ההשקיה שלה על מנת שקל יהיה לזהות אם יש פריצה או סתימה. הצוותים צויידו בממ"ל-ממ"ג (GPS-GIS) המורכבת ממחשב כף-יד (Astech10), מקלט GPS (סטייה מרחבית ממוצעת של 1.5 מטר) ותוכנת ממ"ג ניידת (MobbileMapper10, Spectra Precision, Ltd). כל עץ שליידו נמצאה תקלה סומן באמצעות המערכת וניתן היה לרשום במערכת מספרי חלקה, שורה ועץ, סוג תקלה (פריצה או סתימה), גודל התקלה (קטנה, בינונית וגדולה) והערות כמו האם יש עשבים, האם יש שלולית וגודל שלה, האם העץ יבש, גודל חריג של עץ ועץ חסר. נקודות ציון אלו הועלו על מפת התקלות שזוהו באמצעות האלגוריתם כדי להחליט האם הן זוהו או לא (ראו פרטים בסעיף 4.5.1).

4.2.2 נקודות אימות לבחינת האמינות (שנה ב' וג'):

בחינת אמינות ראשונית: איסוף נתונים לבחינה ראשונית של האמינות בוצע בשנה ב' במטעי זיתים בגשור ושקדים בלביא (טבלה 1). לאחר קבלת מוזאיקה מעוגנת גיאוגרפית של הצילומים, הם סווגו לקבוצות סטטיסטיות טבעיות (ללא הרצת האלגוריתם המתואר לקמן). לאחר הפקת מפה מסווגת סומנו אזורים חריגים שזוהו חזותית כקרים או כחמים מסביבתם (איור 1). כשבוע לאחר הסימון (טבלה 1) יצא צוות לשטח ובדק האם נראים סימנים ברורים בשטח לפריצה (למשל שלולית, עשביה או פריצה בטפטפת גלויה לעין) או לסתימה (טפטפת שתומה או עץ המראה סימנים ברורים של עקה). במידה וכן הדבר נרשם כזיהוי נכון. במידה ולא, נמדדו פוטנציאל המים בגזע (פמ"ג), מדד מקובל להערכת מצב המים בעצים, הן בעץ החשוד והן בעץ לא חשוד בסביבתו הקרובה. מדידות אלו בוצעו על מנת לבדוק האם למרות שאין סימנים

גלויים של תקלה עדיין קיימים הבדלים במצב המים אותם הצילום מזהה. כל המדידות נעשו בשלוש שעות סביב צהרי היום (30:14-11:30 בערך).

איור 1: דוגמא לסימון של אזורים חשודים לתקלות על-גבי צילום תרמי מסווג לפי קבוצות טבעיות. זיתים, גשור, 22.9.2011.
מקרא צבעים: **לבן** - קרקע, **כתום** - קרקע רטובה או פיקסלים מעורבים של קרקע וצמח, **צהוב**, **תכלת**, **כחול בהיר** ו**כחול כהה** - טמפרטורות צמח הולכות ויורדות, כאשר מצב מים הוא בקשר הפוך עם הטמפרטורה. בשחור מסומנים אזורים חשודים מסומנים כפריצות ובכתום מסומנים אזורים חשודים כסתימות. ניתן לשים לב כי אזורים חשודים כפריצות נראים בולטים יותר באמצעות הצילום מאשר אזורים החשודים כסתימות.



בחינה מקיפה של האמינות: איסוף נתונים לצורך בחינה מקיפה של האמינות בוצע בשנה ג'. ראשית, הנתונים שנאספו לדיוק לגבי מיקום תקלות נראות לעין שמשו לבחינת האמינות של האלגוריתם בהכוונה לתקלות הנראות לעין. בנוסף, נאספו נתונים לבחינת האמינות של האלגוריתם בהכוונה לתקלות או בעיות אחרות שאינן נראות לעין. ביום קבלת הצילומים המוטסים לאחר יצירת מוזאיקה מעוגנת גיאוגרפית (בד"כ יומיים מיום הצילום; טבלה 1) הורץ האלגוריתם לזיהוי אזורים חשודים ועל מפת האזורים החשודים הוצבו נקודות הציון של התקלות שזוהו בשטח (ראו סעיף קודם). מתוך כלל האזורים החשודים שלא זוהו כתקלות בסקירת השטח נבחרו 15-30 עצים. בסמוך לעצים הללו נבחרו עצי ביקורת, קרי, עצים שלפי האלגוריתם הינם עצים ללא תקלת השקיה. בכל עץ חשוד ועץ בקרה נמדדו ערכי פמ"ג בשני עלים סביב צהרי היום (30:14-11:30 בערך).

4.3 רכישת צילומים מוטסים

צילומים תרמיים מוטסים בוצעו על-ידי חברת "איקרוס" באמצעות מצלמה תרמית של חברת Jenoptik, IR-TCM640, עם רזולוציה של 480X640 פיקסלים, דיוק של $1^{\circ}K$ ורגישות תרמית של $0.05^{\circ}K$. במקביל לכל צילום תרמי בוצע צילום בתחום הנראה. הצילומים בוצעו מגובה של כ-1500 רגל מעל הנוף עם רזולוציה מרחבית של 35 ס"מ לפיקסל בתחום התרמי וכ-5 ס"מ בתחום הנראה. בשנה א', בוצעו צילומים תרמיים בשני גבהים נוספים: 3250 ו-5700 רגל מעל הנוף עם רזולוציות של 75 ו-150 ס"מ לפיקסל בהתאמה במטרה לבחון עד כמה יעילות עיבוד התמונה משתנה עם כושר הפרדה. תוצאות שנה א' הצביעו על ירידה משמעותית בדיוק הזיהוי של חלקי מטע בודדים ובטיב הקשר בין טמפרטורת פני הצמחים לבין מצב המים שלהם עם הירידה ברזולוציה מרחבית של הצילומים התרמיים. לפיכך הצילומים בשנה ב' וגי' בוצעו רק מגובה של כ-1500 רגל מעל פני הים. טבלה 1 מסכמת את הצילומים המוטסים שבוצעו במהלך המחקר ומפרטת את מספר המטעים מתוך הצילום שבהם בוצע סקר לאיתור תקלות (נקודות אימות לבחינת דיוק).

4.4 פיתוח אלגוריתם לזיהוי תקלות השקיה

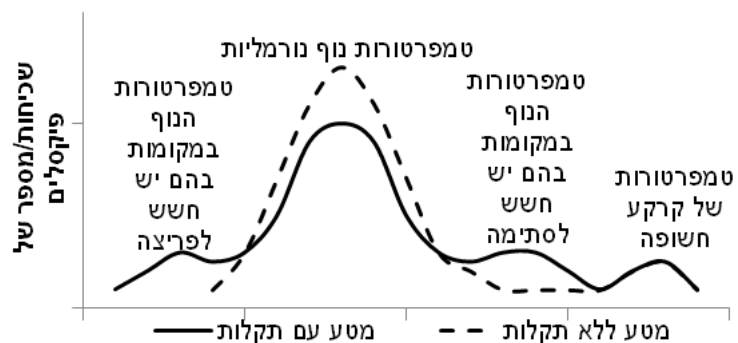
האלגוריתם לזיהוי תקלות על בסיס צילומים תרמיים מתבסס על ניתוח התפלגות הטמפרטורות שמתקבלת מהמטע (איור 2) ומתאים לצילומים רדיומטריים ולא-רדיומטריים כאחד. במילים אחרות, בשום שלב האלגוריתם לא מתייחס לטמפרטורות מוחלטות אלא ליחסים בין טמפרטורות. במהלך שנה ב' של המחקר פותח אלגוריתם ראשוני אשר זיהוי האזורים החשודים בו התבסס על פיקסלים בהם הטמפרטורה היתה גבוהה מסטיית תקן אחת או שתיים ביחס לטמפרטורה הממוצעת של הנוף הצמחי בשורה של עצים. באמצעות הרצת האלגוריתם הזה יצאו הצוותים לשטח לאחר קבלת הצילום

לבחינת האמינות (סעיף 4.2.2). במהלך שנה ג' של המחקר פותח אלגוריתם משופר אשר זיהוי האזורים החשודים בו התבסס על פיקסלים בהם הטמפרטורה היתה גבוהה מסטיית תקן אחת ביחס לטמפרטורה הממוצעת של הנוף הצמחי במטע כולו. הסעיפים הבאים מתארים את פיתוח האלגוריתם המשופר.

טבלה 1: סיכום צילומים תרמיים מוטסים 2010-2012

ניסויים מבוקרים, שנה ראשונה ושניה				
גידול וישוב	תאריך טיסה	טיפולים		
גפן (ענבי מאכל), לכיש	24.8.2010	לדימוי סתימות : עצירת השקיה ל-4,6,10 ימים לפני הצילום		
	8.6.2011	לדימוי פריצות : השקיה בטפטפת נוספת ל-10 ימים לפני הצילום		
	19.8.2011			
זית, רביבים	26.8.2010	לדימוי סתימות : עצירת השקיה ל-4,7,14 ימים לפני הצילום		
	16.6.2011	לדימוי פריצות : השקיה בטפטפת נוספת ל-10 ימים לפני הצילום		
	28.8.2011			
לבחינת המודל באיתור תקלות אמיתיות במטעים, שנה שניה ושלישית				
גידול וישוב	מס' מטעים ושטח (דונם)	תאריך טיסה	תאריכי ניטור לאיתור תקלות בשטח (דיוק)	תאריכי בדיקת האזורים החשודים (אמינות)
גפן (ענבי מאכל), לכיש	165, 26	10.6.2012	10-11.6.2012	14.6.2012
		19.8.2012	19.8.2012	22.8.2012
זית, רביבים	823, 26	17.6.2012	17,18.6.2012	19,21.6.2012
		12.8.2012	12.8.2012	19.8.2012
זית, גשור	555, 20	27.9.2011	לא נבחן	5.10.2011
		24.6.2012	24,25.6.2012	27.6.2012
		26.8.2012	26.8.2012	29.8.2012
שקדים, לביא	345, 13	27.6.2011	לא נבחן	8.7.2011
תמרים, קליה	914, 26	03.6.2012	3.6.2012	6.6.2012
		08.7.2012	8.7.2012	11.7.2012
תמרים, אלמוג	524, 17	03.6.2012	4.6.2012	7.6.2012
		08.7.2012	9.7.2012	12.7.2012
כלל הגידולים (2012)		121 חלקות על שטח של 2,981 דונם		

איור 1: מודל קונספטואלי לניתוח ההתפלגות של הטמפרטורות במרחב הצילום וקישורן למערכת חקלאית.

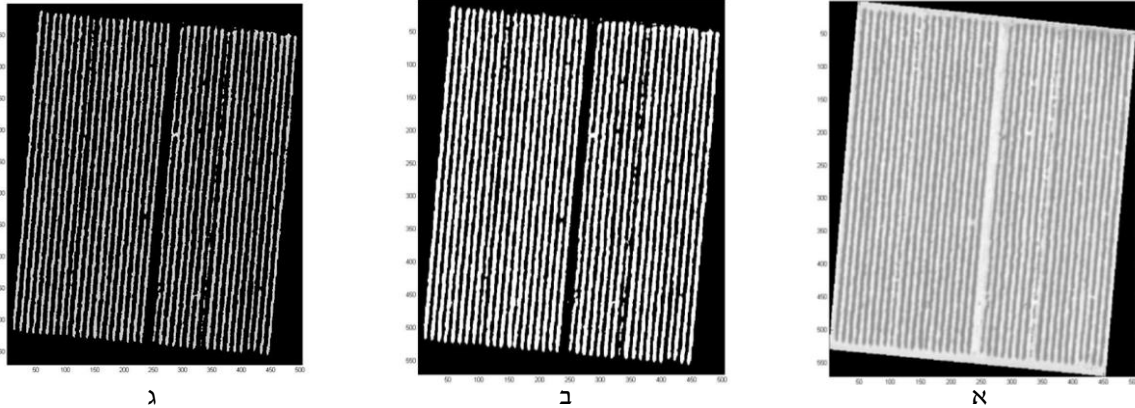


4.4.1 חלוקת המוזאיקה של הצילום התרמי למטעים

הצילום התרמי מתקבל מהחברה כמוזאיקה מעוגנת גיאוגרפית של כלל הצילומים שצולמו במהלך הטיסה. המוזאיקה חולקה לאזורים קטנים יותר (בד"כ לפי גבולות המטעים). החלוקה בוצעה על מנת להסיר אזורים לא רלוונטיים (כמו כבישים, מבנים ומטעים שאינם שייכים לאזור המחקר) מלהשפיע על הניתוח בשלבים הבאים וכן לצמצם את התפלגות הטמפרטורות לפי מטעים בהם השונות בהיבט של השקיה, זן וגיל העצים אמורה להיות קטנה באופן יחסי.

4.4.2 חילוץ פיקסלים של צומח

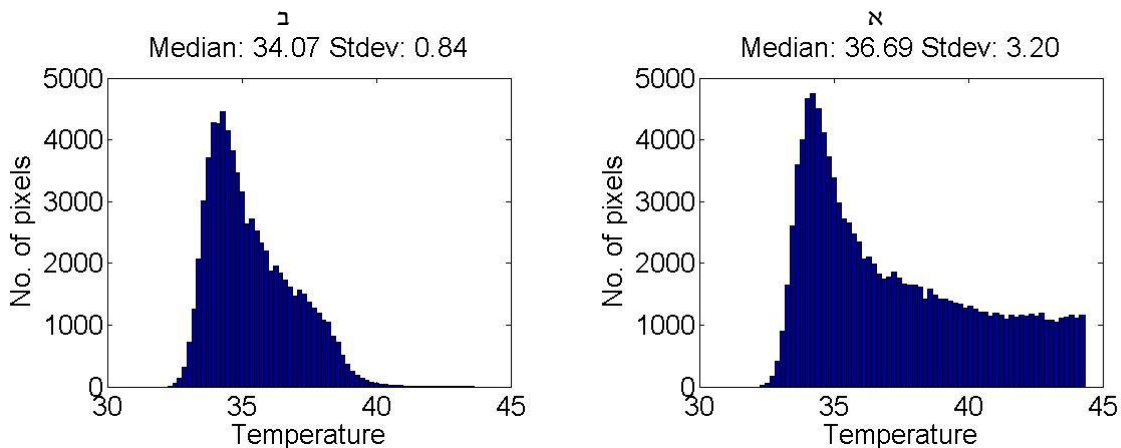
הפרדה בין פיקסלים של צומח וקרקע בוצעה באמצעות שימוש באלגוריתם של Otsu [12] המיועד להפרדה סטטיסטית בין שתי קבוצות, כאשר ההנחה היתה שלמרות שאין מדובר בהתפלגות בימודלית אלו שתי הקבוצות המובחנות ביותר בהתפלגות הטמפרטורות (איור 1). דוגמא לפלט של האלגוריתם מוצג באיור 2.



איור 2: צילום תרמי מקורי (ערכים רציפים) (א), רסטר בינארי מחולק לצומח וקרקע באמצעות אלגוריתם Otsu (ב) ולאחר שחיקה בגודל של פיקסל אחד (ג)
הצילום הוא ממוצע של זיתים בגשור, 26.8.2012

4.4.3 הסרת פיקסלים מעורבים

חילוץ הפיקסלים של הצומח באמצעות אלגוריתם Otsu מותיר פיקסלים מעורבים של צומח וקרקע בעיקר בגבול בין הצומח והקרקע. איור 3 א מציג את ההיסטוגרמה של הפיקסלים של הצומח מהצילום המחולק (איור 2ב) ומראה כי היא מכילה ערכי טמפרטורות בטווח של 32.5-45 מעלות, עם זנב ארוך בטווח שבין 37-45 מעלות.



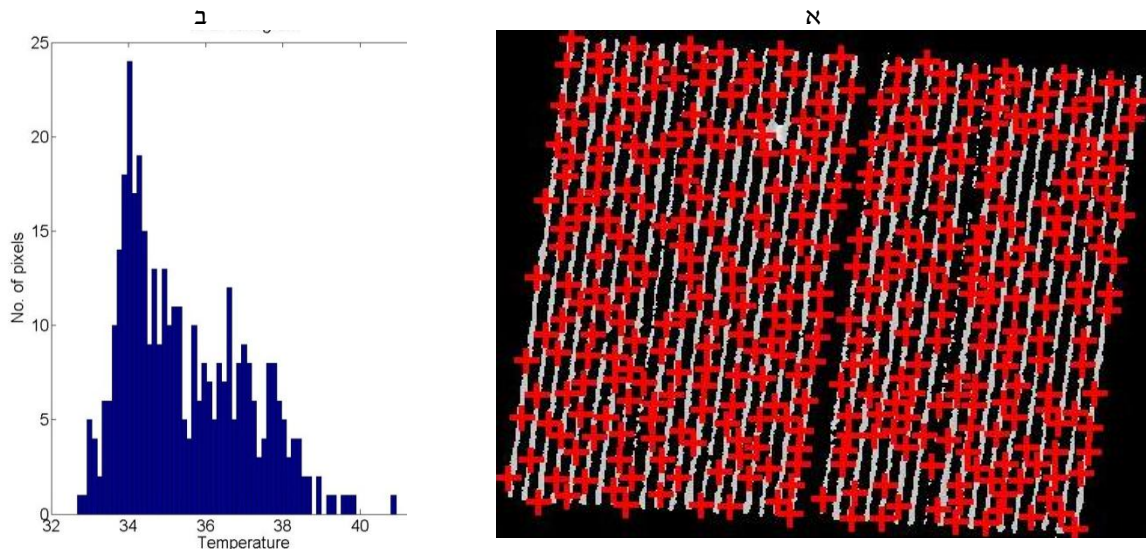
איור 3: היסטוגרמה של הפיקסלים של הצומח מהצילום המחולק באמצעות Otsu (א) ולאחר הסרת חלק ניכר מהפיקסלים המעורבים באמצעות שחיקה בגודל פיקסל 1 (ב)

הזנב הארוך מתקבל בעיקר בשל פיקסלים מעורבים. על מנת להסיר את הפיקסלים המעורבים או לצמצם את מספרם בוצעה "שחיקה" (Erosion) של האובייקטים של הצומח בגודל של פיקסל אחד. לאחר תהליך ה"שחיקה" מתקבלת תמונה בינארית אשר הפיקסלים בה מייצגים טוב יותר את התפלגות הטמפרטורות של הצומח. את הצילום המתקבל לאחר ביצוע ה"שחיקה" ניתן לראות בשגיאה! מקור ההפניה לא נמצא. ג2 ואת ההיסטוגרמה באיור 3ב. שורות הצומח הצטמצמו (איור ג2) וחציון הטמפרטורות של הצומח

ירד מכ- 37°C ל- 34°C , סטיית התקן ירדה מ-3 ל-1 והזנב העבה התקצר והתכווץ (איור 3ב). עדיין ניתן לראות כי ההתפלגות איננה נורמאלית לגמרי וקיים זנב של פיקסלים מעורבים שנתרו.

4.4.4 סיווג פיקסלים חשודים כתקלות והפקת מפה

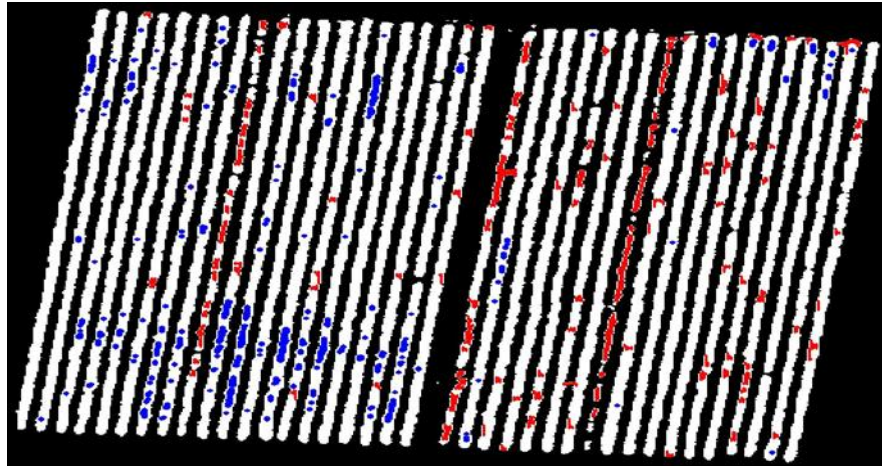
על בסיס התפלגות הטמפרטורות של הצומח ניתן לאתר פיקסלים בעלי טמפרטורה גבוהה ונמוכה מן הממוצע לפי גודל סטיית התקן. חישוב החציון וסטיית התקן התבסס על מבחר פיקסלים במרחק מזערי ביניהם כדי לבנות התפלגות טמפרטורות ללא אוטוקורלציה מרחבית. לשם כך, חושב הסמי-ואריאנס וממנו חולץ ה-range. הסמי-ואריאנס חושב לצילום יחיד מייצג לזיתים וה-range שנבחר עבור כלל הצילומים היה 15.75 פיקסלים שהם כ-5.5 מטרים. דוגמא לפיקסלים נבחרים במרחק מזערי מוצגת באיור 4א וההיסטוגרמה באיור 4ב. בהשוואה להיסטוגרמה של כלל הפיקסלים של הצומח לאחר שחיקה (איור 3ב) מספר הפיקסלים ירד משמעותית מ-69653 ל-361 פיקסלים אך עם זאת החציון וסטיית התקן של שתי הסדרות דומים. הבימודליות של התפלגות הטמפרטורות של הצומח והפיקסלים המעורבים מודגשת באמצעות הפיקסלים הנבחרים.



איור 4: פיקסלים של צומח נבחרים בעלי מרחק מזערי של 5.5 מטרים (א) וההיסטוגרמה שלהם (ב)

לאחר ביצוע החישובים הסטטיסטיים, נבחר כל פיקסל. פיקסל אשר הפרש המוחלט בין הטמפרטורה שלו ובין הטמפרטורה הממוצעת הינו מעל גודל נבחר של סטיית תקן (1, 1.5 ו-2 סטיות תקן) סומן כפיקסל חשוד לתקלת השקיה, כאשר הפרש חיובי מעיד על סתימה והפרש שלילי על פריצה. על מנת לצמצם הערכת יתר של פיקסלים חשודים כתקלות השקיה (False Positive) רק מקבצים של פיקסלים הגדולים מערך סף נבחר, סווגו כחשודים. לסיווג אזורי חשודים כפריצה נבחר ערך סף אמפירי של 10 פיקסלים ולסיווג אזורי חשודים כסתימה נבחר ערך סף אמפירי של 3. לאחר סיווג מקבצי פיקסלים המייצגים תקלה (איור 5), חושב מרכז המסה (Central of mass) לכל מקבץ פיקסלים והרסטר של מרכזי המסה הומר לשכבה מרחבית וקטורית (point shapefile) מעוגנת גיאוגרפית לפי רשת ישראל החדשה עם טבלה המכילה את המאפיינים הבאים: סוג התקלה, וגודל התקלה (בהתאם למספר הפיקסלים שנמצאו). שכבה זו יכולה להיטען באמצעות יישום של ESRI ArcGIS online על טלפון חכם והחקלאי באמצעותה יכול להגיע אל אזור התקלה ולאתרה בקלות.

איור 5: סיווג מקבצי פיקסלים כחשודים (כסתימות אדום) וכפריצות (כחול)



4.5 הערכת ביצועי האלגוריתם בזיהוי תקלות

4.5.1 בחינת דיוק האלגוריתם

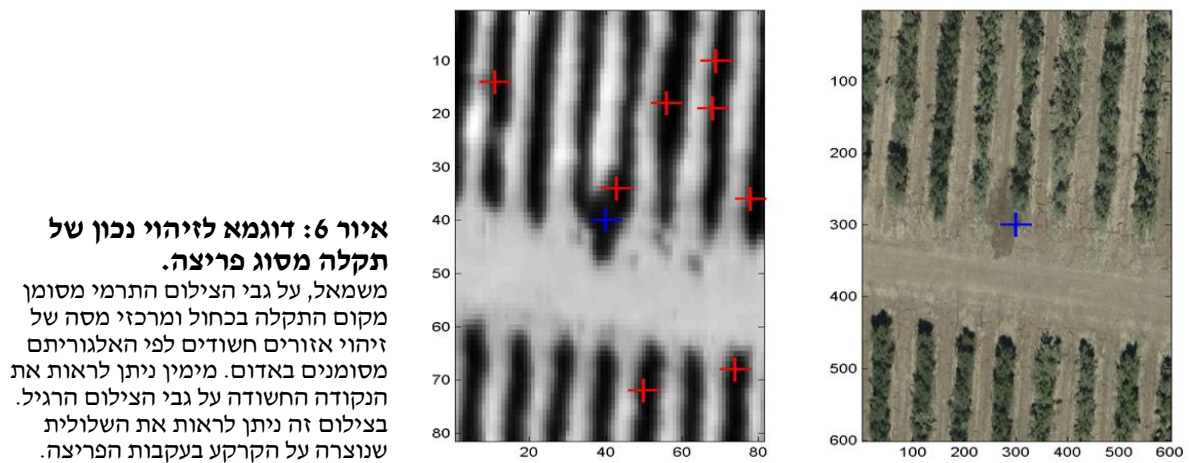
בסעיף 4.2 תואר הליך איסוף נקודות אימות לתקלות אמיתיות בשטח. למרות השאיפה לאסוף נקודות אימות לפריצות ולסתימות כמעט ולא ניתן היה לאתר בעין סתימות אלא רק פריצות. לפיכך, בחינת דיוק האלגוריתם נעשתה על פריצות בלבד. חישוב אחוז הדיוק נעשה על-פי השלבים הבאים:

1. טעינת כל השכבות הוקטוריות עם כל הנקודות שנמצאו כפריצות (עם כל הפרמטרים השונים עבור אותה נקודה) אותן איתרו הצוותים בהליכה בשטח (סעיף 4.2.1).
2. טעינת כל השכבות הוקטוריות של נקודות מרכזי המסה של התקלות שזוהו באמצעות האלגוריתם (סעיף 4.4.4) לפי החלוקה למטעים ובחירת הנקודות החשודות כפריצות.
3. עבור כל נקודה שזוהתה בשטח כפריצה, חושב המרחק המינימאלי בינה ובין הנקודות שזוהו כחשודות כפריצה באמצעות האלגוריתם. אם המרחק ביניהן נמצא קטן מ- 10 מ', נקבע כי האלגוריתם זיהה את הפריצה ואם נמצא מרחק גדול מ- 10 מ' נקבע כי האלגוריתם לא זיהה את הפריצה. דוגמא לזיהוי פריצה ניתן לראות באיור 6. הנקודה הקרובה ביותר שנמצאה בשלב 1 לנקודת הפריצה משלב 2, נמצאה במרחק של 2.28 מ'.
4. אחוז הדיוק נקבע לפי החלק היחסי של הפריצות שזוהו ביחס לכלל הפריצות שזוהו בעין בשטח. אחוזי הדיוק חושבו לכל גידול, בכל אתר בכל תאריך טיסה.

4.5.2 בחינת אמינות האלגוריתם

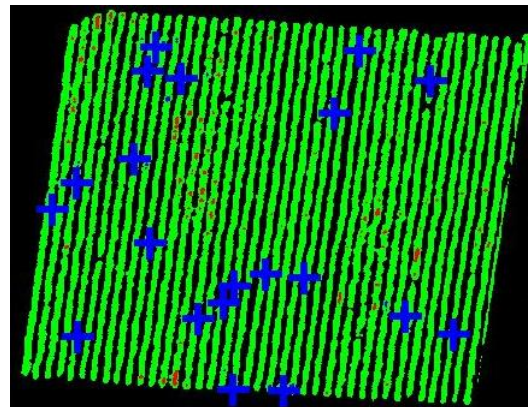
אמינות האלגוריתם חושבה הן לגבי פריצות גלויות לעין והן לגבי פריצות וסתימות שאינן גלויות לעין. אמינות ביחס לפריצות גלויות לעין: הדיוק מבטא את החלק היחסי של הפריצות אותן מזהה האלגוריתם. הבעיה היא שכל שזוהה האלגוריתם יותר מיקבצים חשודים כן יגדל הדיוק אך אמינותו תיפגע. זיהוי עודף מיקבצים חשודים (הערכת יתר או טעויות מסוג False Positive) יוביל למצב שבו החקלאי יישלח לנקודות רבות שבהן אין תקלות אמיתיות. חישוב שטח האזור העודף מתוך השטח המזוהה כפריצות בוצע באופן הבא: חושב המרחק בין כל מרכזי המסה של התקלות שזוהו כאזור חשוד לבין כל נקודות הפריצה שנמצאו בשטח. כל הנקודות החשודות שהמרחק ביניהן ובין פריצה בשטח היה קטן מ-10 מטרים סומנה כזיהוי נכון וכל השאר כטעות מסוג False Positive. איור 7 מציג דוגמא לאזורים חשודים שזוהו באמצעות

האלגוריתם שחלקם בסמוך לפריצה בשטח וחלקם לא. אמינות האלגוריתם חושבה כחלק היחסי של השטח של האזורים החשודים שבסמוך אליהם היתה פריצה ביחס לשטח הכללי של האזורים החשודים.



לדוגמא באיור 7 נמצאו 126,566 פיקסלים השייכים לצומח (סעיף 4.4.2), 1973 פיקסלים זוהו כחשודים (המהווים 1.6% משטח הצומח), מתוכם, 515 פיקסלים (המהווים 26% מכלל השטח החשוד) נמצאו כנכונים, קרי, כאלה אשר בקרבתם נמצאה פריצה ואילו 1458 (המהווים 74% מכלל השטח החשוד) נמצאו כ- False Positive. במילים אחרות, אמינות האלגוריתם לאיתור פריצות גלויות לעין הינה 26% בלבד.

איור 7: דוגמא לאזורים חשודים שזוהו באמצעות האלגוריתם שחלקם בסמוך לפריצה שנמצאה בשטח (כחול) וחלקם לא (אדום)



אמינות ביחס לתקלות שאינן גלויות לעין: אמינות האלגוריתם לתקלות שאינן גלויות לעין חושבה הן לגבי פריצות והן לגבי סתימות. כאמור בסעיף 4.2 מתוך האזורים החשודים נבחרו עצים חשודים ועצי ביקורת בהם נמדדו פמ"ג. בכל נקודה שנבחרה לבדיקה במידה והיה הבדל מוחלט של יותר מ-2 בריס בין ערכי הפמ"ג של העץ החשוד ועץ הבקרה ניתן היה לומר כי האלגוריתם זיהה חריגה אמיתית שיש לבדוק אותה. אחוז האמינות נקבע לפי החלק היחסי של הנקודות בהם נמצא הפרש גדול מ-2 בריס ובין כלל הנקודות שנבדקו. אחוז האמינות נקבע לפריצות ולסתימות בנפרד. בגלל סיבות טכניות בשלב זה בחינת זו של האמינות בוצעה למטעי הזיתים בגשור בתאריך הטיסה השני.

4.5.3 שיעור זמני סיור בשטח לאיתור תקלות בהכוונת האלגוריתם והשוואה עם זמני סיור שגרתיים
יש להדגיש כי אחוזי הדיוק והאמינות משלימים אחד את השני בנוגע להערכת ביצועי האלגוריתם. הדיוק מתייחס לרמת הזיהוי של האלגוריתם את הפריצות הגלויות לעין ולמעשה בוחן את איכות האלגוריתם אל

מול מה שעושה בשטח החקלאי. מכל מקום, לאלגוריתם יתרון בזה שהוא יכול לקצר את הזמן באיתור אחר תקלות באמצעות הכוונה של החקלאי אל האזורים החשודים בלבד. דיוק גבוה בשילוב של אמינות גבוהה אומר כי החקלאי יעבור בצורה מהירה יותר על השטח ועדיין יגלה את מירב הפריצות. כמחקר במסגרת המיזם לחיסכון בכח אדם ביטאנו את החיסכון הפוטנציאלי בכוח אדם באמצעות השוואה בין זמן המעבר בשטח בהכוונת האלגוריתם לעומת זמן המעבר הרגיל. חילקנו את סוגי המעברים לארבעה:

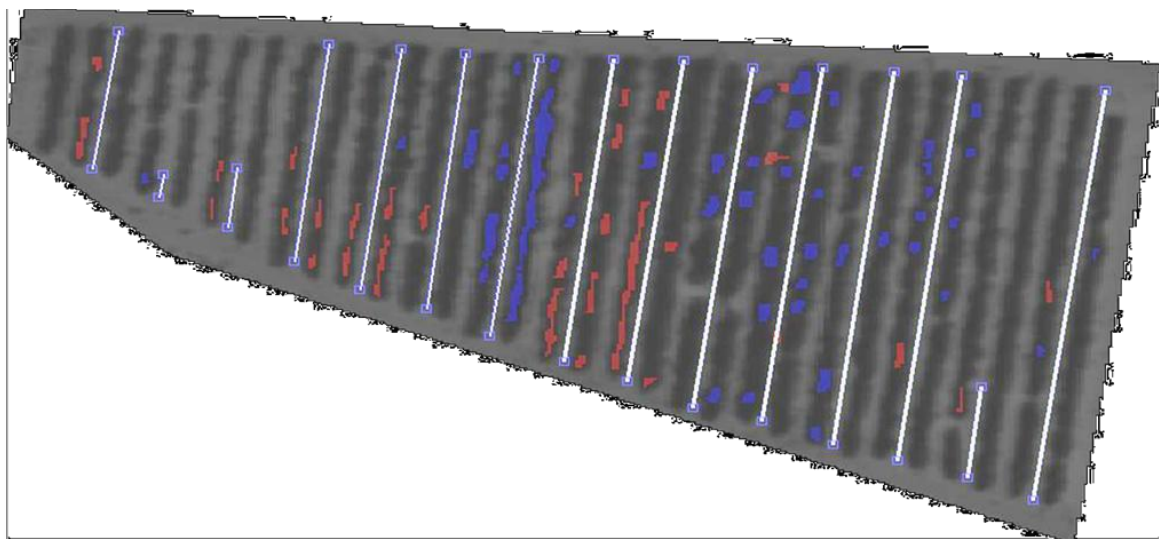
1. מעבר ללא הכוונה: נעשה במהירות נמוכה מכיוון שמדובר למעשה בתהליך של חיפוש אחר תקלות.

2. מעבר עם הכוונה של האלגוריתם בין שתי שורות שבשתייהן יש אזורים חשודים: נעשה במהירות נמוכה בדומה למעבר ללא הכוונה כי גם כאן מדובר בתהליך של חיפוש.

3. מעבר עם הכוונה של האלגוריתם בין שתי שורות שרק באחת מהן יש אזור חשוד: נעשה במהירות נמוכה אך קצת יותר גבוהה ממעבר ללא הכוונה.

4. מעבר עם הכוונה באזור לא חשוד: נעשה במהירות גבוהה יחסית.

המהירויות שבחרנו לצורך החישוב היו: למעברים מסוגים 1 ו-2 בחרנו מהירות של 5 קמ"ש, למעברים מסוג 3 ו-4 בחרנו מהירויות של 8 ו-20 קמ"ש בהתאמה. לצורך שיעור החיסכון בחרנו בשלב זה מטע אחד של זיתים וחישבנו את אורכי סוגי המעבר השונים לפי הזיהוי של האלגוריתם (איור 8).



איור 8: סימון הדרך שיעבור החקלאי בשטח לאיתור תקלות בהכוונת האלגוריתם באדום, אזורים חשודים כסתימות ובכחול אזורים חשודים כפריצות

5 תוצאות

5.1 זיהוי תקלות מדומות (שנה א' וב')

באמצעות ששת הצילומים שבוצעו בשנים א' וב', שלושה בענבי מאכל בלכיש ושלושה בזיתים ברביבים ניתן היה לזהות את טיפולי הקצה כלומר טיפולים המדמים תקלות לאורך זמן של כ-10 ימים בגפן ו-14 יום בזיתים. בגפן, רק באחת מתוך מתוך 3 טיסות ניתן היה לזהות את הפריצות המדומות ולכן, על-פי הנתונים הללו לא ניתן לומר בוודאות כי ניתן לזהות פריצות לאורך זמן בגפן לענבי מאכל. זאת כנראה בגלל שמדובר בגידול המושקה בעודף.

במונחים של פמ"ג, ניתן לומר כי כאשר נוצר הפרש של 11 ברים בממוצע מפמ"ג של עצים תחת השקיה רגילה ניכרו הבדלים מובהקים בטמפרטורה של החופה של הזיתים ולא משנה אם מדובר היה בהפרש

חיובי (חשד לסתימה) או בהפרש שלילי (חשד לפריצה). טווח ההפרשים בזיתים אשר הובילו להבדלים מובהקים בטמפרטורות הנוף נע בין 7.4 ל-13.9 ברים. בגפן, לעומת זאת ניכרו הבדלים מובהקים בטמפרטורת החופה בהפרש של 3 ברים בלבד מהשקיה רגילה, כאשר מדובר היה בטיפולים שדימו סתימות. טווח ההפרשים בגפן אשר הובילו להבדלים מובהקים בטמפרטורות הנוף נע בין 0.3 ל-6.1 ברים.

5.2 בחינת אמינות ראשונית¹

בחינת אמינות ראשונית נעשתה בשנה ב' בזיתים בגשור. מתוך 27 אתרים שאותרו כחשודים לפריצות 15 זוהו בשטח כפריצות גלויות לעין. בנוסף, בחמישה נוספים בהם נבדק פוטנציאל המים בגזע התגלו הבדלים מובהקים המעידים על כך שהעצים באתרים הללו נהנים מעודף מים (ויש לבדוק את הסיבה לכך - פריצה חבויה בטפטוף טמון או סיבה אחרת) באתר אחד מדובר היה בהשפעה של עץ חסר הגורם בעקיפין לסביבה שלו להינות מעודף מים ואילו 6 אתרים נוספים נותרו ללא הסבר. מתוך הנתונים הללו ניתן לומר כי למערכת אמינות ברמה סבירה (סובלת מ-26% הערכת יתר - 6 אתרים שלא ניתן להם הסבר ומקרה אחד של סמיכות לעץ חסר).

5.3 הערכת השטח היחסי שיש לסרוק במטע

על-פי האלגוריתם

טבלה 2: אחוז השטח שזוהה כאזורים חשודים לתקלות

גידול וישוב	תאריך טיסה	פריצות	סתימות	כללי
גפן, לכיש	12.10.6	10%	10%	20%
	19.8.12	12%	9%	20%
זיתים, גשור	24.6.12	5%	5%	10%
	26.8.12	5%	8%	13%
זיתים, רביבים	17.6.12	7%	7%	14%
	12.8.12	8%	6%	14%

טבלה 2 מציגה את החלק יחסי של האזורים החשודים כפריצות וכסתימות בגפנים בלכיש ובזיתים בגשור וברביבים. חישובים אלו וכן חישובי דיוק ואמינות בתמרים בקליה ובאלמוג טרם בוצעו בגלל ההבדל בצורת הניתוח של תמרים לעומת שני הגידולים האחרים. הניתוח אמור להתבצע בחודשים הקרובים. ניתן לראות כי

ברב המקרים כצפוי מחצית מהאזורים החשודים מזוהים כפריצות ומחציתם כסתימות. בגפן אחוז האזורים החשודים גדול יותר מאשר בזיתים (20% מול כ-14%). בכל מקרה האלגוריתם מאפשר התמקדות באזורים קטנים יחסית של המטע ללא צורך בסריקה עיוורת של המטע כולו.

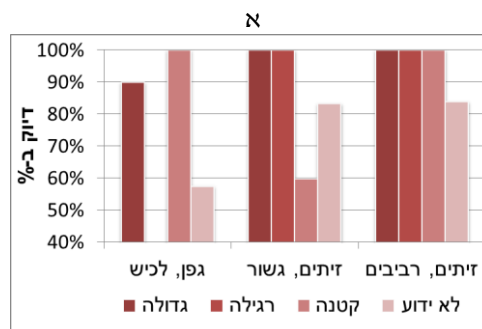
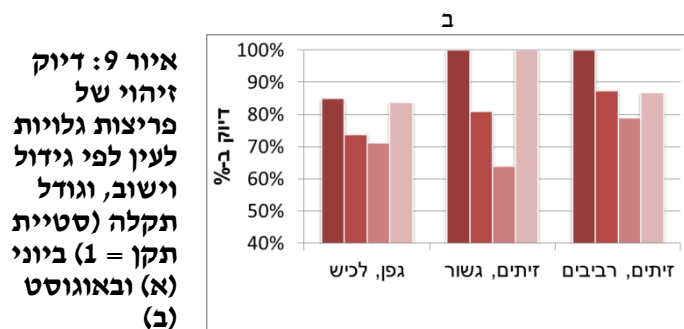
5.4 דיוק האלגוריתם בזיהוי פריצות גלויות לעין

טבלה 3 מציגה את הדיוקים של זיהוי פריצות גלויות לעין בגפנים ובזיתים. הדיוקים מוצגים לפי 2, 1.5 ו-1 סטיות תקן. ככל שסטיות התקן גדולה יותר, פחות פיקסלים מזוהים כשייכים לאזורים חשודים ולכן הדיוק יורד. סה"כ זוהו בעין 671 פריצות עם דיוק של 79% כאשר גודל סטיית התקן נקבע ל-1. מתוך התוצאות הללו החלטנו כי ערך סטיית התקן המתאים לזיהוי של תקלות הינו 1 והמשך הצגת התוצאות יתייחס לערך זה. בגפן בלכיש, דיוק הזיהוי של הפריצות גבוה יותר ב-16% באוגוסט לעומת יוני. יכול להיות שהדיוק הנמוך יחסית שהתקבל ביוני נובע מהעובדה כי ביוני הקרקע עדיין נהנית מעודפי מים גדולים. בזיתים בגשור הדיוק גבוה יותר ביוני מאשר באוגוסט אם כי ההבדלים אינם גדולים. באוגוסט יש מספר גדול מאוד של תקלות קטנות. ברביבים הדיוקים דומים בשני המועדים. מעבר לערכים הכלליים, ניתן לראות כי ככל שהתקלה גדולה יותר דיוק הזיהוי עולה (איור 9). למעשה, זיהוי של תקלות גדולות ברב המקרים עומד על 100% ואינו פוחת מ-85%.

¹ פרטים בדו"ח שנה שניה http://www.agri.gov.il/download/files/AerialTIR_SecondYear_v3_hompage_2.pdf

טבלה 3: אחוזי דיוק של זיהוי פריצות גלויות לעין לפי גודל וישוב, תאריכי טיסה וגודל סטיית תקן

STD						מס' דגימות (n)	גודל תקלה	תאריך טיסה	גידול וישוב
1		1.5		2					
לא נכון	זיהוי נכון	לא נכון	זיהוי נכון	לא נכון	זיהוי נכון				
10%	90%	30%	70%	50%	50%	10	גדולה	10.6.12	גפן, לכיש
0%	100%	100%	0%	100%	0%	1	קטנה		
42%	58%	65%	35%	86%	14%	66	לא ידוע		
38%	62%	61%	39%	82%	18%	77	הכל		
15%	85%	51%	49%	83%	17%	47	גדולה	19.8.12	
26%	74%	52%	48%	72%	28%	46	רגילה		
29%	71%	53%	47%	81%	19%	59	קטנה		
16%	84%	32%	68%	68%	32%	31	לא ידוע		
22%	78%	49%	51%	77%	23%	183	הכל		
0%	100%	0%	100%	0%	100%	2	גדולה	24.6.12	זיתים, גשור
0%	100%	50%	50%	100%	0%	2	רגילה		
40%	60%	60%	40%	80%	20%	5	קטנה		
17%	83%	50%	50%	73%	27%	30	לא ידוע		
18%	82%	49%	51%	72%	28%	39	הכל		
0%	100%	29%	71%	29%	71%	7	גדולה	26.8.12	
19%	81%	43%	57%	67%	33%	21	רגילה		
36%	64%	69%	31%	90%	10%	39	קטנה		
0%	100%	0%	100%	100%	0%	1	לא ידוע		
26%	74%	56%	44%	76%	24%	68	הכל		
0%	100%	29%	71%	57%	43%	7	גדולה	17.6.12	זיתים, רביבים
0%	100%	100%	0%	100%	0%	1	רגילה		
0%	100%	50%	50%	100%	0%	2	קטנה		
16%	84%	47%	53%	74%	26%	137	לא ידוע		
15%	85%	46%	54%	74%	26%	147	הכל		
0%	100%	20%	80%	25%	75%	20	גדולה	12.8.12	
13%	88%	50%	50%	69%	31%	16	רגילה		
21%	79%	58%	42%	82%	18%	38	קטנה		
13%	87%	36%	64%	59%	41%	83	לא ידוע		
13%	87%	41%	59%	61%	39%	157	הכל		
21%	79%	48%	52%	73%	27%	671		כללי	



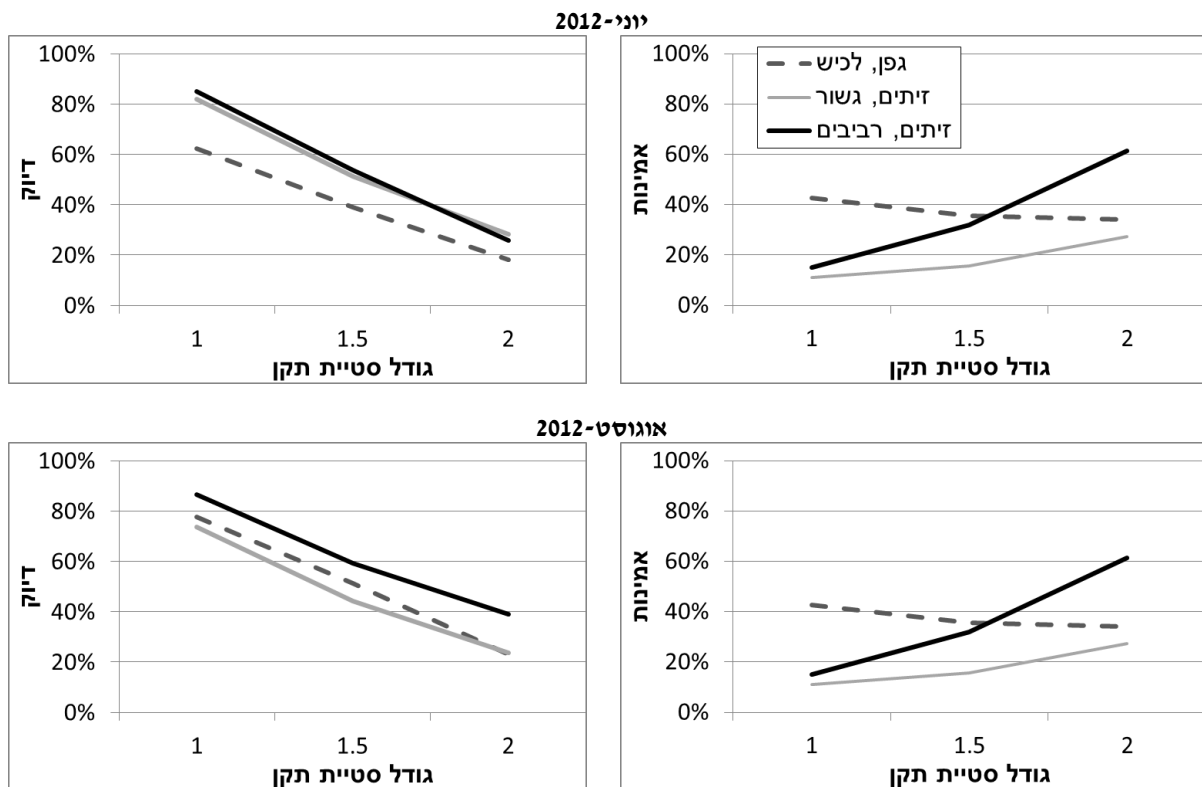
5.5 דיוק ואמינות האלגוריתם בזיהוי פריצות גלויות לעין

טבלה 4 מציגה את אחוזי האמינות של האלגוריתם בזיהוי פריצות גלויות לעין לפי גידול וישוב, תאריך טיסה וסטיות תקן. בנוסף, הטבלה מציגה את אחוז השטח שזוהה כאזורים חשודים. איור 10 מציג את השתנות אחוזי הדיוק והאמינות לפי גודל סטיית תקן לכל חודש בכל גידול וישוב. באופן כללי, ערכי הדיוק גבוהים אך ערכי האמינות נמוכים. בנוסף, כצפוי, ככל שגודל סטיית התקן עולה אחוזי האמינות עולים אך אחוזי הדיוק יורדים (רק במקרה של הגפנים בלכיש ישנה מגמת ירידה בשני המקרים). מכיוון שככל שגודל סטיית התקן עולה אחוזי הדיוק יורדים בצורה משמעותית יותר מאשר העליה באמינות, בחרנו לעבוד עם גודל של סטיית תקן אחת כך נשמר הדיוק הגבוה ביותר עם אמינות קרובה למירבית.

טבלה 4: אחוזי אמינות של זיהוי פריצות גלויות לעין לפי גידול וישוב, תאריכי טיסה וגודל סטיית תקן

גידול וישוב	תאריך	STD	אחוז השטח שזוהה כאזורים חשודים כפריצות	אמינות: אחוז השטח שזוהה נכונה מתוך האזורים החשודים	False positive: אחוז השטח שזוהה לא נכון מתוך האזורים החשודים	אחוז דיוק
גפן, לכיש	6/10/2012	1	10.1%	18%	82%	62%
		1.5	2.3%	20%	80%	39%
		2	0.6%	11%	89%	18%
	8/19/2012	1	9.1%	43%	57%	78%
		1.5	2.8%	36%	64%	51%
		2	0.8%	34%	66%	23%
זיתים, גשור	6/24/2012	1	5.4%	8%	92%	82%
		1.5	1.4%	10%	90%	51%
		2	0.3%	20%	80%	28%
	8/26/2012	1	8.2%	11%	89%	74%
		1.5	2.4%	16%	84%	44%
		2	0.8%	27%	73%	24%
זיתים, רביבים	6/17/2012	1	7.3%	17%	83%	85%
		1.5	1.4%	30%	70%	54%
		2	0.3%	61%	39%	26%
	8/12/2012	1	6.5%	15%	85%	87%
		1.5	1.0%	32%	68%	59%
		2	0.2%	61%	39%	39%

המשמעות של ערכי דיוק גבוהים עם ערכי אמינות נמוכים הינה שבמידה והחקלאי ילך לפי המפה של הפריצות שתיוצר באמצעות האלגוריתם הוא יוכל לזהות את הרב המוחלט של הפריצות הגלויות לעין אך ברב המקומות אליהם הוא יגש לא תימצא פריצה גלויה לעין. עם זאת יש לציין כי אחוז השטח שמזוהה כאזורים חשודים במטע כפריצות הינו קטן מאוד והוא נע בין 7% ל-10% מהשטח בסטיית תקן אחת בגפן ובזיתים בהתאמה (טבלה 4).



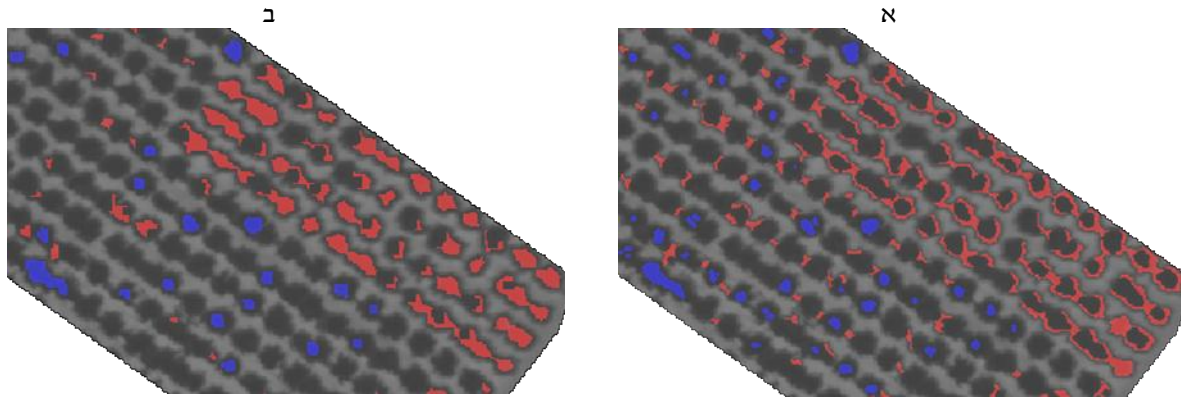
איור 10: השתנות אחוזי הדיוק והאמינות לפי גודל סטיית תקן בכל חודש ובכל גידול וישוב

5.6 אמינות ביחס לפריצות ולסתימות שאינן גלויות לעין

חקלאי עלול להסתייג משימוש במפה בעלת אמינות נמוכה. לפיכך, נותר לבדוק האם האזורים החשודים המזוהים באמצעות האלגוריתם מעידים על תופעה אמיתית של תקלות שאינן גלויות לעין. בבחינת האמינות הראשונית (סעיף 5.2) נראה כי אמנם באזורים חשודים נתגלו עצים הנהנים (או שמא סובלים) מעודף מים שאינו גלוי לעין. בשנת 2012 בחינת האמינות מסוג זה בוצעה הן על סתימות והן על פריצות אך על בסיס נתונים ממטעי הזיתים בגשור מהטיסה באוגוסט בלבד.

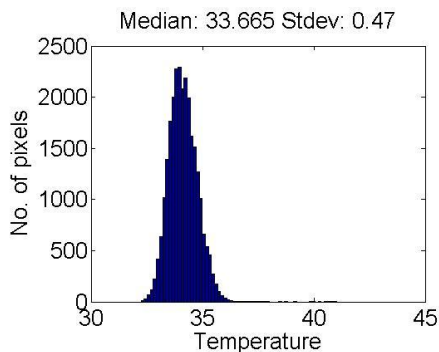
5.6.1 השפעת שחיקה בעוצמות שונות על דיוק ואמינות

האמינות מסוג זה חושבה על בסיס זיהוי של אזורים חשודים בבחירת סטיית תקן אחת אך נבדקה בעוצמות שונות של הסרת פיקסלים מעורבים (קרי, בשחיקה בגדלים של 1-4 פיקסלים (סעיף 4.4.3)). המוטיבציה העיקרית לכך היתה הניתוח החזותי של האזורים החשודים כסתימות במטעי הזיתים ברביבים. איור 11 מציג אזורים חשודים של סתימות במטע של זיתים ברביבים על בסיס שחיקה של פיקסל אחד. רב הפיקסלים שזוהו כאזורים חשודים כסתימות הינם פיקסלים סביב החופה ולא במרכז החופה מה שמצביע על הכללה של פיקסלים מעורבים. יש לציין כי בגפן בלכיש ובזיתים בגשור לא נצפתה תופעה דומה. בכל מקרה, הכללה של פיקסלים מעורבים גורמת לעליה של ממוצע הטמפרטורות ולזיהוי פחות מדויק ופחות אמין של אזורים חשודים כסתימות. בשחיקה של שלושה פיקסלים תופעה זו מזערית (איור 11ב) – רב האזורים החשודים כסתימות מתקבלים במרכז החופה (דיוק גבוה יותר) ויש הפחתה משמעותית של אזורים חשודים כסתימות (אמינות גבוהה יותר). לפיכך נבדקה האמינות של סתימות ופריצות שאינן גלויות לעין על בסיס הסרת פיקסלים מעורבים בעוצמות גבוהות יותר.

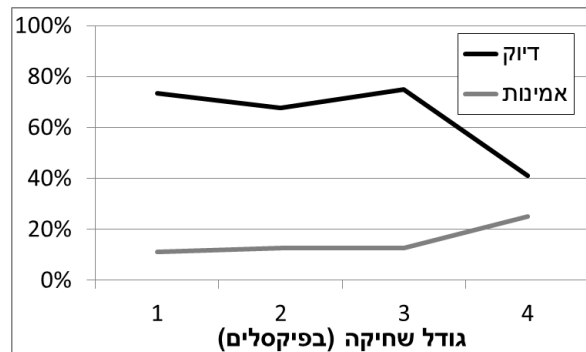


איור 11: אזורים חשודים כסתימות (באדום) וכפריצות (בכחול) על בסיס שחיקה בגודל פיקסל 1 (א) ובגודל של שלושה פיקסלים (ב)

ראשית, נבחנה השתנות הדיוק והאמינות של הפריצות הגלויות לעין במטע בגשור לפי העוצמות השונות (איור 12). שני המדדים אינם רגישים לגודל השחיקה עד גודל של 3 פיקסלים. בגודל של 4 פיקסלים הדיוק יורד בצורה חדה (20%) ואילו האמינות עולה בצורה מתונה יותר (12%). בנוסף, ראינו כי בשחיקה של 3 פיקסלים התפלגות הטמפרטורות דומה יותר להתפלגות נורמלית מאשר התפלגות לאחר שחיקה של פיקסל אחד (איור 13 לעומת איור 3ב) ומכילה מספר קטן מאוד אם בכלל של פיקסלים מעורבים בהשוואה לשחיקה של פיקסל 1.



איור 13: היסטוגרמה של הפיקסלים של הצומח לאחר הסרת הפיקסלים המעורבים באמצעות שחיקה בגודל של שלושה פיקסלים



איור 12: השתנות אחוזי הדיוק והאמינות לפי גודל שחיקה

טבלה 5: אמינות ביחס לזיהוי תקלות שאינן גלויות לעין

גודל שחיקה בפיקסלים	כללי	אזור חשוד כפריצה	אזור חשוד כסתימה
1	80%	70% (7/10)	90% (9/10)
3	75%	67% (6/9)	86% (6/7)

5.6.2 אמינות של פריצות וסתימות בשחיקה

של פיקסל אחד ושלושה פיקסלים

במטע הזיתים בגשור נמצאו לפי שחיקה של פיקסל אחד 10 אזורים חשודים כסתימות ו-10 כפריצות שלא נמצאו בהן תקלות גלויות לעין.

מתוך אלו, בשחיקה של 3 פיקסלים נמצאו עדיין כל 10 האזורים החשודים כסתימות ו-7 בלבד כפריצות. במדידות פמ"ג באותם אזורים של עצים חשודים ועצי ביקורת (לא חשודים) בסביבתם הקרובה נמצא כי ההפרש נע בין 0.5 ל-27.5 ברים. כלומר, מצד אחד האלגוריתם זיהה אזורים חשודים בעלי פמ"ג חריג מאוד שלא נמצאו בהם סימנים הנראים לעין. לצד זה האלגוריתם זיהה אזורים חשודים שלא היו בהם הבדלים בערכי הפמ"ג כלל. ביחס לחישוב אחוזי האמינות ההנחה היתה כי הפרש של יותר מ-2 ברים בערכי פמ"ג בין עצים באזורים החשודים ובין עצי ביקורת הוא מספיק גבוה על מנת לומר כי האלגוריתם זיהה חריגה

אמיתית. על-פי ההנחה הזו ניתן לומר כי בכ-90% מהאזורים החשודים כסתימות ובכ-70% מהאזורים החשודים כפריצות הזיהוי הוא נכון כאשר גודל השחיקה איננו משפיע כמעט (טבלה 5). אמינות של 70% בפריצות דומה לאמינות שהתקבלה בשנה ב' בגשור (76% שכללה גם זיהוי של תקלות גלויות לעין). כלומר, לאלגוריתם כושר זיהוי של אזורים הסובלים מחוסר ומעודף מים יחסיים במקומות שלא ניתן לזהות שום סימנים הנראים לעין.

5.7 חיסכון בכח-אדם

במטע בו נבדק החיסכון הפוטנציאלי בזמן סריקת השטח לאיתור תקלות נמצאו 16 מעברים בסריקה רגילה (מעבר ללא הכוונה, סריקה כל שתי שורות). הדרך הכוללת שצריך לעבור החקלאי הינה 1.98 ק"מ². במעבר ללא הכוונה הנחנו כי מהירות המעבר תהיה 5 קמ"ש (סעיף 4.5.3). במהירות זו, הסריקה תיארך כ-24 דקות. במעבר עם הכוונה של האלגוריתם (לפי סטיית תקן אחת ושחיקה של 3 פיקסלים) נמצא כי מספר המעברים קטן מ-16 ל-14 (קווים לבנים באיור 8) ואורך הדרך יורד ל-1.76 ק"מ. בחלוקת המהירות לפי 3 סוגי המעברים (סעיף 4.5.3) זמן הסריקה מתקצר ל-10 דקות. כלומר, החיסכון הפוטנציאלי עומד על כ-60%. בהצעת המחקר כתבנו כי:

המערכת המוצעת עשויה לחסוך חלק מימי העבודה הקשורים בניטור בלבד. בהערכה זהירה מדובר יהיה בחיסכון של רבע מהזמן הדרוש לאחזקת מערכת ההשקיה (ניטור ואחזקה). על-פי הערכה זו מדובר בפוטנציאל חיסכון של 42,500 ימי עבודה בזית, גפן ותמר (כ-170 עובדים, לפי 250 ימי עבודה בשנה). אם המטע הזה מייצג ניתן לומר כי המערכת המוצעת עשויה לחסוך 60% מהזמן הדרוש לניטור ונראה כי ערך זה דומה להערכה של חיסכון ב-25% בזמן הכללי הדרוש לאחזקת מערכת ההשקיה.

5.8 התייחסות למימוש השלבים והמטרות שהוגדרו בהצעת המחקר

למימוש הפיתוח של מערכת צילום-תרמי מוטסת לניטור אוטומטי של תקלות השקיה הגדרנו שישה שלבים. האלגוריתם שפותח לאיתור אזורים חשודים כתקלות השקיה מתבסס על התפלגות הטמפרטורות של חופת הצומח ולא על הבדלים מוחלטים של טמפרטורות ועל-כן מתאים לשימוש באמצעות צילומים תרמיים רדיומטריים ולא-רדיומטריים כאחד (שלב 1). חברת איקרוס שסיפקה לנו את הצילומים התרמיים המוטסים יש לה יכולות לספק מוזאיקה של צילומים תרמיים מוטסים מעוגנים גיאוגרפית ועם התוצר הזה עבדנו (שלב 2). במסגרת המחקר פותח מימשק למשתמש לקבלת צילומים, להפעלת האלגוריתם עם תפריטי בחירה ולהפקת מפה מעוגנת עם פרמטרים של המטע בסביבה של Matlab (שלב 3-6). עם זאת המימשק למשתמש מבוסס על אלגוריתם זמני שנעשה בו שימוש בתחילת השנה השלישית אך במהלכה ביצענו שיפורים רבים המתוארים בחלק המרכזי של הדו"ח ובחלק הראשון של הדיון והוא לא מומש בתוך המימשק למשתמש וקיימת עוד עבודה על מנת לעשות כן. בנוסף, האלגוריתם טרם נבדק על תמרים ובכוונתנו לבדוק אותו בחודשים הקרובים. האמינות של האלגוריתם באיתור תקלות לא גלויות לעין נבחנה על כלל חלקות הזיתים בגשור בטיסה השנייה בלבד והחיסכון בכח-אדם נבחן על חלקה אחת. יש לבחון את שניהם על בסיס רחב יותר.

² תרגום לפי גודל פיקסל של 35 ס"מ

6 דיון

סריקת המטעים כיום לאיתור תקלות השקיה לא נעשית בצורה שיטתית זאת בעיקר בגלל עלויות של כח-אדם. בסריקת השטח ניתן לאתר בעיקר פריצות גלויות לעין. האפשרות לאתר סתימות מבעוד מועד, קרי, לפני שנוצר נזק משמעותי ובלתי הפיך ליבול, כמעט בלתי-אפשרית. בהצגת התוצאות בפני חקלאים במהלך שנות המחקר נאמרו לנו הדברים הבאים: העניין העיקרי של החקלאים במערכת הינו איתור של סתימות שאינן גלויות לעין. יחד עם זאת, מפה אשר תכוון את החקלאי לאזורים חשודים ותוכל להוות מפת עבודה תעודד אותם לתחזק את מערכת ההשקיה באופן יותר שיטתי. על זאת יש להוסיף שיש למצוא דרכים להוזיל עלויות של המערכת המוטסת.

הערכת הדיוק והאמינות של האלגוריתם בשילוב עם הערכת החיסכון הפוטנציאלי בכח אדם מצביעות על יכולתו לענות על רב הצרכים שהציבו החקלאים:

1. על-פי המפה יש לסרוק 14-20% מהשטח (אזורים חשודים כתקלות באופן כללי). השטח היחסי מתורגם לחיסכון זמן סריקה של כ-60%.
2. בסריקה של האזורים החשודים יימצאו 80% מהפריצות הגלויות לעין (בגפן בתקופה המוקדמת כ-60% בלבד). דיוק ברמה כזו מעיד על היכולת של המפה להחליף את הסריקה הרגילה וזאת למרות שבסריקה רגילה ניתן לזהות קרוב ל-100% מהפריצות. היתרון טמון בתדירות של יצירת המפה שיכול להיות גבוה יותר (פעם בשבועיים) ושיטתי יותר מאשר השגרה שנהוגה היום בשטח (פעם עד פעמיים בעונה).
3. ברב המוחלט של השטח שעל החקלאי לסרוק לא תימצאנה תקלות גלויות לעין. עם זאת, נמצא כי ב-70% מהשטח של אזורים חשודים כפריצות יימצאו עצים שסובלים מעודף מים יחסית לסביבתם וב-90% מהשטח של אזורים חשודים כסתימות יימצאו עצים שסובלים מחוסר מים יחסית לסביבתם.

כלומר, המפה המיוצרת באמצעות האלגוריתם מאפשרת לחסוך כ-60% מזמן הסריקה, לאתר כ-80% מהפריצות הגלויות לעין ולאתר פריצות וסתימות נוספות שאינן גלויות לעין באמינות של 70% ו-90% בהתאמה.

התוצאות משנה ג' מקבלות חיזוק והשלמה מהתוצאות של שנים א' וב' של המחקר שהתבססו על תקלות מדומות. למשל, בגפן, בשנים א' וב' זיהוי הפריצות לאורך זמן הצליח רק באחת מתוך שלושת התאריכים לעומת זיהוי שלהן בכל שלושת התאריכים בזיתים. בשנה ג' דיוק הזיהוי של הפריצות ביוני היה 60% בלבד לעומת 80% בזיתים. בנוסף, באמצעות העמדת תקלות מדומות ניתן היה לקבוע את הסף של פמ"ג לזיהוי תקלות/חריגות בזיתים ובגפנים. בזיתים נראה כי ניתן לזהות חריגות הנעות בין 7-13 ברים ואילו בגפנים חריגות קטנות יותר סביב ה-3 ברים. למרות זאת, בחינת האמינות בזיתים בשנה ג' בוצעה לפי הפרשים של 2 ברים בלבד והביאה לאמינות גבוהה של 70% ו-90% בפריצות ובסתימות.

למרות היתרונות יש להתייחס לאופי החצי-אוטומטי של האלגוריתם שמחייב הכנסה של פרמטרים שנקבעו באופן אמפירי ויכולים לשנות את ביצועיו ממטע למטע לחסד או לשבט.

6.1.1 חלוקת המוזאיקה של הצילום התרמי

האלגוריתם הופעל על חלוקה לפי גבולות חלקות נראים לעין. למעשה, נראה כי חלוקה לפי טקסטים של השקיה עשויה להביא לתוצאות טובות יותר מכיוון שבצורה כזו יימצאו פחות הבדלים בטמפרטורות הנוף הנובעים מתזמון של השקיה שונה בין הטקסטים. בנוסף, בתוך החלקות ישנם זנים שונים. יכול להיות

שהחלוקה צריכה להיות גם לפי זנים. אם כי יש לקחת בחשבון שככל שאיתור החריגים יתבסס על אזורים קטנים יותר התפלגות הטמפרטורות עשויה להיות לא נורמלית ולא מייצגת ועל-כן נושא זה דורש בדיקה.

6.1.2 השפעת פרמטרים אמפיריים על ביצועי האלגוריתם

האלגוריתם מחייב הכנסה של שלושת הפרמטרים האמפיריים הבאים:

1. מרחק מזערי לבחירת פיקסלים ליצירת התפלגות: המרחק המזערי לבחירת פיקסלים של הצומח ליצירת התפלגות טמפרטורות מייצגת, נקבע ל- 5.5 מטרים בקירוב על בסיס צילום יחיד בגלל מגבלות טכניות (זמן חישוב). מרחק זה מתאים למרחק בין עצי הזית במטעים המסחריים אך אינו מתאים מספיק לגפנים. יש להתגבר על המגבלה הטכנית ולאפשר חישוב של המרחק לכל חלקה או טקט השקיה עליו עובדים.
2. גודל מיקבץ של פריצות וסתימות נקבע אמפירית ל-10 ול-3 בהתאמה: לפי התוצאות נראה כי הקביעה האמפירית טובה אך היא עלולה להשפיע על מימצאים בעתיד ויש להתייחס אליה בהתאם.
3. גודל שחיקה: שטחי הסריקה ואחוזי הדיוק חושבו לפי שחיקה של פיקסל אחד. לעומת זאת, בשלב מאוחר בו עבדנו גם על אמינות של זיהוי אזורים חשודים כסתימות נוצרה ההבנה ששחיקה של פיקסל אחד מכניסה לא מעט פיקסלים מעורבים (במיוחד במטעי הזיתים של רביבים). לפיכך, התוצאות של האמינות (משנת 2012) וחיסכון בכח אדם מבוססות גם על שחיקה של 3 פיקסלים ונראה כי יש לבדוק את כלל המימצאים לפי גודל שחיקה זה. למרות ההבנה המאוחרת יש לציין כי הרגישות של האלגוריתם לגודל השחיקה נמוכה מאוד עד גודל של 3 פיקסלים (איור 12) ועל כן יש להניח כי התוצאות לא ישתנו בצורה משמעותית לפחות בזיתים.

7 סיכום ומסקנות

למיטב ידיעתנו לא פורסם מחקר על מערכת לאיתור תקלות השקיה ברמת המטע עד העץ הבודד באמצעות חישה מרחוק בכלל ובאמצעות צילומים תרמיים מוטסים בפרט. האלגוריתם שפותח במסגרת המחקר מתבסס על הבדלים יחסיים בין טמפרטורות ועל-כן ניתן תיאורטית להפעילו גם על צילומים באמצעות מצלמה תרמית לא-רדיומטרית שהינה זולה ממצלמה רדיומטרית (טמפרטורות מוחלטות ומדוייקות). בגלל המוטיבציה לפיתוח מערכת יישומית אימות האלגוריתם בוצע על פני מטעים מסחריים רבים והתבסס על איתור תקלות אמיתיות בשטח. היקף הצילום והאימות למיטב ידיעתנו הוא חסר תקדים ועל-כן התוצאות שלו מבוססות. האלגוריתם כאמור מזהה כ-80% מהפריצות הגלויות לעין אך ביכולתו לזהות חריגות של מחסור ועודף מים שאינן גלויות לעין העלולות לנבוע מתקלות השקיה אך גם מגורמים נוספים. למשל, בשנה הראשונה של המחקר צולמו המטעים המסחריים ברביבים (סביב חלקות הניסוי). החקלאי קבל מאיתנו מפה המציינת עצים בעלי טמפרטורות נמוכות במיוחד מה שמעיד על עודפי מים. החקלאי ניגש למרבית העצים הללו ואמר כי עצים אלו שוכנים ליד עצים הסובלים ממחלת הדוררת ועל-כן הם נהנים מעודפי מים. כלומר, האלגוריתם מזהה חריגות על עודפי ומחסורי מים שדורשים בדיקה והן יכולות להעיד על תקלות השקיה או על בעיה חשובה אחרת.

המערכת שנבדקה במחקר זה היא פלטפורמה מוטסת מאויישת, צילום תרמי רדיומטרי ואלגוריתם חצי-אוטומטי. העלויות של הפלטפורמה המוטסת והמצלמה הרדיומטרית עדיין יקרות לחקלאים (על-פי עדותם) ובנוסף, נתקלנו לא פעם במגבלות שמציב חיל האוויר על הטיסות. על-כן יש לחשוב על חלופות

כמו:

פלטפורמה בלתי-מאוישת: יתרונויה הן בגמישות בימי הצילום אך חסרונויה הן בהספקים קטנים יחסית, ועדיין יש לקבל מירשות מחיל-האוויר

טיסת ריסוס: יתרונויה הם בתדירות הצילומים ובעובדה שאין צורך במירשות מיוחדות של חיל-האוויר. חסרונויה הן בהספקים קטנים יחסית.

בשנים הקרובות אנו מקווים כי נוכל לבחון את מידת היישומיות של הפלטפורמות השונות באספקת צילומים איכותיים, בתדירות מספקת ובעלויות המתאימות לחקלאים.

בכל מקרה בהקשר של המיזם, הכנסת מערכת כזו לחקלאות משמעותה לא רק חיסכון בכח-אד ביחס לשגרה המתקיימת היום אלא גם הכנסת טכנולוגיות חדשות וכח-אדם מקומי בעל יכולות הפעלה של טכנולוגיות מתקדמות. בנוסף, השימוש במערכת עשוי להביא לייעול השימוש במים ולאיתור מחלות ונזקים נוספים מבעוד מועד.

3 פרסומים מדעיים

המימצאים של המחקר טרם פורסמו. בכוונתנו לכתוב מאמר או שניים בנושא.

4 ביבליוגרפיה

- [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] 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.
- [6] 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.
- [7] אלחנתי, ו. וכהן, י. 2009. צילומים תרמיים לייעול ההשקיה בגפן. *ניר ותלם*, גיליון יולי 2009, 17 : 42-44.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Cohen Y., Alchanatis V., Prigojin, A., Levi, A., Soroker V. and Cohen Y. 2012. Use of aerial thermal imaging to estimate water status of palm trees. *Precision Agriculture*, 13:123-140.
- [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] Otsu, N., (1979). Threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, 9, 62-66.

(5) סיכום עם שאלות מנחות

מטרות המחקר לתקופת הדו"ח תוך התייחסות לתוכנית העבודה.
מטרת המחקר הכללית היתה לפתח מערך לצילום תרמי מוטס לניטור חצי-אוטומטי של תקלות במערכת ההשקיה.
עיקרי התוצאות
זיהוי תקלות מדומות : ניתן לזהות חריגות של כ-11 ברים בזיתים ושל 3 ברים בגפנים לענבי-מאכל. זיהוי תקלות אמיתיות: הערכת הדיוק והאמינות של האלגוריתם לזיהוי תקלות בשילוב עם הערכת החיסכון הפוטנציאלי בכח אדם מצביעות על הדברים הבאים: 1. על-פי המפה שמייצר האלגוריתם יש לסרוק 14-20% מהשטח, כאשר השטח היחסי מתורגם לחיסכון זמן סריקה של כ-60%; 2. בסריקה של האזורים החשודים יימצאו בד"כ 80% מהפריצות הגלויות לעין; 3. ברב המוחלט של השטח שעל החקלאי לסרוק לא תימצאנה תקלות גלויות לעין. עם זאת, נמצא כי ב-70% מהשטח של אזורים חשודים כפריצות יימצאו עצים שסובלים מעודף מים יחסית לסביבתם וב-90% מהשטח של אזורים חשודים כסתימות יימצאו עצים שסובלים מחוסר מים יחסית לסביבתם. כלומר, המפה המיוצרת באמצעות האלגוריתם מאפשרת לחסוך כ-60% מזמן הסריקה, לאתר כ-80% מהפריצות הגלויות לעין ולאתר פריצות וסתימות נוספות שאינן גלויות לעין באמינות של 70%-90% בהתאמה.
המסקנות המדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו. האם הושגו מטרות המחקר בתקופת הדו"ח.
המטרה העיקרית הושגה. ויש סיכוי טוב להתשמש באלגוריתם לזיהוי תקלות מתוך צילומים מוטסים. האלגוריתם לא נבדק עדיין על תמרים והאמינות של האלגוריתם באיתור תקלות לא גלויות לעין והחיסכון בכח-אדם נבחנה על חלקות בודדות ויש לבחון את שניהם על בסיס רחב יותר.
בעיות שנתרו לפתרון ו/או שינויים (טכנולוגיים, שיווקיים ואחרים) שחלו במהלך העבודה ; התייחסות להמשך המחקר
הפלטפורמה המוטסת שהשתמשנו בה יקרה וסובלת מקשיים בקבלת מירשות מחיל האוויר. יש למצוא פלטפורמה מוטסת מתאימה וזולה ליישום שיכולה להתגבר על הקשיים שמציב חיל האוויר. הכיוון שנבדק הוא שימוש בכלי טיס של משתמשים בהם בריסוסים או בכלי טיס בלתי מאויישים בטיסה נמוכה מאוד.
הפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח : פרסומים בכתב - ציטוט ביבליוגרפי כמקובל בפרסום מאמר מדע י;
הצגת המימצאים בכנסים של פקחים וחקלאים, המחקר יוצג בכנס בינלאומי _ ASA, CSSA & SSSA בפלורידה בנובמבר השנה (2013).
פרסום הדו"ח : אני ממליץ לפרסם את הדו"ח : (סמן אחת מהאופציות)
← ללא הגבלה (בספריות ובאינטרנט)
← חסוי-לא לפרסום. (יש לצרף אישור ומידע ממוסד המחקר)
האם בכוונתך להגיש תוכנית במשך בתום תקופת המחקר הנוכחי? * לא

* יש לענות על שאלה זו רק בדו"ח שנה ראשונה במחקר שאושר לשנתיים, או בדו"ח שנה שניה במחקר שאושר לשלוש שנים