

ממשק השקיה בתפוא"א בהתבסס על מדד CWSI המחולץ מצילום תרמי

Irrigation management in potato based on CWSI from thermal imaging

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות ופיתוח הכפר

על-ידי

ויקטור אלחנתי, רונית רוד, יפית כהן, אשר לוי ורומן בריקמן – המכון להנדסה חקלאית, מנהל המחקר

החקלאי

ציון דר – שה"מ

גדי הדר – מגדל תפוא"א

בשיתוף עם: אורן בוכשטב – יח"מ, מורן סגולי – מו"פ דרום ואלון בן-גל – מרכז גילת, מנהל המחקר החקלאי

תקציר

הצגת הבעיה: השימוש במדידות טמפרטורת הצמחייה לאיתור עקת מים מאפשרת כיום למפות את התפרושת המרחבית של מצב המים בגידול בקנה מידה של תת-חלקה, שדה ואף בקנה מידה אזורי בעזרת צילומים תרמיים. רוב המחקרים שעושים שימוש בצילום תרמי ומדד העקה CWSI מתרכזים בהערכת מצב המים ומיפוי השונות המרחבית ולא בהכוונת השקיה. אותם מחקרים העוסקים בהכוונת השקיה לפי ערכי מדד CWSI מכוונים לתעשיות היין וגידולי כותנה. מחקרים בודדים עוסקים בהכוונת השקיה בגידולים אחרים. באותם מחקרים שעוסקים בתפוא"א ישנה התייחסות לערכי סף להכוונת השקיה אך הם (1) מבוססים על נתונים נקודתיים ממכשירים בודדים שאמורים לייצג את כלל שטח הגידול; (2) אין התייחסות לשונות המרחבית; (3) אין ביטוי לדינאמיקה העונתית (שלבי גידול ומטאורולוגיה, ימי שרב וכד').

מטרת המחקר: לבחון את היכולת לכוון את ההשקיה בתפוא"א על-פי מדד העקה המופק מצילומים תרמיים: (א) מציאת קבוע החזר ביחידות של מדד העקה; ו(ב) להעריך את יעילות השימוש במדד להכוונת השקיה בהשוואה לגישה המיושמת כיום.

תוצאות: במהלך שנות המחקר גודלו חלקות תפוחי אדמה בארבע עונות, בשנים 2015-2018. בעונה הראשונה, 2015, המחקר התבסס על חלקות שהוקצו שנה קודם לניסוי אחר אך בוצעו התאמות ובוצעו מדידות. בשנים 2016, 2017 ו-2018 תוכננו חלקות יעודיות בחוות הבשור למחקר זה. במהלך העונה בוצעו מדידות של צילומים תרמיים מפלטפורמות קרקעיות ואוויריות, מדידות פיסיולוגיות של הצמחים ומדידות תנאי סביבה והפעלות של מערכות ההשקיה. בסוף העונה נאסף היבול של כל חלקה והוערכה איכותו. סה"כ נעשו 24 ימי מדידה בצילום תרמי, מתוכם 8 מועדים של צילום מוטס, ו-16 מועדים של צילום מפלטפורמה קרקעית.

במהלך המחקר, נקבע עקום תגובה רצוי המבוסס על אינדקס אקה תרמי, ובאמצעותו ניתן לחלץ מקדם להחזר מים בהתאם לגרעון הנמדד באמצעות צילום תרמי. פותחה שיטה לחישוב CWSI בתפוחי אדמה חושב

באמצעות ניתוח אוטומטי של צילומים תרמיים תוך שילוב של נתוני טמפרטורת אוויר, קרינה, רוח ולחות יחסית מתחנה מטאורולוגית. השקיה של חלקות ניסוי התנהלה על פי החלטה על תוספת השקיה נשיתנה על-פי שתי השיטות. ב-2016 השתמשנו בשיטת הרפנס, ב-2017 לפי שיטת ערכי CWSI קבועים וב-2018 השתמשנו בשתי השיטות לסירוגין בגלל אי יציבות של ערך CWSI שלא היה ברור אם הוא נובע מהשקיה בפועל שאיננה נכונה או מחוסר יציבות שלו (בדיעבד התברר כי שתי הסיבות כנראה נכונות).

לפי הממצאים של המחקר הנוכחי, מדד העקה התרמי, מאפשר מעקב אחר תקינות ההשקיה וכן מאפשר תיקון של ההשקיה במצבים של חוסר. הוא איננו תחליף לחיישנים אחרים אלא יכול לבוא בתוספת. ניתן להשתמש בו בימים לא מעוננים כחלק ממערך של חישה ולא ככלי יחיד. הצילומים יכולים לספק את השונות המרחבית ואילו חיישני הקרקע והצמח את המעקב הרציף בזמן בנקודות נבחרות.

מסקנות והמלצות: עדיין אין.

הממצאים בדו"ח זה הינם תוצאות ניסויים. הניסויים לא מהווים המלצות לחקלאים.

חתימת החוקר

יולי 2018

סיוון תשע"ה

תוכן העניינים

1.....	תקציר
3.....	1. מבוא
4.....	2. מטרות המחקר
4.....	3. פירוט עיקרי הניסויים ותוצאות עיקריות
18.....	4. דיון
20.....	5. פרסומים מדעיים
20.....	6. ספרות מצוטטת (ביבליוגרפיה)

ב.1. מבוא

חקלאות מדייקת היא גישה של עיבוד חלקות גידול תוך כדי מתן מענה לשלוש שאלות בסיסיות איתן מתמודדים החקלאים במהלך עונת הגידול: מה צריך לתת (דשן ו/או השקיה ו/או הדברה), מתי (בהתאם לשלבי גידול ו/או רמת פגיעת מזיקים ומחלות) ואיפה (חלקות ותתי-חלקות). כדי לתת מענה לשאלות אלו, ולהגיב לצרכים דינאמיים של הגידול בשלבים השונים, יש לנטר את מצב הגידול באופן שוטף ולבחון את השונות המרחבית והעתית בשדה במהלך כל עונת הגידול. עיקרון זה מציע דרך טובה יותר למגדלים ולסביבה מכיוון שחלוקת המשאבים האופטימאלית בזמן ובמרחב מובילים לירידה בעלויות (ו/או עליה ברווחיות) ולירידה בהשפעות השליליות שלהם על הסביבה (Alchanatis and Cohen, 2011). המעבר של החקלאות המדייקת מתפיסה תיאורטית לשיטה יישומית תלוי לא רק ביכולת המיפוי של השונות בשדה, אלא גם בהגדרה מתאימה של הפעולות אותן יש לבצע באזורי הממשק לניהול הגידול. כלומר יש "לתרגם" את השונות המרחבית לכדי מכלול פעולות מעשיות בעלות משמעות לחקלאי המגדל, הן התגובות למידע המגיע מן החיישנים בשטח.

כיום נמצא לא מעט מערכות מיפוי ושרותים מסחריים המאפשרים ניטור שונות במרחב הגידולים. חלק ניכר מהן מתועל לצרכים של הכוונת דיגומי קרקע וצומח ובמקרים רבים מציגות מידע לא ישים למגדל. זאת מאחר ומוצגים נתוני מדידה גולמיים או אינדקסים למיניהם (לדוגמא ביומסה צמחית ו-LAI) בעוד שהחקלאי נדרש להתמודד עם המשמעות. המערכות מאפשרות הצגת שונות מרחבית ועיתית אך לרוב אינן מאפשרות זיהוי של הגורמים. גם כאשר מדובר במערכות תומכות החלטה המצביעות על אפשרויות סבירות יותר כמקור לשונות המרחבית ו/או העיתית שנתקבלה מנתוני מערכות המיפוי, לרוב ההמלצות לחקלאי לא יכללו ביטוי כמותי ליישום.

השימוש בטמפרטורת הצמחיה כאמצעי להערכת מצב המים בגידול אינו חדש (Fuchs & Tanner, 1966; Gates, 1968). המעבר לחישה מרחוק והערכת עקת יובש באמצעות צילום תרמי הוא שלב מתבקש בדרך לניהול השקיה בתבסס על מדד תרמי, ה-CWSI (Maes & Steppe, 2012). הצילום מאפשר כיסוי נרחב וצימצום זמן איסוף נתונים ועבודה בחלון זמן רלוונטי במהלך היום; והינו משמעותי ביותר בדרך להשלמת היעד של הכוונת השקיה באמצעות מדד תרמי. זאת מאחר והקשר בין מצב המים בגידול למוליכות פיוניות ודיות, מגביל את איסוף נתונים לצורך הערכת מצב המים לכשעתיים שבהן הדינאמיקה היומית מינימאלית ומתקבלת יציבות יחסית בערכי המדדים. מחקרים מהשנים האחרונות הראו כי צילומים תרמיים קרקעיים ואויריים מאפשרים למפות את השונות במצב המים בגידולים באמצעות צילומים תרמיים כמו כותנה, חיטה, גפן, זית ובמטעים נוספים (Cohen et al., 2012, Alchanatis et al., 2010; Bellvert et al. 2013; Ben-Gal et al., 2009; González-Dugo, 2013). מחקרים נוספים הראו כי מדד ה-CWSI מאפשר הבחנה בין גידולי תפוא שהושקו ברמות שונות (Rud et al., 2014). בנוסף ניתן להצביע על ערכי סף המבטאים מצב גידול תקין של תפוא בשלבים שונים במהלך העונה (Rud et al., 2013); בעוד שבמחקרים מוקדמים יותר

(Erdem et al. 2005, Shae et al. 1999) אין התייחסות לדינאמיקה העונתית וההתאמה הספציפית של דרישות המים בכל שלב לאורך עונת הגידול ו/או כתגובה לאירועים מטאורולוגיים ספציפיים כגון ימי שרב.

ב2. מטרות המחקר

לבחון את היכולת לכוון את ההשקיה בתפוז"א על-פי מדד העקה המופק מצילומים תרמיים. מטרות משנה:

- א. מציאת קבוע ההחזר ביחידות של מדד העקה התרמי.
- ב. לבחון את יעילות השימוש במדד התרמי להכוונת השקיה בהשוואה לגישה המיושמת כיום.

ב3. פירוט עיקרי הניסויים ותוצאות עיקריות

מערך הניסויים

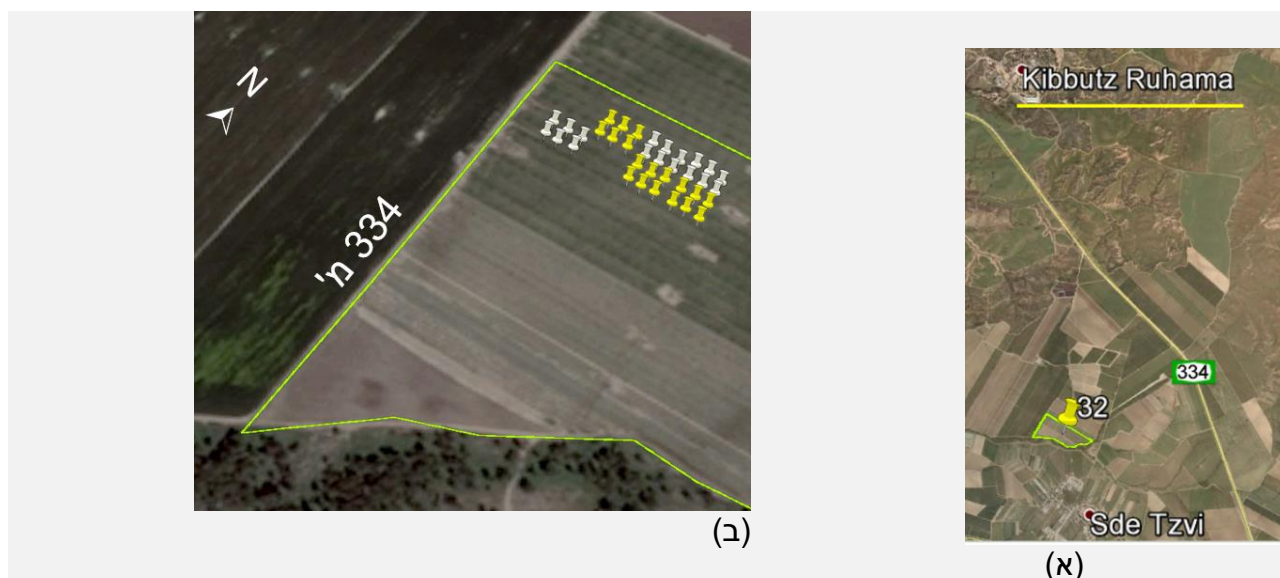
במהלך שנות המחקר גודלו חלקות תפוחי אדמה בארבע עונות, בשנים 2015-2018. בעונה הראשונה, 2015, המחקר התבסס על חלקות שהוקצו שנה קודם לניסוי אחר אך בוצעו התאמות ובוצעו מדידות. בשנים 2016, 2017 ו-2018 תוכננו חלקות יעודיות בחוות הבשור למחקר זה. במהלך העונה בוצעו מדידות של צילומים תרמיים מפלטפורמות קרקעיות ואוויריות, מדידות פיסיולוגיות של הצמחים ומדידות תנאי סביבה והפעלות של מערכות ההשקיה. בסוף העונה נאסף היבול של כל חלקה והוערכה איכותו. טבלה מס' 1 מסכמת את הניסויים ואת המדידות שנעשו במהלך המחקר. סה"כ נעשו 24 ימי מדידה בצילום תרמי, מתוכם 8 מועדים של צילום מוטס, ו-16 מועדים של צילום מפלטפורמה קרקעית.

הערכת יבול	מדידות/צילומים	טיפולים	מקום	
			הניסי	שנה
לא נעשתה	צילומים תרמיים קרקעיים מטרקטור.	בחלק מן החלקה שיועד לניסוי הושמה עקה כשבועיים לפני תחילת המדידות. בהמשך, במקטע זה תוכננו שלושה טיפולים של 3 רמות השקיה, גירועונית, עודפת ורגילה. בכל טיפול 3 חזרות (איור 1).	קיבוץ רוחמה	2015
הערכת כמות	שני צילומים תרמיים מוטסים מרחפן: 2/5/16 ו-9/5/16.	4 טיפולים x 4 חזרות, לפי המפורט באיור 2: השקיה	חוות הבשור	2016

הערכת יבול	מדידות/צילומים	טיפולים	מקום	
			הניסי	שנה
ואיכות היבול	שישה צילומים תרמיים קרקעיים באמצעות תורן בגובה של כ-12 מ': 18/4/16, 3/4/16, 21/4/16, 24/4/16, 1/5/16, 9/5/16. סה"כ 8 מועדים של צילומים תרמיים.	רגילה, השקיה גרעונית, השקיה עם תיקונים לפי צילומים תרמיים		
הערכת כמות ואיכות היבול	צילום תרמי מוטס מרחפן, וצילום בצבע מוטס מרחפן ב 20/4/2017. שישה צילומים תרמיים קרקעיים באמצעות תורן מגובה של כ-12 מ': 9/4/17, 6/4/17, 16/4/17, 27/4/17, 30/4/17, 7/5/17. סה"כ 7 מועדים של צילומים תרמיים מועד אחד של צילום בצבע.	4 טיפולים x 4 חזרות, לפי הפירוט באיור 3: השקיה רגילה, השקיה גרעונית, השקיה עם תיקונים לפי צילומים תרמיים	חוות הבשור	2017
הערכת כמות ואיכות היבול	חמישה צילומים תרמיים מוטסים ממסוק כטב"מ: 11/4/18, 8/4/18, 4/4/18, 29/4/18, 13/5/18. ארבעה צילומים תרמיים קרקעיים מגובה כ-3 מ' ו: 2/5/18, 18/4/18, 15/4/18, 9/5/18. ארבעה צילומים בצבע מרחפן: 4/4/18, 13/5/18, 18/4/18, 8/4/18. סה"כ 9 מועדים של צילומים תרמיים ו-4 מועדים של צילומים בצבע.	3 טיפולים x 3 חזרות, בשני זנים, לפי הפירוט באיור 4: השקיה רגילה, השקיה גרעונית, השקיה עם תיקונים לפי צילומים תרמיים	חוות הבשור	2018

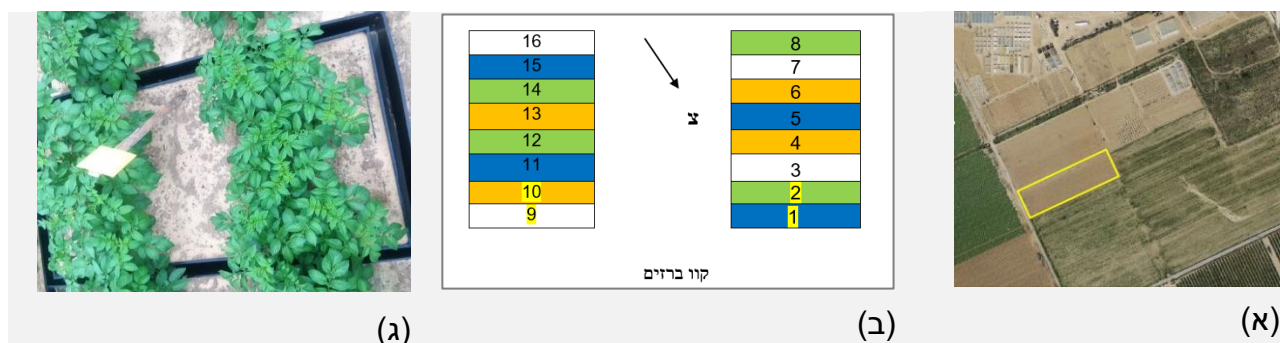
תאור מפורט של הטיפולים של כל שנה: בשנה 2015 אותרה חלקת תפו"א דזירה בשדרות מסחריים בקיבוץ רוחמה. החלקה נבחרה על בסיס תוצרי יבול משנים קודמות, בה לא נמצאה שונות משמעותית (פני שטח מישוריים ללא מפרצוני זרימה של הצטברות מים מהשקיה/גשם והרכב קרקע הומוגני). ההשקיה בחלקות המסחריות נעשתה בהמטרה עם דיזות בספיקה של 630 ל"שעה. הדישון נעשה דרך מערכת ההשקיה (באופן שגרתי כמות גבוהה). עד לשלב של סגירת השורות החלקה הושקתה באופן אחיד. בחלק מן החלקה שיועד לניסוי הושמה עקה כשבועיים לפני תחילת המדידות ע"י החלפת הדיזות לספיקה נמוכה יותר, 400 ל"שעה (63% מכמות המים בשאר החלקה). בהמשך, במקטע זה תוכננו שלושה טיפולים של 3 רמות השקיה,

גירעונית, עודפת ורגילה. בכל טיפול 3 חזרות וכל חזרה כללה 6 מטרות ליצירת משטח הומגני בהשקיה שגודלו 4 מ' x 20 מ' (ללא רצועת חפיפה ממטרות בטיפולים שונים) לפי המפורט באיור 1.



איור 1. חלקות הניסוי בשנה א': החלקה הנבחרת (א) ומערך הטיפולים (ב); בצהוב השקיה גירעונית, 63% מהכמות הרגילה, דיזות של 400 ל"שעה. בלבן השקיה עודפת 113.4% מהכמות הרגילה, שילוב של 3 מטרות 630 ל"שעה ו- 3 מטרות של 800 ל"שעה והשקיה רגילה, 100% הכמות שנקבעה להשקיה בכלל החלקה המסחרית, דיזות של 630 ל"שעה.

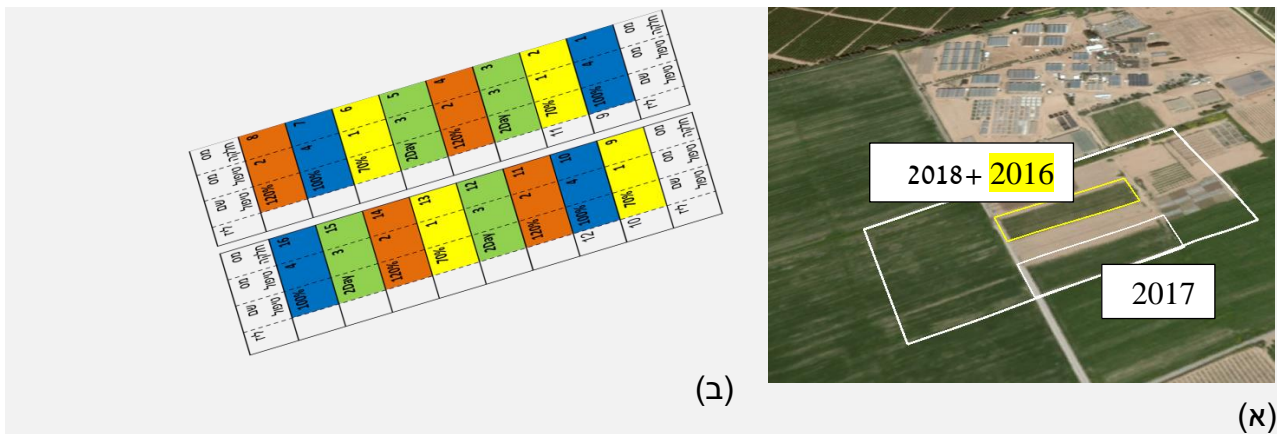
בשנה 2016 הוקם מערך ניסוי בחוות הבשור שכלל 4 טיפולים x 4 חזרות, לפי המפורט באיור 2. כל טיפול היה בגודל של 20 מ' x 24 מ'. מערך זה כלל גם ליזמטר אחד, 1 מ"ר, בכל אחד מהטיפולים. ההשקיה בחלקות נעשתה בהמטרה. הדישון נעשה דרך מערכת ההשקיה (באופן שגרתי כמות גבוהה). עד לשלב של סגירת שורות ההשקיה נעשתה באופן אחיד. 16 ימים לפני תחילת המדידות החל תהליך יישום עקה מתונה, 70% מהכמות הרגילה, באותם טיפולים שיועדו לכך. כמות המים הרגילה נקבעה באמצעות מדדים שנלקחו מנתוני הליזמטרים והיא ייצגה את כמות המים הדרושה לגידול בכל שלב ובהתחשב בתנאים המטאורולוגיים ששררו באותה עת.



איור 2. חלקות הניסוי ב-2016: תיאור כללי (א), מערך הטיפולי השקיה (ב); כחול – 100% כל העונה, לבן – 70% כל העונה, ירוק – 70% התחליתי עם תיקון בהמשך כל יומיים, כתום – 70% התחליתי עם

תיקון בהמשך כל 4 או 3 ימים. בחזרה בה מוצב הליזימטר בטיפולים השונים, מודגש המספר על רקע צהוב. (ג) דוגמה לאחד מהליזמטרים שנקבעו כחלק מרצף משורת הגידול באחת מהחזרות שבכל טיפול.

במהלך עונת הגידול של אביב 2017 נעשו ניסויים בחוות הבשור. מערך ניסוי בחוות הבשור כלל 4 טיפולים x 4 חזרות, השקיה במתזים קבועים, לפי המפורט באיור 3. כל טיפול היה בגודל של 20 מ' x 24 מ'. מערך זה כלל גם ליזמטר אחד, 1 מ"ר, בכל אחד מהטיפולים. הדישון נעשה דרך מערכת ההשקיה (באופן שגרתי כמות גבוהה). עד לשלב של סגירת שורות ההשקיה נעשתה באופן אחיד. 16 ימים לפני תחילת המדידות החל תהליך יישום עקה מתונה, 70% מהכמות הרגילה, באותם טיפולים שיועדו לכך. כמות המים הרגילה נקבעה באמצעות מדדים שנלקחו מנתוני הליזמטרים והיא ייצגה את כמות המים הדרושה לגידול בכל שלב ובהתחשב בתנאים המטאורולוגיים ששררו באותה עת.



איור 3. חלקות הניסוי ב-2017: תיאור כללי של מיקום החלקות בעונות 2016 ו-2017 (א), מערך הטיפולי השקיה (ב); כחול – 100% כל העונה, צהוב – 70% כל העונה, ירוק – 70% התחליתי עם תיקון בהמשך כל יומיים, כתום – 70% התחליתי עם תיקון בהמשך במרווח ההשקיה הרגיל.

ב-2018 הוקם מערך ניסוי בחוות הבשור עם שני זנים: דזירה וסיפרא. הניסוי כלל 3 טיפולים לפי הפירוט הבא: עבור כל זן, 3 חזרות של השקיה 100%, חזרה אחת של השקיה 70% ושלוש חזרות של 70% מתוקן. כל טיפול היה בגודל של 20 מ' x 24 מ'. ההשקיה בחלקות נעשתה בהמטרה. הדישון נעשה דרך מערכת ההשקיה (באופן שגרתי כמות גבוהה). עד לשלב של סגירת שורות ההשקיה נעשתה באופן אחיד.

בכל האתרים, מועד הצילומים תוכנן בסינכרון עם מועדי ההשקיה. הצילומים נעשו בדרך כלל לאחר יומיים עד ארבעה ממועד ההשקיה הקודם, בצהרי יום ההשקיה הבא (ברזים נפתחו בלילה). מיד לאחר הצילומים נעשה ניתוח נתונים וחושב ערך מדד CWSI ממוצע בכל טיפול. בהתאם לערך זה נתקבלה ההחלטה האם לתקן את ההשקיה ובכמה.

אמצעי מדידה וניתוח נתונים

צילומים מוטסים: בשנתים 2016, ו-2017 בוצעו צילומים תרמיים כפי שמוצג באיור 4. בשנה הראשונה והשניה בוצעו צילומים גם מפלטפורמה מוטסת באמצעות רחפן (איור 4ב). בשנה השלישית בוצעו צילומים באמצעות כטב"מ מסוק של המכון להנדסה חקלאית (איור 4ג). איור 6 מראה דוגמא של מפות של טמפרטורה מצילומי האוויר באמצעות כטב"מ בשני מועדים בעונת 2016. כמו כן, צילום בתחום התרמי ובתחום הנראה במועד אחד לדוגמה בעונת 2017.

צילומים קרקעיים: ב-2016 הצילומים הקרקעיים בוצעו כאשר המערכת עמדה במקום, ומגובה של כ-12 מ'. ב-2017 הצילומים הקרקעיים בוצעו מגובה של כ-6 מ' תוך כדי נסיעה במהירות של כ-1.5 קמ"ש. איור 4ג מתאר את מערכת הצילום. כמובן, קואורדינטות ה-GPS של התורן נמדדו תוך כדי נסיעה על מנת לשלב אותם במיפוי הנתונים הקרקעיים. פותחה שיטה אוטומטית לעיבוד וניתוח הנתונים מהצילומים הקרקעיים. השיטה הושמה כתוכנה ב-MATLAB, עם ממשק משתמש המאפשר הפעלה וניתוח על ידי מפעיל לא מנוסה בתיכנות. תוכנה זו משלבת באופן אוטומטי את הנתונים המטאורולוגיים שנאספים מתחנה מקומית בשדה, נתוני ה-GPS מהתורן, והצילומים התרמיים הנלקחים תוך כדי תנועה. בשיטה זו, כל חלקת הניסוי צולמה תוך 25 דקות ונלקחו כ-1500 צילומים תרמיים. זמן הצילום הקצר איפשר מעבר פעמיים על חלקות הניסוי, פעם אחת מהצד המואר של הצמחים ופעם שנייה מהצד המוצל.

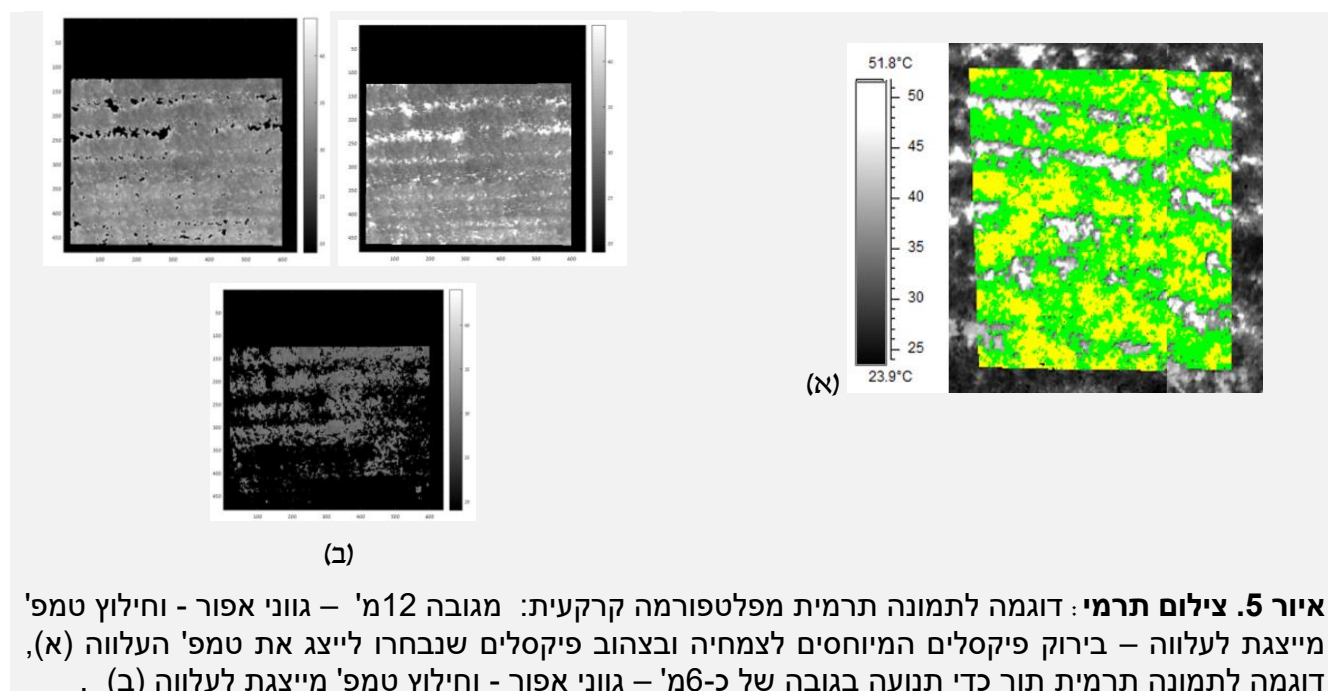
כל הצילומים תרמיים, הקרקעיים מתורן וגם הצילומים מפלטפורמה מוטסת באמצעות רחפן, נעשו באמצעות מצלמת FLIR A655sc (www.flir.com/science/display/?id=46802). הצילומים האויריים נעשו באותה מצלמה מגובה של 100 מ' באמצעות כטב"מ. הרזולוציה המרחבית של הצילומים התרמיים נעה בין 0.5 ס"מ לפיקסל לצילומים הקרקעיים, לבין כ-8 ס"מ לפיקסל בצילומים המוטסים.

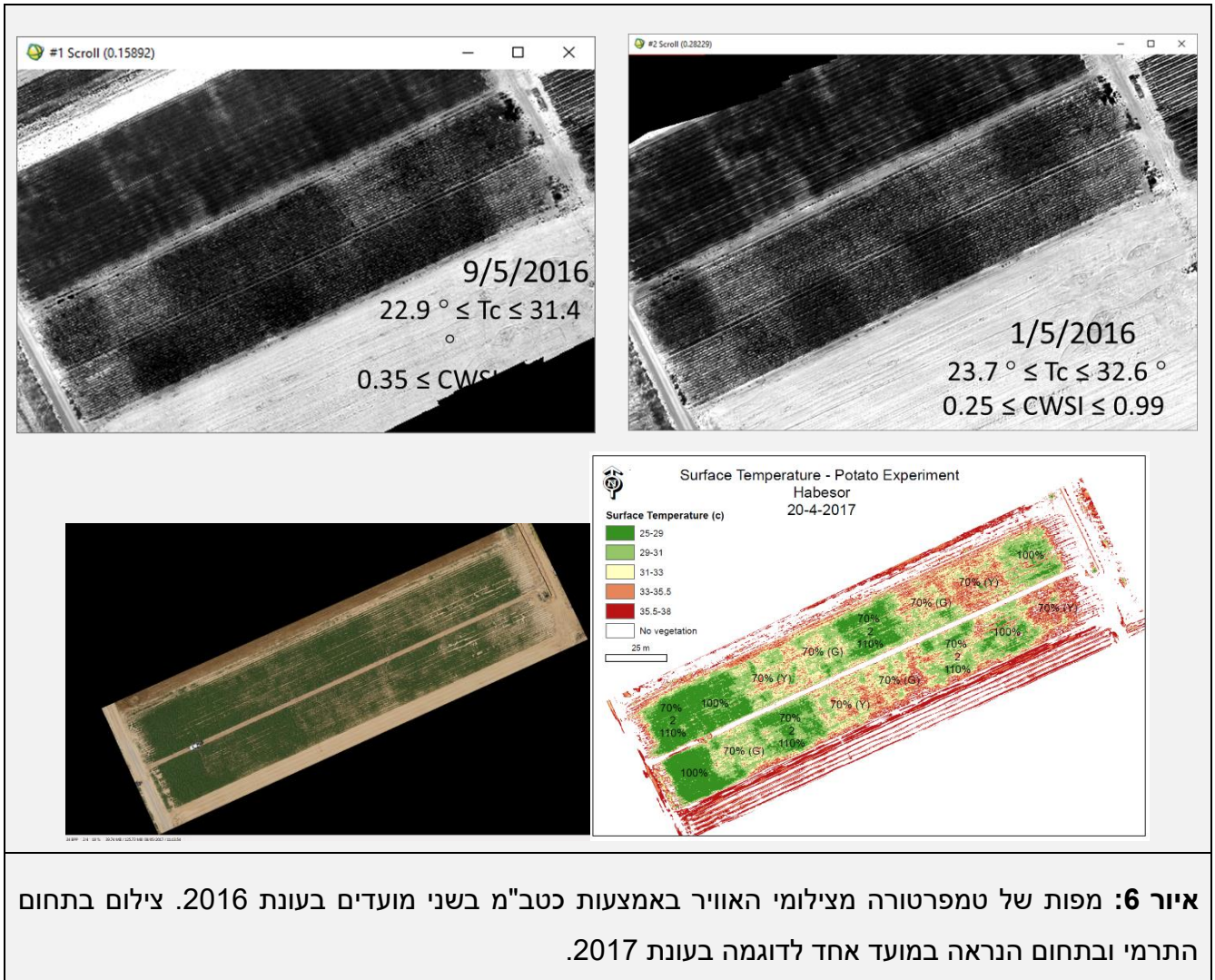


עיבוד הנתונים: הצילומים עברו עיבוד ושימשו לחילוץ טמפרטורת העלווה וחישוב מדד עקת המים. חילוץ טמפ' העלווה (Tc) נעשה בהתבסס על הצילום התרמי ונתוני מטאורולוגיה בשעת הצילום. בשלב ראשון מאותרים פיקסלים המיוחסים לצמחיה (איור 5). מתוך כלל הפיקסלים אלו חושב הממוצע של 33% הערכים הנמוכים. בהמשך חושבו ערכי מדד עקת המים (CWSI) לפי הנוסחה הבאה (Idso et al., 1991; Jackson et al., 1981):

$$CWSI = (Tc - Twet) / (Tdry - Twet)$$

כאשר, Tc הוא טמפ' העלווה שחולץ מהתמונה עבור כל חזרה בכל אחד מן הטיפולים. Tdry הטמפ' המקסימאלית, נקבע אמפרית על סמך מחקרים קודמים כטמפ' האויר+7 מעלות ו-Twet טמפ' המינימום, הוא ערך תיאורתי המחושב בהתבסס על נתונים מטאורולוגיים ומשוואות מאזני אנרגיה המבטאות את האינטראקציה בין צמח לקרינת השמש (Jones, 1992). במקביל לצילומים נמדדו ערכי מוליכות פיוניות, נאספו נתוני מז"א ונתוני הליזמטרים.





איור 6: מפות של טמפרטורה מצילומי האוויר באמצעות כטב"מ בשני מועדים בעונת 2016. צילום בתחום התרמי ובתחום הנראה במועד אחד לדוגמה בעונת 2017.

יבול: בשנים 2016, 2017 ו-2018 נדגמו כל החלקות מבחינת היבול. נאסף היבול של מס' שורות. הוא נשקל ונקבע איכותו על פי התפלגות הפקעות לגדלים שונים. פירוט התוצאות בהמשך הוא לפי היעדים שהוגדרו למטרות המחקר ומתרכזות במציאת קבוע החזר ביחידות של מדד העקה התרמי.

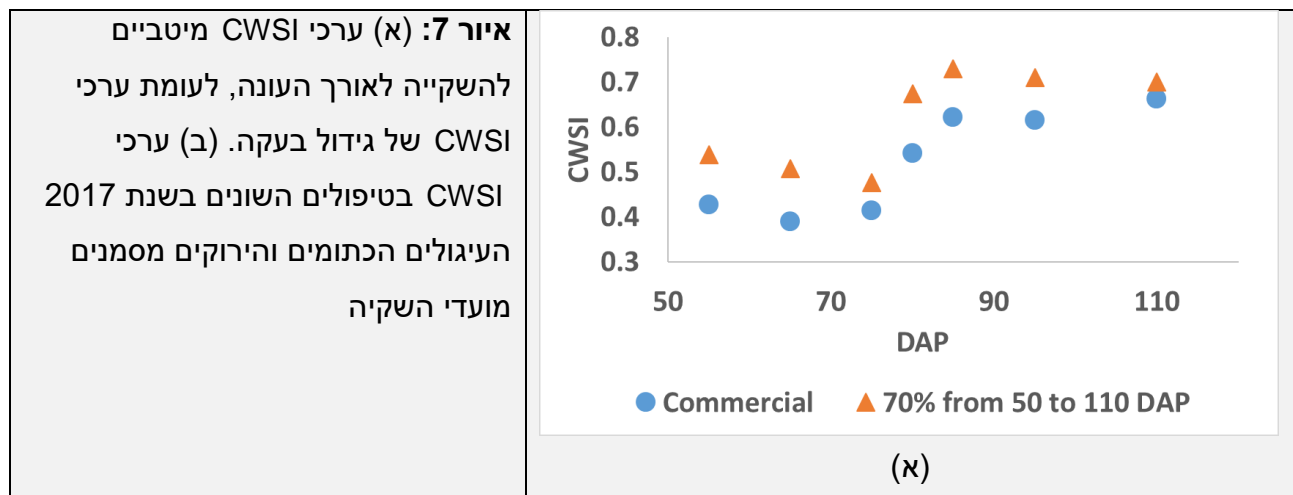
תוצאות עיקריות

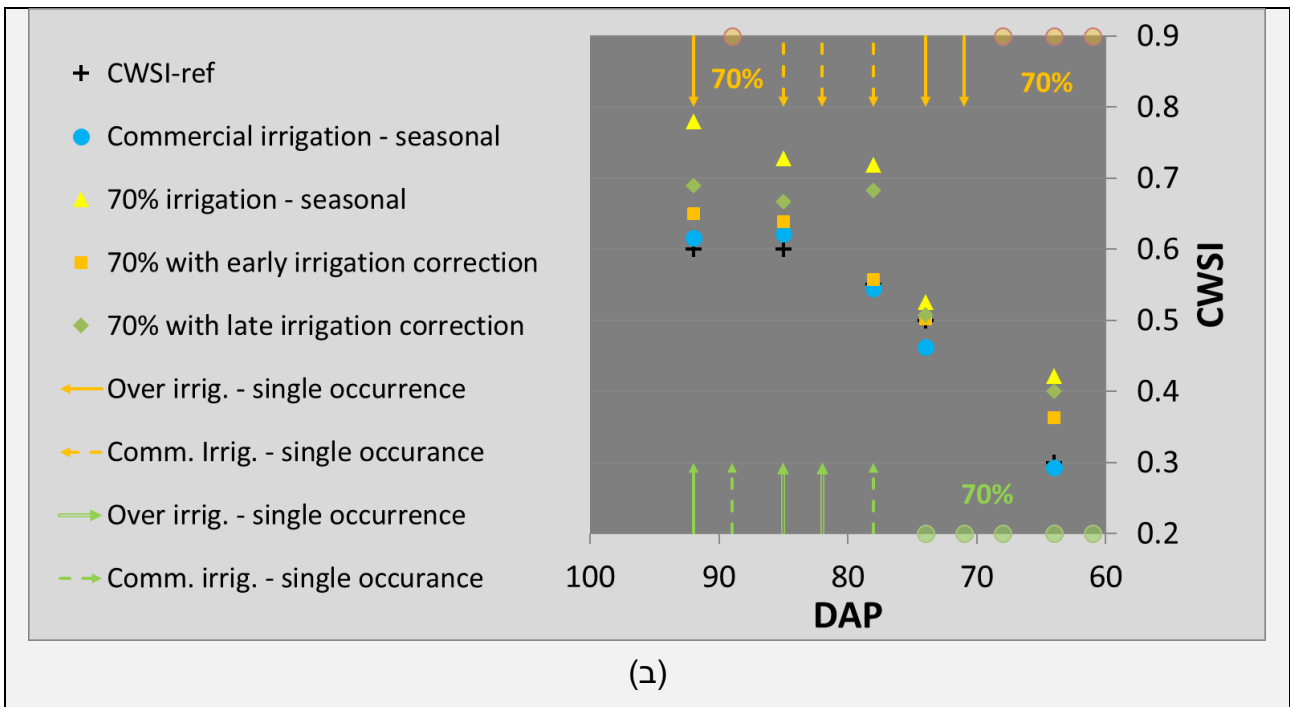
איתור קבוע החזר מתאים

בשנה הראשונה, 2015, הן מדידות מוליכות הפיוניות והן הצילומים התרמיים לא הצביעו על הבדל משמעותי בין טיפולי ההשקיה. למרות זאת סמוך לתאריך הצילום התרמי האחרון כמות ההשקיה הוגדלה על-מנת לאשש ממצאים קודמים. מאחר וטווח הזמן לא איפשר השפעה על מצב הגידול מעבר לשיפור קל ולא חד משמעי בערכי מדד העקה ה-CWSI, לא נעשה דיגום יבול. לפיכך לא מוצגות בדוח זה תוצאות משנה זו.

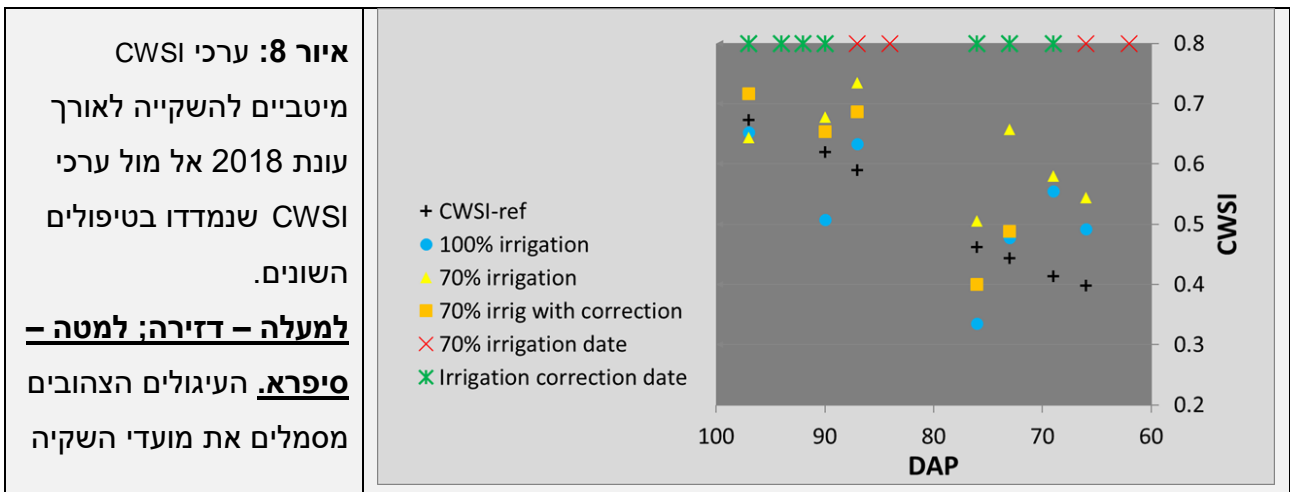
ב-2016, לא נמצאו הבדלים מובהקים בין הטיפולים לפי מדידות מוליכות פיוניות. לפי המדד התרמי CWSI נמצאו הבדלים לא מובהקים (למעט מקרים בודדים), אך התקבלה מגמה דומה המעידה על שיפור במצב המים כתוצאה מתיקון ההשקיה (מהמועד השני). התיקונים שנתנו להשקיה במהלך 2016 היו בייחס לטיפול של 100% השקיה, ולכן, לא נמצאו ערכים לקבוע ההחזר, הקשורים ל-CWSI. ערכי ה-CWSI שנמדדו בטיפולים של 100% השקיה היו גבוהים ביחס לערכים של העבודות הקודמות של הקבוצה הזאת. לאור זאת שממשק ההשקיה המשקי לא היה מספיק טוב, לא ניתן היה להתייחס לעקות מים בטיפולים של השקיה גרעונית.

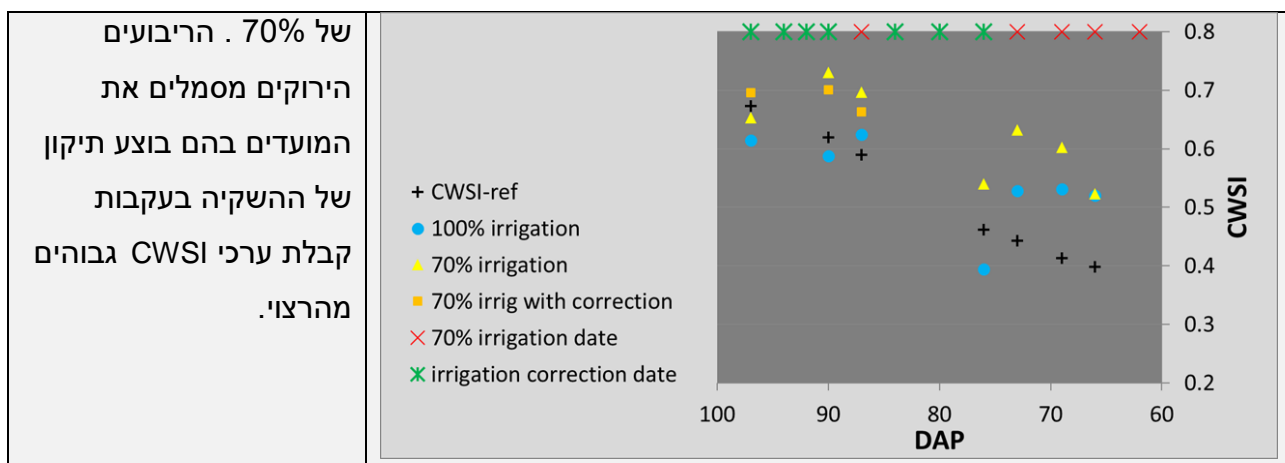
מנתוני המדידות של 2017 נבנה עקום המתאר את מהלך העונתי הרצוי של האינדקס התרמי CWSI, איור 7-א. באותו איוק מתואר המהלך העונתי של גידול המושקה ב-70% מהמנה המשקית. מעקום זה ניתן לחלץ את קבוע ההחזר לצמחים שנמצאים בגרעון. איור 7-ב מראה את המהלך העונתי של מצב המים ואירועי ההקשיה עבור הניסוי של 2017.





איור 8 מציג את אותו מהלך לעונת 2018 לשני הזנים, דזירה וסיפרא. עד ל-62 יום משתילה כל החלקות קבלו את אותה השקיה לפי לוחות השקיה והתאדות. טבלה 2 מסכמת את התצפיות של מדד העקה (איור 8), תכנון ההשקיות בעקבות התצפיות (איור 9) והסברים לתצפיות חריגות באמצעות ההשקיות בפועל כפי שנתקבלו מקריאות מדי המים (איור 10).





טבלה 2: תיאור תצפיות CWSI, החלטות ההשקיה והסברים לתצפיות חריגות לעונת 2018

הערות	הסבר בדיעבד לתצפיות חריגות (איור 14)	החלטות השקיה (איור 13)	תצפיות CWSI (איורים 11 ו-12)	DAP	זן
		התחלת פיצול ההשקיה		62	שני הזנים
זיהוי של חוסר תוך 4 ימים מהשקיה	השקיה בחסר בכל הטיפולים (59 ו-62 DAP)	המשך פיצול השקיה	CWSI גבוה מן הרצוי בכל הטיפולים הבדל קטן בין הטיפולים	66	דזירה
למרות ההחלטות על תוספת של 5% ו-15% לטיפול המסחרי והמיועד לתיקון בהתאמה, ניתנה בפועל תוספת של 6% בלבד	כנראה השפעה של החסר המצטבר בהשקיות קודמות.	התחלת תיקון השקיה: 5% תוספת לטיפול המסחרי 15% תוספת לטיפול המיועד לתיקון	CWSI גבוה מן הרצוי בכל הטיפולים אין הבדל בין הטיפולים	69	דזירה
למרות ההחלטות על תוספת של 10% לטיפול המיועד לתיקון, ניתנה בפועל תוספת של 5% בלבד	אין חריגה	10% תוספת לטיפול המיועד לתיקון	טיפול מסחרי ומתוקן קרובים ל-CWSI הרצוי טיפול 70% עם CWSI גבוה מהרצוי	73	דזירה
	אין הסבר; אי יציבות של ערך הסף?	10% תוספת לטיפול המיועד לתיקון	CWSI נמוך מהמצופה בכל הטיפולים	76	דזירה
הטיפול שמיועד לתיקון קבל בפועל רק 53%		סבב שני של השקיה בחסר (84 ימים משתילה)	גשמים ועננים לסירוגין שלא	77-86	דזירה

זן	DAP	תצפיות CWSI (איורים 11 ו-12)	החלטות השקיה (איור 13)	הסבר בדיעבד לתצפיות חריגות (איור 14)	הערות
		אפשרו ביצוע צילומים ומעקב			
דזירה	87	כצפוי: טיפול מסחרי קרוב לערך הרצוי טיפול מתוקן וטיפול בחסר גבוהים מהרצוי	להמשיך את הטיפול בחסר	אין חריגה	3 ימים לאחר סבב שני של 70% השקיה CWSI נמצא גבוה מהרצוי
דזירה	90	CWSI נמוך מהמצופה בכל הטיפולים אך יש הבדל בין הטיפולים	הוחלט על: תוספת של 10% לטיפול המתוקן ¹	אין הסבר; צילום או ניתוח לא מיטביים? אולי מצביע על הצורך ברפרנס מושקה היטב במקום להסתמך על ערכי סף קבועים	למרות ההחלטה לתת 10% יותר ההשקיה בפועל היתה של 80%. בהשקיה של 97 יום רואים שניתנה תוספת של 10% כנראה שזה המצב גם בהשקיה ב-94 יום (לא היתה קריאת שעונים)
דזירה	97	כל הטיפולים קרובים ל-CWSI רצוי	סיום הניסוי	ההשקיה בפועל מראה כי טיפול 70% קבל 100% השקיה (92 ימים משתילה) זה מספק הסבר לעובדה ש-CWSI שלו קרוב לרצוי	
סיפרא	66	CWSI גבוה מן הרצוי בכל הטיפולים אין הבדל בין הטיפולים	המשך פיצול השקיה	השקיה בחסר בכל הטיפולים (59 ו-62 DAP)	
	69	CWSI גבוה מן הרצוי בכל הטיפולים	המשך פיצול השקיה ²	השקיה בחסר בכל הטיפולים (68 ימים משתילה)	בדיעבד – זיהוי של העקה שבוע לאחר ההשקיה בחסר

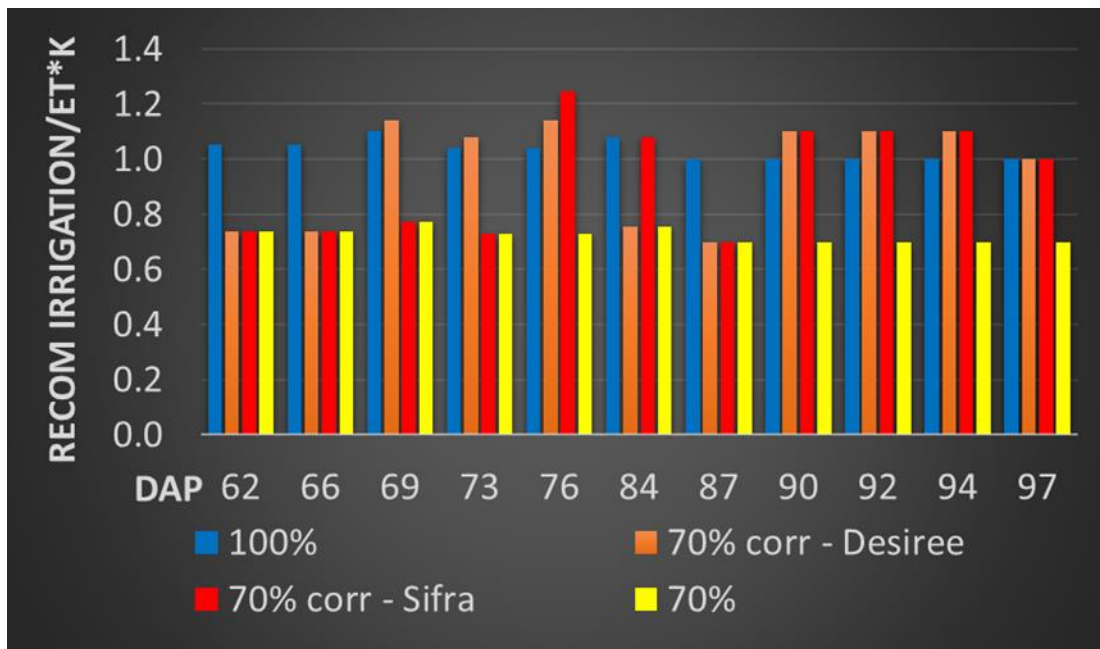
¹ בגין המגמה המצטיירת מהמועדים הקודמים של הבדלים בין הטיפולים ובגין ההפרש במועד הזה.

² מכיוון שזו הפעם הראשונה שעבדנו עם הסיפרא ולא היה הבדל בין הטיפולים לא יכולנו להיות בטוחים שלא מדובר בערכי CWSI שונים מהדזירה

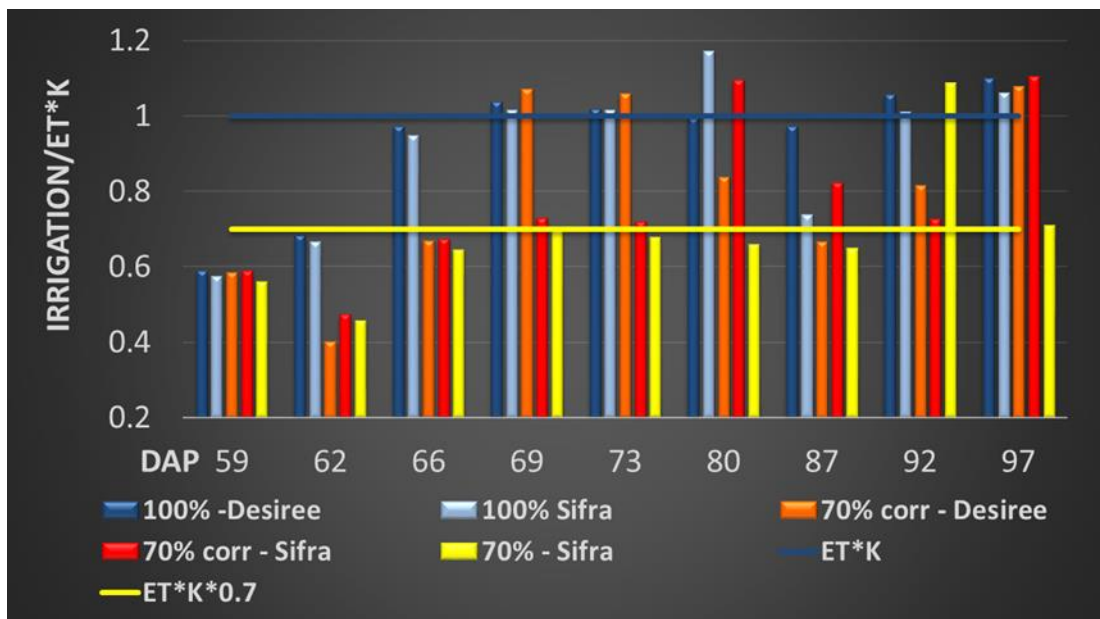
הערות	הסבר בדיעבד לתצפיות חריגות (איור 14)	החלטות השקיה (איור 13)	תצפיות CWSI (איורים 11 ו-12)	DAP	זן
		5% תוספת לטיפול המסחרי ³	ניכר הבדל בין הטיפולים		
	אין הסבר, יכול להיות שלסיפרא יש ערך סף שונה בתקופה הזו מזה של הדזירה	המשך פיצול השקיה ⁴	CWSI גבוה מן הרצוי בכל הטיפולים ניכר פער בין הטיפולים	73	סיפרא
למרות ההחלטה על תוספת של 20% לטיפול המיועד לתיקון, ניתנה בפועל תוספת של 10% בלבד	אין הסבר; צילום או ניתוח לא מיטביים?	התחלת תיקון השקיה: 25% תוספת לטיפול המיועד לתיקון	CWSI נמוך בכל הטיפולים אך ההבדל בין הטיפולים נשמר	76	סיפרא
		השקיית הטיפול המתוקן כמו הטיפול המסחרי	גשמים ועננים לסירוגין שלא אפשרו ביצוע צילומים ומעקב	77-86	
	אין חריגה	סבב שני של השקיה בחסר	CWSI של כל הטיפולים כצפוי	87	
זיהוי של העקה תוך 3 ימים מההשקיה	אין חריגה	תיקון השקיה: 10% תוספת לטיפול המיועד לתיקון	כצפוי: טיפול מסחרי קרוב לערך הרצוי טיפול מתוקן וטיפול בחסר גבוהים מהרצוי	90	
תוך שבוע של תיקון ערך CWSI של הטיפול המתוקן חזר לערכו הרצוי	ההשקיה בפועל מראה כי טיפול 70% קבל 100% השקיה (92 ימים משתילה) זה מספק הסבר לעובדה ש-CWSI שלו קרוב לרצוי	סיום ניסוי	כל הטיפולים קרובים ל-CWSI רצוי	97	
	אין הסבר; צילום או ניתוח לא מיטביים?		ערך CWSI גבוה מאוד בכל הטיפולים (קרוב ל-1)	101	שני הזנים

³ מכיוון שטיפולי 100% של שני הזנים הושקו באמצעות אותו בקר.

⁴ עדיין לא היינו בטוחים שמדובר בערך סף זהה לשני הזנים



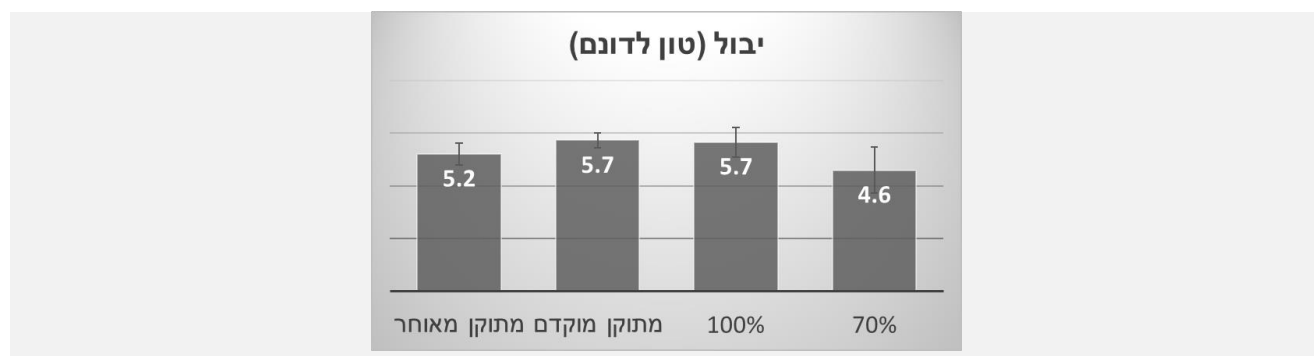
איור 9: השקיה מומלצת לכל טיפול תוך מעקב אחר מדד CWSI

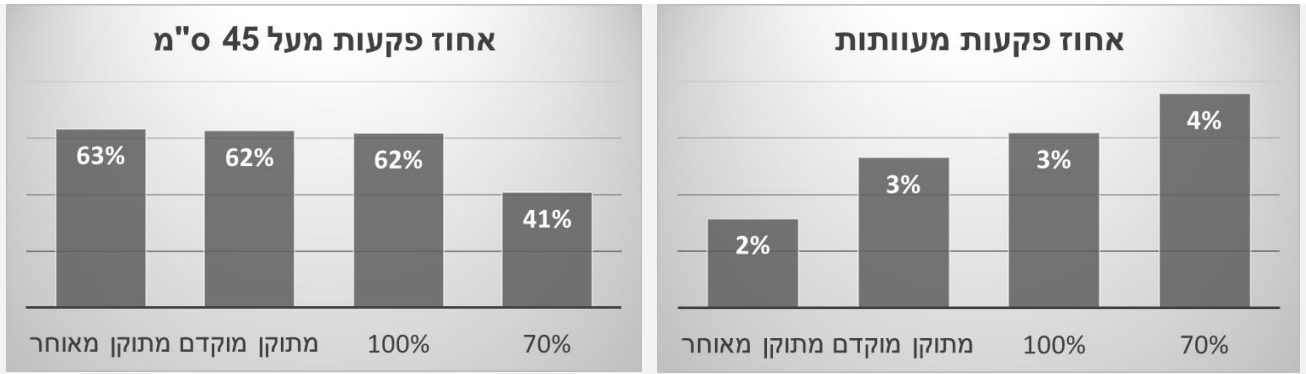


איור 10: השקיה בפועל כאחוז מההשקיה הרצויה (התאדות כפול מקדם גידול) בכל אחד מן החזרות של הטיפולים. הערכים הוצאו מתוך קריאות של מדי מים. מד המים שהיה על טיפול 70% דזירה לא-עבד כמו שצריך ולכן לא מופיע כאן.

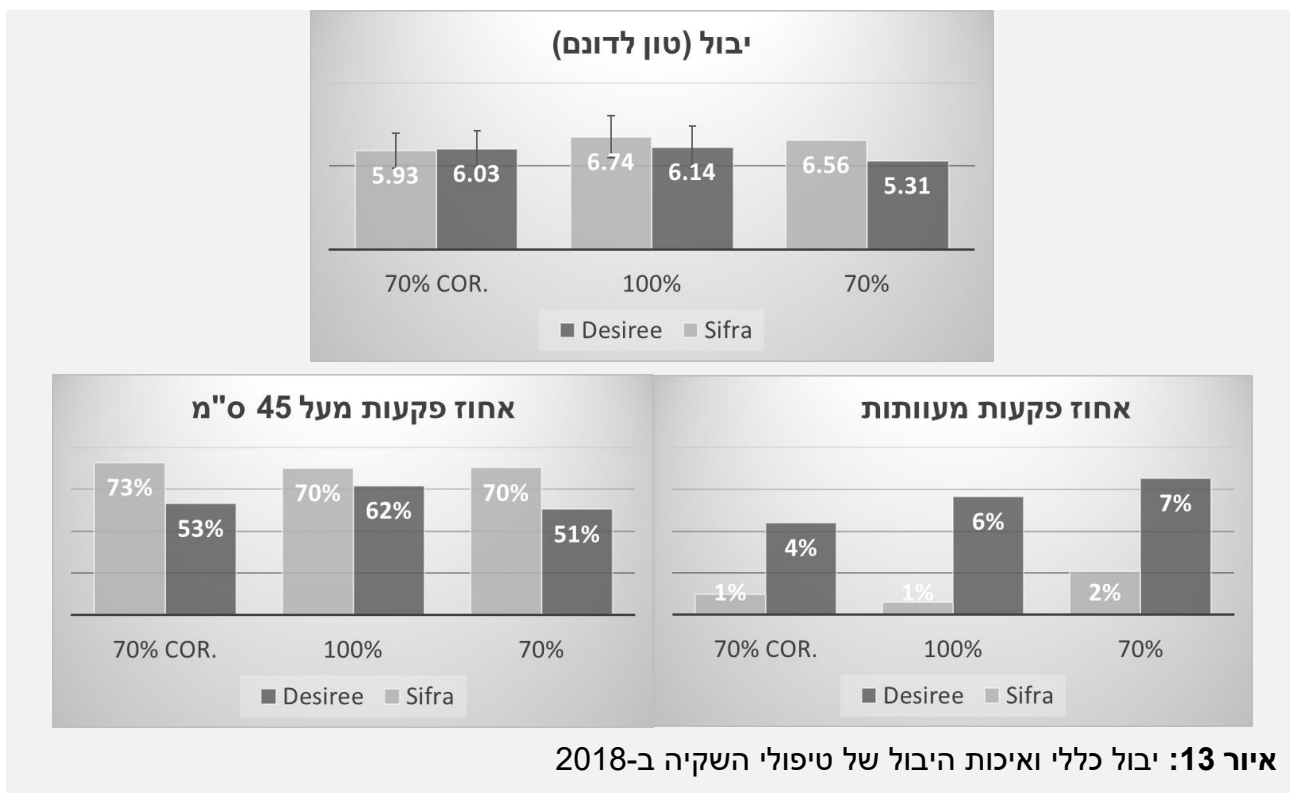
כמות ואיכות היבול

איורים 11-13 מראים את נתוני היבול של עונת 2016-2018. התוצאות מראות כי הטיפול של ה-100% הוא בעל יבול גבוה יותר מהטיפול הגרעוני, וברוב המקרים עם אחוז פקעות גדולות (מעל 45) הגדול ביותר. רואים כי הטיפולים שהחלו ב-70% כדי ליצור עקה מסויימת ואח"כ טופלו כדי לשפר את מצבם לפי הצילומים התרמיים, היבול שלהם גבוה יותר משל הטיפול של ה-70% אך איננו שונה בצורה מובהקת לא מה-100% ולא מה-70%.





איור 12: יבול כללי ואיכות היבול של טיפולי השקיה ב-2017



איור 13: יבול כללי ואיכות היבול של טיפולי השקיה ב-2018

ב.4. דיון

קבלת החלטות השקיה לפי cwsI

CWSI בתפוחי אדמה חושב באמצעות ניתוח אוטומטי של צילומים תרמיים תוך שילוב של נתוני טמפרטורת אוויר, קרינה, רוח ולחות יחסית מתחנה מטאורולוגית.

עקומי CWSI שהתקבלו מאיחוד נתונים רב-שנתיים מראים כי הפרש הממוצע ב-CWSI בין טיפול מסחרי ובין טיפול שקבל 70% הוא 0.1. מדד CWSI הראה הפרשים מהטיפול המסחרי או מערך הסף הרצוי 3-7 ימים לאחר מתן השקיה בחסר של 70%. כלומר, מיד לאחר השקיה אחת או שתיים בחסר. ממצא זה מראה כי למדד יש רגישות גבוהה מאוד. בהשוואה, צילום RGB הצביע על הבדלים כשבועיים לאחר ההשקיה בחסר. כלומר, זהו כלי שמבחינת הרגישות שיכול להתאים לניהול השקיה במהלך העונה.

יש שתי שיטות על-פיהן ניתן להשתמש בעקומים הללו. אם מניחים שערכי הסף הללו הם הדירים וקבועים, ניתן להחליט על תוספת השקיה, במידה שמתקבל CWSI גבוה לפחות ב-0.1 מהערך המתאים באותה תקופה. לחילופין, ניתן להחליט על תוספת במידה ש-CWSI הוא גבוה יותר ב-0.1 מאזור המושקה היטב המתפקד כרפנס.

בשלוש שנות הניסוי, החלטה על תוספת השקיה ניתנה על-פי שתי השיטות. ב-2016 השתמשנו בשיטת הרפנס, ב-2017 לפי שיטת ערכי CWSI קבועים וב-2018 השתמשנו בשתי השיטות לסירוגין בגלל אי יציבות של ערך CWSI שלא היה ברור אם הוא נובע מהשקיה בפועל שאיננה נכונה או מחוסר יציבות שלו (בדיעבד התברר כי שתי הסיבות כנראה נכונות).

לא ניתן לומר בוודאות שעקום CWSI רצוי קבוע קיים בצורה מוחלטת אך ניתן להסתייע בו. עדיף להחזיק בשדה פס או אזור קטן המושקה היטב שיהווה רפנס.

בכל אחת מהשיטות, ההחזר היה בערכים 10-25 אחוזים כתלות בהפרש שהתקבל. מהשוואה עם קריאות שעוני מים ב-2017 וב-2018 ניתן היה לראות, כי למרות שהתכנון היה תוספת של 10-25 אחוזים, ברב המקרים הפועל ההשקיה היתה נמוכה יותר מהתכנון. בכל מקרה, ערכי CWSI של הטיפולים המתוקנים ירדו לערכים רצויים לאחר 1-2 השקיות בעודף ו-1-2 השקיות מסחריות. ב-2018 הראינו כי גם במחסור מאוחר שך השקיה בחסר, הזיהוי של העקה קרה 3 ימים לאחר מתן העקה, המצב חזר לקדמותו תוך השקיה בעודף יחידה. זאת הסיבה שברב המקרים, היבולים ואיכות היבולים של הטיפולים הללו הובילה לפגיעה קטנה ופעמים לא משמעותית.

מכאן, שעל כל הפרש של 0.1 במדד העקה יש לתת תוספת של 10-15 אחוז כדי להחזיר את המצב לקדמותו.

צילומים תרמיים ככלי למעקב אחר מצב מים בשדה

CWSI בתפוחי אדמה חושב באמצעות ניתוח אוטומטי של צילומים תרמיים תוך שילוב של נתוני טמפרטורת אוויר, קרינה, רוח ולחות יחסית מתחנה מטאורולוגית. כאמור, למדד רגישות גבוהה והוא מזהה הבדלים קטנים מאוד בהשקיה תוך השקיה אחת בלבד. על-כן הוא יכול לשמש הן לניהול השקיה והן לאיתור מוקדם

של תקלות השקיה או של אזורים בשדה שלא מושקים מיטבית. אפשרות זו איננה מסופקת באמצעות חיישני קרקע או צמח נקודתיים.

למרות זאת, במהלך שלוש שנות המחקר היו לא מעט ימים מעוננים וגשומים מה שמנע את היכולת לצלם ומנע את היכולת לקבל החלטות שבועיות באופן יציב וקובע. בנוסף, ב-2018 התוודענו למגבלות הקיימות בשימוש ברחפנים במרחב ובזמן. לפיכך, למרות שמדד העקה התרמי הינו רגיש, הגמישות של השימוש בו היא מוגבלת.

כאמור, לפי הממצאים של המחקר הנוכחי, מדד העקה התרמי, מאפשר מעקב אחר תקינות ההשקיה וכן מאפשר תיקון של ההשקיה במצבים של חוסר. הוא איננו תחליף לחיישנים אחרים אלא יכול לבוא בתוספת. ניתן להשתמש בו בימים לא מעוננים כחלק ממערך של חישה ולא ככלי יחיד. הצילומים יכולים לספק את השונות המרחבית ואילו חיישני הקרקע והצמח את המעקב הרציף בזמן בנקודות נבחרות.

5. פרסומים מדעיים

גרף, נ., כהן, י., אלחנתי, ו., לוי, א., בריקמן, ר., סרנגה, י., סגולי, מ., בוכשטב, א. 2018. ממשק השקיה בתפוא"א באמצעות צילומים תרמיים. פוסטר בכנס השנתי של האגודה לגידולי שדה וירקות. פברואר 2018, הפקולטה לחקלאות, רחובות.

כהן, י., רוד, ר., אלחנתי, ו., לוי, א., בריקמן, ר., עוזר, ש., איגנת, ת., גרף, נ., סגולי, מ., ברונר, מ., אלרט, א., בן-גל, א., לזרוביץ, נ., בוכשטב, א., זילברמן (ג'ון), א., דר, צ., 2017. ממשק השקיה בתפוא"א בהתבסס על מדד *cwsi* המחולץ מצילום תרמי. הכנס השנתי של האגודה הישראלית להנדסה חקלאית. 2 בספטמבר 2017, מינהל המחקר החקלאי, ראשון לציון.

6. ספרות מצוטטת (ביבליוגרפיה)

Alchanatis V., Cohen, Y., Cohen, S., Moller, M., Sprinstin, M., Meron, M., Tsipris, J., Saranga, Y. & Sela, E. (2010). Evaluation of different approaches for estimating and mapping water crop status variability in cotton with thermal imaging. *Precision Agriculture*, 11(1): 27-41.

Bellvert, J., Zarco-Tejada, P. J., Girona, J. & Fereres, E. (2013). Mapping crop water stress index in a 'Pinot-noir' vineyard: comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle. *Precision Agriculture*, Springer Science, DOI 10.1007/s11119-013-9334-5,

Ben-Gal, A., Agam, N., Alchanatis, V., Cohen, Y., Yermiyahu, I., Zipori, I., Presnov, E., Sprinstin, M., 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.

- Cohen, Y., Alchanatis, V., Prigojin, A., Levi, A., Soroker, V., Cohen, Y. (2012). Use of aerial thermal imaging to estimate water status of palm trees. *Precision Agriculture*, 13(1): 123-140.
- Erdem, T., Orta, A. H., Erdem, Y. & Okursoy, H. (2005). Crop water stress index for potato under furrow and drip irrigation systems, *Potato Research*, 48: 49-58.
- Fuchs M, Tanner CB. 1966. Infrared thermometry of vegetation. *Agronomy Journal*, 58: 597–601.
- Gates, M., 1968, TRANSPIRATION AND LEAF TEMPERATURE, *Annu. Rev. Plant Physiology* 1968.19:211-238.
- González-Dugo, V., Zarco-Tejada, P. J., Nicolás, E., Nortes, P. A., Alarcón, J. J., Intrigliolo, D. S., Fereres, E. (2013). Using high resolution UAV thermal imagery to assess the variability in the water status of five fruit tree species within a commercial orchard. *Precision Agriculture*, 14: 660-678.
- Idso, S. B., Jackson, R. D., Pinter Jr., P. J., Reginato, R. J., & Hatfield, J. L. (1991). Normalizing the stressdegree- day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24: 45-55.
- Jackson, R. D., Idso S. B., Reginato, R. J., & Pinter Jr, P. J. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, 17, 1133-1138.
- Jones, H. C. (1992). Energy balance and evaporation. Crop water stress index. In: *Plants and microclimate*, 2nd edition (pp. 107-130, 293–295). Cambridge: Cambridge University Press.
- Maes, W. H., Steppe, K. (2012). Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-based thermal remote sensing in agriculture: a review. *Journal of Experimental Botany*, 63(13): 4671–4712.
- Rud R., Cohen, Y., Alchanatis, V., Dar, Z., Levi, A., Brikman, R., Shenderoy, C., Heuer, B., Markovits, T., Mulla, D., Rosen, C. (2013). The potential of CWSI based on thermal imagery for in-season irrigation management in potato fields. *Proceedings, ECPA in Lleida, Catalonia, Spain, July 7-11*.
- Rud R., Cohen, Y., Alchanatis, V., Levi, A., Brikman, R., Shenderoy, C., Heuer, B., Markovits, T., Dar, Z., Rosen, C., Mulla, D., Nigon, T. (2014). Crop water stress index derived from multi-year ground and aerial thermal images as an indicator of potato water status. *Precision Agriculture*, 15(3): 273-289.
- Shae, J. B., Steele, D. D., & Gregor, B. L. (1999). Irrigation scheduling methods for potatoes in the northern great plains. *American Society of Agricultural Engineering*, 42, 351-360.