

אומדן ומיפוי של מצב מים בצמחי כותנה באמצעות צילומים תרמיים

עבודת גמר

**מוגשת לפקולטה למדעי החקלאות , המזון ואיכות הסביבה
של האוניברסיטה העברית בירושלים
לשם קבלת תואר מוסמך למדעי החקלאות**

**על ידי
איתן סלע**

דצמבר 2007

רחובות, ישראל

עבודה זו נעשתה בהדרכתם של:

ד"ר יפית כהן וד"ר ויקטור אלחנתי

המחלקה להנדסת מערכות חישה, מידע ומיכון,

המכון להנדסה חקלאית,

מנהל המחקר החקלאי, בית דגן.

ד"ר יהושע סרנגה

המחלקה לגידולי שדה, ירקות וגנטיקה,

הפקולטה למדעי החקלאות, המזון ואיכות הסביבה ברחובות,

האוניברסיטה העברית בירושלים.

תודות

תודה מקרב לב לד"ר יפית כהן על הליווי הצמוד, על העצות, העידוד והאופטימיות לאורך כל תקופת העבודה ועל דברים שלמדתי ממנה בתחום המקצועי והאנושי.

תודה לד"ר יהושע סרנגה (שוקי) על התמיכה מתחילת הדרך בסוף התואר הראשון ולאורך כל העבודה הנוכחית. תודה על העצות הפוריות הרצון, הסבלנות וההתמדה.

תודה לד"ר ויקטור אלחנתי על ההנחיה והעצות ועל החזון בנושא התרמי, פיתוחו והשתתפות הפעילה בכל הניסויים.

לד"ר שבתאי כהן מן המכון למדעי הקרקע במרכז וולקני, על שיתוף הפעולה בניסויים ובצדדים התיאורטיים.

למרכוס מולר על מדידות הפורומטר הקפדניות ועל העצות בניתוח הנתונים.

לסלבה אוסטרובסקי על פיתוח תוכנת CrossWise ושכלולה בהתאם לצורכי המחקר, על ההסברים והסובלנות.

לצוות הפרויקט התרמי; לד"ר משה מירון על פיתוח משטח הייחוס, לד"ר יוסף ציפריס, ולואלרי אורולוב ממיג"ל בקריית שמונה, על העזרה בניסויים בחוות ניסיונות הגד"ש בקריית שמונה.

לאריה בוסק על החלק הפעיל בתכנון וביצוע הניסויים בקיבוץ רבדים. תודה לצוות הגד"ש בקיבוץ רבדים ובחוות הניסיונות שליד קריית שמונה על העזרה הרבה בביצוע הניסויים.

לחקלאים משה וגידי מקיבוץ נען, על העזרה בשלבי ביצוע ניסוי החמניות בקיץ 2004, למרות שלא נמצא לו המשך.

לחקלאים גלי ואיתמר מקיבוץ מגידו, על ביצוע ניסויי ההשקיה ועל הטיפול המסור בשדה.

תודה מיוחדת לכל צוות חדר GIS בהווה ובעבר; לאביהוא כהן, רונית רוד, יונתן זוסמן, רועי עפרון נתי דויטש ואגוסטין פישמן. תודה לכם על העצות הרבות, שיתוף הפעולה, וסביבת העבודה הנעימה שיצרתם.

תודה לחברתי הדס, שתמכה בי ועמדה ליצידי ברגעים הטובים והקשים.

ואחרונים חביבים,

תודה למשפחתי האהובה, להורי, יוסף ויפה, לאחי אלי ולאחותי שרית.

תודה לכולכם.

תוכן עניינים

1	תקציר	1
3	מבוא	2
5	סקירת ספרות	3
5	חקלאות מדייקת	3.1
6	גידול כותנה	3.2
7	עקת מים והשפעותיה על היבול	3.3
8	שונות בזמינות המים בשדות חקלאיים	3.4
9	שיטות להכוונת השקיה בכותנה	3.5
11	חישה תרמית ככלי להערכת עקת מים	3.6
15	כלים ושיטות	4
15	תיאוריה	4.1
15	מדד העקה התרמי CWSI	4.1.1
15	מאזן האנרגיה של העלה	4.1.2
19	מערך ניסויי השדה	4.2
19	ניסויי שדה הקדמי 2003	4.2.1
19	ניסויי 2005	4.2.2
20	ניסויי 2006	4.2.3
20	ניסויי 2007	4.2.4
20	מהלך המדידות	4.3
21	משטחי ייחוס	4.3.1
22	צילומים תרמיים וצילומים בתחום הנראה	4.3.2
23	עיבוד התמונות	4.4
23	שילוב צילומים תרמיים עם צילומים בתחום הנראה	4.4.1
23	הפרדת אובייקטים בתמונה	4.4.2
25	עיבוד הנתונים	4.5
25	מיפוי	4.6
27	תוצאות	5
27	מדידות מטאורולוגיות	5.1

30	_____ ניתוח הנתונים ברמת העלה הבודד מול רמת החלקה	5.2
31	_____ מדידות פיזיולוגיות, ומדדי העקה התרמיים	5.3
33	_____ מוליכות פיוניות מול מדדי העקה התרמיים	5.4
37	_____ פוטנציאל המים בעלה מול מדדי העקה התרמיים	5.5
41	_____ שלבי הגידול הפנולוגיים ומדדי העקה	5.6
42	_____ השוואה בין זנים	5.6.1
42	_____ מיפוי – יישום המודלים	5.7
42	_____ מיפוי LWP לפי מודל CWSI אמפירי של תקופת הפריחה	5.7.1
44	_____ מיפוי LWP לפי מודל CWSI אמפירי של תקופת מילוי ההלקטים	5.7.2
49	_____ דיון	6
49	_____ אומדן ברמת העלה הבודד לעומת רמת החלקה	6.1
49	_____ מדידות פיזיולוגיות, ומדדי העקה התרמיים	6.2
49	_____ מוליכות פיוניות מול מדדי העקה התרמיים	6.2.1
51	_____ פוטנציאל המים בעלה מול מדדי העקה התרמיים	6.2.2
52	_____ סיכום ביניים	6.2.3
52	_____ שלבי הגידול הפנולוגיים ומדדי העקה	6.3
53	_____ מדדי העקה התרמיים	6.4
54	_____ מיפוי	6.5
55	_____ השלכות מעשיות של המחקר	6.6
56	_____ נושאים להמשך מחקר	6.7
57	_____ רשימת ספרות	7
i	_____ נספחים	8
i	_____ תקציר באנגלית	9

רשימת קיצורים ומונחים

CWSI - Crop Water Stress Index.....	אינדקס העקה התרמי;
DSS - Decision Support System.....	מערכת תומכת החלטה (מת"ה);
GIS - Geographic Information System.....	מערכות מידע גיאוגרפיות (ממ"ג);
GPS - Global Position System.....	מערכת איכון עולמית;
IR - Infra Red.....	אינפרא אדום (א"א);
LAI - Leaf Area Index.....	מדד שטח העלווה;
LWP - Leaf Water Potential.....	פוטנציאל המים בעלה;
NDVI - Normalize Difference Vegetation Index.....	אינדקס צמחיה הפרשי מנורמל;
RDI - Regulated Deficit Irrigation.....	השקייה בחסר מבוקרת;
RGB - Red Green Blue.....	גוני אדום - ירוק - כחול;
RH - Relative Humidity.....	לחות יחסית;
SSA - Site Specific Application.....	יישום מונחה מיקום;
SSM - Site Specific Management.....	ניהול מונחה מיקום;
TIR - Thermal IR.....	א"א תרמי;
VPD - Vapor Pressure Deficit.....	גרעון לחץ האדים;
VRI - Variable Rate Irrigation.....	השקייה מדייקת ברמה משתנה;
VRT - Variable Rate Technology.....	טכנולוגיית יישום ברמה משתנה;
WARS - Wet Artificial Reference Surface.....	משטח ייחוס לח;

1 תקציר

השקיה מהווה גורם מרכזי אשר קובע את כמותם ואיכותם של יבולים. חקלאים קובעים את כמויות המים ומועדי ההשקיה לפי המלצות שנקבעו מראש ו/או לפי מספר מדידות קרקע-צמח-אטמוספירה. בדרך כלל, מתבצעות מדידות אלו במספר נקודות "מייצגות" ויישום ההשקיה נעשה באופן אחיד לכל השדה ללא התייחסות לשונות המרחבית הטבעית שלו.

פוטנציאל המים בעלה (LWP) הוא אחד המדדים המקובלים ביותר למדידת מצב המים של הצמח ולהכוונה ותזמון השקיה בגידולי שדה ובכותנה בפרט. LWP מהווה שיטה אמינה, אולם היא מוגבלת למספר מצומצם של מדידות מקומיות וקשה לאפיין באמצעותה את מצב המים המדויק של שטחים נרחבים, כמו גם לאתר את השונות המרחבית האופיינית לשדות חקלאיים. ירידה ב-LWP גורמת לסגירת פיוניות וכתוצאה מכך לעליית טמפרטורת העלווה. הקשר שימש בעבר כבסיס לבחינת טמפרטורת העלווה כאינדיקטור לאבחון של מצב מים בגידולים חקלאיים וככלי פוטנציאלי להכוונת השקיה. אולם עד כה, נמנע שימוש מעשי בשיטה זו, עקב קשיים שנבעו מפענוח המידע התרמי שהתקבל. בשנים האחרונות התפתח תחום הצילום בתחום האינפרא-אדום התרמי (TIR). צילומי TIR מספקים מידע מרחבי מפורט אודות טמפרטורה של אזורים נרחבים, ברמת דיוק גבוהה.

מטרתה של עבודה זו היא פיתוח שיטה מבוססת-מודל להערכה ומיפוי של פוטנציאל המים בכותנה, באמצעות צילומי TIR וצילומים בתחום הנראה (RGB). עבודה זו עוסקת בין היתר, בייסוד וכיול של מודלים להערכת מוליכות הפיוניות ו-LWP, בבחינת תפקודם במצבים פיזיולוגיים ופנולוגיים שונים. בנוסף, העבודה מציעה שיטה למיפוי של LWP, במטרה לאפיין את השונות המרחבית של מצב המים בחלקות השדה.

חמישה שדות כותנה שגודלו בשנים 2003, 2005, ו-2006 בשלושה אזורים, עם 3-5 טיפולי השקיה, שימשו לצורך איסוף נתונים במהלך שישה-עשר מועדי מדידה. שדה מסחרי עם 3 טיפולי השקיה שימש ב-2007 לאימות המודל. בכל מועד בוצעו צילומי TIR ו-RGB של החלקות מגבהים שונים, כשבתוכם הוצב משטח ייחוס מלאכותי (WARS) המדמה נוף צמחים בתנאי דיות מירבית. במרחב הצילומים נמדדה מוליכות הפיוניות ופוטנציאל מים בעלה של מספר עלים, וכן נאספו נתונים מטאורולוגיים בכל דקה. תמונות ה-RGB שולבו בתמונות ה-TIR לצורך זיהוי ומיסוך של קרקע חשופה ועלים מוצלים.

מדד העקה התרמי (Crop Water Stress Index) CWSI שימש לייחוס הנתונים התרמיים אל תנאי הסביבה. CWSI חושב עבור כל מדידה באופן אמפירי (E_{CWSI}) - בהתבסס על ה-WARS וטמפרטורת האוויר $+5^{\circ}C$, ובאופן תיאורטי (T_{CWSI}) - לפי חישוב טמפרטורת משטחי ייחוס תיאורטיים ותוך שקלול הנתונים במשוואת מאזן האנרגיה של העלה. ערכי E_{CWSI} , T_{CWSI} וערכי

הטמפרטורה של כל אחד מן המועדים הוצבו מול נתוני מדידות מוליכות הפיוניות ו-LWP לצורך ביסוס וכיול מודלי הערכה.

בין מוליכות הפיוניות לבין הטמפרטורה והמדדים התרמיים נמצאו קשרים מובהקים עם מקדמי מתאם (R) שנעו בין 0.55 ל-0.64 והשתפרו עד לכדי 0.79 עם שגיאת תקן של $129.4 \text{ mmol sec}^{-1} \text{ m}^2$ לאחר הסרת נתוני מועדים חריגים. בין נתוני LWP לבין נתוני הטמפרטורה והמדדים התרמיים נמצאו קשרים מובהקים יותר, עם מקדמי מתאם שנעו בין 0.49 ל-0.75 והשתפרו עד לכדי 0.84 עם שגיאת תקן של 0.26MPa, לאחר הסרת נתונים של 3 מועדים חריגים (מתוך 16).

חלוקת המועדים ששימשו לבניית המתאמים, בהתאם לשתי תקופות פנולוגיות במהלך התפתחות כותנה, 'תקופת הפריחה' ו-'תקופת מילוי הלקטים', הניבה מודלים שונים עבור כל תקופה ומקדמי מתאם משופרים ברוב המקרים, בייחוד עבור תקופת מילוי ההלקטים. מודלי המתאם בין E_{cWSI} ל-LWP שימשו ליצירת מפות פוטנציאל מים באמצעות שימוש בצילומים תרמיים אלכסוניים של השדות משתי תקופות פנולוגיות. השוואת ביצועי המיפוי מול מדידות LWP שנערכו בשדה, הראתה יכולת גבוהה באבחון והפרדת מצבי מים שונים שאפיינו חלקות ואזורים שונים בשדה ואף חשפה את השונות בתוך החלקות. אימות המודל מתקופת מילוי ההלקטים נעשה באמצעות רכישת צילום תרמי מוטס מעל שדה מסחרי בקיץ 2007 בו נתנו שלושה טיפולי השקיה. השוואה בין ערכי פוטנציאל מים מדודים בשדה ובין ערכים מקבילים שנתקבלו באמצעות המיפוי הראתה על התאמה טובה עם הערכת יתר מסוימת.

תוצאות המחקר מצביעות על היכולת למפות את מצב המים של שדות חקלאיים באמצעות חישה תרמית. המודלים והמפות שהופקו כדוגמא, עשויות לשמש ככלי להכוונת השקיה ובעתיד אף כבסיס ליישום טכנולוגיית ההשקיה מדייקת.

2 מבוא

מים הינם משאב ההולך ומדלדל באזורים נרחבים בעולם. חקלאות השלחין מהווה קרוב ל-20% מכלל החקלאות בעולם ומנצלת כ-70% מסך צריכת המים הגלובלית (Howell, 2007; FAOSTAT, 2001). חקלאות השלחין פרודוקטיבית יותר מחקלאות הבעל ולכן היא עתידה להפוך לחקלאות הדומיננטית בעתיד, שתתמודד עם צרכי אוכלוסיית העולם ההולכת וגדלה. ניהול יעיל של השימוש במים בחקלאות עשוי לצמצם את משבר המחסור במשאב ולהפחית את הפגיעה בסביבה. ייעול שיטות ההשקיה מקטין את תשומות החקלאי וגם מסייע בשיפור פעולות אגרוטכניות אחרות, כגון יישום של דשנים וקוטלי מחלות (Rosegrant et al., 2001).

גידול הכותנה תופס מקום מרכזי בחקלאות השלחין בארץ ובעולם. בישראל, הכותנה מהווה ענף מרכזי בין גידולי השדה הקיציים. הענף משתרע על שטח של כ-100,00 דונם ומתבסס ברובו על מים מושבים. למרות התחרות הקשה בשווקי העולם, גידול הכותנה בארץ שורד הודות ליבולים הגבוהים, איכות הסיבים שלו והודות למחירים הגבוהים שהענף פודה בשוק העולמי. איכות יבולי הכותנה הישראלית מושגים בין היתר בזכות שימוש יעיל בתשומות, במיוחד במים (פלש, 1997). השקייה מהווה גורם מרכזי המשפיע על כמות ואיכות של יבולים. בגידולים רבים ובכותנה בפרט, עקת מים חמורה וקצרה או עקה מתונה וארוכה, עשויה להתבטא בפגיעה ביבול, עד לכדי אובדן כלכלי מוחלט. בשלבי הגידול השונים של כותנה נדרשים כלים מעשיים לכימות מצב המים של הצמחים. השיטות המקובלות כיום להכוונת השקייה מסתמכות במידה מועטה על מדידות ישירות של הגידול ובעיקר על מדידות קרקע ואקלים. המדידות הישירות של הצמח כשלעצמן מהוות אינדיקציה טובה להתהוות עקת מים, אולם הן מסתמכות על מדידות נקודתיות שאינן מייצגות בהכרח את המצב הכללי בשדה.

חקלאות מדייקת מוגדרת כחקלאות שרתמה לשורותיה את השימוש בטכנולוגיות מתקדמות, לצורך ייעול השימוש בתשומות והשגת יבול מקסימאלי, תוך צמצום הפגיעה בסביבה. השלב הראשון ביישום של עקרונות החקלאות המדייקת הוא איסוף אינטנסיבי של נתונים במרחב ובזמן. בהקשר זה, מיפוי השונות בזמינות המים במרחב השדה עשוי לתרום לתכנון יעיל של מערכת ההשקיה (Whelan and McBratney, 2000). מיפוי זמינות המים יכול להיעשות באמצעות חישה מרחוק בשילוב מודלים המקשרים בין המשתנה הנמדד באמצעי החישה ובין המשתנה הפיזיקאלי הרלוונטי.

טמפרטורת הנוף מהווה אינדיקציה טובה לאבחון עקת מים וכלי פוטנציאלי להכוונת השקייה. בשני העשורים האחרונים, מדידות הטמפרטורה למטרה זו, בוצעו באופן נקודתי או באופן גס משטח נרחב, באופן שהכשיל את השימוש המעשי בהן. מצלמות תרמיות לעומת זאת, מאפשרות מדידת טמפרטורות נוף של אזורים נרחבים באופן מדויק יותר. שילוב של הידע שנצבר בנושא עם

טכנולוגיה זו, עשוי לעזור בקבלת החלטות השקייה בהווה ובהתאם לעקרונות החקלאות המדייקת, להוות בסיס לפיתוח טכנולוגיית ההשקיה המשתנה העתידית. על בסיס מחקרים קודמים, עבודה זו עוסקת במציאת קשר יציב בין מדדי טמפרטורה של נוף, לבין מצב מים של צמחי כותנה לצורך מיפוי מצב המים במרחב השדה, בערכים המקובלים לשימוש בהכוונת השקייה.

מטרות המחקר

מטרתה הכללית של העבודה הנוכחית היא פיתוח שיטה לאומדן ומיפוי של מצב המים בשדות כותנה, באמצעות צילומים תרמיים. מטרת המשנה של העבודה הן:

- א. ביסוס וכיול של מודל להערכת מדדים פיזיולוגיים (מוליכות הפיוניות ופוטנציאל מים בעלה) לפי מדידת טמפרטורת הנוף באמצעות צילומים תרמיים ומדידות מטאורולוגיות.
- ב. בחינת תפקודם של המודלים במצבים פיזיולוגיים ופנולוגיים שונים.
- ג. מיפוי מרחבי של פוטנציאל המים באמצעות יישום המודל על תצלומים תרמיים.
- ד. אפיון השונות המרחבית של מצב המים והשוואת כושר האבחון בין מצבי מים באמצעות המיפוי לעומת כושר אבחונם באמצעות מדידות ישירות של מצבי המים.

3 סקירת ספרות

3.1 חקלאות מדייקת

החקלאות נמנית בין הגורמים הראשונים להתפתחות התרבות האנושית ומהווה גם כיום, תנאי בסיסי לקיום האנושות. מדינות מתפתחות ומפותחות כאחד, נסמכות בכלכלתן על חקלאות. הדרישה העולמית לתוצרת החקלאית הולכת וגדלה ובמקביל, חל צמצום מתמיד במספר העוסקים בחקלאות ובמגוון סוגי הגידולים החקלאיים (Wallace, 2000). בחלק גדול מן המדינות, מגמה זו הביאה ליצירת מצב חדש, בו רוב החקלאות מנוהלת בשדות ענק על ידי משקים בודדים. הטיפול והתייחסות לשדה כאל כיחידה אחת, כפי שנהוג בחלקות שדה קטנות, אינו מתאים למצב הקיים. ככל ששדות תופסים שטחים גדולים כך סביר שיכילו שונות גדולה יותר (הבדלי גובה, טמפרטורה, עומקי קרקע וסוגי קרקע שונים, נגיעות במגוון רחב יותר של עשבים, מחלות ומזיקים וכדומה). בעבר, אופן חלוקת השדות לאזורים קטנים, אפשר לחקלאים להתייחס אל השטח באופן פרטני. במצב הקיים, הטיפול בשדה הגדול נעשה לפי סף יחיד, ועשוי שלא לממש את פוטנציאל הגידול ואף להגדיל במידה משמעותית את התשומות. במקרה של דישון חנקני לדוגמא, ביישום האחיד המקובל לפי 'ממוצע השדה', כמות זהה של דשן מפוזרת על פני אזורים בעלי דרישות דישון שונות. באזורים בהם הדשן ימצא בחסר, הגידול עשוי שלא לנצל את מלוא פוטנציאל היבול שלו ואילו באזורים בהם הוא ימצא בעודף, עשויה להיגרם רביצה וגידול וגטיבי מופרז, צריכת מים מהירה או זיהום של מקורות מים על ידי שטיפה. השלכות אלו נכונות גם לגבי יישום של חומרי הדברה והשקיה.

מטרותיה המרכזיות של החקלאות המדייקת כוללות; יעול של הייצור החקלאי על ידי הקטנת התשומות, העלאת איכות היבול, הגדלת התוצרת החקלאית ומזעור הנזק לסביבה. מטרות אלו מושגות בין היתר, על ידי התחשבות בשונות הקיימת בשדה, תוך התייחסות פרטנית לתתי-אזורים, קרי אזורי ממשק (Whelan and McBratney, 2000). מושג החקלאות המדייקת התפתח בשנות ה-90, ככינוי לחקלאות שרתמה לשורותיה טכנולוגיות חדשות אלה. מערכות כגון מערכת האיכון העולמית (Global Positioning System - GPS) ומערכות מידע גיאוגרפיות (ממ"ג; GIS - Geographical Information. Systems) מאפשרות איסוף וארגון של מידע מרחבי אודות אזורים חקלאיים נרחבים. שילוב מערכות אלו עם תוצרי חישה מרחוק וטכנולוגיות החיישנים המתקדמות, מציע דרכים חדשות ליעול תהליכים אגרוטכנים רבים. כלים אלה מאפשרים זיהוי ופענוח של תופעות מרחביות כמו מהלך התפשטותן של מחלות, חיזוי יבולים או זיהוי מחסורים במינרלים. בכלים אלה נעזרת החקלאות המדייקת לצורך פיתוח שיטות יעילות וכלים חדשים להתמודדות עם בעיות חקלאיות רבות.

החקלאות המדייקת נקראת לעיתים גם ניהול מונחה מיקום (Site Specific Management - SSM) ונסמכת על ההנחה, כי יישום פרטני בהתאם לצרכי תתי-החלקות, יעיל יותר מן היישום האחיד

הנקבע בהתאם לממוצע השדה. בשיטה זו, יחידת הטיפול משתנה בהתאם למאפייני התופעה במרחב וקבלת ההחלטות האגרו-טכניות נעשית באופן פרטני עבור כל יחידה. יישום המהלך האגרוטכני נעשה בתת החלקה באופן אחיד (on/off) או בכמויות משתנות (Variable Rate Technology - VRT), בהתאם למגבלות הכלים וסוג הפעולה. בגלל מאפיינים אלו יש הרואים בחקלאות המדייקת, מידה מסוימת של חיקוי החקלאות המסורתית.

חישה מרחוק

השלב הראשון ביישום של חקלאות מדייקת הינו איסוף נתונים אינטנסיבי במרחב השדה. לצורך זה נעשה שימוש בחיישנים מסוגים שונים לצורך קבלת מידע אודות תופעות חקלאיות. החיישנים עשויים להיות אופטיים, מכנים, אקוסטיים ועוד. המידע המתקבל מן האותות, מעובד ומשמש לצורך קבלת החלטות הגוררות ביצוע מידי (מערכות 'On the go') או לשם ביצוע בשלב מאוחר יותר (Map based control).

חישה מרחוק מוגדרת כתחום העוסק באיסוף ועיבוד מידע מרחבי בעיקר באמצעות חיישנים אופטיים המוצבים על גבי משטחים מוגבהים (לוויינים, מטוסים) בכדי לקלוט החזרי קרינה אלקטרומגנטית מן האובייקטים המרוחקים (Lillesand et al., 2004). תחום זה משתלב בתחומים רבים הנוגעים לכל הקשור במרחב, כמו גיאוגרפיה, כרטוגרפיה, גיאולוגיה, חקלאות ואקולוגיה. החקלאות הינה תחום המבוסס על ניהול מרחבי ולכן לחישה מרחוק יש שימושים רבים בה, החל מזיהוי וכימות היקפם של גידולים לצורכי הערכות יבול וגובה התשומות וכלה במחקר מאפייני הנוף לצורך יישומים אגרוטכניים, כפי שנעשה בעבודה זו.

3.2 גידול כותנה

כותנה היא המקור העיקרי לסיבים טבעיים ומהווה אחד מגידולי השדה המרכזיים בישראל ובעולם. מוצאה באזורים סובטרופיים צחיחים למחצה אולם המינים המתורבתים גדלים באזורים גיאוגרפים נרחבים, מהם אזורים מרובי משקעים, בהם הגידול נעשה בבעל ואזורים שחונים, בהם ניתנת השקיה. נכון ל-2004, היקף הייבוא העולמי של הכותנה, עמד על סך של כ-11 מיליארד דולרים (FAOSTAT, 2007). הייצור העולמי החזוי עבור 2007/8 עומד על 25.4 מיליון טונות, כאשר סין וארה"ב עומדות בראש רשימת היצרניות הגדולות. שיא גובה התשומות בגידול כותנה בהשקיה עומד על \$4,000 להקטאר והמחזיקה בו היא ישראל (פרסומי International Cotton Advisory Committee - ICAC, 2007).

בישראל, כותנה הינה גידול השדה השני בגודלו אחרי חיטה והראשון בגודלו מבין גידולי השלחין. בשנות ה-80, היקף שטחי הגידול הגיע לשיא של 622 אלף דונם, אולם בעקבות רצף משברים במחירי הכותנה ובצורת שפקדה את ישראל בשנים 1999 - 1998 היקף הגידול הגיע לשפל של 96 אלף דונם בשנת 2000. הגידול כיום עומד על היקף של 128 אלף דונם, נכון לשנת 2006, עם תפוקה

של 21.5 אלפי טונות שנמכרו בסך של 210 מיליון ₪ בשנת 2006 (פרסומי הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, 2007; פרסומי מועצת הכותנה 2006).

את מהלך גידול והתפתחות הכותנה נהוג לחלק לחמישה שלבים עיקריים כמפורט בטבלה 1:

טבלה 1: שלבים פנולוגיים בכותנה (בעקבות: רימון, 1984)

תקופת הגידול בישראל	ימים מזריעה	שלב גידול
ראשית אפריל (זריעה)	15	התבססות
עד ה-20 ביוני	50	וגטטיבי
עד ה-20 ביולי	80	פריחה
עד ה-20 באוגוסט	110	מילוי הלקטים
עד סוף ספטמבר	145	הבשלה (ושילוך)*

* בהיות הכותנה צמח בלתי-מסיים, מביאים את הגידול לידי שילוך באמצעים כימיים ואגרוטכנים.

כותנה צורכת במהלך גידולה בין 700 ל-1300 מ"מ, בהתאם לתנאי האקלים. בתקופת ההתפתחות הוגטטיבית, דרישת המים נמוכה ומהווה כ-10% מהסך הכולל. עיקר צריכת המים נעשית בתקופת הפריחה ומילוי הלקטים (כ-60%) ושאר הכמות ניתנת תוך צמצום הדרגתי עד לסיום ההשקיה בתקופת השילוך (FAOSTAT, 2007). בישראל מקובל להתחיל בהשקיה בסוף השלב הוגטטיבי, במנות גדולות ולצמצם את גודל ותדירות המנות בשלב ההבשלה עד להפסקה מוחלטת בזמן השילוך. המים המשמשים להשקיית כותנה בישראל הם ברובם מים מושבים שברוב המקרים עברו טיפול ראשוני בלבד.

מהלך גידול הכותנה כרוך ביישומים מרובים, כגון דישון, מספר יישומים של מווסתי צימוח, יישומים של קוטלי חרקים ומחלות ומספר רב של מחזורי השקיה. תהליך קבלת החלטות הנעשה במהלך הגידול, הינו מורכב ושילוב של SSM מכביד עליו עוד יותר. במסגרת החקלאות המדייקת, הוצע השימוש במערכות תומכות החלטה (DSS) המורכבות ממודלים ומשולבות בממ"ג בכדי לטפל בצורה מיטבית בשיקולים רבים בו-זמנית (McKinion et al., 2001).

3.3 עקת מים והשפעותיה על היבול

כותנה היא צמח בלתי מסיים בו תהליך צבירת היבול ממושך ומתקיים בו זמנית עם צימוח וגטטיבי. קבלת יבול ואיכות מרביים תלויה בשמירת מאזן עדין בין הצימוח הרפרודוקטיבי לוגטטיבי. השקיה היא אחד הכלים האגרוטכניים החשובים ביותר העומדים לרשות המגדל לשם ויסות הצימוח ולשם קבלת יבולים גבוהים. בעוד שבעבר סברו כי יש לשמור על מצב מים בקרקע הסמוך לקיבולת שדה, כיום בכותנה כמו בגידולים רבים, הסיקו כי רצוי לשמור על מחסור מסוים במים, בכדי להשרות גידול רפרודוקטיבי וכדי למנוע צימוח וגטטיבי מופרז (Chalmers et al., 1981). אסטרטגיית ההשקיה המקובלת, שכונתה בידי המחברים (Regulated Deficit Irrigation) RDI, מדגישה את הצורך בכלים מדויקים לאומדן מצב המים של הצמח, שכן תחום פוטנציאל המים הדרוש הינו צר והסכנה שבאובדן יבולים בשל עקת מים מופרזת גדולה.

עקת מים אינה רצויה בשלבי התפתחות קריטיים, פרט לשלב הגידול האחרון שבו מאלצים את הגידול לסיים את הצימוח ולשלך את העלים. מחסור במים משפיע על תהליכים רבים בצמח וגורם באופן ישיר ועקיף לפגיעה ביבול, להאטה או הפסקת התארכות האיברים ולפגיעה בפוטוסינטזה. בזמן עקה מתרחשת סגירת פיוניות הפוגעת באופן ישיר בפוטוסינטזה (Marani et al., 1985). ירידה ביכולת הפוטוסינטתית משפיעה ישירות על יכולת הצמח לשאת אברי פרי (Turner et al., 1986). ירידה בלחץ הטורגור, התלוי ישירות בפוטנציאל המים, מתבטאת בעצירת הגידול ומונעת התפתחות תאים. עקת מים המתרחשת בשלבים פנולוגים מסוימים עשויה לפגוע באופן קשה ביבול. De kock et al. (1989) הראו כי עקת יובש שהתרחשה בשלב הגידול הוגטטיבי ובתחילת שלב הפריחה, התבטאה בפחות הלקטים שהגיעו לבשלות, אך בתגובה התקבלו הלקטים גדולים יותר שהיוו פיצוי על אובדן היבול. עקה שהתרחשה בשלב המאוחר של ההבשלה, זירזה את התפתחות ההלקטים ושיפרה את איכות הסיבים. לעומת זאת, עקה שהתרחשה בשיא שלב הפריחה גרמה להזדקנות חנטים ופרחים ובכך פגעה ביבול הכותן והזרעים ואילו הפגיעה החמורה ביותר, נגרמה כאשר עקת היובש התרחשה בתחילת התפתחות ההלקטים.

3.4 שונות בזמינות המים בשדות חקלאיים

מרבית השדות החקלאיים מאופיינים בשונות הנוצרת כתוצאה מגורמים טבעיים או מלאכותיים והשפעות הגומלין ביניהם. גורמים אלה משפיעים באופן ישיר או עקיף על מצב המים בקרקע ועל זמינות המים לגידול החקלאי (Russo and Bresler, 1981). הגורמים המלאכותיים כוללים בין היתר את טכניקות ההשקיה: הצפה, המטרה או טפטוף ובעיות הנובעות מהן, כגון תכנון לא נכון של מערכת ההשקיה, פגמים או בעיות המובנות בשיטה וכן בעיות הנובעות מעיבוד לא אחיד ופסי הידוק של הקרקע. בין הגורמים הטבעיים המושפעים לרוב מן הטופוגרפיה, נכללים עומק הקרקע, הרכבה ותכולת החומר האורגני בה. קרקעות הממוקמות בעמקים נוטות להיות עמוקות וכבדות יותר בהשוואה לקרקעות הממוקמת באזורים גבוהים, זאת בשל זרימת המים שסוחפים את מקטע החלקיקים הדק. גורם נוסף המהווה בעיה באזורים מסוימים הם כתמי מליחות הנגרמים כתוצאה מהשקיה במים מליחים או כתוצאה מעליית מי תהום (Corwin and Lesch, 2003). כתמים אלו גורמים לירידה בפוטנציאל המים של הקרקע ובכך לעקה אוסמוטית בצמחים, אף-על-פי שתכולת המים בקרקע עשויה להיות גבוהה. כמוכן, תכולת חנקן גבוהה או נמוכה, עומד לא אחיד או כתמי עשבים רעים משפיעים על צפיפות הצמחייה ועשויים גם הם להתבטא בשונות בצריכת המים (Bonfil et al., 2005).

גורמים כגון אלה, עשויים להוביל לשונות בזמינות מי ההשקיה במרחב ובזמן, ברמת השדה ואף במרחקים של מטרים בודדים. עובדה זו מצביעה על הצורך הרב במשטרי השקיה נפרדים לאזורים שונים בשדה בהתאם למאפייניהם הספציפיים.

3.5 שיטות להכוונת השקיה בכותנה

משטרי ההשקיה המקובלים כיום בגידול כותנה בארץ, נסמכים על ניסיון רב שנים ומופצים לחקלאים בצורת המלצות קבועות מראש, בהתאם לשלבים הפנולוגיים של הגידול. פרט ללוחות ההשקיה, חקלאים מסתמכים על מדדים נוספים של המערכת **קרקע-אטמוספירה-צמח** להכוונת ההשקיה ובקרתה. שיטות המתבססות על מדידות **קרקע** כוללות; תכולה, פוטנציאל מים או מאזן של מים בקרקע. בשילוב מדידות של **אטמוספירה** כמו; חישוב האָנופּוּ-טרנספירציה בין ההשקיות, או מדידת קצב התאדות מגיית, נקבע מקדם בהתאם לגודל הצמחייה, המשמש להערכת כמות ההשקיה הדרושה. שיטות אלה נמצאו יעילות והשימוש בהן נפוץ בגידולי שדה ומטעים. למרות זאת, ידוע כי מאפיינים פיסיולוגיים רבים מגיבים ישירות למצב המים ברקמות הצמח, בין אם בשורשים או ברקמות אחרות, יותר מאשר לשינויים בפוטנציאל או בתכולת המים של הקרקע. השפעת הקרקע על הצמח הינה עקיפה ומצטברת מאחר והיא תלויה בין היתר, בהיסטוריה של זמינות המים בה ובתנאי האקלים (Jones, 2004). בין מדדי הצמח המקובלים להכוונת השקיה כוללים; פוטנציאל המים בעלה, קצב צימוח, גודל הנוף (LAI) ובדיקות חזותיות של הצמחים. שיטות נוספות המתבססות על מדידות ישירות של הצמח ואינן משמשות בפועל להכוונת השקיה, כוללות בין היתר; מדידת מוליכות פיוניות, תכולת המים היחסית ברקמות הצמח, מדידת שינויים בעובי הגבעול, העלה או הפרי (באמצעות דנדרומטר), מדידת אירועי קוויטציה בעצה באמצעות האזנה אולטרא-סונית (Ultrasonic Acoustic Emissions) ומדידת קצב הולכת המים בעצה בשיטת פולס-חום.

היתרון של מדדי הצמח נובע מן התפיסה לפיה הצמח משקלל את מכלול גורמי הסביבה המשפיעים על גידולו וכי נתוני המדידות הישירות, משקפות את שלל הגורמים.

מדידות גובה, שטח עלווה וקצב צימוח

גובה צמחי כותנה נמצא בקשר מובהק עם מדד שטח העלווה-LAI. לצורך חישוב מקדם ההתאדות וקצב הצימוח, מקובל למדוד את גובה הצמחים. קצב הצימוח היומי נקבע בהתאם להפרשים היומיים בין מדידות הגובה של מספר צמחים שנבחרו בשדה. את גובה הצמחים ניתן גם להעריך באמצעות חישה מרחוק מולטי-ספקטראלית דרך חישוב NDVI (Normalized differential vegetation index) אשר נמצא במתאם חזק עם גובה הצמחייה (Carlson and Ripley, 1997). מדידות גובה הצמח וקצב הצימוח מהוות אינדיקציה טובה להכוונת השקיה ונטולות חלק בקבלת החלטות ההשקיה של המגדלים. החיסרון בשיטה זו, נובע מחוסר התפקוד שלה בשלבים בהם הגידול מגיע לידי כיסוי קרקע מלא וגובה הצימוח נעצר (כארבעה חודשים מזריעה). הכוונת ההשקיה בשיטה זו נערכת עד השלב בו מגיע הגידול לכדי כיסוי מלא של הקרקע וגובה הצימוח נעצר (LAI~3; כארבעה חודשים מזריעה). מנקודה זו, וכאשר צריכת המים מגיעה לשיאה, המדד המקובל ביותר לתזמון ההשקיה הוא פוטנציאל מים בעלה.

פוטנציאל המים בעלה

פוטנציאל המים בעלה הינו המדד הישיר הנפוץ ביותר לקביעת מצב המים של גידולי שדה ושל כותנה בפרט ומאפשר בקרה והכוונת השקיה בטפטוף ובהמטרה (הלר, 1983; סרנגה, 1983). שיטת המדידה פותחה על ידי Scholander et al. (1963), אם כי העיקרון היה ידוע שנים רבות קודם לכן. פוטנציאל המים מוגדר כהפרש בין הפוטנציאל הכימי של מים הנמצאים במערכת נתונה לבין הפוטנציאל הכימי של מים טהורים וחופשיים (מלחץ פסיקלי או כימי כלשהו), בטמפרטורה זהה (Nobel, 1991). מים ינועו באופן ספונטני רק ממקום בו הפוטנציאל גבוה למקום בו הפוטנציאל נמוך. מהלך זרימה זה, הוא בעל פוטנציאל לביצוע עבודה. הכוח המניע את זרימת המים מן הקרקע אל השורשים, הגבעולים, העלים ומשם לאטמוספירה, הוא הפרש הפוטנציאלים ביניהם (או ההפרש בין האנרגיה החופשית שלהם). הצמח שומר על פוטנציאל מים שלילי, ההולך ונעשה נמוך (שלילי יותר) ככל שפוחתת זמינות המים עבורו. השינויים בפוטנציאל המים נעשים בעיקר על ידי וויסות הלחץ האוסמוטי (אוסמו-רגולציה) אם באופן פסיבי- עקב אובדן ואם באופן אקטיבי- על ידי העלאת הריכוז המוללי.

למרות שפוטנציאל כימי נמדד ביחידות של תכולת אנרגיה ($J mol^{-1}$) מקובל למנות את פוטנציאל המים ביחידות לחץ של Mega-Pascal (MPa) או Bar ($1MPa = 10bar$). את פוטנציאל המים ניתן למדוד מן הגבעול או מן העלה בהתאם למבנה הצמח ואופי גידולו. בכותנה, כמו גם בגידולים נוספים, לכל שלב צימוח נמצא טווח מיטבי של ערכי פוטנציאל מים, עליו החקלאים מנסים לשמור. תוצאות בדיקת פוטנציאל המים עוזרות בעיקר בקבלת החלטה לגבי קביעת מועד ההשקיה או שינוי מקדם ההשקיה. לקביעת כמויות המים הנחוצות, מתאימות מדידות הקרקע ומדידות ההתאדות מגיגית.

מוליכות פיוניות

מוליכות הפיוניות (או בערך הופכי- התנגדות הפיוניות), הינה מדד לקצב אובדן אדי המים דרך העלה. מאחר ורוב חילוף הגזים מתבצע דרך הפיוניות, באמצעות מדד זה ניתן לאמוד את קצב הטרנספירציה המתבצעת דרכן, תוך הזנחת המים האובדים דרך הקוטיקולה. מוליכות הפיוניות נמדדת ומחושבת באמצעות פורומטר (בדרך כלל, פורומטר מסוג Steady-state) המודד את הלחות יחסית ואת הטמפרטורה של אוויר מסוחרר הנמצא בתא שנאטם סביב פיסת עלה בלתי מנותק (בדיקה לא הרסנית). מוליכות נמוכה (או התנגדות גבוהה) מעידה על סגירה חלקית או מלאה של הפיוניות ואבדן מים מצומצם מן העלה. את אסטרטגיית השליטה בפתיחת הפיוניות ובמשק המים של הצמח ככלל, ניתן לחלק לצמחים איזוהידריים (Isohydric) ואנאיזוהידריים (Anisohydric) (Tardieu and Simmoneau, 1998); צמחים איזוהידריים מאופיינים כ"פסימיים", מאחר והם בעלי שליטה אנדוגנית טובה על הפיוניות, ופוטנציאל המים שלהם נשמר יציב תחת מגוון רחב של תנאי יובש. קבוצה זו כוללת צמחים כגון תירס, 'אפונת הפרה' (*Vigna unguiculata*), צפצפה וכמה זנים של גפן (Bates and Hall, 1981). צמחים אנאיזוהידריים כוללים צמחים כגון חמניות, כותנה, שעורה

וחיטה ומוגדרים כ"אופטימיים" או בעלי שליטה פחותה על הפיוניות, מאחר וגם כאשר זמינות המים פוחתת, הם ממשיכים לדיית ופוטנציאל המים בהם יורד, לעיתים, עד לנקודת כמישה. מוליכות הפיוניות מקובלת כאינדיקציה טובה להתפתחות עקת מים, במיוחד בצמחים המוגדרים כאיזהידרים. סגירת הפיוניות נעשית לסירוגין, ולכן יש צורך במספר דגימות בכדי לקבוע את ערך המוליכות. מורכבות המכשור הדרוש למדידה, מנעה את השימוש במוליכות הפיוניות כאמצעי מקובל להכוונת השקיה.

סיכום

מדידות הצמח הישירות נחשבות בעיני רבים כמדידות היעילות ביותר, אולם אין הן בהכרח מתאימות בכל המקרים לתזמון השקיה. בפועל, לרוב הצמחים שליטה אוטונומית על מצב המים (ויסות גודל העלים, העמקת שורשים וכדומה) עם נטייה לצמצום השינויים עם התייבשות הקרקע (Bates and Hall, 1981; Jones, 2004).

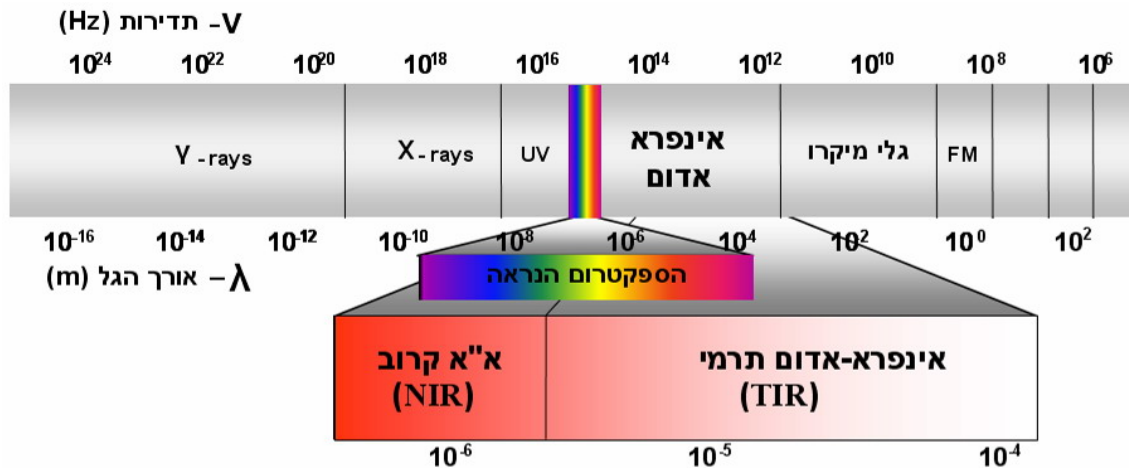
כל השיטות המוזכרות לעיל, מתבססות על מדידות נקודתיות של מספר צמחים או אזורים מצומצמים בשדה. מדידות אלה אמורות לייצג את שטח השדה כולו, אך במקרים רבים, אין די במספר המוגבל של מדידות אלו. מעבר לכך, ברוב המוחלט של המקרים לא ניתן לאתר באמצעות מדידות נקודתיות את כתמי השונות המצויים בשדות רבים (Whelan and McBratney, 2000).

3.6 חישה תרמית ככלי להערכת עקת מים

טמפרטורת הנוף מוכרת מזה זמן רב כאינדיקטור טוב להערכת מצב מים של צמחים וככלי פוטנציאלי להכוונת השקיה בגידולים חקלאיים (Gates, 1964; Tanner, 1963). השיטה מבוססת על העיקרון לפיו, המים המתנדפים מן העלים בזמן הדיות, מקררים אותם על ידי נטילת אנרגיית החום הנצברת בהם. עלים מתחממים באופן טבעי, בעיקר כתוצאה מקליטת קרינת השמש הישירה והעקיפה והמרתה לאנרגיית חום. כאשר זמינות המים פוחתת והצמח נכנס לעקה, הפיוניות נסגרות לסירוגין, קצב הדיות פוחת וטמפרטורת העלים עולה ולכן מהווה אינדיקציה לעקה. אולם, אין די במדידה של מוליכות הפיוניות (האחראיות למרב הדיות) בכדי להקיש על הטמפרטורה החזויה. טמפרטורת הנוף מושפעת בנוסף מגורמים מטאורולוגיים כגון; עוצמת הקרינה, מהירות הרוח, טמפרטורת האוויר וגירעון לחץ האדים של האוויר (Vapor Pressure Deficit - VPD) וכן מגורמים פיסיולוגיים כמו מבנה העלים, עובי שכבת הגבול שלהם, סידורם על הגבעול (phyllotaxis) והזווית בה הם מוצבים כלפי השמש (Jones, 1992). משום כך, קיים קושי בכימות עקת מים בצמחים באמצעות ערכי הטמפרטורה בלבד. צמחים הנמצאים בעקת מים זהה, עשויים להיות בעלי טמפרטורות שונות תחת תנאים מטאורולוגיים שונים, לכן יש צורך לייחס את המדידה למצב הסביבתי הנתון.

קרינת האינפרא-אדום התרמית

קרינת האינפרא-אדום תופסת מקום מרכזי בתחום הספקטרום האלקטרומגנטי (תמונה 2) ומכילה מידע שימושי רב לחקלאות. בעוד שהקרינה הפוטוסינתטית (PAR) והקרינה הנראית לעין האנושית נמצאות בתחום אורכי הגל 400-720nm בקירוב תחום האינפרא-אדום משתרע על תחום נרחב שבין 720nm ל-1400nm ונהוג לחלקו לאינפרא-אדום הקרוב (NIR), לאינפרא-אדום האמצעי (MIR) ולאינפרא-אדום הרחוק (FIR). האינפרא-אדום התרמי (TIR) נמצא בין 3000nm ו-14000nm.



תמונה 2: טווח ה-IR בספקטרום האלקטרומגנטי

תחום ה-NIR הינו התחום הנחקר ביותר באקולוגיה, סביבה וחקלאות. העניין הרב בתחום נובע מן המידע שניתן לקבל דרכו אודות כיסוי צמחי. צמחים נוטים לבלוע היטב קרינה בתחום הפוטוסינתטי (כ-85%) אך לפזר את רוב קרינת ה-NIR (כ-85%). לעומת זאת, ההחזר של קרקעות בשני תחומים אלו, הינו כמעט זהה. תכונה זו של הצמחים מאפשרת את זיהויים, ברוב המקרים, באמצעות שימוש באינדקסים ספקטראליים, כמו ה-NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) הבנוי מהפרש החזרים בין תחום ה-NIR לתחום האדום הנראה, המחולק בסכום שלהם (Carlson and Ripley, 1997).

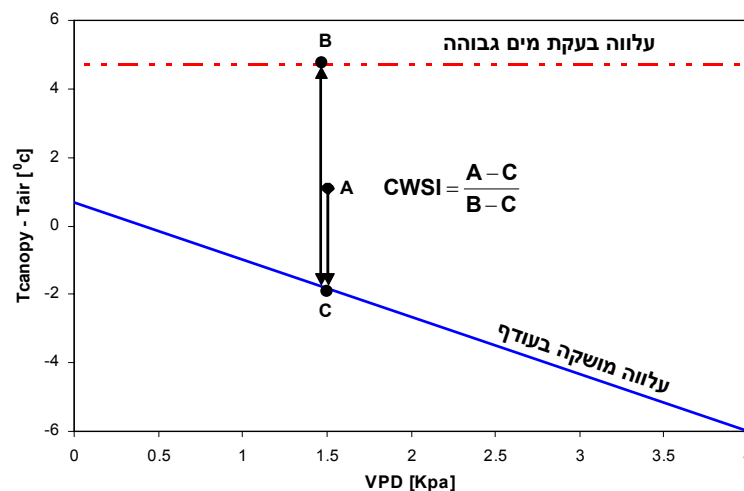
בתחום התרמי, כל העצמים בטבע פולטים במידה זו או אחרת, קרינה אלקטרומגנטית כתוצאה מתנועת מולקולות החומר ממנו הם עשויים ובתנאי שהטמפרטורה שלהם נמצאת מעל האפס המוחלט (0°K או -273°C). בהתאם לתדירות הקרינה התרמית הנפלטת מן האובייקט, ניתן לקבוע את הטמפרטורה שלו מרחוק וללא מגע.

"גוף שחור" הוא כינוי למשטח אידיאלי תיאורטי שבולע (או פולט) את כל הקרינה המגיעה אליו בכל אורכי הגל. אמסיביות (emissivity) מתארת את היחס בין הקרינה שפולט חומר לבין הקרינה הנפלטת מגוף שחור (הקרינה המכסימלית) באותו אורך גל ובאותה טמפרטורה (Jones, 1992). האמסיביות (ϵ) משמשת כמקדם לצורך חישוב הטמפרטורה האבסולוטית דרך הטמפרטורה הנמדדת באמצעות חישה תרמית. בניגוד להחזר בתחום ה-NIR, צמחים בולעים קרינה היטב

בתחום התרמי ומתנהגים כמעט כמו גוף שחור. בעוד שאמסיביות של גוף שחור היא 1, אמסיביות של עלים נעה בין 0.94 ו-0.99 ברוב המינים (Idso et al., 1981). לעומת זאת, אמסיביות של מתכות מלוטשות, כגון רדיד אלומיניום, נמוכה במידה רבה ($\epsilon=0.04$). בתמונה תרמית, אשר ערך האמסיביות הוגדר בה ל-0.96, הן יראו "קרות" ביחס לסביבה צמחית וקל לזהותן. בהדמאה תרמית של סביבה עם אמסיביות גבוהה, ניתן להשתמש במתכות מלוטשות כאמצעי לסימון מטרות.

אמצעים ושיטות לחישה תרמית

ברוב המחקרים שנערכו עד כה, חישת טמפרטורה של צמחים נעשתה על ידי חיישנים בודדים (Thermocouples) שפוזרו על גבי הצמח או בשדה, או על ידי אקדח אינפרא-אדום (Pyrometer או Hand held- IRT) שפותח בתחילת שנות ה-60. אקדחי האינפרא-אדום הורכבו מחיישן בודד שמדד את סך הקרינה התרמית המוחזרת אליו מן המטרה שאליה הוא כוון (שדה ראייה של 4° עד 15°). ברוב המקרים החיישן כוון באופן גס כלפי העלווה הנמדדת מזוויות ראייה שונות (Wanjara, 1992). Ehrler (1973) מדד בשיטה זו טמפרטורות נוף של כותנה שהושקתה היטב ומצא כי ההפרש בין טמפרטורת העלה לטמפרטורת האוויר נמצא בתלות גבוהה עם VPD. Idso et al (1981) ו-Idso (1982) הראו כי לקשר זה יש מתאם ליניארי גבוה עבור 26 מינים של גידולים חקלאיים שהושקו היטב (הקו הרציף בגרף 3). בהתבסס על ממצאים אלה, Idso et al (1981) פיתחו את ה- Crop water stress index (CWSI) הנסמך על טמפרטורות נוף בעקה יחסית לטמפרטורות נוף ללא עקת מים, כנקודות ייחוס עליונות ותחתונות.



גרף 3: היחס בין הפרש טמפרטורת נוף -אוויר וגרעון לחץ האדים באוויר (VPD) עבור נוף צמחים שמבצעים דיות מירבי וצמחים הנמצאים בעקה חמורה. נקודה A מציינת דוגמא ל הפרש טמפרטורת נוף-אוויר של עלווה נתונה. נקודות B ו-C מציינות את הגבול העליון והתחתון של טווח CWSI בתנאי VPD נתונים. בעקבות Idso et al. (1981), Irmak et al. (2000) et al. (2004).

CWSI הפך את המחקר ב-IRTs לנפוץ והניב עשרות עבודות העוסקות בשימוש בו כמדד למוליכות הפיוניות, לרמת היבול ולפוטנציאל מים בעלה (לדוגמא: Hatfield, 1983; O'Toole et al., 1984; Irmak, et al., 2000). עבודות רבות נוספות עוסקות באופן הצבת החיישנים לצורך מדידות הנוף

(לדוגמא: Fuchs, 1989; Stockle and Dugas, 1991) ובשיטות לקביעת טמפרטורות נקודות הייחוס באופן אמפירי (Idso et al., 1990; Jones, 1999) ובאופן תיאורטי (Alves and Pereira, 2000; Jones, 1999). גרסאות נוספות של אינדקסים המבוססים על CWSI פותחו (Moran et al., 1994; Jones, 1999) והוצעו שיטות נוספות למדידת עקה באמצעות IRTs. (Clawson and Blad, 1982) הציעו את השימוש בעלייה בדרגת השונות המתקבלת ממדידת טמפרטורת הנוף, כאינדיקציה להפעלת מחזורי השקייה. Fuchs (1990) ביסס את הטענה ומצא לכך רקע תיאורטי. אולם התופעה לא נצפתה באופן עקבי, בעיקר בעבודות המאוחרות (Grant et al., 2006; Möller et al., 2007).

למרות העבודות הרבות שנעשו בתחום, אבחון עקת המים והכוונת השקייה באמצעות IRT's לא הפך מעשי, עקב קשיים בניתוח המידע התרמי שהתקבל. אחת הבעיות המרכזיות שנובעות משימוש בחיישנים בודדים היא קבלת מידע תרמי מעורב של נוף צמחי עם קרקע, העשויה להגיע לטמפרטורה הגבוהה ב-30°C מטמפרטורת הנוף (Jackson, 1985) וכן טמפרטורות של אובייקטים כגון רקיע וגבעולים כאשר המדידות נעשות מן הצד. בניסיון להימנע מן התופעה, Moran et al. (1994) ובעקבותיו Clarke (1997) שילבו מדידות של קרקע חשופה עם קרקעות בעלות כיסוי צמחי והציעו שימוש באינדקס המורכב מיחס בין אחוז הכיסוי לבין הפרש טמפרטורה הנמדדת - טמפרטורת האוויר (Soil adjusted vegetation index- SAVI). טרפז שנוצר בגרף היחס ציין את הגבולות השייכים לערכים האפשריים עבור צמחייה (VIT-trapezoid). השימוש בשיטה אינו נפוץ, קרוב לזדאי עקב הצורך במדידות נוספות של תכונות הקרקע.

חלופה לאקדח א"א תרמי הינה מצלמה תרמית. תצלומים המופקים באמצעות מצלמות אלו מכילים מידע מפורט ומדויק אודות טמפרטורות של שטחים נרחבים. Leinonen and Jones (2004) הצליחו, להפריד בין טמפרטורות של אובייקטים שונים המופיעים במרחב התמונה באמצעות שילוב של צילומי צבע (RGB) וצילומים תרמיים. השיטה שימשה בעיקר לצורך אפיון הפיקסלים השייכים לצמחים ולרקע ולצורך כיול אופן המיון שלהם. Alchanatis et al. (2005) פיתחו הליך לשילוב צילומי RGB עם צילומים תרמיים ושיטה פשוטה למיון פיקסלים השייכים לנוף צמחי, לקרקע, ולאובייקטים לא רצויים ואף להפריד חלקי נוף תחת תנאי הארה שונים.

4 כלים ושיטות

4.1 תיאוריה

4.1.1 מדד העקה התרמי - CWSI

מדד העקה התרמי, ה-CWSI (Idso et al., 1981), שימש בעבודה זו כאמצעי להערכת עקת המים דרך טמפרטורת העלווה:

$$CWSI = \frac{T_{\text{canopy}} - T_{\text{Min}}}{T_{\text{Max}} - T_{\text{Min}}} \quad (1)$$

ערכי המדד המתקבלים הינם היחס בין הפרש טמפרטורת המינימום מטמפרטורת הנוף ובין הפרש טמפרטורת מינימום מטמפרטורת המכסימום (גרף 3). הערכים נעים בטווח שבין 0 ל-1, כאשר הערך 1 מייצג עקה מרבית. הבסיס התיאורטי למדד הובא על ידי Jackson et al. (1981) שעיבדו את משוואת Penman-Monteith של מאזן האנרגיה (ראה פרק 4.1.2). בשונה מן הטמפרטורה הרגעית שמציג עלה או חופת צמחים, התלויה בתנאים הסביבתיים ששוררים בזמן המדידה, CWSI מאפשר לשקלל את תנאי הסביבה תוך שימוש בנקודות הייחוס.

CWSI הוצע ככלי להכוונת השקיה בעבודות רבות, אך עד כה המדד לא הפך מעשי בעיקר עקב הקושי הקיים באחזקת נקודות הייחוס של חלקות מושקות היטב ועקב תפקוד לקוי של המדד באזורים ממוזגים ולחים, בעלי VPD נמוך. Jones (1999) הציע לשנות את אופן מציאת נקודות הייחוס והציע כחלופה את השימוש במשטחי ייחוס מלאכותיים שיוצבו ברקע התמונה התרמית. מטרתם של משטחים אלה, היא לדמות את טמפרטורות נקודות הייחוס של CWSI תחת התנאים הנתונים (נקודות B ו-C בגרף 3). דרך אחרת להערכת טמפרטורות אלו, היא חישוב תיאורטי שלהן על ידי שימוש בנתוני האקלים ותוך שימוש במספר הנחות לגבי תכונות הגידול. בעבודה זו, CWSI שחושב בדרך זו כונה CWSI תיאורטי וסומן כ- T_{CWSI} ולהבדיל מכך, CWSI שחושב באופן אמפירי בהתבסס על משטחי ייחוס מלאכותיים, כונה CWSI אמפירי וסומן כ- E_{CWSI} .

4.1.2 מאזן האנרגיה של העלה

על מנת להעריך את ערכי הטמפרטורה המתקבלים עבור נקודות הייחוס של T_{CWSI} בכל סביבה נתונה, נעשה שימוש במשוואת Penmann-Monteith המתייחסת למאזן האנרגיה של העלה. לפי חוק שימור האנרגיה (החוק הראשון של התרמודינמיקה) אנרגיה יכולה רק לעבור ממצב אחד למשנהו. יישום החוק מנקודת מבט של עלה בודד או חופת עלים, תוך התחשבות בכל שטפי האנרגיה, ניתן לתיאור באופן כללי באמצעות המשוואה (Jones, 1992):

$$R_n - C - \lambda E = M + S \quad (2)$$

כאשר R_n היא אנרגיית הקרינה נטו (קצרת הגל וארוכת הגל) המתקבלת עבור יחידת שטח; C הוא מעבר החום המוחשי נטו (סך כל החום המועבר לסביבה בהסעה או בקרינה, בעקבות הפרשי טמפרטורה בין העלה לאוויר ולקרקע); λE הוא אובדן החום הכמוס נטו (Latent heat flux), תוצר של קצב האידיוי והאנרגיה המושקעת באידיוי המים מן העלה, (כאשר λ היא האנרגיה הדרושה לאידיוי מים חופשיים); M היא האנרגיה הנקלטת נטו (או הנפלטת) על ידי הריאקציות הביוכימיות בעלה (פוטוסינטזה ונשימה); ו- S היא צבירת החום הפיזי נטו (Sensible heat flux), החום הנאגר במסת העלה המורכבת בעיקר ממים). את כל איברי המשוואה מקובל למדוד ביחידות של שטף אנרגיה לשטח ($W m^{-2}$).

הגורם הדומיננטי במשוואה הוא הקרינה הנקלטת - R_n המשפיעה בעקיפין גם על גורמים אחרים. λE המייצג את הדיות, דומיננטי במיוחד כאשר הפיוניות פתוחות. החום המוחשי (C) הופך לגורם משמעותי במקרים בהם העלווה המכסה את הקרקע דלילה וכאשר טמפרטורת הסביבה נמוכה או גבוהה באופן משמעותי מזו של העלה. לריאקציות הביוכימיות (M) יש משקל יחסי קטן; הערך הנקלט באמצעות הפוטוסינטזה אינו עולה על 5% מאנרגיית הקרינה הנקלטת נטו (R_n) וערכה של האנרגיה הנפלטת בנשימה, אינו עולה על חצי מערך זה. אנרגיית החום הנאגרת בביומסת העלה (S) בדרך כלל זניחה, פרט למקרים של צמחים סוקולנטיים המכילים כמות משמעותית של מים. באופן כללי, ניתן להבחין כי הגורמים הדומיננטיים המרכיבים את מאזן האנרגיה של העלה, הם קרינה, שיעור הדיות והחום המועבר על ידי הסעה. המשוואה ששימשה בעבודה זו לחישוב טמפרטורת חופת עלים ללא עקת מים ובמלוא פוטנציאל הטרנספירציה, נגזרה ממשוואת מאזן האנרגיה:

$$T_l = T_a + \frac{r_{HR} r_{aW} \gamma R_{ni}}{\rho_a c_p (\gamma r_{aW} + \Delta r_{HR})} - \frac{r_{HR} VPD}{\gamma r_{aW} + \Delta r_{HR}} \quad (3)$$

כאשר, T_l ו- T_a הם טמפרטורת העלווה וטמפרטורת האוויר בהתאמה; r_{HR} היא ההתנגדות המקבילה של מעבר החום ומעבר הקרינה (עבור עלה בגודל 0.1m); r_{aW} היא התנגדות שכבת הגבול למעבר אדי מים; γ הוא הקבוע הפסיכרומטרי; R_{ni} היא הקרינה האיזותרמית נטו (הקרינה נטו המתקבלת עבור גוף בסביבה זהה, הנמצא בטמפרטורה זהה לאוויר); ρ_a היא צפיפות האוויר; c_p היא קיבולת החום הספציפי של האוויר; Δ הוא שיפוע עקומת היחס בין הטמפרטורה לבין לחץ האדים ברוויה; ו- VPD הוא גירעון לחץ האדים של המים באוויר.

מן המשוואה, ניתן לראות כי טמפרטורת העלה מושפעת באופן כללי מטמפרטורת האוויר ומשני איברים משתנים; הקרינה נטו וגירעון לחץ האדים.

משוואת האנרגיה של עלה יבש שאינו מבצע דיות, מורכבת פחות מאחר ואין השפעה של ה- VPD , אין את הקבוע הפסיכרומטרי ואין את שיפוע עקומת לחץ האדים ברוויה. המשוואה ששימשה לחישוב טמפרטורת המכסימום של T_{CWSI} המדמה חופת עלים בעקת מים מכסימלית שאינה מבצעת טרנספירציה הינה:

$$T_l = T_a + \frac{r_{HR} R_{ni}}{\rho_a c_p} \quad (4)$$

קרינה

לקרינה תפקיד חשוב בהתפתחות צמחים. מעבר לחשיבותה כמקור האנרגיה של הפוטוסינטזה, השפעותיה על פריחה, מורפוגנזה ומוטגנזה של צמחים, הקרינה היא הצורה העיקרית באמצעותה מתבצעים חילופי האנרגיה בין הצמח לסביבתו. רובה של האנרגיה הקרינתית המגיעה מן השמש היא קרינה קצרת-גל ובינונית (קרינה נראית, NIR ו-MIR) בעוד שרוב האנרגיה הקרינתית הנפלטת מן העלה היא קרינה תרמית ארוכת-גל. הקרינה נטו (R_n) עבור עלה, מורכבת מסך כל הקרינה קצרת-גל וארוכת-גל הנקלטת באופן ישיר ועקיף (Diffused) מן השמש והסביבה (רקיע, עלווה וקרקע), פחות סך כל הקרינה המועברת (Transmitted), המוחזרת (Reflected) והנפלטת (Emitted). לפי חוק Stefan-Boltzmann, קרינה הנפלטת מגוף כלשהו, פרופורציונלית לחזקה הרביעית של הטמפרטורה האבסולוטית שלו (מכאן גם נגזר מקדם האמסיביות), כך ש- R_n תלוי בטמפרטורה של העלה עצמו. כדי לבדוד את השפעת הקרינה, נהוג להשתמש בקרינה האיזותרמית נטו - R_{ni} המוגדרת כסך הקרינה שהייתה מתקבלת עבור גוף זהה בסביבה זהה, אילו היה מצוי בטמפרטורת האוויר:

$$R_{ni} = R_n + \varepsilon \sigma (T_s^4 + T_a^4) \quad (5)$$

כאשר, ε היא אמסיביות המשטח, σ הוא קבוע Stefan-Boltzmann, ו- T_s ו- T_a הם טמפרטורת המשטח וטמפרטורת האוויר (במעלות Kelvin) בהתאמה.

דיות

תהליך הדיות מתאר את מהלך מעבר המים מן העלווה לאטמוספירה ומורכב משילוב של מעבר חום עם מעבר מסה. לפי משוואת Penman-Monteith, קצב הדיות (Transpiration) נקבע בהתאם למפל הריכוזים בין המים בעלה לבין המים באוויר ובהתאם למוליכות התווך שביניהם (מוליכות הפיוניות ושכבת הגבול של העלה). היות והאוויר שבחלל הפיוניות נמצא במצב קרוב לרוויה, מפל הריכוזים תלוי בתכולת המים באוויר בסביבת העלה. לכן הכוח המניע את הטרנספירציה הוא לחץ האדים באוויר. ככל שלחץ האדים נמוך יותר כך יתנדפו יותר מים. גרעון לחץ האדים (VPD) הינו למעשה אינדיקציה לדרישה האוופורטיבית של האוויר. להבדיל מן הלחות היחסית (RH) המתארת את היחס בין כמות המים הנתונה באוויר לבין כמות המים ברוויה בטמפרטורה נתונה, VPD הוא ההפרש בין לחץ האדים החלקי ללחץ האדים החלקי ברוויה ונמדד ביחידות של kilo Pascal- kPa (1kPa=10milibar):

$$VPD = e_{s(T)} - e \quad (6)$$

כאשר e הוא לחץ האדים של המים ו- $e_{s(T)}$ הוא לחץ האדים החלקי של המים ברוויה כפונקציה של הטמפרטורה. VPD גדול יותר מציין אוויר יבש יותר (עליה בדרישה לדיות) ולכן ישנה נטייה להגדלת הטרנספירציה ואיבוד מים באמצעות הצמח. VPD נמצא בקשר ישיר עם קצב הדיות מן העלה או ממשטח לח לאטמוספירה ולכן הוא מהווה מדד מתאים יותר מן הלחות היחסית שהקשר עמה הוא מעריכי.

פוטנציאל המים של האוויר מהווה מדד נוסף שלעיתים משמש לתיאור מצב המים באטמוספירה ונמצא בקשר מעריכי עם הלחות היחסית:

$$\psi_{wv} = \frac{R \times T}{V'} \ln(RH) \quad (7)$$

כאשר ψ_{wv} הוא פוטנציאל המים באוויר (MPa); R הוא קבוע הגזים; V' הוא נפח מוללי חלקי של מים (נפח של מול של מים), ו- T היא טמפרטורת האוויר במעלות קלווין. לטמפרטורה השפעה רבה על מצב המים באוויר וככל שהיא עולה האוויר מסוגל לשאת יותר מים, ה- RH עולה וה- VPD עולה.

שכבת הגבול של העלה

איבוד החום מן העלה נעשה באמצעות קונבקציה חופשית, שבה תנועת האוויר נגרמת כתוצאה משינויים בצפיפותו (האוויר מתרחב, משקלו הסגולי קטן ולכן נע מעלה) ועל ידי קונבקציה מאולצת הנגרמת באמצעות תנועה מאולצת של אויר (רוח). קונבקציה מאולצת גורמת ליצירת מערבולות, כאשר האוויר בא בחיכוך עם המשטח שעליו הוא זורם. מעבר החום הטורבולנטי נוטה להיות מהיר ב-3-7 סדרי גודל מאשר דיפוזיה. האוויר באטמוספירה התחתונה נמצא בתנועה מתמדת וכמעט שלעולם אינו עומד, לכן איבוד החום נעשה בעיקר בדרך זו.

שכבת הגבול מוגדרת כאזור הסמוך לשטח פני העלה שבו המהירות הממוצעת של תנועת האוויר נמוכה באופן משמעותי מזו של האוויר הנע בתנועה החופשית. אחת האסטרטגיות לצמצום קצב איבוד מים מן העלה היא עיבוי שכבת הגבול על ידי רשת סבוכה של שערות, או מיקום הפיוניות בשקערוריות ובחריצים המגדילים את עובי השכבה.

מעבר המסה והחום דרך שכבת הגבול ניתן לתיאור באופן כללי על ידי המשוואה:

$$C = g_H \rho c_p (T_1 - T_2) \quad (8)$$

כאשר, g_H היא עובי שכבת הגבול ו- $(T_1 - T_2)$ הוא הפרש החום בין העלה לאוויר. **רוח ודיות**: עלייה במהירות הרוח מקטינה את התנגדות שכבת הגבול. מצב זה מגביר את קצב האידיוי, אולם קצב הדיות אינו בהכרח גדל באותו האופן; העלייה במהירות הרוח גורמת לאיבוד חום מהיר מן העלה ולירידה בטמפרטורה שלו. הירידה בטמפרטורת העלה מתבטאת בירידה בגרעון לחץ האדים בחלל הפיוניות של העלה המהווה כוח מניע חזק יותר לדיות בהשוואה להתנגדות שכבת הגבול.

4.2 מערך ניסויי השדה

לצורך בניית המודלים, שמשו נתונים מניסוי הקדמי שנערך ב-2003 ומארבעה ניסויי השקיה נוספים שנערכו ב-2005 וב-2006. שדות הניסויים מוקמו באזורים שונים הנבדלים מבחינת תנאי האקלים וסוג הקרקע. טיפולי ההשקיה שימשו ליצירת טווח רחב של מצבי מים לצורך פיתוח וביסוס המודל. באופן כללי בכל הניסויים נקבעו חלקות ברוב של 6 שורות (מרווחי זריעה של 96 סנטימטרים) ובאורך של 20 עד 23 מטרים (למעט הניסוי במגידו 2007). ישום ההשקיה נעשה בצינורות טפטוף שהונחו בין כל שתי שורות או ליד כל שורה, בטיפולים המושקים בעודף. בכל יום מדידות הנתונים נאספו בין השעות 11:00 בבוקר ל-15:30 בצהרים. בין השעות הללו השמש קרובה לזנית, הקרינה גבוהה, העקה בשיאה ופוטנציאל המים נשמר יציב (Grimes and Yamada 1982; Meron et al, 1987).

4.2.1 ניסוי שדה הקדמי 2003

שדה הניסוי מוקם בקיבוץ שמיר שבצפון-מזרח עמק החולה (33°09'N; 35°39'E, 87 מטרים מעל גובה פני הים), על קרקע מסוג 'גרומוסול חום-שחרחר בזלתי ופרוטו-גרומוסול בזלתי'. החלקות נזרעו בכותנת 'פימה' (*Gossypium barbadense L. cv. PF-15*). השדה כלל חמישה טיפולי השקיה בטפטוף עם שתי חזרות, כאשר טיפול 0 כלל השקיה יומית לפי 100% מן ההתאדות היומית מגיית, טיפול-WW כלל השקיה בעודף עם מנת השקיה כפולה מזו של טיפול 0 (טיפול ללא עקת מים). טיפולי העקה שנקראו 2, 4 ו-6 כללו השקיה בדומה לטיפול 0 עם עיכוב של 2, 4 ו-6 ימים עד ליום הצילומים, בהתאמה. כל הטיפולים קיבלו את אותה מנת דשן בהדשייה.

4.2.2 ניסויי 2005

ניסוי אחד נערך בחוות הניסיונות של גידולי השדה שלייד קריית-שמונה (33°10'N; 35°34'E, 69 מטרים מעל לגובה פני הים) על קרקע מסוג 'גרומוסול חום אלובי וגרומוסול הידרומורפי'. החלקות נזרעו בכותנת מזן מכלוא 'אקלפי' (*G. barbadense X G. hirsutum*). השדה כלל שישה טיפולי השקיה בטפטוף עם שמונה חזרות, כאשר; טיפול 0 כלל השקיה יומית לפי 100% מן ההתאדות היומית מגיית, טיפול-WW כלל השקיה בעודף עם מנת השקיה כפולה מזו של טיפול 0 (טיפול ללא עקת מים) וטיפולי העקה שנקראו 2, 3, 4 ו-6 כללו השקיה בדומה לטיפול 0 עם עיכוב של 2, 3, 4 ו-6 ימים עד ליום הצילומים, בהתאמה. כל הטיפולים קיבלו את אותה מנת דשן בהדשייה. הניסוי השני נערך במקביל בשדות הגד"ש של קיבוץ רבדים הממוקם בשפלה, בגבול המזרחי של מישור החוף הדרומי (34°48'E; 31°46'N, 81 מטרים מעל לגובה פני הים) על קרקע מסוג 'גרומוסול חום וחום-אדום אקומולטיבי על גבעות (מכיל גיר)'. החלקות נזרעו לסירוגין בכותנה מזן המכלוא 'אקלפי' ו'פימה' (*G. barbadense L. cv. 08*). השדה כלל שלושה טיפולי השקיה בטפטוף עם שמונה עשרה חזרות (6 עבור 'פימה' ו-12 עבור 'אקלפי') בסידור של בלוקים באקראי. כאשר; טיפול 1 כלל השקיה לפי טבלת השקיה (100% מטבלת ההשקיה, 551m³ בפועל), טיפול 2 כלל השקיה של

80% מהטבלה (עקה מתונה) וטיפול 3 כלל השקייה של 60% מהטבלה (עקה חמורה). הדישון היה זהה בכל הטיפולים.

4.2.3 ניסויי 2006

הניסויים נערכו בשני האזורים בהם נערכו ניסויי 2005 בסמוך לשדות הניסוי הקודמים, על גבי קרקעות מסוג דומה.

בחוות גד"ש שליד קריית שמונה נזרעה כותנה מהזן 'אקלפי', במרחק של 200 מ' מן השדה הקודם. השדה כלל ארבעה טיפולי השקייה עם שש חזרות בסידור של בלוקים באקראי. טיפולי ההשקייה שנקראו 4, 3, 2 ו-1 כללו טיפול משקי, 2, 4, ו-6 ימי עיכוב בהשקייה עד ליום הצילומים, בהתאמה. כל הטיפולים קיבלו את אותה מנת דשן בהדשייה. מבנה השדה היה מאורך (12 שורות X 12 חלקות) כך שניתן היה לצלם אותן תוך כדי נסיעה הלוך ושוב לצד החלקות. השדה בקיבוץ רבדים מוקם במרחק של כ-500 מ' דרומה לשדה הקודם וכלל שלושה טיפולי השקייה בדומה לטיפולי ההשקייה ב-2005.

4.2.4 ניסויי 2007

המטרה העיקרית של הניסוי שהוצב בשנה זו הייתה מיפוי ויישום של המודלים לאומדן פוטנציאל המים. לשם כך נבחר שדה מסחרי ליד קיבוץ מגידו ($32^{\circ}35'N$; $35^{\circ}11'E$), 71 מטרים מעל לגובה פני הים), המאופיין בשונות גבוהה מבחינת עומקי הקרקע והרכבה הנובעים בין היתר מתוואי של נחל העובר בגבולותיו. סוג הקרקע היה 'גרומוסול חום ורנזינה חומה (עם גיר)'. השדה נזרע בכותנה מזן 'אקלפי' ויושמו בו שלוש טיפולי השקייה וטיפול משקי אחד אשר מוקמו ליד שביל הגישה במרכז השדה. הטיפולים הורכבו מחזרה אחת וכללו טיפול של 120%, 50% ו-25% מהטיפול המשקי. טיפולים 120% ו-50% והטיפול המשקי היו בגודל של 50 X 23 מטר וטיפול 25% בגודל 30 X 4 מטר. בנוסף נדגמו גם אזורי עניין נוספים במרחב השדה.

4.3 מהלך המדידות

מדידות השדה התנהלו במסגרת של "ימי צילומים". במהלכו של כל יום, נערכו המדידות בין השעות 11:00 ל-15:30, בזמן בו השמש נמצאת באזור הזנית ובזמן בו ערכי פוטנציאל המים בעלה יציבים וההבדלים בין הטיפולים הם הגדולים ביותר.

תיאור כללי של מהלך הצילומים והמדידות: בכל חלקה שנבחרה הוצב משטח ייחוס לח (WARS – Wet Artificial Reference Surface, ראה פרק 4.3.1). וכעבור זמן קצר החלקה צולמה באמצעות המצלמה התרמית ומצלמת ה-RGB מזווית של כ-90⁰ מפני הקרקע. לאחר מכן סומנו בחלקה ארבעה עלים נבחרים באמצעות פיסת אלומיניום, או אטב עם סרט סימון שהונח על הפטוטרת והחלקה צולמה בשנית עם העלים המסומנים (שני צילומים לחלקה). בתום הצילום התרמי נמדדה מוליכות הפיוניות של ארבעת העלים המסומנים בתוספת 2-3 עלים ששימשו לחישוב ממוצע

החלקה. מיד לאחר מכן, העלים המסומנים נאספו לצורך מדידת פוטנציאל המים באמצעות תא לחץ.

מוליכות פיוניות ופוטנציאל המים בעלה

מוליכות הפיוניות נמדדה באמצעות פורומטר מסוג (*Li-Cor, model 1600, Lincoln, steady-state*) (Nebraska, USA) מיד עם תום הצילומים של כל חלקה. **פוטנציאל המים בעלה** נמדד באמצעות תא-לחץ (ARIMAD-2, א.ר.י.- אביזרי מים, כפר חרוב, ישראל), קרוב ככל האפשר לזמן צילום התמונות. ארבעת העלים הנבחרים שסומנו בכל חלקה שימשו למדידת פוטנציאל המים. לצורך המדידה נבחר העלה הצעיר ביותר שסיים את התפתחותו, הממוקם ברוב המקרים, בפרק הרביעי מקודקוד הצמיחה ונמצא חשוף לשמש וללא פגעים (Grimes and Yamada, 1982; Meron et al., 1987). כל עלה נעטף ונאטם ככל האפשר על ידי רדיד אלומיניום. ארבעת העלים נשמרו בתוך קופסה אטומה וחשוכה, המכילה ספוג לח, עד למדידתם באמצעות תא הלחץ (10-1 דקות).

מדידות מטאורולוגיות

המדידות המטאורולוגיות כללו: לחות יחסית, שטף הקרינה הנכנסת, עוצמת הרוח, וטמפרטורת אוויר בגובה 2 מטר מן הקרקע. במדידות שנערכו בקריית שמונה ב-2005 וב-2006 ובשמיר ב-2003, נעשה שימוש בתחנה מטאורולוגית ניידת (CR 10X, Campbell, Logan, Utah) שהוצבה בתוך שדה הטיפולים ואספה נתונים ברזולוציה של דקה. במדידות שנערכו בקיבוץ רבדים נלקחו נתונים מטאורולוגיים שנאספו כל 10 דקות, מתחנה השייכת לשירות המטאורולוגי שנמצאה במרחק של כ-100 ו-300 מטרים מן השדה של 2005 ושל 2006, בהתאמה. נתוני רבדים עברו אינטרפולציה לרזולוציה של דקה לפי ממוצע המרחק המשוכלל משתי המדידות הסמוכות ביותר.

4.3.1 משטחי ייחוס

לצורך חישוב E_{CWSI} נדרש שימוש במשטחי ייחוס המדמים את טמפרטורות המכסימום והמינימום של העלווה, האפשריות תחת התנאים המטאורולוגיים השוררים בזמן המדידה. Irmark et al. (2000) מצאו כי טמפרטורת המכסימום עבור עלה שאינו מדיית, נמצאת באופן קבוע בצמוד לטמפרטורת האוויר בתוספת 4 עד 5.1°C ($\text{Std}=0.33^{\circ}\text{C}$), תחת מגוון רחב של תנאי לחות, בתחום VPD שבין 1.1 ל-5.7 kPa. בעבודה זו, טמפרטורת האוויר בתוספת 5°C ($T_{air}+5^{\circ}$) החליפה את השימוש במשטח הייחוס המדמה את הגבול העליון ב- E_{CWSI} בדומה לעבודות של Meron et al. (2003) ו-Cohen et al. (2005) ובהתאם לרקע התיאורטי של CWSI המתואר בפרק 4.1.1.

לצורך דימוי טמפרטורת נקודת המינימום של E_{CWSI} הוצב משטח ייחוס לח (WARS), המדמה עלווה שאינה נמצאת בעקת מים המבצעת דיות מכסימלי. המשטח נבנה על פי Meron and Tsipris (US Patent no. 6597991B1; 2003).

בכל אחת מן החלקות שנמדדו הוצב WARS נייד בתחום השטח המצולם, שהוצב זמן קצר לפני הצילומים. בנוסף ל-WARS הנייד, בחלק ממועדי המדידה הוצב גם WARS ניח, כאשר אל מרכזו כוון תרמומטר IR שמדד באופן רציף את טמפרטורת המשטח במהלך שעות המדידה.

4.3.2 צילומים תרמיים וצילומים בתחום הנראה

הצילומים התרמיים נערכו באמצעות מצלמת וידאו תרמית לא מקוררת (ThermaCAM, models PM545 and SC2000, FLIR systems, Sweden) עם מטריצה של 320X240 חיישנים מסוג Microbolometer, הרגישים לאורכי גל בטווח של 7.5-13 μ m ובדיוק של 0.1 $^{\circ}$ C. התצלומים נערכו עם שני סוגים של עדשות; בעלות שדה ראייה זוויתי של 24 $^{\circ}$ ושל 45 $^{\circ}$. צילומי הצבע נערכו באמצעות מצלמה דיגיטלית (DSC F-717, Sony Inc., Japan) שחוברה אל המצלמה התרמית. התמונות נלקחו מזווית של כ-90 $^{\circ}$ מעל לנוף מגבהים שונים וברזולוציות מרחביות שונות, בהתאם לכלי הנשיאה כמתואר בטבלה 4. טבלה 4: אופן ביצוע התצלומים התרמיים וה-RGB לאורך מהלך תקופת הניסויים.

שנה	שדה הניסוי	מתקן נשיאה	זווית עדשה (מעלות)	גובה (מטר)	רזולוציה (סמ"ר)	גודל השטח בתמונה (מ"ר)	אופן התצלום
2003	קיבוץ שמיר	חצובה	24	4	0.5-1	1.3-1.7	1-3 תמונות לחלקה
2005	חוות גד"ש, קריית שמונה	מנוף הרמה (ע"ג משאית)	24	15-20	2.5-3.5	6.3-8.5	1-3 תמונות לחלקה
2005	קיבוץ רבדים	מנוף הרמה (ע"ג משאית)	24	15-20	2.5-3.5	6.3-8.5	1-3 תמונות לחלקה
2006	חוות גד"ש, קריית שמונה	מנוף נגרר (בנייה עצמית)	45	10	3.5	8.5	סרטונים - תמונה כל 330 מילי שניות
2006	קיבוץ רבדים	מנוף הרמה (ע"ג משאית)	24	15-20	2.5-3.5	6.3-8.5	1-3 תמונות לחלקה
2006	קיבוץ רבדים	מטוס	24	300	40	133	סרטונים - תמונה כל 330 מילי שניות
2007	קיבוץ מגידו	מטוס	24	500	50	220	סרטונים - תמונה כל 330 מילי שניות

4.4 עיבוד התמונות

הצילומים התרמיים הומרו מפורמט IMG (12bit) לפורמט BMP לאחר שנקבעו עבורם מספר פרמטרים באמצעות תוכנת ThermaCamTM Researcher Pro 2.8 (FLIR Systems AB,) (Sweden):

1. תחום הטמפרטורה הרלוונטי שנע בין 19 ל- 44.5°C אשר ברזולוציה רדיומטרית של 0.1 מעלות צלזיוס לסיבית, מתאים ל-256 דרגות אפור או 8bit.
2. מקדם האמסיביות של האובייקטים הרלוונטיים בתמונה (0.95).
3. טמפרטורת הסביבה.
4. מרחק מן האובייקט.
5. לחות יחסית בסביבת התמונה.

בשלב הבא הומרו התמונות התרמיות לפורמט TIFF באמצעות תוכנת Photoshop 7.0ME (Adobe) (Systems Inc., California, USA) ועברו תיקון גיאומטרי (Co-registration) באופן ידני, אל מול תמונות ה-RGB המתאימות להן באמצעות תוכנת MATLAB 7.0 (MathWorks Inc., Georgia,) (USA).

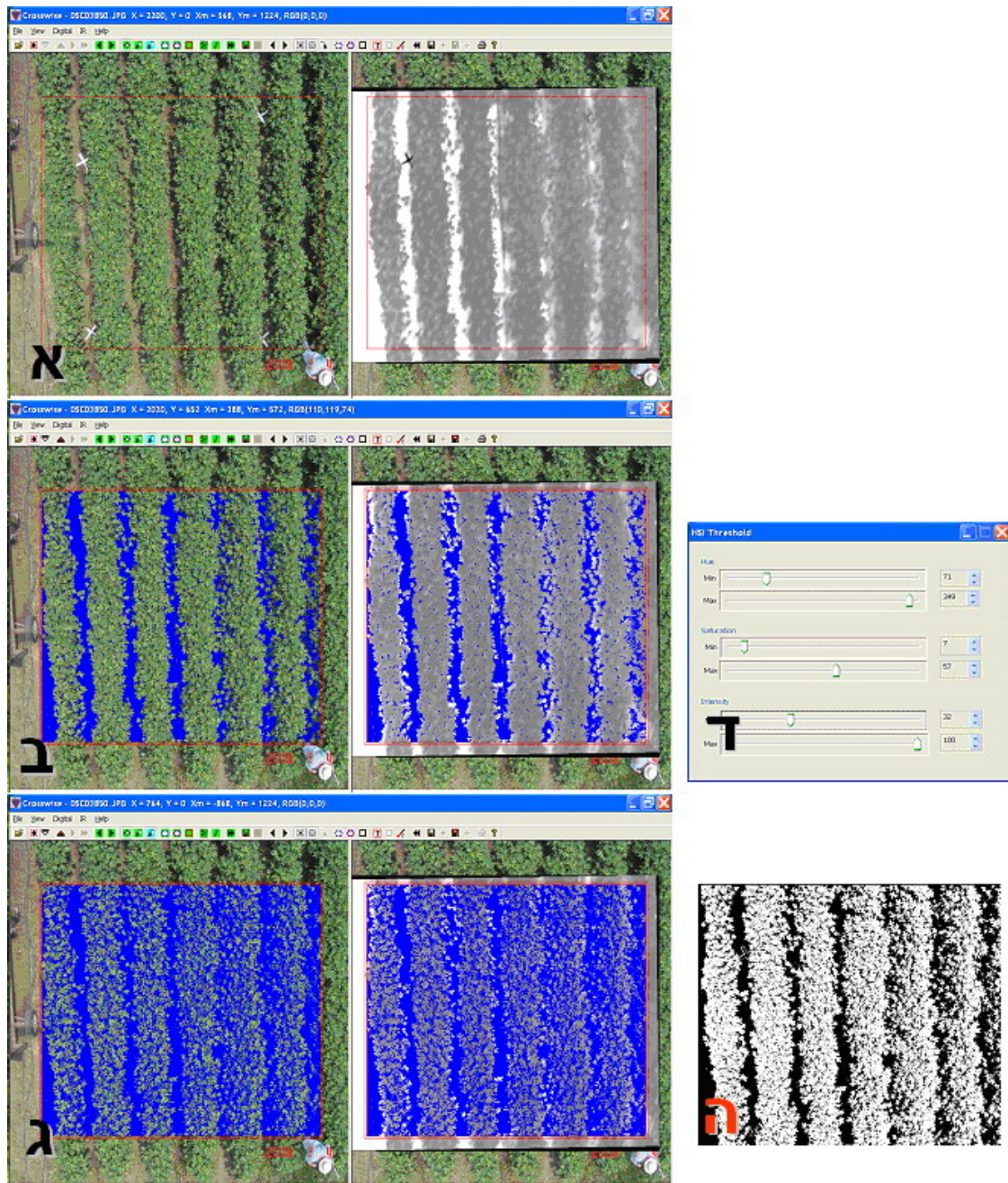
4.4.1 שילוב צילומים תרמיים עם צילומים בתחום הנראה

לצורך זיהוי והפרדת האובייקטים המופיעים בצילום התרמי נעשה שימוש בצילומי RGB בתחום הנראה שנלקחו במקביל להן (Möller et al., 2006; Alchanatis et al., 2005). שני סוגי הצילומים נבדלו ברזולוציה המרחבית שלהן, בזווית הראייה שלהן באופן העיוות של העדשה ובזמן הצילום המדויק (המיקום והשליטה במצלמות היו נפרדים). על מנת לתאם בין הצילומים, מרחבי הצילומים התרמיים הותאמו למרחבי הצילומים הנראה (שהכילו שטח גדול יותר). לצורך כך, מוקמו בשדה הראיה של המצלמות ארבעה צלבי אלומיניום ניחים ששימשו כנקודות ייחוס משותפות לשני סוגי הצילומים. ההתאמה המרחבית בין צילומים נעשתה באמצעות מציאת נקודות בקרה (Ground control points) משותפות לפי מיקום הצלבים (MATLAB). לאחר בחירת נקודות הבקרה, הצילומים התרמיים עברו התאמה ומתיחה בהתאם לצילומים הנראה באמצעות שיטת Linear-Conformal (MATLAB).

4.4.2 הפרדת אובייקטים בתמונה

הפרדת העלווה מן הקרקע והפרדת העלווה החשופה לקרינת השמש הישירה נעשתה באמצעות תוכנה שפותחה במיוחד עבור מטרה זו על ידי צוות המחקר (CrossWise 6.2, ARO, Israel). דרגות שונות של משתני HSI (Hue, Saturation, Intensity) כונו ונקבעו עבור כל סט תמונות RGB (תמונה 5ד') עד שניתן היה להבחין בהפרדה ברורה בין האובייקטים הרלוונטיים. עבור כל תמונה נשמרה תמונת מיסוך (Mask) בינארית בפורמט TIFF (תמונה 5ה') אשר באמצעותה ניתן למסך את הפיקסלים הלא רצויים השייכים לקרקע, לצלבי הייחוס או לעלים המוצללים (תמונה 5ב', ג').

המידע התרמי נאסף מתוך מצולע המוגדר במרחב התמונה ללא הפיקסלים הממוסכים. הנתונים עובדו ונשמרו בקבצי txt (טבלה 6) מהם נבנה בסיס נתונים כללי.



תמונה 5: אופן הפרדת האובייקטים בתצלום באמצעות תוכנת Crosswise: א. הצבת תצלום בתחום הנראה (משמאל) מול תצלום תרמי (מימין לו) שנרכש במקביל, קיבל את קואורדינטות התצלום הנראה ושולב בו, ב. אותו התצלום עם מיסוך הפיקסלים השייכים לקרקע, ג. הפרדת העלווה החשופה לשמש מן העלווה המוצללת ומן הקרקע, ד. אופן כיוון פרמטרי ה-HSI, ה. שכבת ה-Mask המתקבלת מתהליך המיסוך.

במקרים רבים ההתאמה המרחבית בין הצילומים לא הייתה מושלמת ובעקבותיה גם הפרדת הפיקסלים בתמונה. כפי שניתן לראות, תמונה 5 מכילה במתכוון, מקרה בו ההתאמה המרחבית לא בוצעה בצורה מושלמת. כתוצאה מכך התקבל היסט והמיסוך לא מנע לחלוטין ערבוב של פיקסלים לא רלוונטיים של קרקע לממוצע הטמפרטורה של העלווה.

טבלה 6: סוג הנתונים שנאספו מן הצילומים התרמיים של כל חלקה.

שגיאת תקן	טמפ' מכסימום	טמפ' מינימום	טמפ' ממוצעת	
+			+	1, 0.5... 10 עשירונים מכלל הפיקסלים בתמונה
+	+	+	+	פיקסלים השייכים לכלל העלווה
+	+	+	+	פיקסלים השייכים לעלווה החשופה לשמש
+	+	+	+	משטח ייחוס

4.5 עיבוד הנתונים

עבור כל יום מדידות הוכזו נתוני פוטנציאל המים בעלה, נתוני מוליכות הפיוניות, הנתונים המטאורולוגיים והנתונים התרמיים בבסיס נתונים (EXCEL, Microsoft corp.). הנתונים התרמיים כללו מידע אודות הטמפרטורות של העלווה ומשטח הייחוס והכילו את הממוצע, מינימום, מכסימום ושגיאת התקן של כל הפיקסלים וכן, ממוצע ושגיאת תקן של כל אינטרוול ברמת הפרדה של 0.5 עשירונים מהתפלגות הפיקסלים בתמונה. (טבלה 6).

באמצעות בסיס הנתונים חושבו ממוצעי המדידות של כל חלקה שהורכבו מ-1 עד 3 זוגות צילומים תרמיים ובנראה, 4 מדידות LWP ו-6 עד 8 מדידות של מוליכות הפיוניות.

ה- E_{CWSI} האמפירי (E_{CWSI}) והתיאורטי (T_{CWSI}) חושבו באמצעות משוואה 1.

E_{CWSI} חושב באמצעות הצבת טמפרטורת הנוף (T_{canopy}) וטמפרטורת משטח הייחוס הלח (T_{min}) כפי שהתקבלו מהצילומים התרמיים וכן טמפרטורת האוויר בתוספת $5^{\circ}C$ (T_{max}).

T_{CWSI} חושב על ידי הצבת טמפרטורת הנוף כפי שהתקבלה מהצילומים התרמיים מול ערכי טמפרטורות המינימום והמכסימום שחושבו באמצעות משוואת מאזן האנרגיה של העלה (משוואות 3 ו-4 בהתאמה) בכמה שלבים, בהתבסס על הנתונים המטאורולוגיים ובאמצעות המרות של משוואת מאזן האנרגיה וכמה הנחות. מאגרי הנתונים של כל ימי המדידות סוכמו ורוכזו בטבלאות כלליות לצורך מציאת מודלים יציבים של מדדי העקה מול LWP ומול מוליכות הפיוניות.

4.6 מיפוי

לאחר מציאת מודלי רגרסיה, הופקו מפות LWP של חלקים מהשדות ברבדים ובחווה על בסיס צילומים אלכסוניים וכן של השדה בקיבוץ מגידו, על בסיס מספר צילומים תרמיים שצולמו ממטוס בכמה מועדים. המיפוי בוצע באמצעות השימוש בתוכנות ERDAS-IMAGINE (Leica) ו-MATLAB (Geosystems Inc.) לפי השלבים הבאים:

א. תרגום כל רמת אפור בכל פיקסל בצילום התרמי לטמפרטורה באמצעות משוואה 9

$$T_{(X,Y)} = T_{min} + \frac{T_{span}}{255} GL_{(X,Y)} \quad (9)$$

כאשר $T_{(X,Y)}$ מציין את הטמפרטורה המתקבלת עבור פיקסל במיקום (X,Y) ; $GL_{(X,Y)}$ מציין את רמת האפור (Gray-level) של פיקסל בתמונת המקור במיקום (X,Y) ; T_{min} היא טמפרטורת המינימום

של המרווח שנקבע המתאימה לערך 0 של דרגת הכהות ו- T_{span} הוא מרווח הטמפרטורה שנקבע עבור התמונה ($44.5-19.0=25.5^{\circ}\text{C}$).

ב. המרת ערכי טמפרטורה לערכי CWSI עבור כל פיקסל, תוך שימוש בנקודות הייחוס המתאימות לזמן רכישת התמונה :

$$CWSI_{(X,Y)} = \frac{T_{canopy(X,Y)} - T_{Min}}{T_{Max} - T_{Min}} \quad (10)$$

צילומי האוויר וצילומי הצד לא הכילו משטחי ייחוס. כחלופה לטמפרטורת מינימום, נעשה שימוש במספר חלופות: טמפרטורת החלקות המושקות בעודף, טמפרטורת העשירון התחתון השייך לפיקסלים הקרים בתמונה וטמפרטורת המינימום המחושבת ממשוואת מאזן האנרגיה (משוואה 3).
ג. המרת ערכי CWSI לנתונים החזויים של LWP עבור כל פיקסל באמצעות מודל הרגרסיה שנבחר:

$$LWP_{(X,Y)} = a[CWSI_{(X,Y)}] + b \quad (11)$$

ד. מיון ערכי פוטנציאל המים לשש קטגוריות לפי ערכי סף המסייעים בקבלת החלטות להשקיה בהתאם להשפעתם על אופן הגידול (מידע בע"פ מחקלאים, מדריכים וחוקרים):

1.4 MPa - ומעלה : מושקה בעודף

1.4 - 1.6 MPa - : פוטנציאל מלאה, מצב אופטימלי לגידול וגטטיבי.

1.7 - 1.9 MPa - : צימוח מרוסן ללא פגיעה בהטמעה - מצב אופטימלי למילוי הלקטים.

2.0 - 2.2 MPa - : עקת מים המובילה לפגיעה בהטמעה.

2.3 MPa - : עקת מים קיצונית המקובלת לקראת שילוך

ברוב בעונה החקלאי שואף לשמור על פוטנציאל מים של 1.7 MPa, לקראת סוף העונה על 1.9 - MPa ואילו במעבר לשילוך יש שאיפה לעבור במהירות מ- 1.9 MPa ל- 2.3 MPa.

על מנת להעריך את טיב המיפוי יש צורך באימות הנתונים שנאמדו על ידי המפה. לשם כך, במקביל לתמונות התרמיות של השדות, דרושים נתוני פוטנציאל מים שנמדדו בשדה בסמוך לרכישת התצלום. במועדים שקדמו לתחילת התצלומים האוויריים, נרכשו לעיתים (כדרך אגב), תמונות זוויתיות הכוללות את השדה מבט צד. תמונות אלה שימשו מאוחר יותר, להפקת מפות של השדות עצמם, כך שהיו עבורם נתונים פיסיולוגיים שנמדדו סמוך לזמן התצלום. מאוחר יותר בשנת 2007 בוצעו על ידי צוות המחקר, תצלומי אוויר בכמה מועדים, תוך שימוש באותה המצלמה.

5 תוצאות

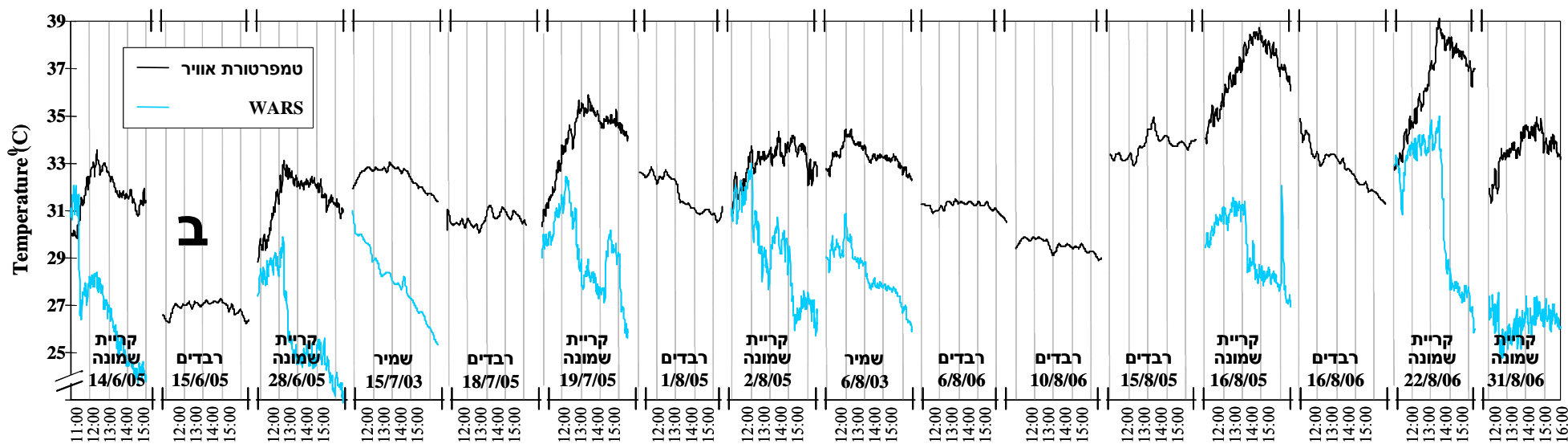
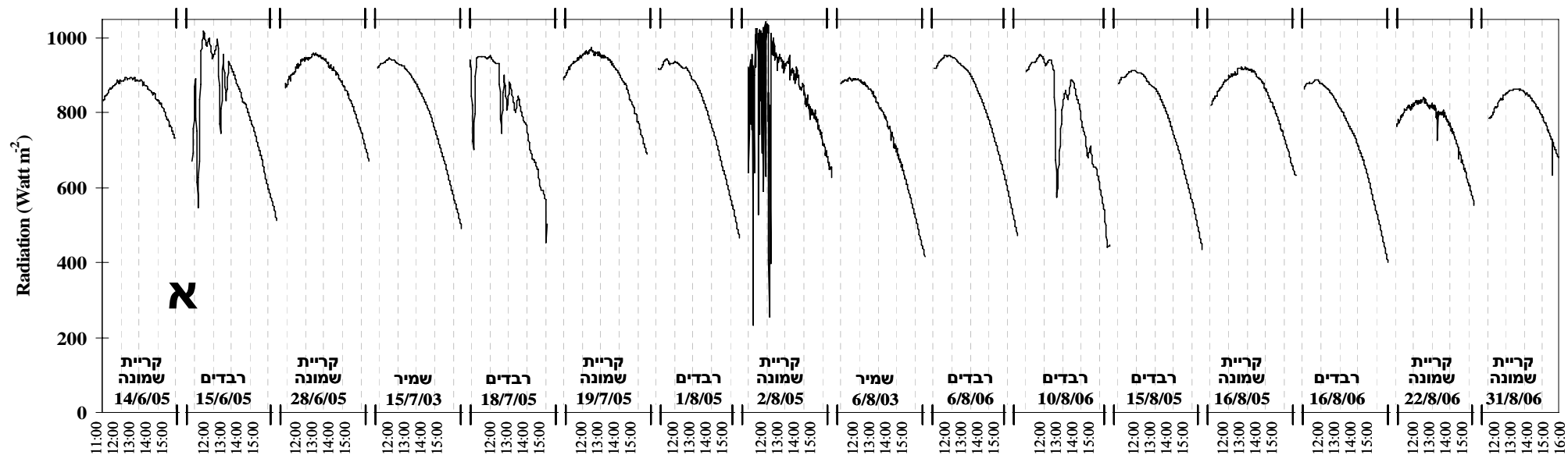
5.1 מדידות מטאורולוגיות

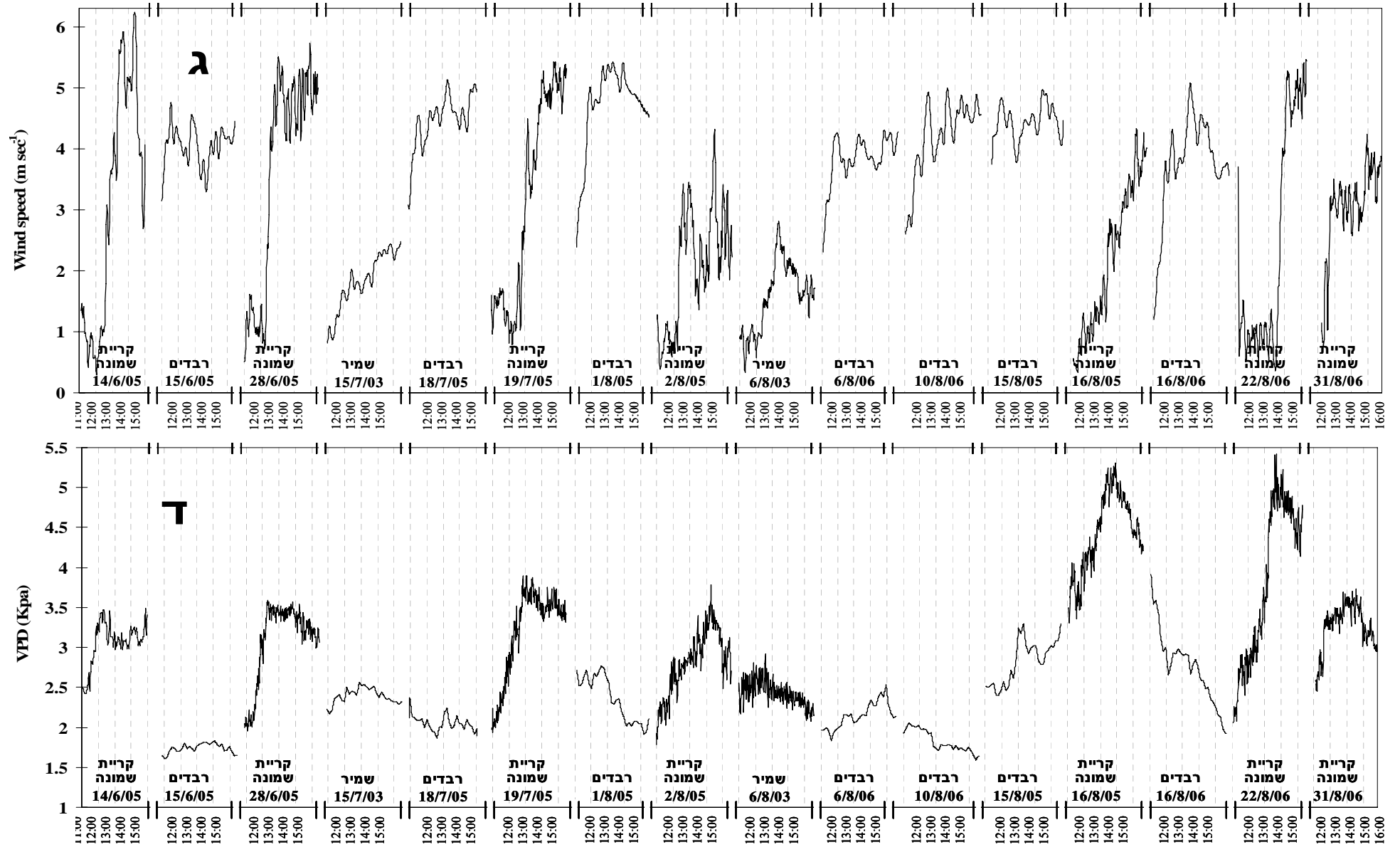
במועדי המדידה השונים, שרר מגוון של תנאים מטאורולוגיים שהשפיעו על רמות העקה ועל האופן שבו היא מוצגת וניתנת למדידה באמצעים התרמיים והפיזיולוגיים. מהלך השתנות הקרינה, הרוח, טמפרטורת האוויר והלחות היחסית לאורך ימי המדידה מוצגים בגרף 7.

בגרף 7' ניתן להבחין בדפוס ההשתנות היומי של עוצמת הקרינה המשתנה בהתאם לזווית השמש בשעות היום השונות. פרט לימים המעוננים, בתחום הזמן בו נערכו המדידות (11:30-15:30), עוצמת הקרינה נעה בטווח מצומצם של כ- 150 watt m^{-2} , כאשר שיא העוצמה הופיע סביב השעה 12:00 ועמד על כ- 950 watt m^{-2} . בימים כמו ה- 15/06/05 ה- 18/07/05 וה- 2/8/05, הופיעו לסירוגין עננים שגרמו למיסוך הקרינה הישירה אולם למרות הימצאותם, ניתן להבחין במגמת ההשתנות היומית המאפיינת את עונת הגידול הקיצית.

בשונה מן הקרינה, טמפרטורת האוויר המתוארת בגרף 7'ב', השתנתה במידה רבה בין מועדי המדידה ובמהלכם. בכל מועדי המדידה, פרט ל-15/6/06, שררו תנאי שרב עם טמפרטורת אוויר גבוהה מ- 30°C וממוצעת של 32.5°C בשעות המדידה. ה-15/6/06 ברבדים מהווה מועד חריג, עם טמפרטורת אוויר ממוצעת וכמעט קבועה, של 26°C . שרב כבד שרר ב-22/8/06 וב-16/8/05 בחוות גד"ש שליד קריית שמונה, עם טמפרטורות אוויר ממוצעות של 37°C בשעות המדידה וטמפרטורת שיא של 39°C . באופן כללי, מהלך השתנות טמפרטורת האוויר במהלך המדידות נחלק לשני דפוסים: בעל טמפרטורת אוויר יציבה הנעה בתחום של 2°C (15/6/05, 18/7/05, 10/8/06) וכדומה) ודפוס בעל מגמת עלייה מהירה בטמפרטורה בסביבת 13:30 אחה"צ וירידה קבועה לאחר מכן.

עוצמת הרוח (גרף 7'ג') התנהגה בדפוסים שונים בהתאם למיקום השדות. בחוות-גד"ש קריית שמונה הממוקמת בעמק החולה, הרוח בבוקר הייתה חלשה או כלל לא נשבה אך באופן קבוע, החל מאזור השעה 12:00 בצהריים, הופיעה רוח מערבית חזקה ("שרקייה") שלעיתים נמשכה במהירות ממוצעת של 5 מטרים לשנייה (28/6/05, 19/7/05, 22/8/06). בקיבוץ שמיר הממוקם במזרח עמק החולה, הרוח המערבית הופיעה בהדרגתיות ונמשכה בעוצמה חלשה יחסית ובמהירות ממוצעת של 2 מטרים לשנייה. בשדה שמוקם בקיבוץ רבדים, ניתן לראות שהרוח התחזקה מוקדם יותר בסביבות השעה 11:30, אולם היא אחידה יותר בשעות המדידה ונעה בכל המועדים במהירות ממוצעת של כ-4 מטרים לשנייה.





גרף 7: נתונים מטאורולוגיים דקתיים ששררו במהלך המדידות (אינטרפולציה מנתונים 10 דקתיים במקרה של רבדים): א. עוצמת שטף הקרינה, ב. טמפרטורת האוויר וטמפרטורת משטח ייחוס לח ניח, ג. מהירות הרוח, ד. גרעון לחץ האדים באוויר (VPD).

גרעון לחץ האדים באוויר (VPD) המופיע ב גרף 7ד' דומה באופן השתנותו למגמת ההשתנות של טמפרטורת האוויר (שכן הוא נגזר בין היתר ממנה) אולם במידה מתונה יותר.

ההבדלים הגדולים בין המועדים במידת ה-VPD מעידים כי בחלק קטן ממועדי המדידה (במיוחד ברבדים ב-15/8/05 וב-10/8/06) שררה לחות יחסית גבוהה, בעוד שבחלק אחר מן המועדים שרר יובש בינוני ואף גבוה (בקרית שמונה ב-16/8/05 וב-22/8/06), כך שהכוח המניע את הטרנספירציה שהופעל על הצמחים, היה חזק ופתיחת פיוניות בתנאים אלו מתבטאת באיבוד מים רב. במונחים של לחות יחסית ופוטנציאל מים באוויר, ניתן לתרגם VPD עם ערך של 1.8KPa (הערך המכסימלי ב-15/6/05) ל-50% לחות יחסית ופוטנציאל מים באוויר של -74.5MPa "בלבד". לעומת זאת, ערך VPD של 5KPa (ערך קרוב לממוצע ב-16/8/05) שווה לערך פוטנציאל מים של -161MPa.

בגרף 7ב' מתואר מהלך השתנות הטמפרטורה של משטח הייחוס הלח שהוצב בחלק ממועדי המדידה במרכז שדה הניסוי (בשונה ממשטח הייחוס הנייד שמוקם בשדה הראייה של התצלומים). טמפרטורת המשטח, שיועד לדמות עלה ללא עקה ולשקלל את התנאים המטאורולוגיים עבור CWSI, השתנתה במידה רבה במהלך המדידות ובין המועדים ונראה כי לא הושפעה מגורם יחיד אלא משילוב של מספר גורמים. מאופן מגמת ההשתנות הכללית ניתן לראות כי הגורמים הדומיננטיים המשפיעים על טמפרטורת המשטח הם שילוב של מהירות הרוח עם טמפרטורת האוויר ו-VPD. מהצבת טמפרטורת משטח הייחוס מול מהירות הרוח הממוצעת לכל 10 דקות (נתונים לא מוצגים) נמצא מתאם של 0.70 ($R^2=0.49$, $n=4,365$). הצבת טמפרטורת האוויר מול טמפרטורת משטח הייחוס מניבה מתאם של 0.36 אולם, כאשר הרוח מהירה מ-2 ומ-4 מטרים לשניה, המתאם בין גורמים אלה משתפר ל-0.64 ($R^2=0.41$) ול-0.80 ($R^2=0.63$) בהתאמה. כלומר, כאשר מהירות הרוח גבוהה טמפרטורת האוויר הפכה לגורם משמעותי הקובע את מהלך השתנות הטמפרטורה של משטח הייחוס הלח וייתכן גם של הנוף הצמחי שאינו בעקה, בהנחה כי משטח הייחוס מייצג אותו היטב.

לסיכום, נתונים אלה, מצביעים על טווח נרחב של תנאים מטאורולוגיים ומייצגים עונה אופיינית של גידול כותנה בישראל.

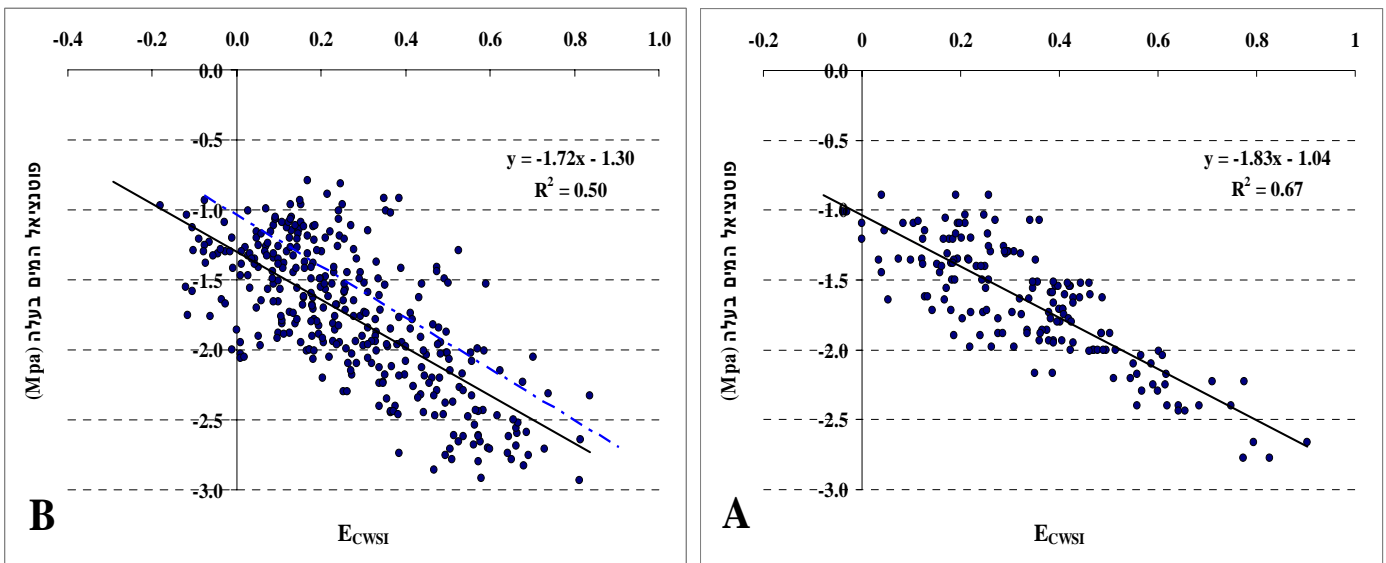
5.2 ניתוח הנתונים ברמת העלה הבודד מול רמת החלקה

אחת ממטרות העבודה הראשוניות כללה השוואה בין נתוני הטמפרטורה שנאספו מן העלים הספציפיים ששימשו למדידת מוליכות הפיוניות ופוטנציאל המים לבין נתוני הטמפרטורה של החלקה כולה (להלן, "רמת העלה" ו"רמת החלקה"). ניתוח הנתונים ברמת העלה הבודד לבחינת הקשר בין מדדים תרמיים ובין מצב המים בצמח מקבילה לגישה של מדידת הטמפרטורה באמצעות התרמומטרים בעלי החישן הבודד (IRT). בעוד שמדידה זו, באמצעות IRT, סובלת בדרך כלל מהשפעה של טמפרטורת רקע, מדידת עלים בודדים באמצעות צילומים תרמיים ברזולוציה גבוהה מאפשרים איתור של פיקסלים טהורים המאפיינים את העלה בלבד. על-כן בבסיס הבחינה ברמת העלה הבודד, עמדה ההשערה שהקשר בין מדד תרמי של עלה בודד (המבוסס על צילומים

תרמיים) לבין מצב המים יהיה טוב יותר מזה שמתקבל ממדידות באמצעות IRT. בהשוואה בין מדד עקה של עלה בודד ובין מדד ממוצע של חלקה ההשערה הייתה שהראשון יגלה מתאם טוב יותר עם מצב המים. ראשית מכיוון שהמושא למדידה זהה (אותו עלה); ושנית המורכבות בתיאום המרחבי היחסי בין התמונות התרמיות ל-RGB גורמת להפרדה בין קרקע ועלים באיכות פחותה, דבר שעלול להכניס רעש במדידות הטמפרטורה.

למרות ההשערות שלהלן, מניתוח הנתונים ברמת העלה הבודד התקבלו באופן עקבי מתאמים נמוכים יותר מאלו שברמת החלקה הן בהשוואה לפוטנציאל מים בעלה והן בהשוואה למוליכות פיוניות. בגרף 8 מובאת דוגמא להבדלים המתקבלים בין המתאמים. במקרה זה מוצג מתאם בין E_{CWSI} לפוטנציאל המים בעלה המורכב משבעה מועדי מדידה שנערכו ב-2005 (14/6, 28/6, 18/7, 19/7, 1/8, 15/8, 16/8). כפי שניתן להבחין, ממוצעי מדד העקה של החלקות שהוצבו מול ממוצעי נתוני פוטנציאלי המים של כל חלקה הניבו מתאם עם שיפוע בסדר גודל דומה לזה שהתקבל לעלים בודדים אך עם מקדם דטרמינציה (R^2) משופר.

כתוצאה מכך, ומכיוון שניתוח ברמת העלה הבודד ממילא לא מנצל את היתרון של חישה מרחוק, המאפשרת חישה של אזורים נרחבים, החל מ-2006 ניתוחי הנתונים נעשו ברמת החלקה בלבד.



גרף 8: פוטנציאל המים בעלה מול E_{CWSI} : A. ברמת החלקה (מקטע הנוף החשוף לשמש) B. ברמת העלה (סך נתוני 2005). הקו המקווקו מציין את קו הרגרסיה של A

5.3 מדידות פיזיולוגיות, ומדדי העקה התרמיים

ממוצעי פוטנציאלי המים ומוליכות הפיוניות (ממוצעים של 4-6 עלים לחלקה) שנמדדו בכל אחד ממועדי המדידה מסוכמים בטבלה 9.

טבלה 9: מאפיינים סטטיסטיים של נתוני טמפרטורת הנוף, המדדים התרמיים שחושבו, נתוני מוליכות הפיוניות ופוטנציאל המים בעלה כפי שנמדדו בכל אחד מן המועדים*.

T _{CWSI}				E _{CWSI}				טמפרטורת הנוף (°C)				פוטנציאל המים בעלה (Mpa)				מוליכות הפיוניות (mmol sec ⁻¹ m ⁻²)				מספר צמדי		
Std	Avg.	Max	Min	Std	Avg.	Max	Min	Std	Avg.	Max	Min	Std	Avg.	Max	Min	Std	Avg.	Max	Min	תצלומים	מיקום	תאריך
0.13	0.43	0.55	0.09	0.1	0.38	0.45	0.11	0.8	30.7	31.6	29	0.21	-1.57	-1.07	-1.74	170	543	854	333	34	ק"ש	14/6/05
0.13	0.52	0.79	0.46	0.23	0.27	0.51	-0.07	1.6	27.5	29.9	25.7	0.11	-1.21	-1.14	-1.47	65	571	620	442	18	רבדים	15/6/05
0.13	0.46	0.6	0.22	0.18	0.37	0.6	-0.03	1.7	30.1	32.4	26.8	0.27	-1.78	-1.38	-2.25	147	328	719	176	39	ק"ש	28/6/05
0.14	0.1	0.38	-0.06	0.3	0.15	0.52	-0.33	1.7	30.1	33.4	28.7	0.4	-1.66	-1.18	-2.26					48	שמיר	15/7/03
0.07	0.28	0.45	0.24	0.11	0.21	0.29	-0.03	0.6	28.7	29.9	27.9	0.14	-1.21	-1.01	-1.5	149	755	998	564	21	רבדים	18/7/05
0.12	0.16	0.44	0.08	0.13	0.24	0.5	0.06	1.5	30.9	33.3	28.5	0.38	-1.52	-0.89	-2.01	353	925	1217	289	47	ק"ש	19/7/05
0.18	0.5	0.8	0.2	0.21	0.46	0.74	0.11	2.1	30.7	34.1	28	0.33	-1.95	-1.41	-2.44	153	386	653	256	23	רבדים	1/8/05
0.09	0.22	0.43	0.11	0.2	0.12	0.5	-0.12	1.8	28.7	32.9	26.7	0.26	-1.54	-1.3	-2.03	167	581	882	354	26	ק"ש	2/8/05
0.25	0.29	0.6	-0.08	0.43	0.18	0.73	-0.36	3	30.7	36.3	28.1	0.68	-1.33	-0.83	-2.44					26	שמיר	6/8/03
0.13	0.63	0.78	0.43					1.5	33.8	34.1	30.3	0.32	-1.71	-1.09	-2.01	84	401	494	234	8	רבדים	6/8/06
0.17	0.64	0.85	0.41	0.21	0.57	0.9	0.26	1.8	31.4	34	29.1	0.18	-1.66	-1.25	-1.98	87	293	459	142	17	רבדים	10/8/06
0.19	0.63	0.89	0.31	0.2	0.56	0.85	0.25	2	34.8	37.8	31.4	0.44	-2.12	-1.41	-2.77	305	575	1216	291	22	רבדים	15/8/05
0.15	0.42	0.57	0.1	0.19	0.6	0.72	0.08	2.8	35.7	38.5	29.6	0.42	-2.39	-1.23	-2.76	187	232	660	75	58	ק"ש	16/8/05
0.13	0.46	0.62	0.23	0.12	0.29	0.51	0.13	1.7	31.7	34.5	28.9	0.26	-1.43	-1.15	-1.91	84	334	439	135	17	ק"ש	16/8/06
0.07	0.26	0.37	0.1	0.09	0.14	0.27	-0.09	0.9	34.6	37.7	33	0.29	-1.45	-1.13	-2.07					36	ק"ש	22/8/06
0.1	0.58	0.77	0.43	0.14	0.63	0.86	0.38	1.5	34.4	37.8	32.3	0.23	-1.83	-1.32	-2.32	71	346	486	233	85	ק"ש	31/8/06

* מוליכות הפיוניות לא נמדדה ב-15/7/03, 6/8/03 וב-22/8/06

* ב-6/8/06 CWSI אמפירי לא חושב מכיוון שמשטח הייחוס הקר הוצב שלא כהלכה והציג באופן עקבי טמפרטורות גבוהות מטמפרטורת העלווה.

מספר התצלומים השונה בין מועדי המדידה נובע מהיקף המדידות ומן ההספק בהתאם לכלים השונים. ב-31/8/06 לדוגמא, בוצעו מדידות רבות כתוצאה משילוב של תוספת בכוח אדם ומן השימוש במנוף הנגרר שנבנה במיוחד למטרה זו ושאפשר צילום סרטונים תרמיים תוך כדי הנסיעה בשדה. לעומת זאת, ב-6/8/06 בוצעו מעט מדידות עקב שקיעת המנוף בשדה בקרקע של חלקה שהושקתה.

גודלו של טווח הנתונים השתנה גם הוא בין המועדים. לדוגמא, ב-15/6/05 טווח פוטנציאל המים שנמדד בחלקות הניסוי היה 0.33MPa בלבד, עם ממוצע של -1.57MPa בלבד ושגיאת תקן קטנה (0.11MPa), כך שניתן לשער כי לא התפתחה עקת מים משמעותית במועד זה. חיזוק לכך ניתן לקבל מנתוני מוליכות הפיוניות עם טווח מצומצם של מוליכות יחסית גבוהה בכל הטיפולים (ממוצע של $571 \text{mmol sec}^{-1} \text{m}^{-2}$) וכן גם מטמפרטורת הנוף הממוצעת, עם ממוצע של 27.5°C . מנגד, ניתן למצוא את ה-15/8/05 וה-16/8/05 בהם טמפרטורת הנוף הממוצעת הייתה הגבוהה ביותר ובהתאם, גם נתוני פוטנציאל המים ומוליכות הפיוניות נמוכים.

5.4 מוליכות פיוניות מול מדדי העקה התרמיים

נתוני מדידות מוליכות הפיוניות הוצבו מול נתוני הטמפרטורה ומול ערכי מדדי העקה התרמיים (טבלה 10) בכל אחד ממועדי המדידה וכקבוצה אחת לצורך מציאת מתאמים כלליים (גרף 11) 'מתאמים-כלליים' כונו מתאמים שהורכבו משילוב של כמה מועדי מדידה. הכינוי 'מתאם מקומי' מתייחס למתאם של מועד בודד.

לצורך השוואה בין המתאמים מופיע הסטטיסט Adjusted R^2 , מאחר ומספר התצפיות שונה ממועד למועד¹.

בכל המתאמים המקומיים הקשרים הליניאריים נמצאו כקשרים בעלי מתאמים גבוהים יותר פרט לשני מועדים: ה-19/7/05 וה-15/8/05, בו היתרון של הקשר המעריכי לא היה משמעותי. בקרב המתאמים הכלליים, הקשר הליניארי נמצא גם הוא גבוה יותר מן הקשר המעריכי, פרט למתאם עם טמפרטורת הנוף הגולמית (גרף 11א').

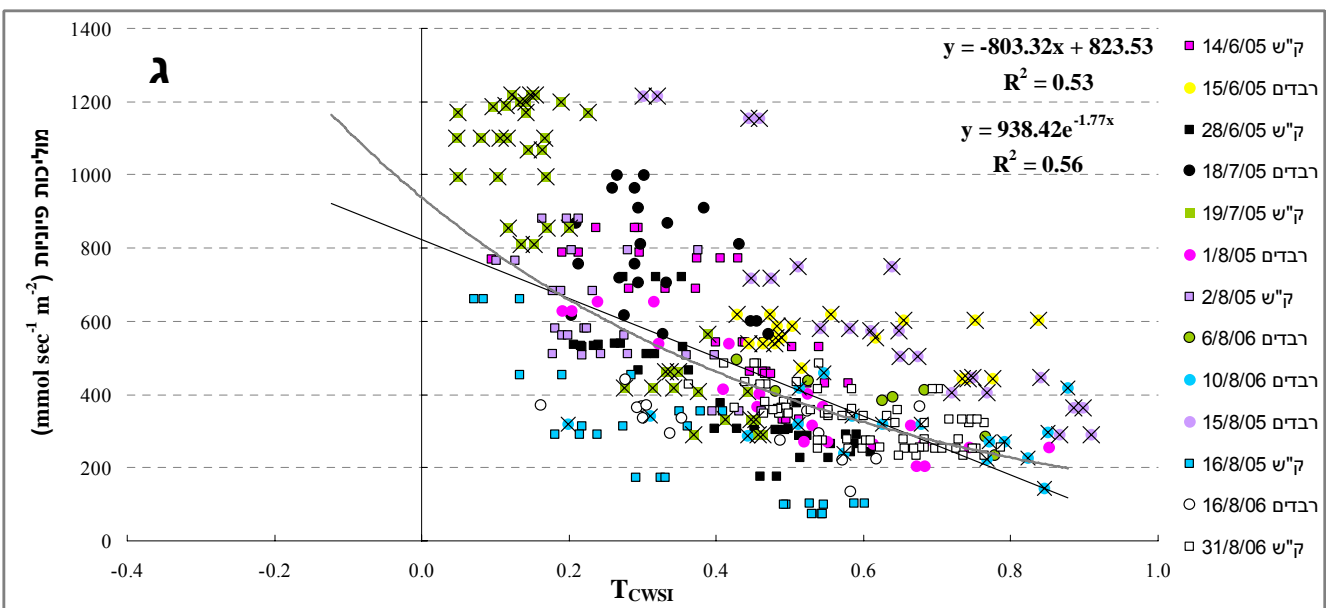
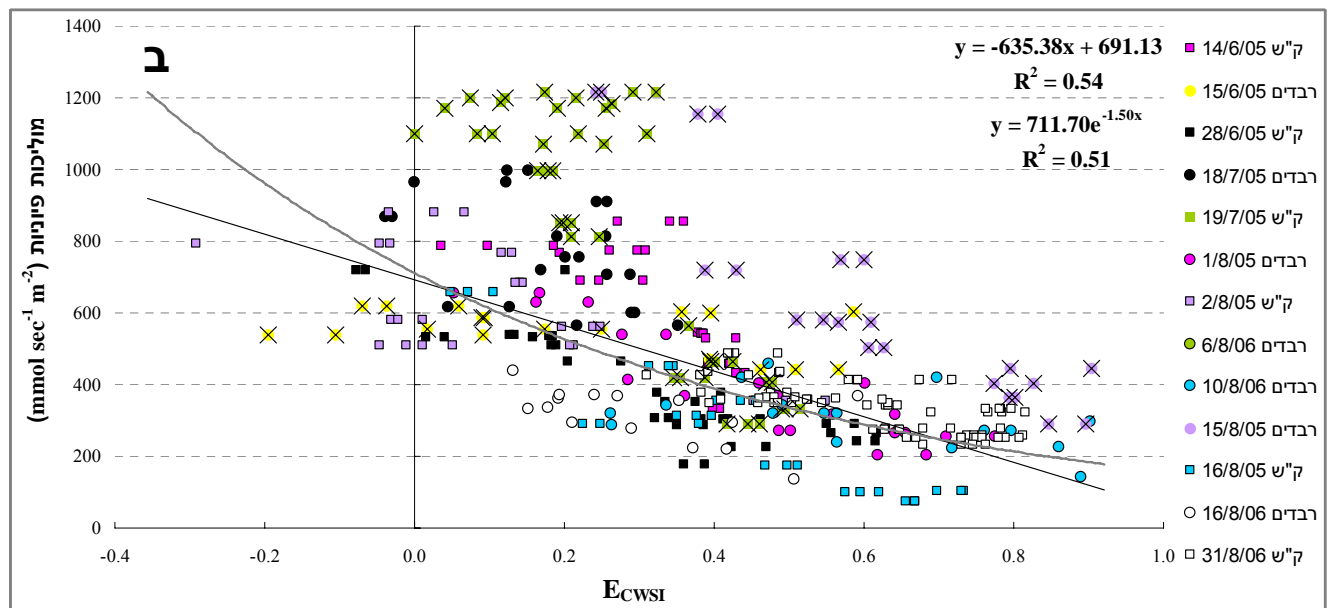
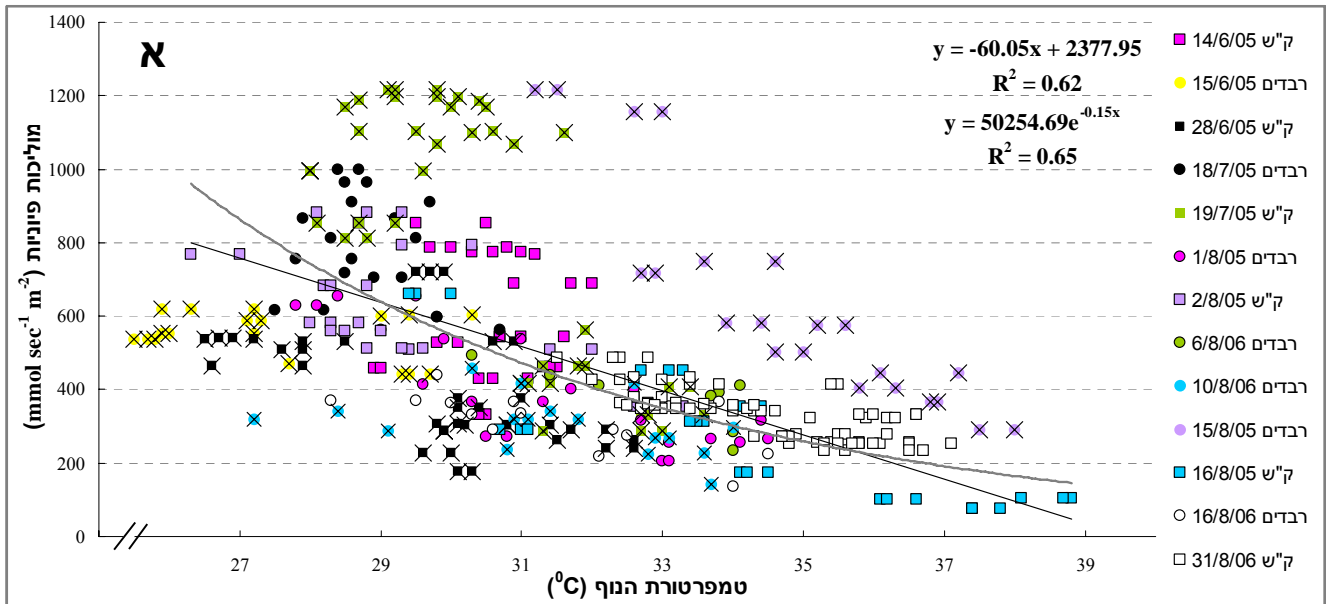
בכל המתאמים המקומיים והכלליים, (גרף 11, טבלה 10), ניתן למצוא קשר שלילי, המראה כי העלייה בטמפרטורת הנוף (או בערכי האינדקסים), מקבילה לירידה במוליכות הפיוניות. גרף 11א', ב' ו-ג' מציגים את כלל הנתונים של היחס בין מדדי העקה התרמיים ובין מוליכות הפיוניות. המודל ומקדם הדטרמינציה של כל אחד מהם מתייחסים לכלל הנתונים לאחר הוצאת נתונים של מועדים 'חריגים' שבאופן כללי מתנהגים אחרת מכלל הנתונים.

¹ "תצפית" מוגדרת כחלקה שצולמה בזמן נתון ושהציגה רמת פוטנציאל מים כלשהיא או מוליכות פיוניות. ללא קשר לסוג טיפול ההשקיה (טיפול השקיה יושמו רק לצורך קבלת טווח נרחב של מצבי מים)

טבלה 10: מתאמים ליניאריים של נתוני מוליכות הפיוניות מול טמפרטורת הנוף. E_{CWSI} ו- T_{CWSI} . במועדי המדידה השונים ויחדיו.

T_{CWSI} מתאם בין מוליכות הפיוניות ל- T_{CWSI}						E_{CWSI} מתאם בין מוליכות הפיוניות ל- E_{CWSI}						מתאם בין מוליכות הפיוניות לטמפרטורת הנוף						תאריך	מיקום	
n	Slope	Intercept ¹	Std ¹	Adj. R ²	R	n	Slope	Intercept ¹	Std ¹	Adj. R ²	R	n	Slope	Intercept ¹	Std ¹	Adj. R ²	R			
30	-1181.0**	1071.6**	102.0	0.65	-0.81**	30	-1197.1**	999.9**	117.9	0.53	-0.74**	30	-22.7	1288.6	174.5	0.02	-0.11		ק"ש	14/6/05
18	-150.0	638.0**	61.5	0.05	-0.32	18	-119.2	575.2**	57.6	0.17	-0.46	18	-11.4	863.6**	62.1	0.03	-0.29		רבדים	15/6/05
37	-990.0**	808.6**	89.4	0.66	-0.82**	36	-711.4**	617.6**	78.8	0.74	-0.86**	37	-50.0**	1884.6**	128.3	0.30	-0.56**		ק"ש	28/6/05
21	-645.8	980.4**	143.1	0.07	-0.35	21	-610.1*	884.6**	135.9	0.16	-0.45*	21	-51.4	2258.4	147.0	0.02	-0.27		רבדים	18/7/05
42	-2354.2**	1363.9**	167.3	0.77	-0.88**	42	-2096.3**	1409.0**	200.4	0.67	-0.83**	42	-147.8**	5340.3**	256.4	0.47	-0.69**		ק"ש	19/7/05
22	-702.3**	737.8*	75.1	0.75	-0.87**	22	-555.2**	637.2**	85.7	0.67	-0.83**	22	-52.8**	2042.4**	98.4	0.57	-0.77**		רבדים	1/8/05
26	-995.9**	871.0**	132.9	0.32	-0.59**	26	-552.0**	683.4**	127.4	0.38	-0.63**	26	-47.2**	2011.6**	139.5	0.25	-0.53**		ק"ש	2/8/05
8	-573.2**	733.7**	42.6	0.74	-0.88**							8	-41.6*	1751.9*	62.0	0.45	-0.73*		רבדים	6/8/06
17	-137.0	392.9**	76.4	0.06	-0.34	17	-188.6*	418.0**	70.5	0.20	-0.50*	17	-16.3	818.7*	74.6	0.10	-0.40		רבדים	10/8/06
22	-1455.5**	1558.4**	134.8	0.80	-0.90**	22	-1320**	1438.1**	134.6	0.80	-0.90**	22	-137.6**	5424.1**	132.6	0.80	-0.90**		רבדים	15/8/05
27	-968.5**	615.1**	96.7	0.73	-0.86**	27	-863.5**	661.3**	74.6	0.84	-0.92**	27	-56.2**	2202.7**	99.3	0.71	-0.85**		ק"ש	16/8/05
15	-300.5*	442.4**	63.9	0.32	-0.61*	14	-547.3**	465.9**	48.8	0.62	-0.80**	15	-26.9**	1163.1**	61.8	0.36	-0.64**		רבדים	16/8/06
70	-417.2**	580.6**	54.3	0.40	-0.64**	70	-369.6**	559.9**	48.2	0.53	-0.73**	70	-35.9**	1569.9**	46.2	0.57	-0.76**		ק"ש	31/8/06
353	-852.0**	876.0**	200.1	0.41	-0.64**	344	-695.2**	772.0**	204.6	0.40	-0.63**	353	-50.3**	2087.5**	218.7	0.30	-0.55**		מתאם כללי	
272	-725.2**	761.5**	152.6	0.42	-0.65**	263	-635.38**	691.1**	137.4	0.54	-0.74**	271	-50.1**	2023.7**	146.4	0.46	-0.68**		מתאם כללי ²	
245	-803.3**	823.5**	134.1	0.53	-0.73**	263	-635.38**	691.1**	137.4	0.54	-0.74**	217	-60.1**	2377.9**	129.43	0.62	-0.79**		מתאם כללי ³	

¹ביחידות של $\text{mmol sec}^{-1} \text{m}^{-2}$, ללא מועדים החורגים משלושת המתאמים הכלליים (ה-15/6/05, ה-19/7/05 וה-15/8/05), ללא חריגים מקומיים. החריגים העקביים מסומנים באפור כהה. החריגים המקומיים מסומנים באפור בהיר. $P < 0.05$, $P < 0.01$, $P < 0.001$.



גרף 11: מתאם בין נתוני מוליכות הפיוניות לבין טמפרטורת הנוף: (א), E_{cWSI} (ב) ו- T_{cWSI} (ג). נקודות הפיזור של מועדי המדידה שאינם משתתפים במתאם מסומנות ב-X.

'חריגים-עקביים' נקראו מועדים שחרגו באופן עקבי בשלושת המתאמים (עם הטמפרטורה, E_{CWSI} ו- T_{CWSI}), 'חריגים-מקומיים' נקראו מועדים שחרגו רק באחד או שניים מתוך שלושת המתאמים. במתאמים עם מוליכות הפיוניות נמצאו שלושה מועדים שהוגדרו כחריגים-כלליים, שכוללים את ה-15/6/05, ה-15/8/05 וה-19/7/05.

ה-15/6/05 בולט באופן פיזור נקודות המתאם שלו וחורג ממיקום כלל הנתונים בערכים הנמוכים של המתאם עם הטמפרטורה ו- T_{CWSI} ובערכים הגבוהים, במתאם עם E_{CWSI} . כמוכן, המתאמים והשיפועים הנמוכים של נתוני המועד לא נמצאו מובהקים בשלושת המקרים, (אך אין זו הסיבה לפסילתם). ב-15/8/05 נמצא מתאם מובהק בכל המקרים, אולם מקדמי המודל שלו, השיפוע והחותך, שונים ביחס למגמות המתאמים הכלליים ונראה כי מסיבה כלשהי, נגרם היסט של ערכי מוליכות הפיוניות כלפי מעלה, מעבר לקו המגמה הכללי.

תכונה חריגה נוספת המשותפת לשלושת המתאמים, ניתן למצוא ב-19/7/05, בו נמדדו נתוני מוליכות גבוהה, המתקבצים בחלקם, סביב הערכים הנמוכים של הטמפרטורה והאינדקסים. מועד בולט נוסף שאינו חריג בכל המתאמים, הוא ה-10/8/06 השייך לתקופת מילוי ההלקטים (מן ה-20 באוגוסט ואילך), אשר בניגוד לשאר מועדי המדידות שנערכו בשלב פנולוגי זה, הציג רק במקרה של ה- $CWSI$ האמפירי, מתאם עם מובהקות גבולית של $P < 0.05$ ומקדמי דטרמיניציה נמוכים בכל המתאמים המקומיים. מבחינת הנתונים המטאורולוגיים שררו במועד ה-10/8/06, נראה כי למעט ה-15/6/05, טמפרטורת האוויר וה- VPD בו הם הנמוכים ביותר.

מוליכות הפיוניות וטמפרטורת הנוף

בקרב המתאמים המקומיים בין מוליכות הפיוניות וטמפרטורת הנוף (טבלה 10), ניתן להבחין כי מתוך שלושה עשר מועדים, ארבעה נמצאו חסרי מובהקות. מתוכם, שניים שייכים לתקופת הגידול הוגטיבית של כותנה (עד ה-20 ביוני), אחד לתקופת הפריחה (20/6 עד ה-20/7) ואחד לתקופת מילוי ההלקטים (20/7 עד ה-20/8).

בקרב יתר המתאמים בעלי המובהקות, בשני מועדים קיים קשר בינוני ובשבעה קשר חזק. השיפועים המובהקים מכילים שני מועדים (15/8/05, 19/7/05) בעלי שיפועים חדים אך שבעת המועדים הנותרים, מציגים שיפועים בתחום צר של -27 עד $-56 \text{ mmol sec}^{-1} \text{ m}^{-2}$ עבור כל תוספת של מעלה. תכונה זו מרמזת על אחידות כלשהי בקרב המועדים באופי הקשר שבין טמפרטורת הנוף ומוליכות הפיוניות.

במתאם הכללי המופיע בגרף 11א' ניתן לראות כי פרט למועדים החריגים, רוב נתוני ה-28/6/05 מפוזרים תחת קו המתאם וחורגים מעננת הפיזור הכללית וכן גם חלק קטן מנתוני ה-10/8/06 שנמצא חסר מובהקות. ללא נתוני ה-28/6/05 מתקבל מתאם כללי המשתפר מ-0.68 ל-0.75- ומתאם מעריכי של -0.77. בנוסף, ללא ה-10/8/06 מתקבל מתאם לינארי של -0.79 ומתאם מעריכי של -0.81.

מוליכות הפיוניות ו- *CWSI* אמפירי

כל המתאמים שהתקבלו מהצבת ערכי מוליכות הפיוניות מול ערכי E_{CWSI} (טבלה 10) נמצאו מובהקים, מתוכם ארבעה ברמת מתאם בינונית ושמונה ברמת מתאם גבוהה. הפיזור הכללי של הנקודות בגרף 11ב' דומה לפיזור הנקודות בגרף 11א' של המתאם בין מוליכות הפיוניות וטמפרטורת הנוף הגולמית. אולם במקרה זה, כל הקשרים מובהקים יותר (פרט למקרה של ה-31/8/06) ונראה כי הדבר נובע מן הנרמול שמבצע ה- $CWSI$. ברוב המועדים, $CWSI$ שיפר את טווח הערכים לעומת השימוש בטמפרטורת הנוף לבדה (טבלה 9). כדוגמא לכך יכול לשמש ה-14/6/05 ברבדים, שבו במתאם עם טמפרטורת הנוף, טווח הטמפרטורה ($2.65^{\circ}C$) היווה 21% מטווח הטמפרטורה הכללי (min-max) ואילו השימוש ב- $CWSI$ במקרה זה הגדיל את הטווח ל-34% מן הטווח הכללי של ערכי $CWSI$. בכך, המדד הגדיל את התחום שניתן להציב מול ערכי מוליכות הפיוניות והתוצאה במקרה זה, היא מעבר ממתאם של -0.02 עם הטמפרטורה הגולמית, למתאם של -0.79 כאשר משתמשים באינדקס. במתאם הכללי המוצג בגרף 11ב', לא נצפו מועדים נוספים שניתן לאבחן אותם כחריגים, מלבד החריגים הכלליים.

מוליכות הפיוניות ו- *CWSI* תיאורטי

הצבת נתוני מוליכות הפיוניות מול נתוני T_{CWSI} שנגזר מן הנתונים המטאורולוגיים (גרף 11ג', טבלה 10), הניבו שבעה מקדמי מתאם גבוהים, שלושה מקדמים בינוניים ושלושה מקדמים נמוכים שלא נמצאו מובהקים. שלושת המתאמים הבלתי מובהקים שייכים ל-15/6/05, ל-18/7/05, ול-10/8/06 שנמצאו נמוכים גם במקרים של המתאם עם שני מדדי העקה האחרים. ברוב המועדים (תשעה מתוך שלושה עשר) המתאמים המקומיים של מוליכות הפיוניות עם ה- T_{CWSI} גבוהים יותר מן המתאמים עם הטמפרטורה. אולם בשמונה מתוך אחד עשר מועדים, המתאמים חלשים יותר בהשוואה ל- $CWSI$ האמפירי. ניתן להבחין בגרף 11ג' כי נקודות הפיזור של ה-16/8/05 נמצאו מתחת לקו המתאם המשותף למרות ששיפוע המועד קרוב מאוד לשיפוע הכללי (טבלה 10). מקדם המתאם המשותף ללא ה-16/8/06 משתפר מ-0.65 ל-0.73.

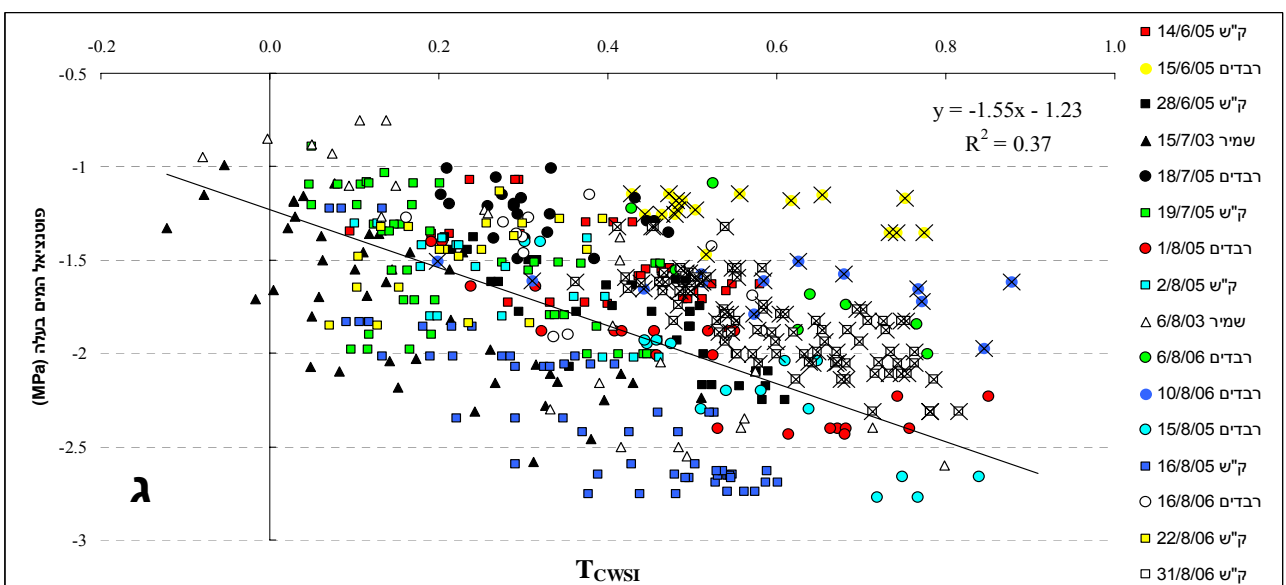
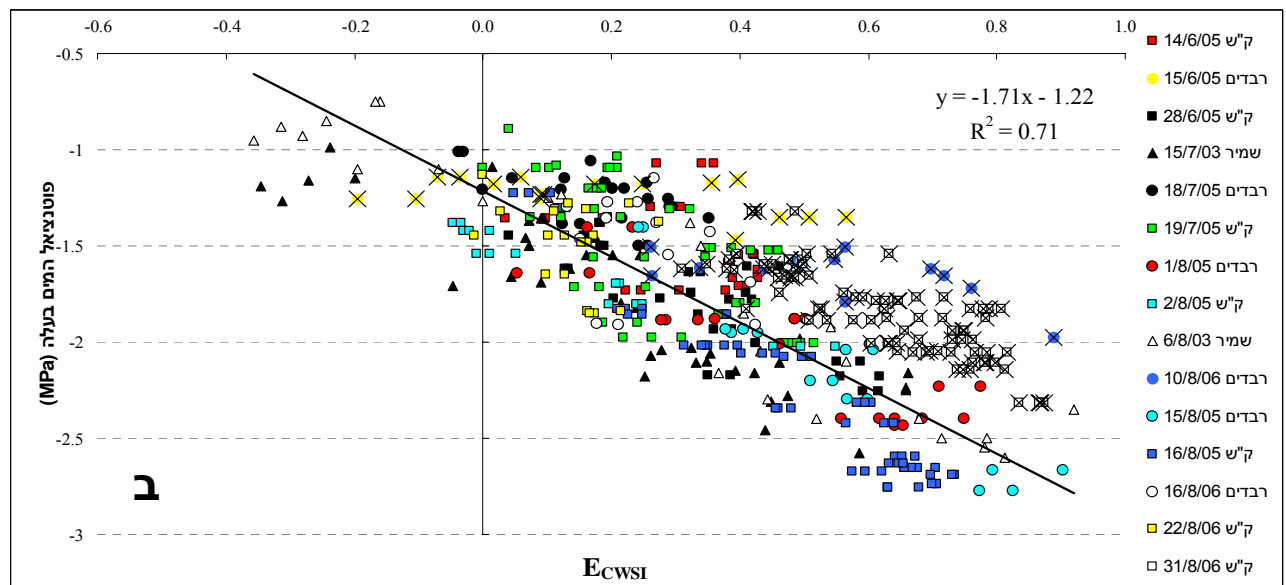
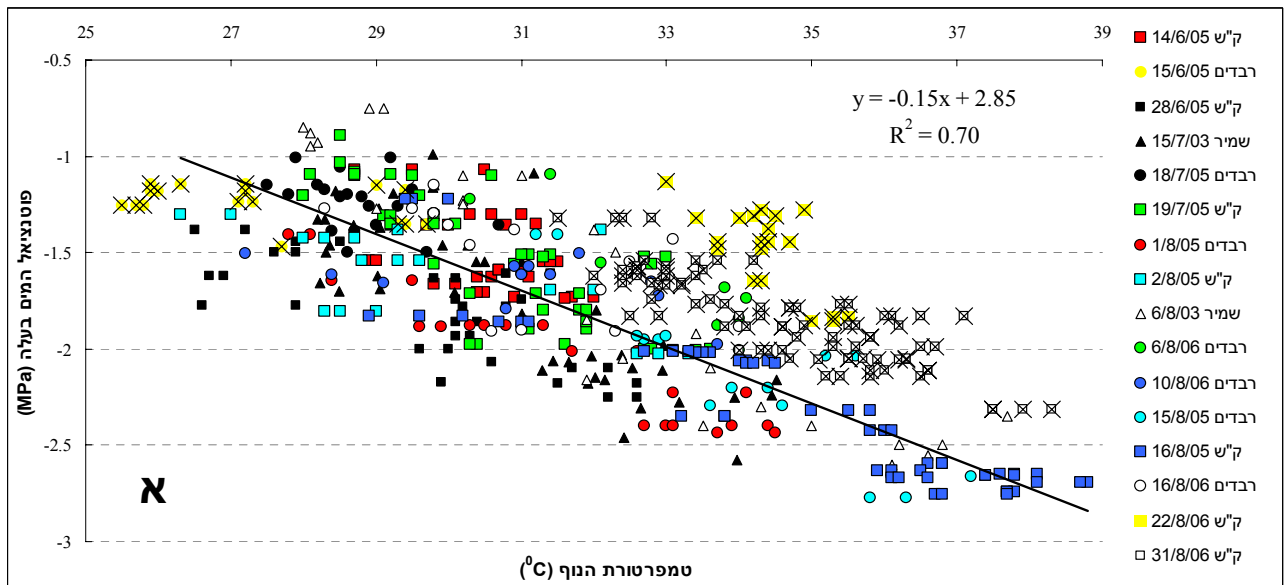
5.5 פוטנציאל המים בעלה מול מדדי העקה התרמיים

בדומה למוליכות הפיוניות, נתוני פוטנציאל המים בעלה הוצבו מול נתוני הטמפרטורה וערכי המדדים התרמיים בכל אחד ממועדי המדידה וכקבוצה אחת לצורך מציאת מתאמים כלליים. טבלה 12 וגרף 13 מציגים את המתאמים שהתקבלו ואופיים.

טבלה 12: מתאמים ליניאריים של פוטנציאל המים מול טמפרטורת העלווה, E_{CWSI} ו- T_{CWSI} , במועדי המדידה השונים ויחדיו.

מתאם בין פוטנציאל המים בעלה ל- T_{CWSI}						מתאם בין פוטנציאל המים בעלה ל- E_{CWSI}						מתאם בין פוטנציאל המים בעלה לטמפרטורת הנוף						תאריך	מיקום
<i>n</i>	<i>Slope</i>	<i>Intercept</i> ¹	<i>Std</i> ¹	<i>Adj. R</i> ²	<i>R</i>	<i>n</i>	<i>Slope</i>	<i>Intercept</i> ¹	<i>Std</i> ¹	<i>Adj. R</i> ²	<i>R</i>	<i>n</i>	<i>Slope</i>	<i>Intercept</i> ¹	<i>Std</i> ¹	<i>Adj. R</i> ²	<i>R</i>		
30	-1.01**	-1.10**	0.17	0.31	-0.58**	30	-0.78*	-1.25**	0.19	0.13	-0.40*	30	-0.10*	1.68	0.19	0.14	-0.42*	14/06/05	ק"ש
18	-0.13	-1.16**	0.09	0.02	-0.19	18	-0.16	-1.20**	0.09	0.12	-0.41	18	-0.02	-0.81*	0.09	0.01	-0.27	15/06/05	רבדים
33	-1.80**	-1.04**	0.15	0.68	-0.83**	32	-1.41**	-1.31**	0.16	0.66	-0.82**	34	-0.11**	1.40*	0.19	0.51	-0.72**	28/06/05	ק"ש
48	-2.07**	-1.42**	0.27	0.55	-0.75**	44	-1.24**	-1.54**	0.23	0.69	-0.83**	48	-0.18**	3.69**	0.24	0.63	-0.80**	15/07/03	שמיר
21	-0.63	-1.04**	0.13	0.09	-0.37	21	-0.74**	-1.11**	0.11	0.32	-0.59**	21	-0.07	0.82	0.13	0.12	-0.40	18/07/05	רבדים
47	-1.60**	-1.14**	0.3	0.3	-0.56**	47	-1.72**	-1.03**	0.28	0.39	-0.64**	47	-0.18**	3.87**	0.23	0.58	-0.77**	19/07/05	ק"ש
22	-1.56**	-1.22**	0.17	0.75	-0.87**	22	-1.38**	-1.38**	0.17	0.76	-0.87**	22	-0.15**	2.70**	0.11	0.89	-0.95**	01/08/05	רבדים
20	-1.53**	-1.20**	0.19	0.39	-0.65**	20	-0.96**	-1.49**	0.14	0.67	-0.83**	20	-0.08**	0.7	0.19	0.38	-0.64**	02/08/05	ק"ש
26	-2.52**	-0.83**	0.32	0.76	-0.88**	26	-1.56**	-1.25**	0.21	0.9	-0.95**	26	-0.20**	4.84**	0.25	0.86	-0.93**	06/08/03	שמיר
8	-2.07**	-0.35	0.19	0.63	-0.83**							8	-0.20**	4.87**	0.15	0.77	-0.90**	06/08/06	רבדים
17	-0.41*	-1.39**	0.14	0.22	-0.51*	17	-0.48**	-1.36**	0.13	0.35	-0.63**	17	-0.05*	-0.18	0.14	0.27	-0.56*	10/08/06	רבדים
16	-2.48**	-0.76**	0.17	0.84	-0.92**	16	-2.01**	-1.05**	0.14	0.9	-0.95**	16	-0.21**	5.01**	0.2	0.77	-0.89**	15/08/05	רבדים
54	-2.24**	-1.46**	0.21	0.73	-0.86**	54	-2.13**	-1.22**	0.12	0.91	-0.96**	54	-0.14**	2.58**	0.16	0.86	-0.93**	16/08/05	ק"ש
16	-0.47	-1.31**	0.27	0	-0.26	16	-0.44	-1.37**	0.27	0.02	-0.22	16	-0.04	-0.14	0.26	0.02	-0.30	16/08/06	רבדים
22	0.86	-1.74**	0.26	0.04	-0.29	22	-0.98	-1.41**	0.27	0.01	-0.25	20	-0.24**	6.92**	0.16	0.48	-0.71**	22/08/06	ק"ש
85	-1.66**	-0.84**	0.15	0.59	-0.77**	85	-1.34**	-1.01**	0.13	0.67	-0.82**	85	-0.12**	2.44**	0.13	0.7	-0.84**	31/08/06	ק"ש
465	-1.05	-1.33	0.38	0.24	-0.49**	478	-1.31**	-1.26**	0.29	0.57	-0.75**	478	-0.11	1.86**	0.29	0.56	-0.75**		מתאם כללי
363	-1.39**	-1.27**	0.38	0.33	-0.57**	376	-1.61**	-1.23**	0.27	0.66	-0.81**	376	-0.13**	2.43**	0.30	0.59	-0.77**		מתאם כללי ²
350	-1.55**	-1.23**	0.38	0.37	-0.61**	363	-1.71**	-1.22**	0.26	0.71	-0.84**	343	-0.15**	2.85**	0.26	0.70	-0.84**		מתאם כללי ³

¹ ביחידות של MPa, ² ללא מועדים החורגים משלושת המתאמים הכלליים (ה-15/6/05 וה-31/8/06), ³ ללא חריגים מקומיים. החריגים הכלליים מסומנים באפור כהה והחריגים המקומיים מסומנים באפור בהיר. $P < 0.05$, $P < 0.01$



גרף 13: מתאמים כלליים בין פוטנציאל המים בעלה לבין טמפרטורת הנוף (א), E_{CWSI} (ב) ו- T_{CWSI} (ג). נקודות הפיזור של מועדי המדידה שאינם משתתפים במתאם מסומנות ב-X.

הצבת ממוצעי טמפרטורת הנוף ומדדי העקה התרמיים מול פוטנציאל המים הממוצע של כל חלקה המופיעה בתצלום, הניבה ברוב מועדי המדידה, מתאמים גבוהים (טבלה 12). ניתן להבחין כי פוטנציאל המים בעלה מושפע ונעשה נמוך יותר (שלילי יותר) ככל שמדדו העקה או הטמפרטורה שמציג הנוף עולים.

בשלושת המתאמים הכלליים (גרף 13) נמצאו שני מועדים שהציגו נקודות פיזור עם מגמת פיזור חריגה. בדומה למוליכות הפיוניות, הנתונים מה-15/6/05 חרגו מעננות הפיזור הכללית, במיוחד בהצבה מול ה-CWSI התיאורטי (גרף 13ג').

נתוני ה-31/8/06 הציגו מתאם בעל מקדם גבוה אולם הנקודות השייכות לו נמצאו באופן עקבי מעל לקו המגמה הכללית. היסט עקבי זה ומספר התצפיות הרב של המועד ($n=85$, טבלה 12), גורם לשינוי משמעותי בקווי המתאם הכלליים ומפחית בכל המקרים ממובהקותם.

פוטנציאל המים בעלה וטמפרטורת העלווה

בטבלה 12 ניתן לראות כי פרט לשלושה מועדים בעלי מתאם לא מובהק, נמצאו שלושה מועדים בעלי מתאמים בינוניים (חלשים מ-0.70-) ועשרה מועדים עם מתאמים גבוהים.

בקרב המועדים בעלי המתאמים המובהקים, נמצאו מגוון שיפועים שנעים בתחום שבין 0.08- ל--0.24MPa (ירידה בפוטנציאל המים) לכל עליה במעלה.

במתאם הכללי (גרף 13א') ניתן לראות כי במקרה זה, נתוני ה-22/8/06 חורגים, ומסיבה כלשהי מקובצים באזור אחד ונמצאים מעל לקו הרגרסיה.

המתאם ללא נתוני שלושה מתוך שישה מועדים (ללא ה-22/8/06, ה-15/6/05 וה-31/8/06) משתפר ל-0.84- ומסביר 73% מן השונות עם שגיאת תקן של 0.26MPa (טבלה 12).

פוטנציאל המים בעלה ו- CWSI אמפירי

במרבית מועדי המדידות, בין פוטנציאל המים בעלה לבין CWSI האמפירי התקבלו מתאמים מקומיים חזקים (טבלה 12). חלקם היו המתאמים המקומיים החזקים ביותר בין שלוש מדדי העקה. פרט ל-19/7/05, ל-1/8/05 ול-22/8/06, ניתן לראות כי CWSI שיפר את המתאם בהשוואה למתאמים עם טמפרטורת הנוף. לעומת זאת, מסיבה שאינה ברורה ב-22/8/06 המתאם הפך לבלתי מובהק ולנמוך במיוחד.

מקרב המועדים בעלי המתאם המובהק, ל-10/8/06 היה השיפוע הנמוך ביותר וניתן להבחין כי הוא חרג מן המתאם הכללי בתחום של נתוני ה- CWSI הגבוהים (גרף 13ב').

המתאם ללא ה-10/8/06 וללא שני המועדים החורגים בכל המקרים (ה-15/6/05 וה-31/8/06) משתנה ל-0.84-, ותורם לעלייה של 14% בשונות המוסברת על ידי המודל לעומת מודל ללא הוצאת החריגים (טבלה 12).

פוטנציאל המים בעלה ו- CWSI תיאורטי

מהצבת ערכי פוטנציאל המים בעלה מול ערכי T_{CWSI} (טבלה 12) התקבלו שמונה מועדי מדידה עם מתאם גבוה, שלושה מועדים עם מתאם בינוני, שלושה נמוכים חסרי מובהקות ומועד אחד (ה-15/6/05) עם מתאם נמוך מאוד. באופן כללי T_{CWSI} מציג תוצאות פחות טובות ממקבילו האמפירי, ברמת המתאמים המקומיים של המועדים. המתאם הכללי שהתקבל, היה נמוך אף הוא (גרף 13ג') ופיזור הנקודות הגבוה מעיד על שונות רבה שאינה מוסברת על ידי המודל ($R^2=0.24$). גרף 13ג' בולטת חריגת נקודות הפיזור של ה-15/6/05 בדומה למקרים הקודמים. כמוכן, ניתן להבחין בחריגת נקודות הפיזור של ה-10/8/06 בתחום ערכי ה-CWSI הגבוהים, בדומה לממצאים במתאם של פוטנציאל המים עם E_{CWSI} . גם ללא ה-10/8/06 ושני המועדים החריגים הכלליים המתאם הכללי נשאר בינוני ($r=0.61$) ומסביר רק 37% מן השונות.

5.6 שלבי הגידול הפנולוגיים ומדדי העקה

בניתוח איכותי של פיזור הנקודות במתאמים הכלליים בהתבסס על נתונים מ-2003 ו-2005, נמצא כי קיים הבדל בין פיזור הנקודות במועדים המוקדמים למאוחרים יותר (Sela et al., 2007). בעקבות זאת, חולקו סדרות הנתונים (כולל 2006) לשתי תקופות פנולוגיות ולכל קבוצה הוצבו ערכי מדדי העקה מול שני המדדים הפיזיולוגיים. קבוצה אחת כללה את המועדים השייכים לתקופת הגידול הוגטטיבית ותקופת הפריחה (עד ה-20 ביולי) וקבוצה שנייה כללה את תקופת מילוי ההלקטים וחלק מתקופת השילוך (מ-ה-20 ביולי ואילך). התקופה הראשונה מכונה להלן 'תקופת הפריחה' (מאחר והיא כוללת רק שני מועדים מן התקופה הוגטטיבית). התקופה השנייה מכונה להלן 'תקופת מילוי ההלקטים' (מאחר והיא מכילה רק שני מועדים מן התקופה השייכת להבשלה).

טבלה 14: חלוקת המתאמים הכלליים³ לשתי קבוצות בהתאם לתקופות הפנולוגיות

תקופת מילוי ההלקטים						תקופת הפריחה						מתאם כללי ³						מדד פיסיוולוגי	מדד תרמי
n	Slope	Intercept ¹	Std Err ¹	R ²	R	n	Slope	Intercept ¹	Std Err ¹	R ²	R	n	Slope	Intercept ¹	Std Err ¹	R ²	R		
290	-44.1	1815.0	105.5	0.55	-0.74**	136	-56.0	2224.3	205.20	0.13	-0.36**	426	-50.1	2023.7	146.4	0.46	-0.68**	טמ'פ נוף	מוליכות פיוניות
283	-501.0	604.3	106.6	0.57	-0.76**	131	-947.4	830.3	162.49	0.46	-0.68**	414	-635.4	691.1	137.4	0.54	-0.74**	E_{CWSI}	
237	-603.9	696.7	99.2	0.57	-0.75**	183	-1679.7	1205.2	167.48	0.68	-0.83**	420	-1060.7	961.3	163.3	0.61	-0.78**	T_{CWSI}	
193	-0.15	2.93	0.25	0.75	-0.87**	183	-0.15	2.80	0.27	0.45	-0.67**	376	-0.1	2.8	0.3	0.70	-0.84**	טמ'פ נוף	פוטנציאל מים בעלה ²
203	-1.76	-1.27	0.21	0.84	-0.91**	178	-1.33	-1.24	0.27	0.45	-0.67**	381	-1.7	-1.2	0.3	0.71	-0.84**	E_{CWSI}	
211	-1.78	-1.22	0.39	0.44	-0.66**	183	-0.94	-1.33	0.33	0.19	-0.43**	394	-1.6	-1.2	0.4	0.37	-0.61**	T_{CWSI}	

¹ מוליכות הפיוניות ביחידות של $\text{mmol sec}^{-1} \text{m}^{-2}$, ² פוטנציאל המים ביחידות של MPa, ³ ללא חריגים מקומיים. $P < 0.05$, $P < 0.01$

מוליכות הפיוניות, טמפרטורת הנוף ו- CWSI

מפיצול נתוני המתאמים הכלליים, עבור תקופת הפריחה התקבלו מתאמים נמוכים יותר במקרה של E_{CWSI} ובמיוחד במקרה של המתאם עם הטמפרטורה (השתנה מ-0.68 ל-0.36). במקרה של

T_{CWSI} עבור תקופת הפריחה, התקבל מתאם טוב יותר מן המתאם הכללי והשוונות המוסברת השתפרה מ-0.61 ל- $R^2=0.69$. תקופת מילוי ההלקטים השתפרה במעט לגבי המתאם עם E_{CWSI} ויותר במתאם עם טמפרטורת הנוף (מ-0.68 ל- $R=-0.74$), אולם במקרה של T_{CWSI} התקבל מתאם מעט יותר נמוך.

פוטנציאל המים בעלה, טמפרטורת הנוף ו- $CWSI$

עבור פוטנציאל המים בעלה, פיצול המתאמים הכלליים, הניב בתקופת הפריחה בשלושת המקרים, מתאמים נמוכים יותר בהשוואה למתאם הכללי ומתאמים גבוהים יותר בתקופת מילוי ההלקטים. בולט במיוחד המתאם עם E_{CWSI} שהשתפר מ-0.84 ל-0.91 עם מקדם הדטרמינציה של $R^2=0.84$ ושגיאת תקן של 0.21MPa בלבד. **במבט כולל**, ניתן להבחין כי בתקופת הפריחה מוליכות הפיוניות נמצאת בקשר חזק יותר עם המדדים התרמיים, שם דווקא T_{CWSI} מתפקד טוב יותר וכי בתקופת מילוי ההלקטים, פוטנציאל המים נמצא בקשר החזק ביותר עם המדדים התרמיים ובמיוחד עם E_{CWSI} .

5.6.1 השוואה בין זנים

הניסוי שנערך ברבדים ב-2005 כלל שני זני כותנה ('פימה' וזן המכלוא 'אקלפי'). אחת ממטרות הניסוי הראשוניות הייתה השוואת אבחון מצבי המים בין זני כותנה שונים. הנתונים שנאספו מניסוי זה שימשו להשוואה בין הזנים. ניתוח הנתונים (הנתונים לא מופיעים), שנערך בנפרד עבור כל זן, הראה כי אין הבדלים משמעותיים בין הזנים מבחינת הקשר בין המדדים הפיזיולוגיים לבין הטמפרטורה, E_{CWSI} ו- T_{CWSI} .

5.7 מיפוי – יישום המודלים

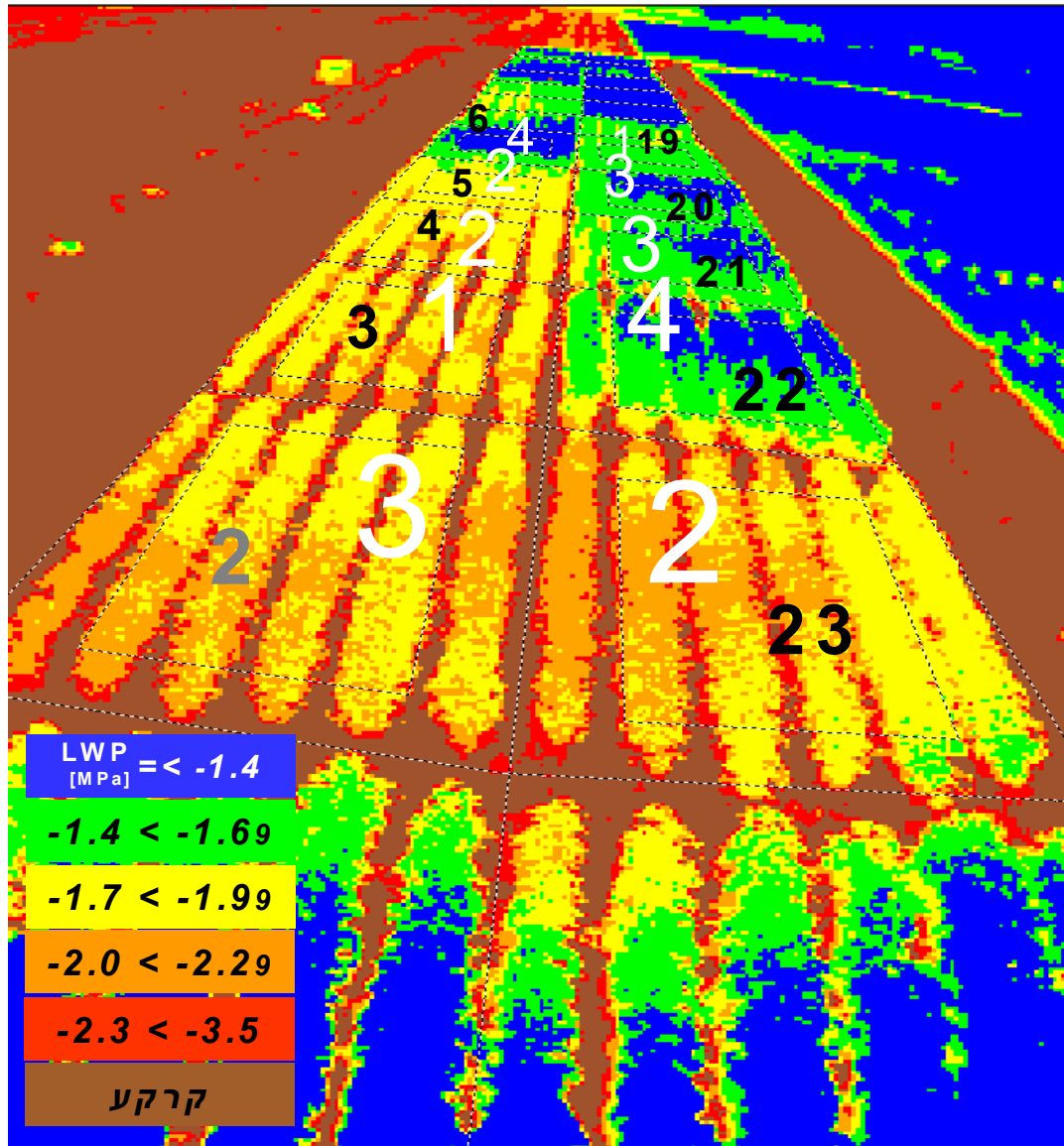
5.7.1 מיפוי LWP לפי מודל $CWSI$ אמפירי של תקופת הפריחה

בתמונה 15 מוצגת מפת פוטנציאל מים שנוצרה על בסיס של תמונה תרמית זוויתית של שדה הניסוי ליד קריית שמונה בתאריך 4/7/2006, לפי מודל המתאם שהתקבל בין E_{CWSI} לפוטנציאל המים בעלה בתקופת הפריחה:

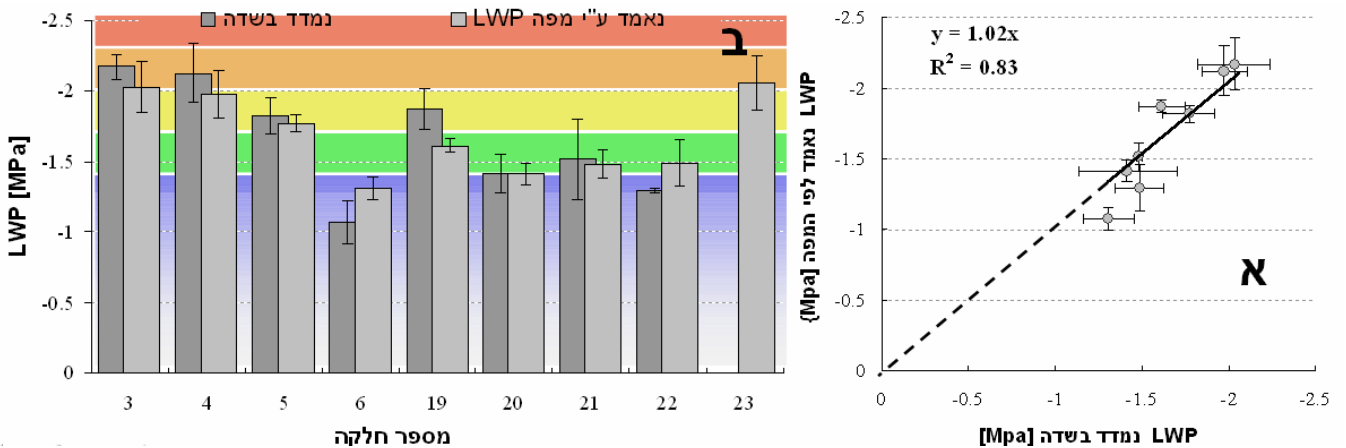
$$LWP = -1.33CWSI - 1.24 \text{ (Std=0.27MPa)}$$

לצורך חישוב ערכי ה- $CWSI$ (עבור כל פיקסל) במקרה זה, טמפרטורת המינימום נקבעה לפי חישוב תיאורטי תוך שקלול הנתונים המטאורולוגיים (משוואה 3).

גרפים 16א' ו-ב' מתארים את הקשר בין ערכי פוטנציאל המים בעלה הממוצעים שנמדדו בכל חלקה, לבין ערכי פוטנציאל המים שנאמדו מן המפה, משטחי החלקות המסומנים. שגיאת התקן של מדידות השדה נובעת מן השונות בין ארבע העלים המייצגים חלקה. שגיאת התקן של אומדן המפה נובעת משונות הפיקסלים המרכיבים את שטח החלקה.



תמונה 15: מפת LWP שהופקה מתמונה תרמית זוויתית של שדה הניסוי בחוות גד"ש שליד קריית שמונה. בתאריך ה-4/7/2005. המספרים בשחור מציינים את מספרי החלקות שבהן נמדד LWP בשדה. רשת הקווים מציינים את גבולות החלקות, הריבועים הפנימיים מציינים את שטח החלקה שנדגם מן המפה לצורך השוואה עם ערכי מדידות השדה. המספרים בלבן מציינים את טיפולי ההשקיה, שנקראו 1, 2, 3, 4 ו-1 וכללו השקיה יזמית כטיפול משקי וכן טיפולים של 2, 4, ו-6 ימים ללא השקיה עד לזמן הצילום, בהתאמה.



גרף 16 א', ב': השוואה בין ממוצע ערכי LWP שהוערכו על ידי המפה מול ממוצע ערכי LWP שנמדדו בחלקות (הצבעים מציינים את טווחי פוטנציאל המים המופיעים במפה).

במבט כללי בתמונה 15, ניתן להבחין כי דפוס הפיזור של רמות פוטנציאל המים דומה במבנהו לדפוס פיזור החלקות עם טיפולי ההשקיה. בגרף 16 ב' ניתן להבחין בקבוצות של חלקות כגון 3, 4 ו-5 וחלקות 6, 20 ו-22, הנבדלות זו מזו בממוצע פוטנציאל המים שנמדד בהן. האומדן שנעשה על ידי המיפוי הצליח לבצע הפרדה דומה עבור אותן החלקות.

תחומי פוטנציאל המים המוצגים במפה ובגרף 16 ב' מייצגים תחומים המשמשים בהליך קבלת החלטות השקייה. במידה והמפה שהופקה הייתה משמשת לקבלת החלטות השקייה, המידע שהתקבל לגבי תחום פוטנציאל המים היה נכון עבור חלקות 5, 6, 20, ו-21, ואילו עבור חלקות 4, 19 ו-22 המידע היה שגוי.

גרף 16 א' מראה כי נמצא קשר מובהק בין הערכים המדודים לערכים שנאמדו באמצעות המיפוי, גם כאשר אולצה נקודת החיתוך לעבור בראשית הצירים. ללא נקודת אילוץ זה, התקבל קשר מובהק עם מקדם דטרמינציה (R^2) של 0.95, שגיאת תקן של 0.09MPa ועם הערכת יתר כללית של +0.06MPa (ממוצע ההפרשים בין הערכים המדודים לערכים המוערכים).

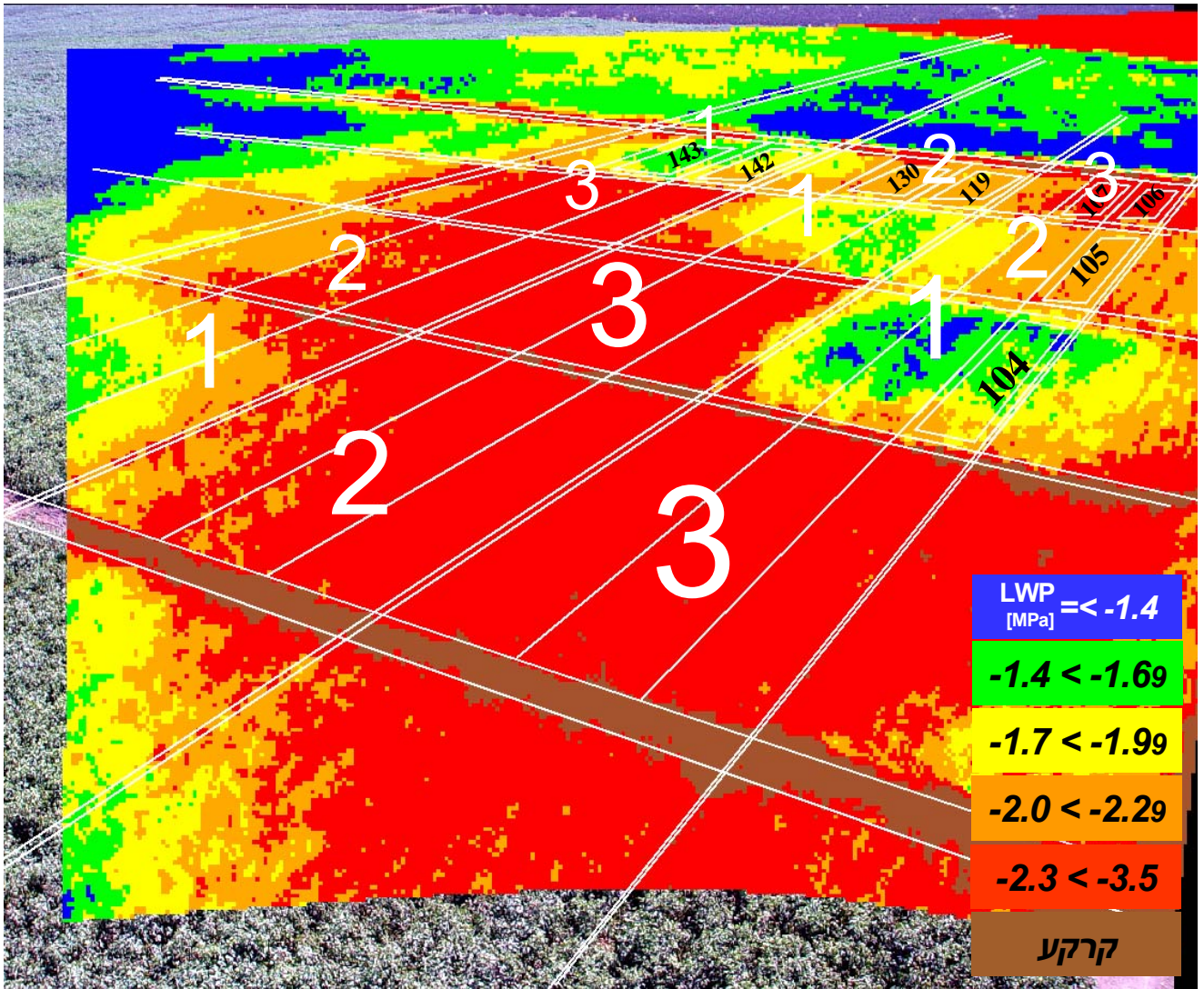
באופן איכותי, המפה המופיעה בתמונה 15 מציגה שתי קבוצות כלליות של תחומי פוטנציאל מים המאפיינות את טיפולי ההשקיה. טיפולים 4 ו-3 נכללו בטווח של -1.4 עד -1.7MPa (פרט לחלקה 2) וטיפולים 1 ו-2 נכללו בטווח נמוך יותר של -1.7 עד -2.3MPa. חלוקה מובהקת, לשני רמות אלו, נמצאה בפועל, גם בנתוני פוטנציאל המים שנמדדו בתאריך זה (נתונים לגבי ביצועי טיפולי ההשקיה, לא מוצגים).

5.7.2 מיפוי LWP לפי מודל CWSI אמפירי של תקופת מילוי ההלקטים

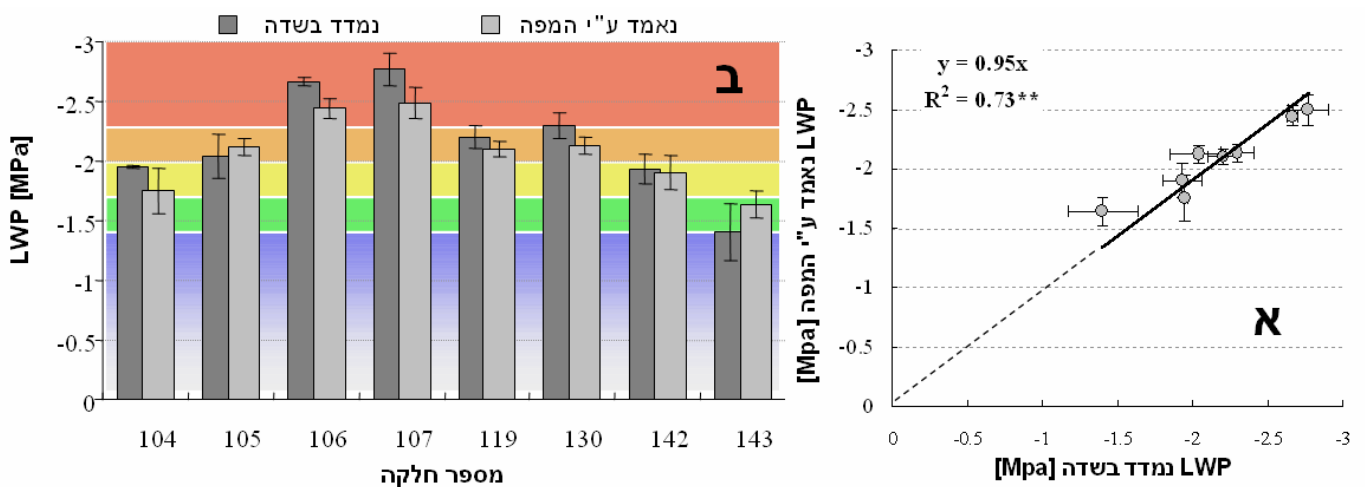
בתמונה 17 מוצגת מפת פוטנציאל מים שנוצרה על בסיס של תמונה תרמית זוויתית של שדה הניסוי בקיבוץ רבדים בתאריך 15/8/2005, לפי מודל המתאם שהתקבל בין E_{CWSI} לפוטנציאל המים בעלה בתקופת מילוי ההלקטים:

$$LWP = -1.76CWSI - 1.27 \quad (Std=0.21MPa)$$

בעת התצלום לא הוצב WARS ברקע התמונה. לצורך חישוב ערכי ה-CWSI (עבור כל פיקסל) במקרה זה, טמפרטורת המינימום נקבעה לפי חישוב תיאורטי תוך שקלול הנתונים המטאורולוגיים (משוואה 3).



תמונה 17: מפת LWP של חלק משדה הניסוי בקיבוץ רבדים בתאריך ה-15/8/2005 (על גבי תמונת צבע). המספרים בשחור מציינים את מספרי החלקות שנמדד בהן LWP בשדה. רשת הקווים הלבנים מציינים את גבולות החלקות. הריבועים הפנימיים מציינים את שטח החלקה שנדגם במפה לצורך השוואה עם ערכי מדידות השדה. המספרים בלבן מציינים את טיפולי ההשקיה הקווים הלבנים הכפולים מציינים את גבולות טיפולי ההשקיה. (טיפול כלל 3 חלקות) כאשר: 1- טיפול מושקה היטב (100% מהטיפול המשקי), 2- טיפול עקה בינונית (80%), 3- טיפול עקה גבוהה (60%).

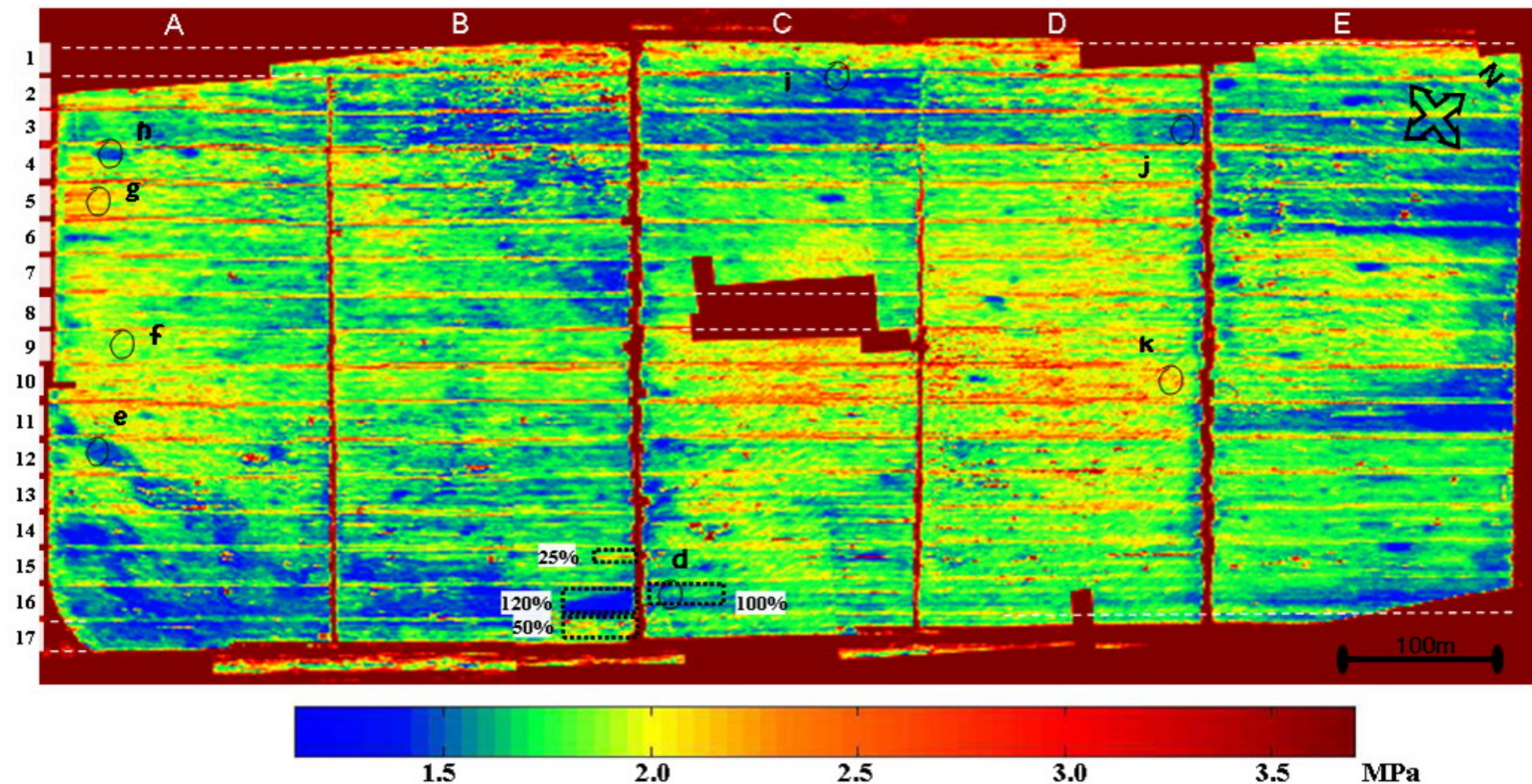


גרף 18א', ב': השוואה בין ממוצע ערכי LWP שהוערכו על ידי המפה מול ממוצע ערכי LWP שנמדדו בחלקות שונות בשדה בקיבוץ רבדים, ב-15/8/2005 (הצבעים מציינים את טווחי ה-LWP המופיעים במפה).

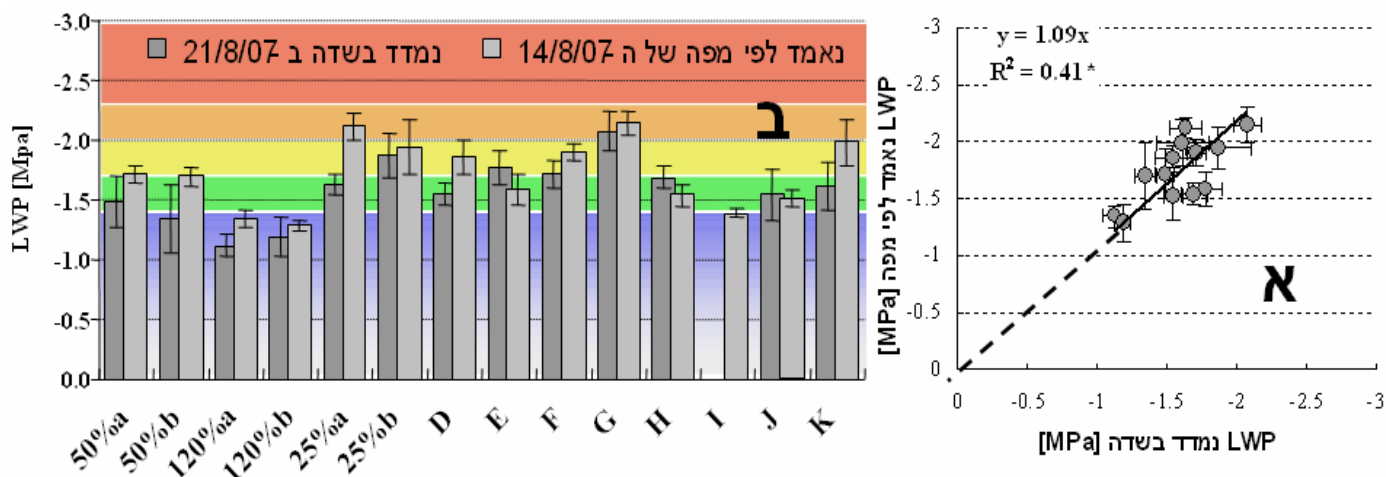
מסקירה איכותית של תמונה 17, ניתן להבחין כי המפה הבדילה בין שלושת טיפולי ההשקיה השונים וכי המרובעים הכוללים את טיפולי ההשקיה (שהורכבו כל אחד משלוש חלקות עם שני זנים שונים), תואמים ברוב שטחם לתחומי פוטנציאל מים נפרדים, כפי שמצוין בסרגל תחומי פוטנציאל המים. הטיפול המושקה היטב התאים לתחום ה-LWP של הצימוח המרוסן (1.7- עד 1.9MPa-) וכך גם טיפול העקה הבינונית ואילו טיפולי העקה הגבוהה, תאמו לטווח עקת המים הידועה כפוגעת בהטמעה (2.0- עד 2.29MPa-) וכן לטווח עקת המים המתאימה לתקופת השילוך (2.3MPa-) ומעלה), בהתאמה.

בגרף 18א' ו-ב' מוצגים ממוצעי פוטנציאל המים שנמדדו בשדה בשמונה חלקות (תמונה 17; חמשת החלקות בקצה האחורי ושלושת החלקות בקצה הימני) בהשוואה לממוצעי ערכי פוטנציאל המים שנמדדו על ידי המפה באותן החלקות. בגרף 18ב' ניתן להבחין כי פרט לחלקה 143 הנמצאת בגבול תחתון של תחום, כל החלקות נמצאות באותם תחומי פוטנציאל המים המשמשים להכוונת השקיה. הצבת הנתונים המוערכים מול הנתונים שנמדדו בשדה הניבה מתאם מובהק עם מקדם דטרמינציה של 0.91 ושגיאת תקן של 0.097MPa. כאשר נכפתה ראשית הצירים כנקודת החיתוך (גרף 18א') התקבל מקדם דטרמינציה של 0.73. באופן כללי, המודל הינו בעל הערכת-יתר של 0.09MPa+ מן הערכים המדודים (כלומר במקרה זה, המפה העריכה שמצב המים הינו חמור פחות מן המצב המשתקף ממדידות פוטנציאל המים שנעשו בשדה).

מודל המתאם שהתקבל בין E_{CWSI} לפוטנציאל המים בעלה בתקופת מילוי ההלקטים שימש גם למיפוי השדה במגידו שצולם מן האוויר. בתמונה 19 מוצגת מפת LWP של השדה במגידו בתאריך ה- 14/8/2007 שנבנתה על בסיס צירוף של מספר תצלומי אוויר תרמיים מגובה 500 מטר. עקב הרזולוציה המרחבית הנמוכה לא ניתן היה להציב משטח ייחוס מלאכותי ממנו ניתן יהיה למדוד את טמפרטורת המינימום. בנוסף, לא הועמדה תחנה מטאורולוגית בתוך השדה בזמן הצילום למדידת טמפרטורת האוויר לחישוב טמפרטורת המקסימום. חלופה למשטח הייחוס המלאכותי שימש האזור שהושקה ב-120% מכמות הטיפול המשקי. חלופה למדידת טמפרטורת האוויר בשדה בזמן הצילום היוותה טמפרטורת המקסימום שנמדדה באותו יום בתחנה מטאורולוגית המוצבת בניר העמק. עקב מגבלות טכניות, מדידות ישירות של LWP נאספו שבוע לאחר הצילום. עם זאת, הן נאספו כמה שעות לפני השקיה, במצב מים דומה לזה שצולם.



תמונה 19: מפת LWP שנבנתה מסדרת תצלומי אוויר תרמיים של שדה הניסוי במגידו מתאריך ה- 14/8/07 שכלל שלושה טיפולי השקייה (מסומנים במלבן שחור מקווקו ובאחוזים בהשוואה לטיפול המשקי). הפסים המופיעים לאורך השורות נגרמו כתוצאה מרמיסה שגרם רכב הריסוס (רוחב הפסים הוא 2 שורות, גודל המלבנים שנוצרו הוא כ-23x180מטר). הדפוסים המלבניים במרכז ובשוליים הינם מקטעים שלא כוסו על ידי התצלומים האוויריים. האותיות והסימונים העגולים מציינים את נקודות הדיגום.



גרף 20' ו-ב': השוואה בין ממוצע ערכי LWP שהוערכו על ידי המפה של הטיסה ב-14/8/07 מול ממוצע ערכי LWP שנמדדו בשדה שבוע לאחר מכן, ב-21/8/2007 (הצבעים מציינים את טווחי ה-LWP המופיעים במפה).

המפה שהתקבלה מדגישה את השונות הרבה האופיינית לשדה. על פי ערכי פוטנציאל המים שנאמדו, ניתן לראות כי השונות בשדה אינה מורכבת מפיזור אקראי של ערכים, אלא בעיקר מכתמים הניתנים לתיחום. לפי המפה ניתן להבחין באזורים (אזורים E11, A15-17, C2-3, אזור E3-6 בקצה הצפון-מזרחי ונקודות h,e,i,j) שערכי פוטנציאל המים שלהם גבוהים (פחות שליליים), לפחות כמו בטיפול ה-120% המושקה בעודף, ואזורים אחרים שפוטנציאל המים בהם נמוך באופן משמעותי (אזור D9-10, C9-10, הסביבה בה נמצאת נקודה g לדוגמא). הדפוסים השונים של הפיזור, רומזים כי קיימת שונות טבעית רבה, אך רומזים גם על שונות שנגרמת כנראה משיטת ההשקיה; בפניה הדרומית של השדה, ניתן להבחין בדפוס אלכסוני, שיתכן כי נגרם בהשפעת נחל קדום שעבר במקום וכעת מוסט ועובר סמוך לצומת השבילים בפניה זו (המהווה את הנקודה הנמוכה ביותר בשדה). אולם, ניתן גם להבחין בכתמים שנוטים לקבל את תבניות המלבנים שנוצרו בגבולות השבילים ופסי הריסוס (אזור E-11 לדוגמא). דפוס זה עשוי להיגרם בהשפעת מערכת הטיפול, שכן כל מלבן נשלט על ידי ברז השקיה נפרד (המגרעות בתוך השבילים האנכיים מכילות את ראשי ההשקיה).

גרף 20' ו-ב' מציגים את ההשוואה בין ממוצעי נתוני פוטנציאל המים שנאמדו על ידי המפה מול ממוצעי הנתונים שנמדדו שבוע לאחר מכן בשדה. הגרפים מורכבים מממוצעים של שתי נקודות דיגום בחלקות טיפולי ההשקיה וממוצעי (4 עלים) נקודות שנבחרו במרחב השדה. מקדם הדטרמינציה שהתקבל מהצבת הערכים שנאמדו מול ערכי LWP המדודים הוא 0.41 עם אילוץ החיתוך בראשית הצירים ו-0.52 ללא אילוץ. שגיאת התקן של האומדן היא 0.2MPa ובאופן כללי, לאומדן המפה יש הערכת-חסר של -0.15MPa.

6.1 אומדן ברמת העלה הבודד לעומת רמת החלקה

הקשרים בין מוליכות הפיוניות ופוטנציאל המים לבין הנתונים התרמיים, נמצאו מובהקים יותר כאשר ניתוח הנתונים התרמיים נעשה ברמת החלקה ופחות, כאשר הניתוח נעשה לפי נתוני העלים הבודדים. זאת למרות כי מדובר באותם העלים מהם נלקחו המדידות הפיזיולוגיות. במקרה הראשון, נתוני LWP או מוליכות הפיוניות של העלה הבודד, הוצבו מול נתוני הטמפרטורה שאותו עלה הציג ובמקרה השני, ממוצע ערכי LWP או מוליכות הפיוניות של 4-6 עלים בחלקה הוצבו מול ממוצעי טמפרטורת הנוף. שונות גבוהה בטמפרטורת שטח העלה הבודד, עשויה להיות הגורם לנחיתות המתאמים של המקרה הראשון. Hashimoto et al. (1984) ביצעו תרמוגרפיה באמצעות חיישן סורק, לעלי חמניות לא מנותקים במהלך התפתחות של עקת מים, שהושרתה באמצעות קיטום שורשים. ממצאיהם עולה, כי שטח העלה מראה שונות גבוהה בטמפרטורה, שמשתנה בכתמים המופיעים באזורים שונים ובאופן לא עקבי.

גורם אחר לתופעה עשוי להיות השונות בזוויות העלים (כלפי השמש) ובגלגול עלים, במיוחד בצמחים הנמצאים בעקה. אופן הדיגום של חלקי העלה בעבודה הנוכחית (העלים נדגמו באמצעות פוליוגן שכלל חלק משטח העלה), לא אפשר מדידה זהה של כל העלים שנדגמו. בחלק מן המקרים, העלה לא ניצב בצורה אופקית מול המצלמה ולעיתים חלקו הוסתר מאחורי עלים אחרים. Grant et al. (2006) ניסו לכמת את מידת סגירת הפיוניות באמצעות צילומים תרמיים, הגיעו בעבודתם למסקנה דומה וקבעו כי "מיצוע ערכים של אוכלוסיות עלים עשוי לעזור בהפחתת טעויות המתקבלות מן השונות בזוויות העלים".

בעבודה הנוכחית, שיטת המדידה ברמת העלה הבודד מקבילה במידה מסויימת לשיטת הצבת ה-IRT's מול עלים בודדים כפי שננקטה במקרים שונים בעבר (Jones, 1999). התוצאות שהתקבלו מדגימות את היתרון שבשימוש בצילומים תרמיים של אזור נרחב יחסית לעומת החיישנים הבודדים ומדגימות כי למבט הכולל, כפי שנעשה בחישה מרחוק, יש יתרון באבחון עקת מים. ממצא מעודד זה, שהתגלה בשלבי העבודה הראשונים, אפשר את הקטנת הרזולוציה, לצורך הכללת שטחים נרחבים יותר.

6.2 מדידות פיזיולוגיות, ומדדי העקה התרמיים

6.2.1 מוליכות פיוניות מול מדדי העקה התרמיים

הקשר השלילי המופיע בכל המתאמים המקומיים והכלליים, (גרף 11 א', ב' ו-ג', טבלה 10), מעיד כי העלייה בטמפרטורת הנוף (או בערכי האינדקסים), היא אחד הגורמים המשפיעים (או מושפעים) באופן ישיר או עקיף, על הירידה במוליכות הפיוניות.

במועד ה- 15/6/05 לא נמצאו מתאמים בין מוליכות הפיוניות לטמפרטורת הנוף כפי שהיא או למדדי העקה התרמיים והוא הוגדר כחריג. מועד זה בלט גם בממוצע של מוליכות פיוניות גבוהה וקבועה וכך גם בערכי פוטנציאל המים. ממצאים אלה מראים כי במועד זה לא שררה עקת מים משמעותית. כאשר בוחנים את התנאים המטאורולוגיים במועד זה (גרף 7), ניתן לראות כי שררה עננות בינונית לאורך היום וכי טמפרטורת האוויר וה-VPD היו הנמוכים ביותר שנמדדו. למרות זאת, קיים טווח לא מבוטל של נתוני טמפרטורת עלווה, עם ממוצע נמוך של 27.5°C וטווח בינוני של המדדים התרמיים (הנגזרים ממנה בין היתר). נראה כי שונות זו בטמפרטורת הנוף והמדדים, נובעת משילוב בין התנאים המטאורולוגיים הנוחים ואופן צילום התמונות. חלק מן התמונות צולמו בתנאי קרינה דיפוזית, תחת העננים (נספח 1) ובמקרה זה התקבלו טמפרטורות עלווה נמוכות מן הרגיל (גרף 7א') שאר התמונות צולמו תחת קרינה ישירה כפי שצולמו רוב התמונות בניסוי, כך שטמפרטורות העלווה הללו אינן חריגות ונמצאות בתחום של שאר המועדים.

מועד זה חושף את אחד החסרונות הבולטים בשיטה ומציג את מידת ההשפעה הרבה של מקרי עננות בזמן רכישת תצלומים תרמיים. מדידות הטמפרטורה הן רגעיות ואילו מדידות מוליכות הפיוניות ובמיוחד מדידות פוטנציאל המים, מייצגות טוב יותר את המצב הכללי של העקה, שכן הם מושפעים פחות משינויים מהירים כמו מיסוך רגעי של עננים (Morgan, 1984).

ניתן להסיק מממצא זה, כי רצוי להימנע מעיבוד צילומים תרמיים בתנאי עננות או שיש לנתחם באופן נפרד תוך התחשבות במצב בו הם נרכשו. מדידה שתירכש במצב כזה עשויה לפגוע בקבלת החלטות ההשקיה ולהתבטא בהערכת חסר של מידת העקה. יתכן ויש לקבוע ערכי סף של קרינה הנדרשים לקבלת תצלומים שישקפו נאמנה את מצב המים.

תאריך ה-19/7/05 הוגדר גם הוא כמועד חריג, עקב המבנה השונה של חלק מנקודות הפיזור שלו, המרוכזות באזור המוליכות הגבוהה מול הנתונים התרמיים הנמוכים (גרף 11). תכונה זו רומזת על האפשרות כי יחס מערכי מתאים יותר לקשר, או לחילופין, יתכן כי הקשר עם מוליכות הפיוניות שונה או פחות מובהק בתחומי המוליכות הגבוהה ומתקיים החל מטמפרטורות העולות על 32°C . מאחר והצבר השני של נתוני ה-19/7/05 השייכים למוליכות הנמוכה, נמצאים מקובצים מנגד, סביב הערכים הבינוניים של הטמפרטורה והאינדקסים, יתכן כי הסיבה לחריגה היא ליקוי במכשיר הפורומטר. שכן אין לתופעה זו סימוכין במדידות פוטנציאל המים או בנתונים המטאורולוגיים (מאוחר יותר נתגלתה תקלה במכשיר והוא נשלח לתיקון). מקרה של תקלה מסוג זה עשוי להסביר גם את החריגה שחלה בנתוני ה-15/8/05 שהוגדר גם הוא כמועד חריג.

באופן כללי, ניתן להסיק כי המתאמים בין המדדים התרמיים למוליכות הפיוניות מציגים קשרים בינוניים עד טובים, שנחלשים מעט בערכי המוליכות הגבוהה. לחילופין, ניתן להסיק כי טמפרטורת הנוף בכנתנה נגזרת בין היתר ממוליכות הפיוניות, אולם קיימים גורמים נוספים המשפיעים על הטמפרטורה, שאינם מוסברים על ידי המודל. שונות זו, שלא הוסברה על ידי המודלים, עשויה להיגרם עקב:

- א. פערים בין זמן המדידה התרמית לזמן מדידת הפורומטר (10-1 דקות בתוספת זמן מדידת העלים- כדקה לעלה x6 עלים).
- ב. שגיאות מדידה הנובעות מן הכלים (לדוגמא, תקלה בפורומטר או שגיאה במדידות התרמיות כתוצאה מפיקסלים מעורבים).
- ג. השונות המובנית במדידות עצמן (שגיאת תקן נפוצה של מוליכות פיוניות בכותנה מוערכת בכ- 20% מן הממוצע).
- בכל אחד מן המתאמים בנפרד, השונות הבלתי מוסברת עשויה להיות תוצאה של השפעת גורמים מטאורולוגיים במתאם עם הטמפרטורה ויכולת מוגבלת בשקלול השפעות אלו באמצעות WARS (במקרה של E_{CWSI}) ובאמצעות החישובים התיאורטיים (במקרה של T_{CWSI}).

6.2.2 פוטנציאל המים בעלה מול מדדי העקה התרמיים

מן המודלים המקומיים והכלליים ניתן להסיק באופן כללי, כי קיים קשר לינארי יציב בין פוטנציאל המים בעלה לבין טמפרטורת הנוף והמדדים התרמיים האמפיריים והתיאורטיים. מתוך שישה עשר מועדים אשר שימשו לבניית מודלי הרגרסיה הכלליים נמצאו שני מועדים שהוגדרו כחריגים. ביניהם ה-15/6/05 שנמצא חריג גם ביחס עם מוליכות הפיוניות, מאותה הסיבה כפי שתוארה בפרק 6.2.1. המועד השני שהוגדר כחריג, ה-31/8/05, הורכב מתצפיות רבות שהניבו מתאמים חזקים בעלי שיפוע דומה, אך עם היסט אחיד של נקודות הפיזור אל מעבר לקו המגמה הכללית (גרף 13). היסט זה עשוי לנבוע משתי סיבות: נתוני פוטנציאל מים גבוהים מן המצופה (פחות שליליים), או כתוצאה מטמפרטורות נוף גבוהות מהרגיל.

העלים אשר שימשו למדידות היו מבוגרים ב-31/8/06, מאחר ומועד זה מאוחר והגידול נמצא בו קרוב לשילוך וכמעט ללא השקיה. בהתאם לאפשרות הראשונה, ייתכן כי פוטנציאל מים גבוה, התקבל הודות לטיב העלים ששימשו למדידה. בעת בחירת העלים נעשתה סלקציה מכוונת לעלים בריאים וצעירים וללא פגעים (בהתאם למתואר בפרק 4.3), בעוד שרוב העלים במועד מאוחר זה, בוגרים למדי, עם פגעים רבים (נספח 2). Möller et al. (2007) הגיעו למסקנה דומה, בעת הערכת עקת מים באמצעות תצלומים תרמיים בגפן, כאשר קיבלו במועד המדידה האחרון היסט דומה במתאם בין $CWSI$ ומוליכות פיוניות. פרט לכך, בבדיקות שנעשו במספר צמחים במהלך העונה (נתונים לא מופיעים), נבדק פוטנציאל המים של עלים בצמחי כותנה בודדים, לכל אורכו של הגבעול. מבדיקות אלה נמצא, כי לעלים הבוגרים הנמצאים במפרקים שמתחת לעלה המוגדר כמייצג (הרביעי מקודקוד הצמיחה), יש באופן עקבי, פוטנציאל מים גבוה יותר (פחות שלילי).

האפשרות השנייה, לפיה נמדדו טמפרטורות נוף גבוהות מן הרגיל סבירה גם היא. במועד המאוחר בו צולמו התמונות, כיסוי הנוף הידלדל עקב נשירת עלים תחתונים (נספח 2), דבר שהביא לחשיפת קרקע חמה ברקע העלים. לכאורה, טמפרטורות הפיקסלים השייכים לקרקע מופרדות מטמפרטורת העלווה באמצעות שילוב תמונות ה-TIR בתמונות הצבע. אולם המיסוך, כפי שהוצג בפרק 4.4.2, אינו מושלם. במקרים כאלה, כאשר הקרקע מופיעה לסירוגין בין העלים הדלילים (להבדיל מקרקע

החשופה המופיעה ברצועות כאשר הגידול צעיר) כמות הפיקסלים המעורבים שמתקבלת, גדולה פי כמה והשפעתם על קריאת הטמפרטורה משמעותית. Jones (2004) שילב תמונות TIR עם RGB של צמחי פול הגינה שגודלו בחממה תחת טיפולי השקיה ומיין את הפיקסלים השייכים לעלים בכמה רמות. ממצאיו עולה, כי ככל שיותר פיקסלים מוגדרים כעלים, כך גדלה ההסתברות כי בחישוב נכללים פיקסלים השייכים לרקע. בעבודה הנוכחית, רוב התצלומים בוצעו מגובה 10-20 מטרים, כך שהרזולוציה המרחבית נעה בין 2.5 ל-3.5 סמ"ר (טבלה 4). לפי היחס בין גודל האובייקט (עלה) לשטח הפיקסל, סביר להניח כי המידע התרמי שהתקבל מן התמונות אכן מורכב מכמות גדולה של פיקסלים מעורבים (שולי עלים ורקע) ככל שברקע העלים הנמדדים (החשופים לשמש) מופיעים פחות עלים מוצללים.

יתרה מכך, הקרקע החשופה מתחת לעלים, מחזירה קרינה ישירה ופולטת קרינת TIR הפוגעות בצידה התחתון של חופת העלים, המורכבת משכבת עלים דלילה. קריאת הטמפרטורה של העלים עשויה להשתנות בעקבות התחממות הנוספת של העלים כתוצאה משינוי זה במאזן האנרגיה. מסיבות דומות Möller et al. (2007) מצאו בגפן את העלווה שנמצאת במרכז השורות, כאזור המתאים ביותר לצורך מציאת יחסים בין CWSI למוליכות הפיוניות.

6.2.3 סיכום ביניים

לאור התוצאות שהתקבלו בעבודה זו, ניתן להסיק כי בכותנה קיים קשר חזק יותר בין פוטנציאל המים למדדים התרמיים בהשוואה לקשרים המקבילים עם מוליכות הפיוניות. זאת, למרות העובדה כי הקשר של פוטנציאל המים לטמפרטורה הוא עקיף, ונגזר בין היתר, מסך מוליכות הפיוניות, מן המוליכות ההידראולית של השורשים והגבעול, מפוטנציאל המים בקרקע ובאוויר ומההיסטוריה של זמינות המים לצמח.

מקובל כי פוטנציאל המים משפיע על מוליכות הפיוניות וזו משפיעה על טמפרטורת הנוף. לכן צפוי להיות קשר אדוק יותר בין טמפרטורה למוליכות, מאשר בין טמפרטורה לפוטנציאל המים. אולם אין לשכוח כי מקדם המתאם מושפע גם מסטיות המדידה שהן כפי הנראה, גדולות יותר במוליכות הפיוניות יחסית לפוטנציאל מים.

בניגוד לצפוי מצמחים אנאיזוהידרים בעלי שליטה מוגבלת על הפיוניות, בין המדדים התרמיים למוליכות הפיוניות, התקבלו קשרים סבירים, המעידים כי לפיוניות חלק מרכזי בוויסות טמפרטורת העלווה. הקשר של פוטנציאל המים בעלה למדדים התרמיים, הינו עקיף, אך למרות זאת המתאמים חזקים יותר, קרוב לוודאי, הודות לאופיו היציב של המדד באפיון העקה.

6.3 שלבי הגידול הפנולוגיים ומדדי העקה

באופן כללי, עבור תקופת מילוי ההלקטים נמצאו קשרים מובהקים יותר בין המדדים הפיזיולוגיים למדדים התרמיים, פרט למקרה אחד בקשר בין מוליכות הפיוניות ל- T_{CWSI} . היתרון של תקופת מילוי ההלקטים, עשוי להיות תוצאה של ערכי פוטנציאל המים שנצפו בתקופה זו (טבלה 14).

פוטנציאל המים בעלה משמש בקבלת החלטות השקייה בכותנה, לאחר שלב הכיסוי המלא של הקרקע, בשלבים של עצירת הצימוח שמאפיינים את תקופת מילוי ההלקטים. היתרון של האמצעים התרמיים דווקא בתקופה זו, מהווה ממצא מעודד מאחר ובשלבים הקודמים לכך, גובה וקצב הצימוח הוכחו ומשמשים כמדדים המתפקדים טוב יותר. עבודות רבות הראו זה מכבר, כי קיים מתאם חזק בין גובה וקצב צימוח לבין NDVI המתבסס על צילומי אוויר או דימותי לוויין מולטי-ספקטראליים (Carlson and Ripley, 1997; Gamon et al., 1995). קבלת החלטות להכוונת השקיה תוכל אם כן להתבסס בעתיד על שילוב של חישה מרחוק מולטי-ספקטראלית בתחום הנראה והא"א הקרוב להכוונת השקיה עד לתקופה הפריחה ואילו חישה תרמית, תשמש להכוונת השקיה בתקופת מילוי ההלקטים. בדרך זו המלצות ההשקייה יינתנו בהתאם ל-LAI עד לתקופת הפריחה ולפי LWP בתקופת מילוי ההלקטים, כפי שהחלטות ההשקייה מתקבלות כיום.

6.4 מדדי העקה התרמיים

מדדי העקה התיאורטי והאמפירי הראו קשר מובהק עם המדדים הפיזיולוגיים. ככלל, T_{CWSI} הוא באופן עקבי פחות מהימן מ- E_{CWSI} מבחינת הקשר עם המדדים הפיזיולוגיים. T_{CWSI} נבנה על בסיס טמפרטורות של משטחי ייחוס תיאורטיים שחושבו מתוך נתוני המדידות המטאורולוגיות וממספר הנחות לגבי מבנה העלווה הכלולות במשוואת מאזן האנרגיה (עובי שכבת הגבול, גודל העלה, קיבולת החום שלו). קרוב לוודאי כי במקרים רבים, הנחות אלו והקבועים המשמשים לחישוב הפרמטרים, שונים מן המתרחש במציאות. ייתכן כי השונות הרבה שאינה מוסברת על ידי המודלים הינה תוצר של השפעה שכזו. לעתים התקבלו ערכי CWSI שליליים, במיוחד במקרה של E_{CWSI} . ערכים אלו מתקבלים אך ורק במקרים בהם WARS, שמטרתו להציג את טמפרטורת המינימום האפשרית, הציג טמפרטורות גבוהות מטמפרטורות העלווה המדודה. עובדה שכזו, רומזת כי המשטח אינו מתפקד כראוי בחלק מטווח התנאים המטאורולוגיים. למשטח הייחוס מאפיינים השונים מן המבנה המורכב של העלווה וייתכן כי גורמים כמו עובי שכבת הגבול, אינם מתנהגים בצורה זהה תחת מגוון משטרי האקלים. מבנה המשטח דרש טיפול מתמיד ושמירה על שטח פנים רטוב. ייתכן כי במקרים בהם המשטח לא טופל היטב, התקבלה הערכת יתר.

בפרק 4.1.2 (תחת הכותרת 'שכבת הגבול של העלה') צוין כי בתנאי רוח חזקה, שכבת הגבול קטנה אך קצב הדיות עשוי שלא לגדול בהתאם, בגין ירידה ב-VPD בחלל הפיוניות. משטח הייחוס הינו חסר פיוניות והמים בו ספוחים על פני השכבה העליונה. ייתכן כי במקרים כמו אלה, המשטח הציג טמפרטורות נמוכות מן הצפוי להתקבל מעלווה ללא עקה.

אף על פי כן, המשטח המלאכותי נמצא ככלי המייצג היטב את השפעת הסביבה, באופן יחסי לטמפרטורת העלווה.

T_{CWSI} לעומת זאת, אינו נסמך על תפקודם של משטחי ייחוס גשמיים ולכן עשוי לתפקד טוב יותר בתנאים בהם משטחי ייחוס לא מייצגים נאמנה את טמפרטורת העלווה. מעבר לכך, החשיבות

הגדולה שבשימוש בגבולות ייחוס תיאורטיים, נובעת מהעדר הצורך בהצבה וטיפול במשטחי ייחוס, שבמקרים של חישה מן האוויר, אינם ניתנים לביצוע. נראה כי תפקוד משטח הייחוס, שדרש העברה מחלקה לחלקה והשגחה מתמדת, אחראי לחלק גדול מן השונות הבלתי מוסברת במתאמים עם E_{CWSI} וייתכן כי חלק קטן ממנה, נובע מן השונות שבהנחת היסוד, לפיה הגבול הקיצון העליון של $CWSI$, נקבע לפי טמפרטורת האוויר בתוספת $5^{\circ}C$ (שכן נדירים המקרים בהם התקבלו ערכי E_{CWSI} גדולים מ-1 המצביעים על טמפרטורת עלווה גבוהה מ- $5^{\circ}C$).

6.5 מיפוי

מפות פוטנציאלי המים סייעו בהמחשת האופן שבו ניתן להציג את מצב המים של הצמחים בשדה, במגבלות שגיאות התקן של המודלים ששימשו למיפוי.

מיפוי פוטנציאל המים בעלה לפי מודל ה- E_{CWSI} של תקופת הפריחה

מודל ה- E_{CWSI} של תקופת הפריחה שהסביר 45% בלבד מן השונות והכיל שגיאת תקן של 0.27Mpa שימש ליצירת מפת פוטנציאל מים של שדה הניסוי בחוות גד"ש שליד קריית שמונה מתצולם תרמי של השדה שבוצע בתאריך ה-4/7/06. למרות כי מועד מוקדם זה, שייך לתקופה הוגטיבית ואינו נכלל בטווח תקופות הגידול מהן נבנה מודל הרגרסיה של תקופת הפריחה ולמרות כי בשלב גידול זה, פוטנציאל המים בעלה אינו מקובל כמדד לקבלת החלטות השקייה, תוצאות האומדן שהתקבלו הינן מעודדות. המיפוי הראה עקביות במגמת האומדן (**Error! Reference**) **source not found.** עם הערכת יתר שיתכן כי נבעה מחוסר התאמה של המודל. המפה הצליחה באופן איכותי, לבצע אבחנה בין טיפולי השקיה אף על פי שבפועל כפי שהתקבל ממדידות השדה, חלקם לא נבדלו זה מזה באופן מובהק.

מיפוי פוטנציאל המים בעלה לפי מודל ה- E_{CWSI} של תקופת מילוי ההלקטים

המודל שפותח עבור תקופת מילוי ההלקטים הסביר 84% מן השונות עם שגיאת תקן של 0.21Mpa. שגיאה זו, קרובה לשגיאת התקן המקובלת במדידות פוטנציאל מים בעלה עצמן (0.2MPa). המיפוי שנעשה באמצעותו הצליח לבצע אבחנה ברורה בין חלקות עם מצבי מים שונים ולחלק רובן לתחומי פוטנציאל מים זהים.

מקדם המתאם הגבוה שהתקבל מהצבת הנתונים המוערכים מול הנתונים המדודים מחזק את המסקנה כי השיטה מתפקדת טוב יותר בשלבי הגידול המתקדמים בתקופה בה פוטנציאל המים בעלה משמש בתהליכי קבלת החלטות השקייה.

המיפוי שנערך באמצעות התצלומים התרמיים שצולמו מן האוויר במגידו ב-14/8/07 חשף את השונות הרבה המצויה בשדה. דגם הפיזור המרחבי של ערכי פוטנציאל המים המוערכים, הראה כי

בשדה קיימים תת-אזורים שכפי הנראה, זמינות המים בהם שונה והטיפול בהם צריך להיעשות בהתאם.

המתאם בין הערכים המדודים לערכים שנמדדו באמצעות המיפוי, הציג מקדם נמוך יותר מן המיפוי שנערך מתצלומי הקרקע. הסיבה העיקרית לכך נובעת כנראה, מן העובדה כי אימות הנתונים נעשה שבוע לאחר מועד הטיסה, זמן ארוך בו פוטנציאל המים עשוי להשתנות באופן קיצוני. בהנחה כי השדה נמצא במצב זמינות מים זהה במועד המדידה ובמועד האימות (שכן הם בוצעו במרווח זמן זהה ממועד ההשקיה האחרון). השונות הבלתי מוסברת ומקדם המתאם הנמוך עשויים להיגרם ממספר סיבות:

א. כתוצאה מן הטווח המצומצם של הנתונים. שכן, לא נמדדו ערכים של עקה קיצונית (הערך הקיצוני ביותר עומד על 2.14MPa), אף לא בטיפול העקה החמורה (השקייה של 25% מן הטיפול המשקי). טווח פוטנציאל המים שנמדד במועד זה היה 0.86MPa לעומת טווח של 1.37MPa במועד ה-15/8/05, של הצילום הזוויתי מן הקרקע.

ב. כתוצאה מכמות גדולה של פיקסלים מעורבים. הרזולוציה שהתקבלה מן הטיסה לא מאפשרת הפרדה טובה של העלווה מן הקרקע. כמו כן, מהירות הטיסה בשילוב 'מהירות סגירת-התריס' של המצלמה התרמית, גרם ל-"מריחה" מסוימת של הצילומים. גורם זה עשוי להסביר גם את הערכת החסר של פוטנציאל המים, קרי, פיקסלים מעורבים שגרמו לקריאת טמפרטורה גבוהה ולהערכה לפיה מצב המים בשדה חמור מן המצב האמיתי.

6.6 השלכות מעשיות של המחקר

מודלי המתאם והטכניקה ששימשה ליצירת מפות פוטנציאל המים עשויים לשמש כבסיס לטכנולוגיית ההשקיה המדייקת המתפתחת. המפות כפי שהתקבלו במצבן הנוכחי, מסוגלות לסייע בקבלת החלטות מקומיות של יישום השקייה אחידה בשדה, בהתאם למקובל בהכוונת ההשקייה באמצעות פוטנציאל המים. בטווח הארוך, שילוב של כמה מועדים לאורך תקופת הגידול, עשוי לעזור בתכנון מראש של מערכת ההשקיה, לפי דגם זמינות המים של השדה.

במסגרת של GIS, שכבות עונתיות של LWP יכולות להשתלב בשכבות מידע נוספות כגון שכבות עומקי קרקעות, תפוצת מינרלים ומליחות, מפות יבול ומפות תפוצת מחלות ומזיקים. חשיפת יחסי הגומלין בין מצב המים של הצמחים לאחדים מן הגורמים שהוזכרו, עשויה לעזור בפענוח תופעות רבות בחקלאות ובתחומים כמו אקולוגיה, בוטניקה, גיאולוגיה ועוד.

הדמאות תרמיות של לווינים, מתקבלות כיום ברזולוציות נמוכות של עשרות מטרים לפיקסל. מגוון של טכניקות משמשות להגדלת הרזולוציה (אינטרפולציה, שילוב במידע המתקבל מערוצים אחרים ברזולוציות גבוהות). המידע שהתקבל מן התצלומים התרמיים בעבודה זו, עשוי לסייע בשיפור טכניקות אלה, על ידי הוספת מידע לגבי אופי הפיזור המרחבי של טמפרטורות בסביבות חקלאיות (הבנה מעמיקה יותר של הרכב הפיקסלים המעורבים שמתקבלים ברזולוציה נמוכה).

באופן כללי, הרחבת הידע לגבי טמפרטורות של גידולים בסביבתם הטבעית, עשויה לתרום להבנה מעמיקה יותר של תהליך האוּפּו-טרנספירציה ולחישוב צריכת המים היומית והעונתית של חלקות חקלאיות. המידע התרמי עשוי לתרום להבנת פעילות מטבולית ותהליכים ביוכימיים של צמחים יצרנים ולחישוב מדויק יותר של ימי מעלה וקצבי גידול המשמשים לחיזוי והערכה כלכלית של יבולים.

6.7 נושאים להמשך מחקר

מכיוון שהשימוש ב-WARS אינו מעשי עבור מדידות הנעשות בהיקף גדול, יש צורך במציאת חלופות למשטח. אחד הפתרונות שהוצעו בעבודה זו, הוא שימוש בנתונים המטאורולוגיים לחישוב תיאורטי של טמפרטורות הנוף. מאחר וברוב המקרים קיים מידע מטאורולוגי זמין בסביבות חקלאיות, הפתרון התיאורטי עשוי להיות אידיאלי, אולם הנושא עדיין לא פתור ויש צורך בהעמקה בו. דרך אחרת למציאת טמפרטורות המינימום היא יישום של חלקות המושקות בעודף בשדה. הדבר מעשי אך עשוי להכביד על מהלך יישום מסחרי של השיטה. מעבר לכך טיפול קבוע של השקייה עודפת בכותנה, מתבטא בהתפתחות אחרת, עם נוף בעל תכונות שונות שאינן משקפות בהכרח את יתר הנוף בשדה בתקופות המאוחרות. פתרון נוסף לבעיית נקודת המינימום, הוא שימוש במאונים (percentiles) מתוך התפלגות הטמפרטורות בתמונה. השיטה מתבססת על הנחה כי תמונת השדה מכילה אחוז מסוים של צמחים שאינם נמצאים כלל בעקה. שיטה זו היא הפשוטה ביותר לביצוע אך דרוש ביסוס נוסף להנחה.

במסגרת מחקר עתידי בנושא, רצוי ליישם השקייה באמצעות השיטה ולתכנן ניסוי, שבו ספים שונים של נתונים תרמיים, ישמשו כגורמי שפעול להשקיה במנות משתנות (VRI). את השלכות ההשקיה בדרך זו, יש לבחון באמצעות השוואה בין פרמטרים של יבול ואיכות היבול מול כמות ההשקיה שניתנה בפועל וכן לבחון את מידת צמצום השונות.

כימות של עקה כשלעצמו הוא משימה קשה, בעבודה זו נערכה השוואה בין שיטות כימות של עקה באמצעים תרמיים לבין שתי שיטות פיסיולוגיות מקובלות. יש צורך בהמשך מחקר המדדים התרמיים כמדדים להכוונת השקייה והשוואתם למדדים קיימים נוספים כפי שהוזכרו בפרק 3.5, בכדי לחשוף את הבעייתיות הטמונה בהם ולפענח את הדרכים לפתרונם.

7 רשימת ספרות

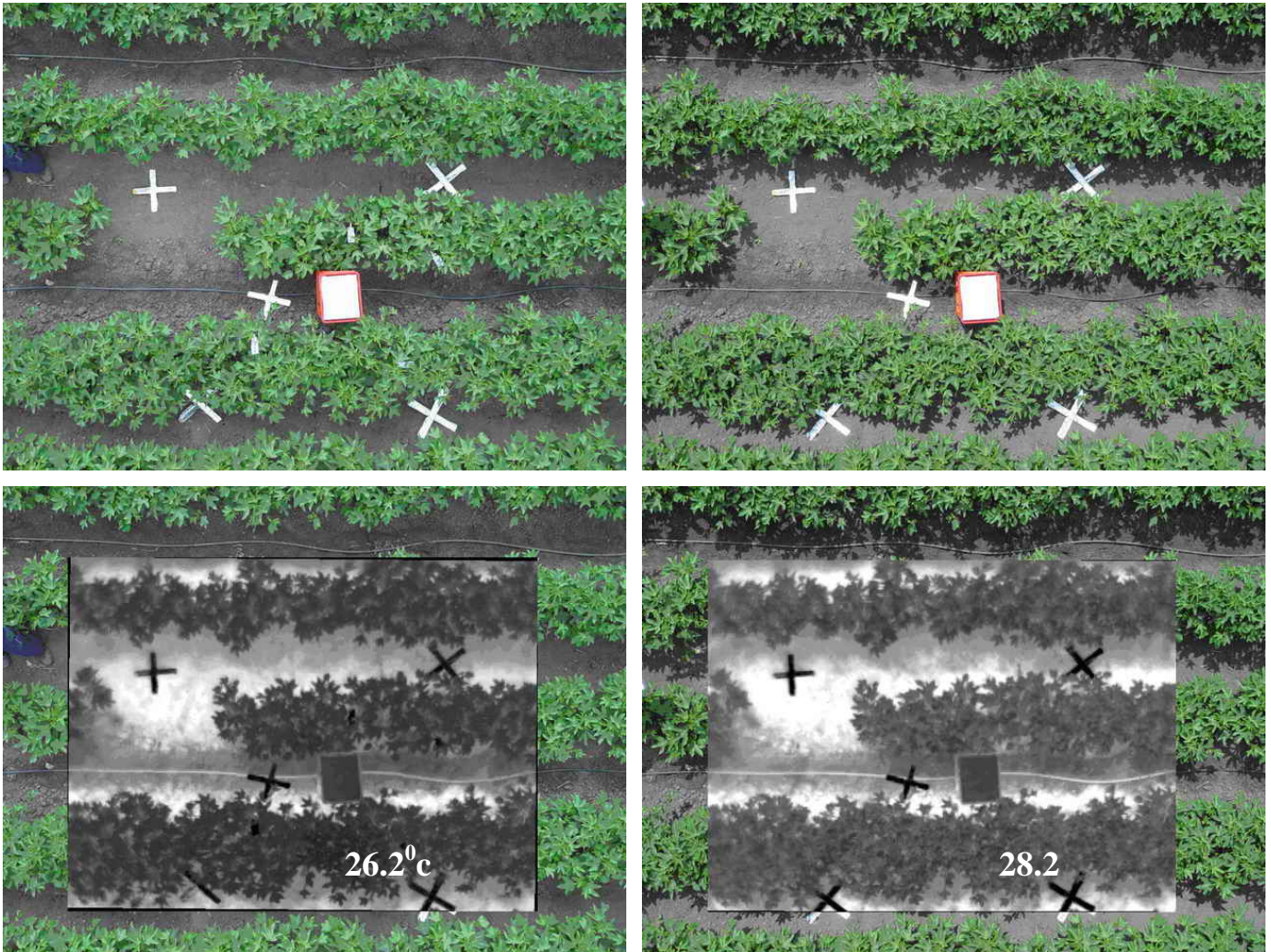
- הלר א. (1983). תגובת צמחי כותנה למתח מים קבוע ומשתנה. עבודת גמר המוגשת לפקולטה לחקלאות, האוניברסיטה העברית בירושלים לשם קבלת תואר מוסמך למדעי החקלאות.
- יגב ח. (1978). מתחי מים והשפעתם על צמיחה, התפתחות וניבה של כותנה בשני אזורי גידול. עבודת גמר המוגשת לפקולטה לחקלאות, האוניברסיטה העברית בירושלים לשם קבלת תואר מוסמך למדעי החקלאות.
- סרנגה י. (1983). תגובת כותנה למנת מים ולעיתוי השקיה לפי פוטנציאל המים בעלה. עבודת גמר המוגשת לפקולטה לחקלאות, האוניברסיטה העברית בירושלים לשם קבלת תואר מוסמך למדעי החקלאות.
- פלש י. (1997). שונות ביעילות ניצול מים בכותנה ואומדנה באמצעות יחס האיזוטופים היציבים של פחמן. עבודת גמר המוגשת לפקולטה למדעי החקלאות, המזון ואיכות הסביבה, האוניברסיטה העברית בירושלים. לשם קבלת תואר מוסמך למדעי החקלאות.
- פרסומי הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, השנתון הסטטיסטי לישראל, 2007.
- רימון ד. 1984. גידול כותנה- עיון ומעשה. הוצאת ש. סגל ושות', 416 עמ'.
- קובץ מיפוי חברות קרקע בישראל (1996). המחלקה לסקר מיפוי יעוד קרקע וחישה מרחוק, האגף לשימור קרקע ולניקוז, משרד החקלאות ופיתוח הכפר.
- עלון פרסומי המועצה לייצור ושיווק כותנה (2007). סיכום עונת הגידול 2006.

- Alchanatis V., Cohen Y., Meron M., Tsipris J., Naor S., Cohen S., Harit Z., Ostrovsky V. (2005). Fusion of thermal IR and color images for evaluation of crop water stress. In: 5th European Conference on Precision Agriculture (5ECPA), *Precision Agriculture '05* – J. V. Stafford (Ed.), Wageningen Academic Publishers, pp 30-33, Upsala (Sweden), 9-12/6/2005.
- Alves I., Pereira L. S., (2000). Non-water-stressed baselines for irrigation scheduling with infrared thermometers: a new approach. *Irrigation Science* **19**, 101-106.
- Bates L. M., Hall A. E. (1981). Stomatal closure with soil water depletion not associated with changes in bulk leaf water status. *Oecologia* **50**, 62-65.
- Bonfil D.J., Karnieli A., Raz M., Mufradi I., Asido S., Egozi H., Hoffman A., Schmilovitch Z. (2005). Rapid assessing of water and nitrogen status in wheat flag leaves. *Journal of Food, Agriculture & Environment* **3**, 148-153.
- Carlson T. N., Ripley D. A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment* **62**, 241-252.
- Chalmers D. J., Mitchell P. D., Vanheek L. (1981). Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density and summer pruning. *Journal of the American Society of Horticultural Science* **106**, 307-312.
- Clarke T. R. (1997). An empirical approach for detecting crop water stress using multispectral airborne sensors. *Hortechonology* **7**, 9-16.

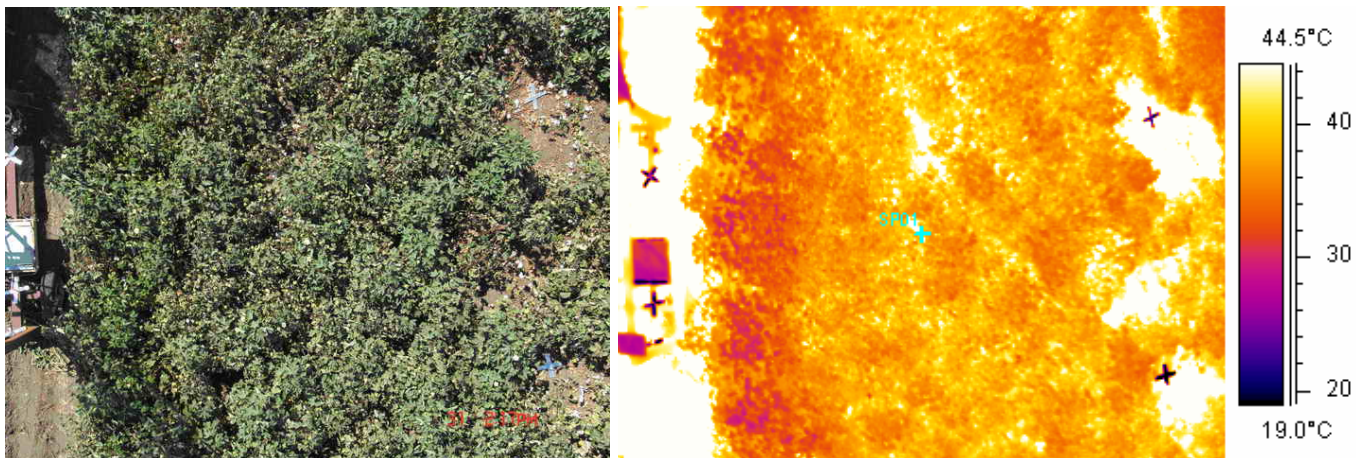
- Clawson K. L., Blad B.L. (1982) Infrared thermometry for scheduling irrigation of corn. *Agronomy Journal* **74**, 311-316.
- Corwin D. L., Lesch S. M. (2003). Application of soil electrical conductivity to precision agriculture. *Agronomy Journal* **95**, 456-471.
- De Kock J., de Bruyn L. P., Human J. J. (1989). The relative sensitivity to plant water stress during the reproductive phase of upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Irrigation Science* **11**, 239-244.
- Ehrler W. L. (1973). Cotton leaf temperatures as related to soil water depletion and meteorological factors. *Agronomy Journal* **65**, 404-409.
- FAO statistical yearbook 2006. FAOSTAT. <http://www.fao.org/statistics/yearbook>, (last accessed at 4/12/2007).
- Fuchs M. (1990). Infrared measurement of canopy temperature and detection of plant water stress. *Theoretical and Applied Climatology*, **42**, 253-261.
- Gamon J. A., Field C. B., Goulden M. L., Griffin K. L., Hartley A. E., Joel G., Penuelas J., Valentini R. (1995). Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three californian vegetation types. *Ecological Applications* **5**, 28-41.
- Gates D. M. (1964). Leaf temperature and transpiration. *Agronomy Journal* **56**, 273-277.
- Grant O. M., Chaves M. M., Jones H. G. (2006). Optimizing thermal imaging as a technique for detecting stomatal closure induced by drought stress under greenhouse conditions. *Physiologia Plantarum* **127**, 507-518.
- Grimes D.W., Yamada H. (1982). Cotton growth related to plant's water status. *California Agriculture* **36**, 13-14.
- Hashimoto Y., Ino T., Kramer P. J., Naylor A. W., Strain B. R. (1984). Dynamic analysis of water stress of sunflower leaves by means of thermal image processing system. *Plant Physiology* **76**, 266-269.
- Hatfield J. L. (1983). The utilization of thermal infrared radiation measurements from grain sorghum crops as a method for assessing their irrigation requirements. *Irrigation Science* **3**, 259-268.
- Howell T. A. (2001). Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agronomy Journal* **93**, 281-289.
- Idso S. B. (1982). Non-water stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agricultural Meteorology* **27**, 59-70.
- Idso S. B., Jackson R. D., Pinter P. J., Reginato R. J., Hatfield J. L. (1981). Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology* **24**, 45-55.
- Idso S. B., Pinter P. J., Reginato R. J. (1990). Non-water-stressed baselines: the importance of site selection for air Temperature and air vapour pressure deficit measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* **53**, 73-80.
- Irmak S., Haman D. Z., Bastung R. (2000). Determination of crop water stress index for irrigating timing and yield estimation of corn. *Agronomy Journal* **92**, 1221-1227.
- Jackson R. D. (1985). Evaluating evapotranspiration at local and regional scales. *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers*, **73**, 1086-1096.

- Jones H. G. (1999a). Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. *Agricultural and Forest Meteorology* **95**, 139–149.
- Jones H. G. (2004). Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany* **55**, 2427–2436.
- Jones H. G., (1992). Plants and microclimate, 2nd ed. Cambridge University Press, 428pp.
- Leinonen I., Jones H. G. (2004). Combining thermal and visible imagery for estimating canopy temperature and identifying plant stress. *Journal of Experimental Botany* **55**, 1423–1431.
- Lillesand T. M., Kiefer R. W., Chipman J. W. (2004). Remote sensing and image interpretation, 5th ed. Wiley Academic Publishers, 736pp.
- Marani A., Baker D. N., Reddy V. R., McKinion J. N. (1985). Effect of water stress on canopy senescence and carbon exchange rates in cotton. *Crop Science*. **25**, 309–313.
- McKinion J. M., Jenkins J. N., Akins D., Turner S. B., Willers J. L., Jallas E., Whisler F. D. (2001). Analysis of a precision agriculture approach to cotton production. *Computers and Electronics in Agriculture* **32**, 213–228.
- Meron M, Grimes D. W., Phene C. J., Davis K. R. (1987). Pressure chamber procedures for leaf water potential measurements of cotton. *Irrigation Science* **8**, 215–222.
- Meron M, Tsipris J, Charitt D. (2003). Remote mapping of crop water status to assess spatial variability of crop stress. In: Stafford J, Werner A, eds. *Precision agriculture*, Proceedings of the 4th European Conference on Precision Agriculture. Berlin, Germany Wageningen: Academic Publishers, 405–410.
- Meron M., Tsipris J. B. (2003). System and method for remote monitoring of water stress status of growing crops. US Patent No. 6,597,991B1. Jul. 22, 2003.
- Moran M. S., Clarke T. R., Inoue Y., Vidal A. (1994). Estimating crop water deficit using the relation between surface–air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment* **49**, 246–263.
- Moran M. S., Clarke T. R., Inoue Y., Vidal A. (1994). Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing Of Environment* **49**, 246–263.
- Morgan J. M. (1984). Osmoregulation and water stress in higher plants. *Annual Review of Plant Physiology* **35**, 299–319.
- Möller M., Alchanatis V., Cohen Y., Meron M., Tsipris J., Naor A., Ostrovsky V., Sprintsin M., Cohen S. (2007). Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. *Journal of Experimental Botany* **58**, 827–838.
- Nobel P. S. (1991). Physiochemical and environmental plant physiology. Academic Press Inc., 635pp.
- O'Toole J. C., Turner N. C., Namuco O. P., Dingkuhn M., Gomez K. A. (1984). Comparison of some crop water stress measurements methods. *Crop Science* **24**, 1121–1128.
- Projected increase in world cotton trade in 2007/08 (2007). International cotton advisory committee (ICAC) Press Release, November 1.

- Rosegrant M. W., Cai X., Cline S. A. (2002). Water and Food to 2025: Policy responses to the threat of scarcity. IFPRI and the International Water Management Institute (IWMI), Washington, USA. pp. 6.
- Russo D., Bresler E. (1981). Soil hydraulic properties as stochastic processes. I: an analysis of field spatial variability. *Soil Science Society of America Journal* **45**, 682-691.
- Scholander P.F., Hammel H.T., Bradstreet E.D., Hemmingsen E.A. (1965). Sap pressure in vascular plants. *Science* **148**, 339-346.
- Sela E., Cohen Y., Alchanatis V. Saranga Y., Cohen S., Möller M., Meron M., Bosak A., Tsipris J., Orolov V. (2007) Thermal imaging for estimating and mapping crop water stress in cotton. In: 6th European Conference on Precision Agriculture (6ECPA), *Precision Agriculture '07* – J. V. Stafford (Ed.), Wageningen Academic Publishers, 875 pp., pp. 365-371, Skiathos (Greece), 3-6/6/2007.
- Stockle O. C., Dugas W. A. (1991). Evaluating canopy temperature-based indices for irrigation scheduling. *Irrigation Science* **13**, 31-37.
- Tanner C. B. (1963). Plant Temperature. *Agronomy Journal* **55**, 210-211.
- Tardieu F., Simonneau T. (1998). Variability among species of stomatal control under fluctuating soil water status and evaporative demand: modeling isohydric and anisohydric behaviors. *Journal of Experimental Botany* **49**, 419-432.
- Turner N. C., Hearn A. B., Begg J. E., Constable G. A. (1986). Physiological and morphological response to water deficits and their relationship to yield. *Field Crops Research* **14**, 153-170.
- UNSTAT 2007. http://www.fao.org/ag/agl/aglw/aquastat/water_use/index6.stm (last accessed at 15/11/2007).
- Wallace J. S. (2000). Increasing agricultural water use efficiency to meet future food production. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **82**, 105-119.
- Wanjura D. F., Hatfield J. L., Upchurch D. R. (1988). Crop water stress index relationships with crop productivity. *Irrigation Science*, **11**, 93-99.
- Wanjura D. F., Upchurch D. R., Mahan J. R. (1992). Automated irrigation based on threshold canopy temperature. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering* **35**, 153-159
- Whelan B. A., McBratney A. B. (2000). The “null hypothesis” of precision agriculture management. *Precision Agriculture* **2**, 265-279.



נספח 1: תמונות RGB של חלקה עם טיפול משקי (ה-15/6/2005, רבדים), תחת תנאי הארה משתנים (הפרש של 71 שניות) ומתחתן תמונות ה-TIR שנלקחו במקביל ושולבו בהן (למטה משמאל: טמפרטורת הנוף הממוצעת).



נספח 2: משמאל- תמונת RGB של אחת מחלקות הניסוי ב-31/8/06 בחוות גד"ש שליד קריית שמונה. מימין- תמונת TIR שנלקחה במקביל לה, בה ניתן להבחין במידת ההשפעה של הקרקע החשופה בתוך החלקה על טמפרטורת הנוף ובמצב העלווה הבוגרת. טמפרטורת הקרקע הממוצעת המופיעה בתמונה הינה 57.4°C , הטמפרטורה המינימלית: 49.4°C והמקסימלית: 69.2°C . העלווה הקרה בשולי החלקה השמאליים רוססה במים.

ABSTRACT

Water status of crop plants is a major factor determining both quantity and quality of yield. Farmers control crop water status through irrigation scheduling and quantifying, which is conventionally based on pre-determined recommendations and/or a few measurements of soil–plant–atmosphere parameters. Moreover, irrigation is usually applied uniformly, disregarding the natural spatial variability within field plots.

Leaf water potential (LWP) is a widely accepted parameter for evaluating plant water status, and is the most commonly used parameter for irrigation scheduling in cotton. However, it is limited to few measurements with no ability to detect the in-field spatial variability. A decrease in LWP usually leads to reduced stomatal conductance which in turn causes an increase in canopy temperature. These relationships served the basis for the study of canopy temperature as an indicator for crop water status and as a potential tool for irrigation scheduling. However, difficulties in data interpretation and normalization to ambient conditions have impeded its application. Recent developments of thermal infra-red (TIR) imaging enables the acquisition of a synoptic view of crop temperature with highly accurate information over wide areas.

This study was aimed to develop a model-based method for estimating and mapping LWP in cotton fields, based on TIR images. Regression models for estimation of LWP and stomatal conductance were developed and tested at different physiological and phenological stages. These models were used for generation of LWP maps in order to characterize the spatial variability within the field plots.

Data was collected in five experimental cotton fields grown in 2003, 2005 and 2006 at three locations, each with 3-5 irrigation regimes. One commercial field with three irrigation treatments used in 2007 for validation. Measurements were taken throughout 16 days during cotton growing season. On each day, simultaneous TIR and RGB images were taken from various heights. An artificial wet reference surface (WARS) was placed within each image field of view to simulate a fully transpiring leaf. LWP and stomatal conductance of plants within the image area were measured and meteorological data was collected at 1-minut interval during measuring time. The RGB images were used to eliminate the bare soil and shaded leaves from the TIR images.

Crop Water Stress Index (CWSI) was used for weighting the thermal data into ambient conditions. For each TIR measurement, a mean value of CWSI was calculated empirically

(E_{CWSI}), based on WARS and air temperature + 5⁰C, and theoretically (T_{CWSI}), based on temperature calculation of theoretical reference surfaces, using Penmann's leaf energy balance.

The E_{CWSI} , T_{CWSI} and temperature values of each measuring day were placed together and separately against stomatal conductance and LWP, in order to establish correlation models. The relationships between stomatal conductance versus temperature, E_{CWSI} and T_{CWSI} , yielded highly significant correlations, with coefficients (R) ranged between 0.55 and 0.64. Improved coefficients of up to 0.79 with standard error (Std) of 129.4mmol sec⁻¹ m², were obtained after eliminating outlier measuring dates. The relationships between LWP versus temperature, E_{CWSI} and T_{CWSI} , yielded higher correlations, with coefficients ranged between 0.49 and 0.75. Improved coefficients of up to 0.84 with Std of 0.26MPa m², were obtained after eliminating outlier measuring dates. Regression models were also developed separately for two phenological periods; flowering and boll development stages. The relationship between the thermal data and LWP were different for each physiological stage providing higher coefficients for the boll development stage in most of the cases.

These models were further used for producing LWP maps, using diagonal TIR images of the fields at the two different development stages. The distribution of LWP in the maps enhanced the differentiation between plots differing in their water status. The maps also revealed the existence of spatial variability within each treatment.

Validation of the boll development model was achieved using aerial TIR above a commercial field in 2007 in which three irrigation regimes were conducted. A general match was achieved between the measured and the mapped LWP with a small overestimation.

These results demonstrate that spatial variability in crop water status can be mapped, based on periodic thermal and RGB imaging, combined with meteorological measurements. These maps may serve as a decision tool for management of uniform irrigation application. With the development of variable-rate technologies for irrigation systems, they may further support site-specific irrigation decisions.

**Use of Thermal Imaging for Estimation and Mapping Water Status
in Cotton**

M.Sc. Thesis

**Submitted to the faculty of
Agricultural, Food & Environmental Quality Sciences
The Hebrew University of Jerusalem**

**By
Eitan Sela**

Rehovot, ISRAEL

December, 2007