

פיתוח טכנולוגיות מבוססות צילומים תרמיים להכוונת השקיה

Development of irrigation scheduling methods based on thermal imaging

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות ופיתוח הכפר

על-ידי

המכון להנדסה חקלאית, מנהל המחקר החקלאי	ויקטור אלחנטי
המכון להנדסה חקלאית, מנהל המחקר החקלאי	יפית כהן
המכון להנדסה חקלאית, מנהל המחקר החקלאי	ויאצ'סלב אוסטרובסקי
המכון לקרקע, מים וסביבה, מנהל המחקר החקלאי	שבתאי כהן
מרכז ידע גליל עליון	משה מרון
המכון לחקר הגולן	עמוס נאור

Victor Alchanatis, *Institute of Agricultural Engineering, ARO, the Volcani Center. Email:*

victor@volcani.agri.gov.il

Yafit Cohen, *Institute of Agricultural Engineering, ARO, the Volcani Center. . Email:*

yafitush@volcani.agri.gov.il

Viacheslav Ostrovsky, *Institute of Agricultural Engineering, ARO, the Volcani Center. Email:*

slavaw@volcani.agri.gov.il

Shabtai Cohen, *Institute of Soil Water and Environment, ARO, the Volcani Center. Email:*

ywshep@volcani.agri.gov.il

Moshe Meron, *MIGAL. Email: merron@migal.org.il*

Amos Naor, *Golan research institute. Email: amosnaor@research.haifa.ac.il*

מאי 2008

אייר תשס"ח

הממצאים בדו"ח זה הינם תוצאות ניסויים.

הניסויים מהווים המלצות לחקלאים: לא

חתימת החוקר

*

רשימת פרסומים

Moller M., Alchanatis V., Cohen Y., Meron M., Tsipris J., Naor A., Ostrovsky V., Sprintsin M. and Cohen S. (2006), Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. *Journal of Experimental Botany Vol. 58, No. 4, pp. 827–838, 2007. Imaging Stress Responses in Plants Special Issue. 58(4):827–838*

V. Alchanatis, Y. Cohen, S. Cohen, M. Moller, M. Meron, J. Tsipris, V. Orlov, A. Naor, Z. Charit (2006). Fusion of IR and Multispectral Images in the Visible Range for

Empirical and Model Based Mapping of Crop Water Status. 2006 ASABE Annual International Meeting, Portland, Oregon, 9 - 12 July 2006

V. Alchanatis, Y. Cohen, S. Cohen, M. Moller, M. Meron, J. Tsipris, V. Orlov, A. Naor, Z. Charit 2007. Integrated thermal and visible imaging for crop water stress assessment in a wine-grape vineyard. 14th Dahlia Greidinger Symposium, Advanced Technologies for Monitoring Nutrient and Water Availability to Plants, March 12-13, 2007, Altura Auditorium, Grand Water Research Institute Technion - Israel Institute of Technology, Haifa.

איתן סלע, יפית כהן, ויקטור אלחנתי, יהושוע סרנגה, שבתאי כהן, מרכוס מולר, משה מירון, יוסף ציפריס, ולרי אורולוב, סלבה אוסטרובסקי. הערכה ומיפוי מצב המים בכותנה באמצעות צילומים תרמיים. הכנס השנתי ה-47 של האגודה הגיאוגרפית הישראלית תשס"ז. אוניברסיטת תל-אביב, החוג לגיאוגרפיה וסביבת האדם, "הגיאוגרפיה בחברה טכנולוגית", כ"ו-כ"ח בכסלו, תשס"ז, 17.12.2006-19.12.2006

Sela, E., Y. Cohen, V. Alchanatis, Y. Saranga, S. Cohen, M. Möller, M. Meron, A. Bosak, J. Tsipris and V. Orollov. 2007, Thermal imaging for estimating and mapping crop water stress in cotton. European Conference in Precision Agriculture, June 2007, Skiathos, Greece. pp: 365-371.

א. תקציר

הצגת הבעיה: בצורות השקיה הנהוגות היום, המים מסופקים בצורה אחידה לכל החלקה, על-פי צריכת המים הגדולה ביותר, ללא התחשבות בשונות הצריכה במרחב השדה. הפעלת טכנולוגיות חקלאות מדייקת למעבר להשקיה פרטנית תביא לחלוקה אופטימאלית של המים תוך פגיעה מינימאלית באיכות הסביבה ומתן יבול מקסימאלי.

מהלך ושיטות עבודה: במהלך העבודה, פותחו שיטות למיפוי מצב המים היחסי והאבסולוטי בחלקות בהן נוצר שונות ידועה מראש (ניסוי השקיה). גפנים גודלו במסגרת ניסויי השקיה במספר חזרות של שלוש עד חמש רמות השקיה. הצילומים התרמיים בוצעו מגובה של 20 מ' מעל שדות גפנים וכותנה באזורים גיאוגרפיים שונים. כמוכן, בוצעו צילומים תרמיים מוטסים להערכה ומיפוי של מצב המים. מהנתונים שנמדדו, פותחו ואומתו מודלים יציבים להערכת פוטנציאל מים בעלה באמצעות צילומים תרמיים.

תוצאות עיקריות: פותח הליך חצי-אוטומטי להפרדה בין קרקע ונוף צמחי וכן בין סגמנטים שונים של הנוף כגון עלווה מוארת או למיסוך רקע, קרקע ועלים בצל. נמצא קשר טוב (0.93) מאוד בין cwsI ובין מוליכות פיוניות בגפנים וקשר בינוני בלבד (0.62) בין cwsI ובין פוטנציאל מים בגזע. בכותנה, נמצאו מודל הקושר בין מדד cwsI לבין פוטנציאל המים בעלה. מודל זה נכון עבור שני זנים בשני אזורים גיאוגרפיים שונים, במגוון תנאים מתאורולוגיים במהלך שתי שנים. המודל לתקופה הווגטיבית שונה מהמודל לתקופת מילוי ההלקטים. פותח הליך לצילום ולמיפוי שטחים נרחבים מהקרקע והיכולת למיפוי פוטנציאל מים באמצעות צילום תרמי מוטס. מופו שדות מסחריים באמצעות צילום מוטס ונמצא קשר טוב בין הערכים המחושבים לבין האימות הקרקעי.

ב. מבוא

בשיטות ההשקיה הנהוגות היום, המים מסופקים בצורה אחידה לכל החלקה (על-פי המקום בעל צריכת המים הגדולה ביותר), ללא התחשבות בשונות הצריכה בין שורות או אזורים. ממשק השקיה אחיד מוריד את יעילות השימוש במים להשקיה, במקרים רבים גורם לבזבז וגורם לחוסר אחידות ביבול דבר הפוגע בפדיון (במיוחד בכרמי יין). השקיה על-פי חקלאות מדייקת באמצעות התאמת ספיקת מפזרי המים באופן ייחודי לכל אזור, או לכל שורה, תביא לחלוקה אופטימאלית של המים בין אזורי השדה, תמנע עקות יתר, תמנע עודפי מים ועשויה בנוסף להביא לעליה באיכות ובכמות היבול בחלקה. הכוונת השקיה יכולה להתבצע על-ידי שימוש במדדים שונים המתחלקים לשלוש קבוצות: מדדי קרקע, מדדי אקלים ומדדי צמח. פוטנציאל המים הוא הביטוי הפיסיולוגי הישיר למצב המים של הצמח ושמירתו על ערכים אופטימליים עשויה להשיא את היבול ואת יעילות השימוש במים. במחקרים שבוצעו בישראל לפני כשני עשורים נמצא פוטנציאל המים כמדד יעיל להשקיית כותנה בטפטוף ובהמטרה. פוטנציאל המים משמש מדד גם למצב המים בגפן. בהכוונת השקיה על-פי פוטנציאל מים בגידולי שדה ובכרם, אפיון מצב המים בחלקה כולה נעשה באמצעות מדידה של מספר עלים והחלקה כולה מושקה על-פי מדידות אלו. בשיטה זו לא נלקחת בחשבון השונות הקיימת בחלקה וניתן לשער כי ערך פוטנציאל המים של העלים הנדגמים איננו מאפיין בצורה ראויה את מצב החלקה כולו. על-מנת לאפיין את השונות במצב משק המים בתוך החלקה יש לבצע מדידות פוטנציאל מים בעלים רבים. יישום ממשק של השקיה פרטנית מותאמת אזור, שורה או עץ יחיד תתאפשר מבחינה ניהולית רק כאשר ניתן יהיה למדוד באופן יעיל את רמת העקה ולמפות את החלקה בצורה מדויקת, בהוצאה נמוכה, וניתנת לעדכון לפי הצורך.

התפתחות טכנולוגיות חישה מרחוק ומיפוי באמצעות צילומים תרמיים, מולטי-היפר-ספקטראליים או בניית פוטוגרמטרי, פתחה פתח למיפוי התפרושת המרחבית של עקות שונות ופגעים שונים ולהפכם למפות

של פעולות אגרוטכניות. טמפרטורת העלה מהווה, בעקיפין, אינדיקציה על מצב המים בצמח. מאזן האנרגיה של עלה משתנה בהתאם לעוצמת עקת המים שכן מידת פתיחת הפיוניות יורדת עם עליית עקת המים דבר המקטין את הטרנספירציה ואת שטף החום מהעלה וכתוצאה מכך עולה טמפרטורת העלה. עם זאת, טמפרטורת עלוות הצמח בחלקה מושפעת מגורמים אקלימיים נוספים (טמפרטורת אויר, לחות, מהירות רוח וקרירה). קיימות עבודות רבות המציעות מודלים להערכת מצב עקת המים המתבססים על טמפרטורת העלווה תוך התחשבות בגורמי אקלים אחרים.

כימות מצב העקה המוחלט באמצעות טמפרטורה איננו טריוויאלי וקיים צורך בהמשך מחקר בתחום זה. לצילומים תרמיים קיימים מספר יתרונות על פני אמצעי מדידת טמפרטורה אחרים: ברזולוציה מרחבית מתאימה ניתן לקבל מדידות טמפרטורה המתייחסות לעלי שמש בלבד ללא עירוב של אובייקטים אחרים בסביבתה כמו קרקע או אזורים מוצלים. עדיין, טכנולוגיה זו מציבה אתגרים חדשים כמו פיתוח הליכים להפרדה בין פיקסלים טהורים של עלווה ופיקסלים של קרקע ופיקסלים מעורבים ופיתוח הליכים להפרדה בין עלי שמש ועלי צל.

התחום בו עסק המחקר התמקד במיפוי עוצמת עקת המים ככלי להכוונת השקיה פרטנית בהתאם לעקרון של חקלאות מדייקת. במסגרת המחקר המוצע נתמקד בכרמים ליין כגידול מודל של מטעים. אם זאת, עקב אילוצים של פעולות האיבה באיזורי הניסוי, העבודה הורחבה גם לגידולי שלחין, כותנה.

כרמים ליין: מעבר ליעול השימוש במים להשקיה על-פי חקלאות מדייקת בכרם יתרון נוסף ביצירת אחידות במצב המים בכרם ובכך לעליה באיכות היין. במשך עשרות שנים מושקע בעולם ובארץ מאמץ מחקרי רב ובמיגוון תחומים למציאת מימשק שיעלה את איכות היין – צפיפות נטיעה, שיטות עיצוב והדליה, עומס יבול, מישטר תאורה ועוצמת עקת מים. פרי טרי ניתן למיין במערך מיון לאחר הקטיף ולסווגו על פי איכות. במקרה של ענבי יין הנבצרים מכנית כחטיבה אחת חל ערבוב של כל הענבים והאיכות המתקבלת היא ממוצע של כל האיכויות בחלקה. לפיכך, חוסר אחידות באיכות ובמועד הבשלה היא מרכיב הפוגם באיכות היין. התחרות הקשה בשוק היין הביאה בשנים האחרונות לתחילת פעילות בפיתוח כלים שיקטינו את חוסר האחידות בתוך הכרם. הפעילות נעה מפעילות אגרוטכנית פרטנית ועד לבציר סלקטיבי. הפעילות האגרוטכנית ברובה נעשית בצורה ממוכנת (קיטום, חילון, בציר), כך שיש פוטנציאל לשילוב בין מערכות חישה מרחוק וממ"ג (GIS) לצורך ביצוע של חקלאות מדייקת בכרם.

המטרה הכללית של המחקר היא יצירת הבסיס המדעי והטכנולוגי לממשק מים של חקלאות מדייקת, המבוסס על שילוב של צילומים תרמיים וצילומים מולטי-ספקטראליים של הנוף.

מטרות ספציפיות:

1. קביעת מצב המים בגפן באמצעות מודלים אמפיריים ותיאורטיים המקשרים בין טמפרטורת העלווה ובין מדדים צמחיים כמו פוטנציאל מים ומוליכות פיוניות.
2. פיתוח של אלגוריתמים של עיבוד תמונה וניתוח מרחבי להערכת היכולת של מיפוי_מיפוי יחסי תחילה ומיפוי אבסולוטי בהמשך) מצב המים בצמח מצילומים תרמיים ומולטי-ספקטראליים.

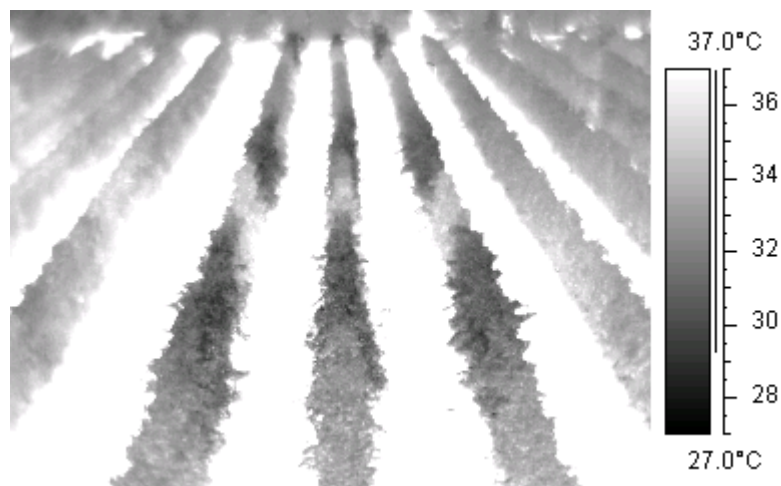
ג. עיקרי הפיתוחים בתקופת הדו"ח

במחקר המתנהל כשלוש שנים מתבצע ניסיון לפיתוח מודל המקשר בין טמפרטורת הנוף בגפן ובין מצב המים באופן כמותי ובכך לאפשר בעתיד הכוונת השקיה מדייקת בכרם. לצורך יצירת טווח של מצבי מים הושקו גפנים בכרם ליין בקיבוץ יפתח בשלוש רמות שונות בעונות 2005 ו-2007. איור 1 הינו צילום תרמי של

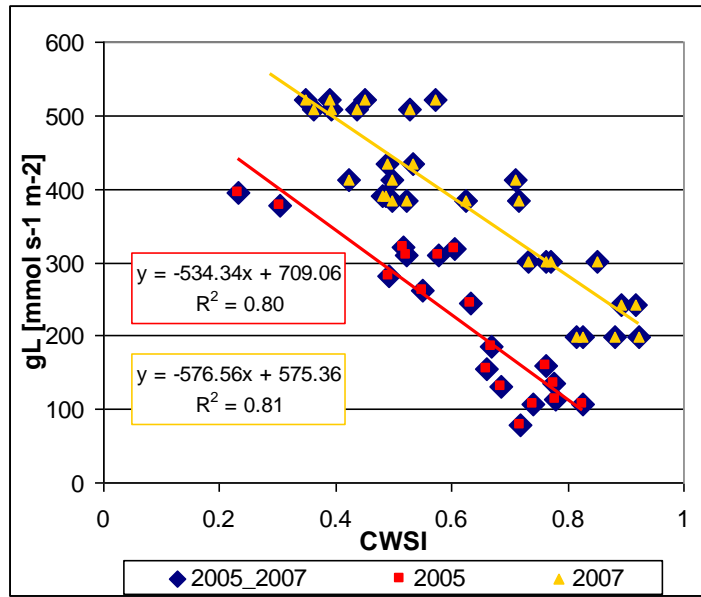
שורות הגפנים תחת ניסוי ההשקיה של קיץ 2005. ניתן לראות שלוש רמות של טמפרטורת נוף במקטעים שונים של השורה המתאימים לטיפול השקיה.

במהלך עונות הקיץ של שנת 2005 ו-2007 נרכשו צילומים תרמיים וצילומים באור הנראה (RGB) של אזור הניסוי. הצילומים בוצעו בארבעה מועדים מקבילים בכל עונה. ב-2005 הצילומים נרכשו מגובה של כ-20 מ' באמצעות העמדת המצלמות על גבי מנוף. ב-2007 הצילומים בוצעו מגובה של 10 מטר ממיתקן אשר נבנה במיוחד ואשר מאפשר צילום תוך כדי נסיעה. כל צילום כיסה שטח של 6X6 מ' ברזולוציה של 2 ס"מ. במקביל לצילומים בוצעו מדידות של מוליכות פיוניות ופוטנציאל מים בגזע וכן נאספו מדידות מטאורולוגיות כל דקה של טמפ' אויר, לחות, קרינה ומהירות רוח. מדד העקה התרמי Crop Water Stress Index (CWSI) חושב על-פי טמפרטורת העלווה כפי שהופקה מהצילומים התרמיים, טמפרטורת האויר (בתוספת חמש מעלות) וטמפרטורת משטח ייחוס מלאכותי. איורים 2 ו-3 מציגים את הפיזור של מדד העקה מול מוליכות פיוניות ופוטנציאל מים בגזע בהתאמה. למרות שהנתונים נרכשו בתנאים מטאורולוגיים שונים ובשנים שונות קיים קשר טוב בין מדד העקה התרמי ובין מוליכות פיוניות. קשר זה הינו מובהק מבחינה סטטיסטית. ניתן לראות כי השיפוע של קווי המגמה של שתי העונות כמעט זהה אך הקווים נבדלים זה מזה בחותך. לעומת זאת למרות שקשר פחות טוב נתקבל עם פוטנציאל מים בגזע הרי שנתקבלו קווי מגמה דומים לשתי השנים. בהקשר זה יש לציין כי אנשים שונים ביצעו את מדידות המוליכות בשתי השני. לעומת זאת אותו אדם ביצע את מדידות פוטנציאל המים בשתי העונות. ההבדל בחותך במקשר עם מוליכות פיוניות והדמיון בקשר עם פוטנציאל המים עשוי לנבוע מההבדלים בין האנשים המודדים.

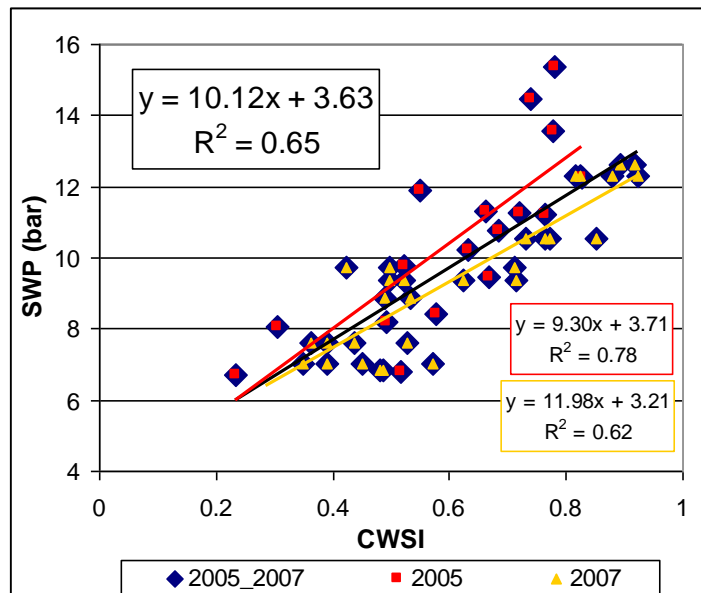
החזרה בקבלת קשרים טובים בין מדידות פיזיולוגיות ובין מדדים תרמיים בשתי שנים שונות מבססת את הפוטנציאל הגלום בשימוש בצילומים תרמיים למיפוי מצב המים בכרם ליין והשימוש העתידי בו להכוונת השקיה.



איור 1: תמונה תרמית של שלוש שורות הגפנים תחת ניסוי ההשקיה. ניתן לראות שלוש רמות של טמפרטורת נוף במקטעים שונים של השורה המתאימים לטיפול השקיה.



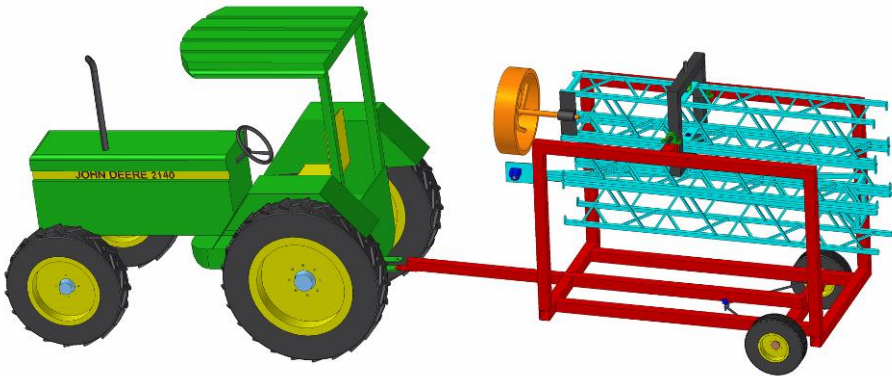
איור 2: מדד עקה תרמי CWSI מול מוליכות פיוניות. נתונים מארבעה מועדי הצילומים בקיץ 2005 ומארבעה מועדי צילום בקיץ 2007.



איור 3: מדד עקה תרמי CWSI מול פוטנציאל מים בגזע. נתונים מארבעה מועדי הצילומים בקיץ 2005 ומארבעה מועדי צילום בקיץ 2007.

מיפוי שונות טבעית

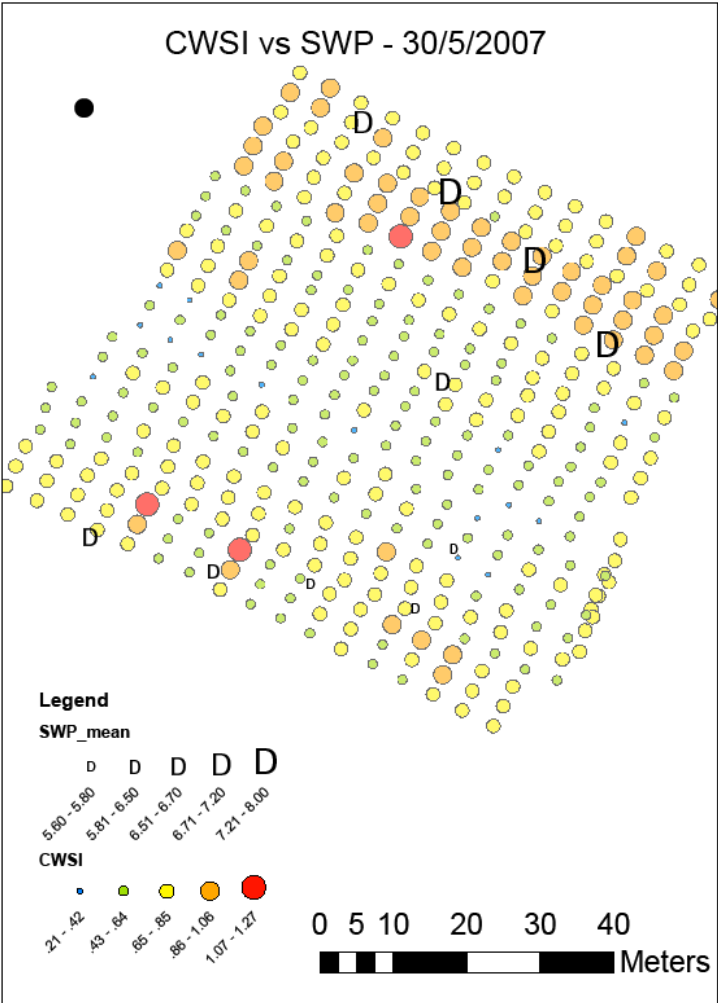
מעבר למציאת מודל המקשר בין מדד העקה ובין מדדים פיזיולוגיים נעשה ניסוי למפות את השונות הטבעית במונחים של מדד העקה ללא תרגום למדד פיזיולוגי זה או אחר. ניסיון זה בוצע באמצעות סריקה קרקעית של כרם המכונה 'גן-עדן 8' בקיבוץ יראון. לצורך זה נבנה מתקן המאפשר צילום של נוף הגפנים תוך כדי נסיעה בין שורות הכרם מגובה של כ-10 מטר. המתקן רתום לטרקטור ונושא מצלמה תרמית ומצלמת RGB בקצה העליון שלו (איור 4). על מסגרת המתקן מחובר מקלט GPS הרושם את מיקום המצלמה כל רגע ורגע. כמו כן, משטח ייחוס רטוב חובר על הקצה העליון של מסגרת המתקן כך שהמשטח הופיע תמיד בתוך שדה הראיה של המצלמות.

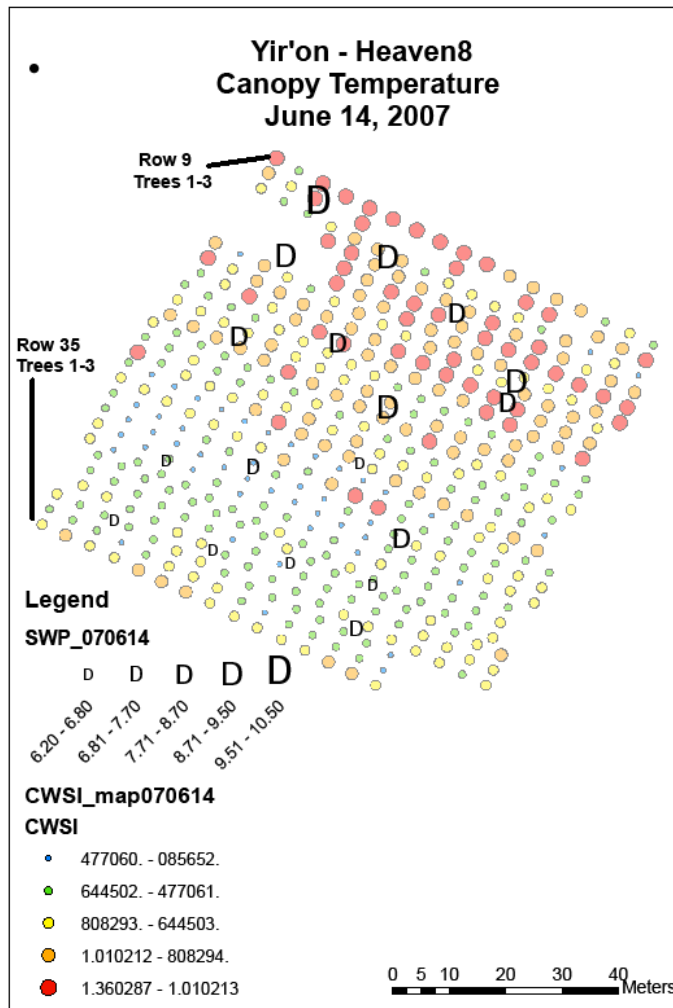


איור 4: מיתקן גובה ייעודי לצילום צילומים תרמיים ובאור הנראה תוך כדי נסיעה בכרם או בשדה. בעיגול כחול מיקום המצלמות ובעיגול אדום מיקום מערכת GPS.

תמונה בודדת כללה 3 שורות של גפנים לרחבה וכ-4 גפנים לאורך השורה. המתקן התקדם במהירות של כ-0.1 מטר לשנייה בין שורות הכרמים והוסע כל שורה שלישית. סריקה קרקעית זו בוצעה בארבעה מועדים שונים בקיץ 2007.

בסוף כל סריקה נוצר מסד נתונים שכלל: (1) תמונות תרמיות, (2) תמונות RGB, (3) נקודות ציון (GPS). מתוך מסד נתונים זה נבנתה מפה של הטמפרטורה הממוצעת של כל קבוצה של 3 גפנים לאורכו ולרוחבו של הכרם. לאחר מכן חושבו ערכי מדד העקה CWSI לכל נקודה בדומה למתואר בחלק הקודם. יש לציין כי התהליך של המיפוי הינו חצי-אוטומטי ואורך מספר שעות כך שמעת הסריקה הקרקעית ועד לקבלת מפה על פיה ניתן לקבל החלטות עוברות מספר שעות בודדות. איור 5 מציג מפות של מדד העקה משני מועדים כאשר כל נקודה במפה מייצגת את המצב הממוצע של שלוש גפנים. במקביל לצילום נמדד פוטנציאל המים בגזע במספר נקודות נבחרות. גם ערכים אלו מופו. באמצעות מיפוי של שני המדדים – מדד העקה והמדד הפיזיולוגי - ניתן לראות כי קיימת התאמה ביניהם.





איור 5: מפות מדד העקה ו-SWP בכרם 'גן-עדן' 8 בקיבוץ יראון.

על בסיס התוצאות הללו ניתן להניח כי אחת האפשרויות להכווין השקיה באמצעות צילומים תרמיים איננה דווקא באמצעות מיפוי של מדד פיזיולוגי כזה או אחר אלא אף באמצעות מיפוי השונות היחסית במדד העקה בין הגפנים במועד מסויים.

העדר האפשרות לפעול בצפון הארץ בקיץ 2006 גרם לריכוז המאמצים בנושא זה באזור המרכז אך בגידול אחר, כותנה. פיתוח מודל להערכת פוטנציאל מים בעלה מבוסס על נתונים שנאספו מתשעה ימי מדידה. שניים נערכו בשדה כותנה בקיבוץ שמיר בקיץ 2003; ארבעה בחוות גדיש בצפון בקיץ 2005; ושניים בקיבוץ רבדים בקיץ 2005. זני הכותנה בשדות היו פימה PF-15, מכלוא ופימה 008 בהתאמה.

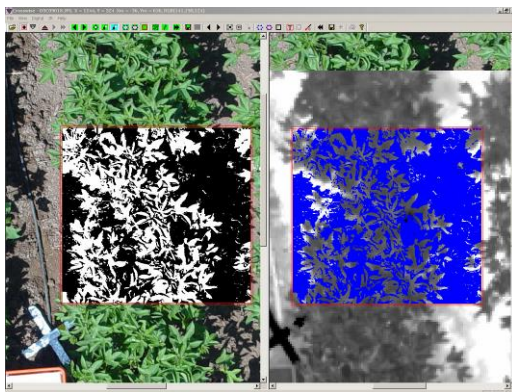
בכל שדה יושמו בין שלושה לחמישה טיפולי השקיה מבוקרים. טיפולים אלה נועדו ליצור שונות מבוקרת ויזומה בפוטנציאל המים בצמח. החלקות תחת הטיפולים השונים צולמו באמצעות מצלמה תרמית ומצלמה בנראה, מגובה של כ-20 מ' באמצעות מנוף. יש לציין כי בקיבוץ שמיר הצילום בוצע צילום תרמי בלבד מגובה של 4 מ'. בכל טיפול נבחרו במרחב הצילום 4-5 עלים המתאימים למדידת פוטנציאל המים. העלים סומנו בעזרת נייר אלומיניום (הנראה כשחור בצילום התרמי) על מנת שנוכל לזהות אותו בצילום התרמי, ולאחר הצילום הם נקטפו ופוטנציאל המים שלהם נמדד באמצעות תא לחץ. במקביל, נמדדו התנאים המטאורולוגיים השוררים בסביבת העלה: טמפרטורת אוויר, לחות יחסית, עוצמת רוח וקרירת השמש. חישוב מדד העקה (נוסחה 1) מצריך ערכי טמפ' עלה קיצוניים (Tmx) ו-(Tbase). טמפרטורה מקסימאלית (Tmx)

נקבעה על-פי טמפי' האויר בתוספת חמש מעלות וטמפרטורה מינימאלית נקבעה לפי משטח ייחוס מלאכותי ספוג במים המייצג עלה מאדה ללא הגבלה (Meron et al., 2003, US Patent 6,597,991 B1).

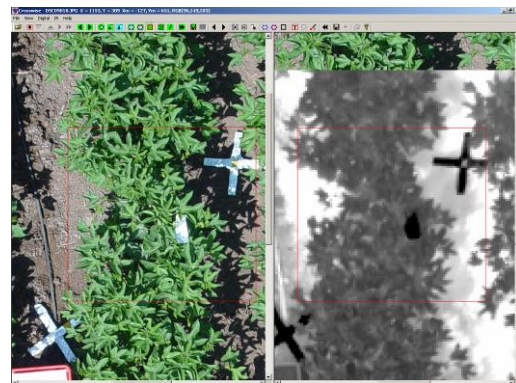
$$(1) \quad CWSI = \frac{(T_c - T_{base})}{(T_{mx} - T_{base})}$$

הצילומים התרמיים בוצעו באמצעות מצלמה תרמית מתוצרת FLIR, דגם SC2000, המצוידת בחיישן מטריצה מסוג microbolometer, בעל רזולוציה מרחבית של 320X240 נקודות, הרגיש לאורכי גל 8 – 12 מיקרו-מטר. הטמפרטורה נמדדה ברגישות של 0.1 מעלות ודיוק של 2 מעלות, כאשר הונח שהאמיסיביות של העלים הינה 0.98. התמונות התרמיות עובדו באמצעות תוכנות FLIR Inc) ThermaCamExplorer ו- ERDAS IMAGINE (Leica Inc) כמו כן פותחה תוכנה ייעודית המכונה Crosswise לשילוב בין תמונות תרמיות לתמונות בנראה. ראשית בוצע ניתוח של עלים בודדים, אשר סומנו בתמונה. טמפרטורות העלים הללו נמדדו באמצעות דגימה של מספר פיקסלים בכל עלה בתמונה התרמית. בדומה לכך נמדדה טמפרטורת משטח הייחוס. על סמך טמפרטורות אלה חושב מדד העקה CWSI לכל עלה שנדגם. בשלב הבא נבחן הקשר בין LWP ו-CWSI.

מעבר לניתוח של הקשר על בסיס עלים בודדים בוצע ניתוח לכלל הנוף במרחב כל תמונה. לשם בחירת הנוף בוצע ייחוס מרחבי של כל תמונה תרמית עם התמונה הנראה המקבילה לה (איור 6). הקרקע והעלים המוצללים זהו בתמונה בנראה ומוסכו בתמונה התרמית. לאחר המיסוך הטמפי' של העלים המוארים חושבה על בסיס התמונה התרמית. על בסיס הטמפי' של הנוף המואר חושב מדד העקה CWSI ונבחן הקשר בין LWP ובין CWSI.

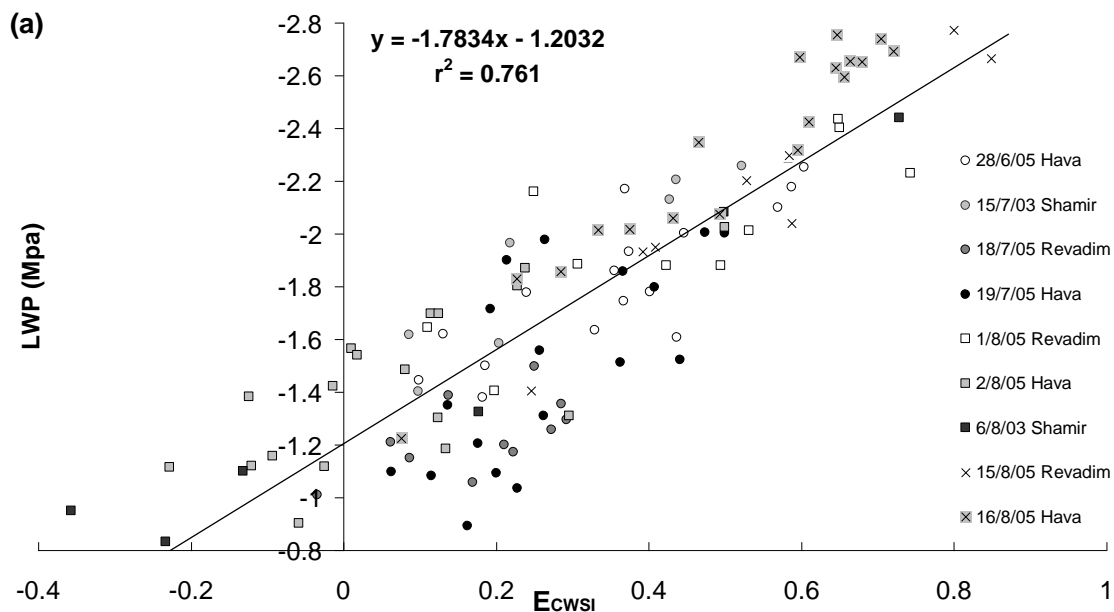


איור 6. זיהוי של קרקע חשופה ועלים מוצלים באמצעות התמונות הנראה ומיסוך שלהם במרחב התמונות התרמיות

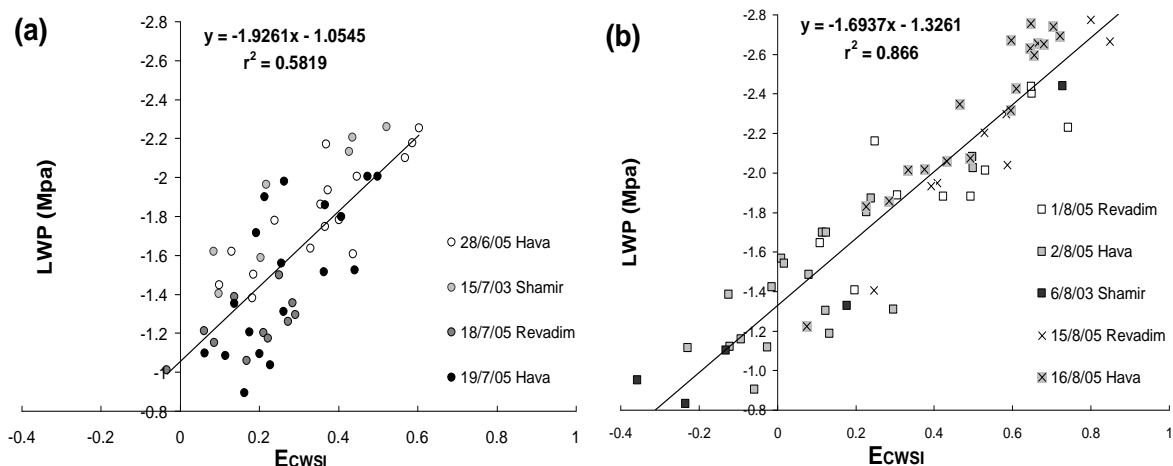


איור 7. ייחוס מרחבי של תמונות תרמיות עם תמונות בנראה באמצעות צלבים

איור 7 מציג את מדד העקה מול פוטנציאל מים מנתונים שנאספו במהלך כל תשעת מועדי הניסויים (סה"כ 117 דגימות). נראה כי כל הנתונים מתאימים למודל יחיד ללא צורך בהפרדה בין השנים, בין הזנים ובין התנאים המטאורולוגיים. עם זאת, מתוך המודל, נראה היה כי הנתונים שנלקחו במועדים מוקדמים יחסית – בשלב הפריחה יוצרים ענן והערכת פוטנציאל המים במועדים אלו על-פי המודל הנוכחי איננה טובה מספיק. על כן, החלטנו להפריד בין הנתונים משלב הפריחה ובין אלו שמשלב מילוי ההלקטים. איור 8 (a ו-b) מציגים את היחסים הנפרדים.



איור 7: מדד העקה (ציר ה-X) מול פוטנציאל מים מדוד בעלים (ציר ה-Y)



איור 8: מדד העקה מול פוטנציאל מים בתקופת הפריחה (a) ובתקופת מילוי ההלקטים (b)

איור 8 מראה כי למעשה קיימים שני מודלים נפרדים לכל תקופה. במילים אחרות, לכל תקופה מקדמי המודל הליניארי קרי השיפוע וההיסט שונים. הקשר בין פוטנציאל המים ובין מדד העקה בתקופת מילוי ההלקטים טוב יותר מאשר הקשר הכולל את הנתונים משתי התקופות וכן זה המתייחס לתקופת הפריחה. למעשה, עד תקופת מילוי ההלקטים רב ההשקיה מתבצעת על פי שינויים בגובה הצימוח ורק לאחר ההשקיה מכוונת על-פי פוטנציאל מים כך, שניתן לומר כי נמצא מודל טוב לתקופת מילוי ההלקטים שהיא התקופה הרלוונטית להכוונת השקיה באמצעות צילומים תרמיים.

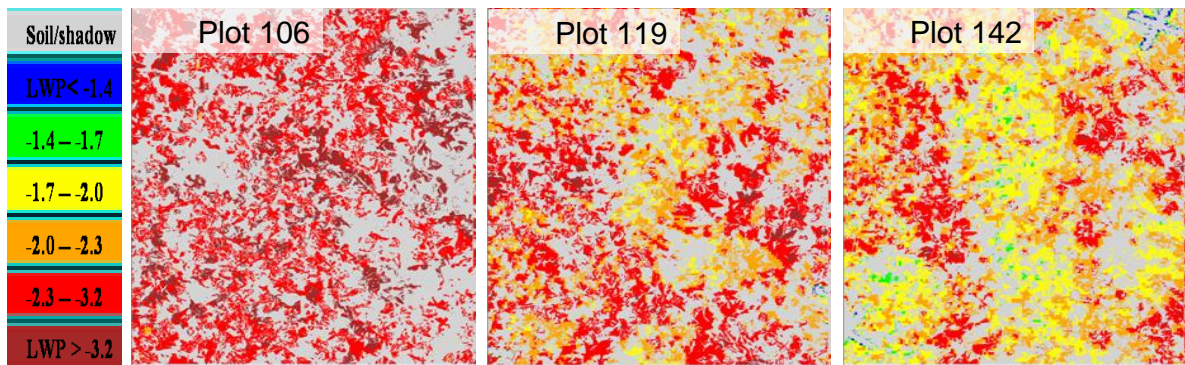
מיפוי פוטנציאל מים בכותנה באמצעות צילומים תרמיים

מכיוון שנמצא קשר משותף לכל הנתונים שנאספו משתי העונות, משלוש הזנים ומשלוש האתרים ניתן היה למפות את פוטנציאל המים באמצעות יצירה של רצף מלאכותי של הצילומים שצולמו. בנוסף, נרכשה תמונה תרמית ממטוס מעל רבדים ביולי 2006 ועל סמך המודל מופה פוטנציאל המים.

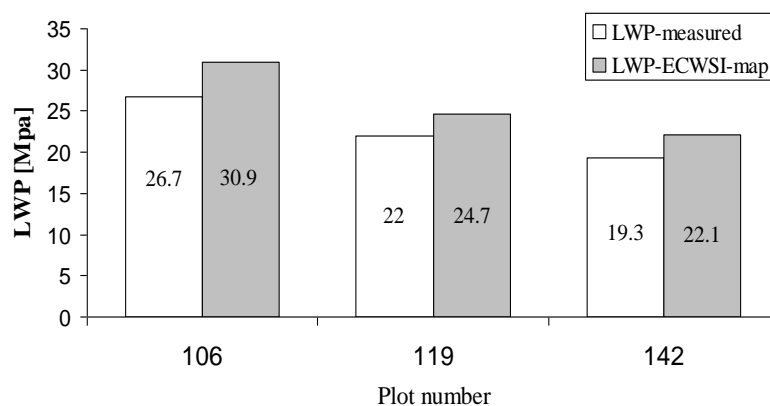
לצורך מיפוי מצב המים בשדה מוינו ערכי פוטנציאל המים שחושבו לפי צילומים תרמיים לחמש קבוצות על-פי טווחי פוטנציאל המים הבאים :

צמחים מושקים ביתר (Oir)	$LWP > -1.4 \text{MPa}$
צמחים מושקים היטב (WW)	$MPa \geq LWP > -1.7 \text{MPa}$
עקת מים מתונה (LWS)	$MPa \geq LWP > -2.0 \text{MPa}$
עקת מים בינונית (MWS)	$MPa \geq LWP > -2.3 \text{MPa}$
עקת מים ברמה גבוהה (SWS)	$MPa \geq LWP > -2.3 \text{MPa}$

איור 9 מציג מיפוי של פוטנציאל מים בעלה משלושה טיפולים ברבדים מקיץ 2005. משמאל טיפול מוצמא, באמצע טיפול בינוני ומימין טיפול השקיה משקי. ניתן לראות כי פוטנציאל המים הממופה מתאים לטיפולים. כמו כן, ניתן לראות כי למרות שמדובר באזורים קטנים יחסים הם מגלים שונות טבעית. לא מתקבל ערך יחיד של פוטנציאל מים. על מנת להעריך כמותית את המיפוי חושב הממוצע של פוטנציאל מים מחושב מול הממוצע המדוד. איור 10 מציג את ההשוואה.



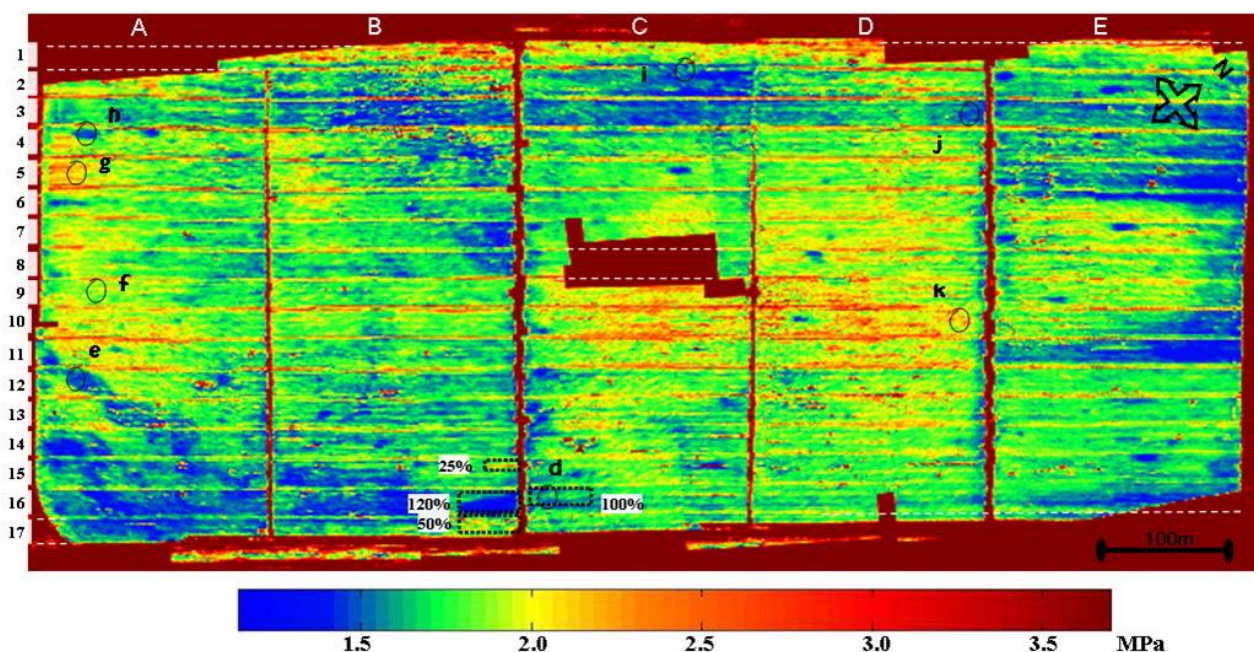
איור 9: מיפוי פוטנציאל מים של שלושה טיפולי השקיה ברבדים – קיץ 2005



איור 10: השוואה בין ממוצע פוטנציאל מים מחושב ובין ממוצע מדוד (מספר החלקה בציר ה-x; פוטנציאל מים בציר ה-y)

בקיץ 2006 ו-2007 בוצע צילום תרמי מן האוויר מעל שדות כותנה ברבדים. הטיסה בוצעה על מנת לבחון את איכות הצילום המתקבלת וכן את איכות המיפוי של פוטנציאל המים באופן גס. במקביל, בוצעו מדידות פוטנציאל מים בשדה. עיבוד מקדים של הצילומים כלל חיבור בין צילומים עוקבים ומיסוך של הקרקע

החשופה באמצעות ערך סף של טמפרטורה. לאחר העיבוד המקדים, חושב מדד העקה. טמפרטורה מקסימאלית (T_{max}) נקבעה על-פי טמפי האויר בתוספת חמש מעלות וטמפרטורה מינימאלית נקבעה לפי טמפי של 33% של הפיקסלים בעלי הטמפרטורות הנמוכות ביותר. בשלב הבא חושב פוטנציאל המים באמצעות המודל הכללי (איור 8) מכיוון התקופה הפנולוגיות של הגידול בזמן הצילום. איור 11 מציג את מיפוי פוטנציאל המים ממטוס. למרות שלא ניתן לאמת את הערכים שהתקבלו באמצעות הצילום המוטס ניתן בכל זאת לראות כי ערכי פוטנציאל המים שהתקבלו הינם ערכים סבירים למועד שבו בוצע הצילום. קיימים אזורים בעודף מים מחד (צבע כחול) או במצב מים טוב (ירוק). באזור הירוק ניתן לראות אזורים בקבוצת הסף (צהוב) שהם האזורים שיש להשקות. באמצעות הצילום והמיפוי ניתן לראות את השונות הקיימת בתוך שדה ובעתיד לכוון את ההשקיה על פי מפות אלו.



איור 11: מיפוי פוטנציאל מים באמצעות צילום תרמי מוטס מעל קיבוץ מגידו – קיץ 2007

בנוסף לכך, פותח פרוטוקול עבודה של צילום טמפרטורת העלווה, תוך כדי ריסוס מים על שורה שכנה ליצירת "משטח ייחוס נייד" שימנע את הצורך במשטח ייחוס קבוע או נייד ומסובך. לאחר הצילום הוצאו אוטומטית טמפרטורות קיצוניות כדי להימנע מקרקע חשופה ומעלי צל. (כל זאת חוסך את ה"צילום הכפול" ואת השימוש בסטטיסטיקה "מסובכת" וארוכה). בזמן המדידות היה לרוח תפקיד מפתח, השפיעה רבות על הערכים המוחלטים וגרמה להם להתפרס על טווחים גדולים. תוצאות: התקבלו תגובות טובות לטיפול ההשקיה בצילום ובתא לחץ וזוהה מצב המים בצמח עפ"י הצילום התרמי. ניתן להתייחס לכלל העלווה מבלי להשקיע זמן וסרבול בהוצאת עלי הצל. התוצאות התקבלו למועד יחיד ולא נבדקה התאמתן למועדים אחרים.

ד. מסקנות והשלכותיהן על המשך ביצוע המחקר

ניתן להעריך ולמפות את מצב המים בגפן ובכותנה באמצעות צילומים תרמיים ברזולוציה גבוהה, 2-3 ס"מ לפיקסל. המיפוי יכול להיעשות ממתקן הנוסע במרחב השדה. הכלי שתוכנן ונבנה מאפשר סריקה מהירה יותר מאשר צילומים סטטיים ממנוף, אולם ההספק הוא עדיין מתאים לצרכים ניסיוניים. איכות התמונות

שהתקבלו תוך כדי הנסיעה טובה מאוד ומאפשרת מיפוי של השדה. תוצאות המיפוי התרמי אומתו עם מדידות קרקעיות.

בגפן, נמצא קשר טוב בין אינדקס תרמי לבין מוליכות הפיוניות ופוטנציאל המים בגזע. בכותנה, נמצא קשר יציב ואוניברסאלי בין מדדים תרמיים לבין מצב המים בצמח. קשר זה טוב יותר בתקופת מילוי ההלקטים וסביר בתקופת הפריחה. יתר על כן ניתן למפות את מצב המים בצמחים באמצעות המודל שנבנה בדיוק הדומה לזה של מדידות באמצעות תא לחץ.

ניסיון ראשון עם צילום תרמי מוטס הראה שצילום מגובה של כ-500 מטר מתקבלת רזולוציה מרחבית המאפשרת מיפוי של מצב המים בצמח על סמך המודל שפותח עבור רזולוציה מרחבית עדינה יותר.

ה. פרסומים מדעיים

Moller M., Alchanatis V., Cohen Y., Meron M., Tsipris J., Naor A., Ostrovsky V., Sprintsin M. and Cohen S. (2006), Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. *Journal of Experimental Botany Vol. 58, No. 4, pp. 827–838, 2007. Imaging Stress Responses in Plants Special Issue. doi:10.1093/jxb/erl115 Advance Access publication 12 September, 2006*

V. Alchanatis, Y. Cohen, S. Cohen, M. Moller, M. Meron, J. Tsipris, V. Orlov, A. Naor, Z. Charit (2006). Fusion of IR and Multispectral Images in the Visible Range for Empirical and Model Based Mapping of Crop Water Status. 2006 ASABE Annual International Meeting, Portland, Oregon, 9 - 12 July 2006

V. Alchanatis, Y. Cohen, S. Cohen, M. Moller, M. Meron, J. Tsipris, V. Orlov, A. Naor, Z. Charit 2007. Integrated thermal and visible imaging for crop water stress assessment in a wine-grape vineyard. 14th Dahlia Greidinger Symposium, Advanced Technologies for Monitoring Nutrient and Water Availability to Plants, March 12-13, 2007, Altura Auditorium, Grand Water Research Institute Technion - Israel Institute of Technology, Haifa.

איתן סלע, יפית כהן, ויקטור אלחנתי, יהושוע סרנגה, שבתאי כהן, מרכוס מולר, משה מירון, יוסף ציפריס, ולרי אורלוב, סלבה אוסטרובסקי. הערכה ומיפוי מצב המים בכותנה באמצעות צילומים תרמיים. הכנס השנתי ה-47 של האגודה הגיאוגרפית הישראלית תשס"ז. אוניברסיטת תל-אביב, החוג לגיאוגרפיה וסביבת האדם, "הגיאוגרפיה בחברה טכנולוגית", כ"ו-כ"ח בכסלו, תשס"ז, 17.12.2006-19.12.2006

3 סיכום עם שאלות מנחות

<p>מטרות המחקר לתקופת הדו"ח תוך התייחסות לתוכנית העבודה.</p>
<p>המטרה הכללית של המחקר היא יצירת הבסיס המדעי והטכנולוגי לממשק מים של חקלאות מדייקת, המבוסס על שילוב של צילומים תרמיים וצילומים מולטי-ספקטראליים של הנוף. המטרות ספציפיות: קביעת מצב המים בגפן באמצעות מודלים אמפיריים ותיאורטיים המקשרים בין טמפרטורה העלווה ובין מדדים צמחיים כמו פוטנציאל מים ומוליכות פיוניות. פיתוח של אלגוריתמים של עיבוד תמונה וניתוח מרחבי להערכת היכולת של מיפוי מצב המים בצמח מצילומים תרמיים ומולטי-ספקטראליים.</p>
<p>עיקרי הניסויים והתוצאות שהושגו בתקופה אליה מתייחס הדו"ח.</p>
<p>בוצעו ניסוי השקיה לקבלת טווח רחב של מצבי מים בגפנים ובכותנה. פותחו מודלים של רגרסיה המקשרים בין מדד תרמי CWSI לבין מצב המים בצמח (מצב המים בצמח תואר באמצעות מדדים פיסולוגיים מקובלים). המודלים כוילו ואומתו עם נתונים ממקומות גיאוגרפיים שונים, מועדים שונים במהלך העונה ושלושה מחזורי גידול. כמוכן, נעשה ניסוי ראשוני לצילום מוטס ובניה של מפה המתארת את מצב המים בשדה ברזולוציה של חצי מטר בכותנה או גפן בודדת בכרם.</p>
<p>המסקנות המדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו. האם הושגו מטרות המחקר בתקופת הדו"ח.</p>
<p>גפן: נמצא שניתן לצלם תמונות תרמיות תוך כדי תנועה ולסרוק שדות שלמים תוך כדי יצירת מפה של טמפרטורות העלווה ומצב המים להכוונה של ההשקיה. כותנה: נמצא מודל שיציב ואוניברסאלי הקושר מדדים תרמיים למצב המים בצמח. פותחו שיטות למיפוי מצב המים על סמך מודל זה. יתר על כן, צילומים מוטסים הראו שרזולוציה מרחבית של כחצי מטר מאפשרת הערכה של מצב המים.</p>
<p>הבעיות שנתרו לפתרון ו/או השינויים שחלו במהלך העבודה (טכנולוגיים, שיווקיים ואחרים); התייחסות המשך המחקר לגביהן, האם יושגו מטרות המחקר בתקופה שנתרה לביצוע תוכנית המחקר.</p>
<p>המחקר הנוכחי הראה שניתן לקבל מפות של מצב המים באמצעות צילומים תרמיים. בהמשך, יש לבסס שיטות ליישום השקיה מונחת מקום, הן מבחינה טכנולוגית והן מבחינה חקלאית.</p>
<p>האם הוחל כבר בהפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח - יש לפרט: פרסומים – כמקובל בביבליוגרפיה, פטנטים - יש לציין מס' פטנט, הרצאות וימי עיון - יש לפרט מקום ותאריך.</p>
<p>Moller M., Alchanatis V., Cohen Y., Meron M., Tsipris J., Naor A., Ostrovsky V., Sprintsin M. and Cohen S. (2006), Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. <i>Journal of Experimental Botany</i> Vol. 58, No. 4, pp. 827–838, 2007. <i>Imaging Stress Responses in Plants Special Issue</i>. 58(4):827–838</p> <p>V. Alchanatis, Y. Cohen, S. Cohen, M. Moller, M. Meron, J. Tsipris, V. Orlov, A. Naor, Z. Charit (2006). Fusion of IR and Multispectral Images in the Visible Range for Empirical and Model Based Mapping of Crop Water Status. 2006 ASABE Annual International Meeting, Portland, Oregon, 9 - 12 July 2006</p> <p>V. Alchanatis, Y. Cohen, S. Cohen, M. Moller, M. Meron, J. Tsipris, V. Orlov, A. Naor, Z. Charit 2007. Integrated thermal and visible imaging for crop water stress assessment in a wine-grape vineyard. 14th Dahlia Greidinger Symposium, Advanced Technologies for Monitoring Nutrient and Water Availability to Plants, March 12-13, 2007, Altura Auditorium, Grand Water Research Institute Technion - Israel Institute of Technology, Haifa.</p> <p>איתן סלע, יפית כהן, ויקטור אלחנתי, יהושע סרנגה, שבתאי כהן, מרכוס מולר, משה מירון, יוסף ציפריס, ולרי אורולוב, סלבה אוסטרובסקי. הערכה ומיפוי מצב המים בכותנה באמצעות צילומים תרמיים. הכנס השנתי ה-47 של האגודה הגיאוגרפית הישראלית תשס"ז. אוניברסיטת תל-אביב, החוג לגיאוגרפיה וסביבת האדם, "הגיאוגרפיה בחברה טכנולוגית", כ"ו-כ"ח בכסלו, תשס"ז, 17.12.2006- 19.12.2006</p> <p>Sela, E., Y. Cohen, V. Alchanatis, Y. Saranga, S. Cohen, M. Möller, M. Meron, A. Bosak, J. Tsipris and V. Orolov. 2007, Thermal imaging for estimating and mapping crop water stress</p>

in cotton. European Conference in Precision Agriculture, June 2007, Skiathos, Greece. pp: 365-371.

פרסום הדו"ח: אני ממליץ לפרסם את הדו"ח: (סמן אחת מהאופציות)

רק בספריות

ללא הגבלה (בספריות ובאינטרנט)

חסוי לא לפרסם