

מיפוי פוטנציאל מים בכותנה באמצעות צילומים תרמיים

על-ידי

יפית כהן, ויקטור אלחנתי,

המכון להנדסה חקלאית, מנהל המחקר החקלאי

אשר אייזנקוט, אברהם זילברמן, יגאל פלש

שה"ס

א. תקציר

הצגת הבעיה: בקרת ההשקיה המקובלת בגידול כותנה בישראל היא באמצעות מדידת השינוי היומי בגובה של הצמחים עד סוף חודש יולי. מחודש יולי ואילך בקרת ההשקיה מתבצעת על-פי מדידות של פוטנציאל מים בעלה בשעות הצהריים באמצעות תא-לחץ. אמצעים אלו נבחנו בעבר במספר רב של ניסויים ונמצאו כאמצעים טובים יעילים זולים ואמינים. אפיון מצב המים בשדה כולו נעשה באמצעות מדידה של מספר עלים והשדה כולו מושקה על-פי מדידות אלו. בשיטה זו לא נלקחת בחשבון השונות הקיימת בשדה וניתן לשער כי ערך פוטנציאל המים של העלים הנדגמים איננו מאפיין בצורה ראויה את מצב השדה כולו.

מהלך ושיטות עבודה: א. צילומים תרמיים מגובה מעל שדות כותנה תחת טיפולי השקיה שונים באזורים גיאוגרפיים שונים; ב. פיתוח מודלים יציבים להערכת פוטנציאל מים בעלה באמצעות צילומים תרמיים. **תוצאות עיקריות:** א. פותח הליך לשילוב צילומים תרמיים ובנראה לבחירת עלווה מוארת או למיסוך רקע, קרקע ועלים בצל; ב. נבחנו קשרים בין מדד העקה בהתבססות על ערכים מחושבים ומדודים ובין פוטנציאל המים בעלה; ג. נמצאו מודלים לכיול נפרדים לתקופה הוודטטיבית ולתקופת מילוי ההלקטים; ד. פותח הליך ראשוני לצילום ולמיפוי שטחים נרחבים מהקרקע; ה. נבחנה היכולת למיפוי פוטנציאל מים באמצעות צילום תרמי מוטס.

ב. מבוא

בקרת ההשקיה המקובלת בגידול כותנה בישראל היא באמצעות מדידת השינוי היומי בגובה של הצמחים עד סוף חודש יולי. מחודש יולי ואילך בקרת ההשקיה מתבצעת על-פי מדידות של פוטנציאל מים בעלה בשעות הצהריים באמצעות תא-לחץ. אמצעים אלו נבחנו בעבר במספר רב של ניסויים ונמצאו כאמצעים טובים יעילים זולים ואמינים. אפיון מצב המים בשדה כולו נעשה באמצעות מדידה של מספר עלים והשדה כולו מושקה על-פי מדידות אלו. בשיטה זו לא נלקחת בחשבון השונות הקיימת בשדה וניתן לשער כי ערך פוטנציאל המים של העלים הנדגמים איננו מאפיין בצורה ראויה את מצב השדה כולו. על-מנת לאפיין את השונות במצב משק המים בתוך השדה יש לבצע מדידות גובה או פוטנציאל מים בעלים רבים. לייצוג השונות בשדה שלוש יתרונות. ראשית, הערכת המצב בשדה כולו בצורה אמינה ומדויקת יותר וכך לקבל החלטות לכמויות ולעיתוי השקיה המתאימות יותר למצב בשדה כולו. שנית, הן מאפשרות לאתר אזורים חריגים הדורשים טיפול מיוחד – תיקון תקלות וכדומה. יתרון אחרון הוא היכולת לחלק את השדה לאזורי מימשק השקיה שונים אשר בעתיד יוכלו לקבל טיפול שונה באמצעות טכנולוגיות השקיה מתקדמות.

צילום אווירי מאפשר קבלת מידע מרחבי בקנה מידה מקומי ואזורי. המידע המרחבי שמתקבל מצילומים מוטסים תלוי בסוג המצלמה בה משתמשים. מיפוי של גובה הצמח יכול להתבצע באמצעות צילום בתחום הנראה והאינפרא-אדום הקרוב (אא"ק; NIR) ואילו מיפוי פוטנציאל מים דורש צילום בתחום התרמי. צילום בתחום הנראה ובתחום ה-NIR מאפשר חישוב של אינדקס הצומח Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) אשר לו מיתאם גבוה עם הכיסוי הצמחי. לכיסוי הצמחי מיתאם גבוה עם גובה הצמחים. צילום אווירי מסוג זה הינו זול וזמין ומספק צילומים ברזולוציה קרקעית מאוד גבוהה וכך יכול להוות חלופה למידגם של עלים בודדים ולייצג את השונות בשדה. בשנים האחרונות התפתחה והפכה זמינה יותר הטכנולוגיה של צילום תרמי. באמצעות צילום תרמי ניתן לאמוד את טמפרטורת העלווה במרחב השדה שלה מיתאם טוב עם מצב המים בצמח או פוטנציאל המים בעלה. באמצעות צילומים תרמיים מוטסים ניתן לקבל מפה המתארת את שונות מצב משק המים בו. להבדיל מהשימוש הנרחב בעולם ב-NDVI לחיזוי הכיסוי הצמחי בגידולים שונים בחינת הקשר בין טמפרטורה המתקבלת באמצעות צילום תרמי ובין פוטנציאל המים בעלה נמצא בתחילת הדרך. בנוסף, המצלמות התרמיות הן עדיין יקרות ובעלות רזולוציה קרקעית נמוכה. לפיכך, יעילותו של צילום תרמי מוטס צריכה עוד להיבחן לפני שניתן יהיה ליישם לבקרת השקיה. לאור זאת, במסגרת שנה זו רצינו לבחון את האפשרות לשימוש בצילומים מוטסים בתחום הנראה וה-NIR למיפוי של כיסוי הצומח ומעקב אחר השינוי בכיסוי הצמחי. כמו כן, עשינו שימוש בצילומים תרמיים מגובה של כ-20 מטר לפיתוח מודל להערכת פוטנציאל המים בעלה.

ג. עיקרי הפיתוחים בתקופת הדו"ח

ג1. צילומים בנראה ובא"א הקרוב למיפוי של כיסוי הצומח

במהלך קיץ 2006 רכשנו שלושה צילום בנראה ובא"א הקרוב מעל שדות הניסוי במועדים: 18/6; 3/7 ו-10/7. שני הצילומים הראשונים התקבלו בפורמט זהה ואילו השלישי התקבל בפורמט שונה. ניתוח אינדקס הצומח הראה כי קיימת עליה בערכי אינדקס הצומח בין המועד הראשון לשני כפי שצפוי. לעומת זאת, ניתוח ערכי האינדקס במועד השלישי הראו על ירידה – נתון שלא מתאים להתקדמות הצימוח של הכותנה. ניסינו להתאים את איכות הצילומים אחד לשני אך כרגע ללא הצלחה. ויתרנו על הניתוחים של עונת 2006 ואנו נערכים לצילומים לעונת 2007 שיבוצעו הפעם באמצעות חברת אופק שהיא חברה ותיקה וידועה בצילומים מולטי-ספקטראליים מוטסים.

ג2. פיתוח מודל להערכת פוטנציאל מים בעלה באמצעות צילומים תרמיים

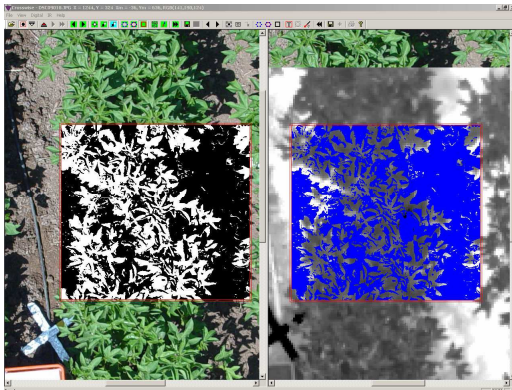
פיתוח המודל להערכת פוטנציאל מים בעלה מבוסס על נתונים שנאספו מתשעה ימי מדידה. שניים נערכו בשדה כותנה בקיבוץ שמיר בקיץ 2003; ארבעה בחוות גד"ש בצפון בקיץ 2005; ושניים בקיבוץ רבדים בקיץ 2005. זני הכותנה בשדות היו פימה PF-15, מכלוא ופימה 008 בהתאמה. בכל שדה יושמו בין שלושה לחמישה טיפולי השקיה מבוקרים. טיפולים 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 טמפ' האוויר 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).

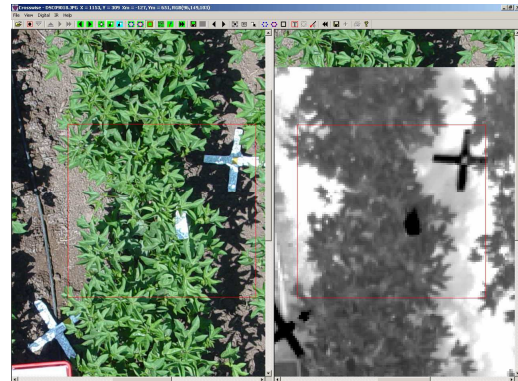
$$(1) \quad CWSI = \frac{(Tc - Tbase)}{(Tmx - Tbase)}$$

הצילומים התרמיים בוצעו באמצעות מצלמה תרמית מתוצרת FLIR, דגם P545, 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 תוכנת 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 1). הקרקע והעלים המוצללים זהו בתמונה בנראה ומוסכו בתמונה התרמית. לאחר המיסוך הטמפ' של העלים המוארים חושבה על בסיס התמונה התרמית. על בסיס הטמפ' של הנוף המואר חושב מדד העקה CWSI ונבחן הקשר בין LWP ובין CWSI.



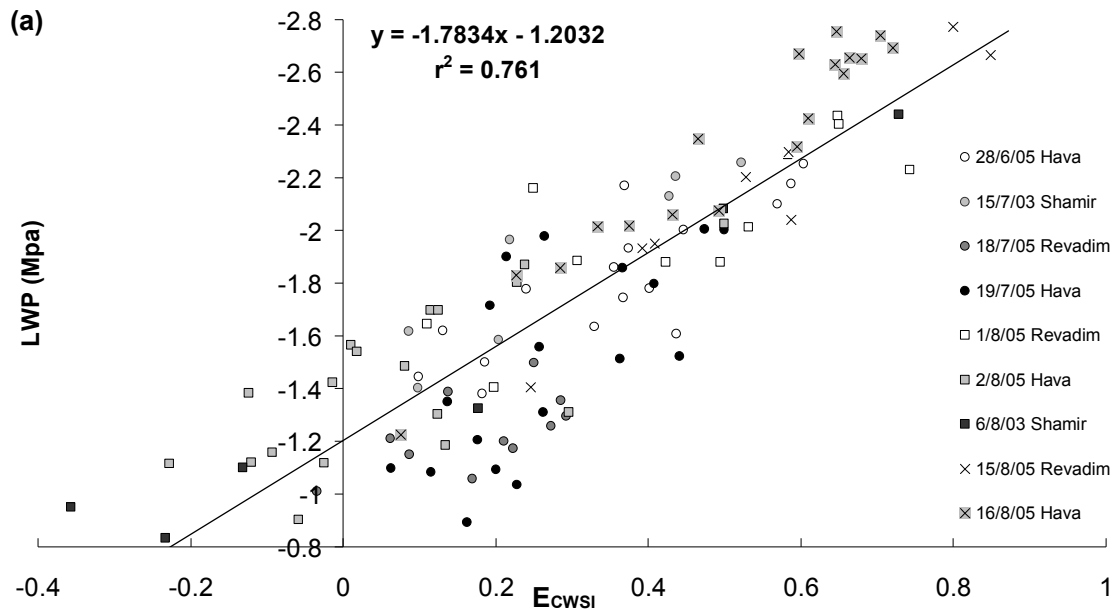
איור 1ב. זיהוי של קרקע חשופה ועלים מוצלים באמצעות התמונות הנראה ומיסוך שלהם במרחב התמונות התרמיות



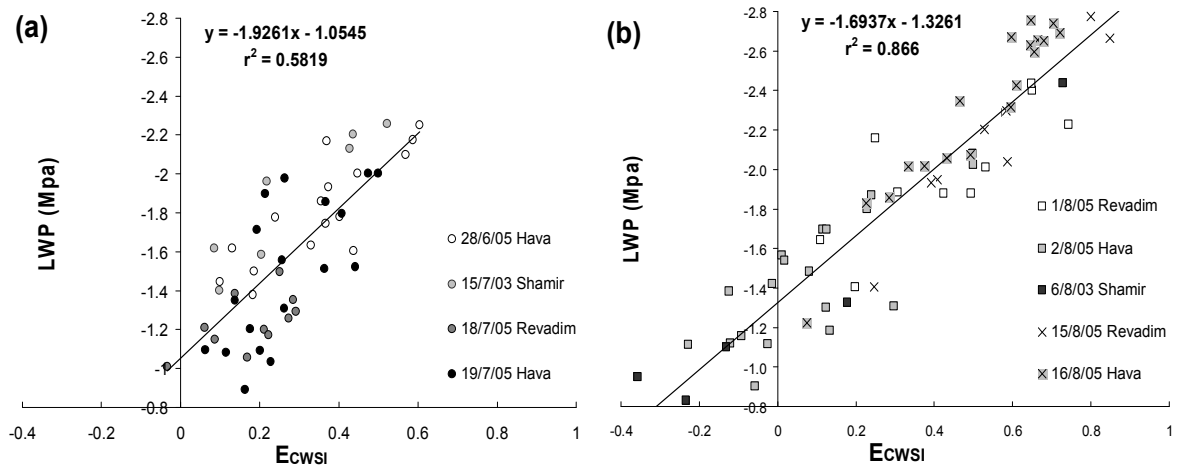
איור 1א. ייחוס מרחבי של תמונות תרמיות עם תמונות בנראה באמצעות צלבים

איור 2 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 3 (a-b) מציגים את היחסים הנפרדים.



איור 2: מדד העקה (ציר ה-X) מול פוטנציאל מים מדוד בעלים (ציר ה-Y)



איור 3: מדד העקה מול פוטנציאל מים בתקופת הפריחה (a) ובתקופת מילוי ההלקטים (b)

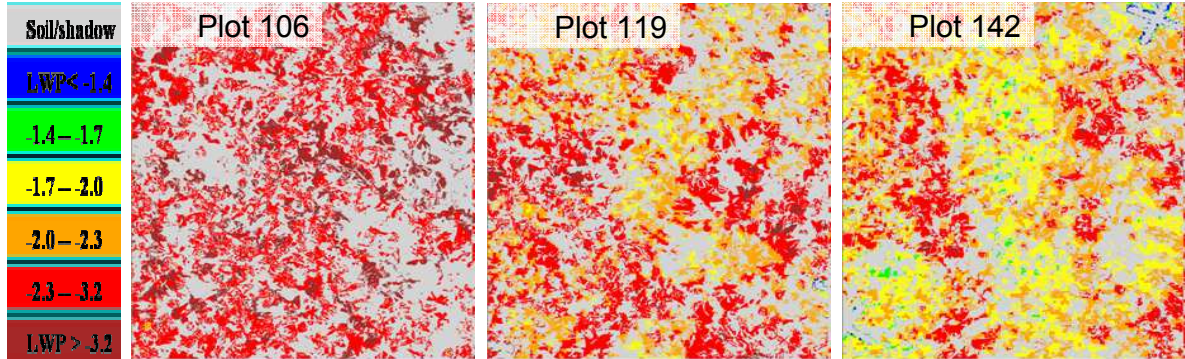
איור 3 מראה כי למעשה קיימים שני מודלים נפרדים לכל תקופה. במילים אחרות, לכל תקופה מקדמי המודל הליניארי קרי השיפוע וההיסט שונים. הקשר בין פוטנציאל המים ובין מדד העקה בתקופת מילוי ההלקטים טוב יותר מאשר הקשר הכולל את הנתונים משתי התקופות וכן זה המתייחס לתקופת הפריחה. למעשה, עד תקופת מילוי ההלקטים רב ההשקיה 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.

ג3. מיפוי פוטנציאל מים בכותנה באמצעות צילומים תרמיים

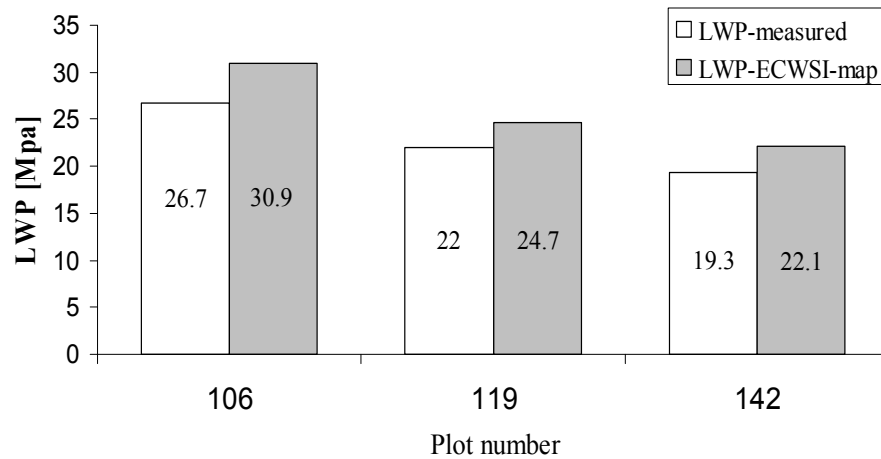
מכיוון שנמצא קשר משותף לכל הנתונים שנאספו משתי העונות, משלוש הזנים ומשלוש האתרים ניתן היה למפות את פוטנציאל המים באמצעות יצירה של רצף מלאכותי של הצילומים שצולמו. בנוסף, נרכשה תמונה תרמית ממטוס מעל רבדים ביולי 2006 ועל סמך המודל מופה פוטנציאל המים. לצורך מיפוי מצב המים בשדה מוינו ערכי פוטנציאל המים שחושבו לפי צילומים תרמיים לחמש קבוצות על-פי טווחי פוטנציאל המים הבאים:

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

איור 4 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 5 מציג את ההשוואה.

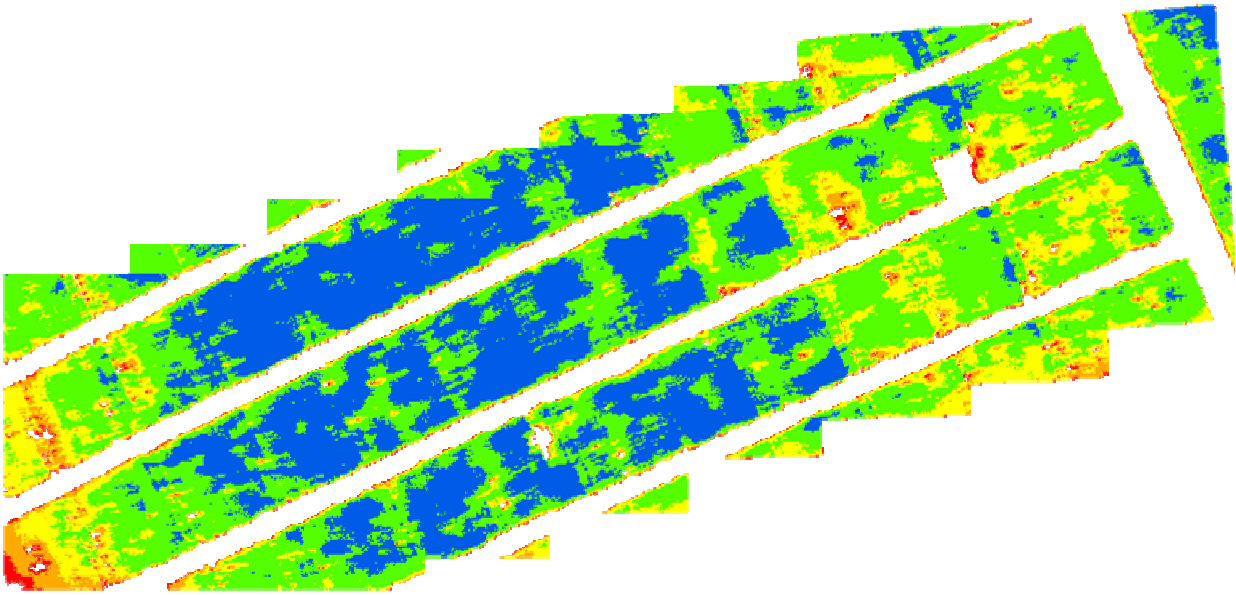


איור 4: מיפוי פוטנציאל מים של שלושה טיפולי השקיה ברבדים – קיץ 2005



איור 5: השוואה בין ממוצע פוטנציאל מים מחושב ובין ממוצע מדוד (מספר החלקה בציר ה-x; פוטנציאל מים בציר ה-y)

ב-6/7/2006 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. מכיוון שלא היינו בטוחים לגבי איכות הצילום ואיכות המיפוי לא 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_{mx}) 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 2) מכיוון שבזמן הניתוח עוד לא הפרדנו בין שתי התקופות הפנולוגיות. איור 6 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. רב האזור והממופה הינו בעודף מים מחד (צבע כחול) או במצב מים טוב (ירוק). באזור הירוק ניתן לראות אזורים קטנים הנמצאים 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 6: מיפוי פוטנציאל מים באמצעות צילום תרמי מוטס מעל קיבוץ רבדים – קיץ 2006
(הצבעים הם לפי החלוקה באיור 4)

ד. כיוונים להמשך המחקר

חוסר ההצלחה למיפוי גובה הצומח באמצעות צילומים בנראה ובא"א הקרוב מחייב אותנו להיערך טוב יותר השנה ולבצע את הצילומים באמצעות חברה אמינה ובעת ניסיון. לכן בעונה הקרובה בעז"ה נבצע מספר צילומים (בין שלושה לשישה – כתלות בתקציב) בשלבים הראשונים של הגידול – קרי עד שלב מילוי ההלקטים (בין תחילת יוני עד אמצע יולי). בנוסף, נבצע כארבעה צילומים תרמיים ממנוף לאורך שלב מילוי ההלקטים (מאמצע יולי עד סוף אוגוסט). צילומים תרמיים ממטוס הינם יקרים יותר מאשר צילומים בנראה ובא"א הקרוב ולכן מספרם גם הוא יהיה תלוי בתקציב – בכל מקרה לפחות צילום אחד ייעשה במקביל לאיסוף נתונים מהשדה.