

הערכת השימוש בתצלומי לוויין לצורך הגברת יעילות השקיה בכותנה

מוגש למועצת הכותנה

עופר בארי¹ יפית כהן², ויקטור אלחנתי², שי מיטל¹
חברת אגם¹; המכון להנדסה חקלאית, מרכז וולקני²

תקציר

הגברת היעילות בהשקית כותנה מחייבת קבלת נתונים מכלל שטח טקט ההשקיה ולא מנקודות בודדות כפי שיכול להתבצע במדידות של תא לחץ. לצורך כך, בחנו שיטת העבודה המשתמשת באיסוף נתונים ממספר קטן של טקטים וכיול הדמאות לוויין כך שיציגו את הנתונים לכל הטקטים באזור המחקר. תוצאות של שלוש שנות המחקר מראות שמדד NDWI, העושה שימוש בערוצי האינפרה-אדום-קרוב והאינפרה-אדום-בינוני, הוא הטוב ביותר למטרה זאת, ואחוז הטעות קטן מ-8%, כמקובל במחקרים כאלו. העלות למוצר כזה מוערכת כ- 2-4 ש"ח לדונם לעונת גידול, כאשר עליה במספר הדונמים, תקטין את העלות לדונם.

מבוא

הגברת היעילות בהשקית כותנה על-ידי שימוש בחישה מרחוק הוצגה במספר רב של מחקרים, בהם נעשה שימוש באינדקסים ספקטראלים של ביומסה ($NDVI = \text{normalized difference vegetation index}$) בשילוב עם נתוני מזג אוויר (Hunsaker, et al. 2005) או חישה טרמלית (Moran et al, 1994. Moran et al, 1994). בנוסף, נעשה שימוש נרחב בחישה טרמלית בלבד לצורך הערכה ומיפוי מצבי מים בכותנה ואף הכוונת ההשקיה (Jackson et al. 1981. Cohen et al., 2014). בשנים האחרונות רוכז מחקר בארץ לפיתוח כלי להכוונת השקיה בכותנה באמצעות צילומים תרמיים מוטסים (Rosenberg et al., 2014; רוזנברג, 2016). לצד ההצלחה בפיתוח שיטת עבודה זאת, נותרה מגבלת הכיסוי, קרי, כ-2000 דונם ביום וממנה נגזרות עלויות עונתיות גבוהות שאינן כלכליות. הגדלת שטח הכיסוי יכולה להיעשות על-ידי מידע מלוויינים באמצעות שילוב של תחום ה- SWIR (short-wave-infra-red) הנמצא בין 1000 ל-2500 ננומטר ומכוסה על ידי שני הלוויינים Landsat ו-Sentinel 2. שילוב של תחום זה עם ערוץ האינפרה-אדום הקרוב מאפשר לחשב מדד חדש, NDWI (normalized difference water index), המשמש למיפוי לחות בצמחיה טבעית ובגידולי שדה (Gao, 1996). מטרת מחקר זה היא להעריך את יעילות השילוב של מידע הקיים בדימותי לוויין למיפוי מצב המים בשדות כותנה ולכמת את העלות הכספית למוצר זה. לצורך כך בדקנו את ההתאמה הסטטיסטית ואת דיוק הכיול בין שלושה אינדקסים ספקטראלים, NDWI, TNDVI, NDVI, לפוטנציאל המים בעלה (פמ"ע) כפי שחושב באמצעות צילומים תרמיים מוטסים וקרקעיים מעל שדות כותנה..

שיטות

מיפוי נתוני פמ"ע באמצעות צילומים תרמיים מוטסים וקרקעיים מוסבר בפירוט רב במחקרים קודמים שבוצעו בארץ (Rosenberg et al., 2014; Cohen et al., 2014; רוזנברג, 2016). בנוסף, במהלך העונה האחרונה בוצעו צילומים תרמיים מן הקרקע במספר שדות כותנה במגידו במתכונת דומה לזו המתוארת ברזנברג (2016) שנעשתה ברבדים ב-2014. טבלה 1 מציגה את התאריכים והמקומות בהם בוצעו הצילומים וכן את מועדי דימותי הלויין הסמוכים להם בזמן. בטבלה מוצגים רק המועדים בהם ההפרש בין מועד הצילום המוטס/הקרקעי לדימותי לויין לא היה יותר מיום. למרות שהצילומים התרמיים ספקו נתונים ברזולוציה של עד חצי מטר, ההשוואה נעשתה בעיקר ברמה של יחידות השקיה (טקט), קרי, לכל יחידת השקיה חושב ממוצע ערך הפמ"ע (על בסיס הצילומים התרמיים) או ערך המדד הספקטרי (על בסיס דימותי הלויין).

טבלה 1 – איסוף הנתונים

מספר שדות	השוואה בין מיפוי קרקעי למיפוי דרך לויין	הדמא ת לויין	צילום תרמי	מיקום	שנה
1	טקט (ממוצע) לטקט (ממוצע)	פיקסל לפיקסל	12/8	11/8 - מוטס	2013 גבעת ברנר
2	טקט (ממוצע) לטקט (ממוצע)		23/7	24/7	2014 רבדים
2	טקט (ממוצע) לטקט (ממוצע)		30/7	31/7	
4	טקט (ממוצע) לטקט (ממוצע)	פיקסל לפיקסל	8/8	7/8	
3	טקט (ממוצע) לטקט (ממוצע)	פיקסל לפיקסל	15/8	14/8	
4	טקט (ממוצע) לטקט (ממוצע)		11/8	11/8	2015 מגידו

מדדים ספקטראליים - דימותי Landsat הורדו מתוך אתר ה-USGS (<http://earthexplorer.usgs.gov>) ועברו עיבוד תמונה הכולל הפחתת המינימום כדי לצמצם הפרעות האטמוספירה והכנת שלושת המדדים הספקטראליים הבאים:

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red) \quad (1)$$

$$T-NDVI = ((T - T_{min}) / (T_{max} - T_{min})) / NDVI \quad (2)$$

$$NDWI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR) \quad (3)$$

כאשר NIR, T, Red, SWIR הינם ערוצי האינפרא-אדום-קרוב, האדום, הטרמלי והאינפרא-אדום-בינוני, בהתאמה.

ניתוח סטטיסטי - בכל מועד נבדקה ההתאמה הסטטיסטית בין נתוני פמ"ע ונתוני המדדים הספקטראליים, הן ברמת הנקודה (בחלק מן המקרים) והן ברמת יחידת ההשקיה (בכל המקרים). ברמת הנקודה, כל נקודות הפמ"ע שהיו בתוך פיקסל אחד של Landsat אוחדו על-ידי מיצוע לנתון בודד. ברמת יחידת ההשקיה, כל נקודות הפמ"ע וכל הפיקסלים אוחדו על-ידי מיצוע.

בנוסף, בכל מועד נעשה כיוול של כל אחד מהאינדקסים הספקטראליים לנתוני פמ"ע משליש מספר יחידות ההשקיה. לצורך הכויל נבחרו הערכים שיצגו את המינימום, המקסימום והחציון בכל מועד. כיוול זה הוחל על נתוני המדדים מיחידות ההשקיה הנוספות לאותו מועד צילום, כך שלכל יחידת השקיה היו נתוני פמ"ע מחושבים לפי המדדים הספקטראליים. נתונים אלו הוצלבו עם נתוני הפמ"ע. לכל מועד חושבו ההתאמה הסטטיסטית (r^2) ואחוז הטעות המוחלטת הממוצעת לפי הנוסחה הבאה:

$$\text{Error\%} = \sum \text{absolute} ((x_1 - x_2) / x_2) \quad (4)$$

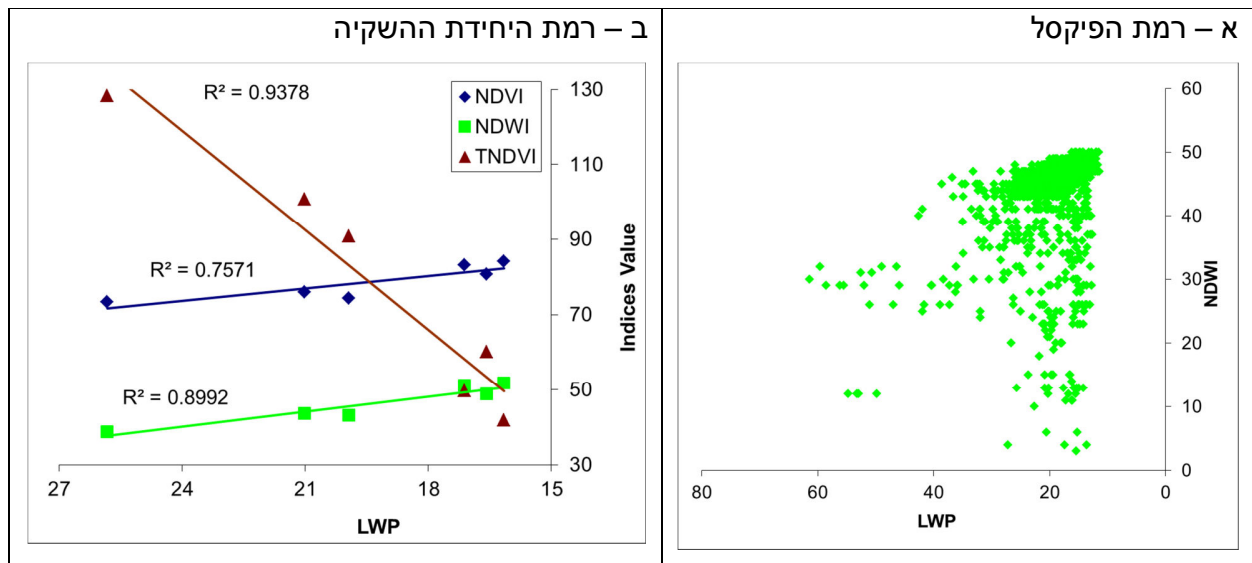
כאשר x_1 הינו ערכי פמ"ע מחושבים על-ידי הדמאת הלווין ו- x_2 הוא ערכי פמ"ע לפי הצילומים התרמיים.

תוצאות

התאמה סטטיסטית (r^2) – ההתאמה הסטטיסטית בין נתוני כל אחד מהמדדים ונתוני פמ"ע ברמת הפיקסלים מראים על קוראלציות מאוד נמוכות (איור 1א וטבלה 1). ברמת יחידת ההשקיה הושגו מתאמים הרבה יותר גבוהים (איור 1ב וטבלה 1). הדבר נובעת מכמה סיבות אפשריות, כגון טעות במיקום בין הפיקסלים של הלווין לנקודות המדידה או אקראיות הטעות הגורמת לכך שמיצוע הנתונים ברמת הטקט מצמצמת אותן. נתוני הקורלציה הגבוהים יותר ברמת יחידת ההשקיה מלמדים על הצורך להשתמש ברמה זאת לצורך הכוונת השקיה, בעוד שמפה ברמת הפיקסל יכולה לכוון סיור ממוקד להבנת השונות בתוך השדה.

בחינת תוצאות ההתאמה ברמת יחידת ההשקיה (טבלה 1), מראה שלמדד NDVI יש התאמה נמוכה יותר מלשניים האחרים ברוב המקרים, מכאן שהוא מייצג פחות טוב את השונות המרחבית בפמ"ע. ההסבר לחוסר הנתונים של TNDVI באוגוסט 2015 הוא עננות באזור המחקר שאמנם לא היתה ישירות על נתוני המחקר אך השפיעה על הערוץ התרמלי ושיבשה נתוני אינדקס זה.

איור 1 – התאמה בין פמ"ע מחושב באמצעות צילום תרמי מוטס ומדדים ספקטראליים, 11/8/2013



טבלה 1. נתוני קוראלציה בין פמ"ע מחושב ומדדים ספקטראליים, לפי מועדי הצילום

r^2 ברמת הטקט				r^2 ברמת הפיקסל					
TNDVI	NDWI	NDVI	n	TNDVI	NDWI	NDVI	n		
0.94	0.90	0.76	6	0.10	0.11	0.11	306	11/8	2013
0.69	0.37	0.47	6					24/7	2014
0.68	0.89	0.00	5					31/8	
0.41	0.60	0.92	12	0.11	0.02	0.03	93	7/8	
0.64	0.81	0.86	8	0.21	0.23	0.19	52	14/8	
	0.75	0.50	11					11/8	2015

כיול והערכת טעות הכיול – הרמות הגבוהות של ההתאמה הסטטיסטית מאפשרות לכייל את נתוני Landsat לערכי פמ"ע, ולחשב את הטעות לכל אחד מהמדדים הספקטראליים (טבלה 2). כזכור, הכיול נעשה על-ידי הכנת נוסחת רגרסיה בכל מועד מנתונים משליש ממספר יחידות ההשקיה, וחישוב פמ"ע לשאר היחידות לפי נתוני המדדים הספקטראליים. השוואה בין הנתונים המדודים לאותם הטקטים והנתונים המחושבים (טבלה 2) מראה שלכל אחד משלושת האינדקסים יש ברוב המקרים r^2 גבוה מ-0.5 ואחוז טעות מתחת ל-15% (אחוז הטעות המקובל במחקרי חישה מרחוק. Sabins, 1986).

טבלה 2. נתוני קוראלציה ואחוזי הטעות בין פמ"ע מחושב על בסיס צילומים תרמיים לפמ"ע מחושב לפי הכיול מדימותי לוויין

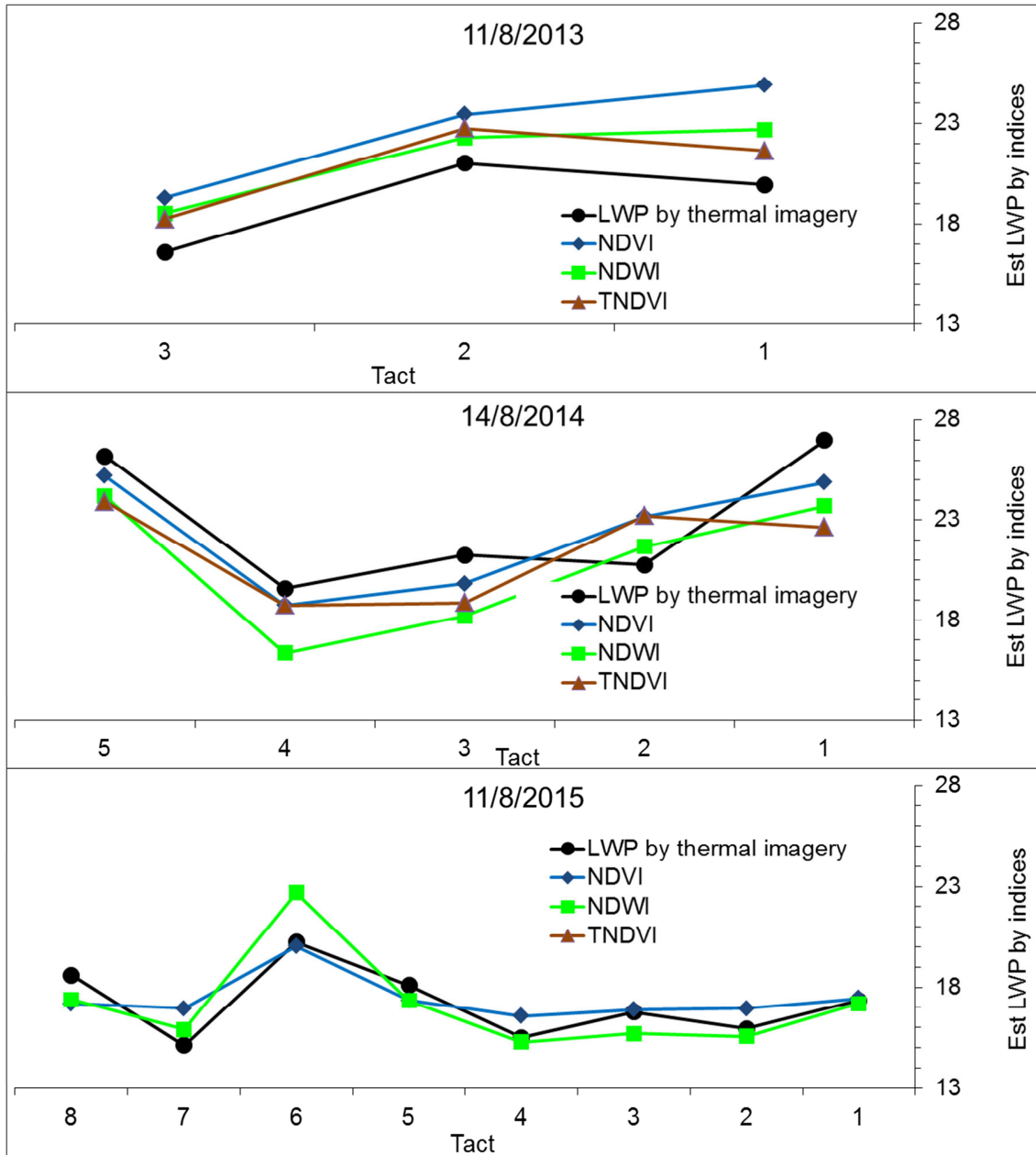
אחוז הטעות המוחלט הממוצע			r^2			n	מועד	שנה
TNDVI	NDWI	NDVI	TNDVI	NDWI	NDVI			
9.0	10.5	17.6	0.99	0.90	0.78	3	11/8	2013
3.5	5.2	13.1	0.67	0.46	0.32	3	24/7	2014
7.5	3.3	9.5	1.00	1.00	1.00	2	31/7	
13.8	12.3	7.1	0.06	0.22	0.95	8	7/8	
6.2	7.3	6.8	0.45	0.75	0.73	5	14/8	
	4.9	4.9		0.88	0.55	8	11/8	2015

n – מספר יחידות ההשקיה ששימשו לתיקוף המודל

סיכום כל אחוזי הטעות המוחלטת הממוצעת מכל ששת המועדים ($n = 29$), מגלה שאחוזי הטעות הנמוכים ביותר הן של NDWI, עם 7.8% (סטית תקן של 5.3%) ואחר כך NDVI עם 8.3% (סטית תקן – 6.0%) וה-TNDVI עם 9.2% (סטית תקן – 7.5%)

הדגמה לשונות בין נתוני הפמ"ע מהקרקע לעומת נתוני הפמ"ע כפי שחושבו מכל אחד מהמדדים הספקטראליים ניתן לראות באיור 2. בחרנו את שלושת מועדי אמצע אוגוסט בכל אחת מהשנים כמועדים החשובים להכוונת ההשקיה בכותנה. בכל אחד מהגרפים ניתן לראות כיצד השונות בפמ"ע בין הטקטים נשמרת גם כשהיא מחושבת מתוך המדדים הספקטראליים.

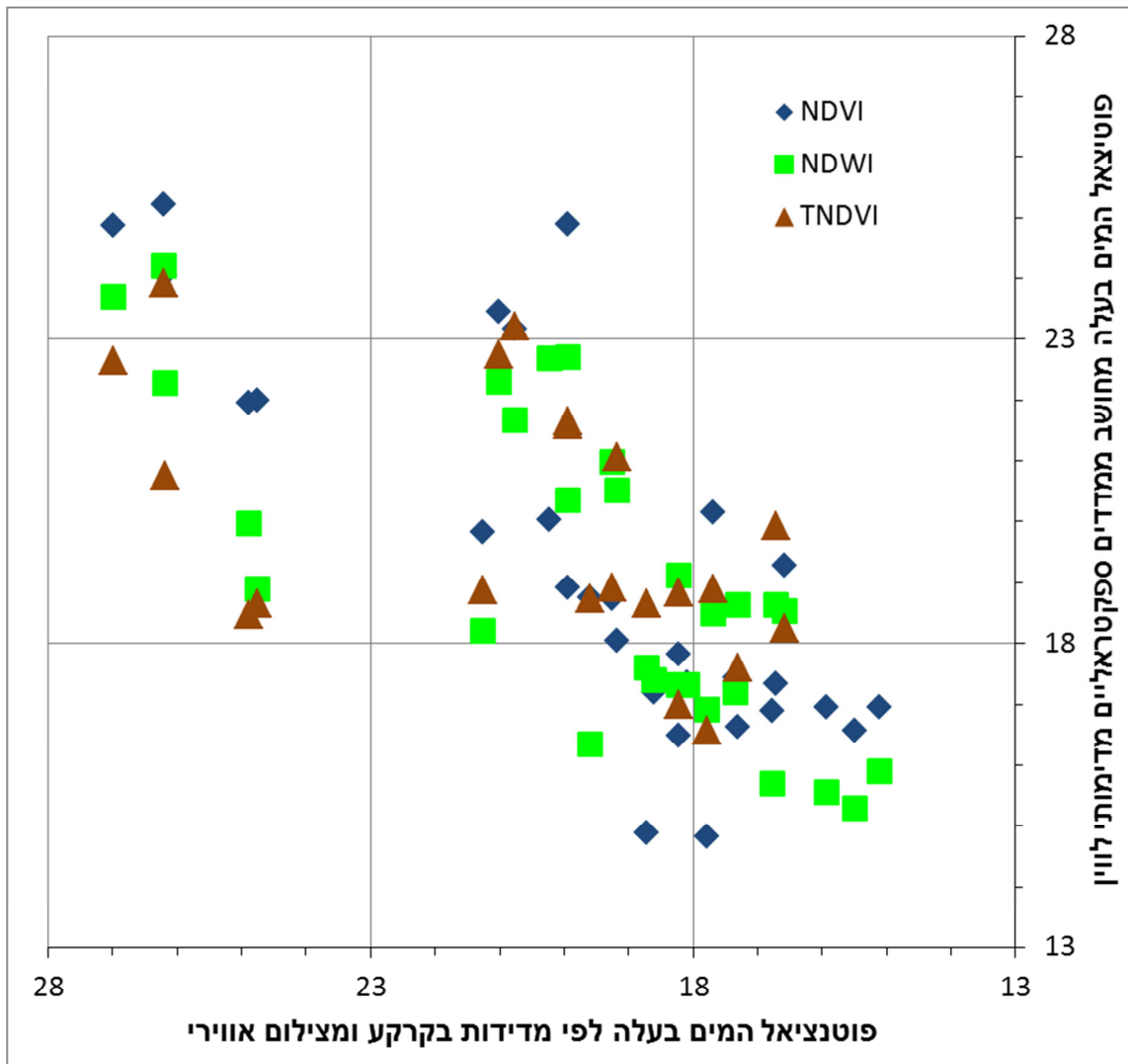
איור 2 : השוואה בין פמ"ע מחושב על בסיס צילומים תרמיים לפמ"ע מחושב לפי הכיול מדימותי לוויין, בשלושה מועדים שונים ולשלושת האינדקסים השונים



השוואת כלל הנתונים המחושבים על-ידי כל אחד מהמדדים הספקטראליים לנתוני הקרקע (איור 3), מגלה ש-TNDVI מספק הערכת חסר כאשר פמ"ע מדוד בקרקע גבוה מ-24 ו-NDVI יותר מפוזר עם הערכת חסר בפמ"ע בסביבות 18-19 והערכת יתר בפמ"ע בסביבות 20-21. ה-NDWI תואם טוב יותר

למידות מהצילומים התרמיים גם בהסתכלות על כל ניסויי בנפרד, כפי שמוצג בנתוני אחוזי הטעות (טבלה 2).

איור 3 : השוואה בין כלל ערכי פמ"ע מחושבים על בסיס צילומים קרקעיים ומוטסים לערכים המחושבים לפי כל אחד מהמדדים הספקטראליים מדימותי לוויין



תדירות הנתונים: האם ניתן לקבל עדכון ברמה שבועית? – אחת המיגבלות העיקריות של השימוש בלוויינים היא תדירות הכיסוי. כך למשל, ה-Landsat8 עובר מעל כל נקודה כל 16 יום, אך בגלל החפיפה של 30% בין הדימותים, יש אזורים להם יש דימות כל 8 ימים (כמו כל מישור החוף הישראלי). בנוסף, החל מנובמבר 2015, ניתן להשיג את נתוני ה-Sentinel2, האוסף נתונים כל 10 ימים, כך שהיעד של איסוף נתונים אחת לשבוע נראה הגיוני. במקביל, ניתן לעבוד גם עם שיטות של

שילוב נתוני לוויין בהפרדה קרקעית גבוהה (כגון Landsat8 או Sentinel2) עם נתונים יומיים מלוויני MODIS+Sentinel3, כך שניתן להתגבר על בעיות של עננות ולעדכן את ההמלצות ההשקיה מדי יום. שיטת עבודה זאת הוצגה על-ידי Gao וחבריו (Gao et al, 2006) ויושמה במספר מחקרים בהם נדרש עידכון התאידות יומי משדות חקלאיים (Anderson et al., 2011. Cammalleri et al, 2014)

הערכת עלות המערכת - לאור הניסיון שהצטבר בשנים האחרונות בעבודה עם המערכת המוצגת במחקר זה, הדורשת נתוני לוויין חינוניים אך במקביל איסוף נתונים במספר אתרים בעת הצילום וכיול ההדמאות לנתונים אלו, ניתן להגיע להערכה כספית לפי הסעיפים הבאים:

- עלות איסוף נתונים מהכותנה (תא לחץ או צילום תרמי קרקעי) הינו 2000 ש"ח לאזור
- בישראל יש 5 אזורי גידול כותנה עיקריים: מישור החוף הדרומי, המרכז, מישור החוף הצפוני, העמקים ועמק החולה. מכאן שיום איסוף נתונים מהקרקע לצורך כיול הינו 10,000 ש"ח לכל ישראל
- עלות עיבוד נתוני הלוויין והפצתם לכל מועד צילום הוא כ- 5,000 ש"ח, וסך כל העלות למועד צילום היא 15,000 ש"ח לכל הארץ
- מספר מועדי הצילום המירבי הוא כ- 12, לפי ההנחה של צילום כל 5 ימים בחודשים יולי-אוגוסט, כך שסך העלות לעונה, לכל הארץ הוא כ-180,000 ש"ח
- בהנחה שמספר הדונמים נע בין 50,000 ל-100,000, הרי שהעלות לדונם תהיה 2-4 ש"ח לדונם לעונה

מסקנות

יעול השקית כותנה דורשת מידע על מצב פמ"ע ממוצע לכל טקט ההשקיה, ולא רק בנקודה או שתיים בתוך הטקט. מחקר זה מראה שעל-ידי כיול הדמאות לוויין למספר נקודות בקרה, ניתן למפות את מצב הפמ"ע בכל טקט באזור הנתון, כבסיס להכוונת טובה יותר של ההשקיה. תוצאות המחקר מראות שהמדד הטוב ביותר למטרה זאת הוא NDWI, העושה שימוש בערוצי האינפרה-אדום-קרוב והאינפרה-אדום-בינוני. לפי נתונים משלוש עונות שונות ומשלושה גושים שונים, ניתן לראות שאחוז הטעות האבסולוטי הממוצע של מדד זה נמוך מ-8%, ותואם את אחוזי הטעות המקובלים במחקרים כאלו. נתוני מדד ספקטראלי זה ניתנים להשגה ממספר לוויינים חינוניים, בעלי רזולוציה מרחבית גבוהה או בעלי הפרדה עיתית יומיומית, כך שמיפוי עדכני כל כמה ימים (5-7 ימים) נראה סביר בהחלט.

תודות

אנו רוצים להודות למועצת הכותנה שתמכה במחקר זה, ולצוותי הגד"ש בגבעת ברנר, צבר-קמה והרי-מגידו שעזרו במחקר זה.

מקורות

חזנברג, 2016. מיפוי פוטנציאל המים בעלה על ידי צילומים תרמיים ככלי להכוונת השקיה בכותנה (עבודת תזה שטרם פורסמה). הפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה ע"ש רוברט ה. סמית, האוניברסיטה העברית בירושלים, רחובות, ישראל

Anderson, M.C., Kustas, W.P., Norman, J.M., Hain, C.R., Mecikalski, J.R., Schultz, L., Gonzalez-Dugo, M.P., Cammalleri, C., d'Urso, G., Pimstein, A., and F. Gao. 2011, Mapping daily evapotranspiration at field to continental scales using geostationary and polar orbiting satellite imagery, *Hydrology Earth System Sciences*, 15: 223-239

Cammalleri, C. Anderson, M.C. Gao, F. Hain, C.R. and W.P. Kustas. 2014. Mapping daily evapotranspiration at field scales over rainfed and irrigated agricultural areas using remote sensing data fusion, *Agricultural and Forest Meteorology*, 186: 1-11.

Cohen, Y., Alchanatis, V., Sela, E., Saranga, Y., Cohen, S., Meron, M., Bosak, A., Tsipris, J., Ostrovsky, V., Orolov, V., Levi, A., and R. Brikman, 2014. Crop water status estimation using thermography: multi-year model development using ground-based thermal images. *Precision Agriculture*, 1-19.

Gao, B.C. 1996, NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sens. Environ.* 58: 257-266

Gao, F., Masek, J., Schwaller, M. and F. Hall. 2006. On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance: Predicting daily Landsat surface reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44: 2207-2218.

Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J., and P.J. Pinter, 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research* 17:133-138.

Hunsaker, D. J., Barnes, E. M., Clarke, T. R., Fitzgerald, G. J., Pinter P. J., 2005. Cotton irrigation scheduling using remote sensing and FAO-56 basal crop coefficients, *Transactions of the ASAE*. 48(4): 1395-1407.

Moran, M.S., 1994. Irrigation management in Arizona using satellites and airplanes, *Irrigation Science*, 15:35-44

Moran, M.S., T.R. Clarke, Y. Inoue, and A. Vidal, 1994. Estimating crop water-deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index, *Remote Sensing of Environment*, 49:246-263.

Rosenberg, OS., V. Alchanatis, Y. Cohen, Y. Saranga, and A. Bosak. 2014. Are thermal images adequate for irrigation Management? *Proceedings of the 12th International Conference on Precision Agriculture*, 2014, Sacramento, California, USA.

Sabins, F.F., 1986. *Remote sensing: Principles and interpretation*, Freeman and company, New York, NY.