

# פיתוח מתודולוגיה למיפוי גובה הצמח וקצב צימוח בשדות כותנה בקנה מידה

## אזורי/ארצי תוך שימוש בטכנולוגיות מידע וחישה מרחוק

יפית כהן<sup>1\*</sup>, איתן גולדשטיין<sup>1</sup>, ניצן גרף<sup>1,2</sup> ואריה בוסק<sup>3</sup>  
<sup>1</sup> המכון להנדסה חקלאית, וולקני.  
<sup>2</sup> הפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה ע"ש רופברט ה. סמית  
<sup>3</sup> מגדלי דרום יהודה

\* [yafitush@volcani.agri.gov.il](mailto:yafitush@volcani.agri.gov.il)

### תקציר

במסגרת מחקר שמומן על-ידי מועצת הכותנה, פותח יישומון (אפליקציה) לאיסוף נתוני גובה מחקלאים. היישומון מופיע הן את העקום של מדידות בפועל של החקלאי והן את העקומים המומלצים של מועצת הכותנה לפי הזן שנבחר ואסטרטגיית ההשקיה (השקיה רגילה או גרעונית).

באמצעות היישומון וקבצים משלימים מחקלאים נוספים הצלחנו לאסוף קרוב ל-600 נתוני גובה מעשרות חלקות ברחבי הארץ. נבנה מודל אמפירי המקשר בין נתוני הגובה שנאספו ובין מדד צימוח NDVI מדימותי לוויין Sentinel2 עם מתאם גבוה ( $r^2=0.82$ ) ושגיאת תקן של 11 ס"מ. כמו כן, הנתונים המחושבים עוקבים בצורה טובה אחר הנתונים המדודים גם ברמה של חלקות בודדות ולא רק ברמת הממוצע. המודל סובל מרוויה אך הרוויה היא בטווח גבהים בסוף תקופת המעקב אחר גובה כך שהחיסרון הזה לעניות דעתנו הוא זניח.

למודל שני יתרונות משמעותיים: תדירות גבוהה יותר בזמן ושונות מרחבית. כלומר, מצד אחד הוא מספק נתונים בתדירות של חמישה ימים ונמצא כי יחסית למדידות הידניות הוא בתדירות גבוהה יותר ומן העבר השני הוא מספק שונות של הגבהים בכל השדה בהשוואה למדידת צמחים בודדים בנקודה אחת בשדה שהיא בד"כ קרוב לשוליים. בגלל שגיאת התקן ובגלל שהדימותים סובלים מעננות ורעש, לא ניתן במצב הנוכחי לספק בצורה אמינה קצב צימוח.

### מבוא

חישוב מנות המים להשקיה בגידולים השונים כולל כותנה נעשה ע"י הכפלת מקדם ההשקיה המתאים בהתאדות המחושבת ע"פ נוסחת פנמן-מונטית' ומקדם התיקון לפי המשוואה:  $Irrig = \alpha * Kc * ET0$  כאשר  $irrig$  זו כמות ההשקיה,  $ET0$  היא ההתאדות המחושבת (פנמן-מונטית');  $Kc$  הוא מקדם הגידול;  $\alpha$  היא מקדם התיקון של מקדם הגידול.

כיום, החקלאים ברוב המקרים עובדים עם  $Kc$  קבועים הזמינים בשירות של שה"ם או לפי הפרסומים של מועצת הכותנה (טבלה 1). את ההתאדות,  $ET0$ , הם שואבים מתחנה מטאורולוגית קרובה (טבלה 1). חישוב מנות ההשקיה לפי התאדות ומקדמי השקיה, מניחים קצב גידול רצוי ואינם מתייחסים למצבי

עקת או עודף מים. כדי לבצע בקרה על ההשקיה, החקלאים מבצעים מדידות בשדה (1-2 שבוע) של מדדי צומח משתנים לפי שלב הגידול ומשווים אותם לעקומי צימוח רצויים.

**מקדם תיקון בשלב הצימוח הווגטיבי:** קצב צימוח הגבעול הראשי נמצא כמדד צמחי אמין לאפיון מצב המים של צמחי כותנה בשלב הצימוח הווגטיבי, כל עוד קצב הצמיחה גבוה מ- 0.5 ס"מ ליום. מועצת הכותנה פרסמה עקומים רצויים של גובה הצמח ושל קצב הצימוח לפי זן לפי תאריכים בשנה וימים מפרח בשדה<sup>1</sup>. החקלאי בוחר ומסמן באמצעות מוטות במבוק מספר צמחים בקטע בשדה שאמור לייצג את החלקה כולה. פעם-פעמיים בשבוע הוא מודד את גובהם של הצמחים ומחשב את קצב הצימוח היומי. אם קצב הצימוח גבוה מהרצוי, יש להוריד ממנת המים, ולהיפך. בשלב מילוי ההלקטים, צימוח הגבעול כמעט ונפסק ולכן מדידת הקצב אינה מתאימה עוד להכוונת ההשקיה.

**מקדמי תיקון לשלב הפרודוקטיבי:** בשלב זה משתמשים במדד הנקרא: "מספר מפרקים מעל פרח צהוב" (ממפ"צ). מדד זה מייצג את היחס בין הצימוח הווגטיבי (תוספת מפרקים) לתהליך הפרודוקטיבי (התקדמות הפריחה במעלה הצמח). מספר מפרקים קטן יחסית למקובל בכל שלב מעיד על צמח מעוכב וגטטיבי. בנוסף, נמצא כי פוטנציאל המים בעלה (פמ"ע) הנמדד באמצעות תא הלחץ הוא אמצעי יעיל ואמין לבקרת ההשקיה. הליך המדידה כולל דגימה של מספר עלים המוכנסים לתא לחץ לצורך מדידת פוטנציאל המים. ככל שהערכים המתקבלים יהיו שליליים יותר הצמח נמצא בעקת מים חמורה יותר. בדומה לגובה, גם לשני המדדים הללו, הופקו על בסיס ניסיונות רב-שנתיים עקומים רצויים. החקלאי מודד בשדה ומשווה את המדידות שלו לעקומים הרצויים ומתקן את ההשקיה בהתאם.

בשנים האחרונות, נצפה מעבר של החקלאים משימוש בלוחות מים קבועים לערכי התאדות מחושבת בזמן אמת בזכות עבודה משותפת של שה"ם והשירות המטאורולוגי של משרד החקלאות (טבלה 1). עם זאת, מקדמי ההשקיה הם עדיין קבועים, ללא התייחסות לשלב הגידול בפועל. לאחרונה, עם התבססות של המחקר בתחום, התפתחו שיטות שימושיות ואף ברמה מסחרית להערכת מקדמי ההשקיה תוך התבססות על דימותי לוויין בתחום הנראה והא"א הקרוב (טבלה 1).

טבלה 1: פרמטרים לחישוב מנות השקיה ומקורות לקבלת נתונים

מקור לערכים (כמעט) בזמן-אמת	מקור לערכים קבועים לפי תקופה בשנה	הגדרה ותיאור	
שה"ם והשירות המטאורולוגי של משרד החקלאות <a href="https://www.moag.gov.il/shaham/professionalinformation/documents/daily_exhalation_user_guide_2014.pdf">https://www.moag.gov.il/shaham/professionalinformation/documents/daily_exhalation_user_guide_2014.pdf</a>	לוחות של מועצת הכותנה <a href="http://cotton.co.il/sites/default/files/%20בקרטה20.pdf">http://cotton.co.il/sites/default/files/%20בקרטה20.pdf</a> מקדמי השקיה של שה"ם <a href="https://www.moag.gov.il/shaham/ProfessionalInformation/Pages/mekadmey_hashkaya_cotton.aspx">https://www.moag.gov.il/shaham/ProfessionalInformation/Pages/mekadmey_hashkaya_cotton.aspx</a>	התאדות מחושבת התלויה בעיקר בתנאים מטאורולוגיים	ETO
חישה מרחוק בתחום הנראה והא"א הקרוב חברת מן-השקיה עובדת בגישה הזו מחקרים של דר' עופר רוזנשטיין ודר' יוסי טנאי		מקדם ההשקיה התלוי בזן, אזור ומועד זריעה	Kc

<sup>1</sup> <http://cotton.co.il/sites/default/files/%20בקרטה20.pdf>

לעומת ההתקדמות בחישוב ההתאדות ומקדמי ההשקיה, מקדמי התיקון נעשים כאמור, על-ידי מדידות בפועל של גובה, ממפ"צ ופמ"ע. למרות הדיוק של מדידות ידניות, ההסתמכות על מספר מועט של צמחים או עלים מהווה בעיה כאשר רוצים לייצג שדות גדולים בהם יש שונות מרחבית משמעותית. בארץ, בוצעו מחקרים בחישה מרחוק תרמית למיפוי והערכת פמ"ע בכותנה באמצעות צילומים תרמיים (Cohen et al., 2005, 2015, 2017). מחקרים אלו הראו כי צילומים תרמיים באמצעות כטב"מים מאפשרים הערכת אמינה של פמ"ע בכותנה ומראים שניתן לייעל את ההשקיה יחסית להשקיה מסחרית מבלי לפגוע ביבול. עם זאת, העלות של הצילומים הללו גבוהה ואינה מצדיקה בהווה את השימוש בהם. לעניות דעתנו, טרם נעשה מחקר בארץ להערכת גובה של הכותנה וקצב צימוח באמצעים של חישה מרחוק.

### מטרת המחקר

פיתוח מתודולוגיה למיפוי גובה הצמח וקצב צימוח בשדות כותנה בקנה מידה אזורי/ארצי תוך שימוש בטכנולוגיות מידע וחישה מרחוק. על מנת להשיג מטרה זו, הוגדרו המטרות הבאות: (1) פיתוח אפליקציה לאיסוף נתוני גובה בשדות כותנה; (2) אפיון ויצירה של מאגר נתונים של גובה משדות כותנה ברמה אזורית (או ארצית) המתבסס על איסוף נתונים באמצעות האפליקציה; (3) בחינת הדיוק והאמינות של מדדים ספקטראליים מחולצים מדימוטי לווין חנימיים למיפוי ולהערכת גובה הצמח וקצב צימוח בקנה מידה של השדה.

### שיטות

פיתוח יישומון לאיסוף של נתוני גובה במהלך גידול כותנה: על מנת לצמצם את היישומונים שהחלקאים ישתמשו בהם חברנו אל מלי זקס ואשר אייזנקוט משה"ם והחלטנו להשתלב ביישומון שלהם כדי להשלים לחקלאי מידע שהוא נדרש לו בקבלת החלטות להשקיה בכותנה: היישומון של שה"ם<sup>2</sup> יספק לחקלאי המלצות לכמויות השקיה על בסיס נתוני התאדות בזמן אמת (ET0) ומקדמי השקיה ( $Kc$ ) ואילו התוספת שלנו תאפשר לו לבחון האם הוא צריך לתקן את מקדם ההשקיה ( $\alpha$ ) בהתאם למדידות גובה הצמח. עם זאת, קיים הבדל נוסף בין שני היישומונים: בעוד שהיישומון של שה"ם נועד לספק מידע לחקלאים מתוך בסיסי נתונים קיימים, היישומון שלנו נועד גם לאסוף נתונים מהחקלאים ולבנות בסיס נתוני גובה ומיקום כדי לפתח מודל התאמה בין נתונים אלו ובין נתוני חישה מרחוק. לכן, מצד אחד את היישומון של הכנסת הנתונים מהחקלאי והמסכים שלו פיתחה לנו אלינה ברטל (המפתחת של היישומון המקורי של שה"ם) אך מן הצד של השרת ואחסון הנתונים הפיתוח נעשה באופן מקומי במכון להנדסה חקלאית. פירוט לגבי שלבי הפיתוח של היישומון והשרת, ניתן למצוא בדו"ח המלא שהוגש למועצת הכותנה<sup>3</sup>.

<sup>2</sup> [https://www.moag.gov.il/shaham/publication/Documents/Application\\_for\\_irrigation.pdf](https://www.moag.gov.il/shaham/publication/Documents/Application_for_irrigation.pdf)

<sup>3</sup> [https://drive.google.com/file/d/1XeNoNc4p-pLgVtQP\\_HWM\\_uoSo-AEP1Wh/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1XeNoNc4p-pLgVtQP_HWM_uoSo-AEP1Wh/view?usp=sharing)

יצירת שכבת גבולות שדות הכותנה שמהם נאספו נתונים: החקלאים לא נתבקשו להכניס את גבולות השדה. הניסיון שלנו הראה כי החקלאים עלולים לא לשתף פעולה עם זה בגלל הסרבול. על-כן, כל שדה שנקלט ביישומון, במידה שהחקלאי ציין שהוא בשדה, נקודת הציון שלו נקלטה אוטומטית מתוך מקלט ה-GPS שבטלפון החכם. על-מנת להפיק את גבולות השדות, הטלנו את נקודות הציון על דימות לוויין בתאריך שבו הכותנה היתה בשיא הצימוח שלה, וסימנו ידנית את גבולות החלקה. בתהליך הזה נתגלו מספר בעיות: 1. חלק מנקודות הציון היו לא מדוייקות, קרי, ההנחה שנקבל נקודות שהם עד 10 מ' מהמיקום שבו היה החקלאי לא היתה נכונה בכל המקרים; 2. בחלק מן המקרים, החקלאים סימנו שהם בשדה כאשר הם לא היו בשדה. כדי לא לאבד את הנתונים שהתקבלו מחלקות עם בעיות במיקום, יצרנו קשר עם החקלאים והם כיוונו אותנו לשדה הנכון ובחלק מן המקרים קבלנו את השכבות של גבולות השדות או צילום מסך של גבולות השדות על-גבי תצ"א וסימנו ידנית.

יצירת בסיס נתוני חישה מרחוק מתוך דימותי לוויין חנימיים: בשלב זה של המחקר הוחלט להשתמש בדימותי לוויין Sentinel-2 בלבד ולא בדימותי לוויין ונוס או Planet-labs. הסיבה העיקרית לכך היא זמינות דימותי הלוויין באמצעות סביבת הניתוח Google earth engine (GEE) ללא צורך בהורדת הדימותים. באמצעות קוד הזמין [בקישור הזה](#)<sup>4</sup> ניתן לקבל ערכי NDVI מבוססים על דימותי לוויין Sentinel-2 לכל תאריך בטווח נבחר לכל פוליגון בשכבה. הקלט של הקוד במקרה שלנו היה: שכבה פוליגונאלית של שדות הכותנה. בהקשר זה יש לציין כי כמו שניתן לשנות את השכבה הפוליגונאלית ואת התאריכים ניתן גם לשנות את סוג הלוויין ולהתאים את הערוצים כך שחישוב ה-NDVI יבצע נכון ולא כאן המקום להאריך.

הערכת גובה וקצב צימוח באמצעות דימותי לוויין חנימיים: לצורך מציאת מודל רגרסיה להערכת גובה, חיברנו את שני בסיסי הנתונים של מדידות הגובה ושל NDVI מדימותי הלוויין לפי מועדי המדידות והדימותים בסביבת אקסל. ההתאמה בזמן לא היתה מושלמת כי דימותי הלוויין זמינים כל חמישה ימים (או בתדירות נמוכה יותר כתלות באחוז כיסוי העננים) ואילו איסוף נתוני הגובה בתאריכים המתאימים לחקלאי. לכן, הוחלט כי כל מדידת גובה תתייחס לדימות הלוויין הקרוב ביותר אליה א"כ עברו יותר מ-7 ימים ממעבר הדימות. בשלב הבא, הוצאו נתונים חריגים. למשל סדרות זמן של NDVI עם ערכים מאוד נמוכים שלא מייצגים שדה כותנה או ערך מקומי של NDVI נמוך באופן קיצוני בין שני ערכים גבוהים ולהיפך, תיעוד של גובה נמוך בין ערכים גבוהים. בשלב האחרון, יצרנו דיאגרמת פיזור בין גובה ל-NDVI ויצרנו מודל רגרסיה ליניארית ומדל רגרסיה פולינומיאלי מסדר שני. לבסוף, חישבנו גם מדדי ביצוע: (RMSE) Root Mean Square Error-I R2.

## תוצאות

<sup>4</sup> <https://code.earthengine.google.com/5c468c678d49a314c08477ce7a90157f>

## המערכת לאיסוף ואגירת נתונים מהחקלאים

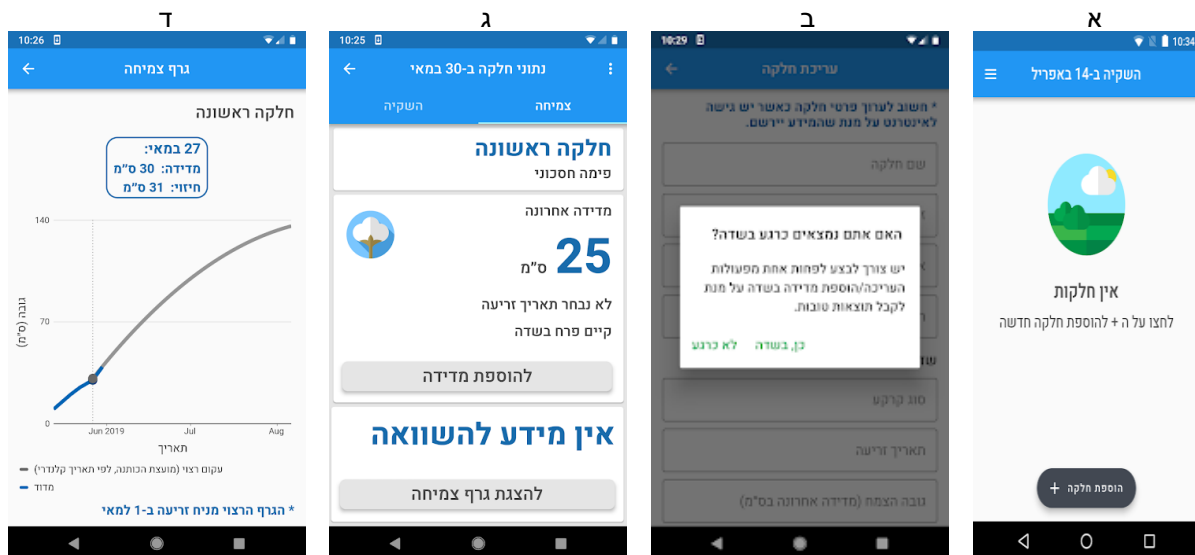
היישומון פותח עבור מערכות Android בפלטפורמת Flutter של Google, תוך שימוש בשרת Firebase של Google. מסכי היישומון: איור 1 מציג כמה מן המסכים של היישומון שפותח. בשלב ראשון, החקלאי מוסיף חלקה או חלקות, אח"כ הוא מוסיף מדידות גובה תוך שהוא נשאל האם הוא נמצא בשדה, במידה שכן היישומון מושך את נקודת הציון ממקלט ה-GPS שבטלפון החכם והחקלאי לא יישאל שוב, שאלת המיקום תעלה כל עוד החקלאי לא היה בשדה באחת מן המדידות, בסופו של תהליך החקלאי יכול להציג את גרף הצמחיה שלו ולראות איך הוא לעומת הגרף המומלץ.

תיאור השרת לאגירת והצגת הנתונים: הוקם שרת עצמאי מקומי עם IP קבוע. השרת מריץ שירותים שונים (מיקרו-סרוויסים) לאיסוף והצגת נתונים המופרדים באמצעות מחיצת הגישה (Endpoint). השרת אוסף ומוסר נתונים באמצעות RESTful web services, כלומר בפקודות GET/POST. השרת מאפשר שירותי איסוף נתונים (מהיישומון שתואר לעיל) והצגתם בשרת ושמירה כקובץ אקסל.

בעונה זו מומשו שני שירותים:

1. איסוף נתונים: א. באמצעות גישה של אפליקציה לשירות update-cotton-field, ניתן להוסיף ולהגדיר חלקה חדשה למגדל (שם, זן כותנה, סוג אדמה, תאריך זריעה וכו') או לעדכן חלקה קיימת; ב. באמצעות גישה של אפליקציה לשירות add-cotton-measurement, ניתן לשמור בשרת תוצאת מדידה. הנתונים הנשמרים כוללים כמובן גם את פרטי מוסר המדידה (מזהה מגדל, מזהה חלקה, נ"צ, תאריך).

2. אגירה והצגת נתונים: באמצעות גישה של אפליקציה או גלישה בדפדפן לשירות measurements, ניתן לצפות בכל הנתונים שנאספו, וכן ישנה אפשרות לשמור הנתונים בקובץ אקסל.



איור 1: מסכי היישומון לאיסוף נתוני גובה משדות כותנה ולהשוואה אל מול עקום גובה רצוי. א) מסך להוספת חלקה; ב) מסך לחיווי למיקום החקלאי (האם הוא בשדה או לא); ג) מסך חיווי של מדידת

הגובה האחרונה ועם אפשרות להוסיף מדידה; ד) מסך השוואה של המדידות (כחול) אל מול עקום הגובה המומלץ.

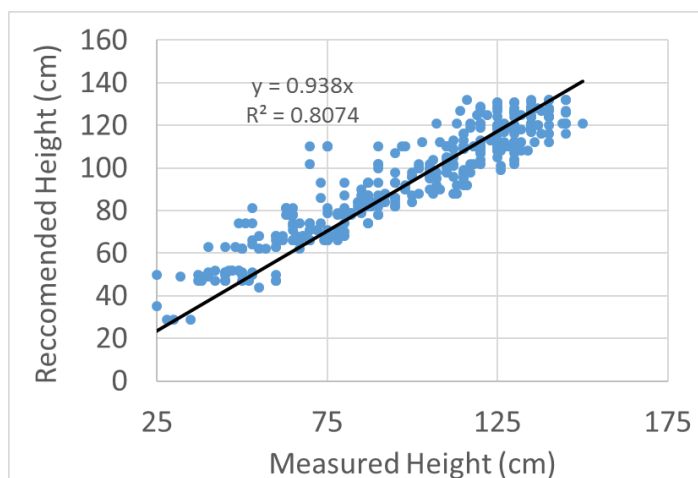
טבלה 1: סיכום נתוני גובה שנאספו לפי משקים, מספר חלקות ומספר מדידות

הערות	תאריך אחרון	תאריך ראשון	מספר מדידות גובה	מספר חלקות	משק	
לא דרך היישומן	18-Jul-19	05-Jun-19	233	24	צב"ר קמ"ה	1
	21-Jul-19	10-Jun-19	57	9	גד"ש חפר	2
	17-Jul-19	05-Jun-19	55	8	גד"ש עציון	3
לא דרך היישומן	19-Jul-19	19-Jun-19	46	6	בני דרום	4
	23-Jul-19	04-Jun-19	31	4	צרעה	5
	22-Jul-19	16-Jun-19	27	4	דליה/מגידו	6
	18-Jul-19	26-Jun-19	26	3	עין-חרוד איחוד	7
	19-Jul-19	04-Jun-19	23	3	חפץ חיים	8
	23-Jul-19	03-Jun-19	17	2	שילר	9
	18-Jul-19	04-Jun-19	15	2	שעלבים	10
	17-Jul-19	04-Jun-19	12	2	הראל	11
	21-Jul-19	10-Jun-19	15	2	גבעת חיים	12
מחולקת ל-3 חלקות	21-Jul-19	10-Jun-19	7	1	עין שמר	13
	11-Jul-19	04-Jun-19	7	1	עין-צורים	14
	23-Jul-19	12-Jun-19	7	1	ניר-גלים	15
איסוף לא סדיר			14	13	משקים שונים	16
ללא "משקים שונים"			299	42	סה"כ דרך היישומן	
ללא "משקים שונים"			578	72	סה"כ	

תיאור נתוני גובה שנאספו על-ידי חקלאים ומדריכים: טבלה 1 מסכמת את נתוני הגובה שנאספו באמצעות היישומן: 13 משקים (ללא שימוש בנתונים שנאספו באופן לא סדיר), 42 חלקות ו-299 נתוני גובה. בנוסף לאלו, התקבלו קבצי אקסל ומפות נלוות של מדידות גובה מהמשקים צב"ר קמ"ה ובני-דרום שהביאו להכפלה של מספר הנתונים לניתוח.

#### גובה כותנה בפועל לעומת גובה כותנה מומלץ

אחד מתוצרי הלואי של איסוף נתוני מדידות גובה רבים הוא היכולת להציג אותם אל מול נתוני גובה רצויים. איור 2 מציג דיאגרמת פיזור של נתוני גובה שנמדדו באמצעות היישומן אל מול נתוני הגובה הרצויים. ניתן לראות כי בעוד שלפי המשוואה הכללית נתוני הגובה המדודים גבוהים יותר מהמומלצים (מקדם קו הרגרסיה קטן מ-1) הרי שהיחס בין הערכים המדודים למומלצים משתנה לאורך העונה. בתחילת העונה, הערכים המדודים נמוכים מהמומלץ (מעל קו המגמה) וככל שהעונה מתקדמת היחס מתהפך ויש יותר מדידות בהם הערך המדוד גבוה מהמומלץ (מתחת לקו המגמה). יכול להיות שמגמה זו היא מגמה רב-שנתית אך גם יכול להיות שמדובר במגמה ייחודית לעונת 2019 שהתאפיינה בזריעה מאוחרת. את זאת ניתן יהיה לבדוק אם נמשיך ונאסוף מדידות דומות בשנים הבאות.



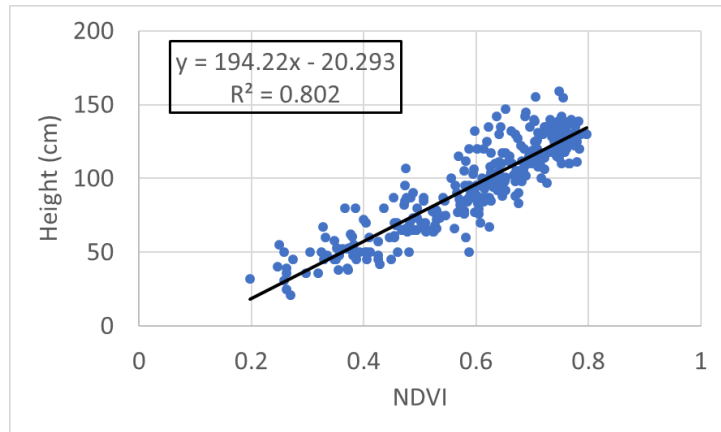
איור 2: דיאגרמת פיזור של מדידות גובה שנמדדו בפועל באמצעות היישומון לעומת הערכים המומלצים (עם "משקים שונים" n=377)

### מודל אמפירי המקשר בין גובה מדוד למדד צימוח NDVI המופק מדימוני לוויין Sentinel-2

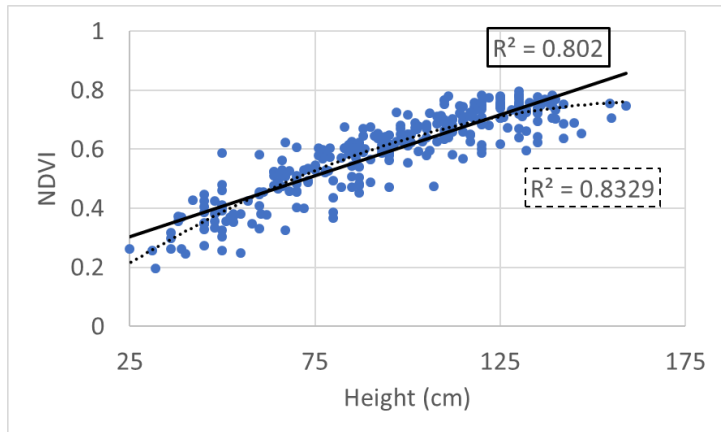
סינון נתונים: טבלה 1 מראה כי באופן תיאורטי היו בידינו 578 נתוני גובה שיכולנו להשתמש בהם כדי לייצר מודל אמפירי המקשר בין נתוני גובה ומדדי צימוח ספקטראליים מלוויינים. בפועל לאחר סינון נותרו 299 נתונים שהם 52% בלבד מהנתונים שנאספו. הסיבה העיקרית לכך היא חוסר היכולת לאתר את המיקום המדויק של שדות. בנוסף, היו מועדים בהם היתה עננות ולחלק מן השדות התקבלו ערכי NDVI לא אמינים. כמו כן, הוצאו 5 ערכים חריגים. היו שתי סיבות להעדר מיקום מדויק ואמין: (1) במקרים רבים, נקודת הציון שהתקבלה מהטלפונים החכמים נמצאה לא מדויקת. זאת למרות שהשגיאה המוצהרת היא של עד 10 מטרים. (2) במקרים מסויימים, הנתון הוכנס במשרד או בבית ולא בשדה. בחלק מן המקרים, אספנו בדיעבד את המיקום של השדות באמצעות שיחה עם החקלאים או המדריכים, אבל לא יכולנו לעשות זאת בכל המקרים. פתרונות אפשריים לבעיה הזו, מוצגים בחלק של המסקנות. למרות חוסר היכולת להשתמש במחצית מן הנתונים, עדיין יש לציין את המספר המרשים של הנתונים שיכולים לשמש אותנו לבניית המודל. מדובר בלמעלה מ-200 נתונים שנאספו מעשרות חלקות המפוזרות כמעט בכל אזורי גידול הכותנה. אין זה דומה לאף מודל שיכול היה להיות מפותח על בסיס ניסוי. וזאת רק מעונה בודדת.

הערכת גובה באמצעות NDVI: איור 3 מציג את דיאגרמת הפיזור של גובה ביחס ל-NDVI. ניתן לראות כי המתאם הוא גבוה ( $R^2=0.80$ ). ידוע כי NDVI מגיע לרוויה לאחר סגירת נוף. לכן, איור 3 מציג את דיאגרמת הפיזור בצורה הפוכה וניתן לראות כי גם סדרת הנתונים שלנו אינה יוצאת דופן. המודל הפולינומיאלי מסדר שני מתאים להתאמה בין שני המשתנים יותר מאשר המודל הליניארי.

א



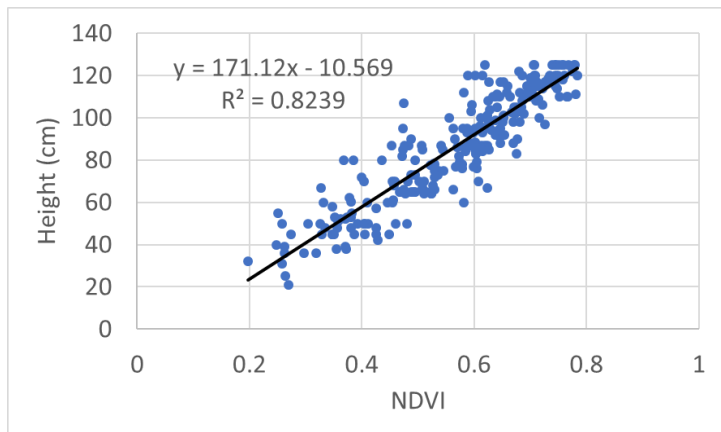
ב



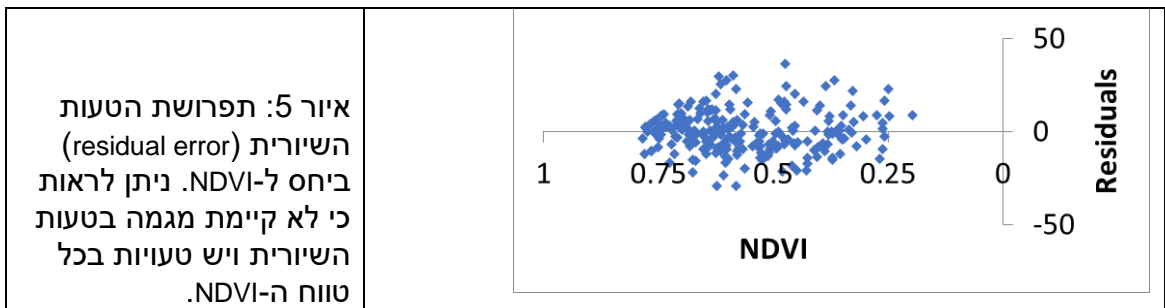
איור 3: דיאגרמת פיזור בין נתוני גובה מדודים ובין מדד NDVI שהופק מדימוטי לוויין Sentinel-2 (a) (n=300) כאשר Y הוא הגובה ו-X הוא NDVI

לאור זאת, הוחלט כי נשתמש במודל שלוקח בחשבון את נתוני הגובה עד 125 ס"מ. ערך זה גם מסתדר עם התקופה בה קצב הצימוח הוא מזערי והחקלאים מסיימים את ניטור הגובה בשלב הפנולוגי הזה. איור 4 מציג את המודל האמפירי הסופי להערכת גובה באמצעות NDVI (n=246). המתאם של המודל גבוה ( $R^2=0.82$ ) עם SE של 11 ס"מ ללא הטיה משמעותית (איור 5).

איור 4: המודל האמפירי הסופי של הערכת גובה באמצעות NDVI (ללא ערכי הגובה הגבוהים מ-125 ס"מ שבהם ה-NDVI נמצא ברוויה) (n=243)



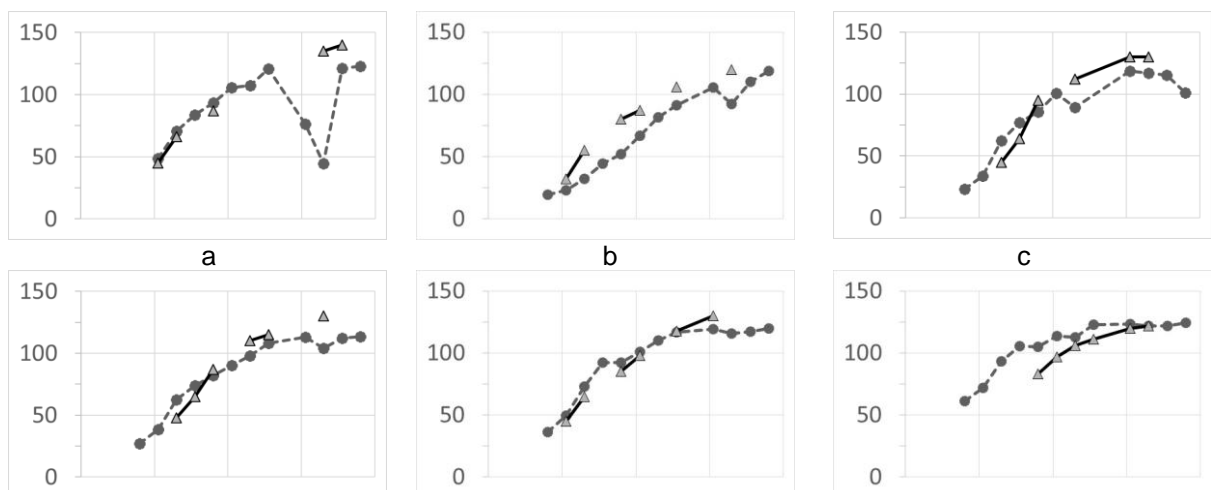


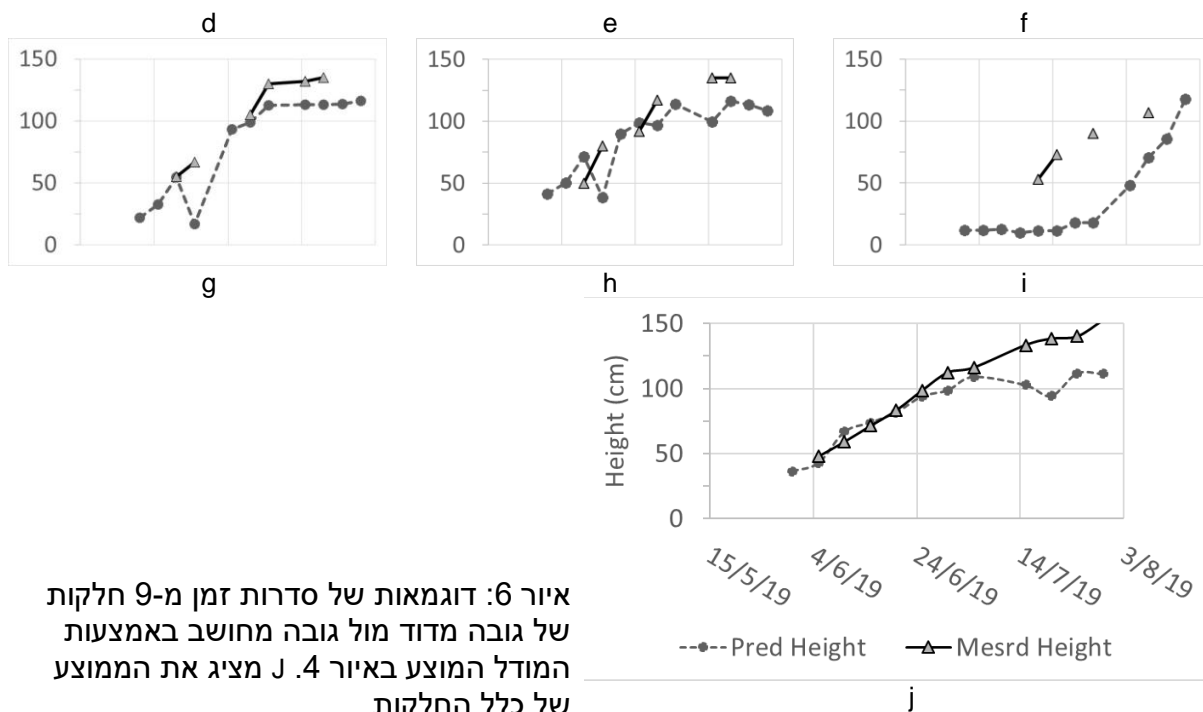


איור 6 מציג דוגמאות מ-9 חלקות של גובה מדוד מול גובה מחושב על בסיס המודל וכן את הממוצע של כלל החלקות (איור 6m). מהדוגמאות עולות כמה מסקנות: ברב המקרים, סדרות הזמן של המדוד והמחושב מתאימות, למרות הוצאת דימוי לווין מה-10.7.19 בגין עננות, עדיין נותרו חלקות בהם היתה עננות מקומית בברמה כזו או אחרת שהביאה לירידה משמעותית בערכים (לדוג' a ו-g), גם כאשר אין השפעה ניכרת של עננות, הערכים המחושבים סובלים מרעש שקשור בין השאר בכיול של הדימויים (לדוג' h), ערכי ה-NDVI סובלים מרוויה ולכן המודל לא מתאים לערכי גובה מעל 125 ס"מ (לדוג' a ו-g), איור 6i מראה דוגמא לחלקה שבעליל המיקום שלה לא היה במקום ולכן היא כלל לא נכנסה לבסיס הנתונים של בניית המודל. גם הממוצע של שתי הסדרות מראה את אותן תופעות, מה שמעיד על כך שהן אינן מקומיות.

תופעה נוספת היא ההבדל בתדירות של שתי סדרות הזמן. ההנחיה ממליצה על מדידות של פעמיים בשבוע, לפי הנתונים שבידינו, לא נמצאה אפילו חלקה אחת שבה נמדד גובה פעמיים בשבוע לאורך זמן. לעומת זאת, סדרת הזמן של הגובה המחושב מתוך דימוי לווין עשירה יותר בנתונים לאורך זמן וזאת למרות שחלק מהפעמים היתה עננות.

תופעות אלו של עננות ושל רעש ממקורות נוספים אינו מאפשר יכולת הערכה אמינה ומדוייקת של קצב הצימוח. לכן, בשלבים הבאים של המחקר נאמץ גישות של ניקוי רעשים ומידול לאחור כדי להעריך לא רק את הגובה אלא גם את קצב הצימוח.

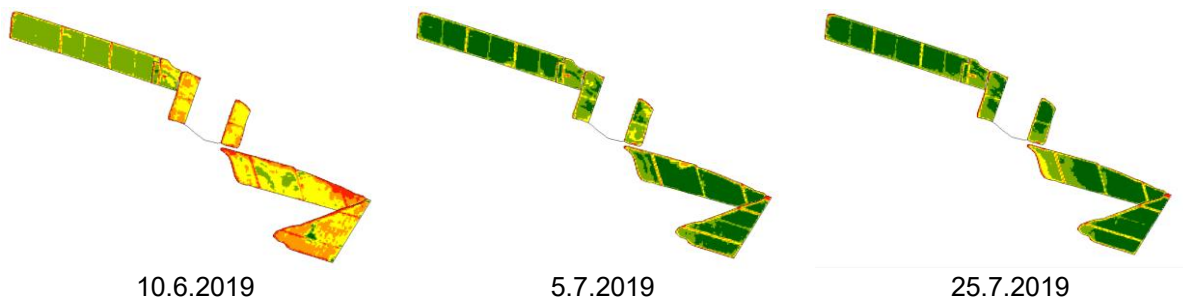




איור 6: דוגמאות של סדרות זמן מ-9 חלקות של גובה מדוד מול גובה מחושב באמצעות המודל המוצע באיור 4. נ מציג את הממוצע של כלל החלקות.

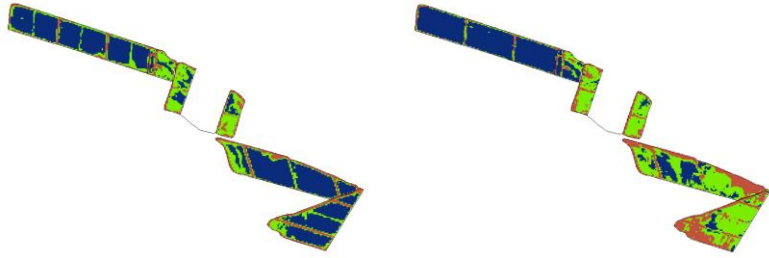
### מיפוי גובה באמצעות המודל

כאמור, היכולת לקשר בין מדד הצימוח הספקטראלי ובין גובה מאפשר למפות את השונות בגובה בחלקות הכותנה. ובצורה כזו, הוא מעשיר את המידע שהחקלאי מקבל על החלקה. להבדיל ממספר צמחים מוגבל (2-4 צמחים) שהחקלאי מודד בהם גובה. איור 7 מציג מפות של גובה ממספר חלקות בשלושה מועדים לאורך העונה. ניתן לראות כי במועד הראשון ישנה שונות גדולה וישנם אזורים עם גובה נמוך יחסית ואזורים בעלי גובה יחסית גבוה. צריך לציין כי למרות השונות הזו, במידה שמחלקים לשלוש קבוצות את הערכים מתחת לערך הרצוי, בטווח הערך הרצוי, כלומר למפה שיכולה לסייע בקבלת החלטות (איור 8) התמונה נראית שונה לגמרי וניתן לראות כי כל השדות נמצאים בגובה מעל הרצוי כמעט ללא שונות. במצב כזה, נראה כי היה צריך למעשה לעצור או להפחית את ההשקיה.



איור 7: דוגמאות למפות גובה של שדות על בסיס המודל. סדר הערכים: אדום, כתום, צהוב, ירוק בהיר וירוק כהה. החלוקה היא יחסית לאותו מועד (natural breaks)

איור 8: מפת עזר לקבלת החלטות מימין 10.6 ומשמאל 5.7. חום: מתחת לטווח הרצוי, ירוק: בתוך הטווח הרצוי, כחול: מעל לטווח הרצוי. הטווח הרצוי נקבע 10% מעל ומתחת לגובה של 62 ו-110 ס"מ, שהם הגבהים המומלצים בתאריכים 10.6 ו-5.7 בהתאמה



## מסקנות

נתוני מדידות גובה הנאספים מחקלאים בשגרה באמצעות יישומנים יכולים להוות בסיס למציאת מודל אמפירי בין גובה ובין מדד צימוח ספקטראלי וזאת למרות המגבלות במרחב ובזמן שיש לנתונים הללו: איננו יודעים את הנקודה המדוייקת ממנה נלקחו הנתונים ואין מדידות גובה רק בימים של חליפת דימות הלוויין. הכח של הנתונים הללו הוא בריבוי שלהם ובשונות שלהם.

החקלאים שהשתמשו ביישומן, טענו כי הוא מאוד נח לשימוש ומאפשר להם לראות בזמן אמת היכן הם יחסית לגובה הרצוי.

יישומן צריך להיות משולב עם מערכת שרתים מאובטחת כדי להבטיח את בסיס הנתונים. ולכן, בשנים הבאות צריך להקים מערכת מאובטחת לאיסוף הנתונים או באמצעות חברה המתמחה בזה או באמצעות הקמת תשתית ציבורית נוחה לשימוש ומאובטחת. ואכן, קבלנו השנה תמיכה נוספת ממועצת הכותנה והמשך הפיתוח יהיה עם חברת AgriTask. בגלל חוסר היכולת להפיק את מיקום החלקות בצורה מדוייקת רק על-ידי נקודת הציון מהטלפון החכם, לא ניתן יהיה להימנע מהצורך שהחקלאי יכניס גבולות החלקה ביישומן.

היישומן בשלבים הבאים שלו יכול גם קצב צימוח, ממפ"צ ופמ"ע.

המודל האמפירי שפותח הוא עם מתאם גבוה והנתונים המחושבים עוקבים בצורה טובה אחר הנתונים המדודים גם ברמה של חלקות בודדות ולא רק ברמת הממוצע. עם זאת המודל סובל מרוויה אך הרוויה היא בטווח גבהים שקצה מועד המעקב אחר גובה כך שהחיסרון הזה לעניות דעתנו הוא זניח.

למודל שני יתרונות משמעותיים: תדירות גבוהה יותר בזמן ושונות מרחבית. כלומר, מצד אחד הוא מספק נתונים בתדירות של חמישה ימים ונמצא כי יחסית למדידות הידניות הוא בתדירות גבוהה יותר ומן העבר השני הוא מספק שונות של הגבהים בכל השדה בהשוואה למדידת צמחים בודדים בנקודה אחת בשדה שהיא בד"כ קרוב לשוליים.

בגלל שגיאת התקן ובגלל שהדימוטים סובלים מעננות ורעש, לא ניתן במצב הנוכחי לספק בצורה אמינה קצב צימוח. אך בשלב הבא במידה ויהיה מימון מספק, נוכל ליישם טכניקות של ניקוי רעשים והחלקות על מנת לספק גם קצב צימוח בצורה אמינה ויחסית מדוייקת.

בנוסף לזה, ככל שייאספו יותר נתונים מהחקלאים בשנים שונות נוכל לבחון חתכים של הנתונים על בסיס זנים, תאריכי זריעה וסוגי קרקעות ובכל אולי לייצר מודלים טובים יותר לזנים השונים ולאזורים שונים.

## **תודות**

המחקר מומן על-ידי מועצת הכותנה. תודה לכל המדריכים והחקלאים שאספו נתונים או ספקו לנו נתוני גובה ואפשרו למעשה את פיתוח המודל. תודה מיוחדת למדריך איתן סלע שאסף שהיה שיאן הכנסת הנתונים באמצעות היישומן.