

פיתוח ממשק השקיה מיטבית בחמצה על בסיס ניתוחים תלת-ממדיים מבוססי תמונות

Development of optimal chickpea irrigation management by image driven three-dimensional analyses

מוגש לקרן המדען הראשי של משרד החקלאות ופיתוח הכפר ע"י:

ד"ר רן לאטי, חוקר ראשי, מנהל המחקר החקלאי, מרכז מחקר נווה יער, פרופ' שגיא פילין, חוקר שותף, הנדסת מיפוי וגיאואינפורמציה, הטכניון, פרופ' שחל עבו ופרופ' צבי פלג, חוקרים שותפים, המכון למדעי הצמח וגנטיקה בחקלאות, האוניברסיטה העברית.

**Ran Lati**, Phytopathology and Weed Research, ARO, Newe Ya'ar Research Center, P.O. Box, 1021, Ramat Yishay, 30095, [ranl@volcani.agri.gov.il](mailto:ranl@volcani.agri.gov.il)

**Sagi Filin**, Mapping and Geo-Information Engineering, Technion–Israel Institute of Technology, Haifa, 3200003, Israel, [filin@technion.ac.il](mailto:filin@technion.ac.il)

**Zvi Peleg**, The Robert H. Smith Institute of Plant Sciences and Genetics in Agriculture, The Hebrew University of Jerusalem, Rehovot 7610001, Israel; [zvi.peleg@mail.huji.ac.il](mailto:zvi.peleg@mail.huji.ac.il)

**Shahal Abbo**, The Robert H. Smith Institute of Plant Sciences and Genetics in Agriculture, The Hebrew University of Jerusalem, Rehovot 7610001, Israel; [shahal.abbo@mail.huji.ac.il](mailto:shahal.abbo@mail.huji.ac.il)

#### תקציר

מטרת המחקר היא פיתוח בסיס ידע לקבלת החלטות מושכלות בהשקית חמצה אשר תבטיח רמות יבול וניצול מים מקסימלי. כמו גם, פיתוח כלים מבוססי תמונה שיאפשרו שחזור תלת-ממדי של חמצה לצורכי זיהוי וכימות פרמטרים מרחביים כאמצעי תומך לקבלת החלטות. **בשנת 2019 ו-2020** נערכו ניסויי שדה עם תחת רמות השקיה משתנות (50-140%) בשני אתרים, שבאחד מהם (גילת) נחשפו הצמחים למחסור במים. הגבלת זמינות המים הובילה לפחיתה ביצור חומר היבש והתבטאה במדדים מורפולוגיים כמו מספר תרמילים ומרחק בין תרמיל אחרון למפרק אשר הושפעו יותר ממדדים אחרים על ידי מצב המים. תוצאות הניסויים משנים אלו הראו כי מקדם השקיה של 110% (דהיינו, מקדם 1.1), בטווח ערכים של 100-120% מהתאדות פנמן, עדיף על מנת להשיג יבול מקסימלי. תוצאות אלו אושרו בסדרת ניסויים שנערכה בשנת **2021** גם באזורי גידול נוספים בתנאי אקלים וקרקע שונים. בהקשרים של הערכת מדדי הצימוח תלת ממדים ראינו כי המדדים המורפולוגיים והספקטראליים שהופקו נבחנו ביכולת חיזוי מצב המים בעלה

ומדדי צימוח נוספים, משקל יבש ו- leaf area index (LAI). בחינה של כל פרמטר בנפרד לא הובילה לרמות מתאם גבוהות, אולם שימוש במודלים מרובי משתנים המשלבים פרמטרים ספקטראליים ומורפולוגיים אפשרו יכולת חיזוי טובה. עם זאת, מדדים אלו מושפעים מהפרמטרים המרחביים של הצמח בצורה קריטית. אירועי אקלים המשפיעים על התפתחות התקינה של הצמחים יפגעו בדיוק ההערכות ולכן מדדים מורפולוגיים אינם מומלצים ככלי לקבלת החלטות בנושאי השקיה.

מעריכים מומלצים לבדיקת הדוח המדעי:

1. אור רם (שה"מ)
2. ד"ר און רבינוביץ (מו"פ צפון)
3. פאדי קיזל (טכניון)

**הניסויים אינם מהווים המלצות לחקלאים**

חתימת החוקר \_\_\_\_\_ תאריך: \_\_\_\_\_

#### **תוכן עניינים:**

מבוא- 3

מטרות 4

חלק א'- פיתוח ממשק השקיה לחמצה 4-10

חלק ב'- פיתוח מודל מרחבי תלת ממדי ברמת הצמח השלם 10-14

דיון- 14-17

## מבוא ותיאור הבעיה

שטחי החמצה (*Cicer arietinum*) בישראל תופסים כ-80,000 דונם, ומתפרשים ברוב שטחי הגד"ש בארץ. החמצה נזרעת בחורף ובמשך חודשי הגידול הראשונים מתבססת על גשם. בתום עונת הגשמים נפרשות שלוחות טפטוף המספקות את תצרוכת המים עד סיום הגידול. אספקת המים בטפטוף מקבילה לשלב התירמול ומילוי הזרעים, והכרחית לאבטחת יכול מרבי. בעוד שבגידולי קיץ אחרים קבלת החלטות בהקשר של מועד וכמות השקיה מתקבלות באמצעות לוחות השקיה ופרוטוקולים שפותחו ואומתו לאורך שנים רבות, בחמצה לא קיים ידע דומה. החלטות מתקבלות לרוב בהתאם לידע אישי של המגדל והמדריכים. לא ברורות הכמויות הדרושות לאבטחת יכול מרבי ולא קיימים אמצעים לזיהוי התפתחות תקינה של הצמחים. עם עליית מחירי המים והפיכתם לרכיב מרכזי בתשומות, ושינויי האקלים, גובר הצורך ביעול השימוש במים תוך שמירה על רמות יכול גבוהות כדי לאפשר עלייה ברווחיות הגידול. מחקרים שונים הראו כי קבלת החלטות בנושאי השקיה המתבצעות בהתאם למצב המים בצמח בזמן נתון יכולות להוביל לעליה ביכול תוך שיפור ביעילות ניצול המים של הגידול [1]. השיטה הזמינה כיום למגדלים לקביעת מצב המים בצמח הינה שימוש בתא לחץ, אולם שיטה זו מסורבלת וארוכה והשימוש בה מועט. הצורך בידע בזמן אמת על מצב המים בצמח אל מול דלות האמצעים לכימות מצב זה מדגיש את הצורך באפיון מדדים פיזיולוגיים/מורפולוגיים אובייקטיביים לקביעת מצב המים בחמצה ובפיתוח גישות אוטומטיות להערכת מדדים אלו כבסיס לקבלת החלטות [2]. מצלמות תרמיות הינן אמצעי להערכת מצב המים בצמח. עד היום פותחו בהצלחה מודלים לזיהוי ומיפוי מצב המים בגידולים שונים כמו כותנה, תירס, תפוחי אדמה וכן בגידולי מטע שונים [3]. עם זאת, המודלים שפותחו עד כה התבססו על מצלמות שמחירן גבוהה וזמינותן לחקלאי הבודד נמוכה, עובדה שמנעה שימוש נרחב באמצעי זה.

עקת מים בשלבי הגידול השונים גורמת למגוון שינויים מורפולוגיים-פיזיולוגיים בצמח המתבטאים בהתפתחות לא תקינה של צמחים. הפגיעה בתהליכים הפיזיולוגיים והביוכימיים של הצמח פוגמת בחלוקת והתארכות התאים, אולם הביטוי הפנוטיפי של העקה ישתנה בין מינים, שלבי צימוח ועוצמת וזמן החשיפה לעקה [4]. בתוכנית זו אנו מציעים לפתח מערכת קבלת החלטות להשקיה מושכלת בחמצה שעיקרה התבססות על ידע אגרונומי המשולב במידע מורפולוגי/פיזיולוגי מבוסס תמונה ושיספק אינדיקציה למצב המים והתפתחות החמצה במועד ההשקיה. שימוש במידע התמונתי ישפר את תהליך קבלת החלטות ויאפשר ליישם את מנת המים המיטבית למועד נתון. בהשוואה לשימוש בתא לחץ לאמידת מצב המים, שימוש במידע מבוסס תמונה יאפשר חסכון בזמן, במורכבות המדידה ובכסף הדרוש לרכישת מערכות מדידה ייעודיות.

## מטרות המחקר (מתוך הצעת המחקר)

מטרת המחקר המוצע היא פיתוח בסיס ידע לקבלת החלטות מושכלת בהקשר להשקיה בחמצה אשר יבטיח רמות יכול וניצול מים מקסימלי. במחקר המוצע נכמת את כמויות המים הדרושות לחמצה ליצירה ומילוי תרמילים מיטבי, ונאפיין את הפרמטרים המורפולוגיים המצביעים על התפתחות תקינה זו. כמו כן, נפתח כלים מבוססי תמונה שיאפשרו שחזור תלת-ממדי של חמצה לצורכי זיהוי וכימות פרמטרים מרחביים

כאמצעי תומך לקבלת החלטות. בטווח הארוך המחקר בא לקדם את גישת ההשקיה המיטבית ולאפשר הפחתה בכמויות המים בהן נעשה שימוש תוך שמירה על רמת יכול גבוהה.

### המטרות הספציפיות של המחקר הן:

1. פיתוח ממשק השקיה מיטבי לחמצה בשלבים השונים של יצירת התרמילים ומילוי הזרעים.
2. פיתוח מודל ייעודי מבוסס תמונה לשחזור תלת-ממדי של חמצה.
3. בחינת יעילותם של מדדים פיסיו-מורפולוגיים לאפיון מצב המים בחמצה.

## חלק א' - פיתוח מודל השקיה מיטבי

### שיטות וחומרים

**שיטת המבחן:** בשנים 2019 ו-2020 נערכו שני ניסויים אשר תוכננו כחד-גורמים (השקיה) ב-6 טיפולי השקיה במתכונת של בלוקים באקראי עם 6 חזרות. הניסויים נערכו בחות הניסיונות בגילת. ממדי כל חזרה היו 25 מטר אורך ושלוש ערוגות רוחב (5.79 מטר). בשנת 2021 ערכנו תצפית אימות (ולידציה) בשני אתרים לתוצאות שקיבלנו בשנתיים הראשונות. באתרים אלו הושווה טיפול השקיה המקובל (100%) לטיפול המומלץ מתוכנית זו, 110%. הניסויים הוצבו בחלקות מסחריות בשני אתרים בעלי אקלים שונה: גילת (נגב מערבי) וקיבוץ גבע (עמק יזרעאל). שטח כל טיפול היה 14 דונם.

**אגרוטכניקה:** גידול קודם: חיטה. עיבודי יסוד: משתת וקלטור ערוגה. החלקות נזרעה בשתי שורות על ערוגה במזרעת פלנטר במרווחים של 0.75 מטר בין שורות הזריעה, 17 זרעים\מטר שורה. הזן: "זהבית" של חברת "הזרע". לאורך כל עונת הגידול בוצעו טיפולי תגובה ומנע כנגד מחלות ומזיקים בחומרים ושילובים המקובלים בישראל, מחלות או מזיקים לא היוו גורם או בעיה לגידול ולא השפיעו על תוצאות הטיפולים. השקיה בוצעה על ידי צינור טפטוף בקוטר 20 מ"מ, הטיפולים השונים התקבלו מהצבת שלוחות עם טפטפות בעלות ספיקות שונות לכל טיפול ועם מרווחים דומים בין הטפטפות (0.5 או 0.6 מטר בין טפטפות) כך שהתקבלו ספיקות שעתיות שונות לכל טיפול. בוצעה השקיה שבועית עם משך השקיה זהה לכל הטיפולים.

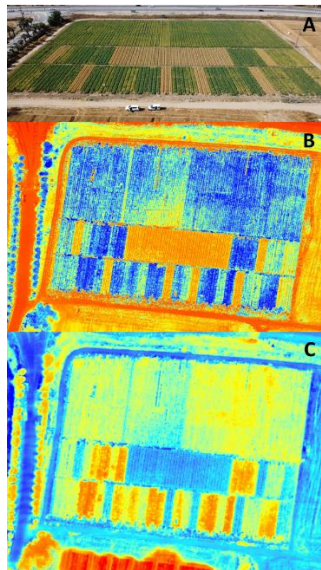
**טיפולי ההשקיה:** מועד פתיחת מים ראשונה נקבע על פי מדידות תא לחץ כשמועד פתיחת המים הרצוי היה בהגעה לפוטנציאל מים בעלה של 16-17 בר. בפועל, נפתחו המים באזור BAR 18-20. שיעורי ההשקיה בטיפולים היו: 50%, 70%, 100%, 125% ו-140% מהתאדות מחושבת אשר נמדדה מתחנה מטאורולוגית סמוכה. ההשקיות ניתנו במרווחים של שבוע.

**ניתוח תוצאות:** ניתוח סטטיסטי לתוצאות נערך בחבילת התוכנה JMP-15, מבחני התחום להשוואת מוצעים נערכו במבחן Tukey. לאורך כל האיורים והגרפים אותיות לטיניות גדולות שונות מצביעות על הבדל סטטיסטי מובהק בין הטיפולים ( $P \leq 0.05$ ).

**מדדי צימוח:** במהלך הניסויים תועדו מדדים שבועיים של: גובה צמח, מספר תרמילים על ענף מרכזי, מרחק קודקוד הצימוח בס"מ מתרמיל מפותח אחרון (Last Fully Developed Pod- LFDP), אורך פרק מעל תרמיל נפוח אחרון (LFDP) וצבירת חומר יבש וגטטיבי ורפרודוקטיבי.

מדדים פיסיולוגיים: מדידת תא לחץ בעלים, טמפרטורת עלווה.

יבול: בסוף העונה נקצרו טיפולי ההשקיה השונים לשקילות יבול בעזרת קומביין ניסיונות (4 שורות מרכזיות מכל חלקה) וכן בדגימות ידניות של 0.5 מטר שורה עם חזרות.



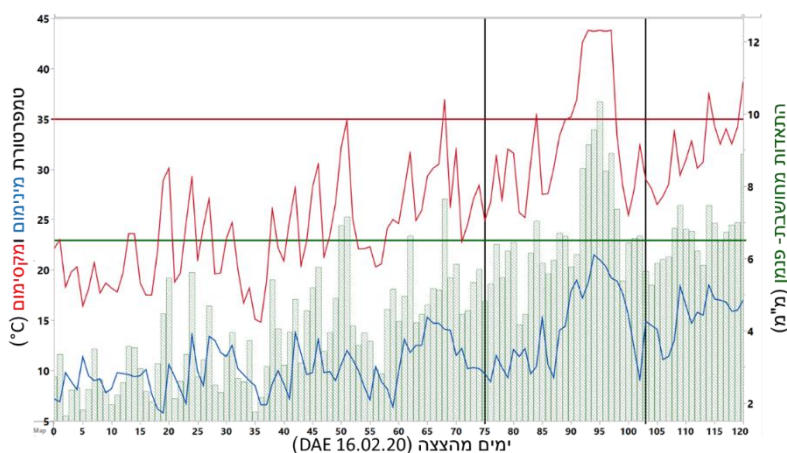
איור 1: חלקת הניסוי במרכז מחקר גילת 2020, משרד החקלאות. תמונה A מרחפן 21.05.20, הדמיה B NDVI ו-הדמיה תרמית C מתאריך 11.06.20.



איור 2: פירוט המדדים המורפולוגיים שתועדו: גובה צמח, מספר תרמילים מפותחים על ענף ראשי, אורך פרק מעל תרמיל מפותח אחרון ומרחק תרמיל מפותח אחרון מקדקוד.

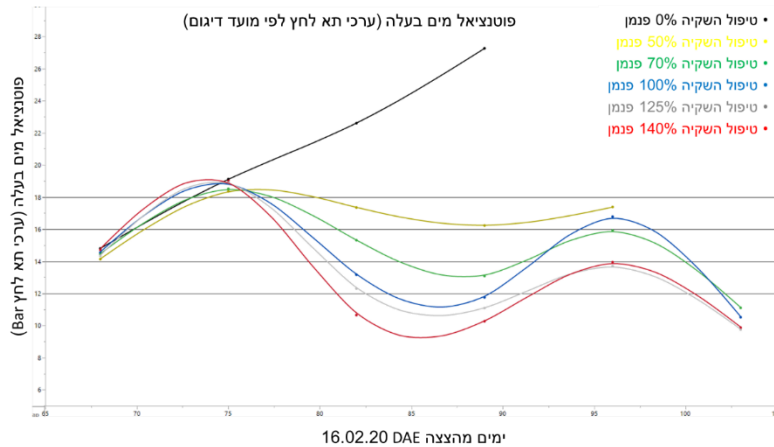
## תוצאות:

**אקלים:** בבחינה של תנאי האקלים בדגש על תקופת ההשקיה (30.04.20 (DAE 75) - 28.05.20 (103 DAE) ניתן להבחין (איור 3) כי מתוך 29 ימים אלו, תועדו 12 ימים ובהם מעל 35 מעלות צלזיוס אשר היוו עבור גידול החמצה עונה חמה מאוד כבר משלב מוקדם מאוד של צבירת היבול. תקופה זו התאפיינה גם בהתאדות מחושבת (פנמן) גבוהה - 12 ימים מעל התאדות מחושבת של 6.5 מ"מ/יום. לשם השוואה, בעונה הקודמת (2019) תקופת ההשקיה נמשכה על פני 43 ימים ועיתוי הימים החמים המלווים בהתאדות גבוהה אירעו בעיקר בסוף תקופת ההשקיה לעומת עונת 2020 בה נמדדו ימים עם אקלים קיצוני כבר בתחילת תקופת ההשקיה עם רצף קיצוני של 7 ימים כאלו ברצף ו"התקבצות" של 11 ימי אקלים קיצוני מתוך 15 בשיא עונת ההשקיה וצבירת היבול DAE 87-101.



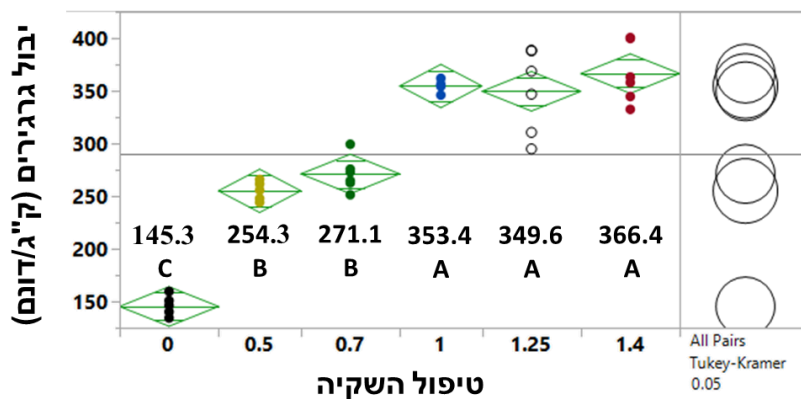
**איור 3:** מעקב אקלים עונתי (טמפרטורת מינימום-מקסימום והתאדות פנמן), גילת 2020. טמפרטורת מקסימום (אדום), טמפרטורת סף של 35 מעלות צלזיוס מבוטאת בקו אופקי אדום. טמפרטורת מינימום (כחול). התאדות פנמן יומית (ירוק), ערך סף של 6.5 מ"מ/יום מופיע כקו אופקי ירוק. מועד פתיחת וסגירת המים מופיעים כקווים אנכיים שחורים בימים 75 ו-103 DAE, בהתאמה.

**פוטנציאל מים בצמח:** בהתבוננות באיור 4, ניתן לראות כי במועד פתיחת המים ערכי הלחץ היו גבוהים מאוד (מעל 18 Bar). לאחר השקיה ראשונה ניתן להבחין כי בעוד בטיפולים ה"רטובים" (100%, 125%, 140% מהתאדות מחושבת) ערכי תא הלחץ ירדו לערכים רצויים מתחת ל- 14 Bar, הרי שבטיפולים ה"יבשים" (50%, 70% מהתאדות מחושבת) ערכי הלחץ לא ירדו לערכים רצויים ונותרו גבוהים מ- 15 Bar. למעשה, טיפולי השקיה אלו גדלו ותירמלו בתנאי עקת מים מסוימת במהלך כל השלב הרפרודוקטיבי של הגידול.

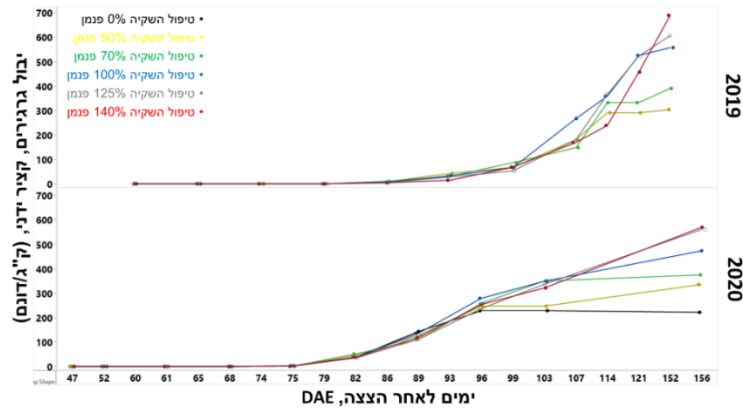


איור 4: פוטנציאל מים בעלה (ערכי תא לחץ Bar) עונתי, דיגום אחת לשבוע, גילת, 2020.

**יבול זרעים:** היה שונה באופן מובהק בין הטיפולים כשהטיפולים ה"יבשים" (50% ו-70% מהתאדות מחושבת) לא נבדלים סטטיסטית (איור 5). בטיפולים ה"רטובים" (100%, 125% ו-140%) גם אין הבדל מובהק בין הטיפולים. ניתן להתרשם כי אירועי האקלים המוקדמים ועוצמתם לא אפשרו לטיפולים ה"רטובים" להשיג את מלא פוטנציאל היבול שלהם, גם בטיפולים היבשים ניכר יבול נמוך יותר לעומת עונה 2019. בטיפולים ה"רטובים", למרות שפוטנציאל המים בצמח היה ברמות סבירות לגידול (איור 4) פרמטר זה לא התבטא בצבירת יבול. עומס החום הכבד והממושך לא אפשר לצמחים לחנוט ולמלא זרעים בצורה נאותה וקיצר דרמטית את משך עונת ההשקיה ולכן רמות היבול בעונה 2020 נמוכות בהשוואה לעונת 2019 (ראה איור 7).

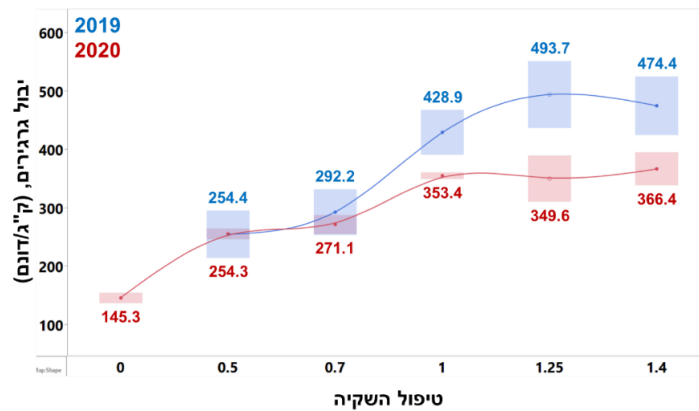


איור 5: ממוצע יבול זרעים כתלות בטיפולי השקיה, קציר בקומביין ניסיונות, גילת, 2020. אותיות לטיניות גדולות שונות מצביעות על הבדל סטטיסטי מובהק בין הטיפולים ( $P \leq 0.05$ ).



איור 6: יבול זרעים, קציר ידני מהלך עונתי לפי טיפולי השקיה, גילת 2019, ו-2020.

בשתי העונות בגילת פתיחת המים הדיפרנציאלית הראשונה חלה סביב 75 ימים מהצצה. בעוד שבעונת 2019 נמשכה תקופת ההשקיה כשישה שבועות (השקיה אחרונה DAE 121) הרי שבעונת 2020 תקופת ההשקיה ארכה כארבעה שבועות (השקיה אחרונה DAE 103) בלבד ובמהלכה חלו אירועי שרב ממושכים. נראה כי קצב צבירת יבול הזרעים הוא מאד בעונת 2020 בהשוואה ל-2019 וכן הטיפולים הרטובים (100, 125, 140 אחוזים מפנמן) לא הצליחו לתרגם את כמויות המים הגדולות שקיבלו ליבול (איור 6). אנו מניח כי לכן גם לא נוצרו פערים גדולים בתוך שתי קבוצות הטיפולים (הרטובים והיבשים). אישוש נוסף לכך הוא בהשוואה ביבול הזרעים הסופי בקציר קומביין בין השנים:

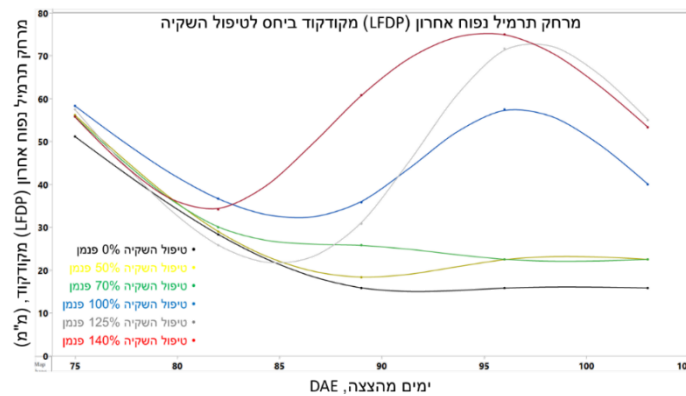


איור 7: ממוצע יבול זרעים, גילת, עונת 2019 (כחול) ו-2020 (אדום), קציר בקומביין. סטיית התקן סביב לכל ממוצע מוצגת בריבועים.

**המרחק בין התרמיל הנפוח האחרון (LFDP-Last Fully Developed Pod) לקדקוד הצימוח: מדד**  
 זה קל, מהיר ופשוט עבור החקלאים לאפיון מצב המים בצמח. התקצרותו של מרחק זה מהווה אזהרה כי הצמח מתחיל להרגיש עקת מים מתמשכת ומתקרר לסיום עונת הגידול שלו. מרחק קטן מאוד (מתחת 30 מ"מ) מאותת כי הצמח נמצא בגרעון מים בקרקע ומתחיל תהליך של קיז' (Cut-Out) בעוד שאורך גדול יותר מ-100 מ"מ מצביע כי הצמח נמצא בסטטוס מים גבוה יחסית וההשקיה או מצב הרטיבות בקרקע מספק, בעונת 2019 בטיפולים ה"יבשים" אורך זה נע סביב 30-50 מ"מ בעוד שבטיפולים ה"רטובים" אורך זה היה סביב 100 מ"מ. בניסוי בגילת 2020 במועד פתיחת המים (איור 8) מדד זה היה כבר מתחת

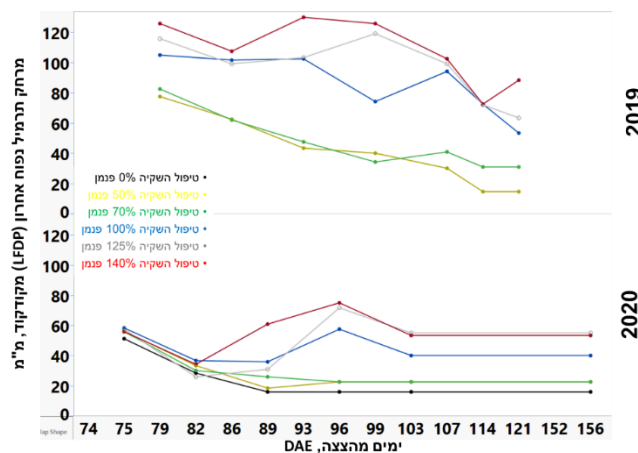


לאופטימום, 50-60 מ"מ, ללא הבדלים בין הטיפולים. רק לאחר כשבועיים מפתחת מים ראשונה (75 DAE) ניכרים הבדלים בין הטיפולים כשבטיפולים ה"יבשים" מדד זה כבר מצביע על סיום הגידול וחסור יכולת לפתח אברי פריחה ותרמילים נוספים, עם ערכים של 30 מ"מ ומטה. רק לאחר שלושה שבועות נוצרו פורים בין הטיפולים ה"רטובים" ל"יבשים" אך בשל תנאי האקלים התובעניים (טמפרטורות והתאדות) למעשה, שום טיפול (גם לא הטיפולים המושקים בעודף 140% ו-125%) לא הצליח להגיע לערכי האופטימום במדד זה גם בעיצומה של עונת ההשקיה.



**איור 8:** ממוצעי מרחק תרמיל נפוח אחרון (LFDP) מקודקוד (מ"מ) כתלות בטיפולי השקיה, מהלך עונתי, גילת, 2020.

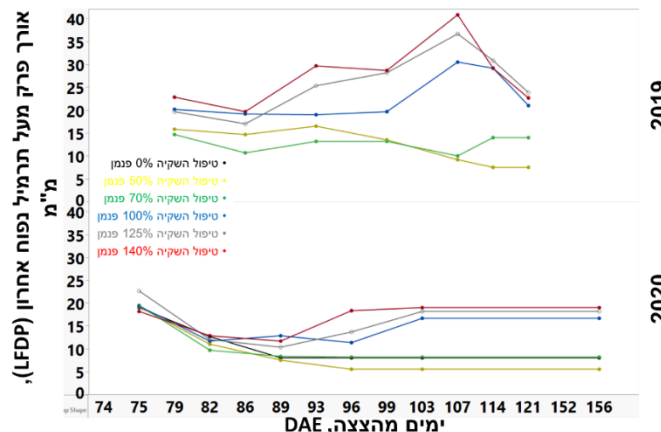
כאשר משווים בין עונות 2019 ו-2020 במדד זה, ניתן לראות (איור 9) שבעונת 2019 במועד פתיחת המים המרחק בין התרמיל הנפוח האחרון לקודקוד היה סביב 100 מ"מ בעוד שבעונת 2020 מרחק זה נע סביב 60 מ"מ. ערך זה מצביע על כך שבעונת 2020 ההשקיה החלה בעת שהצמחים החלו כבר להראות סימני עקה וגם במנות מים גדולות (הטיפולים ה"רטובים") לא ניתן היה כבר לשפר את מאזן המים בצמח, גם בשל תנאי האקלים הקיצוניים ב-2020. לפיכך, לכל אורך עונת ההשקיה של 2020 לא הצלחנו להביא שום טיפול השקיה למרחק האופטימלי, לפי נתוני 2019-100-80 מ"מ, אליו שאפנו להוביל את הצמח.



**איור 9:** מרחק תרמיל נפוח אחרון (LFDP) מקודקוד במילימטרים, מהלך עונתי, גילת עונות 2019, ו-2020.

אורך הפרק מעל תרמיל נפוח אחרון: מהווה גם הוא מדד קל, פשוט ומהיר לאבחון סטטוס המים בצמח בדומה לאורך בין התרמיל הנפוח האחרון לקדקוד (איור 9) מאידך גיסא, אורך פרק זה נקבע סופית מספר ימים לפני מועד המדידה ולכן ניתן להיעזר בו ולנתח את ההשקיות שכבר יושמו בדיעבד וגם לבדוק במקביל פרמטרים נוספים. מהתבוננות באיור 10 ניתן לראות כי בצמחים תחת עקת מים יהיה אורך פרק זה קצר מ-20 מ"מ בעוד שבצמחים המושקים היטב או בעודף יעלה אורך מפרק זה על 30 מ"מ ואף יחצה את קו ה-40 מ"מ. בעונת 2019 ניתן לראות שמנות מים גדולות יחסית אכן מביאות מדד זה לערכים הגבוהים מ-30 מ"מ לעומת הטיפולים היבשים שבהם אורך פרק זה לא מצליח לעלות על 20 מ"מ. כערך אופטימלי ננסה לשאוף לאורך פרק שנע סביב 30 מ"מ אשר יאותת לנו כי מנת המים מספיקה והצמח יכול להמשיך ולפתח עוד ענפים ואברי פרי במקביל לתהליך מילוי הזרעים שכבר חנטו. בעונה 2020, ניתן להניח שבשל חנטה והתפתחות תרמילים וזרעים לקויות ולמרות ההשקיות התכופות אשר מטרתן הייתה לנסות ולשמור על מהלך גידול תקין הצמחים אמנם אידו מים אך לא הצליחו לפתח נוף ואברי פריחה ותרמילים כמצופה.

**אימות (ולידציה):** ממשק ההשקיה החדש העלה את רמת היבולים בשני האתרים אשר נבחנו ברמה דומה, 16% בקירוב. בקיבוץ גבע עלה יכול הגרגרים בעקבות טיפול ההשקיה המשופר, מ-330 ל-384 ק"ג לדונם בטיפולי 100% ו-110%, בהתאמה. בגילת נרשמו עליות דומות כאשר יכול הגרגרים הסופי היה 356 ו-412 ק"ג לדונם בטיפולי 100% ו-110%, בהתאמה.



**איור 10:** אורך פרק מעל תרמיל נפוח אחרון (LFDP), מ"מ כתלות בטיפולי השקיה, מהלך עונתי, גילת, 2019 ו-2020.

**חלק ב-ג' -** פיתוח מודל מבוסס תמונה לשחזור תלת-ממדי של חמצה, ובחינת יעילותם של מדדים פיזיולוגיים המאפשרים אפיון מצב המים בחמצה.

### שיטות

לשם בחינת הקשר בין מצב המים למורפולוגית צמחי החמצה, **ברמת הצמח השלם**, נעשה שימוש ברחפן מסוג DJI MAVIC MINI בעל מצלמה מובנית עם ערוצי RGB (כאשר אותיות אלו מייצגות את עוצמת החזר בערוצים הכחול, ירוק ואדום, בהתאמה). בשתי עונות הגידול (2019 ו-2020) צילום החלקה נעשה מגובה של 25 מטר באותם המועדים בהם נלקחו הדגימות הפיזיולוגיות. כל גיחת צילום כללה שני צילומים באמצעות מצלמת ה-RGB לפני ואחרי הסרת הצמחים לבימוסה. מכל גיחת צילום הורכבה תמונת תצריף

בעלת אוריינטציה גיאוגרפית של החלקה (אורתו מוסאיק) באמצעות תוכנת Pix4D. כל אורתו מוסאיק הורכב מכ-200 תמונות עם חפיפה של 70% בקירוב, שסיפקו רזולוציה מרחבית של 0.7 cm/pixel. התמונות יושרו (georeference) באמצעות מטרות בקרה קרקעיות (control ground points) שנדגמו בתמונות האורתו. לצורך הערכת גובה ונפח הצמחים יצרנו פוליגונים לפי הטיפולים בעלי שטח של חצי מטר רבוע. הפוליגונים מוקמו במפה על צמחים שנראו לפני הסרת הצמחים ושלא נראו במפה לאחר הסרתם. יצרנו מפת גבהים של החלקה לפני ואחרי הסרת הביומסה באמצעות קובץ DEM (digital elevation model) דו ממדי כאשר כל פיקסל במפת ה-DEM נקבע לרזולוציה של 1 סמ"ר. חישוב גובה הצמח נעשה לפי ההפרש בין ממוצע גובה הפוליגון לפני הסרת הצמחים וממוצע גובה הפוליגון לאחר הסרת הצמחים. נפח הצמחים חושב כמכפלת השטח בגובה. בנוסף, יצרנו מפות אינדקס צימח שהתבססו על ערך הפיקסל הממוצע של כל פוליגון כפי שנרכשו על ידי הרחפן. טבלה מס' 1 מסכמת את האינדקסים הספקטראליים השונים אותם הערכנו מהפוליגונים והנוסחאות התואמות.

ראשית, רמת המתאם בין האינדקסים, הערוצים והפרמטרים המורפולוגיים אותם הפקנו (גובה, שטח ונפח) ובין הפרמטרים הפיזיולוגיים (מצב מים בצמח, LAI ומשקל יבש) נבחנה באמצעות מודלים ליניאריים. בנוסף נבחנה רמת המתאם לפרמטר ההתפתחותי מרחק תרמיל נפוח אחרון (LFDP), אשר נמצא כאינדיקטור טוב למצב המים בצמח. עבור כל אחד מהפרמטרים הפיזיולוגיים נבחנה רמת המתאם ( $R^2$ ) ומידת הדיוק (RMSE) אל מול כל אחד מהפרמטרים הספקטראליים והמורפולוגיים שהפקנו. לאחר מכן נבחנה רמת המתאם בין הפרמטרים הפיזיולוגיים אל מול כל הפרמטרים (הספקטראליים והמורפולוגיים) אותם הפקנו באמצעות שימוש וניתוח של מודלים סטטיסטיים רבי משתנים (Multi Variance Analysis). שיטות סטטיסטיות אלו עושות שימוש במודלים כגון Partial Least Squares Regression (PLS-R) אשר באמצעותם ניתן לקשור בצורה ליניארית מידע פיזיולוגי לנתונים ספקטראליים ומורפולוגיים. מודלים אלו מתמודדים היטב עם נתונים בעלי משתנים מסבירים רבים (אינדקסים שונים) המקיימים קולינאריות חזקה, כפי שמתקבל מנתונים ספקטראליים. יתרה מכך, מודלים אלו מסוגלים לשלב מידע מחיישנים או שיטות דיגום שונות לכדי מודל אחד, במקרה זה, נתונים ספקטראליים ומורפולוגיים, להם ערכים שונים. לצורך הניתוח השתמשנו בכל המדידות מעונת הגידול (120 ו-144 עבור עונת גידול 2019 ו-2020, בהתאמה), כאשר מתוכם הוצאו כ-30% מדידות לבחינת המודלים שפותחו. ראשית נעשה שימוש ב-70% מהמדידות לאימון המודל (calibration), כאשר בשלב השני בוצע אימות (cross-validation). האימות בוצע בשיטת השאר אחד בחוץ (leave one out) כאשר מטרתו הייתה לבחון את יעילות המודל וכלליותו. בשלב האחרון נבחנה יכולת המודל לחזות את הפרמטרים הפיזיולוגיים שנמדדו (prediction) באמצעות המודל שפותח. הערכה זו בוצעה על 30% מהמדידות שלא נכללו בפיתוח המודל. לכל אחד השלבים הוערכה רמת המתאם ( $R^2$ ) ומידת הדיוק (RMSE) לבחינת אמינות המודלים.

**טבלה 1.** הערוצים והאינדקסים (כולל נוסחה) בהם השתמשנו.

אינדקס	נוסחה
G/R	G/R
NDI	(G-R)/(G+R)
EXG	2*G-R-B
VARI	(G-R)/(R+G-B)
GLI	(2*G-B-R)/(2*G+B+R)
IKAW	(R-B)/(R+B)
CIV	(0.44*R)-(0.881*G)+(0.385*B)+18
Combination	(0.25*EG)+(0.3*CIV)+(0.3*EGR)+(0.12*VI)
VI	$G/(R^{0.667}*B^{0.333})$

**תוצאות**

בשלב הראשון נותחה רמת המתאם הלינארית בין האינדקסים הספקטראליים והמדדים המרחבים לבין המדדים הפיזיולוגיים, משקל יבש, LAI ופוטנציאל המים. ניתן לראות כי בשנת הניסוי הראשונה (2019) המדדים המרחביים (מודגשים באפור) היו היחידים בהם ערכי  $R^2$  שהתקבלו היו סבירים עבור LAI ( $<0.41$ ), כאשר במשקל היבש ערכים אלו היו גבוהים עוד יותר והגיעו עד 0.69 בניתוח הנפח (טבלה 2). עם זאת, ערכי  $R^2$  בניתוח של פוטנציאל המים היו נמוכות ביותר ( $>0.16$ ) עובדה המעידה על חוסר היעילות של פרמטרים אלו אשר מנותחים בנפרד כבודדים לחזות את פוטנציאל המים בצמח. בשנת הניסוי השנייה (2020) רמות המתאם בין כל הפרמטרים הפיזיולוגיים לפרמטרים שהופקו מהרחפן היו נמוכות יותר בהשוואה לשנת הניסוי הראשונה. יתרה מכך, גם המדדים המרחבים סיפקו יכולות מתאם נמוכות מאוד, עם ערכי  $R^2$  של 0.02 בקירוב, המעידים על חוסר יכולת מוחלטת לחזות את הפרמטרים הפיזיולוגיים המבוקשים.

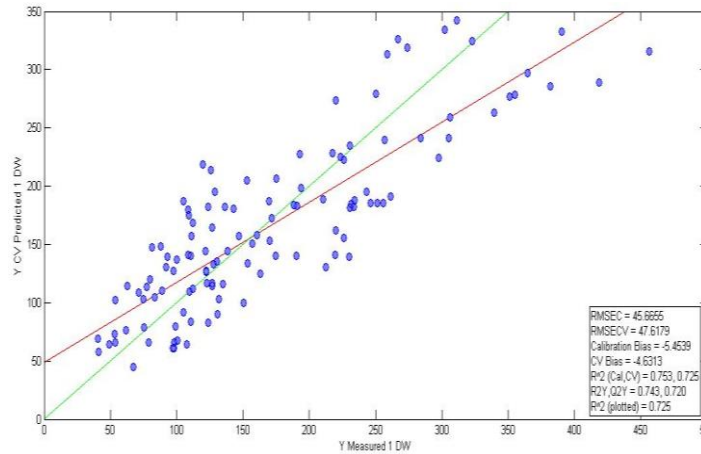
**טבלה 2.** רמת המתאם ( $R^2$ ) ומידת הדיוק (RMSE) של הרגרסיות הלינאריות בין משקל יבש, LAI, ומצב המים בצמח והאינדקסים והפרמטרים המורפולוגיים שהופקו בשנת 2019 (עליון) ו-2020 (תחתון).

	$R^2$				RMSE			
	LAI	DW	LWP		LAI	DW (g)	LWP (bar)	LFDP (cm)
Height	0.42	0.65	0.09	0.17	1.2	51	4.1	4.9
Wid.	0.41	0.55	0.13	0.15	1	68	3.0	5.0
Vol.	0.47	0.69	0.15	0.21	1	45	2.6	4.8
Combination	0.21	0.12	0.33	0.07	1.2	84	1.9	5.4
VI	0.16	0.07	0.28	0.03	1.2	86	1.9	5.1
IKAW	0.02	0.08	0.22	0.01	1.3	86	1.8	5.7
GLI	0.27	0.12	0.29	0.05	1.1	84	1.7	5.3
VARI	0.07	0.06	0.27	0.00	1.3	89	1.7	4.9
EXG	0.27	0.27	0.31	0.13	1.2	83	1.7	5.5
NDI	0.12	0.02	0.28	0.03	1.2	82	1.8	5.6
G/R	0.12	0.03	0.27	0.01	1.2	89	1.6	5.8
CIV	0.15	0.09	0.33	0.02	1.1	60	1.7	4.9

	R <sup>2</sup>				RMSE			
	LAI	DW	LWP	LFDP	LAI	DW (g)	LWP (bar)	LFDP (cm)
Height	0.00	0.00	0.02	0.00	1.1	64	6.6	6.4
Wid.	0.09	0.03	0.04	0.02	1.8	66	6.4	5.6
Vol.	0.00	0.03	0.01	0.03	1.8	70	6.6	6.3
Combination	0.01	0.14	0.04	0.00	1.5	59	6.7	6.4
VI	0.01	0.09	0.04	0.00	1.2	61	6.9	6.2
IKAW	0.06	0.02	0.03	0.04	0.9	63	7.0	6.0
GLI	0.06	0.13	0.06	0.04	0.8	68	6.1	5.9
VARI	0.00	0.20	0.02	0.01	1.2	59	6.3	6.3
EXG	0.03	0.17	0.20	0.00	1.6	60	6.7	6.1
NDI	0.01	0.14	0.01	0.03	1.2	68	6.1	6.0
G/R	0.03	0.13	0.04	0.00	1.4	86	6.7	6.4
CIV	0.16	0.23	0.31	0.00	1.1	62	5.9	6.0

כאשר נותחו הנתונים באמצעות מודל רב משתנים הכולל את הפרמטרים הספקטראליים והמרחביים עלו ערכי R<sup>2</sup> בכל הפרמטרים הפיזיולוגיים שנותחו, ובנוסף השתפרה רמת הדיוק. איור 11 מספק דוגמה מניתוח המשקל היבש ומראה כיצד עלה ערך R<sup>2</sup> בשלב כיוול המודל ל-0.75 (0.69 בניתוח נפח לבד) אולם בערכי RMSE לא היה שינוי. יתרה מכך, בערכי LAI חל שיפור משמעותי הרבה יותר באמצעות הניתוח הרב גורמי (טבלה 3). בשנת 2019 ערכי R<sup>2</sup> עלו מ-0.33 ומטה בניתוח אינדקסים בודד ועד 0.68 עבור מודל הכיוול של הפרמטר LAI. פוטנציאל המים הראה גם כן שיפור ברמות המתאם, אולם במקרה זה הוא היה נמוך יותר, 0.54. גם כאשר נבחנה יכולת החיזוי של המודלים על נתונים חדשים נשמרו רמות מתאם ודיוק דומות בשנה זו. עבור משקל יבש ו-LAI התקבלו ערכי R<sup>2</sup> של 0.77, אולם עבור פוטנציאל מים היו ערכי R<sup>2</sup> נמוכים יותר, 0.55. המודל לא התאים כלל להערכת LFDP ורמות המתאם למדד זה היו נמוכות בכל שלושת השלבים, כיוול, אימות וחיזוי (>0.30).

בשנת הניסוי השנייה (2020) הצליח מודל הניתוח הרב משתנים להעלות את רמות המתאם ולחזות את הפרמטרים הפיזיולוגיים ברמה טובה יותר בהשוואה לאינדקסים ולפרמטרים המרחביים הבודדים. אולם, רמות המתאם היו נמוכות ביותר בשני שלבי הפיתוח, כיוול ואימות. הפחיתה המשמעותית נצפתה בכל הפרמטרים. עבור משקל יבש יקדו רמות המתאם עד 0.26 בכיוול, בהשוואה ל-0.75 בשנת 2019. ב-LAI ומצב המים היו הפחיתות ברמות המתאם חדות גם כן והגיעו עד 0.14 בשלב האימות. רמות מתאם אלו מעידות על איבוד מוחלט של יכולת החיזוי של המדדים הפיזיולוגיים המבוקשים באמצעות הנתונים הספקטראליים והמרחביים שהופקו, ולא היה טעם באימות המודל על נתונים חדשים.

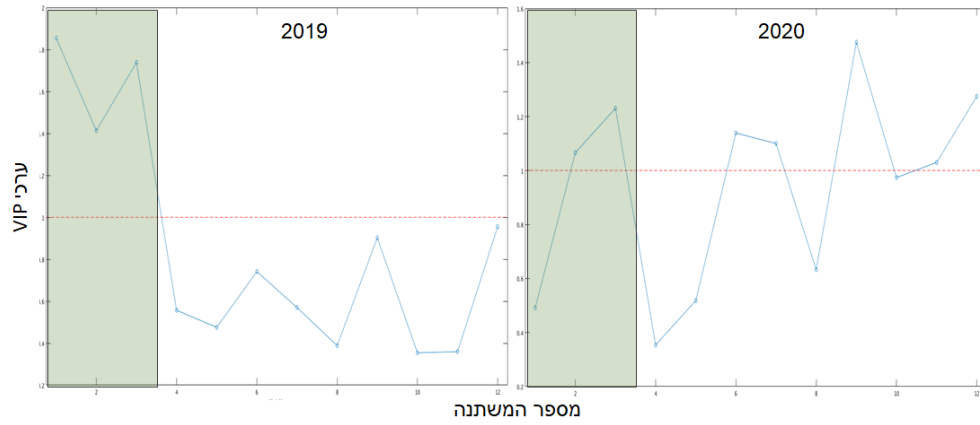


איור 11. בחינת הקשר בין משקל יבש (DW) מדוד וחזוי המבוסס על מודל PLS.

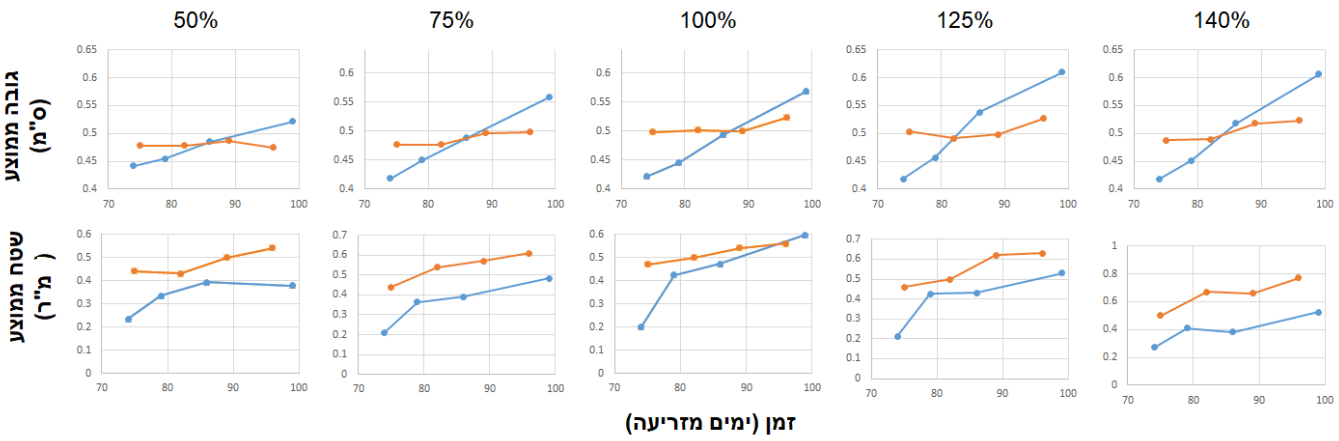
**טבלה 3.** רמת המתאם ( $R^2$ ) ומידת הדיוק (RMSE) בשלבי הכיול (calibration) האימות (cross validation) והחזוי (prediction) שהתקבלו מהמודלים הרב-משתנים בהם נעשה שימוש (PLS ו-SVM) לבחינת הקשר בין מדדים ספקטראליים ומורפולוגיים לפרמטרים הפיזיולוגיים משקל יבש, LAI ומצב המים בצמח.

		2020				2019				מודל/פרמטר	
		RMSE		$R^2$		RMSE		$R^2$			
	חזוי	אימות	כיול	חזוי	אימות	כיול	חזוי	אימות	כיול		
משקל יבש		62	57	0.18	0.26	44	43	41	0.70	0.72	0.75
LAI		1.2	1.1	0.17	0.22	0.58	0.80	0.74	0.77	0.63	0.68
מצב מים (bar)		1.6	1.7	0.14	0.46	1.2	1.4	1.3	0.55	0.48	0.54
LFDP		2.5	2.2	0.14	0.22						

איור מס' 12 מספק אינדיקציה נוספת להבדלים בין השנים ביכולות החזוי של המדדים הפיזיולוגיים של צמחי החימצה והסיבות לכך. איור זה מציג את ערכי ה-VIP של הפרמטרים השונים אשר הוכנסו למודל הרב משתני לחיזוי המשקל היבש. ערכים הגבוהים מ-1 (קו אדום מקוקו) מעידים על תרומה ליכולות המודל בחיזוי הפרמטר. בירוק מודגשים הפרמטרים המרחיבים, גובה, שטח ונפח (בהתאמה לפי הסדר). כפי שניתן לראות, בשנת 2019 לשלושת הפרמטרים הללו התרומה המשמעותית ביותר ליכולות החזוי של המודל עם ערכי VIP הגבוהים מ-1.4, בהשוואה לפרמטרים הספקטראליים שהיו כולם נמוכים מ-1, וככל הנראה היו משניים בחשיבותם. בשנת 2020 חלה פחיתה בערכים אלו כאשר בגובה חלה הפחיתה המשמעותית ביותר, מ-1.85 (2019) ל-0.55, והוא כעת אינו תורם כלל לחיזוי המשקל היבש. ניתן לראות כי השטח והנפח (פרמטרים 2, ו-3, בהתאמה) עדין גבוהים מ-1, אולם יכולת החיזוי הכללית הנומכה של המודל בשנה זו מעיד על חשיבות התפתחות מרחיבת "תקינה" של צמחי החימצה עלמנת לספק הערכות פיזיולוגיות אמינות.



איור 12. ערכי VIP של המודל PLS לחיזוי משקל יבש.



איור 13. ערכי גובה ושטח ממוצעים של צמחי החימצה תחת משטרי ההשקיה השונים אשר הופקו מהרחפן והוכנסו למודל החיזוי ב 2019 (כחול) ו-2020 (כתום).

## דיון ומסקנות

בשנים האחרונות פוקדים את אזורנו אירועי אקלים קיצוניים ובתוכם גם עונות עם טמפרטורות קיצוניות למספר ימים ולא שעות בודדות. אירועים אלו, על פי התחזיות, לא ילכו ויתמעטו אלא רק ילכו ויתגברו בתדירות הופעתם ועוצמתם. על מנת שצמח החמצה, שמקורה כקטנית חורפית, יוכל לעמוד בתנאים אלו ולהצליח לייצר יכול זרעים גבוה יש לשמור על צמח מאוזן מבחינת מצב המים. מצד אחד הפרזה במנות המים יגרמו לצימוח וגטיבי על חשבון ייצור זרעים (מקדם קציר נמוך) עם סיכון גדול לרביצה אשר למעשה מסיימת את שלב צבירת יכול הזרעים ואף פוגעת ביכול שכבר נצבר על ידי הצללת תרמילים קיימים וסכנה של התעפשותם. מצד שני, מנות מים קטנות יובילו להתקצרות המרחקים בין האברים הרפרודוקטיביים לקדקוד הצימוח, מיעוט ענפים נושאי פרי וסכנה של "קיוץ" (cut-out) מוקדם טרם השלמת צבירת יכול זרעים מרבית. במקרים בהם הצמחים יאבדו טורגור בשלב צבירת היכול בה הצמחים עמוסים באברי פרי בחלק העליון של הצמח ותחול עלייה דרסטית בהתאדות היומית, גם אם ליום-יומיים), הצמחים יכרעו תחת הנטל וירבצו. גם אם נשיב לצמח את המים החסרים בהמשך, הצמחים לא יוכלו להזדקף והמשך הצימוח ויצירת אברי הפרי כבר לא יהיו כתקנם, גורם שיוביל ליכול זרעים נמוך. לפיכך, ניטור מצב המים בצמח בצורה מדויקת היא חיונית להבטחת משטר מים תקין ושמירה על פוטנציאל ייצור זרעים גבוה. לאחר הערכת מצב המים בצמח יש לשמור על מדד קבוע אחיד ומהימן אשר יתאים לכל אזור גידול, סוג קרקע או מועד זריעה. תגובת זנים שונים למים תבחן בהמשך המחקר העתידי.

מדידות פוטנציאל מים בצמח על ידי תא לחץ הם כלי חשוב ומדויק להערכת סטטוס המים בצמח, לאור היבולים הגבוהים (איור 7) שהושגו למרות תנאי מזג האוויר הקשים יחסית לגידול חמצה (איור 3) ניתן להניח כי יש להמתין לפתיחת מים ראשונה כל עוד ערכי תא הלחץ לא חצו את ערכי 17 Bar. לעיתים, כדאי להקדים מעט ולא להסתכן בהשריית עקת מים חמורה מדי. לאחר פתיחת המים יש לשמור על ערכי תא לחץ של כ- 14-12 Bar על מנת להשיא יכול זרעים גבוה.

במעקב מדדים מורפולוגיים בצמח, בעזרת סרגל, ניתן לזהות את מצב המים בצמח בעיקר בדיעבד ולנסות להגיב ולתקן מיד כשניתן. כאשר נמדד מרחק בין תרמיל נפוח אחרון (LFDP) לקדקוד, יש לשמור על ידי השקיות על מרחק שינוע סביב 80 מ"מ (איור 9). אך בו בזמן, לוודא שערך זה לא עולה על 100 מ"מ מחשש לרביצות שיגרמו לאובדן יכול והתעפשויות של יכול שכבר נצבר וכן לבזבוז מים כמשאב וכאמצעי ייצור. ניתן ואפשר להשתמש כמדד זה לאחר שרבים- גם בבעל וגם בשלחין, מרחק גדול מ- 70-80 מ"מ יצביע שמצב המים בקרקע היה מספק והפגיעה באברי פרי קיימים ובהמשך תרמול וחנטה מקורם בשרב. מרחק הקטן מ- 30 מ"מ יצביע שהצמח כבר סיים את יכולתו "להמשיך ולתפקד" גם עם מנות מים גדולות לאחר מכן. באופן דומה, אורך פרק מעל תרמיל נפוח אחרון (LFDP) הוא מדד אשר משקף את מצב המים בצמח כשבוע-עשרה ימים לפני הדיגום ויכול להצביע על אירועי אקלים קיצוניים או להצביע על השקיה בעודף/חוסר בדיעבד. על פי תוצאות היכול (איור 10), ניתן להסיק כי אורך הפרק האופטימלי צריך לנוע סביב 30-35 מ"מ. כדאי לנטר מדד זה כבר מתחילת העונה עוד לפני פתיחת המים הראשונה על מנת לצפות ולחזות את מועד פתיחת המים העתידי לחקלאים אשר אינם משתמשים בתא לחץ באופן שוטף, בהנחה שפתיחת המים הראשונה היא כבר לאחר תירמול. גם כאן, מעקב אחר אורך הפרקים האחרונים בצמח יכול



להצביע על סטטוס המים של הצמח מספר ימים-שבועות אחורה. לאחר שנוטר מצב המים בצמח יש לשמור על רצף השקיות במרווחים לא ארוכים, כאשר מנות המים נקבעות על פי סך התאדות פנמן ממועד השקיה קודמת מוכפל במקדם אופטימלי להשקיה. תוצאות השנתיים האחרונות מראות כי מקדם זה הוא 110% (דהיינו, מקדם 1.1) בטווח ערכים של 100-120% מהתאדות פנמן. ניסוי האימות שנערכו בשנת 2021 באזור גידול נוסף המאופיין בקרקעות ואקלים שונה אישרו קביעה זו. צמחי החמצה התפתחו טוב יותר תחת מקדם ההשקיה המומלץ שלנו, והניבו יכול גבוהה יותר בשיעור של 16% בהשוואה לצמחים שהתפתחו במשטר ההשקיה המקובל. תוצאות אלו מאששות את חשיבות התוצאות והממצאים ממחקר זה שבכוחם לשפר את יכול החמצה בשדות מסחריים.

חלקו השני של המחקר התמקד בהפקת פרמטרים מרחביים תלת ממדים של צמחי החמצה, כבסיס להערכת מצבו הפיזיולוגי של הצמח ולקבלת החלטות בהקשרים של ההשקיה. הנתונים המורפולוגיים והספקטריים שהפקנו על ידי השימוש ברחפן סיפקו הערכות טובות לשלושת הפרמטרים הפיזיולוגיים שנבחנו, משקל יבש, LAI ופוטנציאל מים, אך אינם מתאימים להערכת LFDP. בהקשר זה חשוב להדגיש כי רק שילוב הפרמטרים הספקטריים והמורפולוגי יחד בניתוח רב משתנים סיפקו רמות חיזוי טובות ומדויקות ושימוש בפרמטרים ובאינדקסים אלו בנפרד לא הניבו רמות דיוק מספקות. המודל אותו פיתחנו התבסס על פרמטרים שנרכשים מרחפן זול, זמין אשר אינו דורש רישיון הפעלה. עובדות אלו הופכות אותו לכלי פשוט וזמין אשר ניתן לעשות בו שימוש בכל משק ובכך נעוצה יתרונה הגדול של הגישה בה נקטנו לבחינת התפתחות הצמחים ופוטנציאל המים. ניתן לומר כי רמות הדיוק (RMSE) אותן קיבלנו אינן גבוהות ושימוש באמצעים אחרים כמו חישה היפרסקטרלית או מצלמות טרמיות יובילו לתוצאות מדויקות יותר (ידע אישי). עם זאת, זמינות הגישה המוצעת ופשטותה מספקים את הערך המוסף ומפצים על הפחיתות המסוימת בדיוק ההערכות. בשנת 2019, ערכי  $R^2$  ו-RMSE דומים שהתקבלו בשלושת שלבי בניית המודל (כיול, אימות וחיזוי) מעידים על טיב התאמת המודל וחוסר התאמת היתר (over fitting). עובדה זו מצביעה על חסינות המודל ויכולתו הטובה לחזות נתונים משנים וחלקות נוספות ברמת דיוק גבוהה. גם בשנת 2019 מצב המים בצמח (אשר נרכש מתא לחץ) היה פרמטר עם רמת החיזוי נמוכה למרות חשיבותו הגבוהה.

עם זאת, הצלחת המודל תלויה לחלוטין בפרמטרים המרחביים, קרי צימוח והתפתחות מרחבית "תקינה" של צמחי החמצה. בשנת 2020 בה נפגמה התפתחותם "התקינה" של צמחי החמצה עקב אירועי אקלים קיצוניים פחתה רמת הדיוק של המודל בצורה דרמטית עבור כל הפרמטרים הפיזיולוגיים. איור מס' 8 מציג את ערכי הגובה והשטח הממוצעים של צמחי החמצה בשתי השנים. כפי שניתן להתרשם, בעיקר בגובה התקבלה מגמת צימוח והתקבלו ערכים שונים לחלוטין בין השנים. בעוד ב-2019 חלה עליה קבועה בערכי פרמטר זה, בעיקר ברמות ההשקיה הגבוהות שהגיעו להבדלים של 20 ס"מ בין מועדי הדיגום, בשנת 2020 מגמת השינוי הייתה זניחה. מגמה זו נצפתה בכל הטיפולים. גם שטח הצמחים היה שונה בין השנים, וניתן לראות כי ב-2020 ערכי מדד זה היה גבוהה יותר. תוצאות אלו הינם בהתאמה לאירוע הקיצון שהתרחש בין 85-100 ימים לאחר הזריעה והתאפיין בטמפרטורות גבוהות מ-35 C (איור 3 בחלק א'). כתוצאה מתנאים אלו צמחי החמצה איבדו טורגור, רבצו ולא הצליחו להתרומם בהמשך עקב משקל התרמילים. בשלבים אלו היו הצמחים מפותחים וצברו ביומסה וערכי LAI גבוהים, אשר לא תאמו את הממדים אותם

אמדנו ולכן רמות הדיוק של המודל פחתו משמעותית. יתרה מכך, צורת הנוף הכללית של הצמחים הייתה שונה בין השנים. בעוד בשנת 2019 היו אברי הנוף מקובצים היטב יחד לאובייקט חד וברור, בשנת 2020 היה נוף הצמחים מעט דלילים יותר ומפוזרים עקב הרביצה. כתוצאה מכך, שחזור מורפולוגית הנוף על ידי התוכנה בה השתמשנו היה פחות טוב. תהליך השחזור מתבסס על מציאת נקודות העניין בתמונות מחייב אובייקטים ברורים. פגיעה בתהליך זה מובילה למציאת פחות נקודות עניין, וכתוצאה מכך דיוק הפרמטרים ויכולות החיזוי הכללית של המודל פחתו. תוצאות אלו מדגישות את חוסר החסינות של גישת ההערכה אותה בחנו, המבוססת על מדדים מרחביים. היא רגישה מאוד לתנאי סביבה ופגיעה עקב התפתחות לא תקינה של צמחי החמצה. לצערנו גם המדדים הספקטראליים לא התאימו וקיים צורך לפתי גישות אחרות. יתכן ואורכי גל מעבר לתחום הנראה יספקו תוצאות חסינות יותר, אולם רגישות ותנודתיות כה משמעותית בין שנים מדגישה חוסר ההתאמה של הגישה המרחבית לאמידת פרמטרים אלו בחמצה.

**רשימת ספרות מצוטטת:**

- .1 Dagdelen, N.; Yilmaz, E.; Sezgin, F.; Gurbuz, T. Water-yield relation and water use efficiency of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) and second crop corn (*Zea mays* L.) in western Turkey; *Agricultural Water Management*. 2006; 82, 63-85.
- .2 Cohen, Y.; Alchanatis, V.; Sela, E.; Saranga, Y.; Cohen, S.; Meron, M.; Bosak, A.; Tsipris, J.; Ostrovsky, V.; Orolov, V., et al. Crop water status estimation using thermography: multi-year model development using ground-based thermal images; *Precision Agriculture* 2014; 16., 311-329
- .3 Rud, R.; Cohen, Y.; Alchanatis, V.; Levi, A.; Brikman, R.; Shenderey, C.; Heuer, B.; Markovitch, T.; Dar, Z.; Rosen, C., et al. Crop water stress index derived from multi-year ground and aerial thermal images as an indicator of potato water status. *Precision Agriculture* 2014, 15, 273-289.
- .4 Chaves, M.M.; Pereira, J.S.; Maroco, J.; Rodrigues, M.L.; Ricardo, C.P.P.; Osório, M.L.; Carvalho, I.; Faria, T.; Pinheiro, C. How plants cope with water stress in the field. photosynthesis and growth. *Annals of Botany* 2002, 89, **907-916**.