

## פיתוח כלי חישה חינוכי נגיש לחקלאי להערכת מדד שטח עלה, קצב צימוח ופוטנציאל

### מים בצמחי חמצה בשדות מסחריים

איתי הרמן, המעבדה לחישה צמחים, המכון למדעי הצמח והגנטיקה בחקלאות, הפקולטה לחקלאות  
מזון וסביבה, האוניברסיטה העברית בירושלים, קמפוס רחובות ([Ittai.Herrmann@mail.huji.ac.il](mailto:Ittai.Herrmann@mail.huji.ac.il)).

הראל גרינבלט, שה"מ ([harelg@shaham.moag.gov.il](mailto:harelg@shaham.moag.gov.il))

תקציר: בישראל נזרעים בשנים האחרונות 20-50 אלף דונם חימצה בשנה, מרביתם שלחין. השקיית עזר מעלה את מספר התרמילים לצמח ומשקל הזרע הממוצע ולכן את יכול הגרמים. כדי לדייק בתזמון ההשקיה, מקובל כיום למדוד פוטנציאל מים בעלה באמצעות תא לחץ, שיטה זו מדויקת אך מוגבלת מבחינת שטח הכיסוי. חישה מרחוק מאפשרת ניטור שינויים במאפייני הצמחייה לאורך זמן ומאפשרת כיסוי שטחים גדולים תוך התחשבות בשונות המרחבית. החזר ספקטרי ממצח מאפשר הערכה של תכונות כגון מצב המים בצמח, מדד שטח העלה וקצב הצימוח. מחקרנו הניבו יכולת הערכה של תכונות חימצה מהחלל ומחקר זה מיועד להעביר יכולות אלו לכלי חינוכי שיהיה זמין לכל דורש.

מילות מפתח: חישה מרחוק, סנטינל-2, פוטנציאל מים, מדד שטח עלה, חקלאות מדייקת

### מבוא

החימצה (*Cicer arietinum*) בישראל מגודלת ברוב שטחי הגד"ש בישראל. הזריעה היא בחורף (דצמבר-ינואר) בהשקיית בעל בחודשים הראשונים. בתום עונת הגשמים (מרץ) נפרשות שלוחות טפטוף המספקות את תצרוכת המים עד תום עונת הגידול (אפריל-מאי). ההשקיה הכרחית להבטחת יבול ומקבילה לשלב התירמול ומילוי הזרעים. לעומת גידולי קיץ אחרים (כותנה, חמניות ותירס) להם יש פרוטוקולי השקיה שאומתו במשך מספר שנים, בחימצה לא קיים ידע מספק, והחלטות מתקבלות לפי הידע האישי של המגדל והמדריכים. אין הגדרה של הכמויות הנדרשות להבטחת יבול מרבי כמו גם אמצעים לזיהוי התפתחות תקינה של צמחים, ולכן ניתן להניח שיש מקום להתייעלות בנושא ההשקיה כמו גם ניטור שוטף של מצב הצמח. יש קשר בין השקיה ליבול אך השקיה היא לא הגורם היחיד המשפיע על יבול. לכן, אפשרות להעריך קצב צימוח במהלך עונת הגידול עשויה לעזור בהתנהלות המגדל.

השיטה הזמינה למגדלים היום לקביעת מצב המים בצמח היא תא לחץ, המודד את פוטנציאל המים בעלה. יש צורך בידע אודות מצב המים בזמן אמת או הקרוב לזמן אמת, אך יכולת זו דורשת ציוד, זמן ומיומנות כמו כן תספק מידע אודות מספר נקודות בשדה לכל היותר. לכן יש צורך בפיתוח יכולת להעריך מצב המים בצמח.

חישה מרחוק מוגדרת כאיסוף נתונים ללא מגע. החישה התרמית מאפשרת לקלוט שינויי טמפרטורה בעלים ועלווה תוך התבססות הקשר בין עקת מים המובילה לסגירת פיוניות ועלית טמפרטורת העלה. החיישנים התרמיים יקרים יחסית ודורשים תיקון רדיומטרי וכיול, יחד עם זאת שימשו בהצלחה לפיתוח מודלים לזיהוי ומיפוי מצב המים בגידולים שונים (תירס, כותנה ותפוח אדמה) בארץ ובעולם, אך לא עבור חימצה. הפעלת חיישנים אלו דורשת מיומנות רבה ויכולת הכיסוי מוגבלת בשטח במקרה של שימוש קרקעי, במקרה של שימוש מרחפן ידרוש יישום טכנולוגיה נוספת ובמקרה של לווין תרמי

הרזולוציה המרחבית והעיתית עשויות להיות גסות מדי. החישה הספקטרלית בתחום הקרינה הנפלס מהשמש (400-2500 ננומטר) כולל בתוכו את התחום הנראה (400-700 ננומטר), האינפרא אדום הקרוב (700-1200 ננומטר) ואת האינפרא אדום קצר הגל (1200-2500 ננומטר). חישה מולטי- וסופר- ספקטרלית כוללת אורכי גל בודדים עד עשרות ומתבססת בעיקר על החזר הקרינה ממטרות. המידע הספקטראלי המתקבל מהצמח כולל בתוכו תערובת של סך התכונות הפיזיות והכימיות של המטרה ובכך יכול לשקף את מצב הצמח. אחד החיישנים הסופרספקטראליים החדשים ביותר הוא החיישן שנמצא על לוויין הוונס (לוויין ישראלי – צרפתי, ששוגר באוגוסט 2017). הוונס מיועד למטרות מחקר של צמחייה חקלאית ומותאם לכך. דימותי לוויין הוונס ניתנים בחינם למטרות מחקר. על בסיס דימותי לוויין הוונס פותחו מודלים להערכת תכונות צמח (<https://link.springer.com/article/10.1007/s11119-024-10129-w>). היות והזמן בו וונס צפוי לתפקד והכיסוי העולמי שלו מוגבלים ולמרות שוונס הוא לוויין ייחודי שאין כמוהו, עבודתנו זו מתמקדת בפיתוח מודלים בעזרת קונסטלציית סנטינל-2, המורכבת משני לוויינים המספקים נתונים אחת ל 5 ימים, בגודל פיקסל של משתנה – אנחנו עובדים עם פיקסל בגודל 20 מטר כדי לכלול את ערוצי גבול האדום הרלוונטיים מאוד גם למחקר הנוכחי. כמו כן, נתוני סנטינל-2 כוללים גם ערוצים בתחום האינפרא אדום קצר הגל הרלוונטיים לנושא מצב המים בצמח.

#### חומרים ושיטות

עומר פרח, דוקטורנט במעבדה לחישה צמחים, ביצע את עבודת איסוף נתוני השדה בשדות חמצה ברחבי ישראל גם בעונת גידול 2023 כמו גם את מלאכת עיבוד הנתונים במסגרת התואר השלישי שלו בהנחייתי במימון מענק מדענית משרד החקלאות. מימון זה של ארגון עובדי הפלחה מיועד לתמיכה ופיתוח הכלי החינמי. הראל גרינבלט אמון על העברת המודלים שעומר מפתח אל פלטפורמת מנוע הגוגל ארץ (GEE) ופיתוח התצוגה באתר אותו פתח עבור המחקר. מחקר זה בוצע בסיועם של אסף אבנרי (מנכ"ל חקלאי ודוקטורנט במעבדותיהם של ד"ר רן לאטי ופרופ' שחל עבו) כמו גם אור רם ויואב גולן משה"מ. יש להודות לגד"שים ולחקלאים הפרטיים שבשדותיהם עבדנו. זוהי סוף העונה השנייה של הפרויקט הנ"ל אך עבודת המחקר עצמה עוד תמשך ולכן נשמח לדעת על מגדלי חומס נוספים שמעוניינים להצטרף.

במהלך עונת 2023 נאספו מאות דגימות מתשעה שדות חמצה ברחבי ישראל וחלקה אחת בחוות הפקולטה לחקלאות ברחובות (איור 1; בנוסף על הדגימות שנאספו בעונת 2022). הדגימות נאספו סביב נקודות שמיקומן הוגדר ברמת הסנטימטר כך שייצגו את המידע הספקטראלי מהפיקסלים הרלוונטיים. הנקודות מוקמו כך שניתן יהיה לבודד מידע ספקטראלי ולצמצם חפיפה. בנקודות אלו נמדד פוטנציאל מים (תא לחץ) והוערך מדד שטח העלה (ספטומטר). מידע נאסף מאותן הנקודות במהלך עונת הגידול כדי לראות את ההתפתחות לאורך ציר הזמן. דימותי הסנטינל-2 הורדו מאתר הלוויין לאחר תיקונים רדיומטרי, אטמוספרי וגיאומטרי, כך שהם מדויקי מיקום ובערכים של החזרה וניתן לעבד דימותים ממועדים שונים יחד.



איור 1: שדות חמצה בהם בוצע איסוף נתונים ברחבי ישראל בעונת 2023.

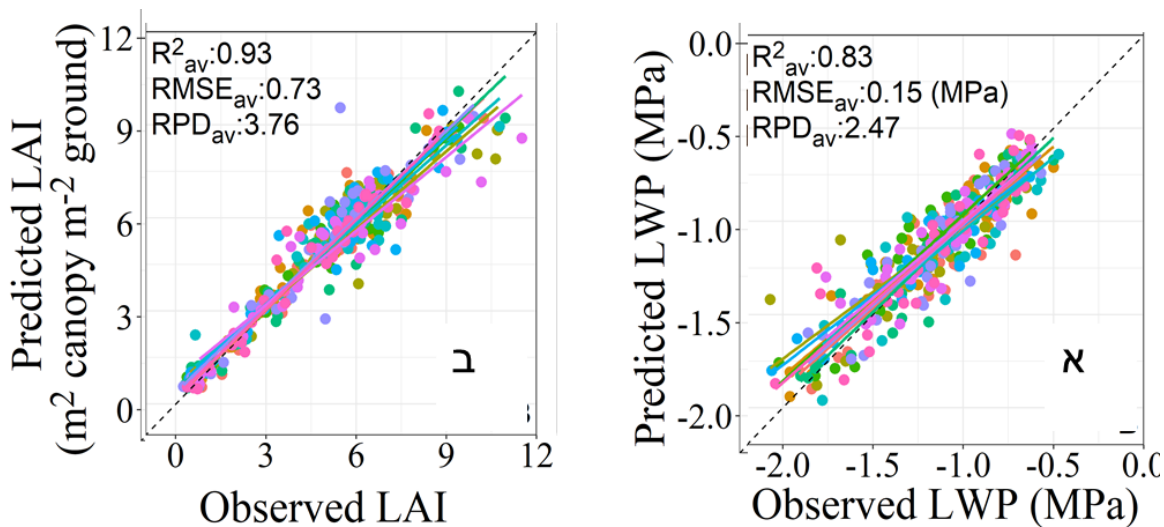
הנתונים הספקטרליים עובדו יחד עם ערכי התכונות שנאספו בשדה לשם בניית מודלים ספקטרליים להערכת פוטנציאל המים וממד שטח העלה. המודלים להערכת תכונה לאורך העונה נבנו על סמך אימון (קליברציה) ובחינה (וולידציה) של דגימות, כלומר דגימות שהיו חלק מכיול המודל לא יהיו חלק מהאימות שלו. המידע הספקטרלי נותח על ידי כלל ערוצי סנטינל-2 הרלוונטיים עבורנו בעזרת מודלים לינאריים לבחירת מינימום ערוצים עם יכולת הערכה המרבית.

### תוצאות ודיון

בפרק התוצאות מופיעה דגימה של התוצאות העוסקות ביכולת הערכת פוטנציאל המים וממד שטח העלה כמו גם המיפוי שלהם בשדות לדוגמא על בסיס האתר שבנה הראל גרינבלט. כמו כן, תוצאות העבר המבוססות על לוויין וונוס

מופיעות בתזה לתואר שני של רועי שדה בספריית הפקולטה לחקלאות, כמו כן, כאמור, התוצאות אוגרו למאמר שפורסם. פוטנציאל המים הוא תכונה בלתי נראית, לכן הקשר למידע הספקטרלי כולל בתוכו מגוון מאפיינים הקשורים למצב הצמח. באיורים 2א ו 2ב ניתן לראות את הקשר בין ערוצי סנטינל-2 לפוטנציאל המים ולמדד שטח העלה, בהתאמה. חשוב לציין שפוטנציאל המים הוא תכונה התלויה מאוד בתנאי סביבה ולכן יכולת ההערכה שלה משתפרת אם נתונים אלו משולבים במודל ההערכה, כפי שנציג בדו"ח למדענית משרד החקלאות. באיור 3 ניתן לראות את הממשק של האתר אותו בנה הראל וזמין על פי דרישה לכל מי שרוצה להשתמש בו (<https://harelg25.users.earthengine.app/view/omer>). בהקשר של מחקר זה, הראל בנה אתר בפלטפורמת GEE והעלה אליו את המודלים הלינאריים שעומר פיתח. כמו כן, עומר מפיץ מפות על בסיס מודלים של SVR המבוססים על 9 ערוצי סנטינל 2. המפות מפותחות בסביבת R ומדריכים וחקלאים שחברו אלינו מקבלים מאיתנו בעונה הנוכחית (2024) מפות כאלו המבוססות על מודלים שפותחו בשתי העונות הקודמות (2022 ו 2023). כך מתקבלת תמונה מרחבית של ערכי פוטנציאל המים או מדד שטח העלה של השדה כולו על בסיס דימות סנטינל-2 (איור 4). בשלב זה של העונה (סוף אפריל 2024) רובם המכריע אם לא המוחלט של שדות השלחין של החמצה כבר מושקים. באיור 4 מופיע מידע מהמועד האחרון, בטרם חופשת הפסח, בו הייתה אטמוספירה נקיה שאפשרה שימוש בדימותי סנטינל 2. זה בדיוק הזמן בו מתקבלת ההחלטה מתי להתחיל בהשקיה. בהמשך העונה, ניתן ממפה מעודכנת ניתן לבחון את התפלגות ערכי התכונה בשדה לתמיכה אפשרית בהמשך קבלת החלטות השקיה.

לסיכום, ישנה יכולת הערכה תכונות צמח בכלים ספקטרליים ועל בסיס זה מוצגות מפות של התכונות. ניתן להעריך גם תכונות שאיננו רואים, כדוגמת פוטנציאל המים. היכולת להעריך את פוטנציאל המים וממד שטח העלה עוד צריכה להמשיך ולהיבדק על סמך נתונים משדות רבים ככל האפשר, כפי שיתבצע בעונת 2023. המטרה היא לשפר את המודל כך שיהיה כוללני ככל האפשר מצד אחד אך מצד שני אם יתברר שישנן אוכלוסיות שונות (בעקבות סוג קרקע, ממשק או זן חמצה או גורם אחר) ניתן יהיה לבנות מודלים ספציפיים לאוכלוסיות אלו. כמו כן, בהקשר הערכת התכונות, ראינו שיש חשיבות לתנאי הסביבה, כלומר, שילובם, שאינו חלק ממחקר זה, מאפשר יכולת הערכה טובה יותר והתוצאות יהיו חשופות לכלל המתעניינים דרך משרד החקלאות ובדרכים אחרות בתום המחקר. בהקשר למחקר הנוכחי, המטרה הייתה לאפשר יישום מודלים מורכבים יחסית והצגה נוחה ככל האפשר של התוצרים בכלי חינמי שימש לקבלת החלטות ומטרה זו הושגה במלואה.



איור 2: תוצאות האימות של מודלי SVR להערכת פוטנציאל מים (א) וממד שטח עלה (ב). הצבעים השונים מצביעים על תת חלוקה רנדומלית לעיבוד הנתונים.

**Himza Animation**  
Just zoom to your plot and change the dates or contrast and the image will automatically update

WP\_himza

Set Start date: 2022-05-11

Set End date: 2022-05-20

Set Min NDVI Value: 8

Set Max NDVI Value: 17.5

**WP scale (Vegetation)**  
WP represent water potential.

Low Medium High

**Himza Animation**  
Just zoom to your plot and change the dates or contrast and the image will automatically update

LAI\_himza

Set Start date: 2022-05-11

Set End date: 2022-05-20

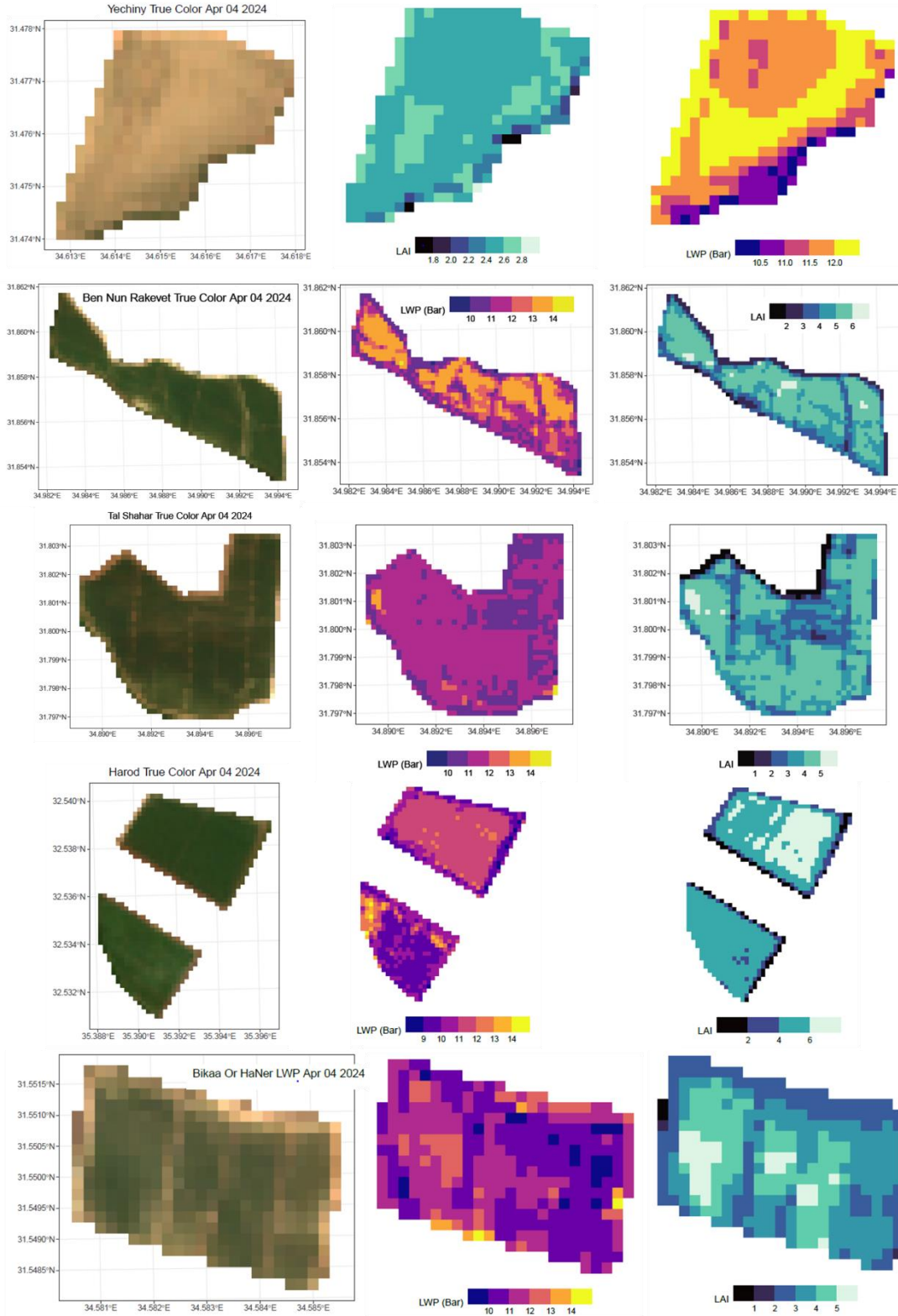
Set Min NDVI Value: 0

Set Max NDVI Value: 8

**LAI scale (Vegetation)**  
LAI should be more suitable for areas with high biomass.

Low Medium High

איור 3: האתר שהראל בנה בפלטפורמת GEE. ניתן לראות את בחירת טווח התאריכים, הערכים של NDVI (יש לסדר זאת שיתאים לכל תכונה), ולמטה את טווח הערכים שכעת מראה גבוה, בינוני, ונמוך (כדאי לחשוב על ערכים מספריים. ניתן לייצר מצב בו תהיה הפרדה טובה יותר בכל תאריך אבל אז יהיה קושי להשוות בין המועדים השונים. לאור נושא המינויים לגופים אקדמיים והקושי היחסי בשימוש ב GEE להעלאת מודלים מורכבים בוצע מעבר ל R (איור 4).



איור 4: יישום מודלי SVR להערכת פוטנציאל מים ומדד שטח עלה בתצוגת R. המודלים מבוססים על מידע שנאסף בעונות 2022 ו 2023 ומוצגים עבור 4 באפריל 2024 במגוון שדות בישראל. מיקום השדות המופיעים כאן הועבר על ידי המדריכים החקלאים. אלו רק חלק מהשדות שעבורם הופקו מפות כאלו. כדי לפרש בהקשר הנכון חשוב לשים לב שערכי התכונות במקרא משתנים לפי ערכי התכונות שהוערכו בשדה כך שמצד אחד אין התאמה בטווח הערכים ובפלטת הצבעים בין השדות השונים אבל בכל שדה יש הפרדה בצבע בין ערכי התכונה.