

שימוש במידע ספקטרלי להערכת פוטנציאל מים, מדד שטח עלווה ויבול בחמצה

רועי שדה¹, אסף אבנרי¹, רן לאטי², דוד בונפיל³ ואיתי הרמן¹*

¹ המכון למדעי הצמח והגנטיקה בחקלאות, הפקולטה לחקלאות מזון וסביבה ע"ש ר.ה. סמית', האוניברסיטה העברית; ² המחלקה למחלות צמחים וחקר עשבים, נווה יער, מינהל המחקר החקלאי-מרכז וולקני; ³ המחלקה לירקות וגידולי שדה, מרכז מחקר גילת, מינהל המחקר החקלאי.

* ליצירת קשר Ittai.Herrmann@mail.huji.ac.il

תקציר: בישראל נזרעים בשנה בין 100-30 אלף דונם חמצה, מרביתם בשלחין. באביב עם תום עונת הגשמים ומעבר לשלב הרפרודוקטיבי, הגידול מסתמך על המים השאריתיים בקרקע. השקית החמצה בתקופה זאת מסייע להארכת התקופה הרפרודוקטיבית, מעלה את מספר התרמילים לצמח ולכן מעלה את יבול הגרגרים. על מנת לדייק בתזמון ההשקיה, חקלאים מסתמכים כיום על מדידת פוטנציאל המים בעלה באמצעות תא לחץ, שיטה הדורשת זמן רב, מיומנות ומוגבלת למספר צמחים בכל יום. חישה מרחוק מאפשרת מעקב וניטור שינויים במאפיינים שונים של צמחייה לאורך זמן ומאפשרת כיסוי שטחים גדולים תוך התחשבות בשונות המרחבית. החתימה הספקטרלית של הצמח מכילה בתוכה מידע אודות מאפיינים פיזיקליים, פיזיולוגיים וביוכימיים של הצמח ומאפשרת הערכה של תכונות בעלות עניין לחוקר או לחקלאי כגון שלב פנולוגי, תכולת חנקן ומצב המים בצמח. תוצאות המחקר מצביעות על הפוטנציאל של נתונים ספקטרליים מן הקרקע וכן מלוויין להערכת תכונות פיזיולוגיות שונות בחמצה. הממצאים מושווים למודלים לחיזוי תכונות אלו המוצעים בספרות.

מילות מפתח: חישה מרחוק מרובת ערוצים (היפרספקטרלית), אפיון רב תפוקה, חקלאות מדייקת

מבוא

החמצה (*Cicer arietinum*) בישראל מגודלת בשטחי הגד"ש ברוב אזורי ישראל. הזריעה היא בחורף (דצמבר-ינואר) ללא השקיה בחודשים הראשונים. בתום עונת הגשמים (מרץ) נפרשות שלוחות טפטוף המספקות את תצרוכת המים עד תום עונת הגידול (מאי-יוני). ההשקיה הכרחית להבטחת יבול ומקבילה לשלב התירמול ומילוי הזרעים. לעומת גידולי קיץ אחרים (כותנה, חמניות ותיירס) להם יש פרוטוקולי השקיה שאומתו במהלך השנים, בחמצה לא קיים ידע מספק, והחלטות מתקבלות לפי הידע האישי של מגדלים ומדריכים. 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 לניטור שוטף של מצב הצמח. יש קשר בין השקיה ליבול אך השקיה היא לא הגורם היחיד המשפיע על יבול. לכן, אפשרות להעריך יבול במהלך עונת הגידול עשויה לעזור למגדל בהתנהלותו הכלכלית.

השיטה הזמינה למגדלים כיום 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 מדידות תא לחץ אינן מספקות מידע על שטחים נרחבים בו זמנית. לכן יש צורך בפיתוח יכולת להעריך מצב המים בצמח. החישה התרמלית 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 (תיירס, כותנה ותפוח אדמה) בארץ ובעולם, אך לא עבור חמצה. הפעלת חיישנים אלו

דורשת מיומנות רבה ויכולת הכיסוי מוגבלת בשטח במקרה של שימוש קרקעי. שימוש ברחפן ידרוש יישום טכנולוגיה נוספת ובמקרה של לווין תרמי הרזולוציה תהיה גסה מדי.

חישה מרחוק מוגדרת כאיסוף נתונים ללא מגע. החישה הספקטרלית בתחום הקרינה הנפלט מהשמש (400-2500 ננומטר) כוללת 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. אחד החיישנים הסופרספקטריים החדשים ביותר הוא החיישן שנמצא על לווין הונוס (לווין ישראלי – צרפתי, ששוגר באוגוסט 2017). הונוס מיועד למטרות מחקר של צמחייה חקלאית ומותאם לכך – 11 ערוצים בתחום של 400-1000 ננומטר (ביניהם 4 ערוצי גבול אדום), גודל פיקסל לאחר עיבוד 5 מטר, וזמן חזרה של יומיים. דימות לווין הונוס ניתנים בחינם למטרות מחקר. החישה ההיפרספקטרלית כוללת מספר אורכי גל רב (מאות עד אלפים) ובעיקרה מתבססת על איסוף קרינה המוחזרת מהמטרה, במקרה שלנו הצמח. המידע הספקטרי המתקבל מהצמח כולל בתוכו תערובת של סך התכונות הפיזיות והכימיות של המטרה ובכך יכול לשקף את מצב הצמח. מרבית החיישנים ההיפרספקטריים המכסים את הטווח הנ"ל אינם זולים ומהווים בעיקר כלי מחקרי למציאת אורכי גל מועילים לזיהוי תכונות צמח שונות ועל בסיס זה לאיתור או ייצור ציוד זול יותר לזיהוי התכונה. יתכן שבעתיד הרחוק יחסית יהפכו חיישנים היפרספקטריים לכלים זמינים למגדל.

חומרים ושיטות

מחקר זה בוצע בשיתוף עם ד"ר רן לאטי (מינהל המחקר החקלאי) ופרופ' שחל עבו ואסף אבנרי שהקימו את הניסויים בגילת (תוך שיתוף פעולה עם ד"ר דוד בונפיל, מינהל המחקר החקלאי) ובשדות החקלאיים. רועי שדה ביצע את עבודת המדידות הספקטרליות ואיסוף נתוני שדה כמו גם את מלאכת עיבוד הנתונים במסגרת עבודת המוסמך שלו ובתמיכה חלקית של ארגון עובדי הפלחה.

במהלך שתי עונות הניסוי (2019 ו 2020) הוקמו ניסויים בחוות הניסיונות בגילת על בסיס מחקר במימון קרן המדען הראשי במשרד החקלאות) ובשדות בגד"ש אורן (2019) ובגד"ש עציון (2020). באתרי הניסוי יושמו חמישה טיפולי השקיה (50%, 75%, 100%, 120% ו 140% מהתאדות על פי נוסחת פנמן-מונטית). בעונה השנייה בחוות גילת יושם גם טיפול בעל. על רקע זה בוצעו המדידות הספקטרליות מהחלל ומהקרקע כמו גם איסוף נתונים מורפו-פיסיוולוגיים צמחיים בשטח. איסוף, עיבוד וניתוח הנתונים הספקטריים כמו גם נתוני השדה בוצעו על ידי רועי שדה.

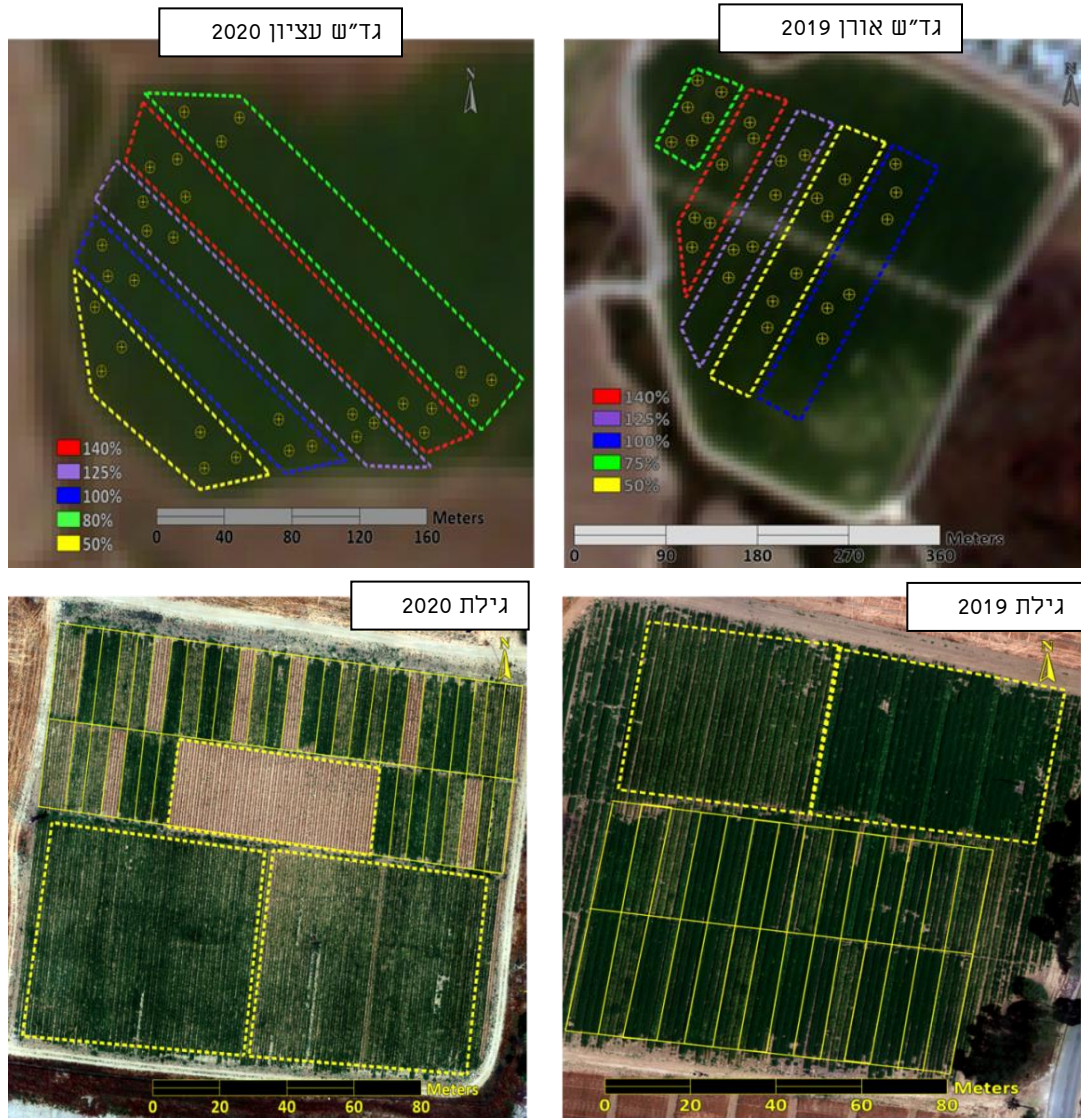
הכלים הספקטריים:

+ לווין ונוס (פירוט במבוא).

+ ספקטרומטר שדה למדידת החזר ספקטרי מהעלווה בטווח של 400-2500 ננומטר, בשבעה מועדים לאורך העונה. הקמנו מערכת ייחודית לעבודה עם שני מכשירים במקביל לשם צמצום ההשפעות האטמוספריות והגדלת מספר הדגימות ליום עבודה.

הנתונים הספקטריים עברו עיבודים מקדימים (רדיומטרי ואטמוספרי) והופקו נתונים בערכים של החזרה יחסית שאותם ניתן להשוות בין מועד המדידה השונים. האיסוף מהקרקע ומהחלל התבצע בפער

מינימלי בין הימים. נתוני שדה שנאספו: מדד שטח עלה בעזרת ספטומטר, פוטנציאל מים בעזרת תא לחץ, דגימות ביומסה מעל פני הקרקע ויבול גרעיניים.

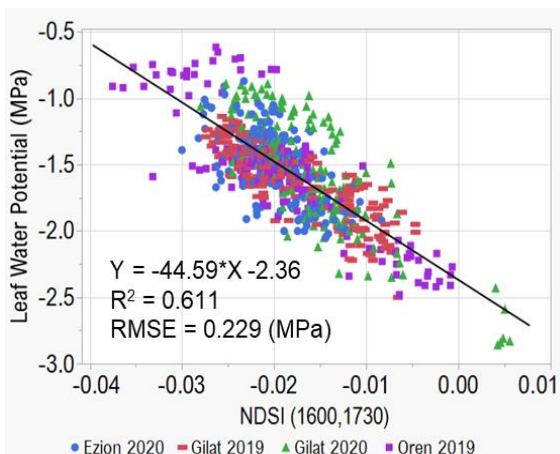


איור 1: ארבעת אתרי הניסוי, השדות בדימותי לוויין וחוות גילת בצילום רחפן.

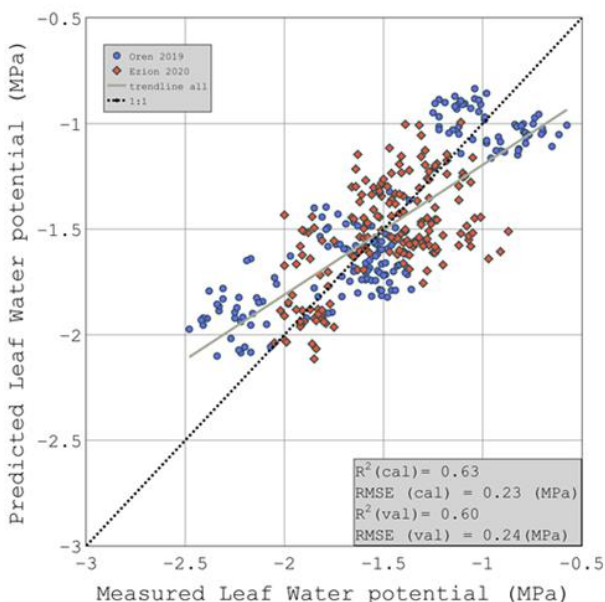
הנתונים הספקטראליים עובדו יחד עם ערכי התכונות שנאספו בשדה לשם בניית מודלים ספקטראליים להערכת נתוני השדה הנ"ל. התוצאות מצביעות על יכולת ספקטראלית טובה להעריך מהחלל ומהקרקע את פוטנציאל המים הנוכחי בעלי חמצה, להעריך את היבול הצפוי כמו גם להעריך מצב נוכחי של מדד שטח עלווה (קורלטיבי לשלב גידול). המודלים להערכת תכונה לאורך העונה נבנו על סמך אימון (קליברציה) ובחינה (וולידציה) של דגימות, כלומר דגימות ששימשו לכיול המודל לא נכללות בסט הנתונים לאימות המודל. במקרים שבהם מספר הדגימות נמוך יחסית (כ- 30 למועד) למשל בהערכת יבול, הניתוח בוצע על סמך וולידציה מוצלבת. המידע הספקטראלי נותח בשלוש שיטות: האחת כלל הערוצים הזמינים (PLSR), השנייה מדדי צמחייה, והשלישית זיהוי שילוב צמד הערוצים המוצלח ביותר להערכת תכונה.

תוצאות ודין

פרק זה כולל חלק מהתוצאות. כלל התוצאות מופיעות בעבודת הגמר של רועי שדה בספריית הפקולטה לחקלאות (יש גישה במרשתת) והתוצאות יאוגדו למאמר שיפורסם בעיתונות המדעית.



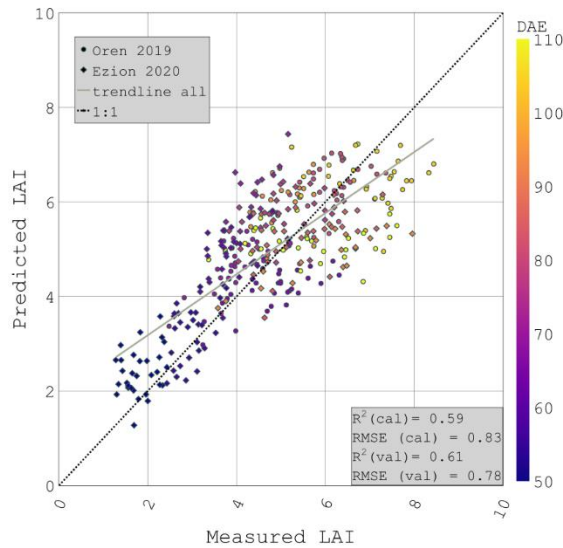
איור 2: הקשר שבין ערכי האינדקס NDSI מבוסס מידע היפרספקטראלי לפוטנציאל מים בעלה. הצבעים מייצגים את אתרי הניסוי.



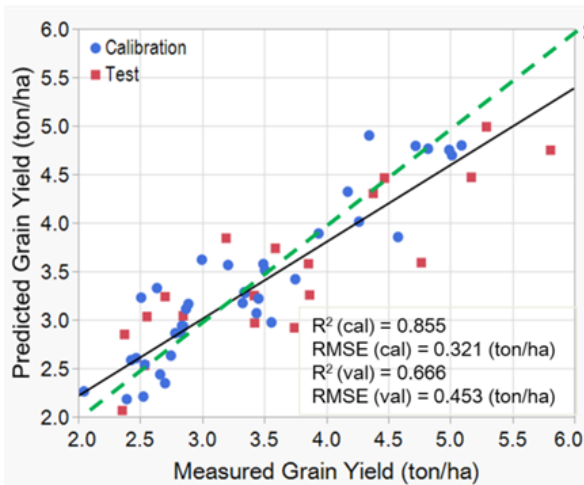
איור 3: גרף נקודות של ערכי פוטנציאל מים בעלה כפי שנמדדו בעזרת תא לחץ מול ערכי הפוטנציאל כפי שהוערכו על ידי מודל מבוסס דימותי לוויין וונוס. מוצגות בגרף תוצאות האימות משני השדות המסחריים אך R^2 של ערכי הכיול והאימות מופיעים כמו גם הטעות ביחידות של מגה פסקל.

פוטנציאל המים הוא תכונה שאינה נראית בעין האנושית, כך שהקשר למידע הספקטראלי כולל בתוכו מגוון מאפיינים הקשורים למצב הצמח. באיור 2 ניתן לראות את הקשר בין שילוב צמד אורכי הגל הטוב ביותר להערכת פוטנציאל המים. הקשר בין המידע הספקטראלי לפוטנציאל המים מוצג כאן על בסיס ארבעת האתרים יחדיו ונראה שכולם יחדיו מבטאים קשר לינארי ובכך מחזקים את האפשרות ליישום השיטה במגוון אתרים. בשנה השלישית נמשיך לבחון קשר זה ונצרף נקודות נוספות לבחינת המודל.

פוטנציאל המים בעלה הוערך גם באמצעות נתונים מדימותים של לוויין וונוס (איור 3). המודל להערכת ערכי פוטנציאל המים בעלה בוצע בשיטת PLSR (כלל אורכי הגל הזמינים בלוויין. ניתן לראות שגם בנתוני הלוויין הנתונים משני השדות המסחריים משתלבים למודל לינארי אחד ומחזקים את האפשרות ליישום השיטה במגוון אתרים. הבדלים בזמינות המים לצמח לאורך זמן תבטא בין השאר בצבע עלווה שונה (נוכחות פיגמנטים) כמו גם מבנה עלווה שונה (ביומסה) לגורמים אלו יש ביטוי ספקטראלי וההנחה היא שמצבי זמינות מים שונים מתבטאים בצמחים. הבדלים פיסולוגיים אלו ניתנים להערכה ספקטראלית וכך ניתן להעריך ספקטראלית את פוטנציאל המים.



איור 4 : גרף נקודות של ערכי מדד שטח עלה כפי שהוערך בשני השדות המסחריים, בשתי עונות הגידול מול מדד שטח העלה שנחזה שנחזה על סמך דימותי לוויין וונוס. הצבעים השונים מייצגים ימים לאחר הצצה.



איור 5 : גרף נקודות של ערכי יבול גרעינים בטון להקטאר כפי שנאסף בגילת בשתי העונות מול היבול שנחזה על סמך הנתונים ההיפר ספקטרליים ביום 93 מהצצה בעונת 2019 וביום 95 מהצצה בעונת 2020.

הערכת מדד שטח העלווה על סמך מידע ספקטרלי בוצעה מהקרקע ומהחלל. באיור 4 ניתן לראות את מודל איכות יכולת הערכת מדד שטח העלווה מלוויין וונוס באמצעות אינדקס המתבסס על ערוצים מתחום האינפרא אדום הקרוב וגבול האדום. הערכת יבול הזרעים באמצעים ספקטריים דומה במידה מסוימת להערכת פוטנציאל המים בעלה. שתי התכונות אינן נראות לעין ומה גם שהיבול נקצר ונמדד שבועות לאחר ביצוע המדידה הספקטרלית. כך, שגם כאן בפועל מעריכים תכונה שאינה נראית אך מתבססת על מגוון תכונות צמח. בזנים בעלי התאמה פנולוגית ניתן יש שביומסה רבה כמו גם מדד שטח עלווה גדול יותר יתבטאו ביבול זרעים רב יותר. באיור 5 ניתן לראות נקודות של כיוול ואימות מודל ספקטרלי להערכת יבול המבוסס על שתי עונות המדידה (דגימות משתי העונות נכנסו לכיוול ולאימות). המודל מבוסס על נתונים ספקטריים קרקעיים.

לסיכום, יש בידנו היכולת להעריך תכונות צמח בכלים ספקטריים. ניתן להעריך גם תכונות בלתי נראות לעין. יש להמשיך ולבדוק את היכולת להעריך את פוטנציאל המים או יבול הזרעים על סמך נתונים משדות רבים ככל האפשר. מטרתנו היא לשפר את המודל כך שיהיה כוללני ככל האפשר. במקביל נשאף לבנות מודלים ספציפיים שיתאימו לסיטואציות אגרו-חקלאיות ייחודיות המושפעות מסוג קרקע, ממשק, זן חמצה (בניסוי זה בכל אחד מהשדות המסחריים גודל זן אחר) או גורמי סביבה אחרים.

תודה מקרב לב לסוכנות החלל הישראלית על השימוש בדימותי הלוויין וונוס.