

# זיהוי מוקדם של פטריה *Macrophomina phaseolina* בצמחי כותנה מהזן פימה באמצעות מדידות ספקטרליות וצילומי רחפן

אנה ברוק<sup>1</sup>, רון סגל<sup>2</sup>, מנחם אליה<sup>3</sup>, עוז צעירי<sup>3</sup>, נעם עמיר<sup>3</sup>, אריה בוסק<sup>3</sup>

<sup>1</sup>מעבדה לספקטרוסקופיה וחישה מרחוק, אוני' חיפה, [abrook@geo.haifa.ac.il](mailto:abrook@geo.haifa.ac.il)

<sup>2</sup>חברת "אגרידע", [ron@agrida.co.il](mailto:ron@agrida.co.il)

<sup>3</sup>מגדלי הדרום, [bosak@bezeqint.net](mailto:bosak@bezeqint.net)

## תקציר:

פטריית קרקע *Macrophomina phaseolina* הנה מחלה קשה במיוחד להדברה משום שהיא שורדות בקרקע לזמן רב ובעלת טווח רחב של פונדקאים. מטרת המחקר היא לרתום אמצעים טכנולוגיים (כגון צילומי רחפן ומידע ספקטראלי) לזיהוי מוקדם של המחלה בשדה. לטובת זיהוי מוקדם ופיתוח כלים למעקב אחר התפתחות המחלה בחלקה, הוצע אלגוריתם חכם (מבוסס למידת מכונה). תוצאות המחקר מצביעות על זיהוי מוצלח את המחלה, בנוסף התוצאות מראות כי ניתן לקשור בין עיתוי ההדבקה (תאריך זיהוי באמצעות האלגוריתם) עם חומרת המחלה.

## הקדמה:

גבעול פגוע (ריקבון) של כותנה נגרם על ידי פטריה בקרקע *Macrophomina phaseolina* (מחלה ששוכנת בקרקע ידוע בענף הכותנה ברחבי העולם). *M. phaseolina* מזרעים וקרקע בעלת תפוצה פתוגנית רחבה (Dhingra and Sinclair, 1978). הפתוגן נמצא בקרקע ופוגע בשורשי הכותנה במיוחד בתקופה המאוחרת של עונת הגידול (Aly et al., 1996). שורשי הצמחים הנגועים נרקבים, הצמחים נובלים ובסופו של דבר מתים (Khan et al., 2017). במהלך ההדבקה בצמחים, הפטרייה מייצרת אנזימים שפוגעים בדופן התא, כגון (Javaid and Saddique, 2011) אנזימים הידרוליטיים (Kaur et al., 2012) ופיטוטוקסינים וביטריידיפלואידי (Ramezani, 2008; Bressano et al., 2010).

טיפול נגד *M. phaseolina* בשלב התפרצות המחלה חסר יעילות (Aly et al., 2006). על אף שהדבקה ראשונית על ידי *M. phaseolina* מתרחשת בשלב השתיל, אין זה אומר שהצמח חולה, אלא אם בשלבי צימוח הבאים (עד לבגרות) הצמח לא גדל בתנאים אופטימליים, הוא נדבק (Dhingra and Sinclair, 1978) ומזוהה כצמח חולה. עם זאת, נראה כי *M. phaseolina* משפיע על זני כותנה מסוימים בצורה פחות חמורה מאחרים, מה שמעיד על קיום של עמידות גנטית פוטנציאלית ל- *M. phaseolina* (Watkins, 1981; Lee et al., 1986; ) (Monga and Raj, 1996, 2000; Turini, 2001). הבנה ברורה של מידת השונות ברגישותם של זני הכותנה ל- *M. phaseolina* תעזור בהפצת זני הכותנה בעלי עמידות גבוהה. הפרקטיקות הנוכחיות לבקרת מחלות צמחים מבוססות בעיקר על פיתוח זנים עמידים ועל יישום של חומרים ביולוגיים (Emmert and Handelsman, 1999). בקרה ביולוגית זוכה לתשומת לב רבה בשל העלות הנמוכה והיישום הידידותי לסביבה. נראה כי ביו-בקרה עם מיקרואורגניזמים מועילים היא גישה מבטיחה לניהול שדות כותנה (Howell, 1982; Howell et al., 1997; Howell and Puckhaber, 2005).

*M. phaseolina* גורמת לאובדן משמעותי בייצור על ידי צמצום אוכלוסיית הצמחים בחלקת הגידו (Khan et al., 2016). לכן זיהוי מוקדם של המחלה ומעקב אחר התפתחותה יעזור למגדל בניהול החלקה. לעומת המחקר הביולוגי הרחב, למיטב ידיעתנו מעט מאוד מחקרים עוסקים בפיתוח כלים לזיהוי ומעקב אחר המחלה בשדה. המחקר הנוכחי מציע לרתום את אמצעי חישה מרחוק לזיהוי מוקדם של פטריה *M. phaseolina* בצמחי כותנה מהזן פימה. זיהוי מתבצע על בסיס צילום מרחפן שמפוענח ע"י אלגוריתם חכם (מבוסס

מכונה לומדת) הקולט את המידע הספקטראלי ההדמתי, מפת הפרשי גובה מצילום קודם (ההמלצה לצלם פעם בשבוע/שבועיים), מפת ביומסה מפענוח ספקטראלי (מפה מופקת ע"י רשת נוירונים קיימת בחברת "אגרידע") ומפת מרקם מבוססת אינדקס GLCM המחושבת למודל פני השטח (DSM) שמופק מצילומי רחפן.

## מהלך המחקר – שיטות ותוצאות:

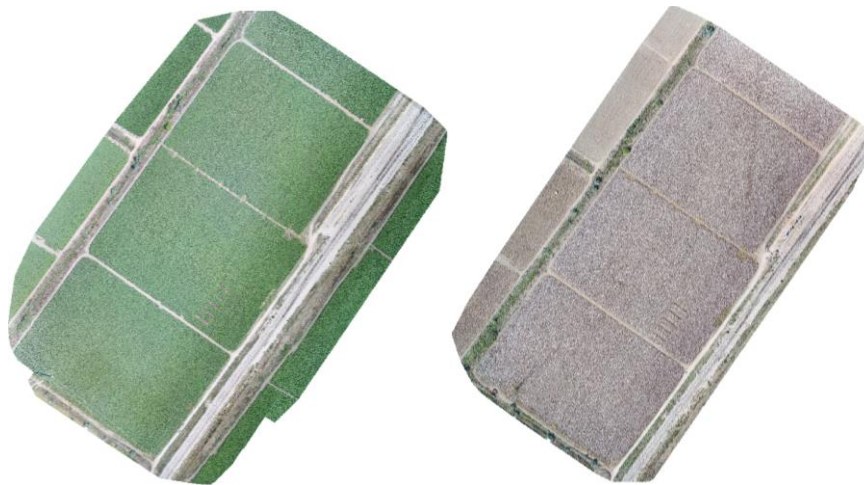
לצורך המחקר חיפשנו חלקות של כותנת "פימה" בהן יופיעו סימני המחלה מוקדם ככל האפשר. האיתור הראשון היה בחלקה ב"בני דרום", ולאחריה חלקה ב"קבוצת יבנה". החלקות צולמו ועובדה למיפוי קטעים "חשודים" כנגועים כבר בסוף יולי 2020. על פי מפה זו סומנו בכל שדה 10 נקודות: 5 נקודות "חשודות" ו-5 נקודות "נקיות" לפי מפת הזיהוי המוקדמת. כדי לאמת זאת, מכל נקודה נדגמו כ-8 צמחים שנראו נגועים. הדגימה כללה את החלק העליון של מערכת השורשים (הסמוך לפני הקרקע) ואת חלקו התחתון של הגבעול הצמוד לשורש. השורשים נשלחו למעבדה בתחנת המחקר ב"נווה יער" של מכון וולקני לאבחון של נוכחות הפתוגן. במקביל נבדקו הגבעולים שנדגמו. סימן שדה ידוע ומקובל לזיהוי המחלה הינו מציאת כתמים חומים על החלק החיצוני של הגליל הלבן של הגבעול, המתגלה מתחת לקליפה החיצונית החומה.

בעוד שבדיקות המעבדה התקשו לאתר את נוכחות הפתוגן, ולכך יתכנו מספר סיבות כמו למשל שינוי עם הזמן בנוכחות או במיקום של הפתוגן, הרי שקילוף הקליפה החיצונית הראה הבדלים ברורים במופע הכתמים החומים על הגליל הלבן.

חשוב לציין כי החלקות צולמו עד לייבוש מוחלט של השדות, פענוח בוצע ב-2 תקופות: 20 ליולי ו-11 לאוגוסט. חלקת בני דרום שימשה לאימון הרשת וחלקת "קבוצת יבנה" לאימות.

שדה בבני דרום – במהלך קיץ 2020 לאחר קבלת דיווח ראשון על הופעת המחלה בשדה כותנה בבני דרום והתחלנו בעבודת שדה מרחבת שכללה:

- צילומי רחפן ומודל פוטוגרמטרי (אורתופוטו ומודל גבהים DSM), צילום מגובה 70 מ' ועיבוד בתכנת Pix4Dmapper. תחילת הצילום ביולי 2020 ומעקב עד סוף העונה אוקטובר 2020.

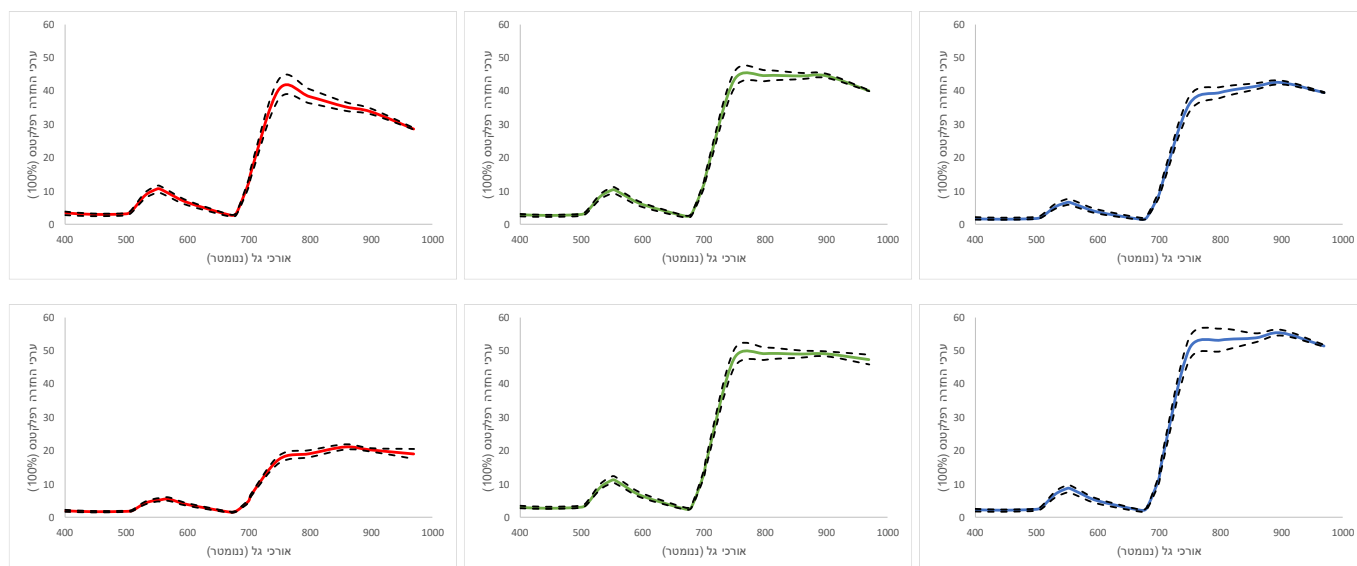


- מדידות ספקטראליות של גידול, עשב וצמחים חשודים באמצעות ספקטרומטר שדה 4000USB של OCEANOPTICS.
- מדידות גובה בשטח

בסוף עונת הצימוח נדגמו צמחים מהאזורים החשודים ומאזורים בהם לא זוהה המחלה לטובת אימות קרקעי. בנוסף, ביצענו הערכת יבול על ידי אלגוריתם מאומן על בסיס מכונה לומדת. ביצענו התאמה מרחבית בין תוצרי המודל למפת יבול דיגיטלית.

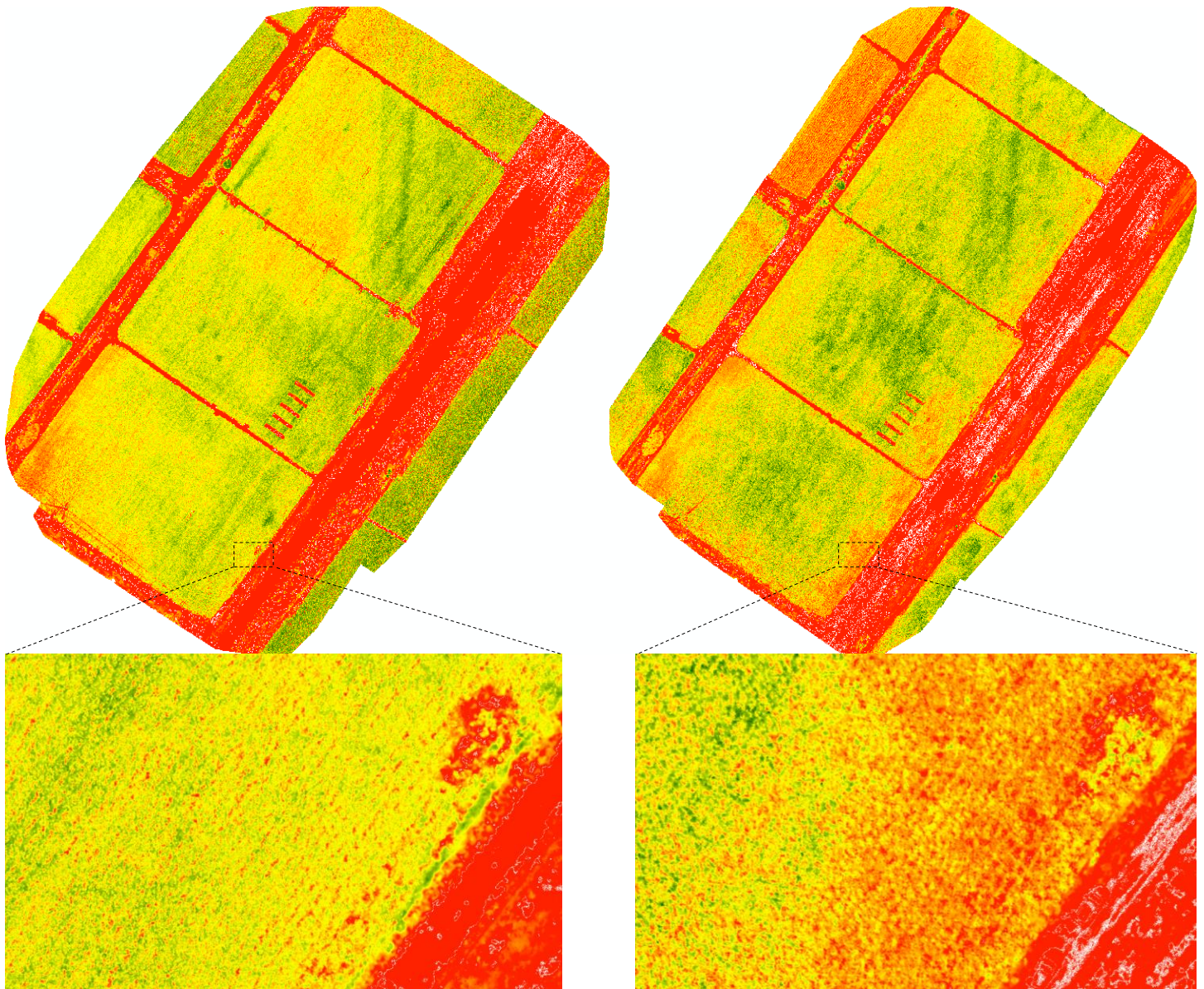
במהלך שלושה שבועות בוצעו מדידות ספקטרליות באזורים חשודים למחלה ומאזורים בהם לא זוהתה המחלה. בסיום עונת הגידול נדגמו צמחי כותנה לטובת אימות קרקעי.

כפי שניתן לראות באיור 1 במדידות ספקטרליות נבדלו באופן מובהק בין הצמחים החשודים לאלו שלא זוהו על ידי פענוח צילומי הרחפן.



איור 1: חתימות ספקטרליות שנמדדו בחלקה (ממוצע ל-50 מדידות לכל סוג, בקו מקווקו מסומן רווח סמך), שורה עליונה חתימות מ-20 ליולי, שורה תחתונה חתימות מ-11 לאוגוסט. ספקטרה בצבע אדום: אזורים חשודים כמחלה, ספקטרה בצבע ירוק: אזורים שלא זוהו ובהם צומחת כותנה באופן תקין, ספקטרה בצבע כחול: כתמי עשבייה שזוהו באמצעות אלגוריתם ייעודי למיפוי עשבייה בשדות כותנה.

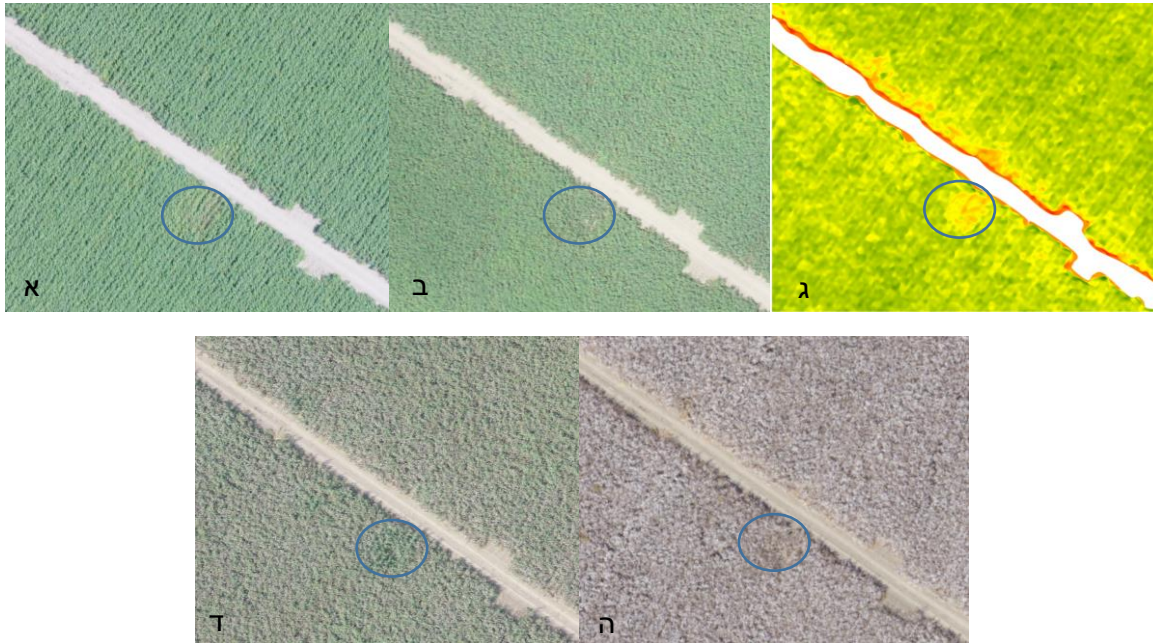
השפעת המחלה נצפתה באופן מובהק במודל הביומסה הצמחית שפותח במסגרת מו"פ איטליה-ישראל במימון רשות החדשנות (הובלה ומסחור ע"י חברת "אגרידע") כפי שניתן לראות במפות הנושאיות (ירוק 60 מ"ג לגרם מתחת ל-10 מ"ג לגרם ריכוז החנקן ברמת העלה). באיור 2, מימין מפת ביומסה צמחית מ-11 לאוגוסט ומשמאל מפת ביומסה צמחית מ-20 ליולי. בולט כי עשבייה צוברת ביומסה ירוקה, הגידול, בייחוד האזורים החשודים במחלה, מפחית את הביומסה הירוקה.



איור 2: מפות ביומסה צמחית מפענוח תצלומי רחפן (אלגוריתם שפותח במסגרת מו"פ איטליה-ישראל במימון רשות החדשנות, הובלה ומסחור ע"י חברת "אגרדע"), צבע אדום: פחות מ-10 מ"ג לגרם, צבע ירוק כהה מעל 60 מ"ג לגרם. מימין מפת צימוח ב-11 לאוגוסט, משמאל מפת צימוח ב-20 ליולי.

ניתן לזהות האטה בקצב הצימוח בתקופה הראשונה, באזורים שצמחי הכותנה לא מצליחים לגדול בצורה נאותה הפטרייה גורמת לעיקוב הצימוח. באיור 3 ניתן לראות בבירור את האזורים החשודים ומפת צימוח שחושבה על בסיס תוצרי DSM שהופקו ממודל פוטוגרמטרי מצילומי רחפן (הפרש גבהים חושב בין 11 לאוגוסט ל-20 ליולי, אדום מעיד על הפחתה של 15 ס"מ מיולי וירוק מעיד על צימוח של 15 ס"מ בתקופה זו). נראה כי באזור שנפגע מהמחלה, לאחר אי הצלחה של גידול הכותנה מתפרצת עשבייה (בולט בצילום מחודש ספטמבר). בשלב ההתייבשות, ניתן לזהות באופן בולט בכתמי עשב היבש ללא יבול.





איור 3: אזור חשוד במחלה - א. צילום מ-20 ליולי, ב. צילום מ-11 לאוגוסט, ג. מפת הפרש גבהים בין יולי לאוגוסט (אדום מעיד על הפחתה של 15 ס"מ מיולי וירוק מעיד על צימוח של 15 ס"מ), ד. צילום מ-11 לספטמבר, ה. צילום מ-7 לאוקטובר. אלגוריתם לזיהוי מוקדם של מקרופומינה כלל את השלבים הבאים:

- 1) חישוב שלל אינדקסים ספקטראליים לבריאות הצמח בתחום אור הנראה ותת אדום הקרוב.
- 2) מפת הפרשי גובה בין כל צמד צילומים (בעדיפות להפרש של שבוע עד שבועיים בין הצילומים).
- 3) חישוב מקדי מקרם וחספוס לפי תוצרי DSM (תוצרי GLCM ואינדקס TRI).
- 4) פיתוח מודל ספקטראלי מבוסס מכונה לומדת לפי אורכי גל של הרחפן (475,560,668,717,840 ננומטר).

## תוצאות – בני דרום

נמצא כי האינדקסים הספקטראליים אינם רגישים לזיהוי מוקדם של המחלה. כל האינדקסים (הרצו 8 אינדקסים ספקטראליים: TGI, LAI, MSAVI, EVI, SAVI, VARI, GNDVI, NDVI) הצליחו לזהות את מוקדי המחלה רק בצילום מחודש אוגוסט ולא יולי, מלבד מודל ביומסה המוצג באיור 2.

מפת הפרשי גובה הייתה יעילה מאוד באיתור המחלה, אבל אזורים שלא הייתה בהם מחלה גם כן הודגשו במפת הפרשים. הרי כל שינוי בגובה (כולל סחף קרקע) ומופה בעזר זה. לכן, הפרשי גובה ישמשו את שיטת הפענוח כמפת עזר בלבד.

מפות חספוס ומרקם לא נמצאו כאינפורמטיביות לזיהוי מוקדם של המחלה בשל בחינת הצמח ברמת החופה ולא ברמת העלים. עזרים אלה היו לנתונים תומכים בלבד.

מודל ספקטראלי הוכח כיעיל ביותר לזיהוי מוקדם של המחלה. המודל כלל ארכיטקטורה לא עמוקה והתבסס על אימון רשת עמוקה. הרשת תתאמן על 813 חתימות ספקטראליות של הצמחים החולים ו-900 חתימות של צמחים בריאים (התפתחות תקינה עד ליבול) ו-787 חתימות של עשבייה (מוגדרת כקבוצה "אחר" ברשת הנוכחית). פיקסלים שסווגו כקבוצת "אחר" המשכנו לפענח באמצעות מודל נוסף מבוסס רשת נירונים. המודל לזיהוי עשבייה אומן בשיטת back propagation וכלל 4 נירונים בשכבה הגלויה ו-3 נירונים בשכבה

הנסתרת. מסד הנתונים חולק ל-70 לאימון, 15 לאימות ו-15 לבחינה. רמת ההצלחה בשלב האימון הייתה 98%, רמת הדיוק בשלב הבדיקה היה 96%.

בימסה צמחית מ"ל לגרם ב11 לאוגוסט	בימסה צמחית מ"ל לגרם ב20 ליולי	סה"כ צמחים שנדגמו באזור הנבחר	צמחים עם תסמינים	
35	29	8	0	אזורים תקינים, לא חשודים
45	40	8	0	
37	36	5	0	
39	34	7	0	
20	27	9	5	אזורים לא תקינים, חשודים במחלה
19	31	6	5	
22	29	7	3	
24	32	8	2	
31	44	7	1	
22	37	6	1	
49	45			כתמי עשבייה
51	36			
55	41			

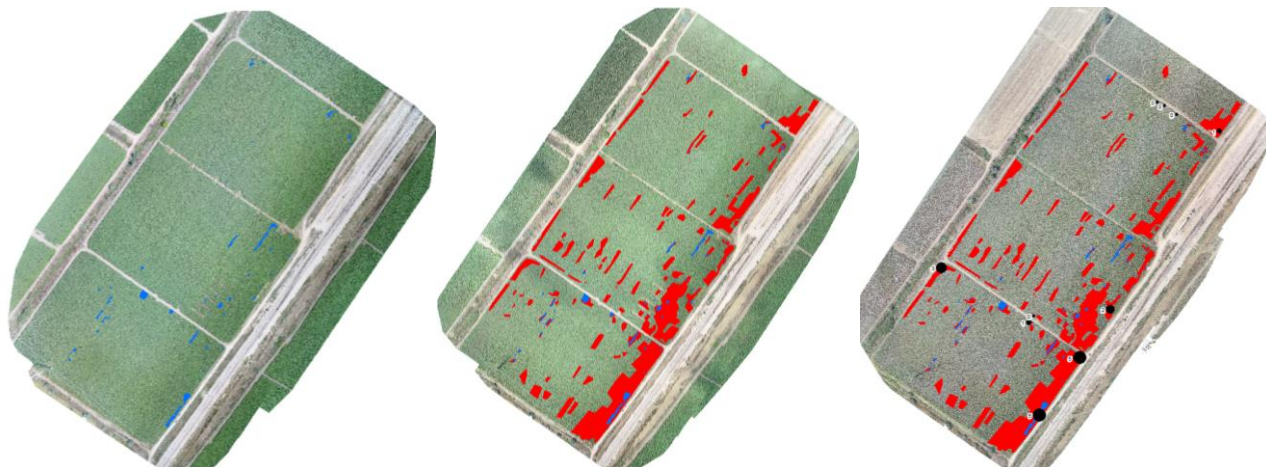
צילום רחפן עם סימון אזורים חשודים (ללא כתמי עשבייה שמופו והוסרו מהצילום בכל תאריך בנפרד) מגובה 70 מ' בבני דרום במהלך תקופת הניטור:



איור 4: זיהוי מוקדם בחלקה (משמאל לימין) צמח בריא, צמחים חולים, שיטת אימות בשטח (גילוף חלקו התחתון של הגבעול), אימות בשורש (כתמים). הזיהוי בשטח הוא לפי "גילוף חלקו התחתון של הגבעול" ובמעבדה נבדקת "נוכחות הפתוגן בשורשים". נתוני אימות קרקעי כללו 10 דגימות שנבחרו ממפות הפענוח לאזורים חשודים ומקומות שלא מופו כחשודים. התוצאות מלמדות כי האלגוריתם הצליח לזהות נכון את אזורי המחלה. יתרה מכך, תזמון הזיהוי ע"י האלגוריתם נמצא קורלטיבי לחומרת המחלה בשטח.



אזורים בהם נמצא יחס צמחים נגועים לשטח הדיגום וסה"כ הצמחים הנבדלים, נמוך, זוהו בצילומי אוגוסט בלבד. אזורים בעלי יחס גבוה זוהו בצילום מילוי, כפי שניתן לראות במפות המוצגות באיור 5.



איור 5: סימון אזורים חשודים במחלה בין 20 ליולי (מצד שמאל סימון בצבע כחול) ל-11 לאוגוסט (מצד ימין סימון בצבע אדום) ומפת חלקה ב-11 לספטמבר עם מיקום של דגימות קרקעיות לטובת אימות תוצאות הפענוח. שטח כולל של 61 אזורים חשודים ב-20 ליולי היה 895 מ"ר, ב-11 לאוגוסט התגלו 103 אזורים חשודים ששטחם נסכם ל-16,400 מ"ר, שטח החלקה הוא 128,000 מ"ר. מכאן עולה כי שטחי האזורים הנגועים עלה בין 20 ליולי ל-11 לאוגוסט ב-12% מכלל השטח המצולם.

אזור שזוהה ב-20 ליולי, נמצא בו יחס גבוהה של צמחים הנגועים (5 מתוך 9)

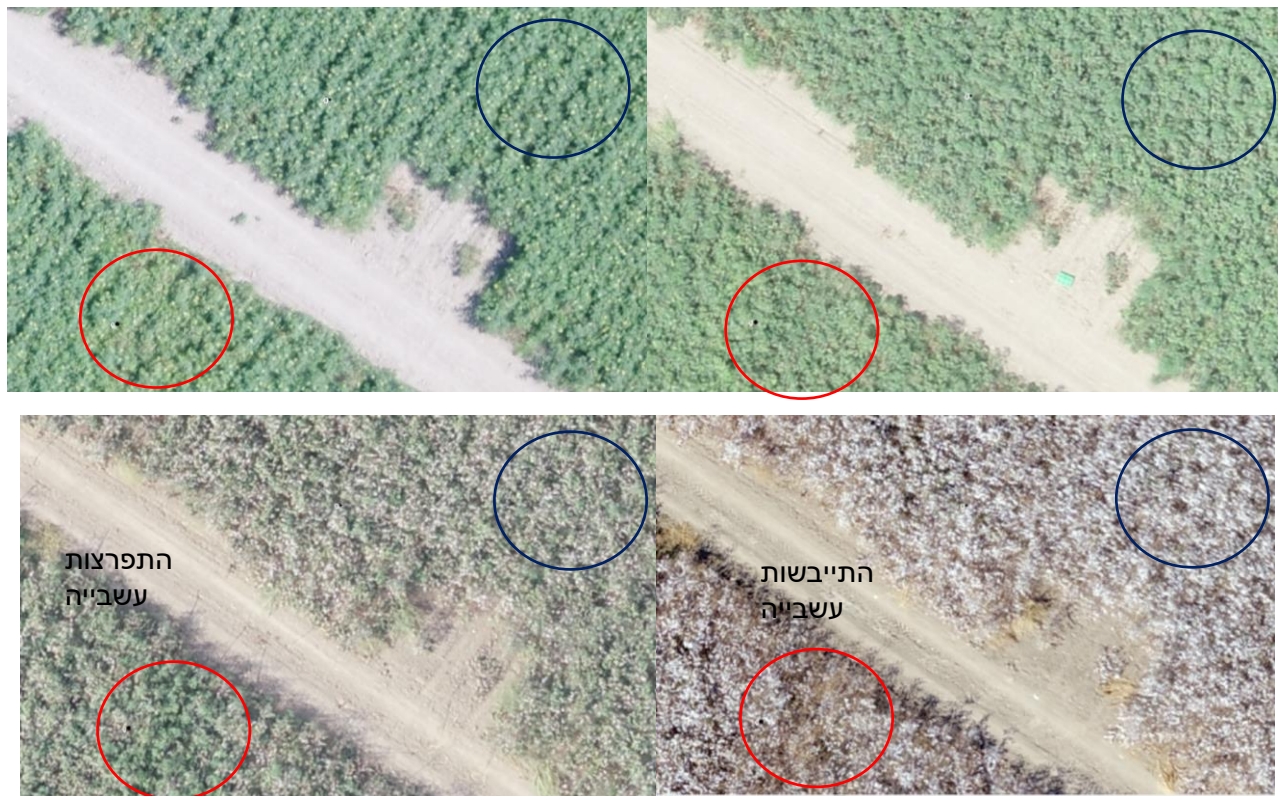


אזור שזוהה ב-20 ליולי, נמצא בו יחס גבוה של צמחים הנגועים (5 מתוך 6)





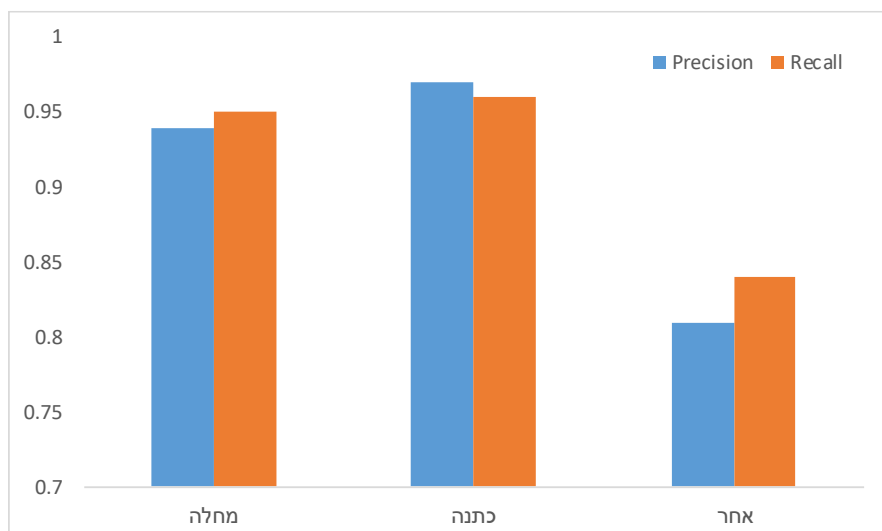
אזור שזוהה ב-11 לאוגוסט, נמצא בו יחס גבוהה של צמחים פגועים (1 מתוך 6), בולטת התפרצות עשבייה מאוד משמעותית בחודש ספטמבר, יובש מאוד ברור בחודש אוקטובר.



### אלגוריתם לגילוי המחלה

מערכת רב-ממדית שיכולה להכיל נתונים מקומיים כגון מרקם וחספוס. הרשת מכילה 5 שכבות ו-3 שכבות איגום P\_MAX\_POOLING בארכיטקטורה RESNET ושכבת AVERAGE\_POOLING לפני שיוך FULLY\_CONNECTED הפענוח מתבצע בשכבת SOFTMAX. אימון בוצע על חלקת בני דרום וכלל 2500 צמחים כותנה, מסד נתונים מאוזן, שחולק ל-70% אימון, 15% אימות ו-15% בחינה. ההצלחה המדווחת בשיעור 96% דיוק (accuracy 96, precision 0.96, recall 0.95). דיות פענוח לפי קבוצות מוצגת בתרשימים הבאים:

מטריצת בלבול (הצלחת זיהוי בין 0 ל-1 לכל קטגוריה ברשת) על בסיס דגימות שטח שלא נכללו בבניית המודל



	מחלה	כותנה	אחר
מחלה	0.92	0.08	0
כותנה	0	0.97	0.03
אחר	0.09	0.18	0.72





FC: 1000

איום  
POOLING4  
4x@256

קומפיה 4  
10x10@256

איום  
POOLING3  
2x2@256

קלט מאחד

קומפיה 31  
10x10@128

קלט 3  
10x12x12

קומפיה 3  
10x10@128

איום  
POOLING2  
2x2@128

קלט מאחד

קומפיה 21  
10x10@64

קלט 2  
10x12x12

קומפיה 2  
10x10@64

איום  
POOLING1  
2x2@64

קומפיה 1  
10x10@64

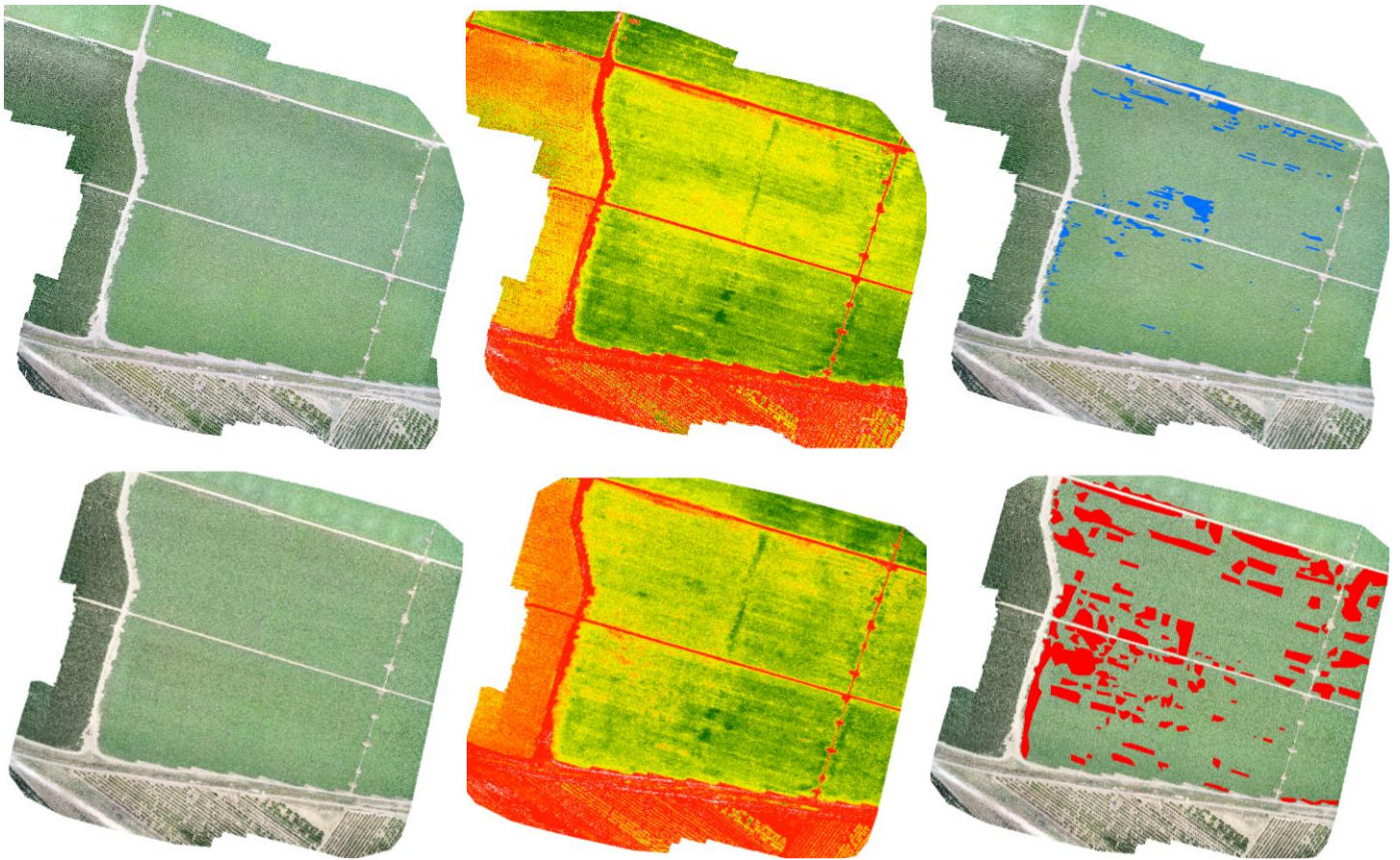
קלט 1  
10x22x224

מודל מבוסס רשת מירונים  
לזיהוי עשבייה

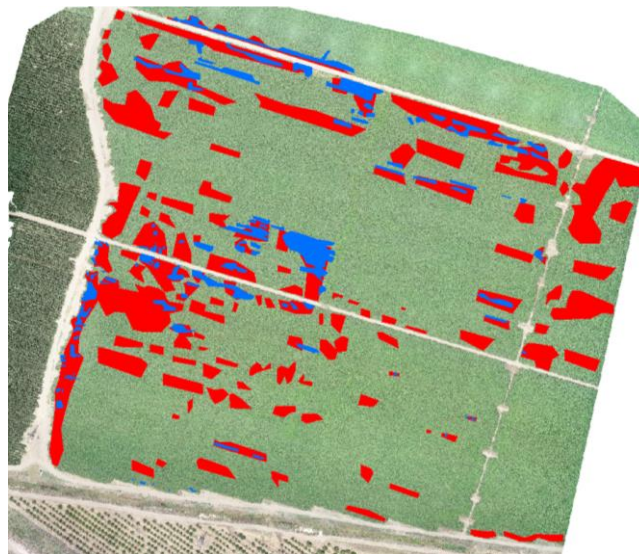
- נתוני קלט:
- עוצים מולטי-ספקטלליים לאחר קדם עבוד בערכי החזרה – אורתופוטו מצילומי רחפן
  - הפרש גבהים מחושב על בסיס מפת גבהים DSM מצילומי רחפן
  - מודל בזימסה מחושה מאורתופוטו
  - אינדקס חספוס TRI מחושב ממודל גבהים
  - אינדקסי מרקום GCM (הומוגניז), אטרופיה, וקוליציה) מחושבים ממודל גבהים

## תוצאות – קבוצת יבנה

שיטת הפענוח המוצעת הופעלה בחלקת יבנה מבלי שנתוני שדה זה השתתפו באימון הרשת. התוצאות מציגות מפות פענוח ע"י המודל כנגד בדיקה קרקעית (בוצע באופן זהה למפורט לעיל).



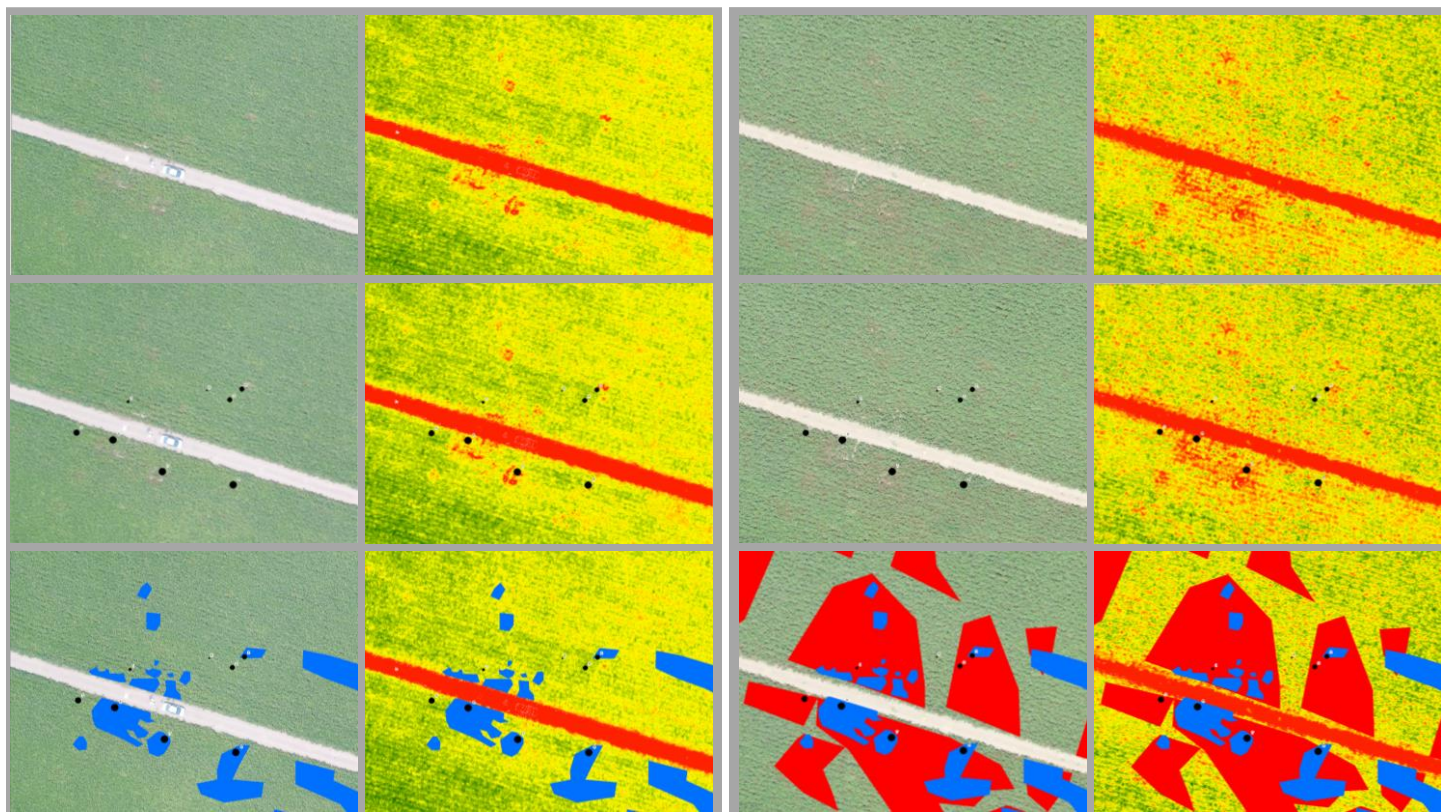
איור 6: שורה עליונה צילום מ-22 ליולי, שורה תחתונה צילום מ-11 לאוגוסט (משמאל לימין): אורתופוטו מצילומי רחפן, מפת בימסה (אדום פחות מ-10 מ"ג לגרם, ירוק יותר מ-60 מ"ג לגרם), מפת אזורים חשודים למחלה שזוהו באמצעות האלגוריתם.



איור 7: מפת אזורים שמזוהים כנגועים בין 22 ליולי (כחול) ל-11 לאוגוסט (אדום). ב-22 ליולי התגלו 117 אזורים חשודים ששטחם הכולל היה 5,040 מ"ר, ב-11 לאוגוסט זוהו 118 אזורים ששטחם נסכם ב-26,000 מ"ר וגודל השטח המצולם היה 140,000 מ"ר, מכאן עולה כי שטח הנגוע עלה ב-15% מסך שטח החלקה בתקופת המחקר.



תוצרי אימות קרקעי הצביעו על מגמה זהה לבני דרום, אזורים עם יחס נמוך של צמחים נגועים ליחידת הדיגום התגלו בתאריך מאוחר יותר, בעוד שאזורים עם יחס גבוה של צמחים נגועים ליחידת הדיגום זוהו ע"י האלגוריתם בתאריך המוקדם.



איור 8: אימות קרקעי ללווי אורתופוטו, ומפת ביומסה לתאריך 22 ליולי (משמאל) ו-11 לאוגוסט (מימין)

בימסה צמחית מ"ל לגרם ב11 לאוגוסט	בימסה צמחית מ"ל לגרם ב20 ליולי	סה"כ צמחים שנדגמו באזור הנבחר	צמחים עם תסמינים	
43	40	7	0	אזורים תקינים, לא חשודים
41	38			
43	41			
41	40			
32	38	7	1	אזורים לא תקינים, חשודים במחלה
29	41	7	2	
28	42	7	2	
10	38	7	6	
8	14	7	6	
9	16	7	7	
55	35			כתמי עשבייה
46	39			
58	36			

## מסקנות:

במסגרת המחקר פותח כלי יישומי לזיהוי וניטור של פטריה *Macrophomina phaseolina* בצמחי כותנה מהזן פימה באמצעות מדידות ספקטרליות וצילומי רחפן. פותח אלגוריתם חכם למיפוי בשדה. הצלנו לקשור בין עיתוי בו זיהינו את המחלה לחומרת המחלה. התוצאות אומתו ברמת השדה ע"י דיגום צמחים בחלקה. הוכח כי באזורים שסווגו כאזורים ללא מחלה, אכן לא נמצאו צמחים חולים (דיגום קרקעי).

המשך המחקר, אנו מתכננים להרחיב את המחקר לגידולים אחרים, נניח עגבניות, חמניות, חמוס ועוד. בנוסף, אנו מעוניינים להמשיך לחקור את הקשר בין פרק הזמן בו זיהינו את המחלה לחומרתה בשדה.

בחוקרים מודים למועצת הכותנה על התמיכה ומימון המחקר. בנוסף, החוקרים מודים למגדלי הדרום וחברת "אגרידע" על עבודת השדה, צילומי רחפן, מדידות ספקטרליות, תמיכה ועזרה.