

פיתוח הדברה משולבת כנגד מחלת הנבילה המאוחרת בתירס – פורמולת חרסית לשחרור איטי של
Azoxystrobin בפס הזריעה ועיטוי זרעים ביולוגי

מוגש להנהלת ענף הפלחה, לסיכום שנת המחקר ב- 2025

שמות השותפים למחקר

דר' אופיר דגני – תל-חי, אוניברסיטת קריית שמונה בגליל, מיגל (ofird@telhai.ac.il).
דר' און רבינוביץ – מיגל - מכון למחקר מדעי בגליל, קריית שמונה (onnrab@gmail.com).
יואב גולן – משרד החקלאות ופיתוח הכפר, שירות ההדרכה והמקצוע (שה"מ).
עוזרי מחקר: אלחנן דימנט, פלג הדרי – תל-חי, אוניברסיטת קריית שמונה בגליל, מיגל

1. תקציר

תקציר

מחלת הנבילה המאוחרת (Late Wilt Disease) בתירס, הנגרמת על-ידי *Magnaportheopsis maydis*, מתפשטת לאזורי גידול חדשים ומהווה מגבלה מתמשכת בעלת השלכות כלכליות משמעותיות על גידול התירס, במיוחד בתנאי חום ועקות יובש. על אף התקדמות באבחון המולקולרי, הבנת מבנה האוכלוסייה בארץ ומנגנוני ההישרדות של הפתוגן בקרקע ובזרעים, השגת שליטה במחלה נותרה אתגר. אסטרטגיות הדברה קיימות מתבססות על זני מכלוא עמידים, שיטות אגרונומיות להפחתת עקת הצמח והנגיעות, והתערבויות כימיות או ביולוגיות. עם זאת, יעילותן של שיטות אלו מוגבלת בשל השונות בתנאי השדה, הסתגלות והתפתחות עמידות של הפתוגן ומגבלות מעשיות. במחקר זה בחנו ממשק הדברה משולב הכולל Azoxystrobin (Az) בשחרור מבוקר ואיטי מנשאי חרסית, בשילוב עיטוי זרעים ביולוגי, לאורך עונת גידול מלאה בבית רשת. מיני *Trichoderma* נבחרים יושמו בשילוב פורמולציות בנטוניט-Az וספיוליט-Az להגנה על שני זני תירס רגישים למחלה. בזן התירס המתוק פרלוד (Prelude), אף שטיפולים ביולוגיים בלבד העניקו הגנה מוגבלת, בסוף העונה השילוב חרסית-Az-טריכודרמה עלה בביצועיו על הטיפול הכימי הקונבנציונלי, והוביל לשיפור במשקל הנצר (116%) והקלחים (145%), בירידה מובהקת בתסמיני המחלה (74%), ובדיכוי מלא של נגיעות השורש ב-*M. maydis*. מגמות דומות נצפו בזן המספוא העמיד יותר, קולוסוס (Colossus), שבו מדדי הצמיחה ובריאות הצמח אוששו לרמות דומות לביקורת הבריאה. שני נשאי החרסית סיפקו הגנה משמעותית מפני המחלה, אולם השילוב של ספיוליט עם תערובת המינים *T. asperellum*, *T. longibrachiatum* ו-*T. virens*, נמצא כיעיל ביותר באופן עקבי. ממצאים אלה ממחישים את הפוטנציאל של ממשק ההגנה הכפול חרסית-Az-טריכודרמה בלחץ מחלה גבוה ובזנים רגישים למחלה. הנתונים מעודדים כעת בחינת הממשק החדש בשדה מסחרי.

מילות מפתח:

Cephalosporium maydis, *Harpophora maydis*, *Magnaportheopsis maydis*, Real-time PCR
בנטוניט, הדברה ביולוגית, מחלות צמחים, מבחני פתוגניות, ספיוליט, שחרור מבוקר

2. מבוא ותיאור הבעיה

הפתוגן *Magnaporthe oryzae*, גורם לנזק חמור בשדות תירס בארץ ובארצות נוספות. מחלת הנבילה המאוחרת נפוצה כיום במרבית אזורי גידול התירס בארץ [1]. בשדות מסוימים ובצמחי זנים רגישים עלולה המחלה לפגוע ב- 100% מהצמחים [2]. המאפיינים הם נבילה מהירה יחסית של התירס המתרחשת לרוב בגיל 60-80 יום, מלפני שלב הפריחה (tasseling) ועד ההבשלה הפיסיולוגית [3]. הפתוגן *M. maydis* שורד בקרקע ובזרעים ומקיים אורך חיים אנדופיטי ("בתוך הצמח" ללא תסמינים גלויים) בצמחי תירס עמידים למחלה ובפונדקאים משניים דוגמת תורמוס, אבטיח, זיפן ירוק וכותנה [4,5]. ככזה הוא עשוי לתקוף את הפונדקאי, כשהתנאים מעודדים זאת. הטיפול של זני תירס עמידים למחלה דורש מאמץ מתמיד לסריקה וזיהוי של זנים חדשים ואלו מאוימים על ידי קווים אלימים של הפתוגן, כפי שדווח במצרים, ספרד וישראל [6-8].

בעשורים האחרונים הושגה התקדמות משמעותית בחקר המחלה בארץ, פיתוח דרכי התמודדות ויישום שיטות מחקר מתקדמות [9,10]. בין השאר פותחה שיטה מבוססת Real Time PCR (qPCR) לאיתור הפתוגן [2] המאפשרת איתור עקבי ורגיש של הפתוגן בשדה (בהבדלי ריכוז של פי מיליון) גם בהעדר תסמיני מחלה חיצוניים. בשנים 2015-2018 פותחה שיטה יעילה וכלכלית, המאפשרת לראשונה מיגון כימי של צמחים רגישים בשדות נגועים בכבדות [1,2,11]. השיטה מבוססת על יישום מבוקר בשלושה מועדים (15, 30, 45 יום לגידול) של חומר ההדברה Azoxystrobin (Az), דרך טפטפות, בגידול בצמדי שורות. בשדה נגוע בכבדות ובצמחים רגישים למחלה הוריד טיפול זה את כמות ה-DNA של הפתוגן בשורש ובגבעול הצמחים לרמות אפסיות, הפחית את הופעת התסמינים ב- 41% והעלה את היבול הכללי ואיכותו (ב- 36% ו- 77% בהתאמה), לרמה המקובלת בשדות בריאים. בנוסף שילוב של Az עם תכשירים בעלי מנגנון פעולה שונה נמצא יעיל ועשוי להקטין את הסיכוי להופעת עמידות לטיפול [12].

יחד עם זאת, השינוי בשיטת הגידול ופריסת טפטפות אינם מתאימה ליישום בכל מקום ועלותם יקרה. בנוסף בשימוש בחומרי הדברה קיים חשש שהפתוגן יפתח עמידות לתכשיר והם נחשבים כגורם סיכון סביבתי ובריאותי. לפיכך מתמקדים המאמצים כעת בפיתוח שיטות הדברה ידידותית לסביבה. מחקר שבצענו בשנים האחרונות (2019-2023) הדגים את היעילות הגבוהה של השימוש במיני פטרייה הנחשבת למדביר ביולוגי (*Trichoderma spp.*) כנגד הפתוגן [13-18]. יחד עם יתרונות ההדברה הירוקה יש לקחת בחשבון שבמקרי מחלה חמורים, יעילותה מוגבלת ותלויה בתנאי הסביבה המשתנים. לאחרונה הודגם בעציצים בשטח פתוח בעונה מלאה כי ניתן להשיג הדברה ביולוגית יציבה וחזקה וצמצום רכישת עמידויות על ידי שילוב של מיני טריכודרמה עם Az במינון נמוך [18]. הנושא לא נבחן בשדה. במקביל נבחן לראשונה הנושא של חיזוק המיקרופלורה הטבעית של צמחי תירס כנגד מחלת הנבילה המאוחרת. בעבודה מקדימה [15] בודדנו פטריות וחיידקים מזרעי תירס, העמדנו אותם במבחן צלחות נגד *M. maydis* ואלו שגברו עליו הוחדרו בחזרה לזרעים ונבדקו בנבטים שגודלו על קרקע מאולחת בגורם המחלה. זרעים מועשרים כאלו הביאו לשיפור משמעותי במדדי הצמיחה ובעיכוב הפתוגן גורם המחלה.

בשנתיים האחרונות פיתחנו נשא חרסית לשחרור איטי של Az כנגד פתוגן התירס [19]. שחרור איטי של פונגיצידי זה, באמצעות חרסית שתפוזר בפס הזריעה, יאפשר מיגון הצמחים בשלב הרגיש של החדירה והתבססות הפתוגן. היתרון בפתרון המוצע שניתן ליישמו בכל ממשק גידול, בצורה זולה לאורך זמן, בכל מקום וביעילות גבוהה (ימנע אובדן פעילות מפיזורו בקרקע). השימוש הממוקד בתכשיר זה מאפשר הפחתת השימוש בחומרי הדברה (70-85% פחות בהשוואה להגמעה), שילוב עם פתרונות הדברה ביולוגיים ועשוי למגן את הצמחים כנגד מחלות קרקע נוספות. הפורמולה החדשה נבחנה בהצלחה בחדר גידול ובחממה בעונת גידול מלאה [20]. בניסוי בחדר הגידול, בגיל 40 יום, טיפולי החרסית-Az, ובעיקר ספיויליט-Az, שיפרו משמעותית

את גובה הצמח ומשקל הנצר (עד 61%), אף שרמות ה-DNA של הפתוגן בשורשים נותרו גבוהות. בניסוי לאורך עונה מלאה בבית הרשת התקבלה תמונה מובהקת יותר: ביום 42 לאחר זריעה הטיפולים ספיוליט-Az ובנטוניט-Az העלו את שיעור השרידות, שיפרו את ההתפתחות הפנולוגית והפחיתו את רמת הפתוגן בשורשים ב-95-97%, ביחס לביקורת הלא מוגנת. בסוף העונה (יום 78) בלט במיוחד הטיפול בנטוניט-Az, שהעלה את משקל הנצר ב-128% ואת משקל הקלח ב-135%, והביא לדיכוי כמעט מוחלט של הפתוגן בשורשים [20]. בנוסף, נמצא כי בנטוניט לבדו תרם לשיפור מסוים במדדי צימוח ובדיכוי המחלה באמצע העונה, ממצא המרמז על תרומה פיזיקלית או ביולוגית אפשרית של החרסית עצמה. בסיכום, פורמולציות clay-AS הדגימו יעילות משמעותית בדיכוי המחלה ובהגברת הצימוח והיבול, תוך פוטנציאל להפחתת מינון קוטל הפטריות (עד 85% ביחס להגמעת התכשיר במינון 400 סמ"ק לדונם) ביישום ממוקד בפס הזריעה. היישום של חרסית-Az הוא בעל פעילות רחבת טווח כנגד גורמי מחלה נוספים כפי שהודגם לגבי *Macrophomina phaseolina* הגורם למחלת ריקבון הפחם בכותנה [21], שמהווה סיכון גם לצמחי תירס [4].

המחקר הנוכחי נועד לרתום הישגים אלו כדי לפתח לראשונה ממשק הדברה ידידותי לסביבה, המשלב עיטוי זרעים ב-*Trichoderma* יחד עם יישום בגומת הזריעה של פורמולת חרסית-Azoxystrobin. הממצאים המוצגים בדו"ח זה יוצגו במאמר מדעי שעתיד בכתובה:

Dimant E., Hadari P., Etedgi E., Rytwo G., and Degani O. Clay-Azoxystrobin and Trichoderma-based treatments for managing *Magnaportheiopsis maydis* maize late wilt disease. (2026), under preparation.

3. מטרת המחקר

פיתוח גישה חדשה להתמודדות עם מחלת הנבילה המאוחרת בתירס, המבוססת על ממשק ביולוגי-כימי משולב חרסית-Az-טריכודרמה, שייבחן אל מול הדברה כימית בלבד.

מטרות ספציפיות

- שיפור פרוטוקול ההדברה הביולוגית: בחינת תבדידי טריכודרמה חדשים שטרם נוסו.
- ביסוס ובחינה של ממשק ההדברה החדש המבוסס על נשאי חרסית לשחרור איטי של Az.
- בחינת הדברה משולבת של תערובות מיני טריכודרמה עם פורמולות חרסית-Az בעצמים בתנאי שדה.

4. תמצית תיאור המחקר

4.1. גידול *M. maydis* ומיני הטריכודרמה ששימשו במחקר זה

דסקית פטרייה בקוטר 6 מ"מ משולי תרבית אשר גדלה במשך 4-6 ימים, הועברה למרכז של צלחת מצע עשיר (PDA). הצלחות הודגרו ב- $28 \pm 1^\circ \text{C}$ בחושך. לצורך גידול מיני הטריכודרמה במצע עשיר נוזלי (PDB), הועברו 2 דסקיות מכל מין פטרייה בנפרד, לבקבוק ארלנמייר עם 60 מ"ל מצע. התרביות הודגרו למשך 6 ימים בטלטול של 150 rpm, בתנאים הני"ל. תרביות של 3 מינים שנבחרו לעיטוי (הפטרייה יחד עם נוזל הגידול) אוחדו ונטחנו במשך דקה בבלנדר יחד עם מקטעי קורים ונבגים שגורדו מפני השטח של 3 צלחות תרבית במצע מוצק (צלחת אחת לכל מין פטרייה). לנוזל הוסף Tween 80 בריכוז סופי של 0.05%. לטיפול הביקורת הוכנה תמיסת מי ברז + Tween 80. תערובת קטעי התפטיר והנבגים שהתקבלו יחד עם התוצרים

המופרשים (3.3×10^9 - 4.3×10^8 CFU/ml), שימשו לעיטוי זרעים שעברו שטיפה חיזונית (ערבוב, הדגרה של 10 דקות עם הזרעים וייבוש ל-24 שעות). מיני ה-*Trichoderma* שימשו במחקר זה מתוארים בטבלה 1.

טבלה 1 – מיני ה-*Trichoderma* ששימשו במחקר

Species	Designation	Origin	Formula
<i>Trichoderma asperellum</i>	P1	<i>Zea mays</i> , Prelude cv.	BioA, BioB
<i>Trichoderma asperelloides</i>	T203	ATCC 36042, CBS 396.92	BioA
<i>Trichoderma beinertii</i>	T14707	<i>Psammocinia</i> sp. ¹	BioA
<i>Trichoderma longibrachiatum</i>	T6607	<i>Psammocinia</i> sp. ¹	BioB
<i>Trichoderma virens</i>	Gv29.8 (Q isolate)	Soil, Texas, USA	BioB

¹ ספוג ים תיכוני.

4.2. מבחן עימות על מצע מוצק

לצורך שיפור שיטת העיטוי הביולוגי נבחנה יכולת ההדברה של תבדידי טריכודרמה חדשים כנגד *M. maydis* באמצעות עימות (dual-culture mycoparasitism). פוטנציאל ההדברה כלל הפרשת חומרים אנטי-פטרייתיים, (מומסים ונדיפים) עיכוב התפשטות קורים במגע ישיר או כיסוי מושבת הפתוגן. לצורך הניסוי, דסקיות אגר בקוטר 6 מ"מ נלקחו משולי מושבות פעילות והונחו משני צדי צלחת (PDA קוטר 90 מ"מ), *Trichoderma* אל מול *M. maydis*, במרחק 0.5 ס"מ מהשוליים. הצלחות הודגרו בחושך ב- $28 \pm 1^\circ\text{C}$ ונבדקו כעבור 3 ימים. כל טיפול כלל חמש חזרות ביולוגיות. האינטראקציות תועדו וצלחות מייצגות צולמו. תבדידי הטריכודרמה שסיפקו עיכוב משמעותי סווגו כבעלי פוטנציאל מיקופרזיטי חזק ונבחרו לניסוי ההמשך בצמחים.

4.3. הדברה משולבת חרסית-Az – טריכודרמה בעציצים בחממה לאורך עונת גידול מלאה

הניסוי בוצע ב-8 חזרות לטיפול, כל חזרה עציץ 10 ליטר המכיל 5 נבטי תירס מזן פרלוד (תירס מתוק) או קולוסוס (תירס מספוא) אורגניים (ללא עיטוי כמי כללי כנגד מחלות), בחוות הניסיונות אבני איתן בבית רשת. המספר הסופי של החזרות מוצג במקרא התרשימים (עקב תמותת חלק מהצמחים או הוצאת חריגים). הזרעים בכל הטיפולים היו אורגניים (ללא עיטוי כימי כללי כנגד מחלות). נבחנו טיפולי הדברה ביולוגית מבוססי מיני *Trichoderma* בנפרד ובמשולב עם חרסית-Az, אל מול צמחי ביקורת:

- 2 תערובות מיני טריכודרמה (BioA, BioB)
- 2 פורמולות חרסית (בנטוניט וספיוליט)-Az

ביקורות:

- הגמעת Az קונבנציונלית בשלושה מועדים מהזריעה.
- ללא הדברה
- ללא אילוח

נעשה שימוש באדמה מקומית כבדה מעורבת ב-20-25% פרלייט גס (מספר 4) לצורך אוורור. לאורך הניסוי בוצעו טיפולי דשן וטיפולים נגד מזיקים שונים, על מנת לשמור על גורם פגיעה רק מהאילוח בפטרייה.

טיפול האילוח: (1) הקרקע אולחה שבוע לפני הניסוי, ב-100 ג' (לעציץ) זרעי דוחן מעוקרים ומאולחים ב-*M. phaseolina*, 6 ס"מ מתחת לפני הקרקע (לפי [18]). השקיה ליצירת לחות בוצעה החל מתשעה ימים לפני הזריעה, 3 דקות פעמיים ביום. (2) אילוח משלים בוצע בכל עציצי הטיפולים לאחר 5 ימים (בהצצה) באמצעות הדבקת הקרקע ב-7 דיסקיות בקוטר 13.12 מ"מ מתרבות של *M. maydis* שגודלה כמתואר מעלה. ההדברה הביולוגית כללה עיטוי זרעים בתערובת (mix) של שלוש פטריות הטריכודרמה כמתואר

קודם לכן [18] (טבלה 1). ההדברה הכימית בוצעה באמצעות הוספת 55-65 מ"ג חרסית-Az לכל זרע בזריעה, כמתואר קודם לכן [20]. הביקורת כללה הגמעה, 15, 30, 44 יום מהזריעה לפרלוד או 14, 31, 45 יום מהזריעה לקולוסוס, 50 מ"ל של 7.36 מיקרוליטר לעציץ (המקביל ל-150 סמ"ק/דונם בשדה) יחד עם ההשקיה.

לאחר 5 ימים נבדקו אחוזי הצצה בכל טיפול. באמצע העונה (יום 42 לפרלוד ו-45 לקולוסוס, שלב V8-V12, בשלב ההפריה בפרלוד, או שבוע לפניו בקולוסוס) בוצע דיגום אמצע לאמון הצמיחה והמחלה וביום 82 או 94, בשלב הבשלת החלב (R5), לפרלוד ולקולוסוס בהתאמה, הניסוי נקצר. בקציר נבדקו מדדי צימות, הערכת התייבשות (כללית ותסמיני קלחים) ונוכחות ה-DNA של הפטרייה בשורש של כל צמח (ע"י qPCR [18]).

4.4. אנליזת Real-Time PCR (qPCR)

הפקת ה-DNA ושיטת ה-qPCR עברו התאמה לאיתור DNA של הפתוגן *M. maydis*. הפריימרים למחקר זה והריאקציה תוארו קודם לכן [2]. הריאקציה בוצעה בנפח של 5 μ l בארבע חזרות - 0.25 μ l (מכל פריימר Forward/Backward) בריכוז של 10 μ M, 2.5 μ l תערובת ריאקציה מוכנה iTaq mix, ו-2 μ l DNA template. תנאי הריאקציה: 95°C למשך 60 שניות ואז 40 מחזורים של 95°C למשך 15 שניות, 60°C למשך 30 שניות ולסיום יצירת עקומת התכה.

4.5. עיבוד סטטיסטי

ניתוח ועיבוד סטטיסטי בוצעו באמצעות תוכנת GraphPad Prism, גרסה 11.0.0 (84) 10/02/2026 (GraphPad Software Inc., San Diego, CA, USA). בהתאם לבדיקת נורמליות הנתונים נותחו באמצעות ניתוח שונות (ANOVA) או במבחן א-פרמטרי (Kruskal-Wallis) ברמת מובהקות של $p < 0.05$. צפויה שונות גבוהה בתוצאות ניסוי העציצים בחממה (ערכי שגיאת תקן גבוהים), בהתחשב בקושי האובייקטיבי של אילוח אחיד של הצמחים. כתוצאה מכך, זה מאתגר להשיג הבדלים מובהקים סטטיסטית. כדי לשמור על עוצמת הבדיקה ולהפחית את הסיכון לשגיאות מסוג II בניסוי החממה, בחרנו במבחן המשך Fisher's LSD או Uncorrected Dunn's test, בהתאמה.

5. תוצאות המחקר

5.1. מבחני עימות בצלחות מצע במעבדה

לצורך בחינת השילוב חרסית-Azoxystrobin (Az) – טריכודרמה, הגדלנו את ספריית הטריכודרמה שלנו מ-8 ל-15 תבדידים ובחנו אותם במבחן אנטגוניזם במצע מוצק כנגד הפתוגן (איור 1). בעקבות המבחן בחרנו לניסוי העציצים תערובת מינים חדשה מבוססת על המינים *T. asperellum*, *T. longibrachiatum*, *T. virens* (BioB) אל מול תערובת שהוכיחה את עצמה בשנים האחרונות במבחן עציצים בתנאי שדה (BioA), טבלה 1, [18].

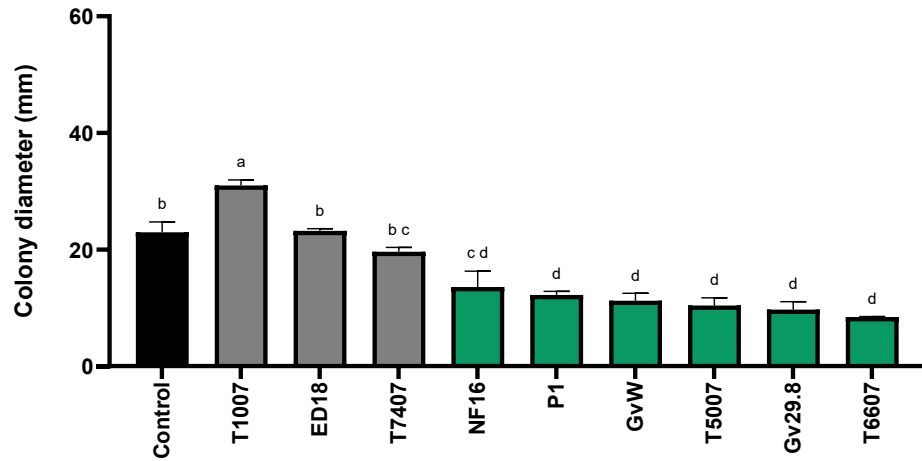
5.2. הדברה משולבת חרסית-Az – טריכודרמה בעציצים בבית רשת לאורך עונת גידול מלאה

ניסוי עונה מלאה בבית רשת לבחינת הדברה משולבת חרסית-Az – טריכודרמה בוצע באביב-קיץ 2025 בחוות הניסיונות באבני איתן. לאורך העונה הצמחים התפתחו היטב והושפעו מהאילוח בפתוגן שהתבטא בהופעת תסמיני מחלה חיצוניים (איורים 2, 3). יעילותם של הטיפולים המשלבים את ההדברה הביולוגית (ובמיוחד BioB) יחד עם החרסיות-Az התבטאה בעיקר בסוף העונה, בהאצת הצימוח תחת עקת הפתוגן, ובלימת התקדמות המחלה, כפי שיפורט בהמשך. השפעת הטיפולים הייתה דומה בשני זני התירס שנבדקו.

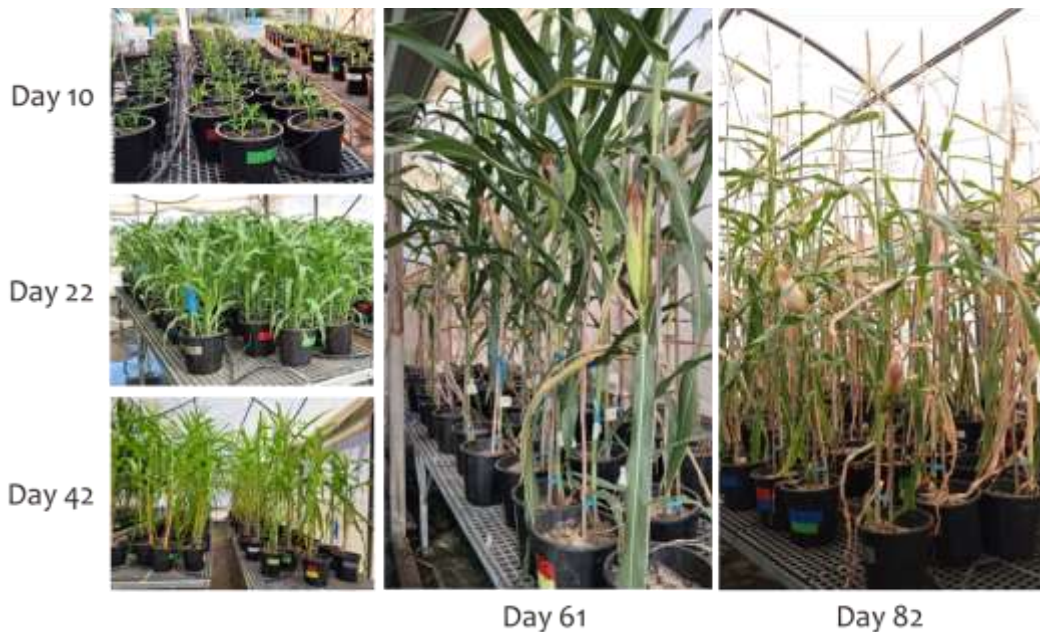
Trichoderma sp.	Designation
<i>T. asperellum</i>	P1
<i>T. asperellodes</i>	T203
<i>T. asperellodes</i>	T1607
<i>T. atroviride</i>	T1807
<i>T. atroviride</i>	NF16
<i>T. longibrachiatum</i>	T5007
<i>T. longibrachiatum</i>	T6607
<i>T. longibrachiatum</i>	T7407
<i>T. longibrachiatum</i>	T7507
<i>T. virens</i>	GvW
<i>T. virens</i>	Gv29.8
<i>T. harzianum</i>	ED18
<i>T. beigelii</i>	T2107
<i>T. beigelii</i>	T14207
<i>T. sp. nov. 1</i>	T5007

מינים חדשים

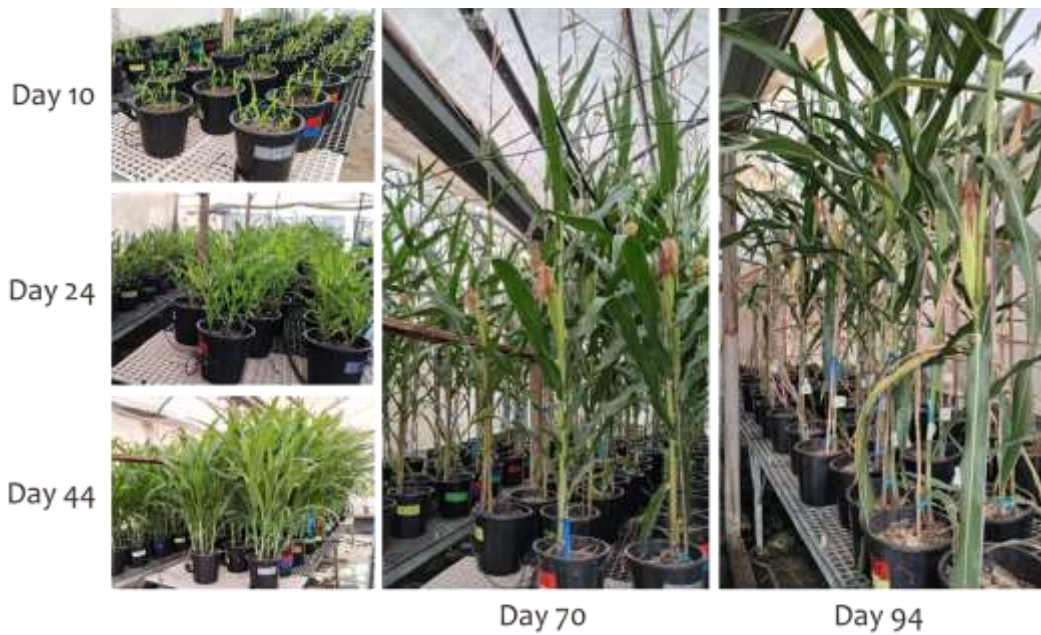
M. maydis (Mm34) - day 3



איור 1. מבחן עימות בצלחות מצע (plate confrontation assay). נבדקה היכולת של קווי הטריכודרמה (בטבלה משמאל) לעכב את מושבות *M. maydis* לאחר 3 ימי הדגרה. כל עמודה מציגה ממוצע של 5 חזרות ביולוגיות, עם שגיאת תקן, והאותיות (a-d) מציינות הבדלים מובהקים סטטיסטית ($p < 0.05$) במבחן ANOVA ולאחריו Tukey. מודגשים בירוק המינים שהציגו הבדל מובהק מהביקורת.



איור 2. ניסוי עציצים בבית רשת, בן התירס המתוק פרלוד, לבחינת ההשפעה המשולבת של עיטוי זרעים בטריכודרמה ושחרור איטי של Az מחרסיות בגומת הזריעה. הניסוי בוצע בחוות הניסיונות באבני איתן, באביב-קיץ 2025. ימי הצילום מהזריעה מופיעים ליד כל תמונה. ההפריה התרחשה בימים 42-48 מהזריעה. תחילת תסמיני מחלה נצפו ביום 55 לגידול. דיגומים בוצעו כעבור 42 ו-82 יום מהזריעה.



איור 3. ניסוי עציצים בבית רשת, בזן תירס המספוא קולוסוס, לבחינת ההשפעה המשולבת של עיטוי זרעים בטריכודרמה ושחרור איטי של Az מחרסיות בגומת הזריעה. הניסוי בוצע בחוות הניסיונות באבני איתן, באביב-קיץ 2025. ימי הצילום מהזריעה מופיעים ליד כל תמונה. הפריה התרחשה בימים 56-59 מהזריעה. תחילת תסמיני מחלה נצפו ביום 73 לגידול. דיגומים בוצעו כעבור 45 ו-94 יום מהזריעה.

בדיגום האמצע (יום 42 לפרלוד ו-45 לקולוסוס, **איורים 4, 6**) המייצג שלב חבוי (latent) של המחלה, רוב מדדי הצימוח היו דומים מבחינה סטטיסטית בין הטיפולים ובין הביקורות. **בזן פרלוד**, בסיכום כל המדדים יחד, 2 תערובות העיטוי הביולוגי והפורמולה בנטוניט-Az לבד שיפרו את מדדי הצימוח ב-8-10% בהשוואה לביקורת הנגועה, בדומה לטיפול הכימי בהגמעה (**טבלה 2**). התכשיר BioA הביא לרמת צימוח דומה לביקורת הלא מאולחת במדד משקל הנצר (שיפור של 15% ביחס לביקורת) ואף בלט בשיפור גובה הצמחים (23% שיפור לעומת ביקורת 5%). גם הפורמולה בנטוניט-Az לבד הייתה יעילה. מנגד הטיפולים המשולבים חרסית-Az – טריכודרמה רשמו ערכי צימוח מעט נמוכים (4-7% פחות מהביקורת המאולחת). **בזן קולוסוס**, התקבלה תמונה דומה (**טבלה 2**). העטוי ב-BioA ובנטוניט-Az, לבד ובמשולב, רשמו את ערכי הצימוח הגבוהים ביותר בהשוואה לביקורת המאולחת. באופן לא צפוי, בקולוסוס בדיגום האמצע, הביקורת הלא נגועה התפתחה לאט יותר בהשוואה לביקורת הנגועה ולשאר הטיפולים, מגמה שהתהפכה בסוף הגידול.

בדיגום הסוף (יום 82 לפרלוד ו-94 לקולוסוס, **איורים 5, 7**) יעילות הטיפולים המשולבים בלטה בשני זני התירס שנבדקו. העיטוי בטריכודרמה (BioB) עם 2 החרסיות שיפר את הצמיחה בעד 67% ואת הבריאות בעד 56%, בהשוואה לביקורת הנגועה (**טבלה 3**). במקביל השילוב של שתי החרסיות עם BioA היה גם כן יעיל, עם מדדי צימוח ובריאות גבוהים (עד 41%-59% בהתאמה). פורמולות החרסית לבד (במיוחד בנטוניט-Az) היו יעילות ותוספת עיטוי ביולוגי הניבה שיפור במדדי הצימוח והבריאות רק לגבי ספיליט-Az.

טבלה 2 – סיכום מדדי צימוח בדיגום האמצע *

פרלוד יום 42

טיפול	משקל נצר	גובה	מספר עלים	נביטה יום 5	מספר צמחים	Ave	Rank
Infected	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
Un-infe	116%	105%	124%	124%	113%	116%	1
Az, 150 ml/0.1 ha	109%	100%	115%	115%	109%	110%	2
BIO A	115%	123%	101%	101%	100%	108%	4
BIOB	106%	100%	114%	114%	109%	108%	3
Bent-Az	110%	112%	105%	105%	100%	107%	5
Sep-Az	98%	107%	97%	97%	96%	99%	8
BIO A + Bent-Az	104%	94%	105%	105%	104%	102%	6
BIO A + Sep-Az	98%	101%	96%	96%	96%	97%	9
BIO B + Bent-Az	103%	109%	93%	93%	87%	97%	10
BIO B + Sep-Az	96%	99%	105%	105%	100%	101%	7

קולוסוס יום 45

טיפול	משקל נצר	גובה	מספר עלים	נביטה יום 5	מספר צמחים	Ave	Rank	Total	Rank
Infected	100%	100%	100%	100%	100%	100%		100%	
Un-infe	61%	75%	89%	107%	103%	87%	10	102%	8
Az, 150 ml/0.1 ha	106%	107%	103%	107%	100%	105%	7	107%	3
BIO A	121%	122%	98%	102%	97%	108%	5	108%	1
BIOB	99%	86%	94%	93%	97%	94%	9	101%	9
Bent-Az	121%	110%	100%	110%	100%	108%	4	107%	2
Sep-Az	97%	99%	100%	98%	103%	99%	8	99%	10
BIO A + Bent-Az	123%	103%	112%	110%	103%	110%	1	106%	4
BIO A + Sep-Az	114%	103%	104%	112%	103%	107%	6	102%	7
BIO B + Bent-Az	111%	115%	106%	110%	103%	109%	3	103%	6
BIO B + Sep-Az	123%	105%	107%	109%	103%	109%	2	105%	5

* הטיפולים כללו אילוח הקרקע ב- *M. phaseolina*, תוספת חרסית-Az בגומת הזריעה ועיטוי זרעים מבוסס טריכודרמה. **Bio B** . *T. beinertii* (T7107) , *T. longibrachiatum* (T7407) , *T. asperellum* (P1) – **Bio A** . *T. virens* (GvW) , *T. longibrachiatum* (T5007) , *T. asperellum* (P1) – **Bent-Az** . Azoxystrobin – **Sep-Az** , Azoxystrobin . ביקורות: צמחים ללא טיפול שגודלו בקרקע מקומית נגועה באופן טבעי (Un-infe, עמודה כחולה), כאלו שהודבקו בפתוגן (Infected, ללא טיפול מגן, עמודות שחורות) וצמחים שעברו טיפול כימי קונבנציונלי (Az) – הגמעה, 15, 30, 44 יום מהזריעה לפרלוד או 14, 31, 45 יום מהזריעה לקולוסוס, 50 מ"ל של 7.36 מיקרוליטר לעציץ (המקביל ל- 150 סמ"ק/דונם בשדה) יחד עם ההשקיה. בירוק מודגש הערך הגבוה ביותר בכל טור ובאדום הערך הנמוך ביותר. מוצג הממוצע (Ave) של כל זן והדרוג שלו (Rank) וכן ממוצע כל המדדים של שני זני התירס (Total) והדרוג הכללי.

טבלה 3 – סיכום מדדי צימוח בדיגום הסוף *

פרלוד יום 82

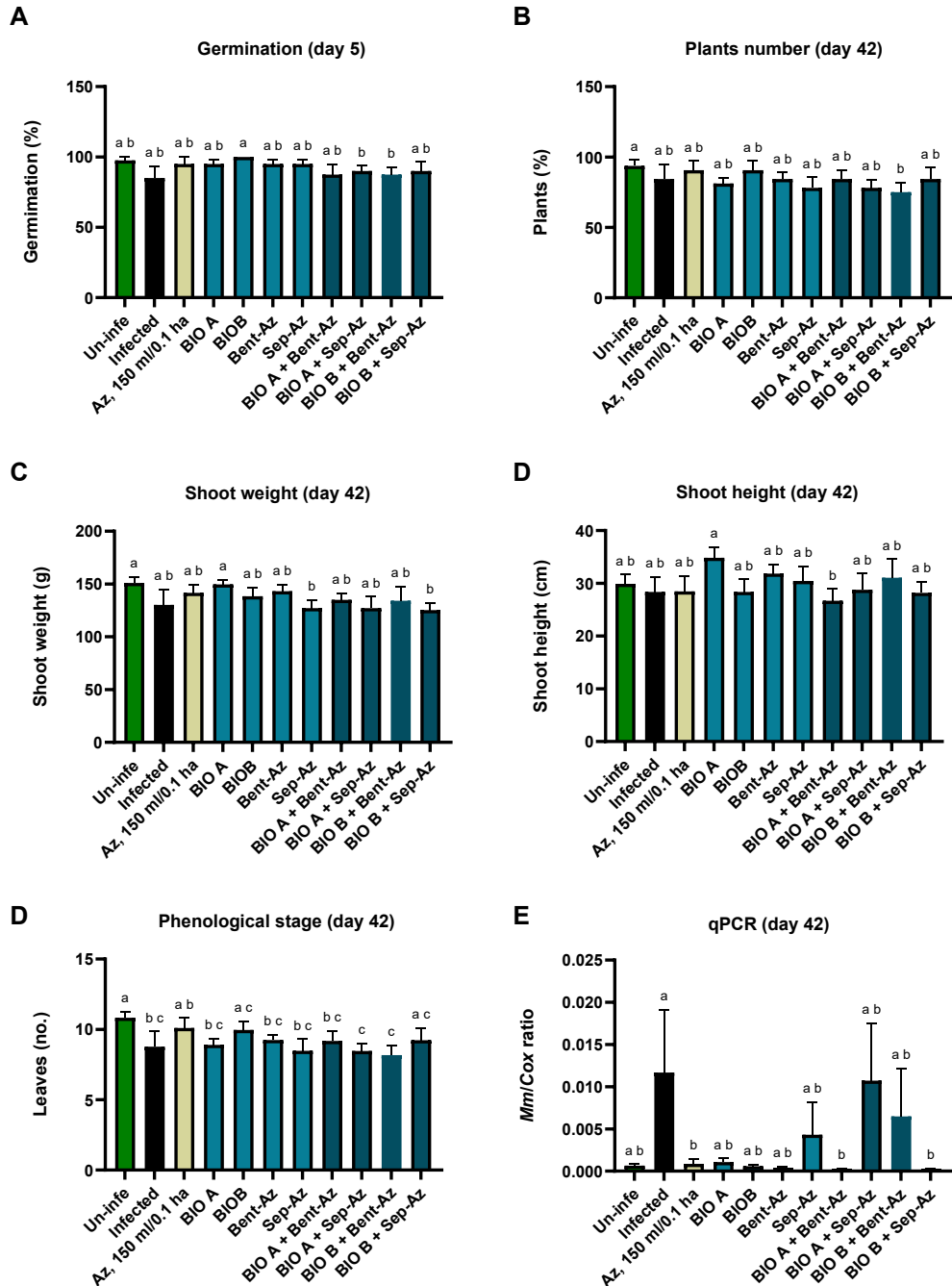
טיפול	משקל צמח	משקל קלח	מס' עלים	גובה	Ave	בריאות נצר	בריאות קלח	Ave
Infected	100%	100%	100%	100%	100%	0%	0%	0%
Un-infe	158%	104%	104%	89%	114%	71%	66%	68%
Az, 150 ml/0.1 ha	168%	153%	102%	90%	128%	73%	42%	57%
BIO A	101%	65%	104%	100%	92%	0%	0%	0%
BIOB	105%	110%	106%	89%	102%	15%	13%	14%
Bent-Az	170%	179%	102%	100%	138%	71%	31%	51%
Sep-Az	172%	161%	96%	96%	131%	61%	38%	49%
BIO A + Bent-Az	164%	189%	100%	95%	137%	60%	27%	43%
BIO A + Sep-Az	167%	173%	96%	88%	131%	74%	44%	59%
BIO B + Bent-Az	185%	163%	100%	96%	136%	68%	39%	53%
BIO B + Sep-Az	216%	245%	101%	106%	167%	63%	19%	41%

קולוסוס יום 94

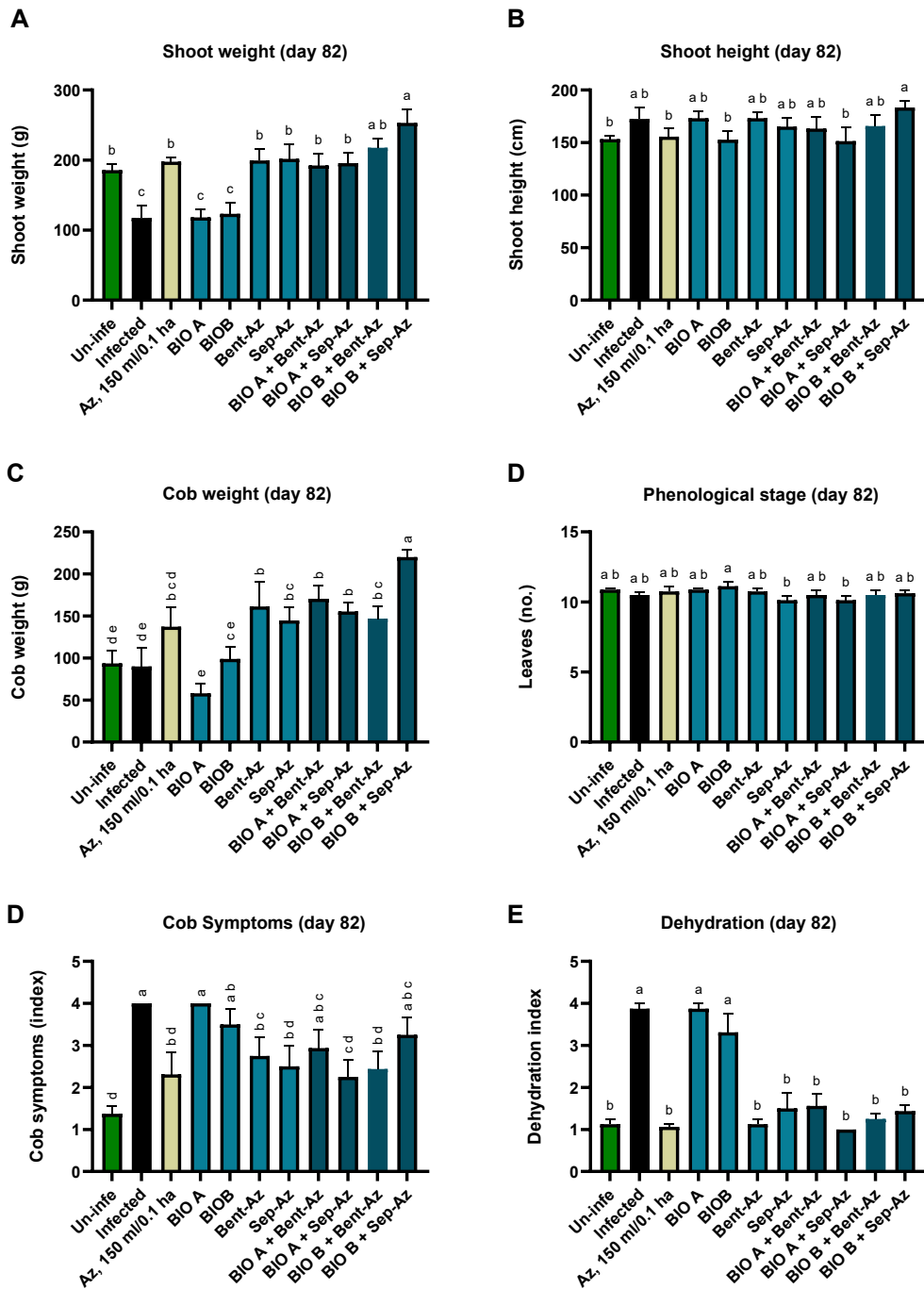
טיפול	משקל צמח	משקל קלח	מס' עלים	גובה	Ave	בריאות נצר	בריאות קלח	Ave
Infected	100%	100%	100%	100%	100%	0%	0%	0%
Un-infe	170%	165%	109%	106%	137%	69%	67%	68%
Az, 150 ml/0.1 ha	167%	190%	105%	108%	142%	67%	56%	61%
BIO A	107%	128%	107%	122%	116%	25%	7%	16%
BIOB	112%	136%	104%	109%	115%	4%	2%	3%
Bent-Az	162%	185%	110%	114%	143%	62%	59%	60%
Sep-Az	148%	194%	101%	113%	139%	49%	20%	35%
BIO A + Bent-Az	145%	178%	103%	111%	134%	67%	50%	59%
BIO A + Sep-Az	165%	180%	110%	111%	141%	56%	58%	57%
BIO B + Bent-Az	163%	189%	109%	117%	145%	60%	52%	56%
BIO B + Sep-Az	152%	191%	104%	111%	139%	56%	41%	48%

טיפול	פרלוד יום 82		קולוסוס יום 94		Total	Rank
	Ave	Rank	Ave	Rank		
Infected	67%		67%		67%	
Un-infe	99%	8	114%	4	106%	7
Az, 150 ml/0.1 ha	105%	6	115%	1	110%	4
BIO A	62%	10	83%	9	72%	10
BIOB	73%	9	78%	10	75%	9
Bent-Az	109%	2	115%	2	112%	2
Sep-Az	104%	7	104%	8	104%	8
BIO A + Bent-Az	106%	5	109%	7	107%	6
BIO A + Sep-Az	107%	4	113%	5	110%	5
BIO B + Bent-Az	109%	3	115%	3	112%	3
BIO B + Sep-Az	125%	1	109%	6	117%	1

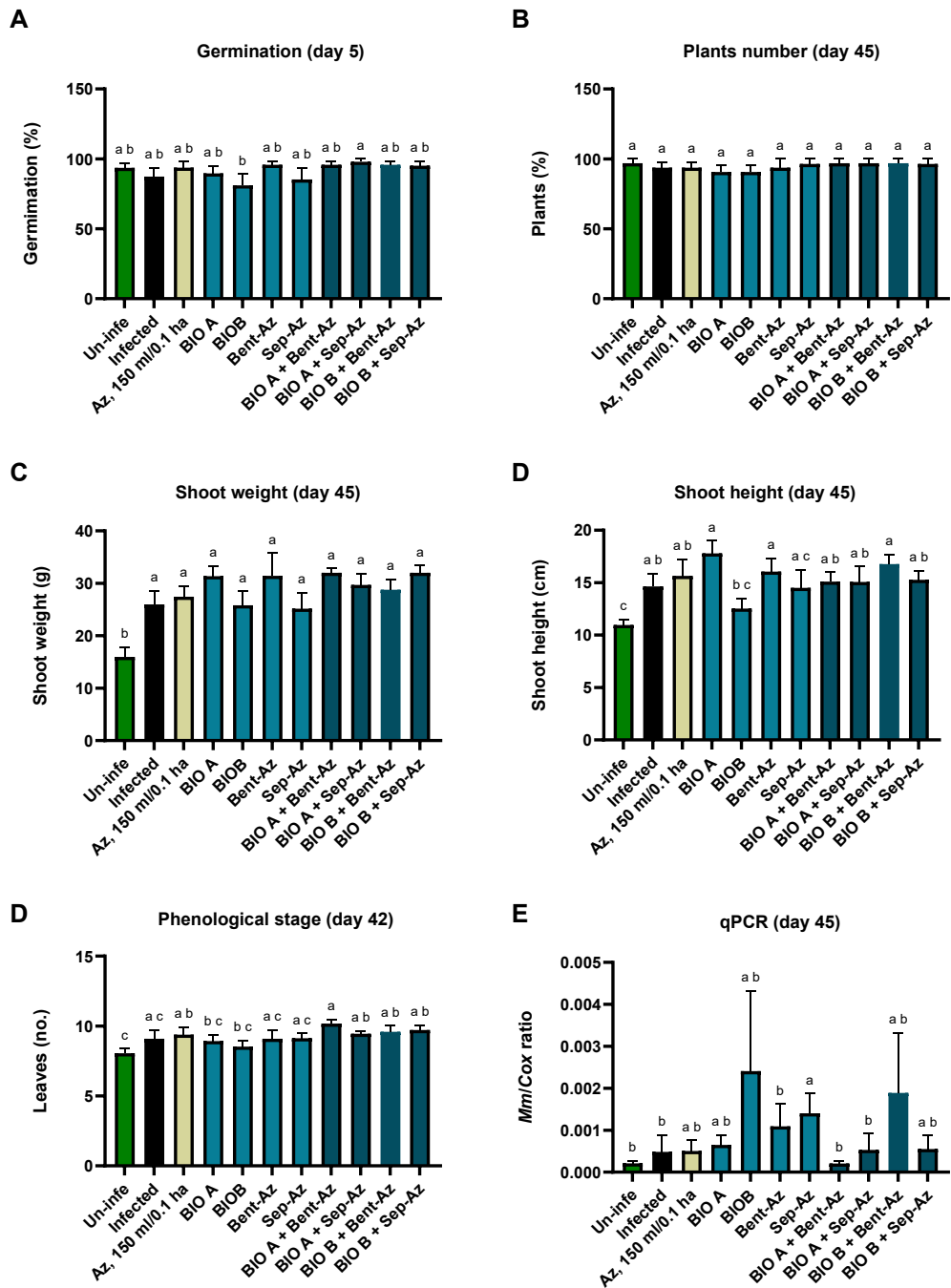
* הטיפולים כללו אילוח הקרקע ב- *M. phaseolina*, תוספת חרסית-Az בגומת הזריעה ועיטוי זרעים מבוסס טריכודרמה. תיאור הקיצורים כבטבלה 2. בירוק מודגש הערך הגבוה ביותר בכל טור ובאדום הערך הנמוך ביותר. מוצג הממוצע (Ave) של כל זן והדרוג שלו (Rank) וכן ממוצע כל המדדים של שני זני התירס (Total) והדרוג הכללי.



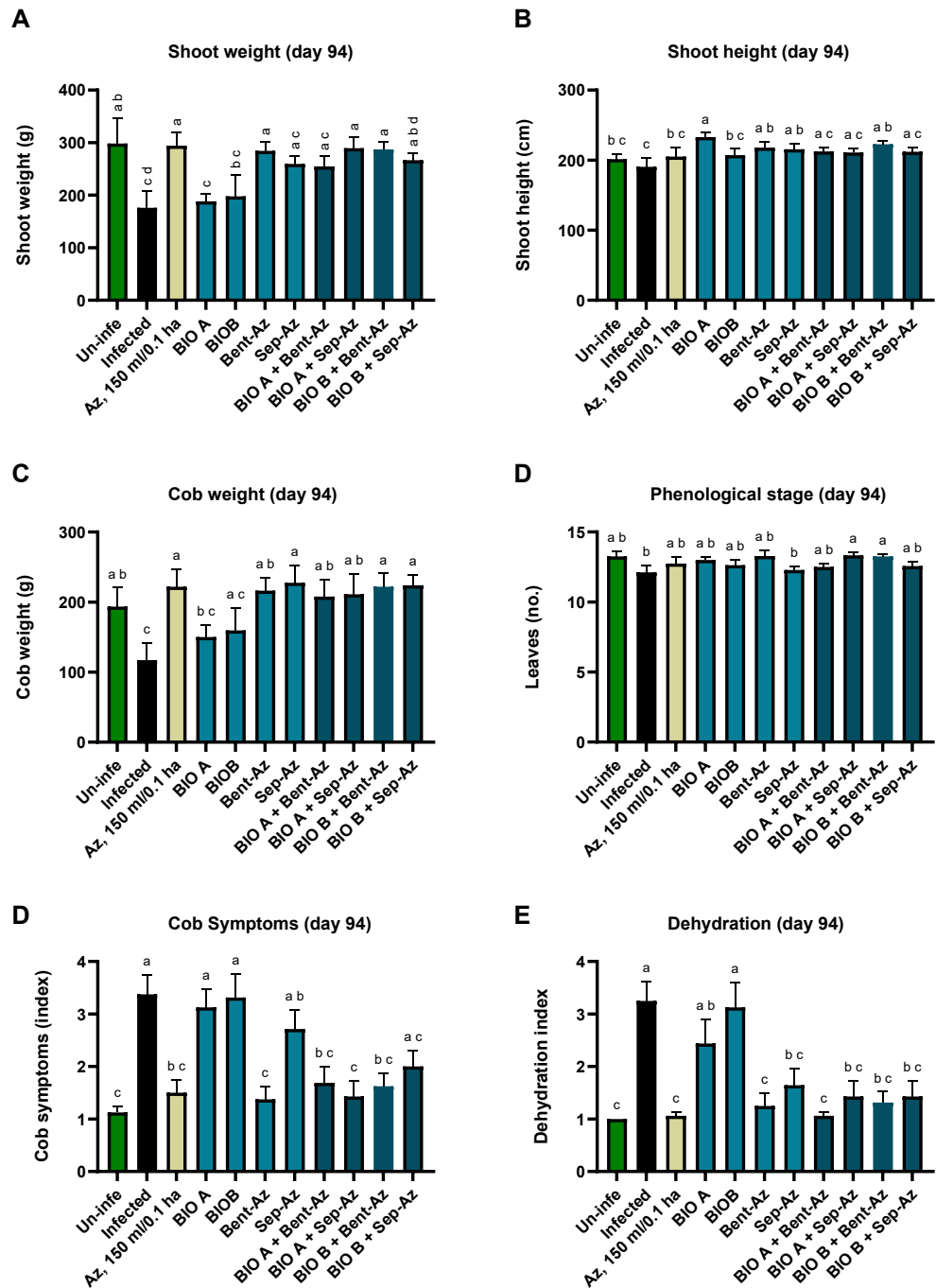
איור 4. מדידים בניסוי החצי-שדה באמצע העונה בזן פרלוד. הטיפולים כללו אילוח הקרקע ב- *M. phaseolina*, תוספת חרסית-Az בגומת הזריעה ועיטוי זרעים מבוסס טריכודרמה. נבדקו מדי צימוח וכמות יחסית של DNA של הפתוגן (*Mpk*) ברקמות השורש, מנורמל לגן ציטוכרום c אוקסידאז (*Cox*) של הצמח. תיאור הקיצורים כבטבלה 2. מספר הצמחים מייצג את הצמחים שהתפתחותם הייתה תקינה (לאחר דילול צמחים קטנים מאוד). הנתונים מייצגים ממוצע \pm שגיאת תקן של 8 חזרות ביולוגיות, למעט תוצאות ה-qPCR שבהן יש 4-8 חזרות עקב תמותת צמחים והסרת ערכים חריגים באמצעות שיטת ROUT (Q = 1%) ב- GraphPad Prism. אותיות שונות (a-c) מעל העמודות מציינות הבדלים מובהקים סטטיסטית בין הטיפולים ($p < 0.05$), במבחן ANOVA ואחריו Fisher's LSD (לנתוני גובה הצמחים) או במבחן א-פרמטרי (Kruskal-Wallis ולאחריו Dunn's) לגבי שאר התוצאות.



איור 5. מדדים בניסוי החצי-שדה בסוף העונה בזן פרלוד. הטיפולים כללו אילוח הקרקע ב- *M. phaseolina*, תוספת חרסית-Az בגומת הזריעה ועיטוי זרעים מבוסס טריכודרמה. תיאור הקיצורים כטבלה 2. הנתונים מייצגים ממוצע \pm שגיאת תקן של 7-8 חזרות ביולוגיות. אותיות שונות (a-e) מעל העמודות מציינות הבדלים מובהקים סטטיסטית בין הטיפולים ($p < 0.05$), במבחן ANOVA ואחריו Fisher's LSD או במבחן א-פרמטרי (Kruskal-Wallis ולאחריו Dunn's) לגבי מספר העלים ומדדי המחלה (התייבשות ותסמיני קלחים).



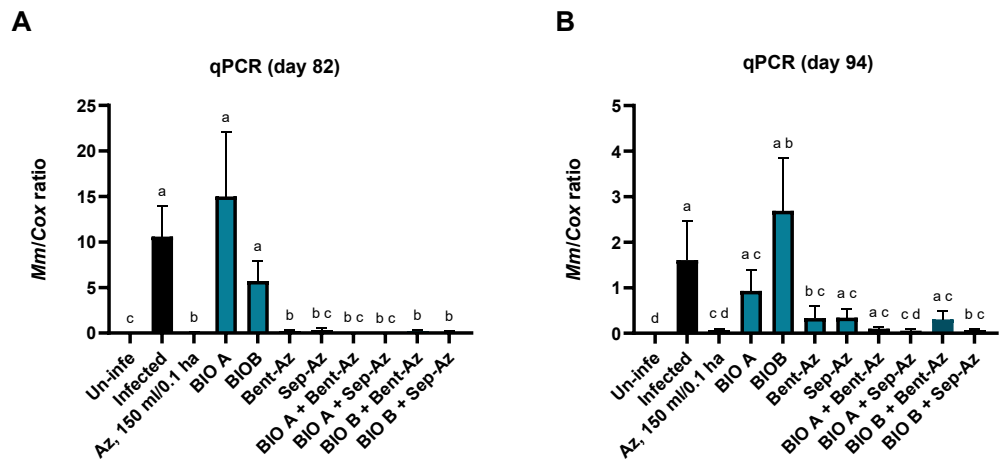
איור 6. מדדים בניסוי החצי-שדה באמצע העונה בזן קולוסוס. הטיפולים כללו אילוח הקרקע ב- *M. phaseolina*, תוספת חרסית-Az בגומת הזריעה ועיטוי זרעים מבוסס טריכודרמה. נבדקו מדדי צימוח וכמות יחסית של DNA של הפתוגן (*Mpk*) ברקמות השורש, מנורמל לגן ציטוכרום c אוקסידאז (*Cox*) של הצמח. תיאור הקיצורים כבטבלה 2. מספר הצמחים מייצג את הצמחים שהתפתחותם הייתה תקינה (לאחר דילול צמחים קטנים מאוד). הנתונים מייצגים ממוצע \pm שגיאת תקן של 7-8 חזרות ביולוגיות, למעט תוצאות ה-qPCR שבהן יש 6-8 חזרות עקב הסרת ערכים חריגים באמצעות שיטת ROUT (Q = 1%) ב GraphPad Prism. אותיות שונות (a-c) מעל העמודות מציינות הבדלים מובהקים סטטיסטית בין הטיפולים ($p < 0.05$), במבחן ANOVA ואחריו Fisher's LSD (לנתוני משקל הצמחים) או במבחן א-פרמטרי (Wallis ולאחריו Dunn's) לגבי שאר התוצאות.



איור 7. מדדים בניסוי החצי-שדה בסוף העונה בזן קולוסוס. הטיפולים כללו אילוח הקרקע ב- *M. phaseolina*, תוספת חרסית-Az בגומת הזריעה ועיטוי זרעים מבוסס טריכודרמה. תיאור הקיצורים כטבלה 2. הנתונים מייצגים ממוצע \pm שגיאת תקן של 6-8 חזרות ביולוגיות. אותיות שונות (a-e) מעל העמודות מציינות הבדלים מובהקים סטטיסטית בין הטיפולים ($p < 0.05$), במבחן ANOVA ואחריו Fisher's LSD לגבי מדדי המשקל, או במבחן א-פרמטרי (Kruskal-Wallis ולאחריו Dunn's) לגבי שאר המדדים.

לאורך העונה רמות ה-DNA של הפתוגן ברקמות עלו ביותר מפי 1000. כמות זו הייתה גבוהה פי 10 בפרלוד בהשוואה לקולוסוס. באמצע העונה (איורים 4, 6) נמצאה יעילות גבוהה (קרוב ל-100% דיכוי

הפתוגן בשורשים) לשילוב BioA + Bent-Az בשני הזנים, ולטיפולים הביולוגים בזן פרלוד. בקציר טיפולי החרסית והמשולבים הפחיתו את כמות הפתוגן ברקמות השורש לרמות אפסיות, אך הטיפולים הביולוגים לבד לא היו יעילים במדד זה (איור 8).



איור 8. נגיעות בפתוגן (qPCR) בניסוי החצי-שדה בסוף העונה בשני הזנים – פרלוד וקולוסוס. הטיפולים כללו אילוח הקרקע ב- *M. phaseolina*, תוספת חרסית-Az בגומת הזריעה ועיטוי זרעים מבוסס טריכודרמה. נבדקו מדדי צימוח וכמות יחסית של DNA של הפתוגן (*Mpk*) ברקמות השורש, מנורמל לגן ציטוכרום c אוקסידאז (Cox) של הצמח. תיאור הקיצורים כטבלה 2. הנתונים מייצגים ממוצע \pm שגיאת תקן של 5-8 חזרות ביולוגיות עקב תמותת צמחים והסרת ערכים חריגים באמצעות שיטת ROUT ($Q = 1\%$) ב- GraphPad Prism. אותיות שונות מעל העמודות (a–d) מציינות הבדלים מובהקים סטטיסטית בין הטיפולים ($p < 0.05$), במבחן Kruskal-Wallis ולאחריו Dunn's.

6. סיכום, מסקנות

המחקר הנוכחי נועד לפתח ולבחון לראשונה ממשק הדברה משולב, ידידותי לסביבה, כנגד מחלת הנבילה המאוחרת בתירס, המבוסס על שילוב של פורמולת חרסית לשחרור איטי של Azoxystrobin בגומת הזריעה יחד עם עיטוי זרעים ביולוגי בתערובות מיני *Trichoderma*. הניסוי בוצע בבית רשת לאורך עונת גידול מלאה והתמקד בשני זני תירס שונים ברגישותם למחלה – פרלוד (מתוק, רגיש יחסית) וקולוסוס (מספוא, סביל יותר). עיקרי הממצאים: התקבלה השפעה חיובית דומה על הצימוח והבריאות בשני זנים, אף שהזן פרלוד הראה רמות נגיעות גבוהות יותר לאורך העונה (פי 10 יותר DNA של הפתוגן בשורש ביחס לקולוסוס. בעוד שבאמצע הגידול (שלב לטנטי של המחלה) מרבית הטיפולים לא נבדלו משמעותית במדדי הצימוח, בסוף העונה בלטו הטיפולים המשולבים חרסית-Az וטריכודרמה. בעיקר בלט השילוב BioB + Sep-Az, שהוביל לשיפור מרבי במדדי הצימוח והיבול (עד 116% במשקל הצמח ו-145% במשקל הקלח בפרלוד), ולדירוג כולל הגבוה ביותר מבין כלל הטיפולים. בנוסף טיפולי החרסית-Az לבד ובשילוב ביולוגי, הביאו לדיכוי כמעט מוחלט של DNA הפתוגן בשורשים בקציר. מנגד, הטיפולים הביולוגיים לבדם לא הצליחו לדכא את רמות הפתוגן באופן עקבי בשלב הסופי, אף שבחלק מהמקרים שיפרו מדדי צימוח.

המחקר מציג יתרון ברור ליישום הממוקד בפס הזריעה. פורמולציות החרסית מאפשרות שימוש מופחת משמעותית בכמות החומר הפעיל (הפחתה של עד 70-85% לעומת הגמעה קונבנציונלית) תוך שמירה ולעיתים אף שיפור ביעילות ההדברה. ליישום החדש פוטנציאל להגברת בטיחות המזון, שמירה על הסביבה ומניעת התפתחות עמידות לתכשיר. הוא יכול לאפשר התמודדות עם מקרי מחלה קשים (נושא שיש לבחון בשדה).

מסקנות יישומיות

פורמולת חרסית-Az בגומת הזריעה מהווה חלופה ישימה, יעילה וכלכלית להדברה כימית בהגמעה. השילוב עם עיטוי זרעים ביולוגי משפר את רמת ההגנה ויכול להעניק יתרון בתנאי מחלה קשים. הממשק המשולב מתאים ליישום במגוון ממשקי גידול, ללא צורך בהתאמות מורכבות של צורת הגידול ומערכת ההשקיה.

כיווני מחקר עתידיים

יש לבחון את הממשק בתנאי שדה מסחריים, בקרקעות שונות ובזני תירס שונים. חשוב לבצע אופטימיזציה של מינוני החרסית ולבחון שילובים שונים של מיני טריכודרמה (גם בשילוב חומר אורגני כמו קומפוסט ומיקרואצות) למיקסום הפוטנציאל. לבסוף יש לבחון את השפעת הממשק על מיקרוביום הקרקע והשורש ולהעריך את עמידות הפתוגן בשימוש לאורך זמן.

7. תודות

אנו מודים לארגון עובדי הפלחה על התמיכה החשובה במחקר, לצוות חוות אבני איתן ולמוריה סנדלר על שאפשרו את ביצוע הניסוי בבית הרשת.

8. רשימת ספרות

1. Degani, O.; Dor, S.; Movshowitz, D.; Fraidman, E.; Rabinovitz, O.; Graph, S. Effective chemical protection against the maize late wilt causal agent, *Harpophora maydis*, in the field. *PloS one* **2018**, *13*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208353>.
2. Degani, O.; Movshowitz, D.; Dor, S.; Meerson, A.; Goldblat, Y.; Rabinovitz, O. Evaluating Azoxystrobin seed coating against maize late wilt disease using a sensitive qPCR-based method. *Plant Dis* **2019**, *103*, 238–248. <https://doi.org/10.1094/pdis-05-18-0759-re>.
3. Degani, O. A review: late wilt of maize—the pathogen, the disease, current status and future perspective. *Journal of Fungi* **2021**, *7*, 989. <https://doi.org/10.3390/jof7110989>.
4. Degani, O.; Dor, S.; Abraham, D.; Cohen, R. Interactions between *Magnaportheiopsis maydis* and *Macrophomina phaseolina*, the causes of wilt diseases in maize and cotton. *Microorganisms* **2020**, *8*, 249. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8020249>.
5. Dor, S.; Degani, O. Uncovering the host range for maize pathogen *Magnaportheiopsis maydis*. *Plants* **2019**, *8*, 259. <https://doi.org/10.3390/plants8080259>.
6. El-Assiuty, E.M.; El-Shafey, H.A.; Ismael, A.-S.; Fahmy, Z.M. Pathogenic variation in *Cephalosporium maydis*. *Phytopathology* **1988**, *88*, S25.
7. Ortiz-Bustos, C.M.; Testi, L.; García-Carneros, A.B.; Molinero-Ruiz, L. Geographic distribution and aggressiveness of *Harpophora maydis* in the Iberian Peninsula, and thermal detection of maize late wilt. *European Journal of Plant Pathology* **2015**, *144*, 383–397. <https://doi.org/10.1007/s10658-015-0775-8>.

8. Shofman, G.; Bahouth, M.; Degani, O. Aggressive strains of the late wilt fungus of corn exist in Israel in mixed populations and can specialize in disrupting growth or plant health. *Fungal Biology* **2022**, *126*, 793–808. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2022.10.003>.
9. Degani, O.; Dor, S.; Movshovitz, D.; Rabinovitz, O. Methods for studying *Magnaportheopsis maydis*, the maize late wilt causal agent. *Agronomy* **2019**, *9*, 181. <https://doi.org/10.3390/agronomy9040181>.
10. Degani, O. Control strategies to cope with late wilt of maize. *Pathogens* **2022**, *11*, 13. <https://doi.org/10.3390/pathogens11010013>.
11. Degani, O.; Weinberg, T.; Graph, S. Chemical control of maize late wilt in the field. *Phytoparasitica* **2014**, *42*, 559–570. <https://doi.org/10.1007/s12600-014-0394-5>.
12. Degani, O.; Dor, S.; Chen, A.; Orlov-Levin, V.; Stolov-Yosef, A.; Regev, D.; Rabinovitz, O. Molecular tracking and remote sensing to evaluate new chemical treatments against the maize late wilt disease causal agent, *Magnaportheopsis maydis*. *Journal of Fungi* **2020**, *6*, 54. <https://doi.org/10.3390/jof6020054>.
13. Degani, O.; Rabinovitz, O.; Becher, P.; Gordani, A.; Chen, A. *Trichoderma longibrachiatum* and *Trichoderma asperellum* confer growth promotion and protection against late wilt disease in the field. *Journal of Fungi* **2021**, *7*, 444. <https://doi.org/10.3390/jof7060444>.
14. Degani, O.; Dor, S. *Trichoderma* biological control to protect sensitive maize hybrids against late wilt disease in the field. *Journal of Fungi* **2021**, *7*, 315. <https://doi.org/10.3390/jof7040315>.
15. Degani, O.; Danielle, R.; Dor, S. The microflora of maize grains as a biological barrier against the late wilt causal agent, *Magnaportheopsis maydis*. *Agronomy* **2021**, *11*, 965. <https://doi.org/10.3390/agronomy11050965>.
16. Degani, O.; Gordani, A. New Antifungal Compound, 6-Pentyl- α -Pyrone, against the Maize Late Wilt Pathogen, *Magnaportheopsis maydis*. *Agronomy* **2022**, *12*, 2339. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102339>.
17. Degani, O.; Khatib, S.; Becher, P.; Gordani, A.; Harris, R. *Trichoderma asperellum* secreted 6-Pentyl- α -Pyrone to control *Magnaportheopsis maydis*, the maize late wilt disease agent. *Biology* **2021**, *10*, 897. <https://doi.org/10.3390/biology10090897>.
18. Gordani, A.; Hijazi, B.; Dimant, E.; Degani, O. Integrated biological and chemical control against the maize late wilt agent *Magnaportheopsis maydis*. *Soil Systems* **2023**, *7*, 1. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7010001>.
19. Degani, O.; Abramovici, A.; Levi-Lion, A.; Demenchuk, D.; Hadad, A.; Dimant, E. Sustained release of Azoxystrobin from clay carriers for the management of maize late wilt disease. *Journal of Fungi* **2026**, *12*, 21. <https://doi.org/10.3390/jof12010021>.
20. A., H.; Dimant, E.; Hadari, P.; Etedgi, E.; Rytwo, G.; Degani, O. New azoxystrobin clay carrier to control corn late wilt disease *World Journal of Microbiology and Biotechnology* **2026**, *In press*.
21. Degani, O.; Hadad, A.; Dimant, E.; Etedgi, E.; Levi-Lion, A.; Hadari, P.; Rabinovitz, O.; Rytwo, G. Clay-based azoxystrobin formulation enhances cotton protection against *Macrophomina* charcoal rot disease. *Journal of Cotton Research* **2026**, *in press*, doi:10.1186/s42397-025-00254-w.