

1 מודל מרחבי-עתי בסקלה אזורית המתאר את הדינמיקה בזמן ובמרחב של כימסון

בתפוח-אדמה

בנג'מין פירסטר¹, דני שטיינברג² וליאור בלנק²

¹ תיכון האנטר, ניו יורק, ארה"ב

² המחלקה לפתולוגיה של צמחים וחקר העשבים, מרכז וולקני, בית דגן

מבוסס על המאמר-

Firester B, Shtienberg D and Blank L (2018). Modeling the spatiotemporal dynamics of *Phytophthora infestans* at a regional scale. *Plant Pathology* 67: 1552-1561

תקציר

מחלת הכימסון, הנגרמת על ידי האומיצט *Phytophthora infestans*, היא אחת מהמחלות החשובות בתפוח-אדמה ובעגבנייה בארץ ובעולם. נכון להיום, אין נתונים כמותיים בספרות על ההתקדמות והדינמיקה של המחלה בסקלה אזורית. בהעדר ידע זה, מגדלים מיישמים פונגצידים בשדות תפוחי אדמה כאמצעי זהירות כנגד כימסון, ללא תלות במידת הסיכון. בפרק זה אנו מציגים מודל מתמטי להתפשטות כימסון בקנה מידה אזורי תוך שימוש בנתונים אמפיריים. המודל שימש ליצירת מפות סיכון המכמתות את הסתברות ההדבקה העתידית באזור. מפות סיכון אלו יכולות לעזור למגדלים לייעל את ההתמודדות עם כימסון ואת השימוש בפונגצידים. בנוסף, המודל יכול לשמש בכדי לעקוב אחרי ההתפשטות של זנים מסוימים של הפתוגן אשר עלולים להיות בעלי רמות שונות של אגרסיביות או בעלי עמידויות לפונגצידים שונים. הגישה המוצגת בפרק זה מאפשרת לעקוב אחר התפשטות מחלות בזמן ובמרחב תוך שימוש בנתונים אמפיריים ומאפשר להתחקות אחר מאפיינים שונים הקשורים להפצת מחלות.

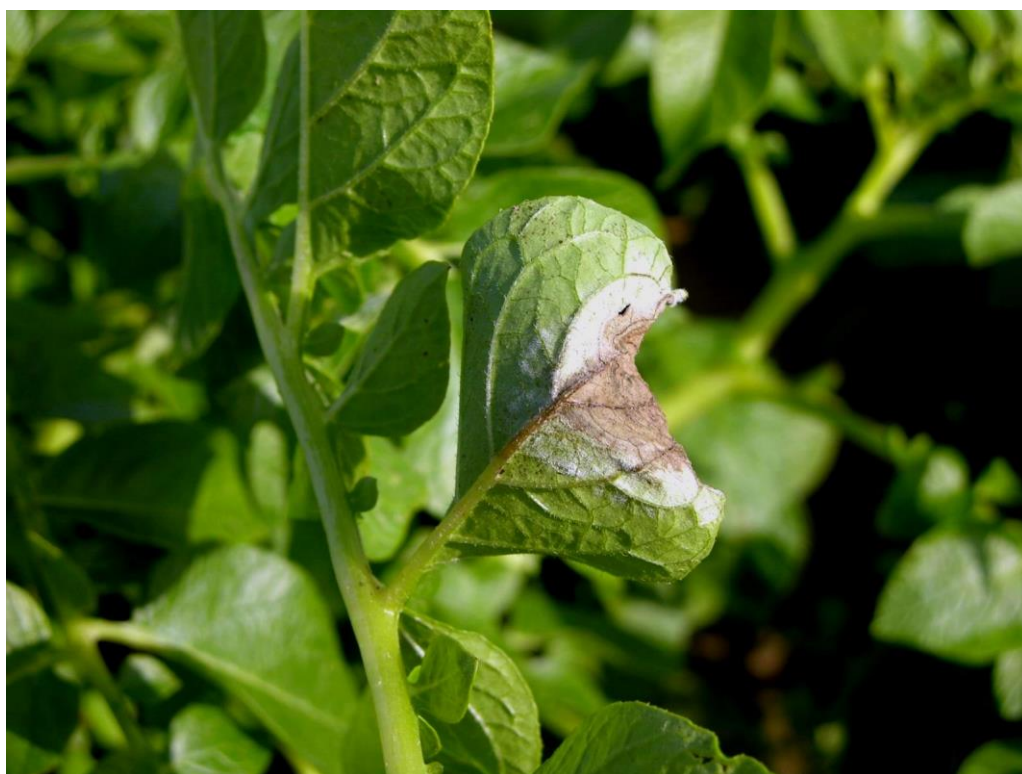
אופן הציטוט: פירסטר ב', שטיינברג ד' ובלנק ל' (2021) מודל מרחבי-עתי בסקלה אזורית המתאר את הדינמיקה בזמן ובמרחב של כימסון בתפוח-אדמה. בספר תובנות חדשות במחלות צמחים, בעריכת אלעד י', דומברובסקי א', מנוליס-ששון ש' ועזרא ד', הוצאת המחלקה לפתולוגיה של צמחים וחקר העשבים.
<https://volcaniarchive.agri.gov.il/skn/tu/e51952>



מבוא

מחלת הכימסון בתפוח-אדמה (איור 1) ובעגבנייה הנגרמת על ידי *Phytophthora infestans* היא מחלת הנוף החשובה ביותר בגידולים אלה בארץ ובעולם (Fry, 2020). אברי הריבוי האל מיניים של הפתוגן, ספורנגיה, נוצרים ברקמות נגועות כששוררים תנאים של לחות גבוהה וטמפרטורות ממוזגות. הספורנגיה

מופצים בהתזה בטיפות מים ודרך האוויר למרחקים. קצב התפתחות המחלה בתנאי סביבה מיטביים עשוי להיות מהיר מאד והמחלה עלולה לגרום להרס מוחלט של היבול (Fry, 2020). הגורמים הסביבתיים המשפיעים על ההפצה של מנבגי הכימסון ידועים, אבל בספרות המקצועית קיים מעט מאד מידע כמותי אודות ההפצה של גורם המחלה במרחב החקלאי (Zwankhuizen et al., 1998). כדי למנוע את התפתחות המחלה והנזק, חלקות תפוח אדמה ועגבנייה מרוססות בתדירות גבוהה, לרוב פעם אחת מידי שבוע ומספר הריסוסים עשוי להגיע ל- 15 ויותר בעונה. הכימסון הוא עדיין מחלה משמעותית הגורמת לנזקים גדולים ליבולים של תפוח-אדמה ועגבנייה מדי שנה ברחבי העולם (Small et al., 2015; Haverkort et al., 2009).



איור 1. כימסון
(*Phytophthora*)
(*infestans*) בעלה
תפוח-אדמה.
תמונה על ידי
יגאל אלעד

אירועי הפצה בקנה מידה אזורי חשובים עבור הבנת הדינמיקה בקנה מידה גדול של פגעים (Brown and Hovmøller, 2002). עבור *P. infestans*, הנבגה מתרחשת כאשר רקמות צמח נגועות נחשפות לתנאי לחות יחסית גבוהה ($RH > 90\%$) במשך כ- 10 שעות בטמפרטורות מתונות (10-20 מ"צ). כאשר הלחות היחסית יורדת, המנבגים משתחררים ממקומם ויכול להתפזר בדרכים שונות למגוון מרחקים (Fry et al., 2013) ובכלל זה הם יכולים להיות מופצים למרחקים גדולים באמצעות הרוח (Skelsey et al., 2009). המנבגים יכולים לשרוד ברוח כל עוד הטמפרטורה וקרינת השמש אינן גבוהות מדי (Fry et al., 2013). מנבגים המופצים ברוח הוא תהליך שקשה לחקור ולכמת. נכון להיום, אין נתונים כמותיים בספרות על הסתברות ההפצה והמרחק המקסימאלי שמנבגי *P. infestans* יכולים להתפשט באמצעות הרוח. הדבר אינו מפתיע בהתחשב בקשיים הברורים בעריכת ניסויים בקנה מידה גדולה עם מחלה זו. תצפיות מפורטות לכימות

הדינמיקה הכללית של התקדמות המחלה לא נערכו, וכפי שידועים לנו, לא בוצעו מחקרים אשר כמתו את ההפצה של מנבגי *P. infestans* בקנה מידה אזורי.

החשיבות של חיזוי ההתפשטות של כימסון מוכר בספרות ככלי חשוב במניעת כימסון ויכול לעזור בצימצום השימוש בפונגציטים (Fry, 2016). כדי לייעל את ההתמודדות עם כימסון פותחו מערכות תומכות החלטה (DSS) (Small et al., 2015; Fry, 2016; Andrade-Piedra et al., 2005). כלים אלה מסייעים לחקלאים להבין את מידת הסיכון, אך כלים אלו מוגבלים היות והם אינם מתייחסים לנוכחות כימסון במרחב. בעבודה זו פיתחנו מודל מרחבי דינמי עבור *P. infestans* בקנה מידה אזורי. המודל פותח תוך שימוש בנתוני ניטור של המחלה באזור מערב הנגב בישראל. המודל אומת באמצעות סט נתונים עצמאי שנאסף באזור בעונות אחרות. המודל שימש ליצירת מפות סיכון המכמתות את הסתברות ההדבקה העתידית באזור. מפות סיכון אלו יכולות לעזור למגדלים לייעל את ההתמודדות עם כימסון ואת השימוש בפונגציטים. בנוסף, המודל יכול לשמש בכדי לעקוב אחרי ההתפשטות של זנים מסוימים של הפתוגן אשר עלולים להיות בעלי רמות שונות של אגרסיביות או בעלי עמידויות לפונגציטים שונים.

אזור המחקר

הנתונים ששימשו במחקר זה לבנות ולאמת את המודל נאספו מחלקות מסחריות באזור צפון-מערב הנגב בישראל. גודלו של האזור הוא כ- 20×35 ק"מ (~ 500 קמ"ר). באזור זה מספר רב של שדות תפוחי אדמה לצד גידולי שדה אחרים. האקלים של האזור הוא צחיח למחצה, והמשקעים השנתיים הממוצעים הם כ- 250 מ"מ. בעונה מבוצע ניטור אינטנסיבי וכל חלקה מנוטרת פעמיים בשבוע לתסמינים של כימסון.

בסיס הנתונים

הנתונים ששימשו לבניית המודל נאספו בין החודשים אוקטובר ומרץ בשנים 2004-5. הנתונים בהם השתמשנו כדי לאמת את המודל נאספו בין החודשים אוקטובר ומרץ בשנים 2007-8, 2014-5 ו 2015-6. המודל מבוסס על הנתונים הבאים: התאריך שבו זוהו לראשונה תסמיני כימסון בכל חלקה, המיקום של השדה, ונתונים מטאורולוגיים (טמפרטורה, לחות יחסית, וכיוון רוח) שנאספו על ידי השירות המטאורולוגי במרווחים של 10 דקות בתחנה הממוקמת בתוך האזור.

בעזרת נתונים אלה, חישבנו שתי פונקציות הסתברות נפרדות כדי להעריך את ההסתברויות של הדבקת שדה לא נגוע על ידי שדות נגועים בכימסון. פונקציית הסתברות אחת מבוססת על המרחקים בין השדות, והשנייה מבוססת על הזווית בין הווקטור משדה נגוע וווקטור הרוח. פונקציות הסתברות אלה שימשו: (א) ליצור מודל מרחבי המזהה את כיוון ההדבקה של הפתוגן, וכן (ii) ליצור מפות סיכון המנבאות את ההסתברות שאזורים לא נגועים במרחב יודבקו על ידי שדות נגועים.

פיתוח המודל

חישוב פונקציית המרחק

השתמשנו בנתוני 2004-5 כדי לחשב את ההסתברות של הפתוגן להתפשט במרחב כפונקציה של המרחק משדות נגועים. בשבוע הראשון של דצמבר 2005 (המכונה להלן "שבוע 1"), המחלה זוהתה לראשונה בשלושה מקומות סמוכים. בשבוע הבא (המכונה להלן "שבוע 2"), המחלה התפשטה ל-10 שדות בכיוונים דומים. בהתבסס על כיוון הרוח, זה היה סביר מאוד כי 10 מיקומים נגועים אלה מקורם באחד משלושה המקומות החולים בשבוע הקודם. יצרנו מעגלים קונצנטריים סביב שלושת השדות הנגועים בשבוע הראשון עם ברדיוס של 1,000 מטרים. ההסתברות של הדבקה במרחק נתון מנקודת המוצא לאחר שבוע הוא פרופורציונלי לחלק היחסי של שדות תפוח-אדמה במרחק שהודבקו בשבוע השני. הסתברויות אלו השתנו ביחס הפוך עם המרחק (איור 2א).

חישוב פונקציית ההסתברות הזווית

אותם נתונים נותחו גם לכימות ההשפעה של הזווית מווקטור הרוח. לשם כך, בנינו אלגוריתם שעובר על נתוני האקלים ומזהה את התנאים המתאימים להנבחה: תנאי לחות של 90% ומעלה למשך 10 שעות בטמפרטורה שגבוהה מ-10 מעלות צלסיוס. כדי שהמנבגים יתייבשו הטמפרטורה צריכה לעלות אך עד סף מסוים של קרינה שעשוי לפגוע במנבגים. תנאי לחות דומים צריך גם כדי להדביק צמחים בשדה היעד. תנאים אלו צרכים להתקיים 5-8 ימים לפני התצפית של תסמיני המחלה. תנאים אלו זוהו על ידי האלגוריתם והגדירו את מסגרת הזמן הרלוונטית להפצה. כיוון הרוח במסגרת הזמן הזו זוהתה כווקטור ההפצה.

לכל אחד מעשרת אירועי ההדבקה בשבוע השני חושב הזווית מווקטור ההפצה שזוהה (איור 2ב). ההסתברות של הדבקה מנקודת המוצא הוא פרופורציונלי לחלק היחסי של השדות בחלק שנתחם על ידי זווית זו. יש לציין שההסתברות היא יחסית ואינה מוחלטת ומשמשת לבחינת סבירות ההדבקה בכל מיקומי השדות. לכל שדה חדש שהודבק, המרחק לכל שדה שכבר היה מודבק בשבוע הקודם חושב ונבחנה ההסתברות בהתאם לשתי פונקציות ההסתברות שתוארו. ההנחה היא שכל שדה הודבק ממקור יחיד, כך שנבחרה ההסתברות המחושבת הגבוהה ביותר מכל ההסתברויות שמקורן בכלל השדות המודבקים. נבחנו 3 יחסים המתארים את התרומה של פונקציית המרחק ופונקציית הכיוון: $1:1$, $1:6$ ו- $1:10$ (איור 3).

בניית מפות הסיכון

מפות הסיכון נוצרו עם נתוני עונת 2014-15. על ידי איחוד מתמטי של כל ההסתברויות עבור כל נקודה במרחב מכל מקורות המדבק האפשריים. לפיכך, מפת הסיכונים מציגה את ההסתברות היחסית של הדבקה עבור כל מיקום במשך שבוע אחד במהלך העונה. ההסתברויות הן יחסיות ותהיינה שונות בכל שבוע, שכן הן תלויות במספר השדות הנגועים. כדי ליצור את מפת הסיכון, לוקחים בחשבון את המרחק (γ) והזווית (Θ). בהינתן וקטור הרוח הנוכחית (ϕ) הנוסחה הבאה מחשבת את ההסתברות של ההדבקה עבור כל נקודה במרחב (x, y):

$$P(x, y) = \frac{\frac{10^{2.996}}{\sqrt[3]{\gamma^4}} + 6 * \frac{10^{-0.524}}{|\theta - \varphi|^{0.472}}}{7}$$

נוסחה זו מייצגת את הממוצע המשוקלל של רגרסיות המרחק והזווית מווקטור הרוח, אשר ינועו בטווח שבין 0 ו-1.

אימות המודל

המודל אומת עם נתונים שנאספו בעונות 2006-7, 2014-15 ו-2015-16. סך הכול נבחנו 10 שבועות. אימות המודל בשיטות מקובלות לא אפשרי בגלל שהיקף המידע מוגבל (מספר קטן יחסית של שדות הודבקו בכל שבוע) ובגלל שהוא מבוסס רק על נתוני נוכחות (Presence only). למרות שהמחלה לא נמצאה בשדות רבים, אין ודאות שהמחלה לא הייתה נוכחת (False negative).

לשם אימות המודל השתמשנו במיקומי השדות המודבקים ו-70 אתרים שנבחרו אקראית באזור. בנינו אלגוריתם הבוחן את כל כיווני הרוח האפשריים מ 0 ועד 360 מעלות באינטרבליים של 2 מעלות, ועבור כל כיוון רוח מכל שדה שכבר היה מודבק, האלגוריתם חישב את ממוצע ההסתברויות של השדות הנגועים והנקודות האקראיות. מכיוון שאין שום דרך לדעת בדיוק היכן לא הייתה מחלה, הנקודות האקראיות מייצגות שדות לא מודבקים. גם אם חלק מהנקודות האקראיות היה בשדה נגוע, עדיין כיוון הרוח הממוצע מייצג שדות לא נגועים. הערכים בכיוון הרוח שהניבו את ההפרש החיובי הגדול ביותר בהסתברות ההדבקה בין כיוון הרוח הממוצע אל השדות הנגועים בפועל והממוצע למיקומים שנבחרו באקראי ייצגו את כיווני הרוח שרחוקים מאקראי ולכן תומכים במודל. כיווני רוח אלו הושוו לכיווני הרוח שנצפו ביום בו התרחשה ההפצה. אם כיוון הרוח החזוי תואם את כיוון הרוח הנצפה, הרי המודל מצליח להבדיל בין שדות נגועים לשדות לא נגועים.

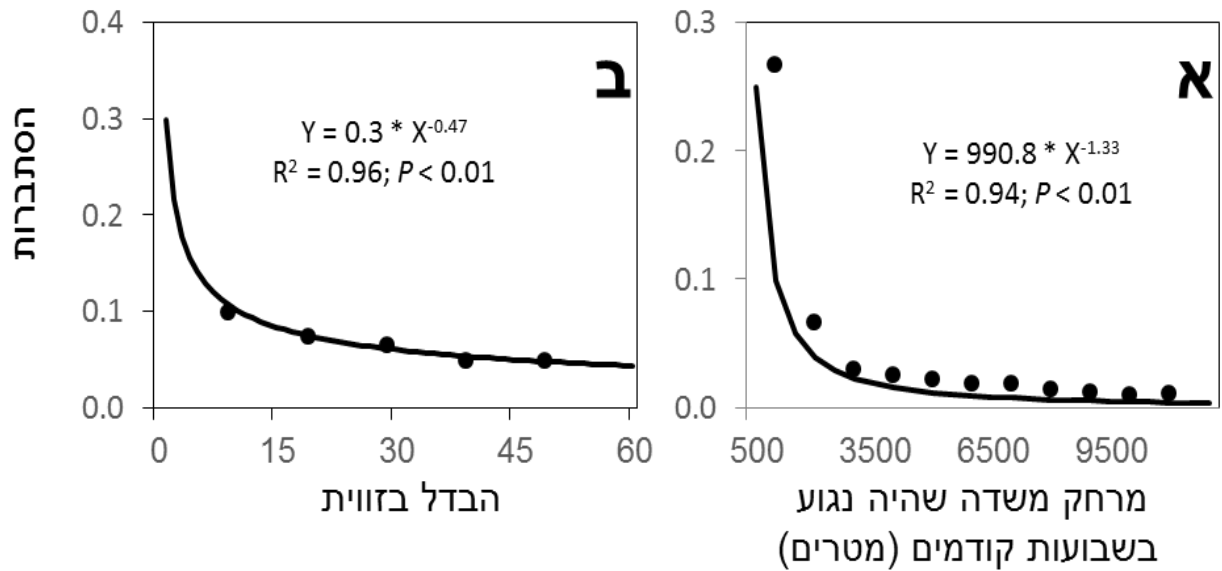
סימולציות של התפשטות גנוטיפים שונים

בכדי להדגים את יתרונות המודל, בנינו שתי סימולציות באמצעות המודל- סימולציה של גנוטיפים שעמיד לחומר הדברה (לדוגמא, מפנוקסם) וגנוטיפ בעל אגרסיביות גדולה. לשם כך בחרנו בצורה אקראית שישה מיקומים של שדות נגועים. בשלושה שדות יש פתוגן (G1) wild type, שניים בעלי עמידות לחומר הדברה (G2) ופתוגן עם אגרסיביות גבוהה.

פיתוח המודל

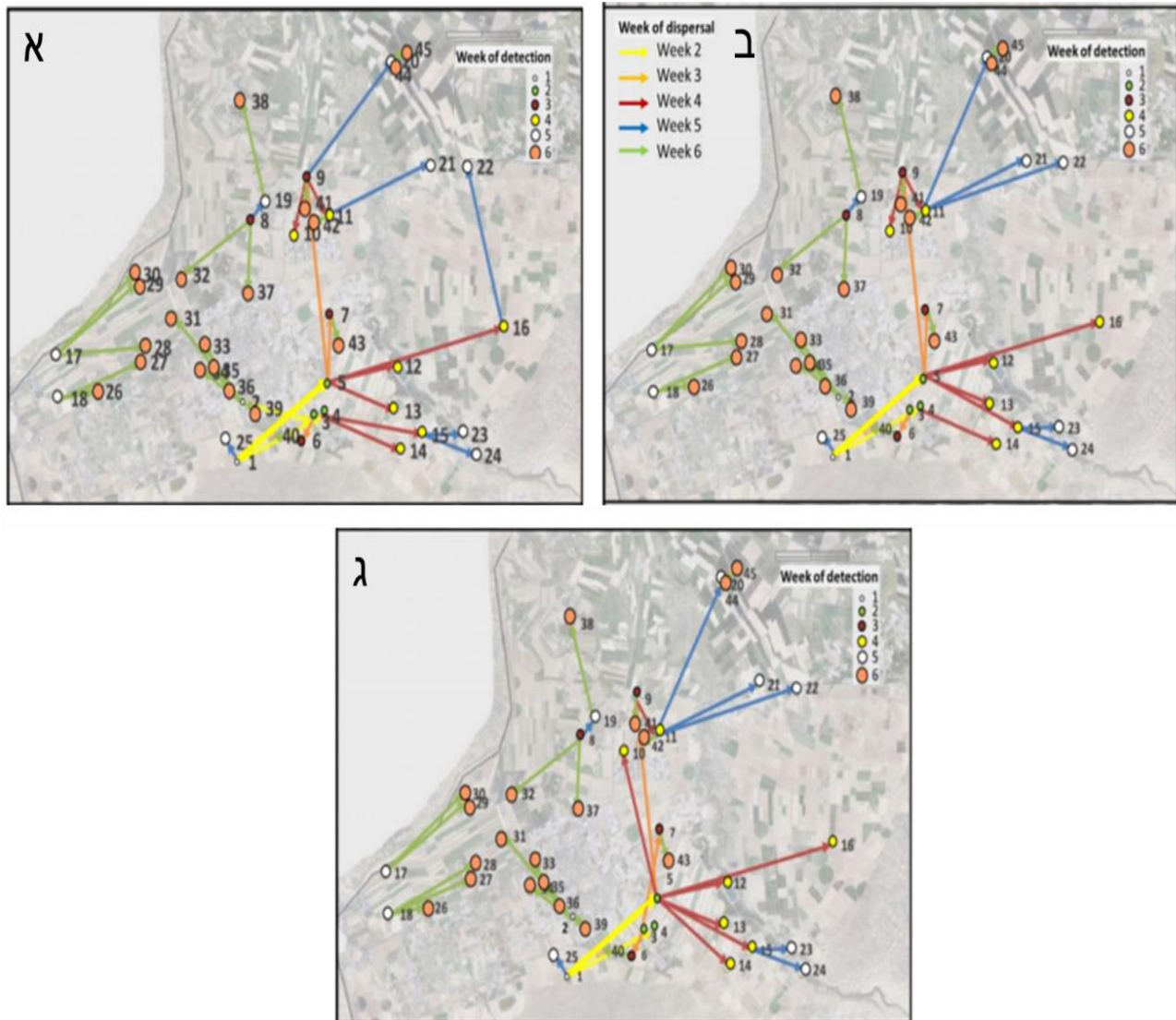
חישוב פונקציות מרחק וזווית מווקטור הרוח

חישבנו את ההסתברויות ההפצה במרחקים שונים (איור 2א) ובזוויות שונות מווקטור הרוח (איור 2ב) באמצעות נתוני ניטור ונתונים מטאורולוגיים מעונות 2005-6. שתי הפונקציות הן היפרבוליות. הערך הקריטי בו פונקציית המרחק מגיע ל-1 הוא 295 מטרים, פחות מהרדיוס של שדה ממוצע.



איור 2. ההסתברות שמחלה בשדה מסוים מקורה בשדה נגוע בשבועות קודמים כפונקציה של: מרחק בין שדות (א) וההבדל בזווית מוקטור הרוח (ב). הנתונים לאנליזה זו מקורם בנתונים מעונת 2004-5.

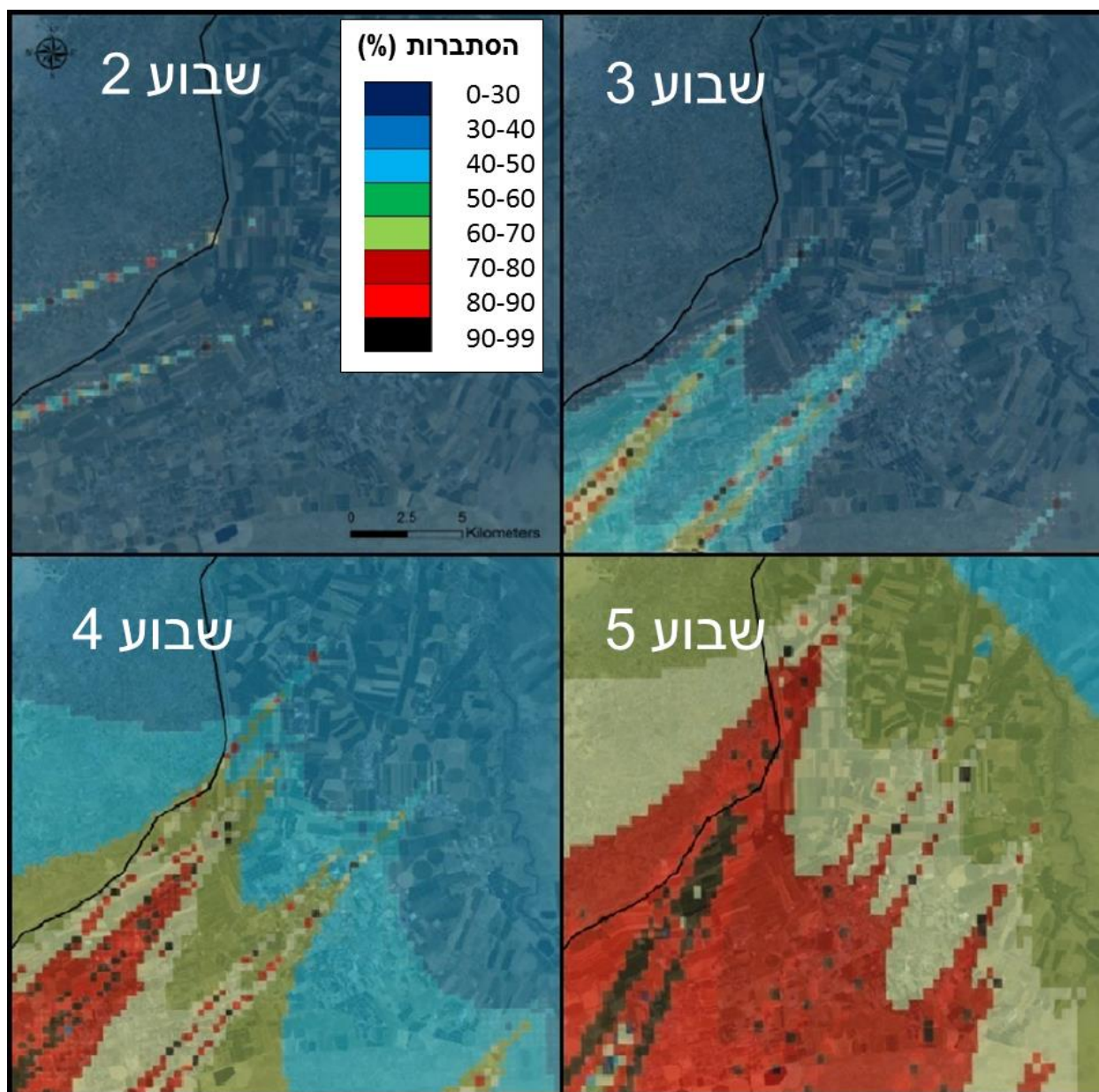
בנינו שלושה מודלים בכדי למצוא את הפרמטרים המתאימים למודל הסופי (איור 3). היחס בין מרכיב הרוח למרכיב המרחק שנראה המתאים ביותר הוא 1:6 היות והחיבורים בין שדות נגועים לשדות מודבקים הוא הסביר ביותר. לדוגמא, שדה 22 קרוב דומה מאוד לשדה 21 בזווית. היות והם הודבקו באותו זמן והם במקומות די דומים, הגיוני היה ששניהם הודבקו על ידי אותו מקור או לפחות ממקורות קרובים. לכן יחס של 1:3 (איור 3א) פחות סביר. באופן דומה, ההדבקה של שדה 7 משדה מקור 3 אינו סביר היות ששדה 5 קרוב יותר וההבדל בזווית הרוח די קטן. לכן יחס 1:10 (איור 3ג) פחות סביר. בעיות אלו אינן מתקיימות ביחס של 1:6 (איור 3ב).



איור 3. אימות של המודל באמצעות נתוני 2004-5. מוצגים שלושה מודלים השונים ביחס התרומה של הרוח והמרחק לתחזית המודל- א. 1:1; ב. 6:1 ו- ג. 10:1. העיגולים והמספרים הסמוכים מייצגים את חלקות תפוחי-האדמה המאולחים. זמן ההדבקה מצוין על ידי צבע חצים וגודל העיגול. החצים מציינים איך המחלה התפשטה משדה לשדה, כאשר כל חץ מצוין את המקור עם ההסתברות הגבוהה ביותר להדביק את שדה היעד עלפי המודל. שדות שאין חץ המוביל אליהם, הם או שדות שהודבקו בשבוע הראשון או שנקבע על ידי המודל שהם הודבקו ממקור חיצוני שאינו חלקה מודבקת קודמת שנוטרה במחקר זה.

מפות סיכון

מפות הסיכון מדגימות כיצד המודל הדינמי במרחב ובזמן ישתמש במידע על שדות נגועים ובנתונים מטאורולוגיים כדי לכמת את הסתברויות היחסיות להדבקה בכלל האזור (איור 4). ביחס לאזור בו נמצאים השדות הנגועים, ההסתברות להדבקה באזורים הדרום מערביים גבוהה יותר. ככל שהעונה מתקדם, שטח האזור, שחזוי להיות בעל הסתברות גבוהה להדבקה, גדל.

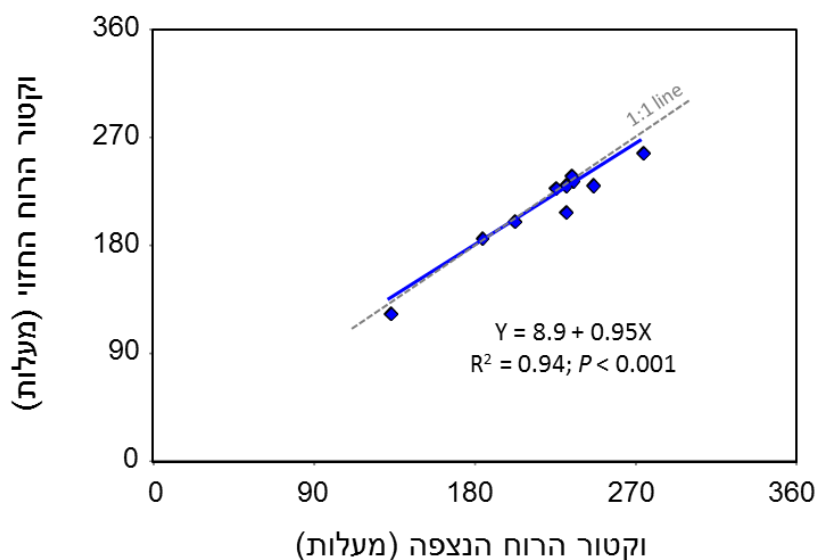


איור 4. מפות סיכון שנוצרו באמצעות מידע שנאסף ב-2014-15. הצבעים השונים מייצגים את הסתברות ההתפשטות של המחלה מהשדות הנגועים במערב הנגב. כל מפה מייצגת את הסתברות ההפצה בכל שבוע. (א) 1 ועד ל-6 בנובמבר 2014. כיוון וקטור רוח המצטבר היה 249° ; (ב) 7 ועד ל-13 בנובמבר 2014. כיוון וקטור רוח המצטבר היה 226° ; (ג) 14 ועד ל-20 בנובמבר 2014. כיוון וקטור רוח המצטבר היה 220° ; (ד) 21 ועד ל-26 בנובמבר 2014. כיוון וקטור רוח המצטבר היה 220° .

אימות המודל

כאשר השוואנו את ערכי כיוון הרוח החזוי לערכי כיוון הרוח הנצפה, ההפרש הממוצע היה 7.7 מעלות (שורש ממוצע הריבועים, RMS, שווה ל-9.66) וההבדל בין הממוצעים עמד על 3.1 מעלות. באיור 5 אפשר לראות את ההשוואה בכיוון הרוח בין חזוי לנצפה ב-10 שבועות שונים ($r=0.94$; $P\text{-value}<0.001$).

איור 5. אימות של המודל האמצעות נתונים מעונות 2006-7, 2014-2015 ו-2015-16 (שלא שימשו לבניית המודל). נקודות מייצגות כיווני רוח חזויים ונצפים. קו הרגרסיה מציין את הקורלציה בין חזוי למצוי והקו האפור מייצג התאמה מושלמת תאורטית בין שני המשתנים.



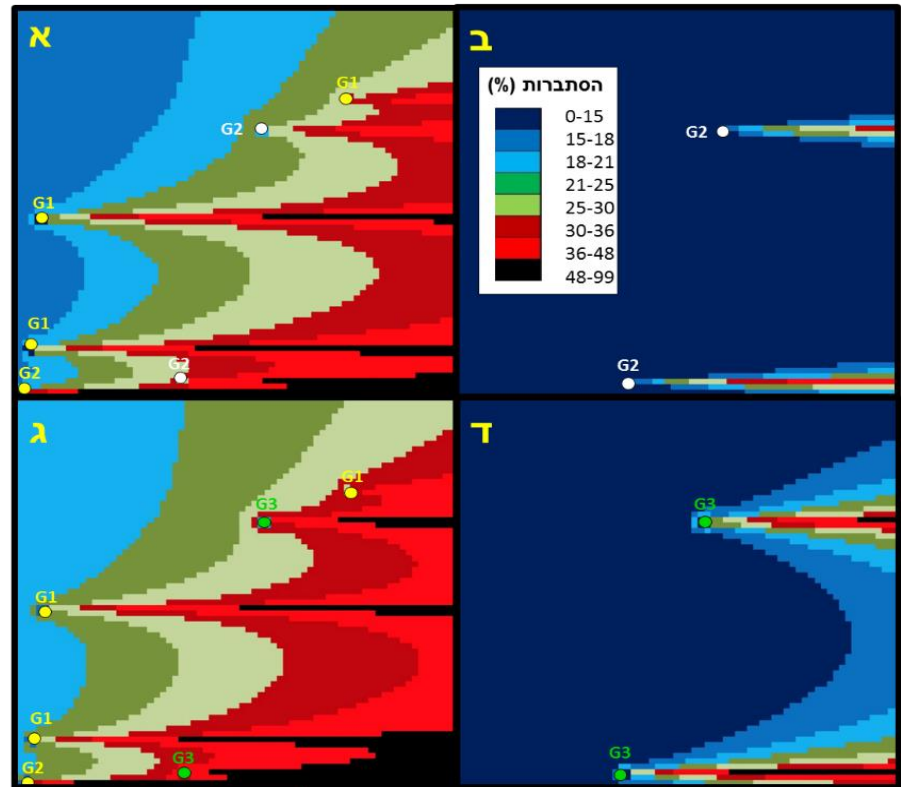
סימולציות של התפשטות גנוטיפים שונים

הסימולציות מראות שהמודל מאפשר לזהות, מיתוך סך כל ההסתברויות שמקורן בכל השדות הנגועים באזור (איור 6א'), את ההסתברות להדבקה על ידי שדות נגועים מסוימים (איור 6ב'). בנוסף, הסימולציות מדגימות את העליה בהסתברות ההדבקה כאשר יש גנוטיפ אגרסיבי יותר, גם בסך כל ההסתברויות באזור (איור 6ג') וגם כאשר משווים רק שדות מסוימים (איור 6ד').

דין

בעבודה זו אנחנו מציעים מתודולוגיה חדשה לזהות את מסלול ההפצה של מחלות בזמן ובמרחב ופיתוח מודל דינאמי עבור *P. infestans*. בקנה מידה אזורי תוך שימוש בנתוני ניטור היסטוריים של המחלה שנאספו באזור צפון-מערב הנגב. בעיה ידוע עם נתוני מחלות רבות היא שבדרך כלל הנתונים מתעדים רק את האתרים בהם המחלה נצפתה (persence-only), אך לא מאשרים את האתרים בהם לא נצפתה המחלה. מחקרים בתחום חיפשו דרכים להתגבר על מגבלות כאלה (Suttrave et al., 2012). טכניקות אימות מודל רבות בדקו את המודלים על ידי השוואת ההצלחות והכישלונות של המודל באמצעות סימולציה לעומת נתוני אמת (Rykiel, 1996), אבל כאשר רק נתוני נוכחות זמינים, לא ניתן להשתמש בטכניקות אלה. במחקר זה, אנו מציעים שיטה של אימות מודל שיכול להשתמש בנתוני נוכחות בלבד ואינו דורש כמויות גדולות של נתונים, אבל עדיין יכול להעריך ביעילות את המודל.

איור 6. שימושים אפשריים של המודל על ידי יצירת סימולציות של מפות סיכון. בסימולציות אלו כיוון הרוח נקבע ל 90 מעלות (רוח מערבית). העיגולים מייצגים שישה שדות מודבקים שמיקומם נקבע באופן אקראי. G1- פתוגן wild type; G2- פתוגן עם רגישות לרודמיל אך אם אגרסיביות זהה ל wild type ו- G3- פתוגן עם אגרסיביות גבוהה.



בשל הזמינות של נתוני נוכחות בלבד, הדרך היחידה לאמת את המודל הייתה תוך בחינת ווקטור הרוח. לעומת כיוון הרוח הנצפה, המודל היה מסוגל לחזות את כיוון הרוח בסטיה של מעלה בחלק מהשבועות. בנוסף, בתוך כל שבוע של התפשטות, המודל לא רק ניבא בדיוק כמה ימים של התפשטות היו בכל שבוע (מבוסס על מזג אוויר מתאים עבור הפתוגן) אלא גם מצא במדויק את כל הימים בהם התקיימו תנאים מתאימים. זה מוכיח שהמודל יכול לייצג את המורכבות של התפשטות על ידי הרוח בהצלחה. למרות שהרוח משנה את כיוונה בכל יום, עדיין המודל הצליח לכמת את ההתפשטות בצורה מדויקת. המתודולוגיה שפותחה בעבודה זו היא ספציפית לכימסון. הקלט הדרוש עבור המידול הוא מינימלי, וכולל את מיקומם של שדות נגועים בעונה והפרופורציה של שדות תפוחי האדמה באזור. לכן, המודל יכול להיות מיושם גם באזורים אחרים תוך שינויים לא רבים.

הערכת הסיכון וחיזוי כימסון יכולים להיות כלי רב עוצמה כדי להילחם בכימסון ולעזור למנוע שימוש עודף בפונגיצידיים. בידוד אזורים הנמצאים בסיכון יכול לעזור למגדלי להגן טוב יותר על החלקות שלהם תוך שימוש בטיפול התואם את מידת הסיכון, אבל ללא ספק היכולת של המודל לאתר אזורים הנמצאים בסיכון נמוך הוא חשוב לפחות באותה מידה. בחלקות בעלות סיכון נמוך המגדלים יכולים לרסס פחות פונגיצידיים וכך לחסוך עלויות ומצמצם סיכונים סביבתיים. ידיעת הערכת סיכונים נכונה יכולה לעזור לחקלאים לנטר טוב יותר על החלקות שלהם ולמקד את המשאבים שלהם בתחומי הסיכון הרלבנטיים ביותר.

יתרון נוסף של שימוש במודל שלנו הוא היכולת לעקוב אחרי ההתפשטות של גנוטיפים שונים של הפתוגן. זה יעזור מגדלים לרסס את הפונגיצידיים המתאימים. לדוגמה, ל- mefenoxam / metalaxyl יעילות גבוהה מאוד כנגד זנים רגישים של המחלה, אבל הם גם מאוד יקרים. קוטלי פטריות פרוטקטנטיים (כגון mancozeb

או chlorothalonil) הם פחות יעילים אבל זולים יחסית. שימוש בקוטלי פטריות פרוטקטנטיים בזמנים עם סיכון נמוך של התפשטות הפתוגן יש השלכות כלכליות; החלת קוטלי פטריות פרוטקטנטיים באזורים בהם נמצא הפתוגן העמיד עלולה לגרום להפסדים משמעותיים. עם זאת, מגדלים לא תמיד יודעים את הסבירות של התפשטות הפתוגן ואת התגובה של אוכלוסיות הפתוגן לפונגיצידיים שונים. יתכן כי תבדידים עמידים בחלקה יכולים לסכן שדות סמוכים. כמו כן ייתכן ששדות אחרים (אפילו באזורים אחרים) יהיו בסכנה. הבנת ההיבטים במרחב ובזמן של התפשטות זיהום תשפר בחירת חומר ההדברה ותקטין את הסיכונים של מגיפות לא מבוקרות.

מובאות

- Andrade-Piedra J. L., Hijmans R. J., Juárez H. S., Forbes G. A., Shtienberg D. and Fry W. E. (2005) Simulation of potato late blight in the Andes. II: Validation of the LATEBLIGHT model. *Phytopathology* 95: 1200–1208.
- Brown J. K. and Hovmøller M. S. (2002) Aerial dispersal of pathogens on the global and continental scales and its impact on plant disease. *Science* 297: 537–541.
- Fry W. E. (2016) *Phytophthora infestans*: New tools (and old ones) lead to new understanding and precision management. *Annual Review of Phytopathology* 54: 529–547.
- Fry W. E. (2020) *Phytophthora infestans*: The itinerant invader; “late blight”: The persistent disease. *Phytoparasitica*. 48: 87-94.
- Fry W. E., McGrath M. T., Seaman A., Zitter T. A., McLeod A., Danies G., et al., (2013) The 2009 late blight pandemic in the eastern United States—causes and results. *Plant Disease* 97: 296–306.
- Haverkort A. J., Struik P. C., Visser R. G. F. and Jacobsen E. (2009) Applied biotechnology to combat late blight in potato caused by *Phytophthora infestans*. *Potato Research* 52: 249–264.
- Skelsey P., Kessel G. J. T., Holtslag A. A. M., Moene A. F. and Van der Werf W. (2009) Regional spore dispersal as a factor in disease risk warnings for potato late blight: a proof of concept. *Agriculture and Forest Meteorology* 149: 419–430.
- Small I. M., Joseph L. and Fry W. E. (2015) Development and implementation of the BlightPro decision support system for potato and tomato late blight management. *Computers and Electronics in Agriculture* 115: 57–65.
- Zwankhuizen M. J., Govers F. and Zadoks J. C. (1998) Development of potato late blight epidemics: Disease foci, disease gradients, and infection sources. *Phytopathology* 88: 754–763.