

דו"ח מדעי מסכם – חיזוי מרחבי-עיתי של הלקטית ורודה באמצעות מודל מבוסס נתוני לוויין

דוד הלמן ומיכל אקסלרוד

תקציר

בשנה השנייה למחקר המשכנו לקדם את פיתוח מודל אוכלוסיות ההלקטית הוורודה בעזרת שתי תוספות חשובות: (1) מידול הטלת ביצים כפונקציה משולבת של גיל הנקבה ותנאי טמפרטורה (מנתוני הלוויין), ו-(2) מידול תמותת כל ארבעת השלבים (ביצה, זחל, גולם ובוגר) כפונקציה של הטמפרטורה. מידול ההטלה והתמותה נעשו על-סמך תוצאות ניסוי מעבדה שפורסמו בספרות המדעית. לאחר הכנסת שתי התוספות למודל, השתמשנו במודל על מנת לחזות את אחוז ההלקטים הנגועים בביצים ובזחלים עבור שדה הכותנה בגן שמואל בעונת 2011. המודל שעובד במבנה דו-ממדי (מודל דו-ממדי ראשון מסוג המשלב נתוני לוויינים ופתרון נומרי), חזה בדיוק רב את התפתחות הביצים והזחלים בגן שמואל, וזאת, ללא כיוול ראשוני. כלומר, שנתוני הספרות נמצאו מתאימים אף לתנאים בארץ, והמודל אינו מצריך כיוול או ידע מקדים על התפתחות המזיק. אף על פי כן, תיזמון התפתחות אברים רפרודוקטיביים, ובעיקר שלבי הפריחה והתפתחות ההלקטים, הכרחי כתנאי שפה לאתחול המודל. בדיקה ראשונית מראה ששימוש במדד הצומח NDVI מלוויינים יכול לחזות את שלב הפריחה בכותנה, ולכן לשמש כסמן לאתחול המודל. בשנה הקרובה נתמקד במאמץ זה, מלבד הוספת מרכיב התנועה במרחב.

מילות מפתח

הלקטית ורודה, חישה מרחוק, ימי מעלה, כותנה, מודל אוכלוסיות, מודל חישובי (נומרי)

מבוא

חיזוי אוכלוסיית הלקטית ורודה (*Pectinophora gossypiella*) בזמן ובמרחב כיום קטנה ומבוססת בעיקר על התראה מבוססת תצפיות וידע נרכש קודם. ידע מקדים ממודלים ביו-פיזיקליים מבוססי-תהליכים על תזמון התפתחות זחל ההלקטית, למשל, יכול לאפשר פעולות מנע חשובות להפחתת הנזק ליבול ואיכות הכותנה הנגרמות מהזחל. במחקר הנוכחי, אנו מפתחים כלי אשר יניב חיזוי מרחבי-עיתי – בזמן אמת – של אזורים בהם תיתכן נגיעות גבוהה של הלקטית ורודה בשדה כותנה (או כל שדה אחר בעולם). מטרתינו הן להגביר את יכולת החיזוי, לחסוך במשאבי אנוש, ובסופו של דבר לשפר את יכולת ההתמודדות עם המזיק, בין אם בחיזוי הזמן והמרחב הנכונים להדברה ובין אם בחיזוי הזמן והמיקום הטובים ביותר לזריעה וקטיפה. בשנה השנייה למחקר, התמקדנו בשתי תוספות חשובות במודל: (1) הטלת ביצים, ו-(2) תמותה. לאחר מידול שתי התוספות הנ"ל, הרצנו את המודל עם נתוני אמת שנאספו ע"י מיכל אקסלרוד בגן שמואל בעונת 2011. לקמן נציג את אופן מידול התהליכים, תוצאות הרצת המודל עם נתוני האמת, ותכנית התקדמות לשנה הקרובה.

שיטות

מידול הטלת ביצים

בכדי למדל את ההטלה של הנקבות, התבססנו על מחקר חדש שנעשה במעבדה בהודו ואומת בהמשך עם נתונים שנאספו בשדה (Paddu *et al*, 2020). רב המודלים של הטלת ביצים בדרך-כלל מבוססים על פונקציה של הטמפרטורה בלבד (Blum *et al*, 2018; 2015, לדוגמה), בעוד שיכולת הטלת הביצים של הנקבה הולכת וקטנה עם הגיל. לכן, בכדי לקחת בחשבון את גורם הגיל קודם כל מידלנו את ההטלה כפונקציה של הטמפרטורה על-סמך הנתונים מ-Paddu וחוברו (Fig. 1A). אח"כ מידלנו את יכולת ההטלה של הנקבה כפונקציה של מדד מנורמל של הגיל העכשווי של הנקבה (נמדד כמספר ימים מיום הבקיעה מהגולם) לעומת הגיל החציוני של חיי הנקבה (החציון של מספר הימים מיום הבקיעה ועד תמותה טבעית) (Fig. 1B). בכדי לעשות שימוש בפונקציה זו במודל שלנו, המרנו את קצב ההטלה המצטבר בנגזרת שלו (קו כתום ב-Fig. 1B), בכדי לקבל את פוטנציאל ההטלה ביום נתון. כך שהתהליך במודל הוא הדרגתי וכולל את שני השלבים הבאים: (א) קודם כל מחושבת כמות ההטלה הפוטנציאלית כפונקציה של הטמפרטורה ואז, (ב) כמות זו מותאמת ע"י פונקציית הגיל של הנקבה בכל קבוצת גיל (כלומר, הכמות מופחתת עבור בוגרות שגילן צעיר או מבוגר מהשיא לפי קבוצת הגיל – cohort – אליהן הן משתייכות).

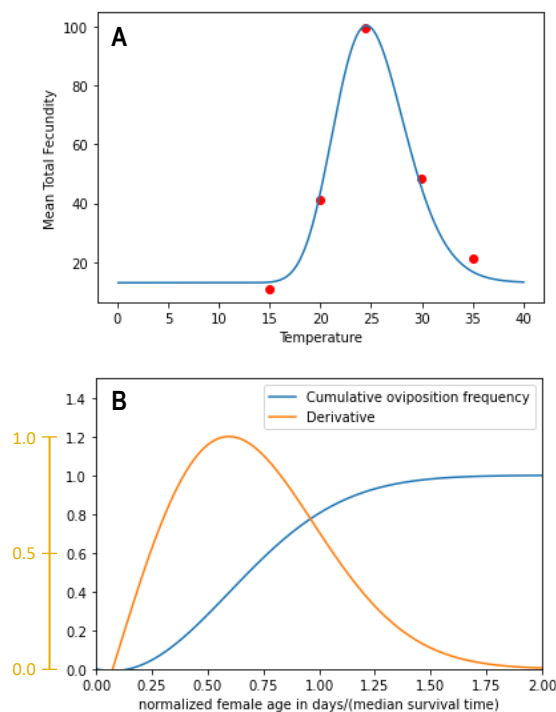


Fig. 1. (A) Fecundity as a function of temperature from lab observations (red dots; data taken from Peddu *et al.* 2020). (B) Cumulative and instantaneous oviposition frequency as a function of the female age (Peddu *et al.* 2020). Both functions were combined to derive the daily rate of oviposition for females per each life cohort.

בשלב הבא, מידלנו את התמותה של המזיק על ארבעת שלבי חייו בעזרת נתוני המעבדה שפורסמו ב-Paddu *et al.* (2020). עבור כל סט נתונים, התאמנו פונקציה מטיפוס גאוס (הפוכה) המתארת את אחוז התמותה כפונקציה של הטמפרטורה (Fig. 2). לאחר חילוץ הפרמטרים של פונקציות התמותה, הוספנו את רכיב התמותה במודל, כך שבסוף כל יום, הופחתה הכמות היחסית של הפריטים במאזן, עבור כל שלב חיים בנפרד. כפי שניתן לראות ב-Fig. 3, מרכיב התמותה מקטין באופן ריאלי יותר את האוכלוסיות השונות עם הזמן.

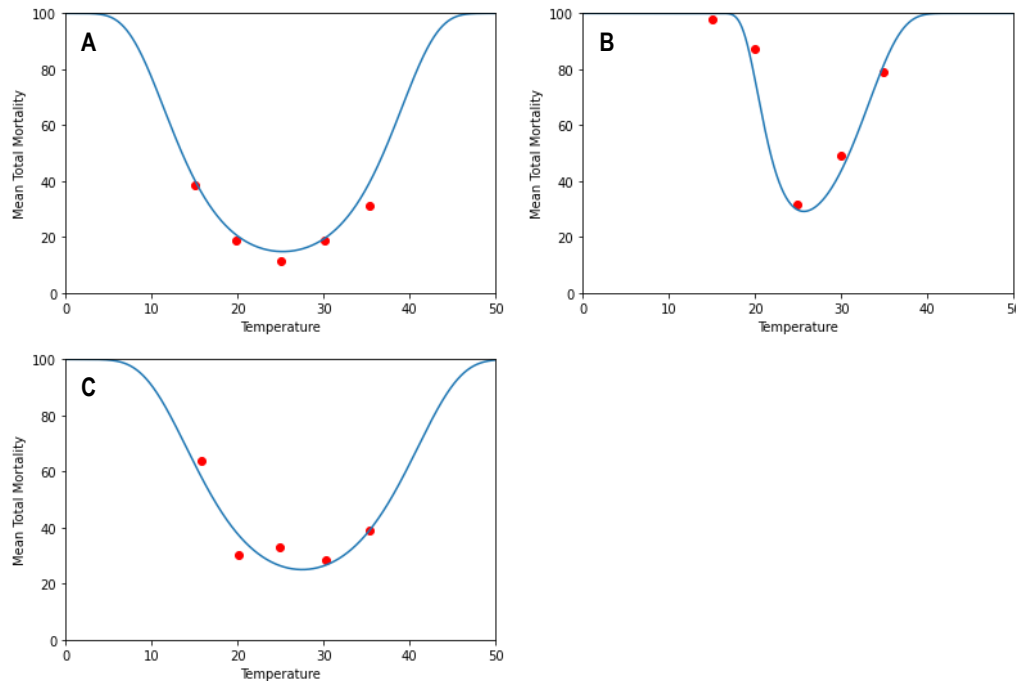


Fig. 2. Gaussian-type functions fitted to mortality rate as a function of temperature for observations derived in the lab (red dots, observations from Peddu *et al.* 2020) for (A) eggs, (B) larvae, and (C) pupae. The same function is in (A) was used for the adult population with a 99.5% reduction.

שימוש במודל בחלקת גן שמואל והשוואה עם תצפיות

לאחר הכנסת שני הרכיבים (הטלה ותמותה), ביצענו הרצה של המודל עם נתוני הטמפרטורה מהלוויין, עליו חיישן ה-MODIS, בשדה גן שמואל בעונת 2011. הפעם לא אתחלנו את המודל עם כמות ביצים מהתצפיות, כפי שעשינו בשנה הקודמת, אלא עם נתוני כמות בוגרים בלבד. המטרה היתה לנסות ולשחזר את התפתחות הביצים והזחלים. את הכמות ההתחלתית וההתפתחות של הבוגרים הזנו למודל על-סמך פונקציה מעריכית של

טמפרטורה כפי שמצאה מיכל אקסלרוד בתזה שלה (אקסלרוד 2014). הפעלת הפונקציה המעריכית נעשתה מהתאריך 1.1.2011. ניתן לראות ב-Fig. 3A, שתחילת הופעת הבוגרים מהמחזור הקודם היא בסביבות סוף אפריל 2011 בעוד שהשיא נצפה בתחילת יוני. תחילת ההטלה האפקטיבית היא באמצע יוני, עם ההופעה הראשונית של אברים רפרודוקטיביים. ניתן לראות ששיא הופעת הזחל על-סמך המודל נמצא לקראת אמצע חודש יולי, אלא שאז עדין אין הופעה של פריחה משמעותית, כך שהשרידות של הזחל נמוכה ביותר.

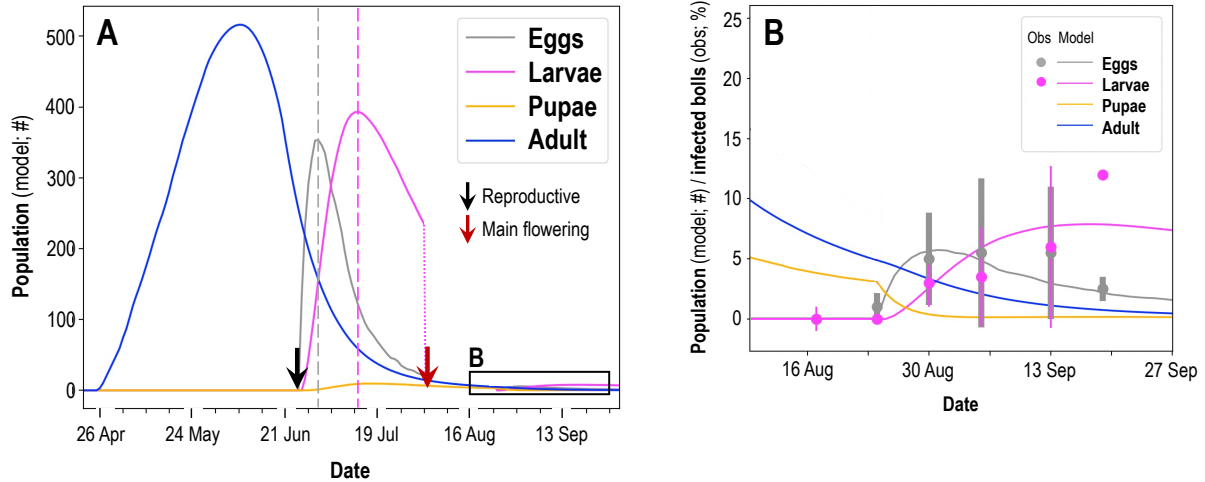


Fig. 3. (A) Model run showing the egg, larva, pupa, and adult population for temperature conditions in Gan Shmuel field in 2011. The start of reproductive (black arrow) and main flowering (red) stages are shown. The initial adult population was derived from an exponential function of temperature from Axelrod 2014. The peaks of egg and larva populations are shown with vertical dashed lines. Notice that the model was reset at the flowering stage to simulate population in produced bolls. (B) An enlarged view of the rectangle area in (A) shows the model's performance and comparison with observations. Notice that the model simulates population (#) while observations are the relative number of infected bolls in percentages (%).

לקראת תחילת אוגוסט מתחילה הפריחה המשמעותית (חץ אדום ב-Fig. 3A), והלקטים גדולים ראשוניים נצפים לקראת סוף אוגוסט (Fig. 4A). לקראת סוף אוגוסט ניתן כבר לראות הלקטים הנגועים בביצים ובזחלים, כאשר המודל (שלא כויל מראש, יש לציין) מזהה התפתחות זו בדיוק גבוה (Fig. 3B). הרעש בתצפיות אמנם גדול (סטיות תקן משמעותיות בתצפיות באיור Fig. 3B), אך ניתן לראות דיי בבירור ששיא התפתחות הביצים מקדים בכשבוע-שבועיים את שיא ההתפתחות בזחל, במודל ובתצפיות כאחד.

אתחול המודל עם הטלה אפקטיבית בתזמון הנכון (הופעת פריחה משמעותית ויצירת הלקטים), היתה קריטית למידול נכון של התפתחות המזיק. יש לציין שזהו הכיול היחיד שנעשה למודל, שעדיין מצריך התערבות "ידנית" לצורך תזמון ההטלה האפקטיבית. אמנם, זיהינו שמדד ה-NDVI המתקבל מלוויינים ומשמש למעקב אחר התפתחות מופע צומח (Helman *et al.* 2015; Helman 2018), יכול לשמש כסמן לזמן התחלת הפריחה והתפתחות הלקטים בדיוק רב (Fig. 4A). מצאנו שלאחר החלקת הסדרה העתית של ה-NDVI, ניתן להשתמש בנגזרת השנייה של הסדרה בכדי לזהות את השלב הרפרודוקטיבי הראשוני (חץ שחור ב-Fig. 4B) וכן את שלב הפריחה (חץ אדום ב-Fig. 4B) כשיאים השליליים בנגזרת השנייה. יתירה מזאת, ניתן אף לזהות את שלב התפתחות הלקטים כשלב חציית קו ה-0 בנגזרת, לאחר שלב הפריחה (חץ צהוב ב-Fig. 4B).

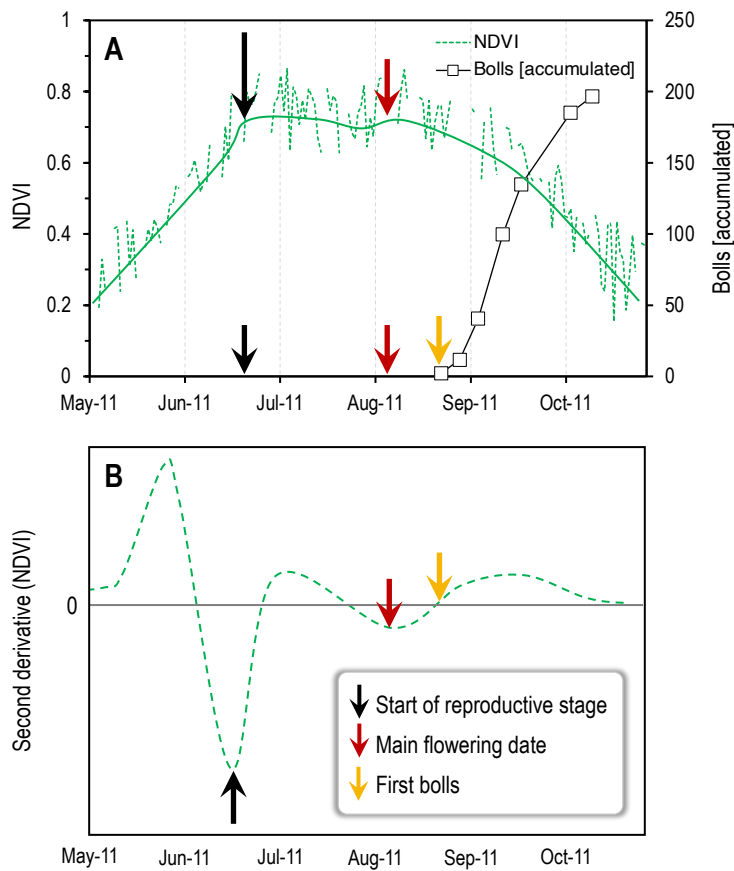
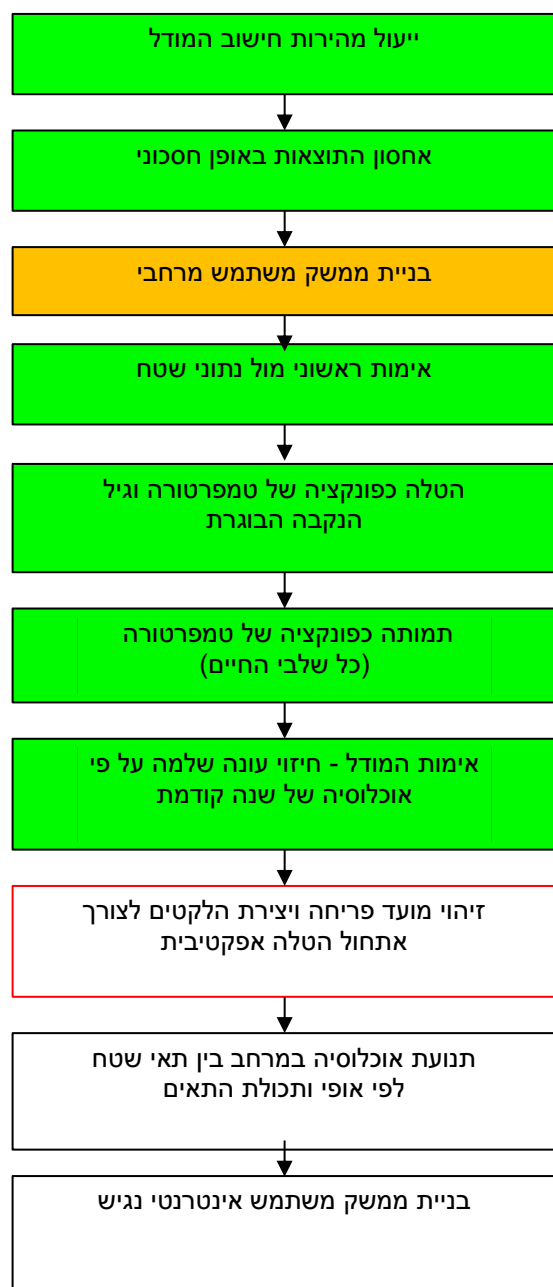


Fig. 4. (A) Time series of NDVI derived from MODIS (daily data) and the number of accumulated bolls in Gan Shmuel field in 2011. The dashed green line in (A) is the NDVI calculated from the original data, and the solid green line is the smoothed time series from a moving average over the original data. (B) The second derivative of the smoothed time series shows negative peaks corresponding to the start of the reproductive (black arrow) and main flowering (red arrow) stages. The date of the appearance of the first bolls is indicated with a yellow arrow and corresponds to the intersection of the second derivative with zero following the flowering stage.

תכנית לעתיד



בהתבסס על התכנית שהצגנו בשנה שעברה, אנו מתכוונים להמשיך את בניית ופיתוח המודל כפי המתואר ב**תרשים א**. השלבים שכבר השגנו עבורם תוצאות משביעות רצון מצוינים בצבע ירוק. בצבע צהוב, סומן שלב הממשק המרחבי, שעבורו עדיין נותרה עבודה שחלקה תעשה בשנה הקרובה, כתלות בהשגת היעדים המקדימים של פיתוח המודל. בלבן, סומנו השלבים שטרם בצענו ומתוכננים לשנה הקרובה. האתגר השנה יהיה בעיקר שילוב נתוני ה-NDVI במודל, לצורך תזמון אתחול המודל בזמן ובמרחב (סומן במסגרת אדומה - שלב שלא נכלל בתכנית המקורית, ומצאנו שהנו קריטי להרצת המודל ואתחולו). בנוסף, עדיין נותר לנו לשלב תנועה מרחבית במודל, שלב מאתגר בפני עצמו המצריך אינטראקציה בין התאים השונים (דבר שלא התחשבנו בו עד כה, אף-על-פי שהמודל כבר רץ באופן דו-ממדי).

תרשים א. הצגה היררכית של שלבי העבודה הנדרשים להשלמת הפרויקט (המודל). בירוק – שלבים ראשוניים שכבר בוצעו בשנתיים האחרונות. בצהוב – שלבים שבוצעו באופן חלקי. בלבן – שלבים משלימים המתוכננים לביצוע בשנה האחרונה. במסגרת אדומה, שלב חדש שנכלל לשנה הקרובה בעקבות הרצת המודל על נתוני שטח בגן שמואל, שלב שלא נלקח בחשבון בשנה הקודמת. תיתכן חזרה על השלבים ירוק וצהוב עם הכנסת אלמנטים נוספים במודל לצורך שיפור וייעול.

- אקסלרוד מ. (2014). הקטנת הנגיעות והנזק של הלקטית ורודה (*Pectinophora gossypiella*) בכותנה באמצעים אגרוטכניים. עבודת גמר לשם קבלת תואר מוסמך. הפקולטה לחקלאות.
- Blum M, Nestel D, Cohen Y, Goldshtein E, Helman D and Lensky IM** (2018). "Predicting Heliothis (*Helicoverpa armigera*) pest population dynamics with an age-structured insect population model driven by satellite data". *Ecological Modelling*, 369, 1–12.
- Blum M, Lensky I, Rempoulakis Polychronis, Nestel D** (2015). "Modeling insect population fluctuations with satellite land surface temperature". *Ecological Modelling*, 311, 39–47.
- Helman D, Lensky I, Tessler N, Osem Y** (2015). "A phenology-based method for monitoring woody and herbaceous vegetation in Mediterranean forests from NDVI time series". *Remote Sensing*, 7 (9), 12314–12335.
- Helman D** (2018). "Land surface phenology: what do we really see from space?" *Science of the Total Environment*, 618, 665–673.
- Peddu, Hemant, et al** (2020). "Estimation and validation of developmental thresholds and thermal requirements for cotton pink bollworm *Pectinophora gossypiella*." *Crop Protection* 127: 104984.

תרשים המציג את עיקרי מבנה המודל וחלקי התוכנה (modules). בכחול – החלקים (modules) שכבר נכתבו. בכתום – השלבים שטרם נכתבו בתוכנה. האיור אינו מציג את שלבי הכיול והאימות שהם בנוסף לבניית המודל על חלקיו.

