

חיזוי מרחבי-עיתי של הלקטית ורודה באמצעות מודל מבוסס נתוני לוויין

חיים אלבז, דוד הלמן ומיכל אקסלרוד

תקציר

יכולת חיזוי אוכלוסיית ההלקטית הוורודה כיום קטנה ומבוססת בעיקר על התראה מבוססת תצפיות. התמודדות עם מזיק זה, הפוגע באופן משמעותי בכותנה בישראל כמו גם ביבולים נוספים ברחבי העולם, כוללת בעיקר אמצעים אגרוטכניים, אך גם הדברה כימית, והצלחת כלל אלו תלויה במידה רבה בתזמונם. במחקר זה אנו מפתחים כלי חשובי ייעודי, מבוסס חישה מרחוק, אשר יחזה בזמן ובמרחב את אוכלוסיית ההלקטית הוורודה ויסייע בקבלת החלטות מסוג זה. השתמשנו במודל על מנת לחזות את אחוז ההלקטים הנגועים בזחלים עבור שדה הכותנה בגן שמואל באוגוסט 2011. למרות שחיזוי ראשוני זה התבצע באופן חד-ממדי (על נקודה מסוימת במרחב), המודל עובד במבנה דו-ממדי, דבר המאפשר לחזות את התפתחות המזיק בכל מקום במרחב ובזמן.

מילות מפתח

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

מבוא

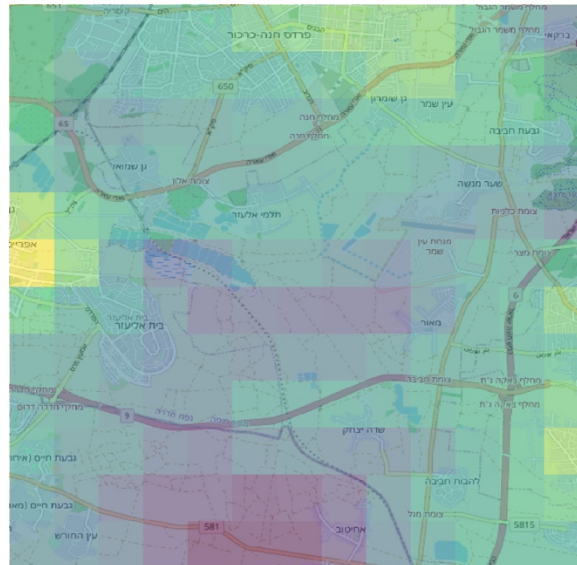
חיזוי אוכלוסיית הלקטית ורודה (*Pectinophora gossypiella*) בזמן ובמרחב כיום קטנה ומבוססת בעיקר על התראה מבוססת תצפיות וידע נרכש קודם. זחל ההלקטית גורם בארץ לפגיעה משמעותית ביבול הכותנה ולהשלכות משמעותיות על הענף כולו. דרכי ההתמודדות עם מזיק-כותנה עיקרי זה כוללים שימוש בחוטי פרומון להפרעה זיווגית, סניטציה ברמת השדה, והדברה כימית. למרות הצלחת שיטות אגרוטכניות, עדיין נדרש שימוש בהדברה כימית, ומחקרים קודמים (Brown et al. 1992) מציינים ששינוי בעיתוי הזריעה והקטיף יכולים להפחית את רמת הנגיעות. 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). מטרתנו 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 וקטיף.

שיטות

ייעול המודל הקיים

המודל הקיים בשפת Python לדינמיקה של אוכלוסיית מזיקים בחישה מרחוק מבוססת טמפרטורה (Blum et al., 2018) בעל האינטגרציה הנומרית היה אמנם מדויק, אך החישוב היה יחסית איטי לשימושינו, בעיה שהלכה וגברה

כשכמות החישובים הלכה ועלתה בהעתקת המודל מצורתו החד-ממדית (נקודתית) לצורתו המרחבית (אוסף של תאי-שטח בעלי ממד נתון במרחב), במיוחד כשמדובר על גבי תקופות זמן ממושכות ומספר שלבי חיים של המזיק. מטרתנו, בשלב זה, היא שהמודל יהיה מסוגל לספק תוצאות יומיות, ושתוצאות חישוב המודל יתקבלו בזמן המתאים לתכנון ופעולה בעקבותיהן (כלומר, תוצאות מתעדכנות באופן יומי, בזמן אמת). לכן, בשלב ראשון האינטגרציה הנומרית – שהיא בבסיס המודל – הופרדה משאר חלקי המודל לצורך יעולה. לצורך כך, האינטגרציה נכתבה מחדש בשפת תכנות Fortran, שפה המיועדת לחישובים מהירים מסוג זה ויעילה פי 100 משפת המקור (Python). אמנם, בשביל לקשר בין השפות נעשה שימוש בכלי F2PY, המאפשר שימוש משולב של פונקציות Fortran מתוך Python לצורך הגברת מהירות החישוב (Peterson et al., 2009). להמחשה, תרגום זה גרם לכך ששלב חיים אחד יחושב בכמה מאיות השנייה, לעומת 8 שניות בגרסה הקודמת. כשהמודל עבד בצורה מהירה משמעותית, הוא הורחב למצב בו הוא מחשב באופן יומי, בעזרת טמפרטורות פני-השטח הרלוונטיות עבור כל תאריך ועבור כל תאי השטח שנאספו על ידי לווייני חיישן ה-MODIS, את כל שלבי מחזור החיים של המזיק. **איור 1** מדגים יום אחד של הרצה עבור שלב חיים אחד במודל, כרגע עדיין ללא סינון אזורים חקלאיים ותמותת פריטים.

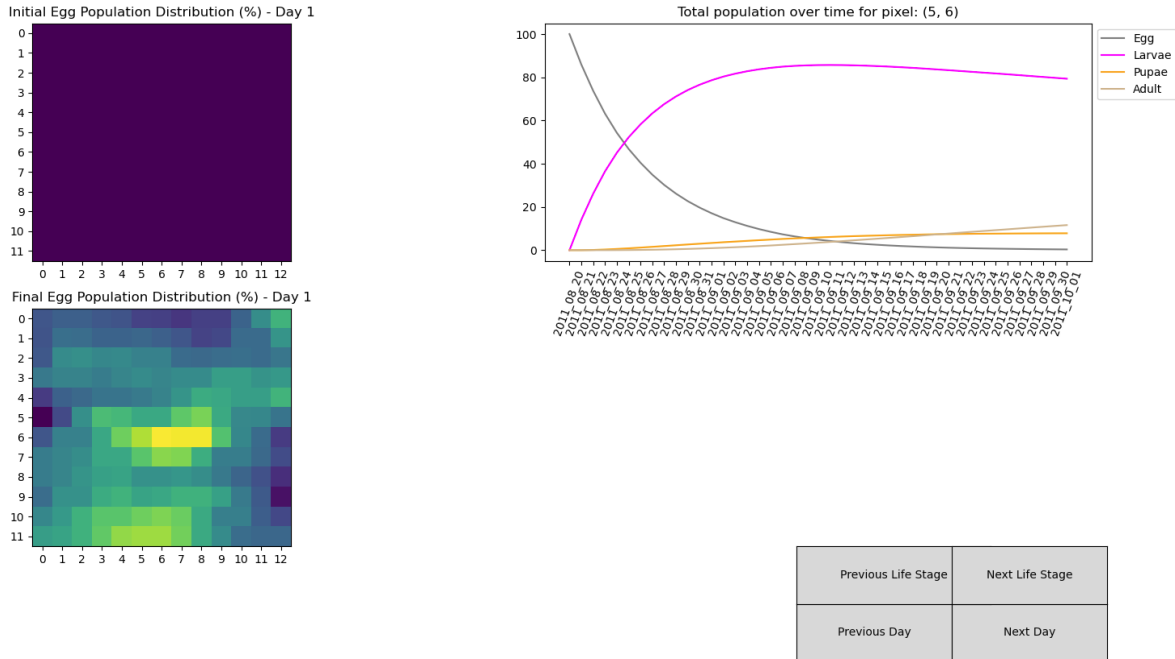


איור 1. תוצאת הרצת המודל על גבי מפה. תא השטח (פיקסל) הוא 1x1 ק"מ ומייצג את הרזולוציה המרחבית של נתוני המקור (טמפ' הלויין). כפי שניתן לראות, המודל עדיין לא כולל הפרדת שטחים חקלאיים ולא-חקלאיים. כמו כן, המודל אינו כולל את תנועת המזיק במרחב.

בניית ממשק אינטראקטיבי ויצירת בסיס נתונים

במודל הישן קבצי הפלט היו תמונות מצב של אוכלוסיית המזיק (על שלבי החיים השונים) לפני ואחרי היום המחושב. עקב ריבוי החישובים ותאי השטח, נמנעה יצירה של תמונות מרובות אשר היו גוזלות זמן חישוב כמו גם נפח אחסון, וכעת הפלט נשמר בקובץ netCDF יחיד ('קוביית מידע') אשר מאחסן את המידע כולו באופן מעוגן

גיאוגרפית (Rew et al., 1990). בקוביית מידע זו יאוחסן בעתיד גם המידע המרחבי הקשור לאופי תאי השטח, כמו למשל השלב ההתפתחותי של הכותנה, סוג תא השטח (חקלאי/לא חקלאי) וסוג הגידול. תמונה מבוקשת נוצרת ומוצגת על פי דרישת משתמש בממשק אינטראקטיבי שנוצר לשם כך בשפת תכנות פיתון באמצעות ספריות קוד פתוח, ומציגה עבור יום רצוי את תפוצת שלב החיים הנבחר באופן מרחבי. בלחיצה על פיקסל בתמונה זו, המייצג תא שטח בודד, מוצגות תוצאות התפתחות האוכלוסייה על כל שלבי החיים לתא שטח זה לאורך התקופה המחושבת במערכת צירים נפרדת (ראה דוגמה של הסדרה העיתית באיור 2).



איור 2. הדגמת ממשק המשתמש הנוכחי. בשלב הבא התמונה תוצג על מפה אינטראקטיבית.

התאמת המודל להלקטית ורודה

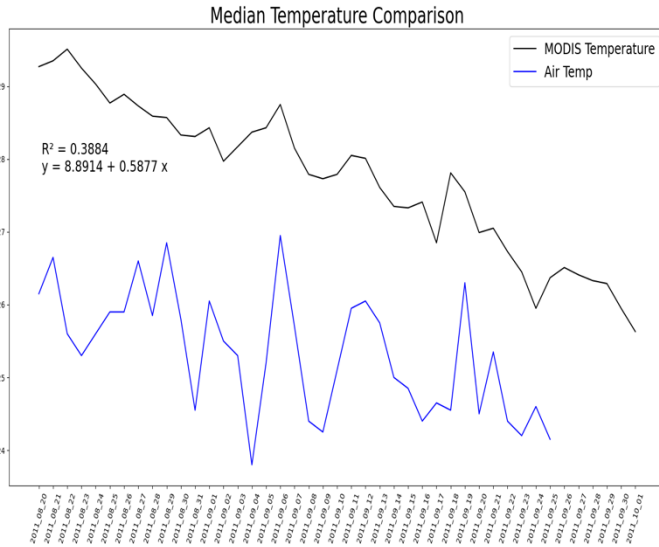
על מנת להתאים את המודל להלקטית ורודה התבססנו על מידע ונתונים שהתפרסמו על התפתחותה לפי ימי מעלה כפי שנמדדו בניסויי מעבדה במספר טמפרטורות שונות (Hutchison et al., 1986). מחזור החיים חולק לארבעה שלבים - ביצה, זחל, גולם ובוגר, כאשר לכל שלב חיים זמן התפתחות (תלוי ימי-מעלה) משלו. הבדלי הגילאים בתוך אותו שלב חיים בוטאו כקבוצות גיל (age cohorts), כאשר המעבר מקבוצה לקבוצה הינו תלוי טמפרטורת ההתפתחות והטמפרטורה הסביבתית היומית (ראה תיאור מפורט ב- Blum et al., 2018).

הרצת המודל והערכה עם נתונים מדודים בשדה

לצורך הערכת המודל התבססנו על נתונים שנאספו במחקר קודם בשנים 2011-2013 (אקסלרוד, 2014), בפרט בשנת 2011, בשדה כותנה גן-שמואל. הנתונים שנאספו במחקר זה הינם עבור הלקטים נגועים בביצים ובזחלים.

לעומת זאת, המודל הנומרי מחשב את מספר הזחלים והביצים עצמם (ולא את ההלקטים הנגועים). אנו מניחים כי מספר ההלקטים הנגועים בביצים או בזחלים הינו פרופורציוני למספר הפריטים הנמצאים בשלב החיים המתאים. בעקבות זאת, השתמשנו בנתוני הנגיעות בביצים בלבד במטרה לשחזר את נתוני הנגיעות בזחלים באמצעות המודל, תוך התחשבות בסטיות התקן ושגיאות המדידה על הנתונים הנ"ל.

תוצאות

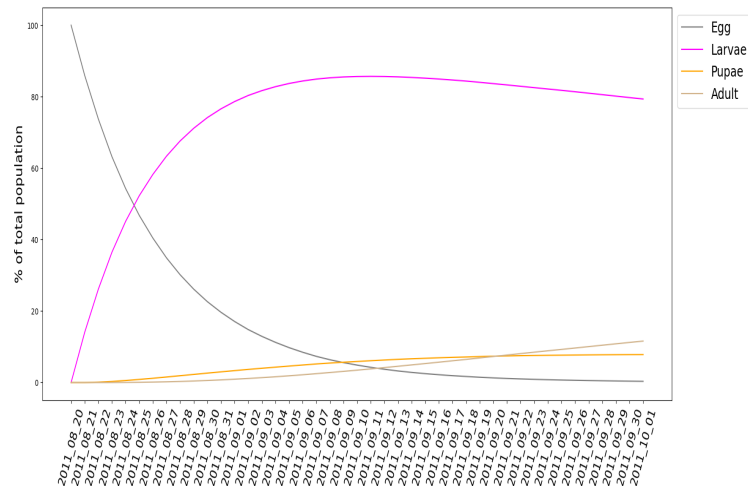


באיור 3 ניתן לראות שיש הבדל בין טמפרטורת פני-השטח מהלוויין לטמפרטורת האוויר מהתחנה, כאשר טמפ' פני-השטח תמיד גבוהה מזו של האוויר. מלבד העובדה שהטמפ' יותר גבוהה, התנודות הבין-יומיות (קו שחור) פחות ניכרות בפני השטח לעומת האוויר (קו כחול).

בשביל להבין את ההתנהגות הכללית של המודל, נעשתה הרצה ראשונה עם טמפ' הלוויין עבור האזור והתקופה הרלוונטיים. תוצאות אלו מוצגות כאחוזי נגיעות **באיור 4**. ניתן לראות שהאוכלוסייה אינה מתפתחת באופן אחיד, וישנה דעיכה באוכלוסיית הביצים הנראית

איור 3. טמפרטורת פני-השטח בשדה, כפי שמתקבל מהלוויין (קו שחור), וטמפ' אוויר, מתחנה מטאורולוגית בשדה (כחול), עליהן התבססו הרצות המודל. ההתאמה הליניארית (R^2) בין שתי הטמפרטורות מוצגת בסמוך.

כתמונת מראה לגידול אוכלוסיית הזחלים מכוון שהמודל אינו כולל עדיין תמותת פריטים (מתוכנן כתוספת במודל בשלב הבא). לאחר צבירת ימי-מעלה בסף הנדרש, גידול אוכלוסיית הזחלים מתמתן, כך שחלק מהזחלים הופכים

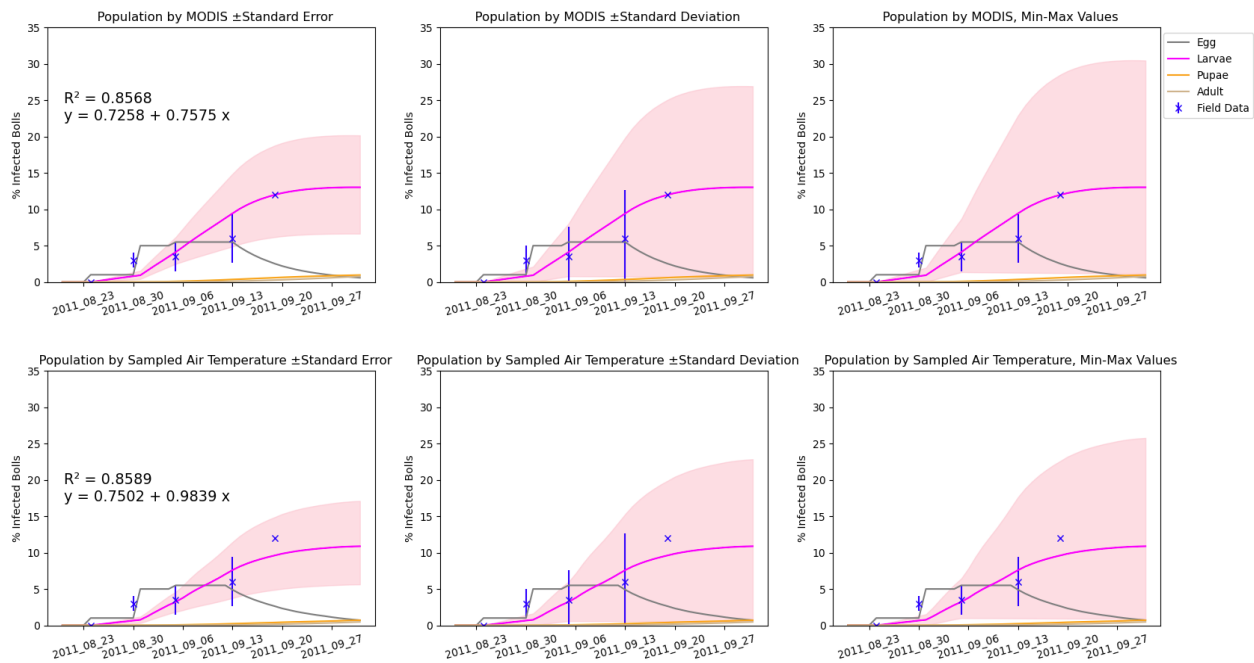


איור 4. דינמיקה של אוכלוסיית שלבי החיים של ההלקטית באחוזים, כפי שחושבה על ידי המודל בעזרת טמפרטורת לווין באזור גן-שמואל. בדוגמה זו, התחלנו ממספר שרירותי של ביצים (100%) והצגנו את התפתחות האוכלוסייה לאורך 43 יום מתוך אותה כמות התחלתית של ביצים. המודל אינו מדמה בשלב זה תמותת פריטים.

במודל לגלמים (ובוגרים). לאחר כחודש ימים של הרצת המודל, כמות הבוגרים עולה על כמות הגלמים, דבר המשתקף גם מנתוני התצפיות המראים על זמן דור של כחודש (אקסלרוד, 2014).

בשלב הבא, הערכנו את ביצוע המודל בעזרת תצפיות על ידי תנאי שפה ידועים. כלומר, הרצנו את המודל עם נתוני נגיעות ביצים מהשדה ונתנו למודל "לייצר" את אוכלוסיית הזחלים בעצמו. המודל הורץ עם שני מסדי נתוני הטמפ', פעם עם טמפ' הלוויין ופעם עם טמפ' אוויר מהתחנה המטאורולוגית. תוצאות ההרצה מוצגות באיור 5.

התוצאות מראות כי ישנה התאמה גבוהה ומשמעותית בין המדידות לתוצאות המודל עבור ההרצה עם שני מסדי נתוני הטמפ' ($R^2 > 0.85$) עבור התאריכים בהם נאספו נתוני נגיעות בזחלים. נראה שבאופן עקבי ישנה הערכת פחת עבור השבוע הראשון, אך מהשבוע השני בכל הדוגמאות נתוני השטח היו בתוך טווח התוצאות של המודל. המודל צפה עלייה הדרגתית באוכלוסיית הזחלים כל עוד גודל אוכלוסיית הביצים נשאר קבוע. את הנתון האחרון עבור אוכלוסיית הביצים, ממוצע של 2.5% הלקטים נגועים בביצים עבור התאריך 19.08.11, לא כללנו בתנאי ההתחלה של המודל, וניתן לראות שהמודל אכן הצליח לנבא באופן מדויק את הערך הנכון על סמך דעיכת אוכלוסיית הביצים בעזרת נתוני ההתחלה והטמפ' בלבד.



איור 5. תוצאות הרצת המודל מול נתוני השדה של זחל וורוד. שורה עליונה - תוצאות הרצת המודל על-ידי שימוש בטמפ' פני-השטח מהלוויין. שורה תחתונה - תוצאות הרצת המודל על-סמך טמפ' אוויר מהתחנה. עבור כל מסד נתוני טמפרטורה חישבנו את המודל שלוש פעמים עם נתוני התחלה שונים: ממוצע אחוז הלקטים הנגועים בביצים וסטיית התקן שלהם (1), ממוצע עם שגיאת התקן (2), וממוצע עם ערכי מינימום ומקסימום (3). תוצאת טווח האפשרויות עבור ההלקטים הנגועים בזחל מסומנת ברקע ורוד בהיר כאשר הקו הוורוד הכהה הינו הממוצע בחלקה על-סמך המודל. אחוז ההלקטים הנגועים בזחל שנספרו בשדה מסומנים ב-x בצבע כחול. טמפ' הלוויין נלקח עבור תא השטח (פיקסל) החופף את האזור ממנו נאספו ההלקטים הנגועים.

יש לציין שתוצאות המודל מבוססות על חישוב פרטים באוכלוסייה בעוד הנתונים שהוזנו, וכן אלו המשמשים לאימות המודל (ומוצגים בסימן כחול באיור 5), הם של אחוז הלקטים נגועים ולא של הפרטים עצמם (ביצים או זחלים). אמנם, עקב ההתאמה הגבוהה בין נתוני השטח לתוצאות המודל ניתן להסיק כי ההנחה לפיה מספר ההלקטים הנגוע פרופורציוני לגודל האוכלוסייה היא הנחה סבירה במקרה זה.

תכנית להמשך



אנו מתכוונים להמשיך את בניית ופיתוח המודל לפי השלבים המתוארים באיור 6. בשלב הבא אנו מתכוונים להוסיף פונקציית תמותה למודל, על בסיס טמפרטורה. מבחינה זו, כל שלב חיים מגיב שונה לטמפרטורה, כך שלכל שלב חיים תשולב פונקציית תמותה משלו (Peddu *et al.*, 2020). בשלב הבא, תשולב פונקציית הטלת ביצים, גם כן כתלות בטמפרטורה, על סמך ניסוי מעבדה כפי שתואר ב-Peddu *et al.*, 2020. גם כאן נבצע הרצה של "ניסוי ותהייה" בכדי לכייל את המודל. הפעם תנאי השפה יכללו רק בוגרים, על-סמך נתוני לכידות בשדה (אקסלרוד, 2014), והמודל ינסה לשחזר את אוכלוסיית הביצים והזחלים מתנאי שפה אלה. לאחר כיוול ראשוני, המודל יורץ על פני עונה עוקבת שלמה. הרצה זו תכלול חישוב גיחות ראשוניות, לפי צבירת ימי-מעלה, התחשבות בפעולות החקלאיות המבוצעות בתחילת העונה, במהלכה ובסופה, והשלכתן על אוכלוסיית ההלקטית מעונה לעונה. בשלב זה נרצה להוסיף למודל אינטראקציה מרחבית. כלומר, מעבר אוכלוסיית בוגרים בין תאי השטח במרחב על-סמך פונקציית הסתברות. תנועה זו תתחשב בגורמים שונים כגון, שימושי קרקע, סוגי יבול, ושלבי התפתחות צומח (plant phenology). השלב האחרון (מעריכים בשנה השלישית) יהיה הנגשת המודל למשתמש-קצה ובניית ממשק משתמש אינטרנטי נגיש ומובן על בסיס מפה אינטראקטיבית. כמובן שהתכנון המוקדם הוא לכלול ולסכם את תוצאות וביצועי המודל במאמר מדעי בשנה הנוכחית.

איור 6. הצגה היררכית של שלבי העבודה הנדרשים להשלמת הפרויקט (המודל). בירוק – שלבים ראשוניים שכבר בוצעו. בכתום – שלבים שבוצעו באופן חלקי. בלבן – שלבים משלימים המתוכננים לביצוע בשנתיים הקרובות. ייתכן והשלבים ירוק וכתום יחזרו על עצמם 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.
- Brown P, Silvertooth J, Watson T** (1992). "Revised planting window for full season cotton varieties. In: Cotton, A College of Agriculture Report" Tucson: University of Arizona. pp. 421-451.
- Hutchison, W. D., G. D. Butler Jr, and J. M. Martin** (1986). "Age-specific developmental times for pink bollworm (*Lepidoptera: Gelechiidae*): three age classes of eggs, five larval instars, and pupae." *Annals of the Entomological Society of America* 79.3: 482-487.
- Peddu, Hemant, et al** (2020). "Estimation and validation of developmental thresholds and thermal requirements for cotton pink bollworm *Pectinophora gossypiella*." *Crop Protection* 127: 104984.
- Peterson, Pearu** (2009). "F2PY: a tool for connecting Fortran and Python programs". *International Journal of Computational Science and Engineering* 4.4: 296-305
- Rew, Russ, and Glenn Davis** (1990). "NetCDF: an interface for scientific data access." *IEEE computer graphics and applications* 10.4: 76-82.

נספח

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.

