

תוכן עניינים:

תקציר –	עמודים 2-4
גוף דו"ח המחקר - מבוא –	עמוד 5
גוף דו"ח המחקר - מטרות המחקר –	עמודים 5-6
גוף דו"ח המחקר - פירוט עיקרי הניסויים ותוצאות המחקר –	עמודים 6-17
גוף דו"ח המחקר – דיון –	עמודים 17-18
גוף דו"ח המחקר – רשימה ביבליוגרפית -	עמודים 19-20

שנת המחקר 3 מתוך 3 שנים

פיתוח מודל לחיזוי דינמיקת האוכלוסיות של כנימת עש הטבק בגידולי ירקות בשטח פתוח בתגובה לשינויי טמפרטורה ובניית כלי מהימן להערכת סיכונים וקבלת החלטות

Developing a modeling tool for predicting the dynamics, under global warming, of whitefly pests in open field vegetable crops, and building a reliable tool for risk assessment and decision making

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות ע"י:

פרופ' שי מורין האוניברסיטה העברית בירושלים

פרופ' אפרת מורין האוניברסיטה העברית בירושלים

ד"ר ליאורה שאלתיאל הרפז מיגל-מו"פ-צפון

Prof. Shai Morin, The Hebrew University of Jerusalem, P.O.Box 12, Rehovot 7610001.
E-mail: shai.morin@mail.huji.ac.il.

Prof. Efrat Morin, The Hebrew University of Jerusalem, Edmond J. Safra Campus, Jerusalem, 91904, Email: efrat.morin@mail.huji.ac.il.

Dr. Liora Shaltiel-Harpaz, IPM Northern R&D MIGAL, POB 831 Kiryat Shmona 11016. E-mail: lioraamit@bezeqint.net.

תקציר

הצגת הבעיה

כלים למידול הדינמיקה של אוכלוסיות חרקים מזיקים, המסכנים הן את רווחיות המערכת החקלאית והן יכולתה להבטיח מזון איכותי כמעט ואינם בנמצא כיום. יתר על כן, המודלים הקיימים פותחו עבור אזורים עם תנאים שונים מישראל, הם אינם מותאמים לטמפרטורות האופייניות לאזורינו, ולא יכולים לדייק בתנאים של גלי חום קיצוניים. במחקר זה, פיתחנו כלי סימולציה אשר מאפשרים תחזיות הסתברותיות אזוריות הן לימים הקרובים (חיזוי לטווח בינוני), הן לעונה הקרובה והן לאקלים עתידי. כלי זה יוכל לשמש מקבלי החלטות כמו למשל פקחי מזיקים/מגדלים או משרדי ממשלה בתכנון עונתי של מחזור גידולים, בניטור ובקרה של המזיקים לאורך העונה ובהערכות של מערכות חקלאיות וטבעיות להשפעות שינויי אקלים.

שיטות העבודה

הוקם מאגר נתונים מטאורולוגי לעמק החולה ונאספו נתונים אטמוספריים מ-22 מודלים אקלימיים גלובליים מפרויקט CMIP5 עבור אזור עמק החולה. בנוסף, נאספו נתוני רה-אנליזה מ-NCEP/NCAR ומ-ERA5 לאזור המחקר (משימה 1 שנה 1).

בשיתוף פעולה עם יחידת המחקר של השירות המטאורולוגי, תוך שילוב תחזיות עונתיות כפי שניתנות מהמודל האירופי ECMWF החל מה-1 במרץ ועד סוף חודש נובמבר, נבנה "מנוע מזג אוויר" המאפשר downscaling של טמפרטורות חזויות לתחנה נקודתית בעמק החולה (משימה 2 שנה 1).

בוצעו ניסויי השדה בחוות המטעים להערכת שיעורי ההטלה, קצבי ההתפתחות ושיעורי ההישרדות של דור אחד של כנימת עש הטבק (כע"ט) על תפוא, בטטה, אבטיח מללי, שעועית, כרוב ניצנים ועגבנייה (משימה 3 שנה 1).

בוצעו סימולציות וזוהו סדרות זמן/טמפרטורה המכילות גלי חום, בהן השתמשנו לביצוע ניסויים באינקובטור על מנת לבחון את התאמת המודל לתרחישי אקלים קיצוניים. במסגרת הניסויים בחנו את השפעתו של גל

חום קיצוני על קצב ההתפתחות ואיך משפיע תזמונו של גל החום על קצב ההתפתחות (משימה 1 שנה 2).

פוח מודל לחיזוי דינמיקת האוכלוסיות של כע"ט. המודל עבר אופטימיזציה ואימות תוך שימוש בתוצאות ניסויי השדה וניסויי המעבדה (משימה 2 שנה 2).

בחנו את ההשפעה של שינויי האקלים על דינמיקת האוכלוסיה של כע"ט (בעזרת סימולציות וניתוח מגמות) תוך שימוש במסד נתונים של עשור מתחילת המאה ה-21 (הקרוי אקלים נוכחי, current) ונתונים של עשור מאמצע המאה ה-21 (אקלים עתידי, future) (משימה 1 שנה 3).

בעזרת "מנוע מזג האוויר" נבנה כלי המאפשר מתן תחזית עונתית (כבר בתחילת העונה) ותוך-עונתית לדינמיקת האוכלוסיות של כע"ט. לאחר איסוף כל הנתונים הנדרשים, בחנו וכיילנו את המערכת על בסיס מסד נתונים של השנים 2011-2020, ובשנת 2021 חישבנו והפצנו תחזיות עונתיות. בנוסף, בשנת 2021 אספנו תצפיות לגבי מצב המזיק מפקחיות מזיקים בעמק החולה והשווינו אותן לתחזיות המודל (משימה 2 שנה 3).

תוצאות עיקריות לשנים 2019-2021

לאחר הקמת בסיס הנתונים המטאורולוגי, בוצעו שישה ניסויי שדה ושלושה ניסויי מעבדה באינקובטור. ניסויים אלה שימשו לפיתוח, כיול ואימות של מודל דינמיקת האוכלוסיות של כע"ט. תהליך זה אופייני בעיקר במעבר משימוש בקלט של טמפרטורה שעתית או יומית ממוצעת, לממוצע של 6 השעות האחרונות (כלומר ביממה יש 24 נתוני טמפרטורה שכל אחת מהן מייצגת את הטמפרטורה הממוצעת ב-6 השעות האחרונות). שינוי זה שיפר בצורה משמעותית את ביצועי המודל, כתוצאה כנראה מייצוג מהימן של ההשפעות הפיזיולוגיות של עקות חום וקור והזמן הנדרש להתאוששות מהן.

עבודת הכיול והאימות של מודל החיזוי העונתי (מאפשר מתן חיזוי לחקלאי ולפקחית על התנהגות אוכלוסיות כע"ט כבר בתחילת העונה) בוצעה בגישת cross-validation ובפרט בשיטת leave-one year-out (שבה נתונים של שנה נבדקת לא נכללו בחישובים של המודל ושל "מנוע מזג האוויר". על בסיס שיטה זו, הערכנו את ביצועי התחזית המטאורולוגית העונתית ואת "תוצרי מנוע מזג האוויר" אשר התבססו על התחזיות, וכיילנו מספר גורמים במערכת. המערכת שנבנתה הוכנסה לשימוש בשנת 2021, בה חושבו תחזיות עונתיות (7 חודשים קדימה) בתחילת החודשים מארס, אפריל ומאי. בכל שבועיים, עודכנו התחזיות על בסיס חישובים שכללו גם את נתוני הטמפרטורה בתחנות המטאורולוגיות עד לנקודת זמן זו והופצו לפקחיות מזיקים הפועלות בעמק החולה. בשכלול תוצאות החיזוי העונתי עבור השנים 2011-2020 ועבור שלוש תחנות מטאורולוגיות, נמצא כי בחיזוי תזמוני הדורות לאורך העונה התחזיות העונתיות טובות ואמינות ועולות בהרבה על תחזיות המסתמכות על ממוצע אקלימי. לעומת זאת, לתחזיות העונתיות המבוססות על "מנוע מזג האוויר" אין יתרון בחיזוי גודל האוכלוסייה הצפוי בכל דור. בהשוואת התחזיות שחושבו והופצו בתחילת העונה (חודש אפריל) ולאורך עונת הגידול של 2021 לתצפיות שנאספו מפקחיות מזיקים באזור המחקר (עמק החולה), נמצא כי התחזיות העונתיות חוזות היטב את עיתוי הופעת המזיק לראשונה, את עיתוי העלייה המשמעותית בלחץ האוכלוסייה בשדות הסמוכים לתחנה המטאורולוגית (זמן התחלת הטיפול במזיק) ואת זמן הפעילות והדעיכה של האוכלוסיות בסוף העונה.

בסימולציות שערכנו על מנת ללמוד על השפעת שינויי האקלים בעמק החולה על התנהגות אוכלוסיות כע"ט, נמצא כי הטמפרטורה העונתית צפייה לעלות בממוצע עד לאמצע המאה ה-21 כמעט במעלת צלזיוס אחת (בתרחיש ה"ביניים" RCP4.5). שלושת מדדי האוכלוסייה שנבדקו הצביעו על כך שבתרחיש העתידי עונת הפעילות של המזיק תתארך, מה שכנראה יאפשר לכע"ט ליצור דור נוסף בכל שנה ועקב כך לחץ האוכלוסיות ביחוד בעונת הסתיו צפוי לגדול. בנוסף, נבדקה התחזית לאמצע המאה למספר הממוצע של גלי חום בשנה, ממוצע עוצמת גלי-החום וממוצע אורכם של גלי-החום. בכל שלושת המשתנים נמצא כי הממוצע גבוה יותר עבור התרחיש העתידי, המתאר מציאות בה מתרחשים הרבה יותר גלי חום, עוצמתם חזקה יותר והם גם ארוכים יותר.

מסקנות והמלצות

תוצאות הניסויים שנערכו בשדה וניסויי המעבדה באינקובטור (אשר אפשרו סימולציה של גלי חום) מצביעות על כך שהמודל שפיתחנו חוזה היטב את דינמיקת המזיק בשדה וכי המודל הינו חסין (Robust) ואיננו רגיש לשלב בעונה, הצמח הפונדקאי או המיקום הגאוגרפי. הוא אמין בזיהוי הזמן בתחילת העונה בו מתחילה פעילות של המזיק בשדה וכן בזיהוי הזמן הרלוונטי (דור 5) להתחלת הטיפול כנגדו. לכן, כבר ככלי לעבודה בזמן אמת ובחיזוי של מספר ימים קדימה, הוא יכול לשמש כעזר רב בפיקוח מושכל של מזיקים. מעבר לכך, העבודה באינקובטור הצביעה על כך מודל האוכלוסיות מסוגל לחזות בצורה טובה את זמן ההתפתחות גם תחת תנאי חום קיצוניים. התאמה זו חשובה מאוד בשל העובדה שהמודל יופעל אופרטיבית בשנים הקרובות, בהן אירועים של גלי חום וטמפרטורות קיצוניות צפויים להתגבר ולהתעצם עקב שינויי האקלים הגלובליים.

התחזיות העונתיות מאפשרות לספק תחזית עונתית לחקלאי כבר בתחילת עונת הגידול, ובכללן הערכה לתזמוני הדורות הקריטיים לניהול המזיק, הערכה הסתברותית על גודל אוכלוסיות כע"ט והשתנות הצפוייה במהלך העונה וכן אמידת הסיכונים להתפרצויות באתרים השונים. הכלי מאפשר יצירת תחזיות מקומיות לכל אתר בו קיימת תחנה מטאורולוגית, וגילוי שונות בתחזיות אפילו בין נקודות שונות בתוך אזור קטן ואחיד אקלימית כמו עמק החולה. כאמור, כלי זה יכול לשמש מקבלי החלטות כמו למשל פקחי מזיקים או מגדלים לא רק בזמן אמת לאורך העונה אלא גם ואולי בעיקר בתכנון עונתי של מחזור גידולים תוך התייחסות מיוחדת לתכנון גידולי הסתיו בהם הידיעה אם צפויה בשנה מסוימת אוכלוסייה גדולה מאוד של כע"ט חיונית להצלחת הגידול. יתרה מזאת, המערכת החישובית שפותחה במחקר זה יכולה לקבל כקלט גם סימולציות עבור תרחישים אקלימיים משתנים ועתידיים, בהם ניתן יהיה לצפות את ההתנהגות ארוכת הטווח של המזיק במערכות חקלאיות וטבעיות שונות ולגבש מבעוד מועד אסטרטגיות חדשות לניהול המערכת החקלאית.

מעריכים מומלצים לבדיקת הדוח המדעי

על פי ההנחיות באתר המדענית על מידע זה לא להופיע בקובץ ה-PDF של הדו"ח המסכם

הצהרת החוקר הראשי:

הממצאים בדו"ח זה הינם תוצאות ניסויים.

הניסויים מהווים המלצות לחקלאים: כן

הידע יופץ על ידי בניית כלי עבודה אינטראקטיבי והעברתו ישירות לשימוש פקחי/ות מזיקים בעמק החולה

תאריך: **27.2.2022**

חתימת החוקר



רשימת פרסומים שנבעו מהמחקר:

Neta, A., Gafni, R., Elias, H., Bar-Shmuel, N., Shaltiel-Harpaz, L., Morin, E., & Morin, S. 2021. Decision support for pest management: Using field data for optimizing temperature-dependent population dynamics models. Ecological Modelling, 440, 109402. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109402>.

מבוא

מחקר זה עוסק בפיתוח גישה מחקרית רב-תחומית להתמודדות עם השפעת שינויי האקלים על העלייה הצפויה בפעילות חרקים שהינם מזיקי מפתח בחקלאות, הפוגעים בגידולים המשמשים כמזון בסיסי. המחקר מתמקד בכנימת עש הטבק, *Bemisia tabaci* (כע"ט), שהינה מזיק מפתח בגידולים חד-שנתיים רבים ברחבי ישראל. הגישה המחקרית משלבת בין מודלים אקלימיים גלובליים לחיזוי שינויי אקלים, לבין מודלים להתנהגות של אוכלוסיות כע"ט בטמפרטורות שונות, תוך שימוש ב"מנוע מזג אוויר". דבר זה מאפשר הרצת תרחישים, המבטאים לא רק את תגובת האוכלוסיות לעלייה הממוצעת הצפויה בטמפרטורות אלא גם לשונות של ערכים אלו והשתנותה עם הזמן (Zidon et al. 2016). בעזרת גישה רב-תחומית זו, אפיינו את התגובות הביולוגיות (הדינמיקה של אוכלוסיות כע"ט) למגוון רחב של דפוסי טמפרטורה. יתרה מזאת, בשל המדגם הגדול, גם היינו מסוגלים לאפיין מקרים נדירים של גלי חום קיצוניים, המהווים מוקד עניין מיוחד במחקרינו. עם מגוון זה, זיהינו את תנאי הטמפרטורה העיקריים המשפיעים על גודל אוכלוסיות כע"ט באזור מרכז עמק החולה, בו התמקדו עיקר מאמצנו. כפי שנראה בפרק התוצאות, מודל דינמיקת האוכלוסיות שפותח מסוגל להעריך את זמן ההתפתחות וגודל האוכלוסיות של דורות כע"ט בתנאי שדה בצורה טובה וחסינה. התאמת המודל לאקלים משתנה ולעלייה בתדירות מצבי קיצון כגון גלי חום טובה גם היא. בנוסף, באמצעות כלי החיזוי העונתי שפותח, ניתן לספק תחזית אשר תאפשר לחקלאי לקבל כבר בתחילת עונת הגידול, הערכה הסתברותית על גודל אוכלוסיות כע"ט והשתנותן הצפויה במהלך העונה. כלי זה מאפשר קבלת החלטה מושכלת על מועדי ניטור ומועדי טיפול ואם להקדים או לאחר את מועדי הזריעה/שתילה וכן קבלת התראות לאתרים עם סכנת התפרצות הדורשים ניטור נוסף. כמו כן, ניתן לערוך סימולציות עבור תרחישים אקלימיים משתנים ועתידיים, בהם ניתן לצפות את ההתנהגות ארוכת הטווח של המזיק במערכות חקלאיות וטבעיות שונות ולגבש מבעוד מועד אסטרטגיות חדשות לניהול המערכת החקלאית.

מטרות המחקר

המחקר בשנים 2019-2021 התמקד בהשגת המטרות הבאות:

2019

1. הקמת בסיס נתונים מתחנות מטאורולוגיות באזור המחקר, ואיסוף נתונים אטמוספריים מרה-אנליזה וממודלים אקלימיים גלובליים לתא השריג המכסה את אזור המחקר.
2. פיתוח "מנוע מזג אוויר".
3. ביצוע ניסויי שדה בני דור אחד אשר אפשרו בחינה וכיול של המודל לחיזוי ביצועי אוכלוסיות כע"ט.

2020

1. ביצוע ניסויי מעבדה משלימים באינקובטור לכיסוי משטרי טמפרטורות שקשה לקבלם בשדה (בעיקר ערכים קיצוניים המאפיינים גלי חום).
 2. פיתוח סופי של המודל לחיזוי דינמיקת האוכלוסיות של כע"ט לאחר השלמת הניסויים בשדה ובמעבדה.
- 2021
1. זיהוי השינויים הצפויים בדינמיקה של אוכלוסיות כע"ט באזור עמק החולה בין האקלים הנוכחי לבין האקלים העתידי (אמצע המאה ה-21).
 2. פיתוח כלי חיזוי לזמן-אמת, חיזוי עונתי (בתחילת העונה) ותוך-עונתי.

פירוט עיקרי הניסויים ותוצאות המחקר (כולל נתונים, טבלאות ואיורים)

2019 – 1א'. הקמת בסיס נתונים מתחנות מטאורולוגיות באזור המחקר

מאגר התצפיות המטאורולוגיות שנבנה כלל את התחנות הבאות באזור עמק החולה: דפנה, כפר-בלום, איילת השחר, חוות גד"ש, גדות וכבול (חוות חולה). כמו כן כללנו תחנה בעמק בית-שאן (חוות עדן) לצורך השוואה עם אתר בעל תנאי אקלים שונים (טבלה מספר 1). רשימת התחנות לעיל שונה במעט מהרשימה בהצעת המחקר (הוספנו את תחנות חוות גד"ש וגדות והסרנו את תחנות כפר סאלד, עמיעד, בית צידה וכפר נחום), על פי עיקרון שנקבע בתחילת המחקר להתמקד בתחנות הממוקמות בלב האזור החקלאי במרכז עמק החולה (אזור אשר אפשר אימות של נתוני המודל עם תצפיות הפקחיות בשדות השונים בשנים 2019 ו-2021) ולא בשולי האזור (עמיעד, בית צידה וכפר נחום). כמו כן, בכפר סאלד לא נמצאה תחנה מטאורולוגית הפעילה כיום. מאגר הנתונים נבנה בשתי רמות של פירוט עיתי: שעה ויממה.

הנתונים מתחנות השירות המטאורולוגי מתקבלים בפירוט עיתי של 10 דקות. הנתונים הומרו למרווחי זמן של שעה כך שבכל שעה עגולה בה ישנן לפחות 3 רשומות (מתוך 6) מוצעו הרשומות ובשעות בהן היו פחות מ-3 רשומות נרשם קוד לנתון חסר. הנתונים מתחנות מו"פ צפון התקבלו מראש בפירוט שעתי. עבור כל מסדי הנתונים, בדקנו את תקינות הנתונים, מיפינו נתונים חסרים וזיהינו מדידות שגויות. נתונים חסרים שוחזרו על ידי הפעלת קשרי רגרסיה לינארית פשוטה בין תחנות עם מתאם גבוה. חישוב המתאם וקשרי הרגרסיה התבסס על נתונים מהשנים 2017-2019.

תחנה	מקור	תקופה	פירוט עיתי
דפנה	השירות המטאורולוגי	1970-2019	יומי לכל התקופה, שעתי עבור 2017-2019
כפר בלום			
איילת השחר			
חוות עדן	מו"פ צפון	2017-2019	שעתי ויומי
חוות גד"ש			
גדות			
כבול			

טבלה 1 – תחנות מטאורולוגיות בעמק החולה מהן נאסף מידע על הטמפרטורות.

המחקר

נאספו נתונים אטמוספריים מ-22 מודלים אקלימיים גלובליים מפרויקט CMIP5 עבור אזור עמק החולה. המודלים ברזולוציה יומית, והם כוללים את משתנה טמפרטורת האוויר במפלס לחץ 1000 הפ"ס. בנוסף, נאספו נתוני רה-אנליזה מ-NCAR/NCEP ומ-ERA5 לאזור המחקר.

2019 - 2. פיתוח "מנוע מזג אוויר"

"מנוע מזג האוויר" מייצר סדרות זמן אקראיות של טמפרטורות עבור תחנה מטאורולוגית, כאשר האילוץ מגיע מנתונים אטמוספריים ברזולוציה גסה, מרה-אנליזה או ממודל אקלימי גלובלי/אזורי, והטמפרטורות המתקבלות מייצגות תחנה נקודתית (תהליך של Downscaling סטטיסטי). באקלים הנוכחי, המאפיינים הסטטיסטיים של סדרות הטמפרטורה מ"מנוע מזג האוויר" צריכים להתאים למאפיינים הסטטיסטיים של התצפיות בתחנה.

כאשר נעשה חיזוי עונתי (7 חודשים קדימה), התחלנו את העבודה על "מנוע מזג האוויר" דרך שילוב התחזיות העונתיות מאנסמבל של המודל האירופי ECMWF, לתחזיות שפורסמו לתקופות מרץ-ספטמבר, אפריל-אוקטובר ומאי-נובמבר. תקופות חיזוי אלו נבחרו כי הן מייצגות את התקופה בה מתרחשים מרבית השינויים הדמוגרפיים באוכלוסיות כע"ט הרלוונטיים לחקלאי. בניית הכלי התבצעה על בסיס נתונים משנים קודמות (2011-2020), עבורן היו זמינים לנו נתוני החיזוי מהמודל האירופי, נתוני הרה-אנליזה וגם נתוני הטמפרטורה שנמדדו בפועל בשלוש תחנות בעמק החולה (כפר בלום, כבול ואילת השחר). במודל האירופי כל תקופת תחזית מתוארת באמצעות 25 או 51 חברי אנסמבל, ולכל חבר באנסמבל אנו מייצרים 100 סדרות סטוכסטיות של טמפרטורה מקומית (כלומר שעברה downscaling) באמצעות "מנוע מזג האוויר", כך שבסופו של דבר מתקבלות סדרות טמפרטורה רבות המייצגות את התקופה. סדרות אלו מועברות למודל האוכלוסיות ובדרך זו ניתן לקבל חיזוי לגבי קצב ההתפתחות וגודל האוכלוסייה עבור כל תקופת זמן הזמינה בנתוני החיזוי (ראה תוצאות שנה 2021 - 2).

כאשר נעשה חיזוי עתידי, "מנוע מזג האוויר" הופעל בתנאי אקלים של תחילת ואמצע המאה ה-21 (בתרחישים שונים) וחושבו צברים של סדרות טמפרטורה בשתי תקופות האקלים אשר היוו קלט למודל אוכלוסיות כע"ט (ראה תוצאות 2021 – 1).

2019 - 3. ביצוע ניסויי שדה בני דור אחד לכיול המודל לחיזוי ביצועי אוכלוסיות כע"ט

ניסויי שדה בוצעו בסוף האביב, במהלך הקיץ ובתחילת עונת הסתיו. הניסויים נערכו בבית-רשת בחוות המטעים שבמרכז עמק החולה על מנת להעריך את שיעורי ההטלה, קצבי ההתפתחות ושיעורי ההישרדות של דור אחד של כע"ט. צמחים פונדקאים אולחו בכע"ט תוך שימוש בכלובי עלה. בתום תקופת הטלה בכלובים נאספו הכנימות הבוגרות. ספירת ביצים בוצעה מתחת לבינוקולאר מספר ימים לאחר האילוח. לאחר כ-10 ימים החלה ספירת נשלים יומית שאפשרה את חישוב היום הממוצע של השלמת הדור. בכל ניסוי נאספו נתוני טמפרטורה בסמיכות לצמחים כך שניתן היה להשתמש בנתונים להזנת המודל (ראה

תוצאות 2020 -2) ולבצע השוואה של זמן ההתפתחות מביצה לבוגר, בין התצפיות בניסויים לתחזיות המודל.

הטבלה הבאה מרכזת את תוצאות ניסויי השדה שנערכו:

פונדקאי	תאריך התחלה	חזרות	זמן התפתחות ממוצע (סטיית התקן), ימים	שרידות ביצה לבוגר	מספר ביצים ממוצע לנקבה
תפוח-אדמה*	17/5/2019	6	-	-	-
בטטה	4/7/2019	4	21.02 (1.08)	21.9%	12.18
אבטיח	29/8/2019	9	24.44 (0.53)	20.4%	5.05
שעועית	7/10/2019	13	23.4 (0.4)	31.9%	8.51
כרוב-ניצנים**	3/5/2020	12	27.88 (1.07)	42%	12.9
עגבנייה	31/5/2020	10	24.88 (1.03)	51%	8.5

טבלה 2 – סיכום תוצאות ניסויי ההתפתחות/שרידות שנערכו בחוות המטעים במהלך השנים 2019-2020. קודם להתחלת הניסוי, האוכלוסיות עברו תקופת אדפטציה של לפחות שלושה דורות לפונדקאי הנבחן. *בעונת 2019, נגרם נזק כבד לצמחי תפוח-האדמה בעקבות האילוח והטמפרטורות הגבוהות ששררו בבית הרשת. לכן, לא התאפשר לקבל אומדן מהימן ממספיק חזרות. לאחר מכן בוצעו התאמות על מנת להבטיח את הצלחת הניסויים הבאים - נפרסה רשת צל על מבנה בית-הרשת והוגדל מספר החזרות. בעונת 2020, לא בוצע לצערנו, ניסוי חוזר בתפוח-אדמה. הניסוי תוכנן להתבצע בתחילת האביב (במקביל לתקופת הגידול של הפונדקאי בשדות) אך לא יצא לפועל עקב מגבלות סגר הקורונה. **למרות שבהצעה המקורית נכתב שיבוצעו ניסויי שדה בכרובית וברוקולי, בחרנו לבסוף לבצע את הניסויים בכרוב-ניצנים כנציג משפחת המצליבים לאור התאמתו לגידולי השדה בעמק החולה והקרבה הגנטית הגדולה בין הכרובית, הברוקולי וכרוב הניצנים. שינויים אלה דווחו בדו"ח המסכם של שנת המחקר 2020. בנוסף, כל ניסויי השדה והמעבדה שנערכו העידו על כך שהמודל הינו חסין (Robust) ואיננו רגיש לשלב בעונה, הצמח הפונדקאי (כל הצמחים הרלוונטיים המגודלים בעמק החולה נחשבים כפונדקאים מצוינים של הכנימה) או המיקום הגאוגרפי. לכן, ובהתחשב גם בנסיבות שפורטו למעלה, קיבלנו החלטה שאושרה ב-2020 כי לא נדרשים ניסויי שדה נוספים.

2020 – 1. ניסויי מעבדה

מכיוון שניסויי השדה אינם מכסים את כל טווח הנתונים האפשרי מבחינת המצב האקלימי, ביצענו ניסויי התפתחות באינקובטור בו ניתן לשלוט בטמפרטורה. האינקובטור מסוגל לקבל כקלט סדרות טמפרטורה (בתדירות שעתית) ולייצר משטרי אקלים שונים (כולל משטרים קיצוניים המדמים את גלי חום). כך התאפשר לנו לבחון את תגובת כע"ט והמודל גם לתנאים אלו.

לצורך כך, ייצרנו סדרות טמפרטורה המייצגות אירועי קיצון מסוג גלי חום, בהתבסס על נתוני טמפרטורה אשר נמדדו בתחנת כפר בלום בעשר השנים האחרונות. את הגדרתנו לגלי חום ביססנו על ההגדרה של al. Kuglitsch et al. (2010): גל חום הוא רצף של שלושה ימים רצופים או יותר, שבהם טמפרטורות המינימום והמקסימום היומיות גבוהות מהאחוזונים ה-95% (של טמפרטורת מינימום ומקסימום) בתנאי האקלים המקומי. באנליזה שבוצעה זוהו בכפר בלום בין 0-2 אירועי גל חום בכל שנה. בחרנו להתמקד בגל חום שהתרחש במאי 2020, ועל בסיסו לבצע את הניסויים באינקובטור.

על מנת להעריך בצורה מיטבית את השפעת גל-החום על ההתפתחות, ביצענו ניסויים משני סוגים - האחד, ניסוי בו נעשה שימוש בסדרה סינטטית של טמפרטורות של יממה ממוצעת לתקופה, כלומר סדרה זו לא כוללת גל חום. נתוני הטמפרטורה של סדרה זו הוזנו לאינקובטור וחזרו על עצמם כל יום לאורך כל תקופת

הניסוי (עד לסיום ההתפתחות של דור אחד). בניסויים מהסוג השני, שילבנו את גל החום שנמדד במאי 2020 בתוך הסדרה הסינטטית שהוזכרה מעלה. גל החום שולב פעם אחת בתחילת תקופת ההתפתחות (ימים 2-10 של הניסוי) ופעם אחת באמצע תקופת ההתפתחות (ימים 11-19 של הניסוי). קצב ההתפתחות הממוצע שנמדד בניסויים בהם היה קיים גל חום, נמצא בהתאמה גבוהה לקצב ההתפתחות אשר נחזה על ידי המודל אשר קיבל כקלט את אותה סדרת טמפרטורות (טבלה 3). דבר זה העיד שוב כי המודל שפותח חוזה היטב את קצב התפתחות המזיק, הינו חסין, ונשאר מדויק גם בנוכחות גלי חום. לעומת זאת, יש לציין שהתקבלה אי התאמה בין תחזית המודל לבין זמן ההתפתחות הממוצע שנצפה בניסוי מהסוג הראשון אשר בוצע תוך שימוש חזרתי בסדרה סינטטית של טמפרטורות של יממה ממוצעת לתקופה. אנו משערים שאי התאמה זו היא תוצר לוואי "מלאכותי" של שימוש חוזר בסדרה קבועה הגורם להצטברות רציפה וקבועה (תמיד באותו הכיוון) של סטיות קטנות בין תחזיות המודל (המכויל לשונות האקראית הקיימת בשדה), לנתוני הניסוי באינקובטור בכל יום, כך שבסוף התהליך מתקבלת סטייה משמעותית. לא נמצא הבדל משמעותי בשיעורי ההישרדות של הנימפות (צורות החיים הלא בוגרות של הכנימה) בין שלושת הניסויים. לדעתנו, ממצא זה מצביע בעיקר על יכולתה של כע"ט להתמודד בצורה טובה מאוד עם מצבי אקלים קיצוניים. עובדה זו אינה מפתיעה לאור התפוצה הגיאוגרפית והעונתית של כע"ט, ובאופן ספציפי של המין MEAM1 הנפוץ באזורנו ומתרבה באין מפריע לאורך כל חודשי הקיץ החמים בישראל.

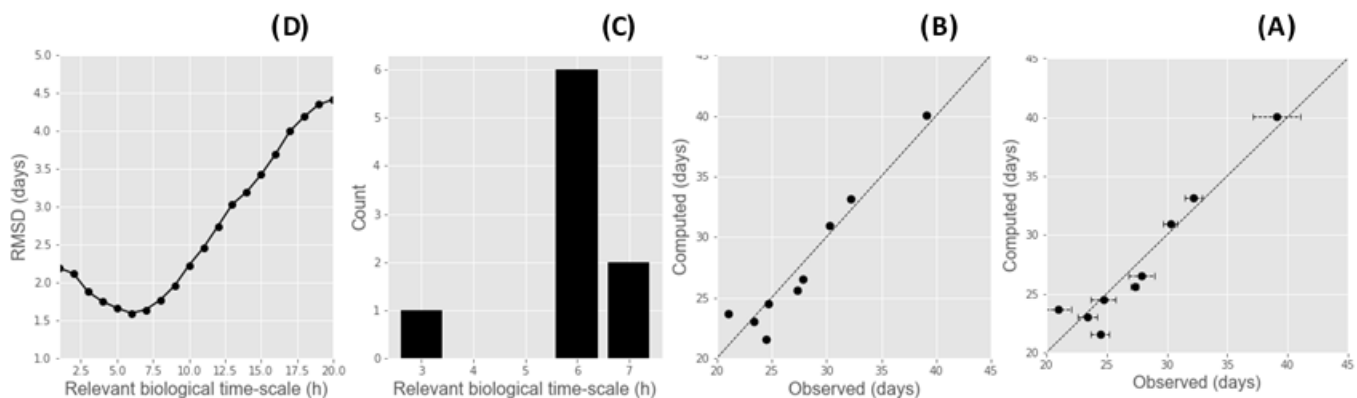
	סוג הניסוי	טמפרטורה מוצעת בניסוי (סטיית התקן), ימים	זמן התפתחות ממוצע (סטיית התקן), ימים	תחזית על פי המודל (ימים)	מספר ביצים ממוצע ממוצע לנקבה	שרידות ביצה לבוגר
1	סדרה סינטטית של יממה ממוצעת	23.47, 5.05	29.72, 0.46	22.5	3.6	0.59
2	גל חום מוקדם	25.37, 6.64	24.83, 0.62	23.7	6.2	0.85
3	גל חום מאוחר	25.37, 6.64	24.93, 0.61	23.7	7.3	0.76

טבלה 3 – סיכום תוצאות ניסויי ההתפתחות/שרידות שנערכו באינקובטור על מנת לבחון את השפעת סדרות טמ"פ הכוללות גל חום על ביצועי כע"ט ותחזיות המודל. קודם להתחלת הניסוי, האוכלוסיות עברו תקופת אדפטציה של לפחות שלושה דורות לפונדקאי הנבחן (כרוב-ניצנים).

2020 - 2. פיתוח סופי של המודל לחיזוי דינמיקת האוכלוסיות של כע"ט

לאחר שהשלמנו את ניסויי השדה, הרחבנו וסיימנו את עבודת הכיול של המודל. בתום האופטימיזציה התקבלה התאמה טובה בין תוצאות הניסויים והערכים החזויים של המודל ($RMSD=2.18$ days, bias=1.18 days, איור 1A). עם זאת, החלטנו לבדוק את השפעתו של פרמטר חדש במערכת- (RBTS) Relevant Biological Time Scale. באופן כללי, הפרמטר מתאר את מספר השעות שעבורן יחושב

ממוצע הטמפרטורה עבור כל נקודות הזמן המועברות למודל כקלט. כך למשל, אם נגדיר $R BTS = 3$, עבור השעה 12:00, המודל יזן בערך הממוצע של הטמפ' בין השעות 09:00-12:00 ועבור השעה 13:00, המודל יזן בערך הממוצע של הטמפרטורה בין השעות 10:00-13:00. כך מתקבלים עבור כל יממה 24 ערכי טמפרטורה, שכל אחד מהם הוא ממוצע הטמפרטורה של מספר שעות אחורה. הוספת הפרמטר למערכת וחקירת הרגישות אליו, גילתה ערך אופטימאלי של 6 שעות אשר שיפר את ביצועי המודל ($RMSD = 1.59$ days) בצורה משמעותית (איור 1B-D). ברצוננו לציין כי מדובר בתוספת חדשנית למודל (לא מצאנו שימוש קודם בספרות) ה"לכדת" כנראה בצורה מדויקת מחזורים פיזיולוגיים בכנימה הנובעים למשל מקצב הפירוק של חלבונים או סוכרים אלוהוליים המיוצרים בזמן עקת חום ונדרש זמן של כ-6 שעות עד להיעלמותם.

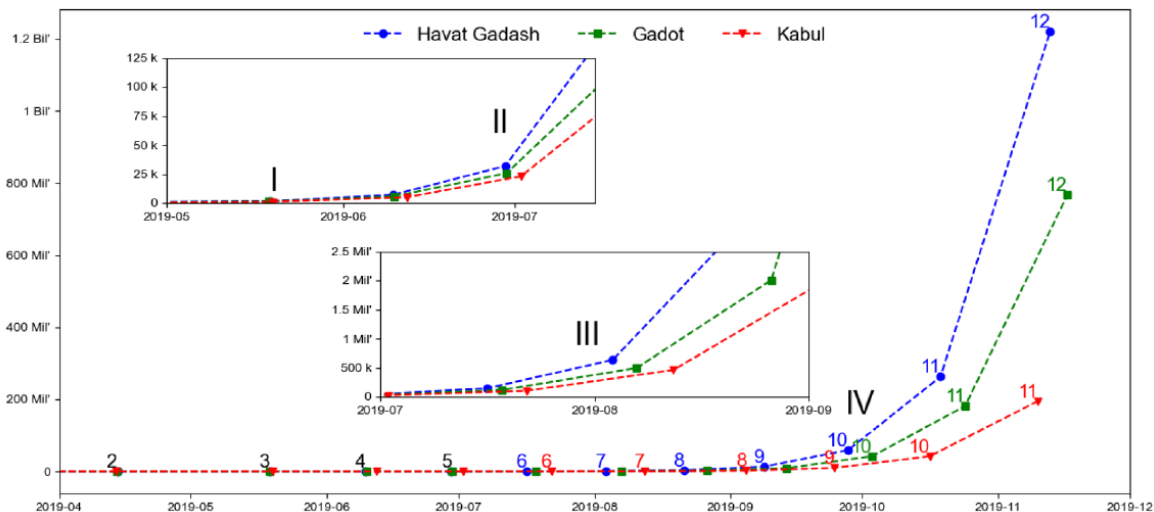


איור 1: תוצאות כיול המודל (פירוט מופיע במאמר שפורסם, Neta et al. 2021). (A) זמן ההתפתחות המדוד בניסויי שדה כנגד תוצאת החיזוי של המודל המקורי (רזולוציה שעתית), (B) זמן ההתפתחות המדוד בניסויי שדה מול תוצאות המודל עם הפרמטר $R BTS = 6$, (C) בדיקת רגישות החיזוי לפרמטר $R BTS$ בשיטת Leave-One-Out, (D) בדיקת רגישות החיזוי לפרמטר $R BTS$ על ידי שימוש במדד Root Mean Square Difference (RMSD).

2020 - 3. בדיקת נתוני הסימולציה מהמודל מול תצפיות פקחיות (תוספת שלא הופיעה בתכנית המחקר)
 במהלך עונת הגידול אביב-קיץ 2019 נאסף מידע אודות תצפיות כע"ט משלוש פקחיות מזיקים בעמק החולה. הפקחיות התבקשו לתאר על בסיס שבועי את תמונת המצב של אוכלוסיית הכע"ט בשטחים בהן הן עובדות. השדות המדווחים נבחרו לפי קרבתם לתחנה מטאורולוגית של מו"פ צפון או של השירות המטאורולוגי. התצפיות תועדו על מנת לבצע השוואה למודל המבוסס על התצפיות המטאורולוגיות של התחנות הנבחרות בעמק החולה (המודל פורט בסעיף הקודם). קשרי המחקר עם הפקחיות תרמו גם הם בצבירת הניסיון והידע לגבי האפקליקטיביות של המודל ככלי תומך החלטה במערכות חקלאיות (ראה תוצאות בשנת 2021).

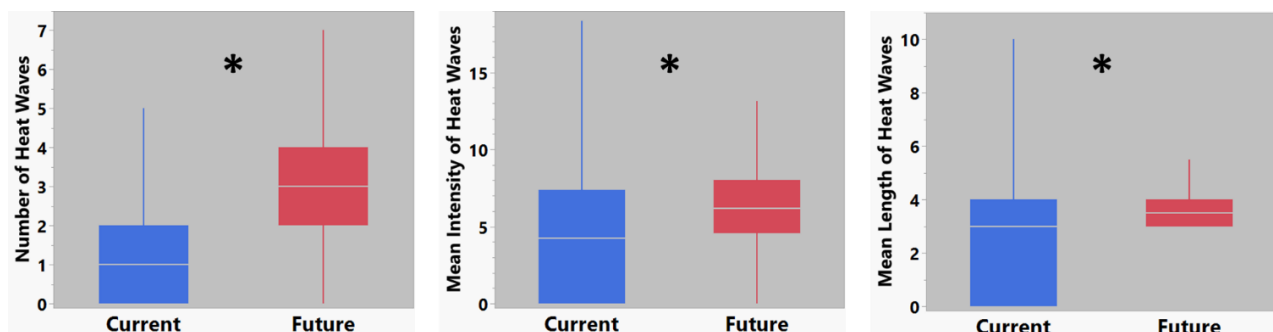
באיור 2 מסוכמות בהכללה התצפיות שהתקבלו מהפקחיות לאורך העונה. בתחילת העונה, לאורך חודשי אפריל-מאי-יוני נצפו כמויות נמוכות של מעופפים (כנימות בוגרות) ולא נעשו פעולות מנע. בחודשים אלו המודל חזה התקדמות עד הדור השלישי-רביעי. רק בתחילת חודש יולי, יחד עם החיזוי להתחלת דור מספר 5 במודל, התייצבו הדיווחים על אוכלוסיות בוגרים משמעותיות יותר אשר גרמו להחלטה על ביצוע

ריסוסים כנגד כע"ט. לאחר מכן, המשיך עליית תחזית גודל האוכלוסייה, לווה בדיווחים חוזרים ונשנים על לחץ אוכלוסיות משמעותי בהרבה מהגידולים ועל איבוד יעילות הטיפולים הכימיים. המודל חזה בסה"כ 12 דורות עבור רוב התחנות. בסיום העונה ביקשנו מהפקחיות לסכם את העונה באופן כללי: עלה כי הופעת הכנימות הייתה יחסית מאוחרת מניסיון הקודם ובעיקר כי לחץ האוכלוסיות בשדות היה גבוה מהרגיל. יש לציין שהמודל שפיתחנו חזה במדויק את ההגעה המאוחרת של כע"ט לאיזור עמק החולה בשנת 2019 וכן את הזמן הרלוונטי (דור 5) להתחלת הטיפולים כנגדה. ממצא זה היווה אישור לכך שהכלי שפותח יהיה רלוונטי ושימושי ויאפשר ניהול מושכל של המאמצים להתמודד כע"ט לאורך העונה.



איור 2 – הרצת המודל המשלב בין פונקציות החזות את קצב ההתפתחות, ההטלה והשרידות של כע"ט לאורך עונת הגידול 2019 (התחלת הרצה ב- 1.1.2019) עבור שלוש תחנות מטאורולוגיות: כבול (קו אדום), גדות (קו ירוק) וחוות גד"ש (קו כחול). מוצגים, זמן ההופעה וגודל האוכלוסייה של כל דור (מהדור השני) על פי תחזית המודל, ודיווחי פקחיות המזיקים. (I) תחילת פעילות משמעותית של כע"ט בשדה בשנת 2019 הייתה בשליש השלישי של חודש מאי. (II,III) גידול משמעותי (שני סדרי גודל) התרחש בחודשים יולי-אוגוסט (דור 5-7) ובהתאמה מלאה לדיווחי הפקחיות. (IV) ניתן לראות שההגעה המאוחרת של החורף בשנת 2019 (רק בחודש דצמבר נרשמה ירידה משמעותית בטמפרטורות) גרמה לכך שפעילות משמעותית של אוכלוסיות כע"ט נרשמה עד סוף חודש נובמבר 2019 (שוב, בהתאמה מלאה לדיווחי הפקחיות בשדה).

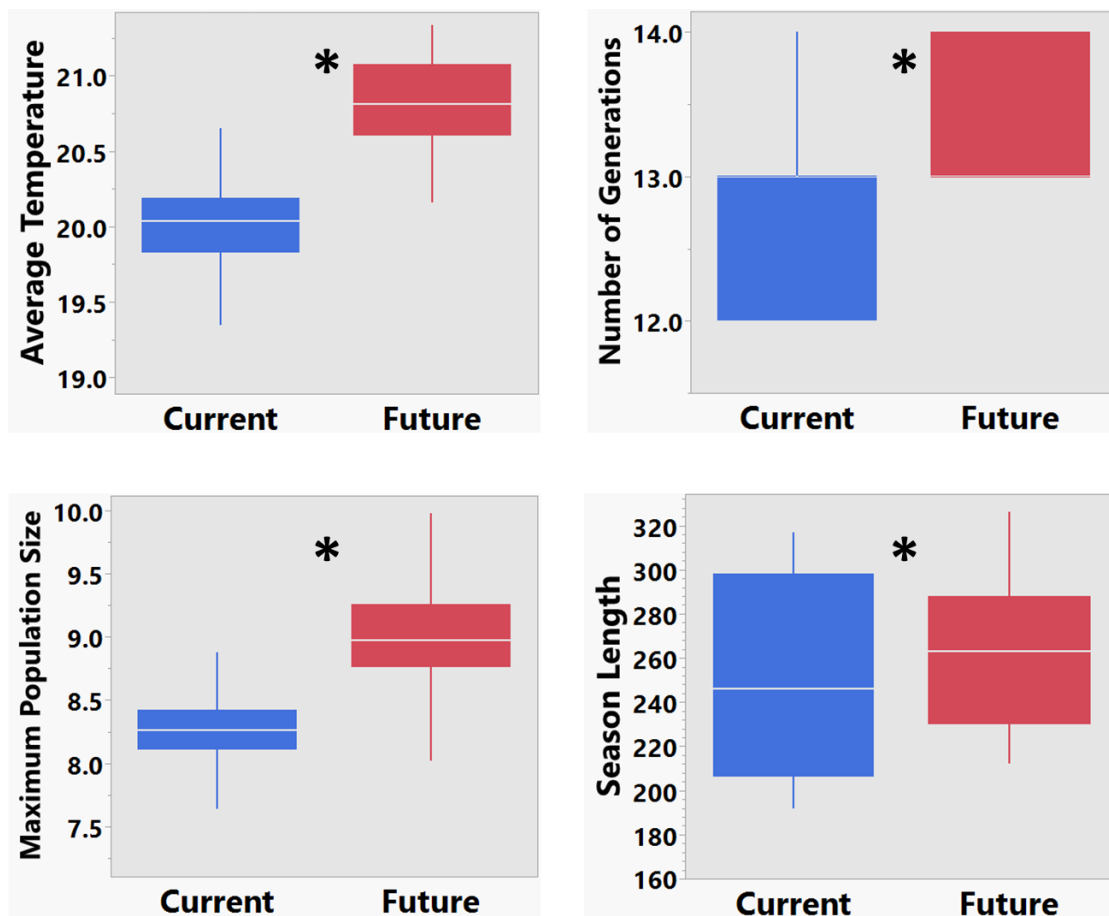
2021 – 1 זיהוי השינויים הצפויים בדינמיקה של אוכלוסיות כע"ט באזור עמק החולה בין האקלים הנוכחי לבין האקלים העתידי (אמצע המאה ה-21)



איור 3 - תהליך downscaling על בסיס מנגנון "מנוע מזג-האוויר" לנתוני אקלים נוכחי (Current) ועתידי (Future) לאומדן ממוצע מספר גלי החום בשנה, ממוצע עוצמת גלי-החום וממוצע אורך גלי-החום. גל-חום הוא רצף של שלושה ימים רצופים או יותר, שבהם טמפרטורות המינימום והמקסימום היומיות גבוהות מהאחוזונים ה-95% (של טמפרטורת מינימום ומקסימום) בתנאי האקלים המקומי.

על מנת לבחון את השפעת שינויי האקלים על דינמיקת האוכלוסיות של כע"ט השתמשנו במסד נתונים של עשור מתחילת המאה ה-21 (הקרוי אקלים נוכחי, Current) ונתונים של עשור מאמצע המאה ה-21 (אקלים עתידי, Future). בדוגמה המוצגת באיור 3, נתוני האקלים העתידי מגלמים בתוכם את ההשפעה האפשרית של ריכוז גזי חממה באטמוספירה על האקלים בתרחיש ביניים (CMIP5, RCP4.5, BCC model). הנתונים המקוריים עברו תהליך downscaling על בסיס מנגנון "מנוע מזג-האוויר", ביחס לתחנת כפר בלום שבעמק החולה, כך שעבור כל שנה יצרנו 200 סדרות טמפרטורה אפשריות.

בניתוח התוצאות מבחינה אקלימית, סיכמנו עבור כל סוג נתונים את ממוצע מספר גלי החום בשנה, ממוצע עוצמת גלי-החום וממוצע אורך גלי-החום (איור 3 בעמוד הקודם). בכל שלושת המשתנים שנבדקו, נמצא כי הממוצע גבוה יותר עבור התרחיש העתידי, המתאר מציאות בה הרבה יותר גלי חום מתממשים, עוצמתם חזקה יותר והם גם ארוכים יותר. ההבדלים בממוצעים של כל המשתנים שנבדקו היו מאוד מובהקים סטטיסטית (במבחן One-way ANOVA, $P < 0.0001$).



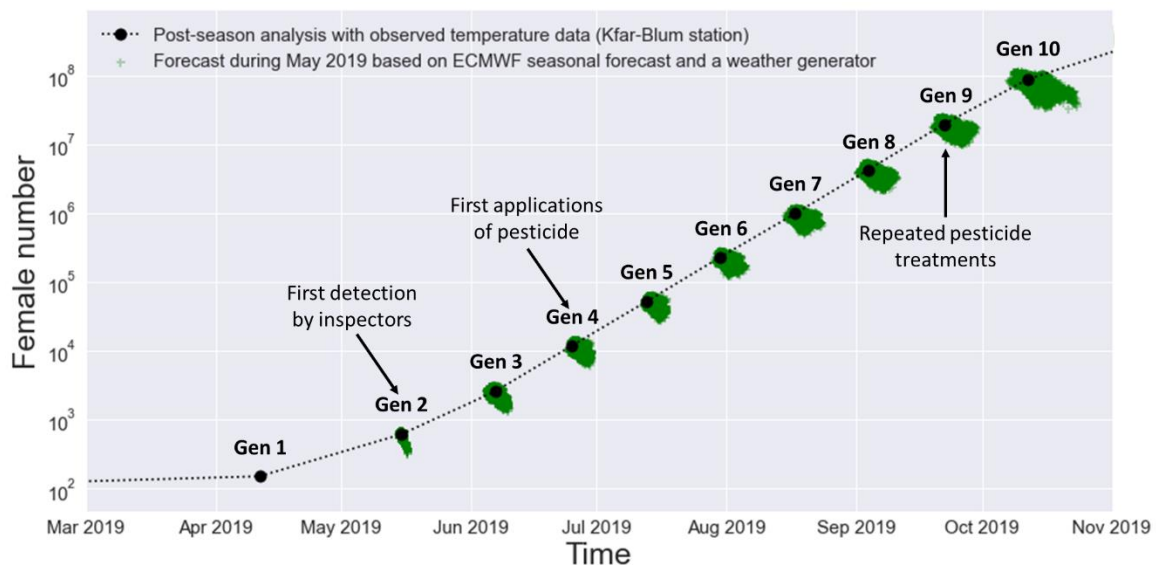
איור 4 – תוצאות הרצת מודל האוכלוסייה בתנאי תחילת (Current) ואמצע (Future) המאה ה-21. ניתן לראות את העלייה הצפויה בטמפרטורה הממוצעת, את העלייה במספר הדורות הממוצע שכע"ט צפויה להשלים במהלך עונת הגידול, את העלייה בממוצע גודל האוכלוסייה המקסימלי (סקלה לוגריתמית) בסיום העונה ואת העלייה בממוצע אורך העונה (מספר הימים בין הופעת הדור הראשון להגחת הדור האחרון של המזיק). הממוצעים חושבו עבור 200 סדרות טמפרטורה אפשריות בכל שנה על פני 10 שנים.

ההשפעה האפשרית של האקלים העתידי על דינמיקת האוכלוסיות של כע"ט נבחנה ביחס לאקלים הנוכחי בשלושה פרמטרים: גודל האוכלוסייה המקסימלי, אורך העונה (הזמן, בימים, מתחילת הדור השני ועד תחילת הדור האחרון), מספר הדורות המצטבר ולשם ההשוואה האקלימית, הטמפרטורה הממוצעת. התפלגות הנתונים מכל הסימולציות ובכל השנים (סה"כ 2000 סדרות נבחנות) מוצגת באיור 4 (בעמוד הקודם). התפלגות ממוצעי הטמפרטורה הממוצעת ממחישה את ההבדל החריף בין תנאי האקלים, בעיקר באמצעות ההפרש בין החציונים של שתי התקופות – כמעט מעלת צלזיוס אחת. שלושת מדדי האוכלוסייה משקפים את תוצאות ההבדלים בטמפרטורות הממוצעות: בכל אחד מהם ההתפלגות של המדד באקלים העתידי גבוהה יותר, כלומר בתרחיש העתידי המזיק ישהה באזור החקלאי לפרקי זמן ארוכים יותר, מה שיאפשר את ההתפתחות של דור נוסף בכל שנה ועקב כך גם לחץ גובר של אוכלוסיות כע"ט בסיום העונה, דבר היכול להשפיע מאוד על יכולת ההצלחה והרווחיות של גידולי הסתיו. יש לציין כי גם כאן ההבדלים בממוצעים של כל המשתנים שנבדקו היו מאוד מובהקים סטטיסטית (במבחן One-way ANOVA, $P < 0.0001$).

2021 – 2. פיתוח כלי חיזוי לזמן-אמת, חיזוי עונתי (בתחילת העונה) ותוך-עונתי

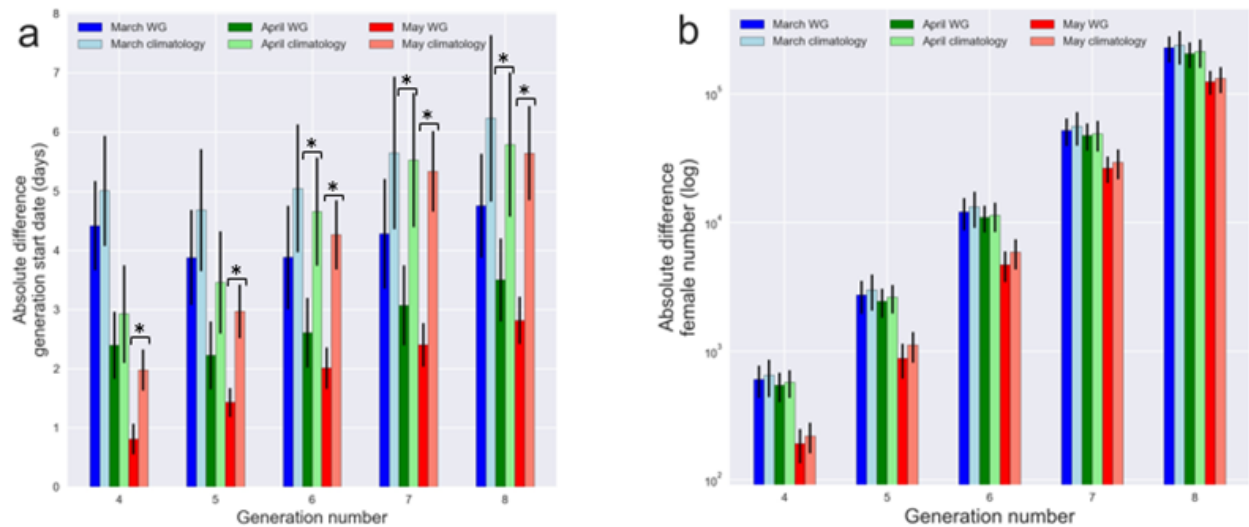
המטרה המרכזית של המחקר שלנו הייתה שילוב מערכת המודלים שפותחה בכלי שימושי ונגיש לכל, אשר מאפשר הן קבלת נתונים בזמן-אמת לגבי מצב המזיק בשטח והן קבלת תחזיות לגבי התנהגות אוכלוסיות המזיק בעתיד (חודשים קדימה). לשם כך, שילבנו נתונים ממודל חיזוי מזג אויר (ECMWF) ב"מנוע מזג אוויר" המבצע תהליך של downscaling סטוכסטי לנתונים אלו (ראה 2019 – 2), ועל בסיסם הפעלנו את מודל האוכלוסיות.

על בסיס מסד הנתונים של 2011-2020 יצרנו שלוש תחזיות עונתיות (עבור כל אחד ממועדי פרסום התחזית) עבור כל תחנה מטאורולוגית כלפיה בוצע תהליך ה-downscaling. נציין שבהרצת מודל האוכלוסיות, נתוני הטמפרטורה מהסדרות הסטוכסטיות (תוצרי "מנוע מזג האוויר") חוברו לנתונים שנרשמו בתחנה המטאורולוגית המתאימה החל מה-1 בינואר של אותה השנה ועד לתאריך פרסום התחזית. הערכת טיב התחזיות העונתיות התבצעה כנגד סימולציה המבוססת על נתוני הטמפרטורה שנמדדו בתחנה לאורך השנה כולה (אותה ניתן להריץ רק בסיום העונה אך מהווה מבחינתנו רפרנס למודל העונתי). כפי שניתן לראות בדוגמה המוצגת באיור 5 (עמוד הבא), השילוב בין המודל שפותח על מנת לתאר את דינמיקת אוכלוסיות המזיק לתחזיות ECMWF אשר עברו downscaling תוך שימוש ב"מנוע מזג האוויר" מאפשר לייצר תחזיות עונתיות יחסית מדויקות (חצי שנה קדימה) הן לעיתוי הדורות והן לגודל האוכלוסייה כאשר נעשה שימוש בתחזית העונתית המתפרסמת כבר בתחילת חודש מאי.



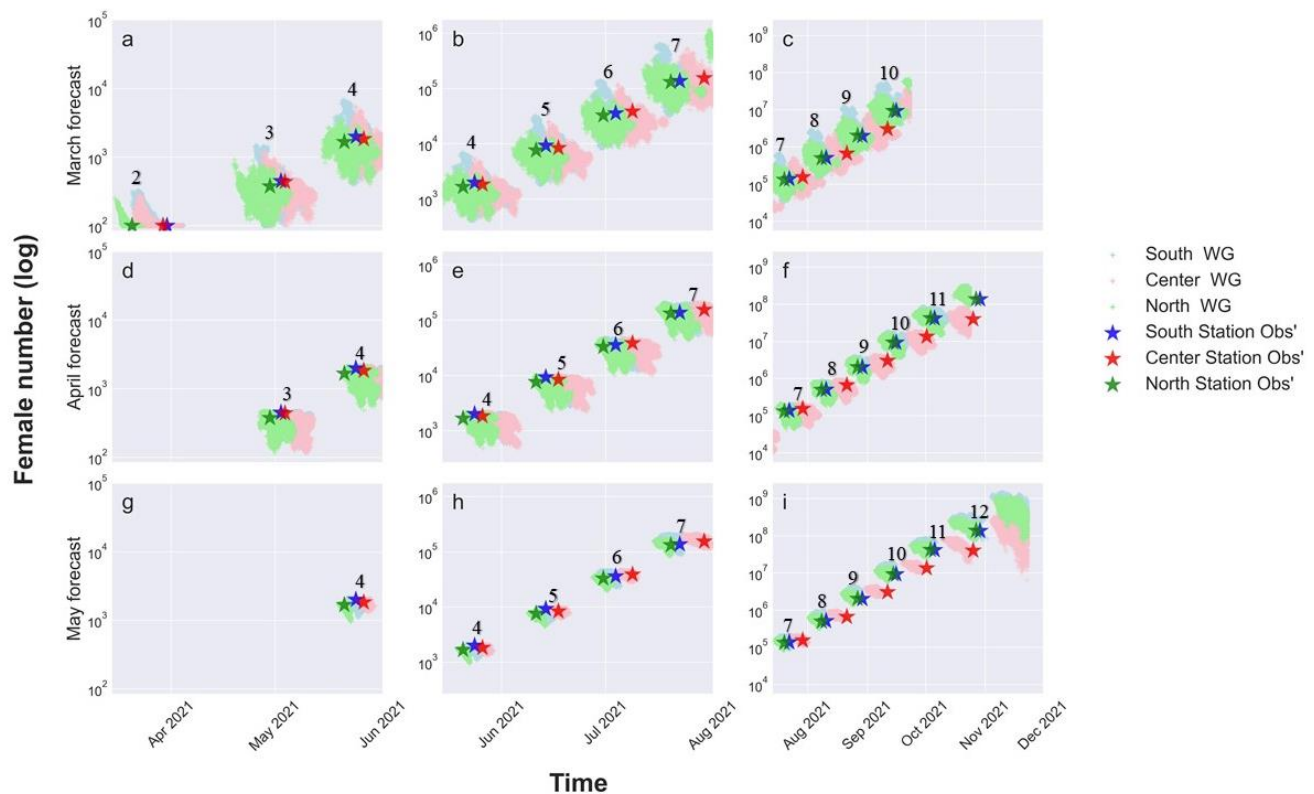
איור 5 - חיזוי עונתי של כע"ט המציג את גודל האוכלוסייה לאורך עונת הגידול 2019 עבור הדורות השונים (התחלת הרצה ב- 1.1.2019). יש לשים לב כי סקלת ציר Y היא לוגריתמית וכי הדור הראשון המתקבל לאחר החורף ממוספר באיור זה מופיע כדור 1 (מופיע כדור 2 בשאר האיורים). שילוב נתוני החיזוי העונתי של ECMWF יחד עם "מנוע מזג האוויר" מייצרים סדרה סטוכסטית של טמפרטורות חזויות לחצי שנה קדימה (2500 סדרות טמפרטורה אפשריות), ואלו מהוות קלט למודל האוכלוסיות. מודל האוכלוסיות מתואר ב- Neta et al. (2021). לבדיקת טיב החיזוי, המודל הורץ גם עם נתוני טמפרטורה מדודים אשר נרשמו בתחנת כפר-בלום בשנת 2019. בנוסף, האיור מראה התאמה גבוהה לדיווחי פקחיות המזיקים: תחילת פעילות משמעותית של כע"ט בשדה באמצע חודש מאי (דור שני). גידול משמעותי בחודש יולי (דור רביעי ובהתאמה לדיווחי הפקחיות). נוכחות גבוהה של המזיק בשדה בחודש אוקטובר (דור 9 ובהתאמה לדיווחי הפקחיות). ניתן גם לראות שהתחזית העונתית חוזה את ההגעה המאוחרת של החורף בשנת 2019 (רק בחודש דצמבר נרשמה ירידה משמעותית בטמפרטורות) ובעקבות זאת מספקת לחקלאי כבר בחודש מאי מידע כי פעילות משמעותית של אוכלוסיות כע"ט תתרחש בשדה עד חודש נובמבר 2019.

בשלב הבא, בחנו את ההפרש בגודל האוכלוסייה ובתאריך התחלת הדור בין הערך החיצוני של התחזיות המבוססות על תוצרי "מנוע מזג האוויר" עם החיזוי העונתי ובין הערך שחושב על בסיס נתוני התחנה, והשוונו אותם להפרש המתקבל מחיזוי המבוסס על סדרת טמפרטורה שעתית ממוצעת על פני העשור כולו (ממוצע קלימטולוגי). כדי לאפשר השוואה אמינה בין תחזית "מנוע מזג האוויר" לתחזית הממוצע הקלימטולוגי, חוברו גם נתוני תחזית זו לנתוני התחנה שנמדדו באותה שנה מה-1 בינואר ועד מועד פרסום התחזית. השוואות אלו כללו את הדורות 4-8 בלבד, מכיוון שתזמוני דורות אלו נכללים בתקופת התחזית של כל אחת מתקופות התחזיות שאיתן עבדנו (מרס-ספטמבר, אפריל-אוקטובר, מאי-נובמבר). במבחן א-פרמטרי חד גורמי (תחזיות מבוססות "מנוע מזג אוויר" WG , מול תחזיות מבוססות קלימטולוגיה $climatology$) מסוג Kolmogorov-Smirnov, אשר בוצע בכל דור באופן עצמאי, נמצא כי תחזיות זמן התחלת הדור המבוססות על "מנוע מזג האוויר" מדויקות יותר באופן מובהק ($P \leq 0.05$) עבור כל הדורות בתחזית חודש מאי, ועבור דורות 6,7,8 בתחזית חודש אפריל. לעומת זאת, בתחזיות לגבי גודל האוכלוסייה לא נמצא הבדל מובהק בין התחזיות המבוססות על "מנוע מזג האוויר" לעומת התחזיות הקלימטולוגיות (איור 6 בעמוד הבא).



איור 6 - הפרשי המדידה בתאריך התחלת הדור (a) ובגודל האוכלוסייה (b) של התחזיות המבוססות על "מנוע מזג האוויר" לעומת התחזיות הקלימטולוגיות, עבור הדורות 4-8, ובשכלול נתונים מהעשור 2011-2020, משלוש תחנות מטאורולוגיות ושלושה מועדי תחילת תחזית. עמודות בעלות צבע כהה מסמלות את ההפרש של תחזיות המבוססות נתוני "מנוע מזג האוויר", עמודות בהירות הן ההפרש של תחזיות מבוססות ממוצע קלימטולוגי.

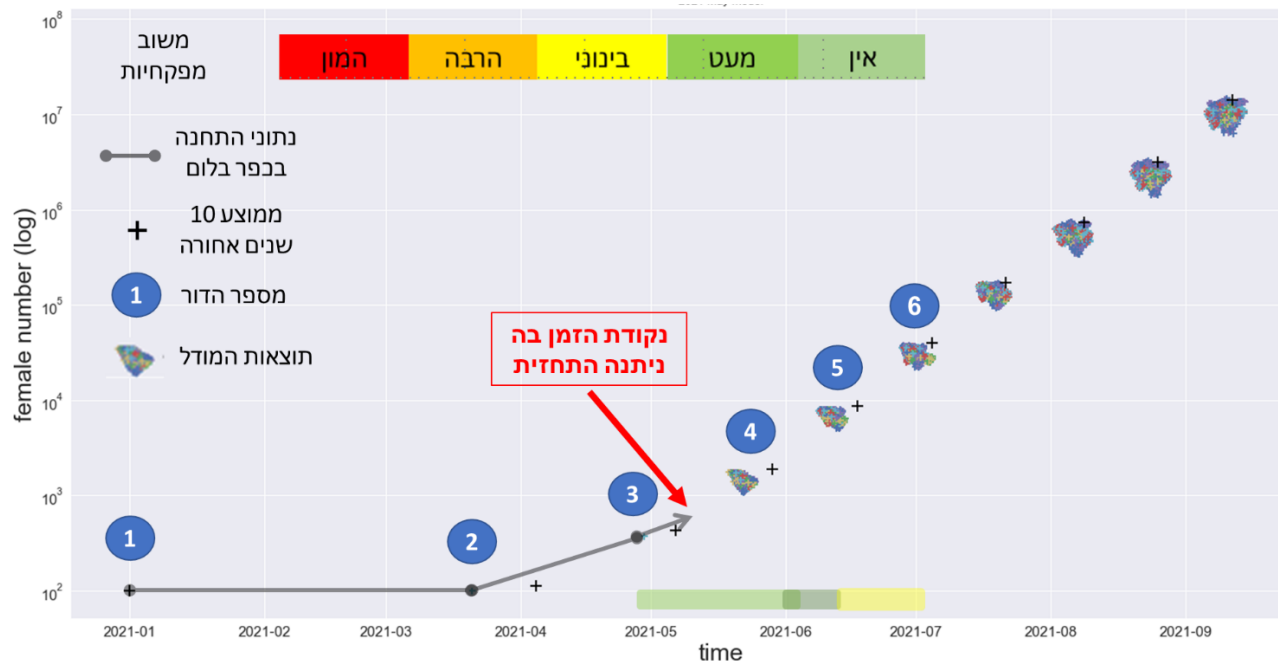
בעונת הגידול של 2021, הפעלנו את מערכת החיזוי בתצורה אופרטיבית בה החישובים ב"מנוע מזג האוויר" מתבססים על נתוני השנים 2011-2021, והתחזיות העונתיות מחושבות מחדש עבור כל תחזית המתפרסמת בחודשים מארס, אפריל ומאי. עבור כל תחזית, עודכן הקלט בהסתמך על הנתונים שנמדדו בתחנות מה-1 בינואר ועד למועד עדכון התחזית. בנוסף, בשנת 2021 אספנו תצפיות לגבי מצב המזיק מפקחיות מזיקים בעמק החולה, על פי סקאלה קטגורית שהוגדרה יחד עם המדענים: ציון 0- אין כנימות, ציון 1: נמצאו 1-5 פרטים בוגרים למ"ר, 2: נמצאו 6-10 פרטים בוגרים למ"ר, 3: 11-30 בוגרים למ"ר, ו-4: יותר מ-30 בוגרים למ"ר. באיור 7 מוצגות כל התחזיות אשר חושבו עבור שלושת התחנות (בצבעים השונים) ובשלושת תזמוני פרסום התחזית (בשורות), בחלוקה של הזמן (בטורים) המאפשרת לראות את הדינמיקה בכל תקופה על ידי שינוי בסקאלת ציר ה-Y (גודל האוכלוסייה בסקאלה לוגריתמית). כל "ענן" מסמל את תוצאות החיזוי הסטוכסטי של "מנוע מזג האוויר" וכל "כוכב" את נתוני התחנה (אנליזה הניתנת לביצוע עם סיום העונה בלבד). דיווחי הפקחיות הראשונים על רמה נמוכה של פרטים בוגרים החלו בחודש אפריל, יחד עם התחזית להתחלת הדור השלישי. רמת הנגיעות המדווחת המשיכה לעלות במתינות עד יולי, שבו דווחה עלייה משמעותית ברמת הנגיעות ואף הומלצו טיפולים כימיים כנגד כע"ט. זאת בצמידות לתחזית המודל על פתיחת הדור החמישי. ירידה קלה בלחץ הנגיעות דווחה לאחר מכן, כנראה עקב הצלחת הטיפולים הכימיים. החל מחודש אוגוסט ועד ספטמבר, לא הועברו דיווחים עקב הפסקה בגידול פונדקאים מתאימים בעמק החולה. עם זאת, ניכר כי אוכלוסיות כע"ט המשיכו לשגשג על פונדקאים הגדלים בבר, כך שעם חזרת הדיווחים בגידולי הסתיו, נרשמה נגיעות גבוהה. זאת רוסנה באמצעות סבבי ריסוס נוספים, עד שבתחילת נובמבר נרשמה ירידה ואף איפוס הנגיעות בדצמבר, ככל הנראה עקב הטמפרטורות הנמוכות.



איור 7: חיזוי דינמיקת האוכלוסיות של כע"ט בשנת 2021. תוצאות החיזוי המתבסס על "מנוע מזג האוויר" מתוארות ב"עננים" עבור שלוש תחנות בעמק החולה (כחול- איילת השחר, אדום- כבול וירוק- כפר בלום), והתוצאות המתבססות על נתוני התחנה בכוכבים. שורה עליונה (a-c) תחזית חודש מרץ. שורה אמצעית (d-f) תחזית חודש אפריל. שורה תחתונה (g-i) תחזית חודש מאי.

ברצוננו לציין שבמידה רבה, כלי החיזוי שפותח כבר נגיש ככלי תומך החלטה למקבלי ההחלטות בזמן אמת. בסוף חודש אפריל 2021 קיימנו פגישה עם כל פקחיות המזיקים בגד"ש עמק החולה. בעקבות פגישה זו, ניהלנו קשר רציף עם הפקחיות כך שבכל שבועיים נשלחה אליהן תמונת המצב של התחזיות לגבי דינמיקת האוכלוסיות, כולל האיור המעודכן ביותר של התחזיות (בכל שבועיים עדכנו את החיזוי של המודל באמצעות נתוני התחנה המטאורולוגית של השבועיים האחרונים) וכמה משפטים המתארים את התקדמות האוכלוסייה והצפי לשבועות הקרובים. כפי שפורט למעלה, הפקחיות מצידן השיבו על סקר קצר שכלל את השאלות: מהי רמת הנגיעות? האם המלצת על ריסוסים ספציפיים נגד כע"ט? והאם המלצת/בוצעו ריסוסים כנגד מזיקים אחרים? כפי שניתן לראות מאיור 8 (איור עדכון אשר נשלח לפקחיות המזיקים ב-13.5.22), כלי החיזוי שפותח לא רק שחזה באופן מדויק את הזמן בו פקחיות המזיקים התחילו לדווח על נוכחות המזיק בשדה (דור 3) אלא גם נתן התראה מדויקת חודשיים מראש על זמן הופעת הדורות החמישי והשישי בחודש יולי אשר דרשו טיפול בריסוסים כימיים על מנת להוריד את רמת המזיק בשדה אל מתחת לרמת הנזק הכלכלי. על סמך ניסיון מוצלח זה אנו בונים כעת אתר אינטרנט שיהיה נגיש

לכל חקלאית/ת ופקח/ית מזיקים בעמק החולה ויאפשר קבלה של תחזית עונתית (7 חודשים קדימה במתכונת דומה לזו המוצגת באיור 8) לאורך כל עונת הגידול הקרובה.



איור 8 – תחזית מעודכנת שנשלחה בתאריך 13.5.21 (על פי תחזית חודש מאי) לפקחיות המזיקים בעמק החולה. כפי שניתן לראות באיור, התחזית חוזה באופן מדויק חודשיים מראש את זמן ההופעה של הדור החמישי והשישי ואת גידול האוכלוסייה הצפוי ומאפשרת לפקחית ולחקלאי להיערך בהתאם. יש לשים לב כי תמונת המצב של המזיק בשדה המופיעה בתחזית האזור היא מידע שניתן להוסיף רק ברטרנספקטיבה בחודש יולי.

דיון

מידת החסינות של מערכות חקלאיות לשינויי אקלים צפויה להשפיע במידה רבה על הסיכויים להבטחת ביטחון תזונתי עולמי (Anderson et al. 2020). האתגר המרכזי הוא השגת יכולת לייצר מספיק מזון איכותי לאוכלוסייה עולמית הולכת וגדלה, תוך הבטחת השפעה מינימלית על הסביבה ושמירה על הרווחיות (Lykogianni et al. 2021). כדי לאפשר עמידה באתגר זה, גובשה בעשור הקודם תפיסה חדשה, "חקלאות רגישה-לאקלים" ("Climate-Smart Agriculture"; FAO, 2010), המנחה כיצד לבצע שינויים במערכות חקלאיות על מנת להבטיח יצרנות רגישה-לסביבה בתנאי אקלים משתנה. אולם, בתפיסה זו קיימים כיום חסרים מכיוון שהיא איננה מציעה אסטרטגיה ברורה להתמודדות עם הגידול הצפוי בתדירות ועוצמה של התפרצויות מזיקים חקלאיים (FAO, 2017). בפרט, עולה הצורך לפתח בדחיפות אסטרטגיות חדשות להפחתת השימוש בחומרי הדברה, הגורמים להשפעות שליליות על הסביבה ועל האדם (Larsen et al. 2019). סקירה שנערכה לאחרונה הצביעה על הזיהום הכימי (הכולל חומרי הדברה) כגורם השני בחשיבותו לירידה העולמית בגודל ומגוון אוכלוסיות חרקים (Sánchez-Bayo and Wyckhuys 2019). יתר על כן, יישום חומרי הדברה גורם לזיהום מים וקרקע והשפעות שליליות על בריאות האדם, כולל חשיפה כרונית לשאריות חומרי הדברה במזון (Zikankuba et al. 2019).

בעבודת מחקר זו התמקדנו בכנימת עש הטבק (כע"ט) *Bemisia tabaci* הנחשבת לאחד המזיקים החקלאיים העולמיים הגרועים ביותר בכל הזמנים (De Barro et al. 2011). כע"ט מסכנת את היכולת להבטיח מזון (Food security) בעולם המתפתח, כולל אפריקה, אסיה, ודרום אמריקה. היא גורמת לנזק חמור ליותר מ-600 מינים של צמחים, ישירות על ידי הזנה והפרשת טל-דבש, ובעקיפין על ידי העברת יותר מ-200 וירוסים של צמחים (Brown et al. 1995, Navas-Castillo et al. 2011). כמו חרקים מוצצי שיפה אחרים, אוכלוסיות כע"ט צפויות להיות מושפעות מאוד מתהליך ההתחממות הגלובלית בשל זמני ההתפתחות הקצרים, הרבייה הפרתנוגנטית, כושר הרבייה הרב והיכולת להקים מספר רב של דורות בשנה (Zidon et al. 2016). תחזית זו אושרה במחקר זה (איור 4). שלושה מדדי אוכלוסייה שנבדקו הצביעו על כך שבתרחיש העתידי עונת הפעילות של כע"ט תתארך, מה שכנראה יאפשר למזיק ליצר דור נוסף בכל שנה ועקב כך לחץ האוכלוסיות ביחוד בעונת הסתיו צפוי לגדול דבר העלול לגרום להתפרצויות בלתי מבוקרות.

במהלך המחקר פיתחנו כלי עבודה חדשני המשלב בין תחזיות מזג-אוויר עונתיות (שבעה חודשים קדימה) מאנסמבל של המודל האירופי ECMWF, נתוני טמפרטורה שנמדדו בפועל בתחנה מטאורולוגית ומודלים מתמטיים החוזים את ההתנהגות של אוכלוסיות כע"ט בטמפרטורות שונות, תוך שימוש בשיטות של data-science המקשרות בין מודל ECMWF לחיזוי בנקודה בתהליך של Downscaling סטוכסטי ("מנוע מזג אוויר"). תוצרי התהליך, סדרות טמפרטורה עתידיות, משמשות כקלט במודל דינמיקת האוכלוסיות אשר פותח וכויל (תוך שימוש בנתונים שאספנו בניסויים שערכנו בשדה) במהלך שתי השנים הראשונות של עבודת המחקר. במהלך העבודה הראנו כי מודל האוכלוסיות שפותח מתאר היטב את דינמיקת המזיק בשדה (Neta et al. 2021), וכי שילוב תחזיות ECMWF עם "מנוע מזג האוויר" מאפשר לייצר תחזיות עונתיות יחסית מדויקות (חצי שנה קדימה) הן לעיתוי הדורות והן לגודל האוכלוסייה החל מחודש מאי (איורים 5, 7 ו-8, מאמר המסכם את פרק זה נמצא בכתיבה ועתיד להישלח לשיפוט במהלך שנת 2022).

לסיכום, על פי המפורט בפרק התוצאות ניתן לראות כי עבודת המחקר שבצענו בין השנים 2019-2021, עמדה בכל היעדים שהוגדרו וזאת למרות הקשיים הרבים שהציבה בפנינו מגפת הקורונה. אין לנו ספק שמתן המידע אשר מספק כלי החיזוי שפותח לחקלאי יהווה פריצת דרך ביכולת ההתמודדות העתידית עם המזיק. ניתן יהיה לתכנן את הזריעה והשתילה של הגידולים על מנת לחמוק עד כמה שניתן מאוכלוסיות גדולות של המזיק כאשר הצמחים בתחילת ההתפתחות, ניתן יהיה לקבל החלטה מושכלת על מחזור הגידולים המיטבי. ניתן יהיה לתכנן ביעילות את תכנית פיקוח המזיקים ולקבל החלטות מושכלות על מדיניות הריסוסים וגם לעקוב על יעילותה, וכמו שהוזכר למעלה, ניתן יהיה לקבל הערכה מושכלת על הסיכויים לקבלת אוכלוסיות גדולות של הכנימה בסוף העונה ולהעריך בהתאם הן בבחירת הגידולים המתוכננים לתקופה זו והן בממשק המשולב להתמודדות עם נזקי המזיק. ברצוננו לציין כי כלים תומכי החלטה המאפשרים תכנון עונתי ותת-עונתי לניהול מושכל וידידותי לסביבה של אוכלוסיות כע"ט אינם קיימים כיום ומדובר בפיתוח חדשני אשר על פי הידוע לנו לא קיים במקום אחר בארץ או בעולם.

1. Anderson, R., Bayer, P.E. and Edwards, D., 2020. Climate change and the need for agricultural adaptation. *Current Opinion in Plant Biology*, 56: 197-202.
2. Brown JK, Frohlich DR, Rosell RC. 1995. The sweetpotato or silverleaf whiteflies: biotypes of *Bemisia tabaci* or a species complex? *Annual Review of Entomology* 40:511-534.
3. De Barro PJ, Liu SS, Boykin LM, Dinsdale A. 2011. *Bemisia tabaci*: a statement of species status. *Annual Review of Entomology* 56:1-19.
4. FAO, 2010. "Climate-Smart" agriculture: policies, practice and financing for food security, adaptation and mitigation. FAO, Rome, Italy.
5. FAO, 2017. The future of food and agriculture—Trends and challenges. Annual Report, 296. FAO, Rome, Italy.
6. Kuglitsch, F. G., Toreti, A., Xoplaki, E., Della-Marta, P. M., Zerefos, C. S., Türkeş, M., & Luterbacher, J. (2010). Heat wave changes in the eastern Mediterranean since 1960. *Geophysical Research Letters* 37: L04802.
7. Larsen, A.E., Patton, M. and Martin, E.A., 2019. High highs and low lows: Elucidating striking seasonal variability in pesticide use and its environmental implications. *Science of the Total Environment*, 651: 828-837.
8. Lykogianni, M., Bempelou, E., Karamaouna, F. and Aliferis, K.A., 2021. Do pesticides promote or hinder sustainability in agriculture? The challenge of sustainable use of pesticides in modern agriculture. *Science of The Total Environment*, 148625.
9. Sánchez-Bayo, F. and Wyckhuys, K.A., 2019. Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biological Conservation*, 232: 8-27.
10. Navas-Castillo J, Fiallo-Olivé E, Sánchez-Campos S. 2011. Emerging virus diseases transmitted by whiteflies. *Annual Review of Phytopathology* 49:219-248.
11. Neta, A., Gafni, R., Elias, H., Bar-Shmuel, N., Shaltiel-Harpaz, L., Morin, E. and Morin, S., 2021. Decision support for pest management: Using field data for optimizing temperature-dependent population dynamics models. *Ecological Modelling*, 440: 109402.

12. Zidon R, Tsueda H, Morin E, Morin S. 2016. Projecting pest population dynamics under global warming: the combined effect of inter-and intra-annual variations. *Ecological Applications* 26:1198-1210.
13. Zikankuba, V.L., Mwanyika, G., Ntwenya, J.E. and James, A., 2019. Pesticide regulations and their malpractice implications on food and environment safety. *Cogent Food & Agriculture*, 5: 1601544.