

דוח מדעי מוגש למועצת החלב

נושא המחקר : התמודדות עם השפעת שינויי אקלים ועקת חום בענף החלב בישראל

מחקר מספר 118-0064-2022

חוקרים : פרופ' איל קמחי, ד"ר רם פישמן, ד"ר גבי עדין, ד"ר יניב לבון

תקציר

בעוד שחידושים מתודולוגיים ומסדי נתונים גדולים ומפורטים יותר שיפרו את ההבנה של האופן שבו מזג אוויר קיצוני משפיע על הייצור החקלאי, עדיין קיימים פערי ידע מתמשכים לגבי ענפים שלא נחקרו לעומק ולגבי פוטנציאל ההסתגלות שלהם. אנו משתמשים בנתונים יומיים על ייצור החלב של 130,000 פרות במשך 12 שנים בישראל, ובנתונים מסקר המספק מידע על אמצעי הסתגלות שבהם נעשה שימוש, כדי להעריך את ההשפעות העכשוויות והמושהות של עקת חום על תנובת החלב. התוצאות מראות שעקת חום היא בעלת השפעות שליליות לא ליניאריות, המגיעות לירידה של עד 10% בייצור החלב בימים קיצוניים, והשפעות אלה נמשכות עד 10 ימים לאחר החשיפה הישירה לחום. יתרה מכך, אימוץ אמצעי צינון, שינויים בתזמון ההמלטות או שינויים בשיטות ההזנה מביאים להפחתה מוגבלת בלבד של הפגיעה בתנובת החלב עקב עקת חום קיצונית. לאור הקידמה הטכנולוגית של מערכת החלב הישראלית, החשיפה ארוכת השנים לחום והמגוון האקלימי בארץ, תוצאות אלו מצביעות על כך שאסטרטגיות הסתגלות נפוצות הן בעלות פוטנציאל מוגבל להפחתת ההשפעות של שינויי האקלים על ענף החלב בעולם, ענף שהינו בעל חשיבות הן מבחינה תזונתית והן מבחינה כלכלית.

1. מבוא

ענף החלב הוא בעל חשיבות תזונתית וכלכלית במרבית מדינות העולם. וחשיבותו עוד צפויה לגדול. עקת חום מהווה אחד הגורמים המגבילים את התפתחות הענף במדינות רבות, כולל ישראל. אם הטמפרטורות תמשכנה לעלות, כפי שחוזים מומחי אקלים, ענף החלב יסבול מכך יותר ויותר, ופוטנציאל ההתרחבות שלו ייפגע.

ההשפעות המשמעותיות של עקת חום על הפרות החולבות בכלל ועל תנובת החלב בפרט תועדו רבות בספרות המדעית (לסקירת הידע הקיים ראה Kadzere et al., 2002). ההשפעה העיקרית היא תגובת ויסות חום פיסיולוגית המפחיתה את האנרגיה המיועדת ליצור חלב (Mauger et al., 2015). השפעות נוספות כוללות ירידה באכילה (St-Pierre et al., 2003, Mauger et al., 2015), המפחיתה גם היא את תנובת החלב, ירידה בביצועי הפוריות, בהתעברות ובהמלטות, ועלייה בתמותה (St-Pierre et al., 2003, Key et al., 2014). ישנן עדויות מחקריות לכך כי מבכירות שאמותיהן נחשפו לעקת חום במהלך ההריון סובלות מייצור חלב מופחת (Tao and Dahl, 2013) ומירידה במדדי איכות נוספים (Recce et al, 2021; Kipp et al., 2021). מחקר שנערך בישראל (Weller et al., 2021) מצא שעומס החום משפיע על כלל הביצועים של הפרות לאורך שלושה דורות אימהיים לפחות.

עקת חוס מהווה כבר כיום אחד הגורמים העיקריים המגבילות את תנובת החלב במדינות רבות כולל ישראל, ואומדנים של הנזק הכלכלי במדינות צפון מזרח ארה"ב בלבד מגיעים למאות מיליוני דולרים (St-Pierre et al., 2003). ענפי בעלי החיים מתאימים את עצמם לשינויי האקלים לאט יותר מאשר ענפי הצומח (Yang and Shumway, 2016). ככל שהטמפרטורה הממוצעת ממשיכה לעלות, והתדירות של גלי חום קיצוניים גדלה, הנזקים לענף החלב יגדלו ותנובת החלב תיפגע יותר ויותר.

למרות החשיבות של ענף החלב, יש מעט ניתוחים כמותיים ברמה גבוהה של הקשרים הסבוכים שבין עקת החום לתנובת החלב, כמו גם של ההשפעות האפשריות של שינויי אקלים (Carleton and Hsiang, 2016; McCarl and Hertel, 2018). למעשה, המחקר המקיף ביותר של ההשפעות שינויי האקלים בארה"ב אינו מתייחס כלל לענף החלב (Hsiang et al., 2017). גם מעט המחקרים הכמותיים על ענף החלב שונים בתכלית מאלה שעסקו בענפי הצומח. בשני העשורים האחרונים, לכלכנים תרמו משמעותית למחקר על שינויי האקלים והשפעותיהם, בעיקר על ענפי הצומח, תוך שהם מפתחים מתודולוגיות חדישות שהשלימו את אלה שהיו בשימוש מדעני הצמח (Auffhammer et al., 2013; Auffhammer and Schlenker, 2014; Dell et al., 2014), אולם מחקרים אלה לא יושמו לענף החלב, למרות שהם הניבו תובנות חשובות ומשמעותיות.

תובנות אלה כוללות, בין היתר: (א) החשיבות של שימוש בנתונים מקיפים על הייצור ועל תנאי מזג האוויר שנמדדים בזמן אמיתי, לעומת הסתמכות על ניסויי מעבדה מנותקים מהסביבה, על מנת לתפוס את התגובה האנושית של החקלאים ודפוסי ניהול המשק שלהם (Lobell and Burke, 2009); (ב) הדגש על אמידת הקשר הסיבתי שבין תנאי מזג האוויר לבין התפוקה על בסיס שינויים אקסוגניים במזג האוויר (Auffhammer et al., 2013); (ג) היותם של קשרים אלה לא-ליניאריים וניתנים לאמידה באמצעות צורות פונקציונליות גמישות וניתוח לא-פרמטרי (Schlenker and Roberts, 2009); ו-(ד) החשיבות של אמידת היעילות והעלות של שיטות התמודדות שונות של החקלאים וניתוח מידת האימוץ של שיטות אלה.

ספציפית, חסרות הערכות כמותיות של היעילות שבה דרכי התמודדות כגון צינון ושינוי הרכב מנת המזון מפחיתות את ההשפעה של עקת החום. הדו"ח החמישי של הפאנל הבין-ממשלתי על שינויי אקלים קבע כי "יחסית לגידולים צמחיים ולגידול דגים, קיימת ספרות מועטה בהרבה על השפעות שינויי האקלים על ענפים חקלאיים אחרים, כולל ענפי בעלי החיים. המחסור בידע בתחום זה משקף מחקרים מועטים מידי ולא בהכרח השפעה מועטה של שינויי אקלים".

קיימים אומדנים עדכניים מבוססי נתונים של הקשר בין תנובת החלב ותנאי מזג האוויר, ואין ספק שיש להם חשיבות רבה במדעי בעלי החיים החלב, אולם אומדנים אלה ברובם מסתמכים על ניסויים בהיקפים קטנים למדי (לדוגמה Collier, 2011), ובמקרה של ישראל גם (Wolfenson et al., 1988; Her et al., 1988; Adin et al., 2009), אינם כוללים נתונים נוספים שהם בעלי חשיבות רבה לכלכלת ענף הרפת, או שהם מניחים קשר ליניארי המבוסס במקרים רבים על אינדקס של טמפרטורה ולחות (Bryant et al., 2007; Andre et al., 2011; Igonon et al., 2007; Bohmanoya et al., 2007; Ravagnolo et al., 2000; Lambert et al., 2014; et al., 1992), ובכך מחמיצים קשרים פוטנציאליים שאינם ליניאריים. מרביתם של מחקרים אלה מבוססים על שונות מרחבית או עונתית במזג האוויר, מה שעלול להוביל להטיות בתחזיות, ורובם נערכו במדינות שבהן מזג האוויר ממוזג וגלי חום קיצוניים נדירים בהן בהרבה יחסית לישראל. מכאן שהם אינם מסוגלים לזהות השפעות לא-ליניאריות מורכבות, לאמוד השפעות של אירועי מזג אוויר קיצוניים, ולהעריך האם ההשפעה היא זמנית או מתמשכת.

המחקרים הבודדים שמצליחים לבודד את השונות האמיתית במזג האוויר (Bohmanova et al., 2007; Ravagnolo et al., 2000) מבוססים על כיסוי מרחבי מצומצם יחסית ולכן הם פחות שימושיים לתחזיות רחבות היקף. כתוצאה מכך, מעטים מתוכם מנסים לחזות השפעות של שינויי אקלים עתידיים (Key and Sneeringer, 2014; Mauger et al., 2015).

ביקורת חוזרת ונשנית על הספרות הכלכלית העוסקת בשינויי האקלים היא חוסר ההתייחסות להתאמת דפוסי ההתנהגות. בספרות זו מקובל לאמוד את השינויים בתפוקה כתוצאה משינויים קצרי טווח בטמפרטורה ובמשקעים, ולבצע אומדנים לטווח ארוך בהנחה שהקשר נשאר יציב. באופן מובלע, יש כאן הנחה שההתנהגות של היצרנים אינה משתנה גם בטווח הארוך וגם לאחר שינויים גדולים בתנאי מזג האוויר. מחקרים המבוססים על שונות מרחבית בתנאי מזג האוויר מסייעים להתגבר על מגבלה זו (Mendelsohn et al., 1994), אולם הם חשופים לביקורת על רגישותם למשתנים מתערבים. החזית של המחקר בתחום זה מנסה לבודד דפוסי תגובה של היצרנים לשינויי מזג האוויר החלים לאורך זמן, לאפיין את התנאים המובילים לאימוץ של דפוסי תגובה אלה, ולכמת את יחס התועלת-עלות שלהם (Carleton and Hsiang, 2016; Hsiang et al., 2017; Dell et al., 2016). מחקר זה מציע חידושים מתודולוגיים נוספים בכיוון זה.

התאחדות מגדלי הבקר בישראל עורכת מעקב שנתי אחרי יחס תנובת החלב בין הקיץ לחורף. נמצא שבשנים חמות במיוחד, היחס נמוך במיוחד. אולם למיטב ידיעתנו, מלבד פרסומי ההתאחדות, עדיין לא בוצע בישראל מחקר מקיף, המסתמך על מסד נתונים רחב היקף, על הקשר בין עקת חום לתנובת החלב. החשיבות של מחקר כזה חורגת מגבולות ישראל, הואיל וההטרונגניות הגדולה של תנאי האקלים בישראל מצד אחד, והמחירים האחידים וההומוגניות הרבה של טכנולוגיית ייצור החלב מצד שני, מאפשרים לפקח על מאפיינים רבים שאחרת היו עלולים להטות את התוצאות. יתרון נוסף הוא הנתונים המפורטים והאמינים המדווחים על ידי מרבית הרפתות ברמה יומית. לבסוף, העובדה שתנאי האקלים בישראל קשים יחסית למרבית המדינות המפותחות, והרמה הטכנולוגית הגבוהה של הרפתות, מבטיחים שרפתות רבות כבר צברו ניסיון בהתמודדות עם עקת החום, כך שאפשר לאסוף מידע רב ערך על דרכי ההתמודדות שלהן.

2. מטרות

מטרת המחקר היא לסגור את פערי הידע בנושא של השפעת שינויי האקלים בכלל ועקת החום בפרט על תנובת החלב בישראל, בעזרת שימוש במסדי נתונים ברזולוציה גבוהה על ייצור החלב ברמה של פרה/יום משולבים עם נתוני מזג אוויר יומיים וסקר רפתנים. הקשר הסיבתי בין תנאי מזג האוויר לבין תנובת החלב ייאמד בצורה גמישה תוך שימוש בסטנדרטים הגבוהים ביותר של הספרות העולמית העוסקת בהשפעת שינויי האקלים במגזרים אחרים. בנוסף לכך, ייאספו נתונים על דרכי ההתמודדות של הרפתנים עם עקת החום, כך שיתאפשר לבחון את היעילות היחסית של כל דרך התמודדות, להבין מדוע בחר/ה כל רפתן/נית בדרך התמודדות ספציפית, ולאמוד את המידה שבה של דרכי ההתמודדות מצליחות להחליש את הקשר בין עקת החום ותנובת החלב.

מטרות ספציפיות:

1. להשתמש בשיטות של "big data" ו-"machine learning" על מנת לקבל אומדים מדויקים ביותר וגמישים של ההשפעה הסיבתית הלא-ליניארית של חום ולחות על ייצור החלב בישראל.

2. לאסוף נתוני אמת על דרכי ההתמודדות של הרפתנים בישראל עם עקת החום, לשלב אותם עם נתוני תנובת החלב ועם נתוני מזג האוויר, ובאופן זה לכמת את היעילות של דרכי התמודדות אלה.

3. חומרים, תהליכים ושיטות עבודה

1. עיבוד ראשוני של מאגר הנתונים על תנובת החלב (ספר העדר, התאחדות מגדלי הבקר), הכולל נתונים יומיים על יצור החלב של כל פרה בישראל, כ-30 מיליון תצפיות בשנה.

2. איסוף נתוני מזג אוויר (טמפרטורות מינימום ומקסימום, משקעים ולחות ברמה יומית) ממאגרי נתונים בינלאומיים ומתחנות ניטור של השירות המטאורולוגי, המתאימים לכל התקופה שעבורה קיימים נתונים על תנובת החלב. בישראל קיימות 114 תחנות מטאורולוגיות המדווחות טמפרטורה ולחות כל 3 שעות. דיווחים חסרים הושלמו באמצעות אינטרפולציה בעזרת נתונים של תחנות שכנות. לכל רפת הוצמדו הנתונים של ממוצע משוקלל של כל התחנות הנמצאות במרחק של 30 ק"מ לכל היותר, כאשר המשקל הוא ביחס הפוך למרחק התחנה מהרפת ולהפרש הגבהים בין התחנה לבין הרפת. ספציפית:

$$W_f = \frac{\sum_{s=1}^S [d_{s-f}^a \Delta e_{s-f}^b \times W_s]}{\sum_{s=1}^S [d_{s-f}^a \Delta e_{s-f}^b]}$$

כאשר W_s הוא ערך המשתנה (טמפרטורה, לחות וכדומה) של תחנה s , W_f הוא ערך המשתנה המחושב לרפת f , d_{s-f} ו- e_{s-f} הם המרחק האופקי והפרש הגובה האנכי בין תחנה s לרפת f , בהתאמה, S הוא מספר התחנות הנמצאות ברדיוס של 30 ק"מ מרפת f , ו- a ו- b הם פרמטרים שנקבעו כך שיביאו למינימום את ממוצע ריבוע הטעויות של האומדן. נתוני היצור של כל רפת הוצמדו לנתונים מתחנת הניטור הקרובה אליה.

3. ביצוע סקר מנהלי רפתות, שבו נשאלו הרפתנים, בין היתר, על הדרכים שבהן הם מתמודדים עם השפעת עקת החום על יצור החלב (לדוגמה, שימוש באמצעי צינון). לגבי אמצעי צינון, שאלנו האם יש ברפת צינון במרבץ, באבוס, בחצר המתנה ייעודית או בחצר צינון אחרת, וכמו כן שאלנו על השנה שבה כל אמצעי הותקן והשנה שבה הוא שודרג לאחרונה. כן שאלנו על דפוסי ההפעלה של האמצעים (לפי תאריכים, טמפרטורות או אינטואיציה), ועל אמצעי התמודדות נוספים כמו שינוי מנת המזון ותכנון עונתי של ההמלטות. בנוסף, אספנו פרטים רבים נוספים על הרפת והרקע המקצועי של המנהל. התוצאות מעידות על הטרוגניות רבה באופן השימוש באמצעי ההתמודדות עם ההשלכות של עקת החום על תנובת החלב.

4. ביצוע ניתוחים סטטיסטיים על מנת לקבל אמידה לא-פרמטרית ולא-ליניארית של השפעת עקת החום על תנובת החלב, ברמת דיוק שלא הייתה קיימת עד היום. מודל הרגרסיה שלנו משתמש בשיטות המתקדמות ביותר מהספרות של שינויי האקלים על מנת לבודד השפעות סיבתיות וגמישות. זה מאפשר לנו לבחון את ההשערות העומדות בבסיס השימוש המקובל בספרות באינדקס הטמפרטורה-לחות, העלולות להחמיץ ממדים חשובים של הנושא, ולהפשירן. הניתוח מבוסס על משוואת הרגרסיה הבאה:

$$\log(\text{milk}_{it}) = \beta W_{fijt} + \gamma X_{it} + a_i + b_t + \varepsilon_{it}$$

כאשר milk_{it} היא תנובת החלב של פרה i בתקופה t הוא W_{fijt} הוא וקטור של מאפייני מזג אוויר ברפת f בתקופה t הוא וקטור של מאפייני פרה ורפת המשתנים על פני זמן

מספר החליבות היומיות ברפת, מספר התחלובה של הפרה והשלב בתחלובה a מפקח על גורמים הספציפיים לפרה וקבועים על פני זמן ו-b מפקח על גורמים המשתנים על פני זמן בלבד (שנה או חודש, בהתאם לספסיפיקציה). המשתנה שנבחר לייצג את מזג האוויר הוא TWB (wet bulb temperature) המחושב באופן הבא (Stull, 2011):

$$TWB = T \times \arctan(0.151977(RH + 8.313659)^{1/2}) + \arctan(T + RH) - \arctan(RH - 1.676331) + 0.00391838 RH^{3/2} \arctan(0.023101 RH) - 4.686035$$

כאשר T הוא הטמפרטורה במעלות צלזיוס ו-RH הוא הלחות באחוזים. TWB עדיף על משתני THI אחרים היות שהוא מבוטא ביחידות של מעלות צלזיוס. תוצאות שקיבלנו בעזרת מדדים אחרים לא היו שונות מהותית. וקטור המשתנה W במשוואה הנאמדת כולל, בגירסה אחת, משתני דמי המציינים שהמוצע היומי של TWB נמצא בטווחי טמפרטורות מסוימים, ובגירסה אחרת, את מספר השעות ביום שבהן TWB נמצא בטווחים מסוימים.

בספסיפיקציות נוספות של המודל כללנו גם אינדיקטורים לעקת חום בימים הקודמים, ואינדיקטורים לשימוש בטכניקות שנקטו ברפתות להתמודדות עם עקת החום.

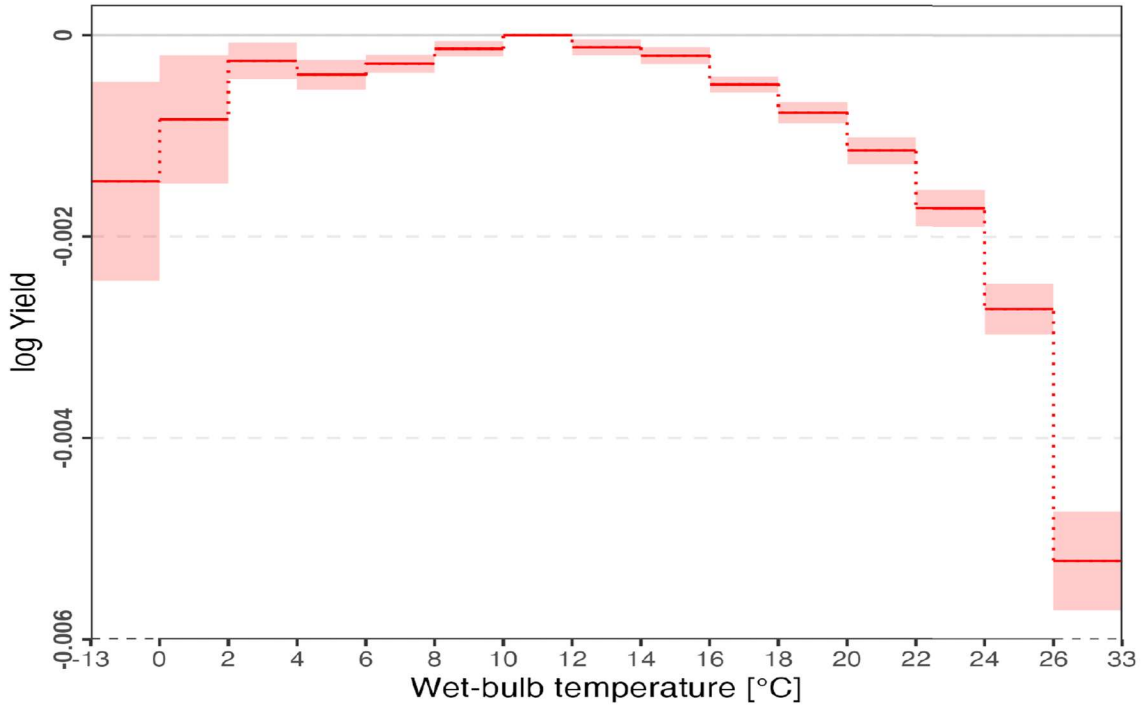
5. שימוש בטכניקות של "machine learning" על מנת לנצל את יכולת החיזוי, בעזרת מאות מיליוני תצפיות, של הפסדי החלב הנובעים מתנודתיות מזג אוויר, בצורה גמישה לחלוטין, ולבחון את פוטנציאל החיזוי של הפסדי החלב בטווח הקצר והארוך. בנוסף, בחינה של ההשפעה המצטברת של תנאי מזג האוויר בשבועיים שקדמו לכל תצפית.

4. תוצאות

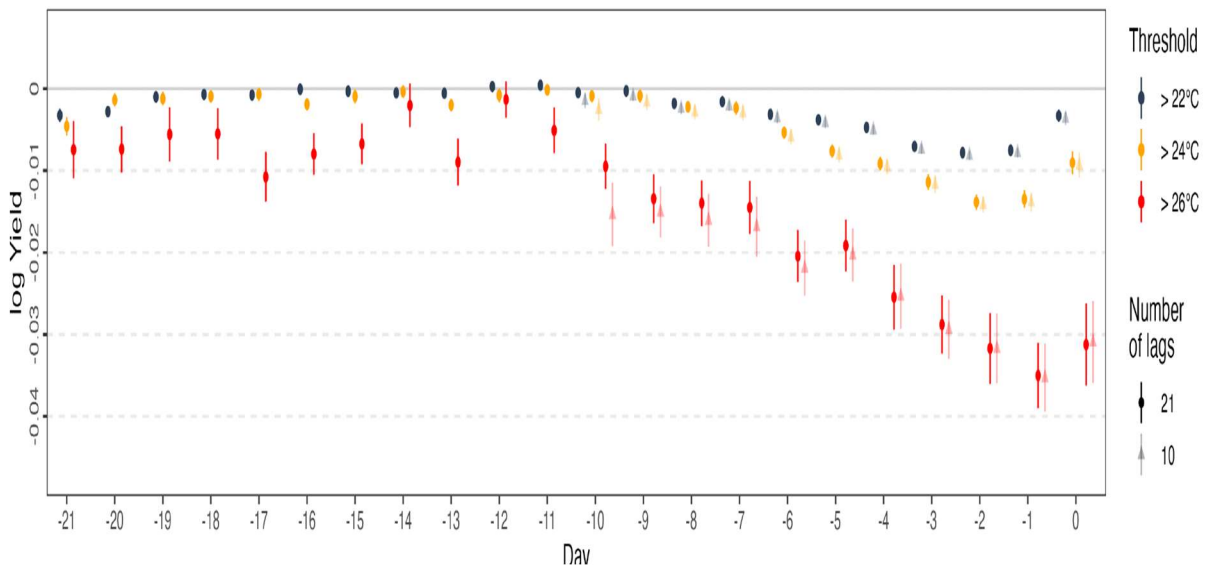
א. ניתוח אקונומטרי

התרשים הבא מתאר את הקשר בין תנובת החלב היומית לבין TWB (הנמדד במספר השעות ביום שהוא נמצא בכל מקטע של 2 מעלות), יחסית למקטע של 10-12 מעלות. כלומר, המספר על הציר האנכי מבטא את הירידה בתנובת החלב אם תהיה שעה אחת יותר ביום של TWB בטווח המצוין על הציר האופקי, ושעה אחת פחות בטווח של 10-12 מעלות. הקטע הצבוע מסמן את רווח הסמך של ההשפעה הנאמדת.

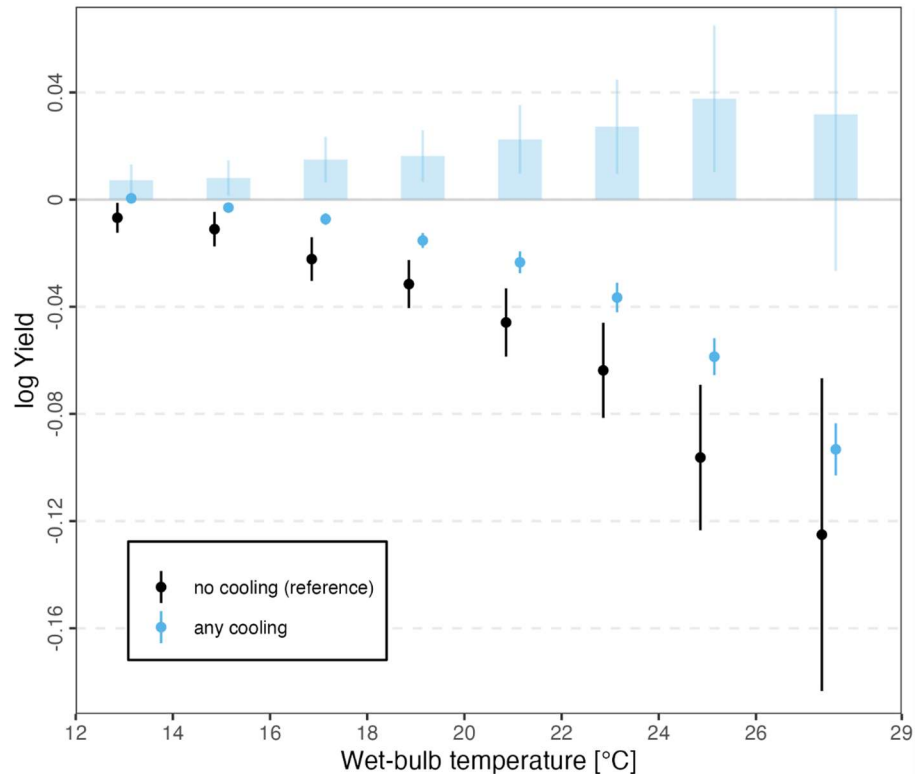
התוצאות מעידות על ירידה מובהקת בתנובת החלב, הן בימים קרים יותר והן בימים חמים יותר, כאשר הירידה מתגברת ככל שהימים נעשים חמים יותר. לדוגמה, ביום שבו יש שעה אחת יותר של TWB מעל 26 מעלות, תנובת החלב היומית פוחתת בכחצי אחוז. זה נראה כשינוי קל, אולם מדובר בשעה אחת ביום בלבד, בעוד שבימים חמים במציאות השינוי מצטבר על פני שעות רבות ביום.



התרשים הבא מציג את ההשפעה המצטברת של עקת החום על תנובת החלב היומית, כפונקציה של משתנה בינארי המציין אם הטמפרטורה היומית הממוצעת ביום ספציפי עברה סף מסוים. מוצגות מספר אמידות הנבדלות בשני ממדים: סף הטמפרטורה (22, 24 או 26 מעלות) ומספר הימים לפני היום הנוכחי שנכללים במודל (10 ימים לעומת 21 ימים). הממצאים מראים כי עקת החום משפיעה עד עשרה ימים קדימה ולא יותר. ככל שעקת החום גבוהה יותר, הירידה בתנובת החלב היומית גדולה יותר. לדוגמה, טמפרטורה יומית ממוצעת מעל 26 מעלות ביום הנוכחי מפחיתה את תנובת החלב בכ-3%, יחסית ליום של 10-12 מעלות. אולם אם הטמפרטורה הייתה גבוהה מ-26 מעלות בכל אחד משלושת הימים הקודמים, כל אחד מימים אלה תורם גם הוא לירידה בתנובת החלב של כ-3%, וההשפעה הזאת מצטברת.



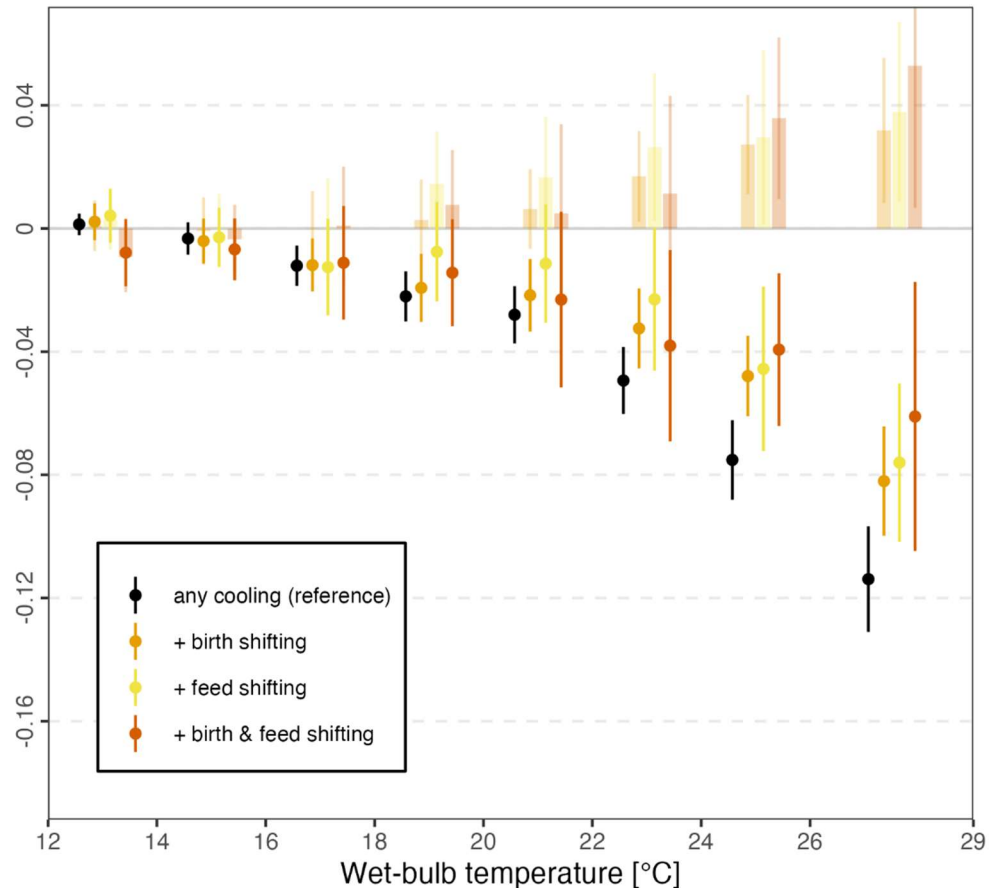
התרשים הבא מציג את ההשפעה הממתנת שיש לשימוש באמצעי צינון ברפת. לשם כך פיקחנו על מועד ההתקנה של אמצעי הצינון ולא על השימוש בהם בפועל. כמעט כל הרפתות התקינו אמצעי צינון בין השנים 2009-2020 שאותן מכסה המחקר, ולכן ההבדל בין שתי ההשפעות שמוצגות בתרשים מציין את ההבדל בהשפעה של עקת החום באותה רפת לפני התקנת אמצעי הצינון ואחרי התקנתם. משתנה עקת החום במקרה זה הוא הטמפרטורה היומית הממוצעת, ולצורך העניין מוצגים רק טווחי הטמפרטורה שמעל ל-12 מעלות.



העמודות שבחלק העליון של התרשים מציגות את ההבדל בירידה בתנובת החלב (באחוזים) לאחר התקנת אמצעי צינון. ניתן לראות כי הפגיעה בתנובת החלב עקב עקת חום פוחתת בכ-40% לאחר התקנת אמצעי הצינון, והפרש זה מובהק סטטיסטית מלבד בתחום הטמפרטורות הגבוה ביותר. בנוסף לכך, הפרדנו בין אמצעי צינון שמוותקנים בסככה המרכזית, בחצר ההמתנה, ולאורך פסי ההאכלה או לאורך האבוסים, והתוצאות מראות שאמצעי צינון בחצר ההמתנה הם האפקטיביים ביותר. תוצאה זו הגיונית לאור העובדה שצפיפות הפרות בחצר ההמתנה יוצרת עקת חום חזקה יותר מאשר בשאר שטחי הרפת, ומצד שני הצפיפות מאפשרת לצנן יותר פרות בהספק נתון של אמצעי הצינון כך שהאפקטיביות שלהם גדלה. בנוסף לכך, הגישה לפסי ההאכלה או לאבוס היא וולונטרית, ולכן לא כל הפרות נחשפות לצינון באופן שווה.

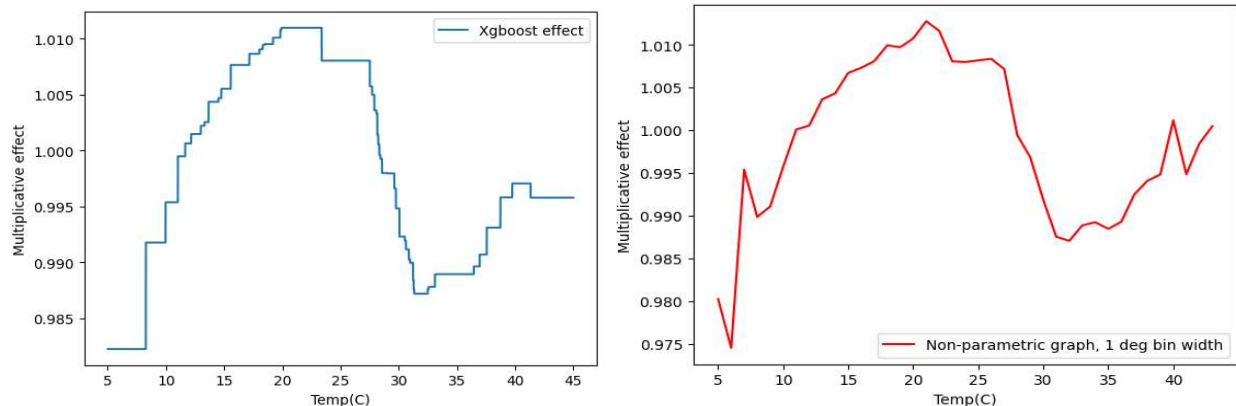
אמצעים נוספים להתמודדות עם עקת החום ברפת כוללים העברת המלטות לחודשי החורף, שינויים בהרכב מנת המזון ושינויים בשעות חלוקת המזון. מנהלי הרפתות ציינו בתשובותיהם לסקר אם הם נוקטים כל אחד מאמצעים אלה. פיקחנו על תשובות אלה באמידה נוספת של הקשר בין עקת החום לתנובת החלב היומית, תוך שימוש בנתוני 2019-2020 בלבד, המקבילים לתקופה שבה נערך הסקר. התרומה של השינויים בהרכב מנת המזון לא נמצאה מובהקת סטטיסטית. התרשים הבא מציג את התרומה של שינויים במועד ההמלטות, שינויים בשעות

חלוקת המזון, ושימוש בשני האמצעים בו זמנית, בהשוואה לשימוש באמצעי צינון בלבד. ניתן לראות כי אמצעים אלה מפחיתים את הפגיעה בתנובת החלב עקב עקת החום, בעיקר בטווחי הטמפרטורות הגבוהים.



ב. ניתוח של למידת מכונה

התרשים הבא מתאר תוצאות של אמידה גמישה, בעזרת טכניקות של למידת מכונה, של השינויים בתנובת החלב היומית כתוצאה משינויים בטמפרטורה היומית המקסימלית. העקומה האדומה מימין מראה תוצאות של אמידה לא-פרמטרית, בעוד שהעקומה הכחולה משמאל מראה תוצאות של שימוש בטכניקה של Random forests. האמידה הלא-פרמטרית אינה שונה בהרבה מהאמידה שדווחה בחלק הקודם, אם כי מדובר במדגם שאינו זהה, במשתנה טמפרטורה שונה ובהגדרות שונות של טווחי הטמפרטורות. תנובת החלב עולה עד טמפרטורת מקסימום של 22 מעלות ומעבר לזה מתחילה לרדת. תנובת החלב בימים עם טמפרטורת מקסימום של 31 מעלות נמוכה בכ-2% מהשיא. בימים חמים יותר המגמה משנה כיוון, והפגיעה בתנובת החלב מצטמצמת עד כדי מחצית. ייתכן שאלה הם בדיוק הימים בהם הרפתניים מפעילים את אמצעי הצינון במלוא עוצמתם. יש לזכור שהניתוח האקונומטרי הראה שרמת הדיוק של האומדים בימים החמים ביותר אינה גבוהה, וכנראה גם האמידה הלא-פרמטרית ולמידת המכונה סובלות מכך, ולכן אין צורך לייחס חשיבות רבה לשינוי המגמה של תנובת החלב היומית בימים החמים ביותר.



העקומה הכחולה בחלק השמאלי של התרשים זהה כמעט לחלוטין לעקומה הימנית, מה שמדגיש את הפוטנציאל של למידת מכונה לזהות קשרים קיימים בין משתנים. לעומת זאת, יכולת החיזוי של שיטה זו עדיין איננה גבוהה ויש צורך במחקרי המשך על מנת לבסס את השימוש בשיטה ולשפר את יכולותיה. ניתן לשפר את יכולת החיזוי באמצעות הוספת משתני מזג אויר. כאשר הוספנו למודל משתנים של טמפרטורת מינימום יומית, לחות יחסית, וכן משתני מזג אויר של שישה ימים אחרונים, יכולת החיזוי השתפרה, וכמו כן ההבדל ביכולת החיזוי בין המודל של למידת מכונה לבין מודלים פרמטריים שמשמשים בפולינומים מדרגה שניה או רביעית גדל ככל שהמודל כלל יותר משתני מזג אויר.

5. דיון ומסקנות

תוצאות המחקר מצביעות על כך שלעקת חום יש השפעות מאוד לא ליניאריות ומתמשכות יחסית על תנובת החלב. יתר על כן, אימוץ טכנולוגיות צינור פשוטות עשוי להפחית פחות ממחצית מההשפעות של חשיפה לעקת חום קיצונית. האקלים המגוון של ישראל וההתקדמות הטכנולוגית של ענף החלב שלה מצביעים על כך שתוצאה זו עשויה לשקף גבול עליון לפוטנציאל ההסתגלות שניתן להשיג על ידי טכנולוגיות הנגישות מבחינה כלכלית באזורי עולם רחבים.

את ההבדלים שאנו מוצאים בין רפתות בעלות אמצעי צינור ורפתות ללא אמצעי צינור לא ניתן לייחס באופן סיבתי לאימוץ אמצעי הצינור, מכיוון שאימוץ זה עשוי להיות אנדוגני. כלומר, ייתכן שרפתות שסובלות יותר מעקת החום מאמצות את אמצעי הצינור מוקדם יותר. אם אכן ההחלטה לאמץ טכנולוגיית צינור מוטה כלפי רפתות שבהן אמצעי הצינור יהיו מועילים במיוחד, האמידה שלנו עשויה אפילו להפריז בהשפעות הממוצעות האמיתיות של אמצעי הצינור.

התוצאות שהושגו עד כה מעידות על ישימות של שיטות המחקר והערך של הנתונים המפורטים לקבלת תוצאות שאינן סותרות ממצאים קודמים אבל מדויקות יותר ומייצגות את כל הענף. אנו נמשיך לדייק תוצאות אלה במחקרי המשך. בין היתר, ננסה לפקח לא רק על מועד ההתקנה של מערכות הצינור אלא גם על ממשק ההפעלה שלהן.

- Adin, G., Gelman, A., Solomon, R., Flamenbaum, I., Nikbachat, M., Yosef, E., Zenou, A., Shamay, A., Feuermann, Y., Mabjeesh, S.J. and Miron, J. "Effects of cooling dry cows under heat load conditions on mammary gland enzymatic activity, intake of food and water, and performance during the dry period and after parturition." *Livestock Science*, 124(2009), pp.189-195.
- Andersson-Sköld, Yvonne, David Simpson, and Viel Ødegaard. Humidity Parameters from Temperature: Test of a Simple Methodology for European Conditions." *International Journal of Climatology* 28, no. 7 (2008): 961–72.
- André, G., B. Engel, P. B. M. Berentsen, Th V. Vellinga, and AGJM Oude Lansink. "Quantifying the effect of heat stress on daily milk yield and monitoring dynamic changes using an adaptive dynamic model." *Journal of Dairy Science* 94, no. 9 (2011): 4502-4513.
- Auffhammer, Maximilian, and Wolfram Schlenker. "Empirical studies on agricultural impacts and adaptation." *Energy Economics* 46 (2014): 555-561.
- Auffhammer, Maximilian, Solomon M. Hsiang, Wolfram Schlenker, and Adam Sobel. "Using weather data and climate model output in economic analyses of climate change." *Review of Environmental Economics and Policy* 7, no. 2 (2013): 181-198.
- Berman, A. "Estimates of heat stress relief needs for Holstein dairy cows 1." *Journal of animal science* 83, no. 6 (2005): 1377-1384.
- Bohmanova, J., I. Misztal, and J. B. Cole. "Temperature-humidity indices as indicators of milk production losses due to heat stress." *Journal of dairy science* 90, no. 4 (2007): 1947-1956.
- Bosen, Julius F. An Approximation Formula To Compute Relative Humidity From Dry Bulb And Dew Point Temperatures." *Monthly Weather Review* 86, no. 12 (December 1, 1958): 486–486.
- Bryant, J. R., N. López-Villalobos, J. E. Pryce, C. W. Holmes, and D. L. Johnson. "Quantifying the effect of thermal environment on production traits in three breeds of dairy cattle in New Zealand." *New Zealand Journal of Agricultural Research* 50, no. 3 (2007): 327-338.
- Burke, Marshall, and Kyle Emerick. Adaptation to Climate Change: Evidence from US Agriculture." *American Economic Journal: Economic Policy* 8, no. 3 (2016): 106–40.
- Burke, Marshall, Solomon M. Hsiang, and Edward Miguel. "Global non-linear effect of temperature on economic production." *Nature* 527, no. 7577 (2015): 235.
- Carleton, Tamma A., and Solomon M. Hsiang. Social and Economic Impacts of Climate." *Science* 353, no. 6304 (September 9, 2016). doi:10.1126/science.aad9837.

Collier, R. J., R. B. Zimbelman, R. P. Rhoads, M. L. Rhoads, and L. H. Baumgard. "A re-evaluation of the impact of temperature humidity index (THI) and black globe humidity index (BGHI) on milk production in high producing dairy cows." In *Western Dairy Management Conf.* Reno, NV. USA, pp. 113-125. 2011.

Collier, Robert J., and Rosemarie B. Zimbelman. "Heat stress effects on cattle: What we know and what we don't know." In *22nd Annual Southwest Nutrition & Management Conference*, pp. 76-83. 2007.

Conley, T. G. "GMM Estimation with Cross Sectional Dependence." *Journal of Econometrics* 92, no. 1 (1999): 1-45.

Costinot, Arnaud, Dave Donaldson, and Cory Smith. "Evolving Comparative Advantage and the Impact of Climate Change in Agricultural Markets: Evidence from 1.7 Million Fields around the World." *Journal of Political Economy* (2016) 124: 1, 205-248.

Dell, Melissa, Benjamin F. Jones, and Benjamin A. Olken. "What do we learn from the weather? The new climate-economy literature." *Journal of Economic Literature* 52, no. 3 (2014): 740-98.

Deryugina, Tatyana, and Solomon M. Hsiang. "Does the environment still matter? Daily temperature and income in the United States." National Bureau of Economic Research Working Paper No. 20750. 2014.

Deschênes, Olivier, and Michael Greenstone. "The Economic Impacts of Climate Change: Evidence from Agricultural Output and Random Fluctuations in Weather." *American Economic Review* 97, no. 1 (2007): 354-385.

Eccel, Emanuele. "Estimating Air Humidity from Temperature and Precipitation Measures for Modelling Applications." *Meteorological Applications* 19, no. 1 (March 5, 2012): 118-28.

FAO. *Climate Change and Food Systems: Global Assessments and Implications for Food Security and Trade*. Food Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2015.

Fishman, Ram, Paul E. Carrillo, and Jason Russ. "The Long-Term Economic Effect of High Temperatures: Evidence from Earnings Data in Ecuador." *Journal of Environmental Economics and Management* 93 (2019), 221-238.

Fleischer, Aliza, Ivgenia Lichtman, and Robert Mendelsohn. *Climate change, irrigation, and Israeli agriculture: Will warming be harmful?* The World Bank, 2007.

Frank, Stefan, Heinz-Peter Witzke, Andrea Zimmermann, Petr Havlík, and Pavel Ciaian. *Climate Change Impacts on European Agriculture: A Multi Model Perspective*. Paper prepared for presentation at the EAAE 2014 Congress.

Her, E., Wolfenson, D., Flamenbaum, I., Folman, Y., Kaim, M., & Berman, A. "Thermal, productive, and reproductive responses of high yielding cows exposed to short-term cooling in summer." *Journal of Dairy Science*, 71 (1988), 1085-1092.

Hsiang, Solomon, Robert Kopp, Amir Jina, James Rising, Michael Delgado, Shashank Mohan, D. J. Rasmussen, et al. "Estimating Economic Damage from Climate Change in the United States." *Science* 356, no. 6345 (June 30, 2017): 1362–69.

Hsiang, Solomon. "Climate Econometrics." *Annual Review of Resource Economics* 8 (2016): 43-75.

Igono, M. O., G. Bjotvedt, and H. T. Sanford-Crane. "Environmental profile and critical temperature effects on milk production of Holstein cows in desert climate." *International journal of biometeorology* 36, no. 2 (1992): 77-87.

Isen, Adam, Maya Rossin-Slater, and Reed Walker. "Relationship between season of birth, temperature exposure, and later life wellbeing." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114, no. 51 (2017): 13447-13452.

Kaminski, Jonathan, Iddo Kan, and Aliza Fleischer. "A Structural Land-Use Analysis of Agricultural Adaptation to Climate Change: A Proactive Approach," *American Journal of Agricultural Economics*, Volume 95, Issue 1, 2013, 70–93,.

Kan, Iddo, Ayal Kimhi, Ami Reznik, and Jonathan Kaminski. "Integrated Micro-Macro Structural Econometric Framework for Assessing Climate-Change Impacts on Agricultural Production and Food Markets." Paper prepared for presentation at the 30th International Conference of Agricultural Economists, July 29-August 2, 2018, Vancouver, Canada.

Key, Nigel, and Stacy Sneeringer. "Potential effects of climate change on the productivity of US dairies." *American Journal of Agricultural Economics* 96, no. 4 (2014): 1136-1156.

Kipp, C., Brügemann, K., Yin, T., Halli, K., & König, S. (2021). "Genotype by heat stress interactions for production and functional traits in dairy cows from an across-generation perspective." *Journal of Dairy Science*, 104(9), 10029-10039.

Klinedinst, Peggy L., Donald A. Wilhite, G. Leroy Hahn, and Kenneth G. Hubbard. "The potential effects of climate change on summer season dairy cattle milk production and reproduction." *Climatic Change* 23, no. 1 (1993): 21-36.

Lambertz, C., C. Sanker, and M. Gauly. "Climatic effects on milk production traits and somatic cell score in lactating Holstein-Friesian cows in different housing systems." *Journal of Dairy Science* 97, no. 1 (2014): 319-329.

Lobell, David B., and Marshall Burke, eds. *Climate change and food security: adapting agriculture to a warmer world*. Vol. 37. Springer Science & Business Media, 2009.

Mauger, Guillaume, Yoram Bauman, Tamilee Nennich, and Eric Salathé. "Impacts of climate change on milk production in the United States." *The Professional Geographer* 67, no. 1 (2015): 121-131.

McCarl, Bruce A., and Thomas W. Hertel. "Climate Change as an Agricultural Economics Research Topic," *Applied Economic Perspectives and Policy*, Volume 40, Issue 1, 1 March 2018, Pages 60–78.

Mendelsohn, Robert, William D. Nordhaus, and Daigee Shaw. "The impact of global warming on agriculture: a Ricardian analysis." *The American economic review* (1994): 753-771.

OECD/FAO, *OECD-FAO Agricultural Outlook 2018-2027*, OECD Publishing, Paris/Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2018.

Ravagnolo, O., I. Misztal, and G. Hoogenboom. "Genetic component of heat stress in dairy cattle, development of heat index function." *Journal of Dairy Science* 83, no. 9 (2000): 2120-2125.

Recce, Sebastián, Emilia Huber, Ulises S. Notaro, Fernanda M. Rodríguez, Hugo H. Ortega, Florencia Rey, Marcelo L. Signorini, and Natalia R. Salvetti. "Association between heat stress during intrauterine development and the calving-to-conception and calving-to-first-service intervals in Holstein cows." *Theriogenology* 162 (2021): 95-104.

Schlenker, Wolfram, and Michael J. Roberts. "Nonlinear Temperature Effects Indicate Severe Damages to US Crop Yields under Climate Change." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106, no. 37 (2009): 15594-15598.

St-Pierre, N. R., B. Cobanov, and G. Schnitkey. "Economic losses from heat stress by US livestock industries." *Journal of Dairy Science* 86 (2003): E52-E77.

Stull, R. "Wet-Bulb Temperature from Relative Humidity and Air Temperature." *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 50, No. 11 (2011), 2267-2269.

Tao, S., and G. E. Dahl. "Invited Review: Heat Stress Effects during Late Gestation on Dry Cows and Their Calves." *Journal of Dairy Science* 96, no. 7 (July 2013): 4079-93.

Van Passel, Steven, Emanuele Massetti, and Robert Mendelsohn. "A Ricardian Analysis of the Impact of Climate Change on European Agriculture." *Environmental and Resource Economics* (2017) 67, No. 4, 725-760.

Weller, Joel Ira., Ephraim Ezra, and Moran Gershoni. "Broad phenotypic impact of the effects of transgenerational heat stress in dairy cattle: A study of four consecutive generations." *Genetics Selection Evolution* 53 (2021): 69.

West, J. W. "Effects of heat-stress on production in dairy cattle." *Journal of Dairy Science* 86, no. 6 (2003): 2131-2144.

Wolfe, David W., Lewis Ziska, Curt Petzoldt, Abby Seaman, Larry Chase, and Katharine Hayhoe. "Projected change in climate thresholds in the Northeastern US: implications for crops, pests, livestock, and farmers." *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 13, no. 5-6 (2008): 555-575.

Wolfenson, D., Flamenbaum, I., & Berman, A. "Dry period heat stress relief effects on prepartum progesterone, calf birth weight, and milk production." *Journal of Dairy Science*, 71 (1988): 809-818.

Yang, Sansi, and C. Richard Shumway. "Dynamic Adjustment in US Agriculture under Climate Change," *American Journal of Agricultural Economics*, Volume 98, Issue 3, 2016, 910–924.