מדינת ישראל
משרד התחבורה
השירות המטאורולוגי

כ״ז טבת התשפ״ד
8 ינואר 2024
סימוכין: 4000-0804-2024-0000001

שינויי הטמפרטורה בישראל – השוואה בין שלושה אטלסים אקלימיים

איל אילוטוביץ, נועם חלפון, יצחק יוסף, אגף אקלים, השירות המטאורולוגי

תקציר

עבודה זו בוחנת את מגמות השינוי בטמפרטורה בישראל בהתבסס על השוואת שלוש תקופות מיצוע של 15 שנה מתוך האטלסים האקלימיים שפרסם השירות המטאורולוגי הישראלי: 1964-1979, 1995-2009 ו-2006-2020. הממצאים מראים על התחממות ניכרת ומובהקת של הטמפרטורה בין התקופה האחרונה לבין שתי התקופות שקדמו לה, הן ברמה השנתית והן ברמה העונתית. שיעור ההתחממות הממוצע בין 2006-2020 ל-1964-1979, עומד על כ-1.5 מעלות צלזיוס, כשבשלושת העשורים האחרונים (1991-2020) נצפתה מגמת ההתחממות כללית מובהקת בישראל, העומדת על כ-0.6 מ״צ/עשור.

החלוקה העונתית מגלה שכל עונות השנה נמצאות במגמת התחממות ברורה כשהקיץ מאופיין בהתחממות הגבוהה ביותר בשיעור ממוצע של כ-1.6 מ״צ בטמפרטורת המקסימום וכ-1.9 מ״צ בטמפרטורת המינימום. בהשוואה בין שתי התקופות האחרונות ניכר כי מגמת ההתחממות נמשכת, אם כי ההבדלים בין התקופות הסמוכות קטנים יותר. לא נמצאה מגמה משמעותית במשרעת הטמפרטורה היומית. קרי, קצב עליית טמפרטורת המקסימום דומה לקצב עליית טמפרטורת המינימום בממוצע בין תקופות אלו.

טמפרטורת הימים והלילות החמים ביותר (TXX, TNX) וטמפרטורת הימים והלילות הקרים ביותר (TXN, TNN) נמצאו גם הם במגמת עלייה מובהקת בעיקר בין ממוצעי התקופה האחרונה לתקופה 1964-1979. העליות המשמעותיות ביותר נמדדו באזור מישור החוף עם התחממות ממוצעת של 1.8 מ״צ ו-3 מ״צ בטמפרטורת הימים החמים ביותר והלילות החמים ביותר בהתאמה.

בחינת שכיחות שבירת שיאי הקיצון, העלתה כי בשתי התקופות האחרונות שיעור שבירת שיאי החום היה גבוה פי 2.6 ביחס לשבירת שיאי קור. עם זאת, יש לציין כי כשליש משבירת השיאים הקרים התרחשו בשתי התקופות האחרונות. הדבר מדגיש את האפשרות להתרחשותם של אירועי קיצון קרים, חרף ההתחממות הבולטת.

Abstract

This study explores temperature changes in Israel by comparing three 15-year averaged periods using climatic atlases published by the Israel Meteorological Service: 1964-1979, 1995-2009, and 2006-2020. The results reveal a pronounced and significant increase in temperature during the last period compared to the two preceding periods, evident at both annual and seasonal levels. The average rate of warming from the period 1964-1979 to 2006-2020 is approximately 1.5°C, highlighting a notable temperature difference. Furthermore, our findings reveal a significant warming trend of about 0.6°C/decade in Israel's temperatures over the past three decades (1991-2020).

All seasons experienced a warming trend. The analysis revealed that summer exhibited the most substantial warming, with maximum temperatures increasing at an average rate of approximately 1.6°C and minimum temperatures rising by 1.9°C. A comparison between the two most recent periods demonstrates a continuation of the warming trend, albeit with smaller differences between adjacent periods. No significant trend is observed in the diurnal temperature range (DTR), indicating that the average rate of increase in maximum temperature is similar to the rate of increase in minimum temperature during these periods.

The temperatures of the hottest days and nights (TXX, TNX) as well as the coldest days and nights (TXN, TNN) exhibited a significant increasing trend, especially when comparing the means of the last period with those of the 1964-1979 period. The most noteworthy increases were observed in the coastal plain region, with an average rise of 1.8°C and 3°C in temperature during the warmest days and warmest nights, respectively.

An analysis of the frequency of absolute records showed that, during the two most recent periods, the rate of breaking maximum temperature records was 2.6 times higher than that of minimum temperature records. It is worth mentioning that, despite the notable warming, approximately one-third of the instances of breaking cold records occurred during these two most recent periods, highlighting the occurrence of cold extremes in a warming climate.

1. מבוא

הטמפרטורה העולמית ככלל וזו של מזרח אגן הים התיכון בפרט נמצאת בעלייה מאז תחילת המאה שעברה וביתר שאת בארבעת העשורים האחרונים. בישראל הטמפרטורה עלתה מאז אמצע המאה שעברה בכ-1.5 מ״צ, כשכמעט כל העלייה התרחשה בתוך תקופת התקן האחרונה 1991-2020 (איור 1).

איור 1 מתאר את השינוי בטמפרטורת המקסימום והמינימום היומית הממוצעת לישראל[1]. בעוד שבמגמות הארוכות, בתקופה 1950-2020, שיעור ההתחממות של טמפרטורת המינימום עולה במעט על קצב התחממות טמפרטורת המקסימום (0.26 מ״צ/עשור ו-0.21 מ״צ/עשור בהתאמה), הרי שבשלושת העשורים האחרונים שיעור ההתחממות האיץ ועומד בשניהם על כ-0.6 מ״צ/עשור. עוד מצאנו שבתקופת התקן האחרונה (1991-2020) עיקר ההתחממות התרחשה בעונת האביב עם עלייה בשיעור של 0.86 מ״צ/עשור בטמפרטורת המקסימום ו-0.65 מ״צ/עשור בטמפרטורת המינימום. בעונת הקיץ (והסתיו) נמדדה עלייה דומה בשיעור של כ-0.49 (0.45) מ״צ/עשור בטמפרטורת המקסימום ו-0.54 מ״צ/עשור בטמפרטורת המינימום. גם בחורף נצפתה התחממות משמעותית בטמפרטורה בשיעור של 0.57 ו-0.42 מ״צ/עשור בטמפרטורת המקסימום והמינימום בהתאמה. כלל המגמות המצוינות נמצאו מובהקות סטטיסטית ברמת מובהקות[2] $p\leq 0.05$.

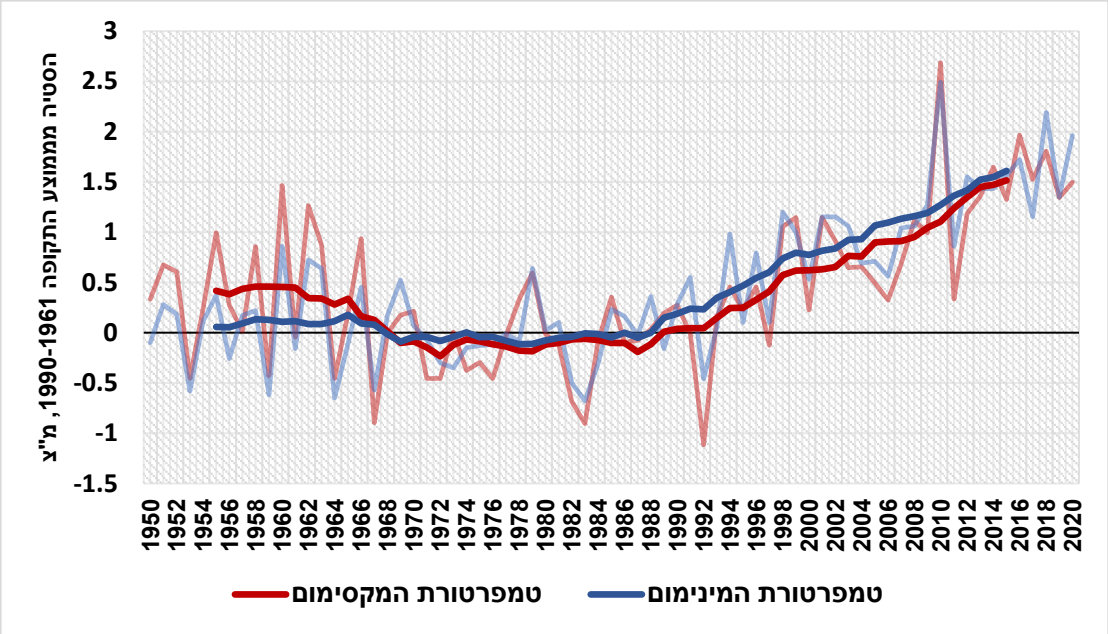
את ההתחממות המואצת בעשורים האחרונים בישראל (בדגש על עונת הקיץ), ניתן להסביר בין היתר בהתחממות מי הים התיכון ככלל ואגנו המזרחי בפרט. מחקרים רבים מצביעים על מגמת התחממות פני הים התיכון בעשורים האחרונים המשפיעה גם על אזורים הסמוכים לחוף, כמו ישראל. כך לדוגמה במרכז הדלי שבבריטניה הראו מספר חוקרים שטמפרטורת הים התיכון עלתה בכ-0.71 מ״צ מ-1982 עד 2006 מה שגורם לו להיות אחד המובילים בשיעורי ההתחממות ביחד עם הים הבלטי, הים הצפוני, ים יפן וים סין (Belkin, 2009; Trenberth et al., 2007). דיווחים ממדידות (in situ) ומלווינים מצביעים אף הם על התחממות דרמטית בשלושת העשורים האחרונים ובפרט באגן המזרחי של הים התיכון שהתחמם בקצב של 0.5 מ״צ/עשור מול 0.3 מ״צ/עשור באגן המערבי, בתקופה 1995-2006 (Nykjaer, 2009). זאת בשעה שקצב התחממות הממוצע של גופי המים בעולם באותה עת היה מתון יותר ועמד על 0.16 מ״צ/עשור (von Nykjaer, 2009 ; Schuckmann et al., 2018). במחקר שפורסם לאחרונה (García-Monteiro et al., 2022), דווח על חימום מובהק של 0.4 מ״צ/עשור במזרח אגן הים התיכון לתקופה 2003-2019. גורמים נוספים יכולים לתרום להסבר ההתחממות באזורנו, בין היתר עלייה בטמפרטורה במפלס 850 מ״ל בקיץ (Saaroni et al., 2003) וכן עלייה בתדירות הופעתו של אפיק פרסי רדוד המאופיין ברוחות אטזיות חלשות, אלו אותן רוחות מכיוון צפון-מערב המכניסות אוויר קריר לאזורנו (Saaroni et al., 2010). הדבר מוביל גם לירידה בעובי שכבת האינברסיה המרינית ומכאן להכבדה בעומסי החום בשל מזג אוויר הביל יותר בחוף ובשפלה ומזג אוויר חם ויבש בשדרת ההר והאזורים הפנימיים.

[1] הממוצע הארצי מבוסס על מיצוע של 24 תחנות הומוגניות להן רשומות נתונים ארוכות (Yosef et al., 2019).
[2] המגמות הלינאריות ומידת מובהקותן חושבו בשיטת Mann-Kendall ו- Sen׳s slope estimator.

בסך-הכל התחממות הטמפרטורה סביב אגן הים התיכון מסוף המאה ה-19 מוערכת בכ-1.4 מ״צ (Cramer et al., 2018) ובמבט קדימה נראה כי נחווה המשך עלייה בעומסי החום ועלייה בשכיחות גלי החום, כפי שכבר נצפתה בעשורים האחרונים (יוסף וחובריו, 2022 ; Zittis et al., 2015).

לאור השינויים המהירים בטמפרטורה המתרחשים תוך כדי תקופת תקן של 30 שנים, יש צורך לעדכן את ממוצעי הטמפרטורות הרב שנתיים לעיתים תכופות ולהתחשב בתקופה קצרה יותר של 15 שנים (Huang et al., 1996; Wilks, 2013; Wilks and Livezey, 2013; WMO, 2007).

בעבודה הנוכחית נעמוד על שיעור ההבדלים בין העונות ואזורי הארץ השונים כפי שהם באים לידי ביטוי בעשורים האחרונים. הבחינה תבוצע על-ידי השוואת ממוצעים רב-שנתיים של תקופות בנות 15 שנה שפורסמו באטלסים אקלימים שונים, בהוצאת השירות המטאורולוגי (להלן: שמ״ט) לתקופות: 1964-1979, 1995-2009 ו-2006-2020. יש לציין שהתקופה 1964-1979 היתה יחסית קרירה בישראל גם ביחס לעשורים שקדמו לה, שנות ה-50 וראשית שנות ה-60 של המאה הקודמת היו גבוהות ממנה, כפי שניתן לראות באיור 1.



איור 1. שינוי בטמפרטורת המקסימום (באדום) והמינימום (בכחול) היומית הממוצעת בישראל (מבוסס על מיצוע נתונים הומוגניים של 24 תחנות לפי התיאור ב- Yosef et al., 2019). קווים בולטים מציינים ממוצע נע ל-11 שנים.

2. מתודולוגיה

2.1. הנתונים ואופן בחינת ההבדלים המרחביים

בדומה לאטלס הקודם (1995-2009), גם באטלס הנוכחי מפורטים ממוצעי טמפרטורה חודשיים ל-44 תחנות הפרוסות לאורך המדינה. מעבר לפירוט הממוצעים בתחנות ספציפיות, בחינת השינויים התבססה בעיקר על השוואת ערכי הטמפרטורות של הממוצעים הרב-שנתיים בין המפות המופיעות באטלסים השונים. המפות שהופקו בשני האטלסים האחרונים (1995-2009 ו-2006-2020),

מבוססות על כל התחנות שפעלו במרבית זמן תקופת המיצוע[3], בכלל זה שימוש גם בתחנות שאינן של השמ"ט, באם ציוד המדידה ותנאי המדידה בהן נמצאו נאותים. בסך הכל השתתפו 120-125 תחנות (של השמ"ט וגופים ממשלתיים אחרים) בהפקת המפות בכל אחד משני אטלסים אלו. האטלס הישן יותר לתקופה 1964-1979, הוכן על סמך 38 תחנות כפי שפורסם באטלס אקלימי לתכנון פיסי וסביבתי בישראל (ביתן ורובין, 1991).

מפות האטלסים של שתי התקופות האחרונות, כוללות מפות חודשיות ושנתיות של טמפרטורת המקסימום והמינימום היומי (TX ו-TN בהתאמה), הממוצע היומי[4] (TM) והמשרעת היומית (DTR). מפות אלו הוכנו בשיטה של רגרסיה רב משתנית שהותאמה לכל אחת מהן בנפרד, ראו מתודולוגיה מפורטת להפקת המפות בכל אחת מתקופות המיצוע בדפי ההסבר הנלווים לאטלס האקלימי באתר השמ"ט (1995-2009, 2006-2020).

הטמפרטורה הינה משתנה מרחבי רציף המאופיין בשיעור שינוי דומה בין אזורים סמוכים ולכן אין צורך לאמוד את השינוי ברזולוציה מרחבית מאוד גבוהה. לאור זאת, חולקה הארץ לשמונה תתי-אזורים המאופיינים במספר סוגי אקלים. חלוקה זו מבוססת על עבודה קודמת שלנו (יוסף וחובריו, 2018), כפי שניתן לראות באיור 2. עבור כל אזור חושב הממוצע המרחבי של הטמפרטורה בו על-ידי מיצוע כל הפיקסלים הנמצאים בשטחו. ממוצעים חושבו ברמה השנתית וברמה העונתית על בסיס החלוקה המטאורולוגית המקובלת לרבעונים המבוססים על ערכים חודשיים: קיץ (יוני עד אוגוסט - JJA), סתיו (ספטמבר עד נובמבר - SON), חורף (דצמבר עד פברואר - DJF) ואביב (מרץ עד מאי - MAM).

באמצעות הממוצעים המרחבים עמדנו על ההבדלים בין התקופה האחרונה (2006-2020) לשתי התקופות הקודמות (1964-1979, 1995-2009). בחינת מובהקות השינוי בוצעה על בסיס סדרות הזמן של 26 התחנות ההומוגניות, באמצעות מבחן T-test (דו-כיווני), ברמת מובהקות $P_{value} \leq 0.05$.

למרות האמור לעיל וכדי לא לנוון את המרחב לפוליגונים בלבד, בוצע בנוסף מיפוי רציף של הפרש הממוצע השנתי של טמפרטורת המקסימום והמינימום היומי, בין האטלס הנוכחי 2006-2020 לאטלס הישן 1964-1979. תהליך זהה בוצע גם עבור הפרש ממוצע הטמפרטורה של ארבעת החודשים החמים וגם הוא מופה ומוצג על-גבי מפה רציפה.

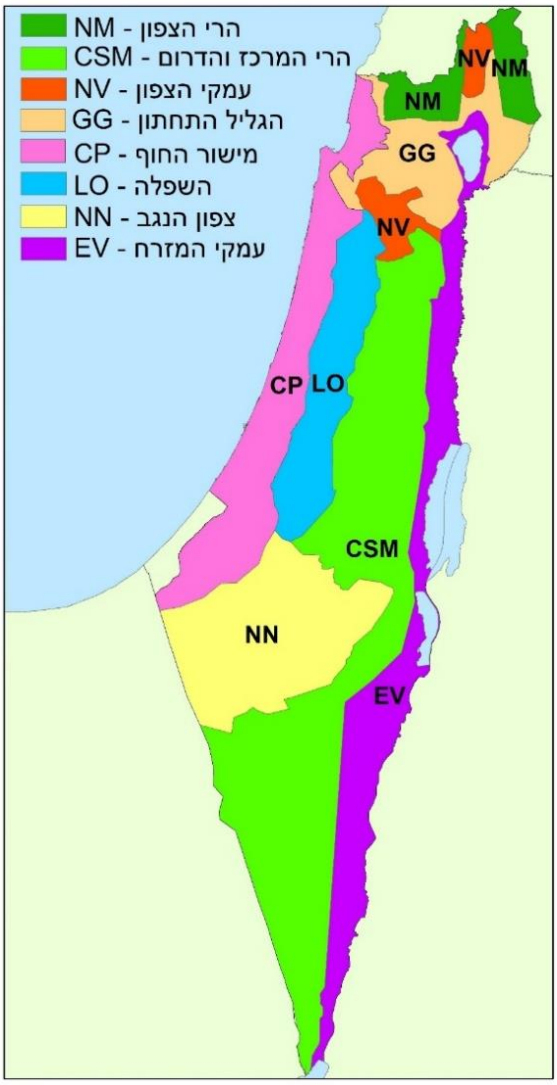
2.2. אימות הקשר בין ממוצע המחושב ממפה רציפה לבין ממוצע מתחנות מייצגות

מפות שני האטלסים האחרונים הופקו, כאמור, באמצעות מספר גדול יחסית של תחנות, אך יש לציין שתחנות אלו לא עברו מבחני הומוגניות, קרי לא הובאו בחשבון השינויים שחלו בתנאי המדידה בתחנה לאורך השנים. ההנחה היא שעל-ידי מיצוע מספר גדול של תחנות, שינויים אלו דוגמת הבדלים הקשורים במכשור ובתנאי הצבה יתקזזו, לפחות ברמה האזורית והארצית ומה

[3] במקרה של תחנות באזורי עניין שאינם מכוסים על-ידי תחנות אחרות, נעשה מאמץ להתאים את נתוניהן לממוצע הרב-שנתי של האטלס גם אם המדידות נערכו לתקופת זמן קצרה יותר.
[4] מאחר שבתקופה הראשונה לא היתה מדידה ברזולוציה עתית גבוהה, הממוצע היומי הוא ממוצע בין טמפרטורת המקסימום היומית לטמפרטורות המינימום היומית, (TX+TN)/2.

שבעיקר יבלוט הוא השינוי האקלימי. מכאן, הנחנו, כי שיעור השינוי האקלימי צריך להיות דומה, בין אם הממוצע חולץ מתוך מפה רציפה או חושב על-ידי ממוצע של תחנות המתארות את אותו תת-אזור.

הנחה זו נבדקה באמצעות 26 תחנות שעברו תהליך הומוגניזציה (Yosef et al., 2018; Yosef et al., 2019), כאשר כל אזור מיוצג על-ידי תחנה אחת לפחות. במקרים בהם ישנן מספר תחנות באותו אזור, חושב הממוצע ביניהן לצורך ייצוג אזור העניין. את רשימת האזורים והתחנות המייצגות ניתן לראות בטבלה 1. הממוצע הארצי חושב על בסיס כלל התחנות ו/או מיצוע כל האזורים במפות.



איור 2. חלוקת הארץ לתתי-אזורים: NM (הרי הצפון); NV (העמקים הצפוניים), GG (גליל תחתון, גליל מערבי ודרום רמה"ג); EV (עמקי המזרח); CSM (הרי המרכז והדרום); LO (השפלה וצפון מערב השומרון); CP (מישור החוף); NN (הנגב).

טבלה 1. רשימת האזורים והתחנות בעלות סדרות נתונים הומוגניים המייצגות כל אזור לכל התקופות.

סימון	אזור	תחנה
NM	הרי הצפון	צפת
GG	גליל תחתון, גליל מערבי ודרום רמה"ג	תבור - כדורי
NV	העמקים הצפוניים	כפר בלום, עפולה, דפנה, כפר יהושע
CP	מישור החוף	עכו, עין החורש, בית דגן, נגבה, בשור-חווה, תל אביב-חוף, יבנה, דורות
EV	עמקי המזרח	בית ציידא, צמח, שדה אליהו, סדום, יטבתה, אילת
CSM	הרי המרכז והדרום	ירושלים
LO	השפלה ומערב השומרון	בית ג'מל, גלעד
NN	הנגב	באר שבע, להב, שדה בוקר

2.3. ביטויי מגמת ההתחממות בערכי קיצון חודשיים ושיאים מוחלטים

בחלק האחרון של עבודה זו התמקדנו בשכיחות המקרים בהם נשברו שיאי חום וקור בכל אחת מהתקופות הנ"ל. ניתוח מסוג זה מחייב שימוש בערכים יומיים ומכאן הצורך בשימוש בנתוני תחנות במקום בממוצעים אזוריים. הפעם בחנו את השינויים החודשיים, עבור ממוצע המדדים הבאים: היום החם ביותר (TXX), הלילה הקר ביותר (TNN), היום הקר ביותר (TXN) והלילה החם ביותר (TNX). הממוצע חושב על בסיס נתוני הטמפרטורה היומית המקסימלית/המינימלית שנמדדה בכל חודש ב-15 שנות המיצוע בכל אחת משלוש התקופות.

את השינוי בטמפרטורת המקסימום/מינימום החודשי המוחלט (ערך השיא) בדקנו על בסיס התחנות להן קיימים נתונים יומיים מדודים החל מ-1964 ועד 2020, המכסים את שלוש התקופות הנחקרות. התקופה 2006-2020 קוצרה לתקופה 2010-2020 כדי לא ליצור חפיפה עם התקופה 1995-2009 וכן נבחנה תקופה נוספת 1980-1994, כדי ליצור רצף היסטורי החל משנת 1964. יש לציין, כי ישנם שיאים שנקבעו לפני שנת 1964 (חלקם אף אירעו בתחילת המאה שעברה ובסוף המאה ה-19), אך מאחר שהיסטוריית הנתונים בכל תחנה שונה, העדפנו להתייחס לתקופה אחידה בה פעלו כל התחנות.

כאמור, מספר השנים בכל תת-תקופה אינו זהה, לכן מספרם של הערכים המוחלטים נורמל על-ידי סכימת מספר השיאים שנחצו בכל תת-תקופה וחלוקתו במספר השנים של אותה תת-תקופה. יחס זה הוצג באחוזים ביחס לתקופה כולה. לדוגמה, התקופה האחרונה שהיא הקצרה ביותר (2010-2020) חושבה באופן הבא: סכמנו את מספר הפעמים בהן נשבר שיא וחילקנו במספר השנים של תת-תקופה זו, שבמקרה הזה הוא 11. באופן דומה בוצע החישוב לשאר התקופות בהתאם למספר השנים. התוצאות הוצגו ביחס לחלק היחסי של כל תקופה מתוך התקופה כולה (1964-2020).

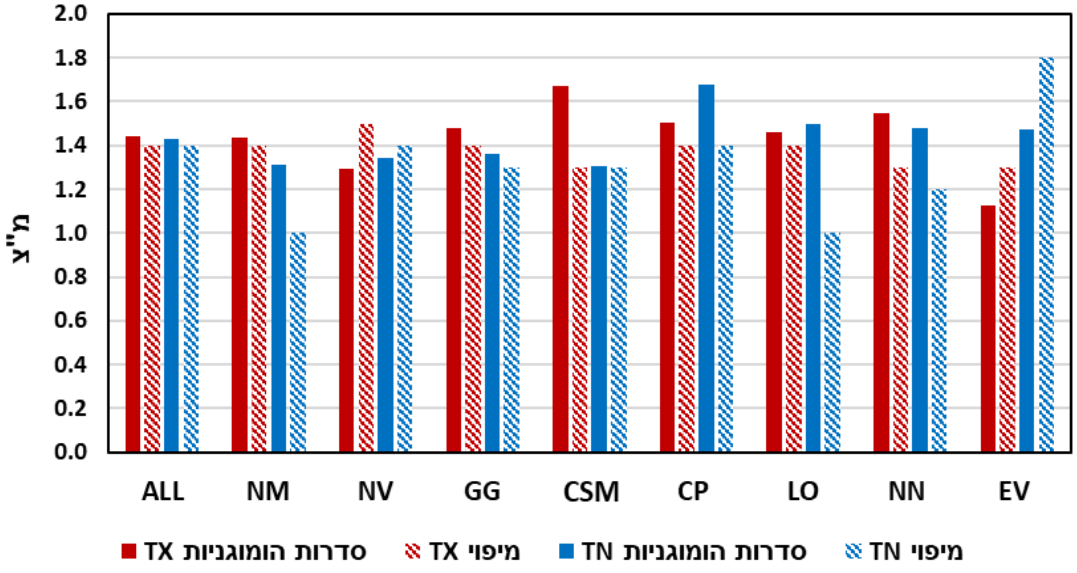
להרחבה ומידע נוסף על הערכים המוחלטים ראו דפי ההסבר באטלס האקלימי.

3. תוצאות

3.1 השינוי בטמפרטורת המקסימום והמינימום היומי הממוצע

כדי להעריך את שיעור השינוי בכל אחד מהאזורים והעונות נבדקו ההפרשים הממוצעים של טמפרטורת המקסימום (TX) וטמפרטורת המינימום (TN) לכל אזור אקלימי בין האטלס הנוכחי בתקופה 2006-2020, לבין שתי התקופות הקודמות ברמה השנתית והעונתית.

כאמור, ההפרשים בין התקופות מבוססים על הערכים שחושבו מתוך המפות. אך כדי לתקף את הממצאים שהתקבלו מהמפות, בדקנו את שיעור השינוי (הפרשי הטמפרטורות) בין התקופה 2006-2020 לתקופה 1964-1979 בשתי גישות, פעם אחת על-ידי ממוצע המחושב מהמפות הרציפות ופעם שניה על-ידי חישוב המבוסס על סדרות נתונים הומוגניים של תחנות מייצגות. איור 3 מציג את התוצאות על פי שתי השיטות. מן האיור עולה שההבדלים בין השיטות, ברמה הארצית (ALL) קטנים. ברמה האזורית נמצא כי בעמקי המזרח (EV) קיימים הבדלים גדולים יחסית (0.3 מ״צ) בהפרש טמפרטורת המינימום (TN) שחושב על בסיס המפות לתקופות השונות, לשינוי שחושב מסדרות הזמן ההומוגניות של התחנות. הבדל בכיוון ההפוך, נמצא באזורי השפלה ומערב השומרון (LO) וגם בהרי הצפון (NM), קרי שיעור שינוי גדול יותר בתחנות ביחס לשינוי שחושב מתוך המפה (הבדל של 0.5 מ״צ ו-0.3 מ״צ בהתאמה). בטמפרטורת המקסימום (TX) נמצא הבדל יחסית משמעותי באזור הרי המרכז והדרום (CSM) שבו שיעור ההתחממות בסדרות ההומוגניות היה גדול יותר מאשר במיפוי (עם הבדל של 0.4 מ״צ). למרות הבדלים נקודתיים אלו, בסך-הכל להערכתנו ניתן להתבסס על ההפרשים שנמצאו על בסיס המפות לבחינת השינויים במרחב ובזמן.



איור 3. השוואת התחממות הממוצע השנתי של טמפרטורת המקסימום / המינימום לפי שיטת ממוצע מרחבי (הפרש בין המפות) ולפי שיטת תחנות הומוגניות מייצגות. ההפרשים מציגים את ההבדלים בין התקופה 2006-2020 לתקופה 1964-1979.

3.2 הבדלים עונתיים בטמפרטורת המקסימום והמינימום היומית הממוצעת

באיורים 4 ו-5 מוצגים ההבדלים בין התקופות על גבי מפה ארצית לפי חלוקת האזורים שהוצגו באיור 2, עבור טמפרטורת המקסימום והמינימום בהתאמה. בחלקו העליון של איור 4 מוצגים הערכים של ההפרשים בטמפרטורת המקסימום הממוצעת היומית (TX), בין התקופה 2006-2020 לתקופה 1964-1979. בחלקו התחתון של איור זה, מופיעים ההפרשים בין התקופה 2006-2020 לתקופה 1995-2009. מאיור זה עולה כי ההבדלים בטמפרטורת המקסימום גדולים יותר ביחס לתקופה 1964-1979 מאשר ביחס לתקופה הקודמת 1995-2009. הדבר אינו מפתיע, שכן בעשורים האחרונים קיימת מגמת התחממות מתמדת (איור 1) ולכן ההפרש בין שתי תקופות סמוכות (עם חפיפה של 4 שנים) נמצא קטן יותר. עוד ניתן לראות שהעלייה בטמפרטורה הינה די אחידה בכלל האזורים עבור כל אחת מהעונות. בהשוואה לתקופה הראשונה 1964-1979, כל השינויים בכל אזור ועונה נמצאו מובהקים סטטיסטית, כאשר הקיץ מאופיין בעלייה הגדולה ביותר בשיעור ממוצע של כ-1.6 מ״צ, האביב בכ-1.4 מ״צ, הסתיו בכ-1.3 מ״צ והחורף בכ-1.2 מ״צ.

כאמור, שיעור ההתחממות בין התקופה האחרונה לתקופה 1995-2009 הינו קטן יותר, אך למרות זאת, גם כאן קיימת התחממות שנתית מובהקת בממוצע הארצי (ALL) ובכל תתי-האזורים (לא מוצג). עוד נמצא כי עונות הסתיו והאביב מציגות את העלייה הגבוהה ביותר בשיעור ממוצע של כ-0.7 מ״צ ו-0.9 מ״צ בהתאמה בעוד שהקיץ והחורף התחממו בשיעור דומה של כ-0.5 מ״צ. כלל עליות אלו, בעונות השונות, בממוצע הארצי, נמצאו מובהקות סטטיסטית. לעומת זאת, ברמה האזורית, חלק מההבדלים בין שתי התקופות האחרונות אינם מובהקים סטטיסטית (אזור מנוקד באיור 4) בעיקר עבור מספר אזורים בקיץ ובחורף. בהרי הצפון לא נמצאה מובהקות סטטיסטית באף אחת מהעונות. בהתחשב בשנים החמות שפוקדות אותנו בתחילת העשור השלישי של המאה ה-21, יש להניח כי ברגע שניתן יהיה למצע 15 שנים נפרדות לחלוטין מהתקופה 1995-2009, ההבדלים בין התקופות יהיו בולטים אף יותר.

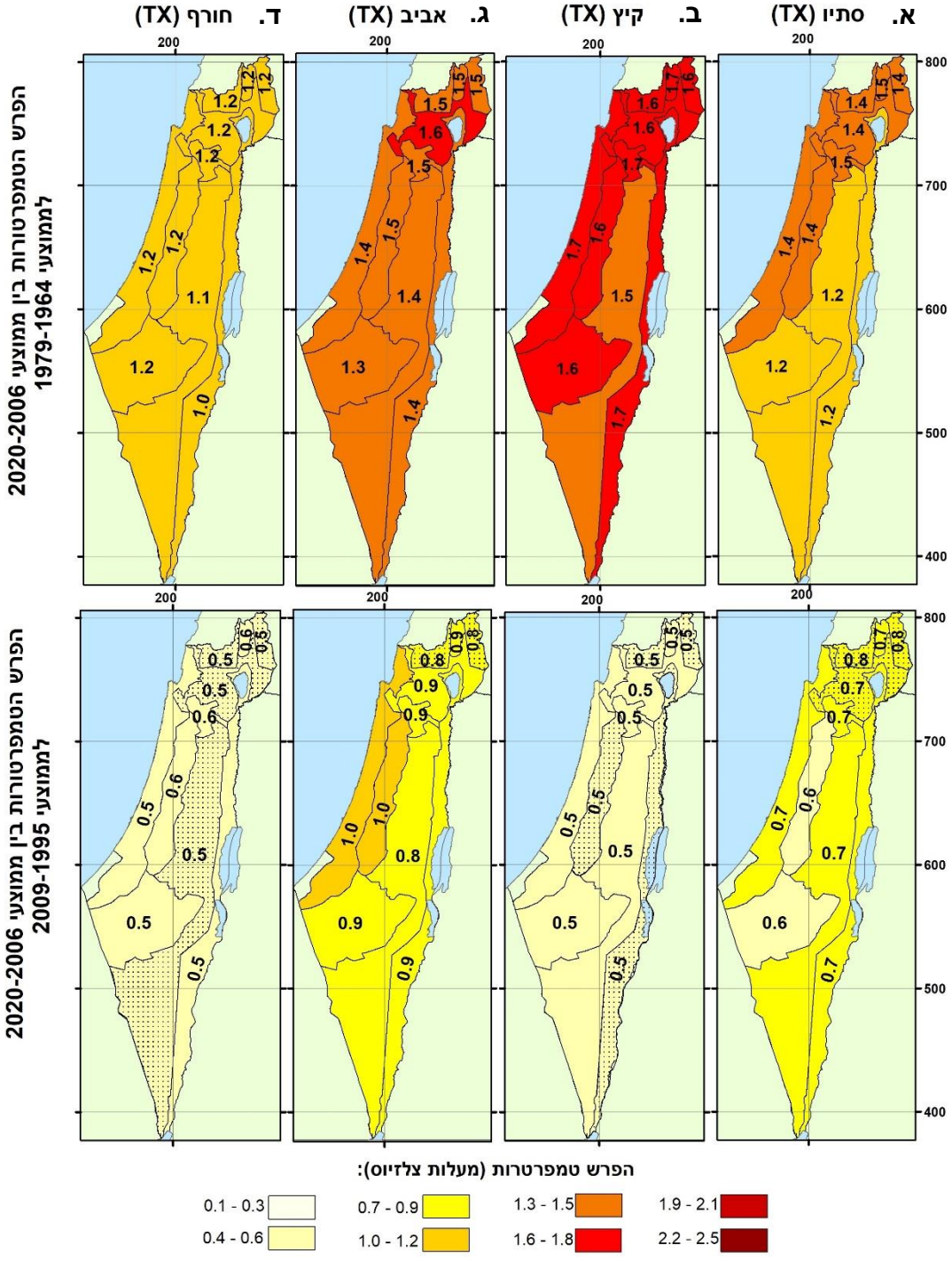
איור 5 מציג את ההבדלים בטמפרטורת המינימום הממוצעת היומית (TN), לכל אזור ובכל עונה בנפרד. בדומה לטמפרטורת המקסימום (איור 4), גם במקרה זה ניכרת התחממות משמעותית ומובהקת בין התקופה 2006-2020 לתקופה המוקדמת 1964-1979, בכל העונות. בניגוד לטמפרטורת המקסימום, כאן ניתן לראות שונות מרחבית ברורה יותר בפרט בקיץ ובעונות המעבר בין האזורים השונים. מניתוח זה עולה כי טמפרטורת המינימום עלתה בקיץ ובסתיו בממוצע אף יותר מטמפרטורת המקסימום. שיעור התחממות טמפרטורת המינימום הממוצעת בקיץ הינו הגבוה ביותר ועומד על כ-1.9 מ״צ ובסתיו כ-1.5 מ״צ בממוצע. בעונות אלו רואים עלייה משמעותית בטמפרטורה באזור מישור החוף (קיץ 1.9 מ״צ, סתיו 1.7 מ״צ) ובעמקים הצפוניים (קיץ 2.1 מ״צ, סתיו 1.7 מ״צ). כמו כן, אזור גליל תחתון, גליל מערבי ודרום רמה״ג (GG) חוו עלייה של 1.8 מ״צ בקיץ וכ-1.4 מ״צ בסתיו. בהרי המרכז והדרום (CSM) הפרש זה עומד בקיץ גם כן על ערך גבוה של 1.9 מ״צ ובסתיו על 1.3 מ״צ. ממצאים אלו תואמים לדיווחים מעבודות קודמות שהראו שהמגמה במספר הלילות החמים[5] עלתה ביתר שאת בשלושת העשורים האחרונים (יוסף וחובריו, 2018 ; יוסף וחובריו, 2019 ; Yosef et al., 2019), ועולה גם בקנה אחד עם ההתחממות הכללית שנצפתה

[5] לילות בהן טמפרטורת המינימום גדולה מ-20 מ״צ וגם לילות בהם טמפרטורת המינימום גבוהה מאחוזון 90.

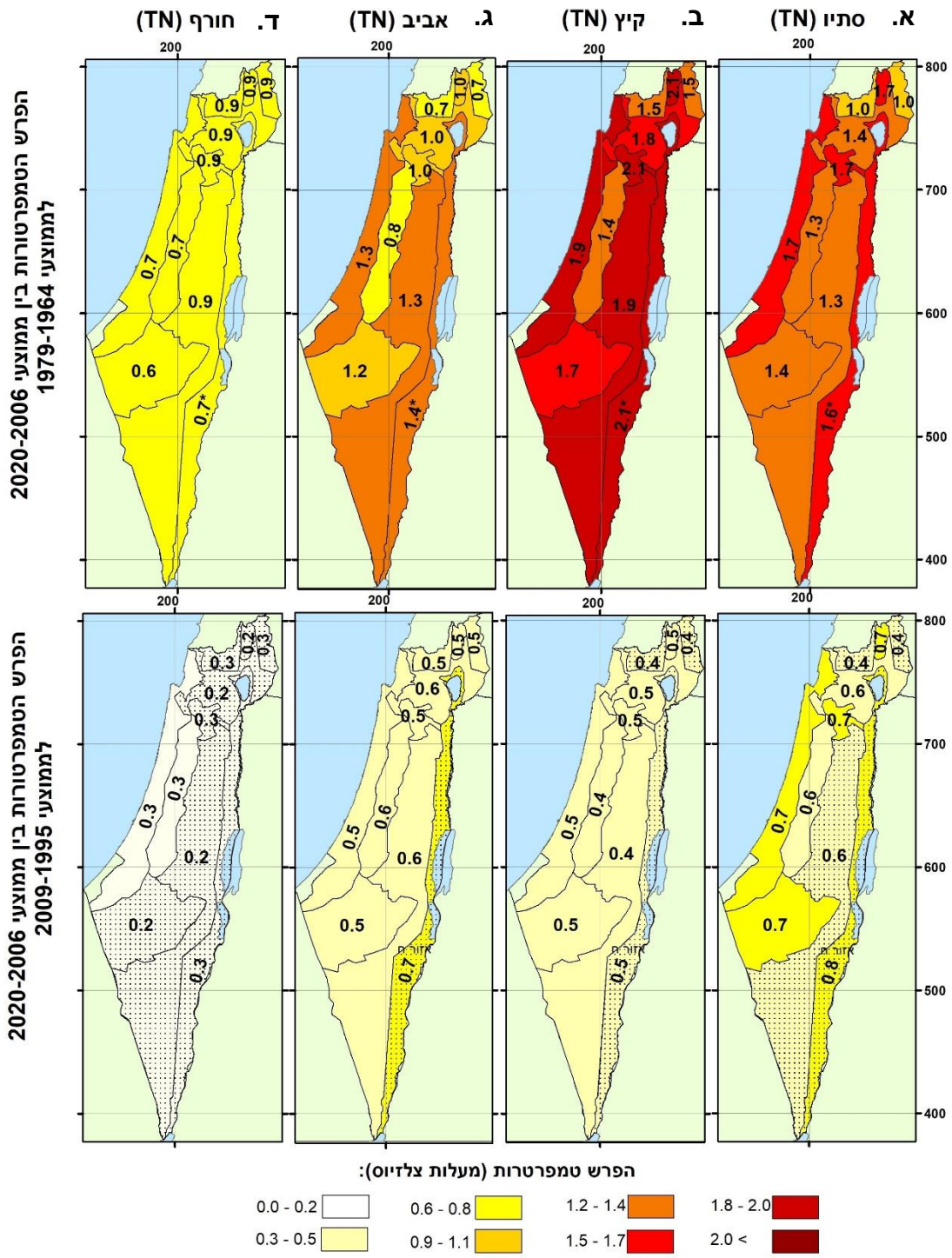
בעשורים האחרונים בטמפרטורה של מזרח הים התיכון (Zittis et al., 2022 ;Nykjaer, 2009). בעונת האביב נרשמה התחממות ארצית מתונה יותר של כ-1.2 מ״צ עם שונות אזורית של 0.2± מ״צ מערך ממוצע זה, למעט הרי הצפון והשפלה בהם התרחשה התחממות מתונה של 0.7-0.8 מ״צ בלבד. בחורף התרחשה ההתחממות המתונה ביותר, כ-0.9 מ״צ בממוצע בהרים ובעמקי הצפון וכ-0.7 במרבית האזורים האחרים. יש לציין שאזור עמקי המזרח (EV) התחמם על בסיס המיפוי בצורה משמעותית יותר מהמערך ההומוגני וזאת כנראה בעקבות התחממות לא קלימטולוגית של טמפרטורת המינימום כפי שאנחנו יודעים על מספר תחנות באזור זה, דוגמת גידול העיר אילת וסגירת התחנה על ידי מבנים וכן שינויים באזור סדום. לאור זאת, העדפנו במקרה זה, לקחת עבור אזור זה בלבד, את ההבדלים בין התקופות כפי שהם באים לידי ביטוי במערך התחנות ההומוגניות ולא מתוך המפה.

גם כאן, השוואה בין תקופה 2006-2020 לתקופה 1995-2009, מראה כצפוי, על הפרשים נמוכים יותר אך גם על שונות קטנה יותר במידת ההתחממות בין האזורים. בעונות המעבר נמצאה התחממות דומה בשיעור ממוצע של כ-0.6 מ״צ, בקיץ כ-0.5 מ״צ ובחורף שיעור ההתחממות הינו כ-0.3 מ״צ. בקיץ ובאביב כמעט כל חלקי הארץ חוו עלייה מובהקת בניגוד לחורף, שם העלייה בטמפרטורת המינימום אומנם מאפיינת את כל האזורים, אך נמצאה מובהקת רק באזור השפלה ומישור החוף. בסתיו העלייה נמצאה מובהקת בכלל האזורים למעט באזור ההרים (CSM ו-NM) וכן בעמקי המזרח (EV). בעמקי המזרח (EV), באופן עקבי, לא נמצאה מובהקות סטטיסטית באף אחת מהעונות.

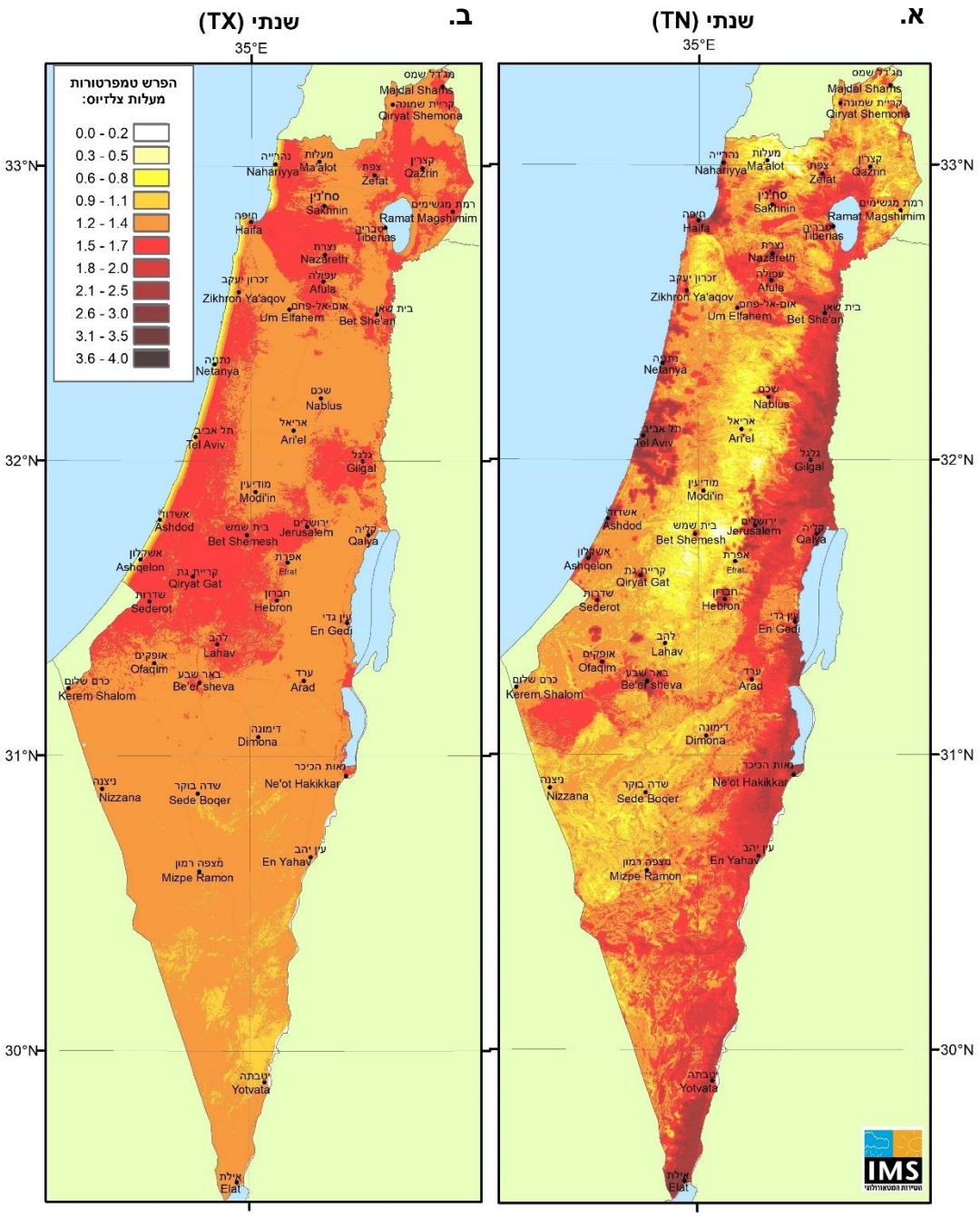
יחד עם המיצוע על פי חלוקה אזורית מוגדרת, כפי שהוצג באיורים 4 ו-5, מצאנו לנכון לתאר את השינוי המרחבי גם באמצעות מפה רציפה ברזולוציה מרחבית גבוהה. איור 6 מציג את מפת ההפרשים בין התקופה 2006-2020 לתקופה 1964-1979, עבור טמפרטורת המקסימום והמינימום השנתית הממוצעת. מאיור זה עולה כי התחממות טמפרטורת המקסימום, גם במיפוי רציף, נראית אחידה למדי בעוד שהתחממות טמפרטורת המינימום הטרוגנית ומגיעה לשיא ההתחממות בלילות באזורים עירוניים שהלכו והצטופפו, אך גם באזורים פתוחים יותר כמו עמקי הצפון והמזרח. איור 7, בדומה לאיור 6, מציג את ההפרשים בטמפרטורה עבור ממוצע ארבעת החודשים החמים בלבד (יוני-ספטמבר). ניתן לראות כי האזור העירוני עדיין מתחמם באופן ניכר ביחס לשטחים הפתוחים אך הפערים האזורים קטנים יותר. זאת במקביל להתחממות בולטת בטמפרטורת הים הקיצית בעשורים האחרונים (García-Monteiro et al., 2022), לה יש השפעה רבה על טמפרטורות המינימום בחודשי הקיץ בישראל ולא רק באזור מישור החוף.



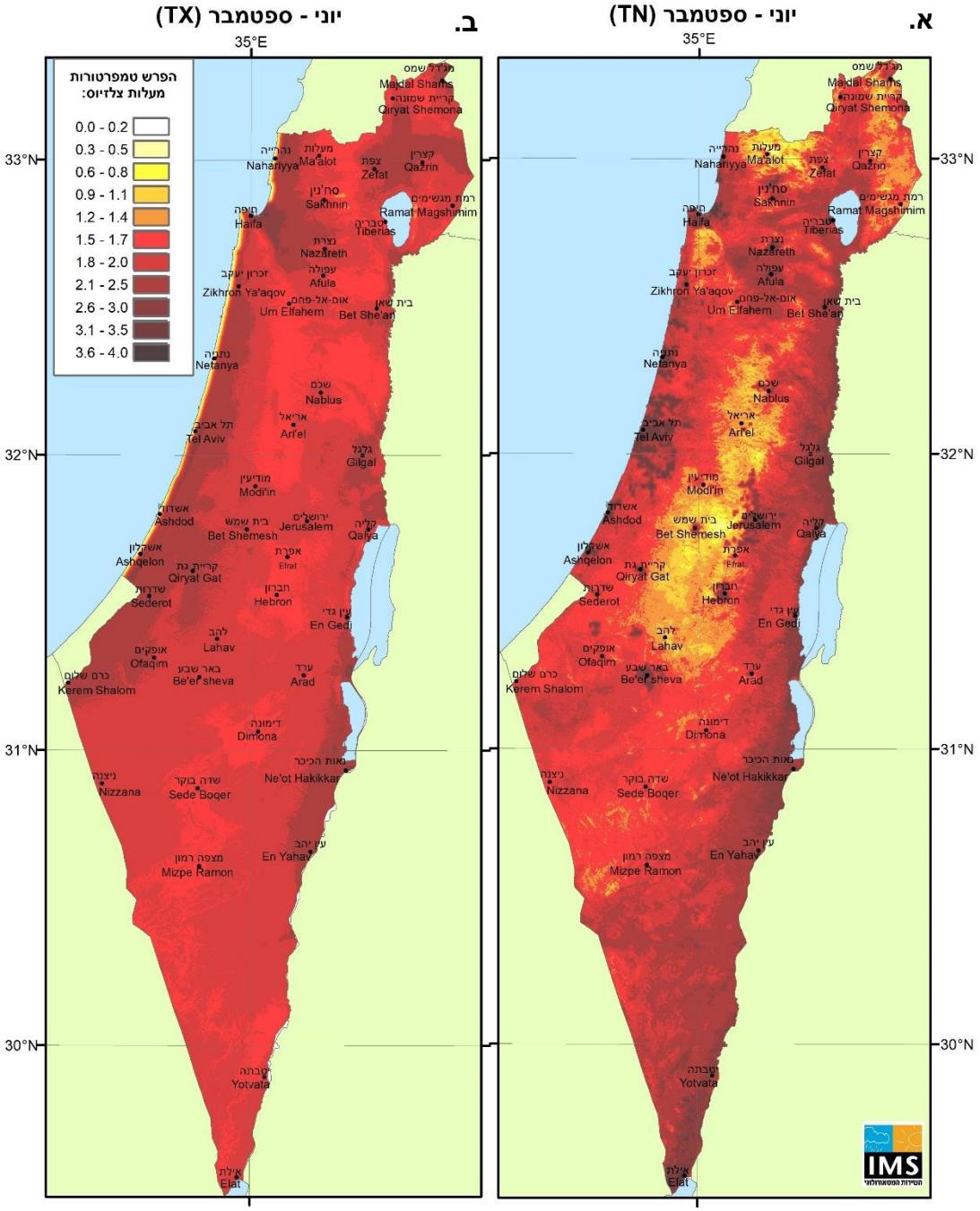
איור 4. ההפרש הממוצע השנתי של טמפרטורת המקסימום היומי בכל אחד מהאזורים השונים בין התקופה 2020-2006 לבין התקופה 1979-1964 (פאנל עליון) ולבין התקופה 2009-1995 (בפאנל התחתון), בעונות: (א) סתיו, (ב) קיץ, (ג) אביב, (ד) חורף. אזורים מנוקדים אינם מובהקים סטטיסטית.



איור 5. הפרש הממוצע השנתי של טמפרטורת המינימום היומי בכל אחד מהאזורים השונים בין התקופה 2020-2006 לבין התקופה 1979-1964 (פאנל עליון) ולבין התקופה 2009-1995 (בפאנל התחתון), בעונות: (א) סתיו, (ב) קיץ, (ג) אביב, (ד) חורף. אזורים מנוקדים אינם מובהקים סטטיסטית. הסימן * מצביע על הפרש על בסיס המערך ההומוגני.



איור 6. הפרש הממוצע השנתי של טמפרטורת המינימום (א) וטמפרטורת המקסימום (ב) היומי, בין ממוצעי 2006-2020 ל-1964-1979 .



איור 7. כמו איור 6 רק עבור הפרש הטמפרטורות של ממוצע ארבעת החודשים החמים בלבד, יוני עד ספטמבר.

3.3 ההבדלים במשרעת הטמפרטורה היומית (DTR)

איור 8 מציג את ההבדלים במשרעת הטמפרטורה היומית ברמה השנתית וממנו ניתן ללמוד כי בממוצע הארצי (ALL) לא ניכר שינוי מהותי במשרעת היומית הממוצעת, כלומר קצב עליית טמפרטורת המקסימום דומה לקצב עליית טמפרטורת המינימום בין תקופות אלו. יחד עם זאת בבחינה אזורית ישנם שינויים מסוימים במשרעת הטמפרטורה היומית הממוצעת ולשני הכיוונים. כך למשל באזור הרי המרכז והדרום (CSM), חלה עלייה גבוהה יחסית לשאר האזורים ומובהקת של ה-DTR בשיעור של 0.36 ו-0.23 מ״צ בין התקופה 2006-2020 לתקופה 1964-1979 ולתקופה 1995-2009 בהתאמה. לעומת זאת, באזור עמקי המזרח (EV) נרשמה הירידה הגבוהה ביותר 0.35 מ״צ ביחס לתקופה 1964-1979 ו-0.13 מ״צ ביחס לתקופה 1995-2009. באזור מישור החוף (CP) נמצאה ירידה ב-DTR בשיעור ממוצע של 0.17 מ״צ בין התקופה האחרונה לתקופה 1964-1979, לצד עלייה של 0.12 מ״צ ביחס לתקופה 1995-2009. השוואת התקופה הנוכחי לזו שקדמה לה (1995-2009) מגלה כי ה- DTR עלה במרבית המקרים בשיעור קטן ולא מובהק.

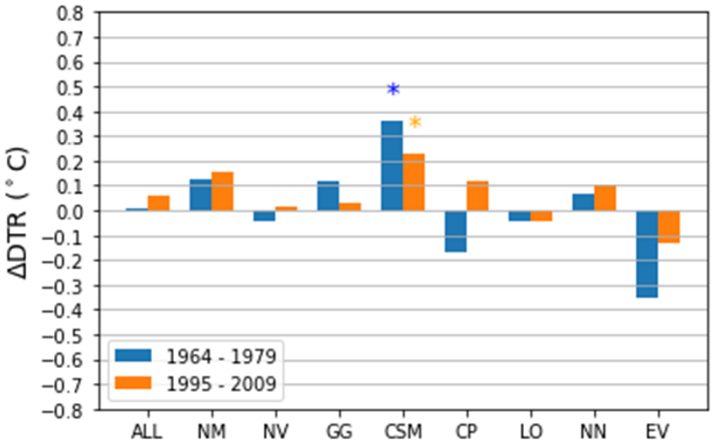
בשונה מהבחינה השנתית, ברמה העונתית נמצאו שינויים גדולים יותר ב-DTR. איור 9 מציג את ההבדלים במשרעת היומית בכל אחת מהעונות בהתאם לאזורים השונים. השוואה בין התקופה 2006-2020 לתקופה 1964-1979 בעונת הקיץ (איור 9 א׳ בכחול), מראה שבכל האזורים הפרש ה-DTR בין התקופות הינו שלילי למעט באזור הרי המרכז והדרום (CSM) שם נצפתה עלייה מובהקת של כ-0.4 מ״צ. כלומר המשרעת היומית בהרי המרכז בתקופה האחרונה גדולה יותר בהשוואה לתקופה 1964-1979 בניגוד לשאר האזורים. לעומתו אזור מישור החוף (CP) בולט עם ירידה מובהקת במשרעת היומית בשיעור ממוצע של 0.6 מ״צ ביחס לתקופה 1964-1979. צמצום משרעת יומית זו עשויה להיגרם מעלייה בלחות המוחלטת בשל התחממות פני הים וכמות האדים הנמצאים תחת האינברסיה. אלו בתורם מקטנים את שיעור ההתקררות הקרינתית (גם בעמקים פנימיים יותר) ומכאן לעלייה בטמפרטורת המינימום. תרומה נוספת להקטנת המשרעת היומית במישור החוף, יכולה להתקבל גם כתוצאה מהתגברות אפקט אי החום העירוני המגיע לשיאו בלילה ותורם לעלייה בטמפרטורת המינימום באזורים אורבניים. בעמקים המזרחיים (EV) והצפוניים (NV) נמצאו הבדלים לא מובהקים בשיעור של 0.7 מ״צ ו-0.5 מ״צ בהתאמה. בבחינת הפרש ה-DTR בין התקופה הנוכחית לזו שקדמה לה 1995-2009, לא נמצאו שינויים משמעותיים.

שינוי דומה ניתן לראות גם בעונת הסתיו (איור 9 ב׳), למעט בהרי הצפון (NM) שם נצפתה עלייה ב-DTR בעיקר בהשוואה התקופה הנוכחית עם התקופה 1964-1979 בשיעור של 0.3 מ״צ.

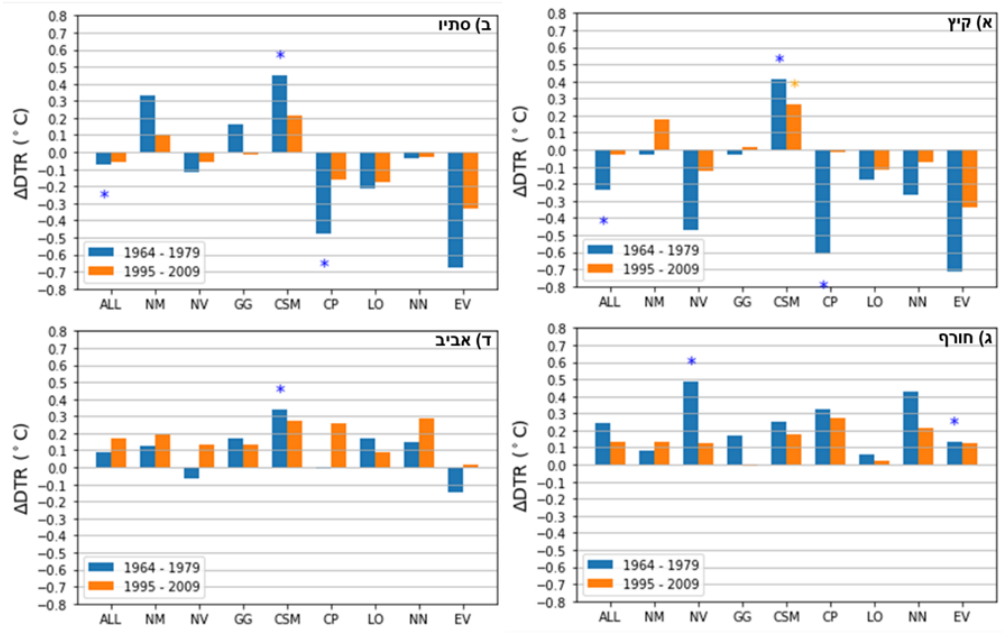
בעונת החורף (איור 9 ג׳) בכל האזורים ההבדלים נמצאו חיוביים בהשוואה התקופה האחרונה לשתי התקופות הקודמות. שיעור השינוי הינו עד כחצי מעלה (טמפרטורת המקסימום עלתה יותר מאשר המינימום מה שהוביל למשרעת גדולה יותר בתקופה הנוכחית היחס לעבר). שינוי מובהק ובולט נמצא בעמקי הצפון (NV) ביחס לתקופה 1964-1979 עם שינוי בשיעור של 0.5 מ״צ. ברמה הארצית חלה עלייה לא מובהקת של 0.2 מ״צ. גידול משרעת הטמפרטורות ככלל ובעמקים בפרט עשוי ללמד על אפשרות ליותר לילות המאופיינים בהתקררות קרינתית (ימים בהירים) ופחות ימי גשם המלווים בערבול אוויר ולחות גבוהה המקטינים כאמור את משרעת הטמפרטורה. ממצא זה עולה בקנה אחד עם ממצאים המצביעים על ירידה כללית במספר ימי הגשם בארץ (יוסף וחובריו, 2019; חלפון ויוסף, 2021).

גם בעונת האביב (איור 9ד') בדומה לחורף, חלה עלייה במשרעת היומית (בהשוואה לתקופה 1964 – 1979), כמעט בכל האזורים למעט בעמקי המזרח (EV) שבו נרשמה ירידה לא מובהקת במשרעת היומית בשיעור של 0.1 מ״צ. אזור הרי המרכז והדרום (CSM) הינו היחיד שעלה בצורה מובהקת בשיעור של 0.3 מ״צ. ברמה הארצית חלה עלייה קטנה ולא מובהקת של פחות מ-0.1 מ״צ.

מהתוצאות ניתן להסיק שהפרשים במשרעת היומית משתנים בין העונות ומתקזזים ברמה השנתית. בעונת הקיץ והסתיו טמפרטורת המינימום עלתה יותר מאשר טמפרטורת המקסימום, בין היתר בשל עלייה בלחות היחסית תחת שכבת האינברסיה (Ziv and Saaroni, 2011), בעוד שבעונות החורף והאביב המצב הפוך.



איור 8. ההבדלים השנתיים במשרעת הטמפרטורה בכל אחד מהאזורים האקלימיים השונים בין התקופה 2006-2020 לבין התקופה 1964-1979 (בכחול) ולבין 1995-2009 (בכתום). האזורים המסומנים ב-* מציינים תוצאות מובהקות סטטיסטית.



איור 9. ההבדלים במשרעת הטמפרטורה בכל אחד מהאזורים השונים בין התקופה 2006-2020 לבין התקופה 1964-1979 (בכחול) ולבין 1995-2009 (בכתום) לחודשים יוני – אוגוסט (א), ספטמבר – נובמבר (ב), דצמבר – פברואר (ג), מרץ – מאי (ד). האזורים המסומנים ב-* מציינים תוצאות מובהקות סטטיסטית.

3.4 הפרשים בממוצעי ערכי המקסימום והמינימום החודשיים של הטמפרטורה

בשונה מממוצע טמפרטורת המקסימום והמינימום היומי, המורכב מכ-450 ערכים בכל חודש (כ-30 יום * 15 שנה), ממוצעי היום החם ביותר (TXX), הלילה הקר ביותר (TNN), היום הקר ביותר (TXN) והלילה החם ביותר (TNX) החודשיים של הטמפרטורה, מחושבים מערך חודשי בודד בכל שנה ולכן משתנה זה רגיש יותר לאירועי מזג אויר קיצונים ומאופיין בשונות גבוהה. בשל הצורך בשימוש בערך הגבוה/הנמוך ביותר בכל חודש, יש צורך בנתונים יומיים, לכן בחלק זה של העבודה נעשה שימוש בנתונים הומוגניים מהתחנות השונות בלבד (טבלה 1). לכל שנה ולכל עונה (ראו בנספח) נבחר הערך המקסימאלי/המינימאלי, כשעל-בסיס ערכים אלו חושבו הממוצעים לכל אחת משלוש תקופות העניין.

איור 10 מציג את ההפרשים בטמפרטורות המקסימאליות של ממוצע הימים החמים ביותר TXX (איור 10א'), ממוצע הימים הקרים ביותר TNN (איור 10ב'), ממוצע הלילות החמים ביותר TNX (איור 10ג') וממוצע הימים הקרים ביותר TXN בשנה, בין התקופה 2006-2020 לתקופות 1964-1979 (בכחול) ו-1995-2009 (בכתום). כפי שניתן לראות מהאיור קיימת עלייה ברורה ומבוהקת בטמפרטורה בין התקופה האחרונה לתקופה 1964-1979 בכל המדדים ובכל האזורים (למעט אזור עמקי המזרח [EV] במדד TXN), בדגש על הימים והלילות החמים ביותר. ההשוואה בין התקופה האחרונה לתקופה 1995-2009 מעידה על המשך המגמה, בעיקר של עלייה בטמפרטורה של הלילות החמים ביותר, אם כי בשיעור נמוך יותר ועם פחות אזורים מובהקים סטטיסטית.

מדד TXX (איור 10א'): ברמה הארצית שיעור ההתחממות של ממוצע טמפרטורת הימים החמים ביותר בתקופה האחרונה, בהשוואה לממוצעי 1964-1979 עומד על 1.1 מ״צ ובהשוואה לתקופה 1995-2009 הוא 0.6 מ״צ. עלייה במדד זה נעה בין 0.5 ל-1.8 מ״צ באזורים השונים ביחס לתקופה 1964-1979. אזור מישור החוף (CP) התחמם באופן המשמעותי ביותר בשיעור של 1.8 מ״צ. שיעור ההתחממות באזורי ההרים (CSM ו-NM) גם כן גבוה יחסית ועומד על כ-1.5 מ״צ.

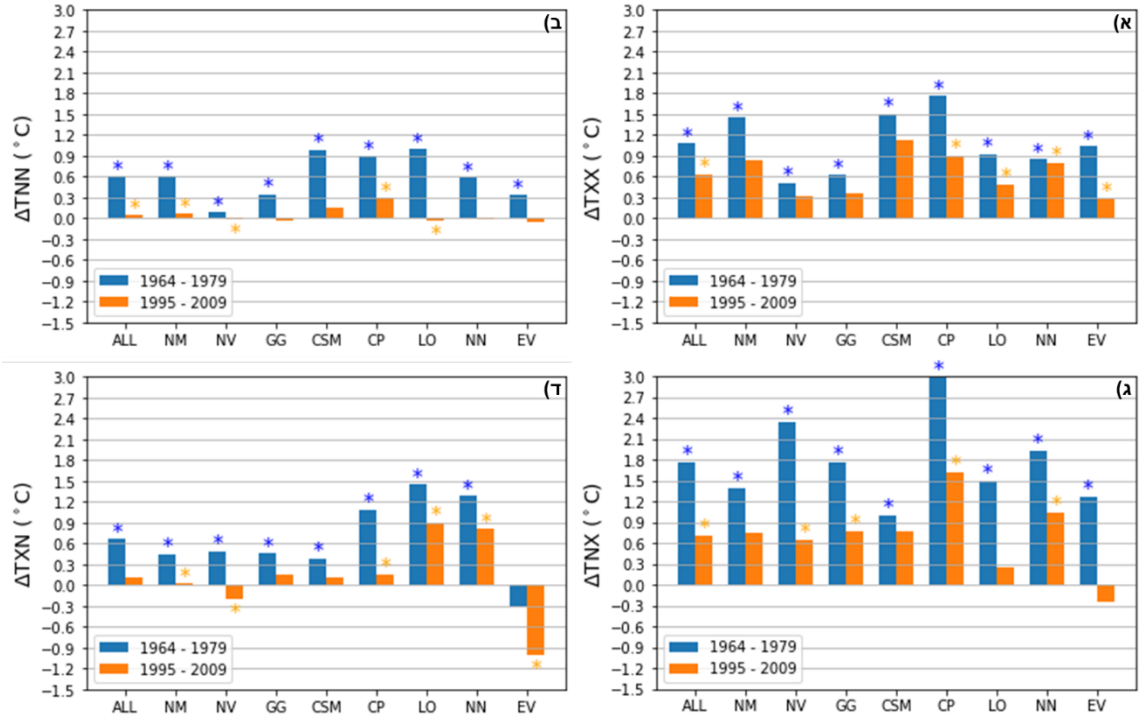
מדד TNN (איור 10ב'): ההפרשים במדד זה נמוכים משמעותית ממדד TXX. ברמה הארצית שיעור ההתחממות של ממוצע טמפרטורת הלילות הקרים ביותר בתקופה האחרונה בהשוואה לממוצעי 1964-1979 עומד על 0.6 מ״צ ובהשוואה לתקופה 1995-2009 לא נמצא הבדל. עלייה במדד זה נעה בין 0.08 ל-1.0 מ״צ באזורים השונים בהשוואה לתקופה 1964-1979. שלושה אזורים בולטים הם השפלה ומערב השומרון (LO), הרי המרכז והדרום (CSM) ומישור החוף (CP), עם עלייה מובהקת של כ-0.9 מ״צ.

מדד TNX (איור 10ג'): נמצא כי ההבדלים בין התקופות הגדולים ביותר שייכים למדד הלילות החמים ביותר. ברמה הארצית שיעור ההתחממות של מדד זה בתקופה האחרונה לעומת 1964-1979 הוא 1.8 מ״צ ו-0.7 מ״צ בהשוואה לתקופה 1995-2009. עליית הטמפרטורה נעה בין 1.0 ל-3.0 מ״צ באזורים השונים בהשוואה לתקופה 1964-1979. בדומה לממוצע הימים החמים ביותר (TXX), האזור הבולט ביותר גם כאן הינו מישור החוף (CP) עם עלייה משמעותית בטמפרטורה של 3 מ״צ וביחס לתקופה 1995-2009 שיעור החימום הוא 1.6 מ״צ. סביר להניח, כי עליות אלו, קשורות לעובדה שטמפרטורת מי ים התיכון עלתה כפי שהוזכר קודם (Nykjaer, 2009 ; von Schuckmann

et al., 2018; Garcia-Monteiro et al., 2022), וכן לעלייה בשכיחות גלי החום הקיציים, בהם שוררת במישור החוף לחות גבוהה המחלישה משמעותית את ההתקררות הלילית.

מדד TXN (איור 10ד'): ברמה הארצית קיימת ההתחממות של הטמפרטורה הממוצעת של הימים הקרים ביותר בתקופה האחרונה, ביחס לתקופה 1964-1979 בשיעור של 0.7 מ״צ ו-0.1 מ״צ בהשוואה לתקופה 1995-2009. עלייה במדד זה נעה בין 0.4 ל-1.4 מ״צ באזורים השונים בהשוואה לתקופה 1964-1979. שלושה אזורים בהן העלייה בטמפרטורה בולטת הם השפלה ומערב השומרון (LO), צפון הנגב (NN) ומישור החוף (CP).

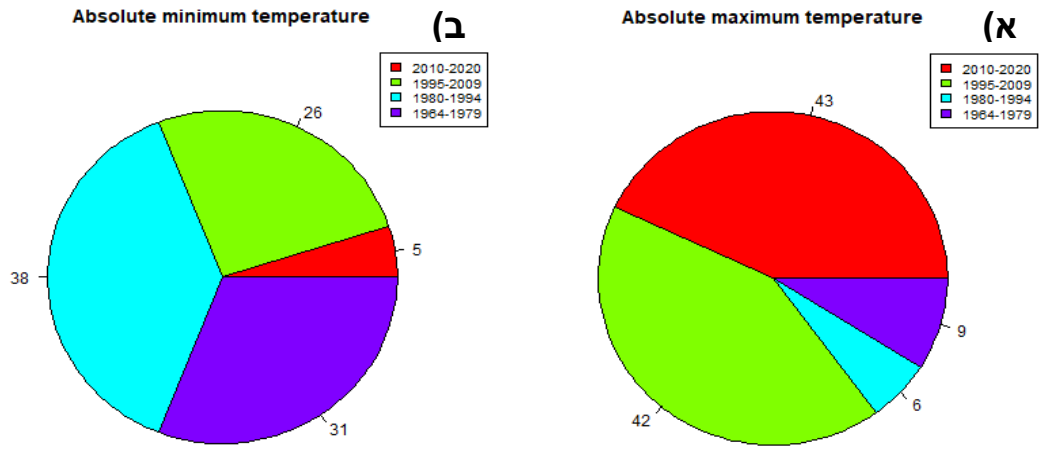
בנוסף, בוצע ניתוח עונתי לכל אחד מהמדדים, ראו בנספח של עבודה זו.



איור 10. ההפרש השנתי הממוצע בכל אחד מהאזורים השונים בין 2006-2020 לבין התקופה 1964-1979 (בכחול) ולבין 1995-2009 (בכתום) עבור TXX (א), TNN (ב), TNX (ג) ו-TXN (ד). האזורים המסומנים ב-* מציינים תוצאות מובהקות סטטיסטית ברמת מובהקות של 0.05.

3.5 ניתוח ערכי קיצון מעודכנים עבור שלוש התקופות ומחוצה להן

בחינת שכיחות ערכי שיא חודשיים מוחלטים, בוצעה כאמור רק על בסיס נתוני התחנות הוותיקות והוגבלה לתקופה 1964 עד 2020 בלבד. תקופה זו חולקה ל-4 תתי תקופות בהן נבחנה התרומה היחסית של כל תקופה לשבירת שיאים לאחר נרמול לפי מספר השנים באותה התקופה (איור 11). באיור 11 ניתן לראות כי החלק היחסי בשבירת השיאים בטמפרטורת המקסימום, הוא הגדול והמשמעותי ביותר בשתי התקופות האחרונות 2009-1995 ו-2020-2010 ועומד על 85% (איור 11א'), בניגוד לשתי התקופות שקדמו להן המהוות רק 15%. לעומת זאת שבירת שיאי קור התרחשה לרוב בתקופות 1979-1964 (31%) ו- 1994-1980 (38%), בעוד שרק 31% משבירת השיאים של טמפרטורת המינימום התרחשו בשתי התקופות האחרונות (איור 11ב'). מכאן, בשתי התקופות האחרונות ערכי הקיצון החמים שברו שיאים בתדירות גבוהה פי 2.6 משבירת ערכי הקיצון הקרים. עם זאת, יש לציין, כי כשליש מהשיאים הקרים המוחלטים נשברו בשתי התקופות האחרונות וזאת חרף ההתחממות המובהקות בעשורים אלו.



איור 11. החלק היחסי באחוזים של שבירת שיאי ערכי קיצון של טמפרטורת מקסימום (א) ומינימום (ב), בתקופות: 2020-2010 (אדום), 2009-1995 (ירוק), 1994-1980 (תכלת), 1979-1964 (סגול).

4. <u>מסקנות</u>

בעבודה זו בחנו מגוון מדדי טמפרטורה כפי שפורסמו בשלושה אטלסים שונים בתקופות: 1964-1979, 2009-1995 והתקופה האחרונה 2006-2020. השינויים נבחנו בהבדלים בטמפרטורה בין התקופה האחרונה לשתי התקופות שקדמו לה. ככלל התקופה האחרונה מאופיינת בטמפרטורות גבוהות יותר בכל הפרמטרים ברוב האזורים בישראל. באופן טבעי ההתחממות ביחס לתקופה המוקדמת יותר 1979-1964 (שהיתה קרירה אף מהעשורים שקדמו לה) גבוהה יותר מזו שהושוותה לממוצעי 2009-1995 (לה יש 4 שנים חופפות עם התקופה האחרונה). הדבר קשור בעיקר לשיעור העלייה החד והמובהק בטמפרטורה (TX ו-TN) בשלושת העשורים האחרונים העומד על כ-0.6 מ"צ בממוצע לעשור.

ככלל הטמפרטורה בתקופה 2006-2020 עלתה בכמעלה וחצי מ״צ ביחס לתקופה 1964-1979. עיקר ההתחממות נרשמה בקיץ עבור טמפרטורת המקסימום ועוד יותר עבור טמפרטורת המינימום בשיעור ממוצע של כ-1.6 מ״צ וכ-1.9 מ״צ בהתאמה. בנוסף, התחממות משמעותית נמצאה גם באביב בטמפרטורת המקסימום (1.4 מ״צ) ובסתיו בטמפרטורת המינימום בשיעור ממוצע של כמעלה וחצי. עוד עולה, כי גם עונת החורף התחממה בצורה מובהקת, אם כי בשיעור יחסית נמוך ביחס לשאר העונות, עם תוספת ממוצעת של כ-1.2 מ״צ בטמפרטורת המקסימום ו-0.8 מ״צ בטמפרטורת המינימום.

שיעור ההתחממות בטמפרטורת המקסימום הינו די דומה בין חלקי הארץ השונים בעוד ששיעור ההתחממות של טמפרטורת המינימום יותר הטרוגני במרחב (בעיקר בקיץ ובעונות המעבר). יש לציין כי אזור מישור החוף הציג את העלייה הגדולה ביותר (אחרי עמקי המזרח) בטמפרטורת המינימום בעונת הקיץ, בשיעור של 1.9 מ״צ. אזור זה מאופיין בשיעור התחממות גבוה גם בסתיו (1.7 מ״צ) ובאביב (1.3 מ״צ). ניתן לייחס חלק מההתחממות הכללית המוגברת בקיץ ובסתיו ובפרט זו של אזור מישור החוף להתחממות של טמפרטורת ים התיכון כפי שעולה ממחקרים אחרים.

במשרעת היומית (DTR) השנתית הממוצעת לא נמצאו שינוי משמעותיים. אך בחלוקה לעונות נמצא כי בקיץ ובסתיו קיימת נטייה לא מובהקת ברוב האזורים לירידה במשרעת היומית הממוצעת אותה ניתן לייחס לעלייה בלחות המוחלטת בעוד שבעונות החורף והאביב קיימת נטייה (לא מובהקת) לעלייה באזורים הנמוכים בפרט. את הגדלת משרעת הטמפרטורה ניתן לייחס בין השאר לגידול בימי התקררות קרינתית המלווה בהפחתה במספר ימי גשם.

הטמפרטורה הממוצעת של הימים החמים ביותר (TXX) והלילות הקרים ביותר (TNN) רשמו ברמה השנתית עלייה מובהקת בשיעור של 1.1 מ״צ ו-0.6 מ״צ בהתאמה, בהשוואה בין התקופה הנוכחית לתקופה 1964-1979. ברמה העונתית (ראו נספח) עולה שבחודשי הקיץ, הסתיו והאביב שיעורי ההתחממות עלו בצורה משמעותית יותר מאשר בחורף. הטמפרטורות של היום הקר ביותר (TXN) והלילה החם ביותר (TNX) עלו ברמה השנתית והארצית בשיעור של 0.7 ו-1.8 מ״צ בהתאמה, בהשוואה בין התקופה הנוכחית לתקופה 1964-1979. יש לציין כי ההתחממות המשמעותית ביותר בממוצע הטמפרטורה של הלילות החמים ביותר (TNX) נצפתה באזור מישור חוף (CP), הן ברמה השנתית והן בעונות הקיץ בשיעור של 3 מ״צ ומעלה והסתיו בשיעור של 2.6 מ״צ, בהשוואה לתקופה 1964-1979. כך גם בהשוואה לתקופה המאוחרת יותר 1995-2009, ההפרשים בקיץ ובסתיו גבוהים במדד זה ועומדים על כ-1.9 מ״צ. הדבר מתקשר לעובדה שצוינה בהקשר של עליית טמפרטורת מי ים התיכון בעשורים האחרונים וכן לעלייה בשכיחות גלי החום שבשיאם ההתקררות הלילית הקרינתית במישור החוף מינורית. עלייה משמעותית נוספת נמצאה במדד הימים הקרים ביותר (TXN), באזור צפון הנגב (NN) בעונת הקיץ והסתיו בשיעורים של 2.4 ו-3.6 מ״צ בהתאמה.

בחינת ערכי קיצון האבסולוטיים שבוצעה ל-22 תחנות המכילות נתונים מלאים מ-1964 עד 2020. הראתה כי כ-85% מסך שבירת שיאי טמפרטורת המקסימום בתחנות השונות התרחשו החל מ-1995 לעומת 15% בלבד קודם לכן. מבחינת שבירת שיאי מינימום, 31% מהשיאים נקבעו אחרי 1995 לעומת 69% שהתרחשו קודם לכן. למרות ששבירת השיאים בטמפרטורת המקסימום גדולה

פי 2.6 מאלו של המינימום בשתי התקופות האחרונות, עדיין אנו עדים לשבירת שיאים קרים חרף התחממות הבולטת.

מסמך זה יש לצטט כך:

אילוטוביץ, א', חלפון, נ', יוסף, י' (2024). שינויי הטמפרטורה בישראל – השוואה בין שלושה אטלסים אקלימיים. דו"ח מחקר מס' 4000-0804-2024-0000001, השירות המטאורולוגי.

Ilotovize, E., Halfon, N. and Yosef, Y. (2024). Temperature changes in Israel: A comparison of three climatic atlases. Research Report No. 4000-0804-2024-0000001, Israel Meteorological Service.

מקורות

ביתן א' ורובין ש' (1991). אטלס אקלימי לתכנון פיסי וסביבתי בישראל.

חלפון, נ' ויוסף, י' (2021). השוואת שלוש תקופות תקן סטנדרטיות בכמות הגשם בישראל 1931-2020. דו"ח מחקר מס' 4000-0804-2021-0000106, השירות המטאורולוגי הישראלי.

יוסף, י', בהר"ד, ע', אוזן, ל', אוסטינסקי-צדקי, א', כרמונה, י', חלפון, נ', פורשפן, א', לוי, י', סתיו, נ' (2019). שינוי האקלים בישראל מגמות עבר ומגמות חזויות במשטר הטמפרטורה והמשקעים. דו"ח מחקר מס' 4000-0804-2019-0000075, השירות המטאורולוגי הישראלי.

יוסף, י', חלפון, נ', פורת, ע', אוסטינסקי-צדקי, א', פורשפן, א' (2016). מגמות באירועי מזג אוויר קיצוניים בישראל. דו"ח מחקר מס' 21921416, השירות המטאורולוגי.

יוסף, י', פורשפן, א', אוזן, ל', ציפורי, א' (2022). מגמות בטמפרטורות הגבוהות בעשורים הקרובים, השירות המטאורולוגי.

יוסף, י', פורת, ע', פורשפן, א' (2018). מגמת השינוי בטמפרטורה בישראל בתקופה 1950-2016. דו"ח מחקר מס' 06115818, השירות המטאורולוגי.

Belkin, I. (2009). Rapid warming of large marine ecosystems. *Progress in Oceanography*, **81** (1–4), 207–213. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.04.011

Cramer, W., Guiot, J., Fader, M., Garrabou, J., Gattuso, J. P., Iglesias, A., Lange, M. A., Lionello, P., Llasat, M. C., Paz, S., Peñuelas, J., Snoussi, M., Toreti, A., Tsimplis, M. N., & Xoplaki, E. (2018). Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. *Nature Climate Change*, **8**(11), 972-980. https://doi.org/10.1038/s41558-018-0299-2.

García-Monteiro, S., Sobrino, J. A., Julien, Y., Sòria, G., & Skokovic, D. (2022). Surface Temperature trends in the Mediterranean Sea from MODIS data during years 2003–2019. *Regional. Studies. in Marine. Science.*, **49**, 102086.

Huang J., van den Dool H. M., & Barnston A. G. (1996). Long-lead seasonal temperature prediction using optimal climate normal. *Journal of Climate*, **9**(4): 809-817.

Nykjaer, L. (2009). Mediterranean Sea surface warming 1985-2006. *Climate Research*, **39** (1), 11-17. https://doi.org/10.3354/cr00794.

Saaroni, H., Ziv, B., Edelson, J. and Alpert, P. (2003). Long-term variations in summer temperatures over the Eastern Mediterranean. *Geophysical Research Letters*, **30**(18).

Saaroni, H., Ziv, B., Osetinsky, I. and Alpert, P. (2010). Factors governing the interannual variation and the long-term trend of the 850 hPa temperature over Israel. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **136**(647), 305–318.

Trenberth, K. E., Jones, P. D., Ambenje, P., Bojariu, R., Easterling, D., Tank, A. K., Parker, D., Rahimzadeh, F., Renwick, J. A., Rusticucci, M., Soden, B., … Zhai, P. (2007). Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, & H. L. Miller (Eds.), Climate change 2007: *The physical science basis* (pp. 235–336). Cambridge University Press.

Wilks, D. S. (2013). Projecting "normal" in a nonstationary climate. *Journal of Applied Meteorology and Climatology,* **52**(2): 289-302, DOI10.1175/JAMC-D-11-0267.1

Wilks, D. S., & Livezey, R. E. (2013). Performance of alternative "normals" for tracking climate changes, using homogenized and nonhomogenized seasonal US surface temperatures. *Journal of Applied Meteorology and Climatology,* **52**(8): 1677-1687. https://doi.org/10.1175/JAMC-D-13-026.1.

Yosef, Y., Aguilar, E., & Alpert, P. (2018). Detecting and adjusting artificial biases of long-term temperature records in Israel. *International Journal of Climatology*, **38**, 3273-3289. https://doi.org/10.1002/joc.5500.

Yosef, Y., Aguilar, E., & Alpert, P. (2019). Changes in Extreme Temperature and Precipitation Indices: Using Innovative Daily Homogenized Database in Israel. *International Journal of Climatology*, **39**(13), 1-24. https://doi.org/10.1002/joc.6125.

World Meteorological Organization. (2007). The Role OF Climatological Normals In a Changing Climate. WCDMP-No. 61.

von Schuckmann, K., Le Traon, P. Y., Smith, N., Pascual, A., Brasseur, P., Fennel, K. & Djavidnia, S. (Eds). (2018). Copernicus marine service ocean state report. *Journal of Operational Oceanography*, **11**(sup1), S1–S142. https://doi.org/10.1080/1755876X.2018.1489208.

Zittis, G., Hadjinicolaou, P., Fnais, M. & Lelieveld, J. (2015). Projected changes in heat wave characteristics in the eastern Mediterranean and the Middle East. *Regional. Environmental. Change*, **16,** 1863-1876.

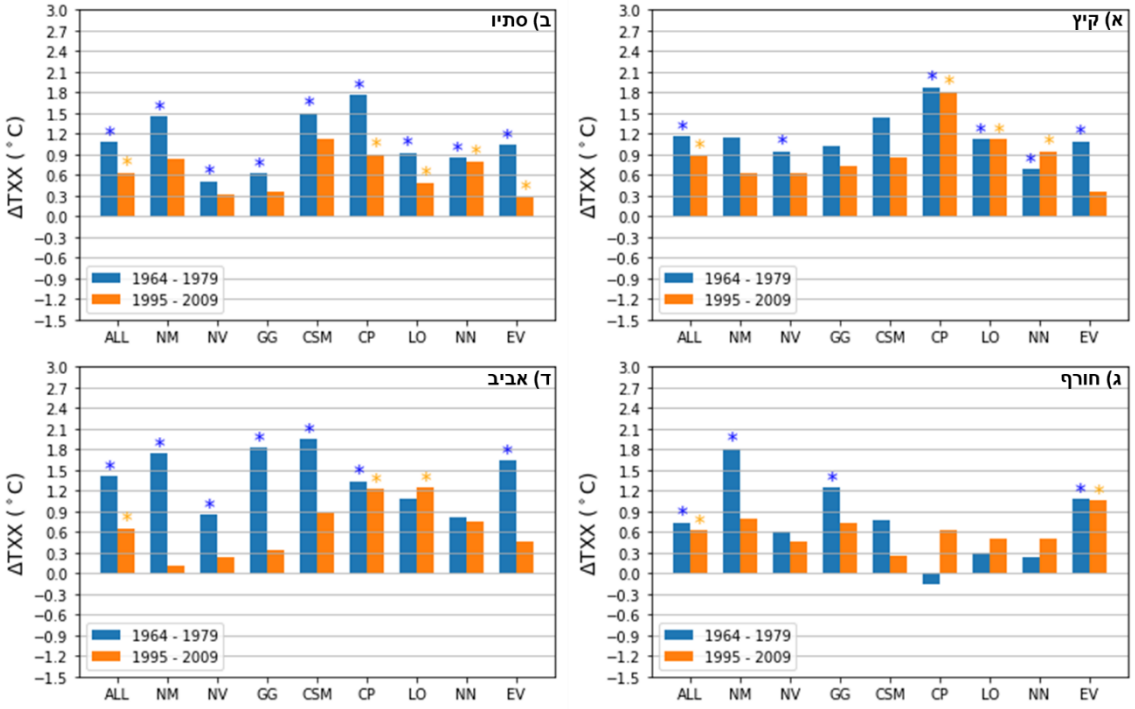
Zittis, G., Almazroui, M., Alpert, P., Ciais, P., Cramer, W., Dahdal, Y., ... & Lelieveld, J. (2022). Climate change and weather extremes in the Eastern Mediterranean and Middle East. *Reviews of Geophysics*, 60(3), e2021RG000762.

Ziv, B., and Saaroni, H. (2011). The contribution of moisture to heat stress in a period of global warming: the case of the Mediterranean. *Climatic Change*, **104,** 305-315. https://doi.prg/10.1007/s10584-009-9710-3.

נספח – מגמות עונתיות במדדים: TXX, TXN, TNN, TNX

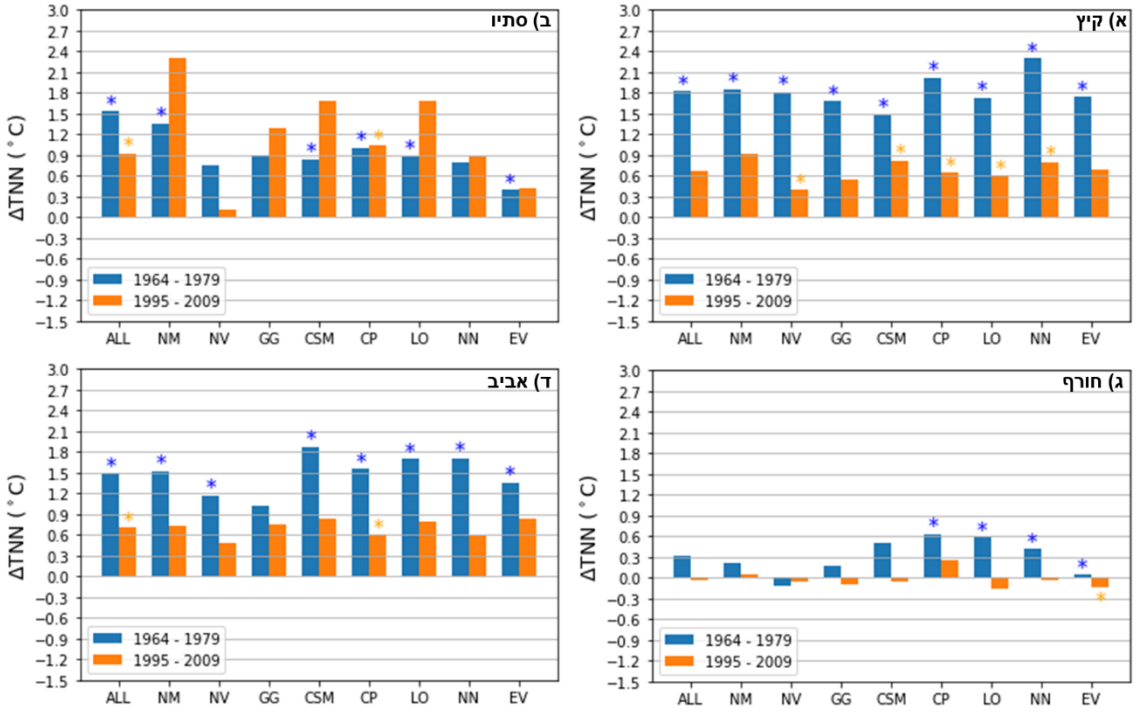
בהמשך לסעיף 3.4, בנספח זה מוצגים ההפרשים בממוצעי ערכי המקסימום והמינימום העונתיים של הטמפרטורה, בין התקופה 2006-2020 לשתי תקופות קודמות, לכל אחד מארבעת המדדים: הימים החמים ביותר (איור 12, TXX), הלילות הקרים ביותר (איור 13, TNN), הלילות החמים ביותר (איור 14, TNX) והימים הקרים ביותר (איור 15, TXN).

איור 12 בוחן את השינויים בטמפרטורה בימים החמים ביותר (TXX) בכל עונה בנפרד. באופן כללי ניתן לראות הפרשים חיוביים בכל האזורים ובכל העונות. ההתחממות המשמעותית ביותר בעונת הקיץ (איור 12א') והסתיו (איור 12ב') נמצאה באזור מישור החוף (CP) עם הפרשים של 1.8 מ"צ ומעלה ביחס לשתי התקופות הקודמות בקיץ.



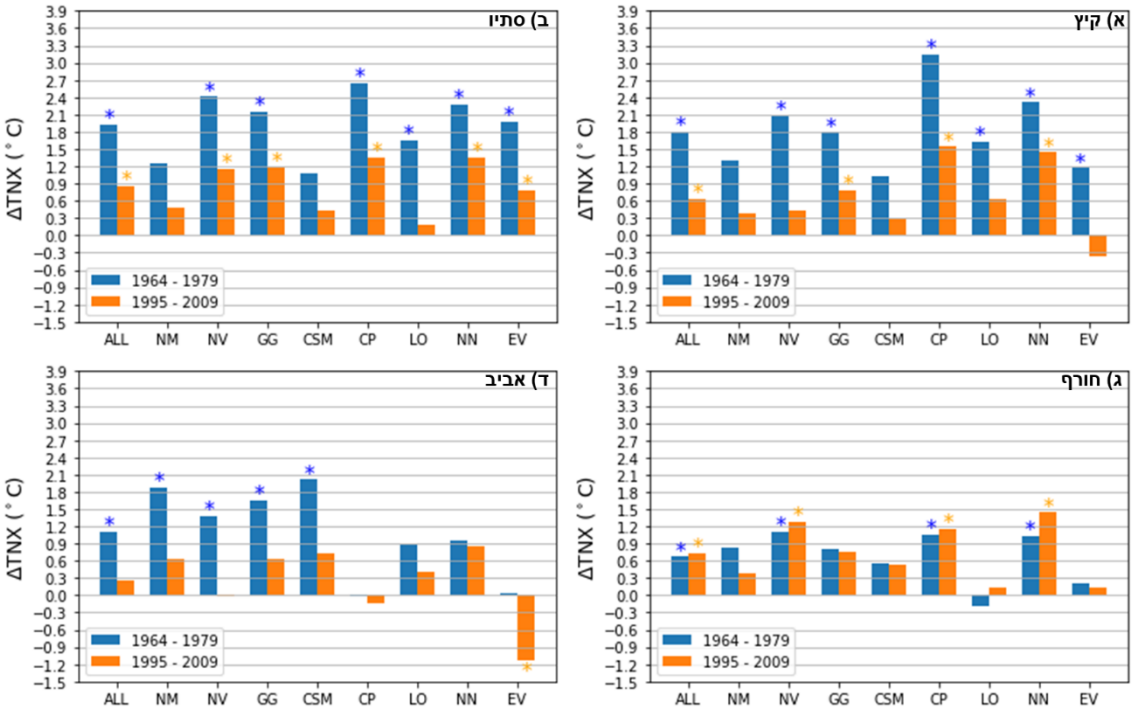
איור 12. ההפרש העונתי הממוצע של טמפרטורת הימים החמים ביותר (TXX) בכל אחד מהאזורים השונים בין התקופה 2006-2020 לבין התקופה 1964-1979 (בכחול) ולבין 1995-2009 (בכתום), בעונות (א) קיץ, (ב) סתיו, (ג) חורף, (ד) אביב. האזורים המסומנים ב-* מציינים תוצאות מובהקות סטטיסטית.

איור 13 בוחן את השינויים בטמפרטורה בימים הקרים ביותר (TNN) בחלוקה עונתית. מאיור זה עולה כי ארעה התחממות משמעותית, בדגש על הקיץ (איור 13א') והאביב (איור 13ד'), בין התקופה 2020-2006 לתקופה 1979-1964.



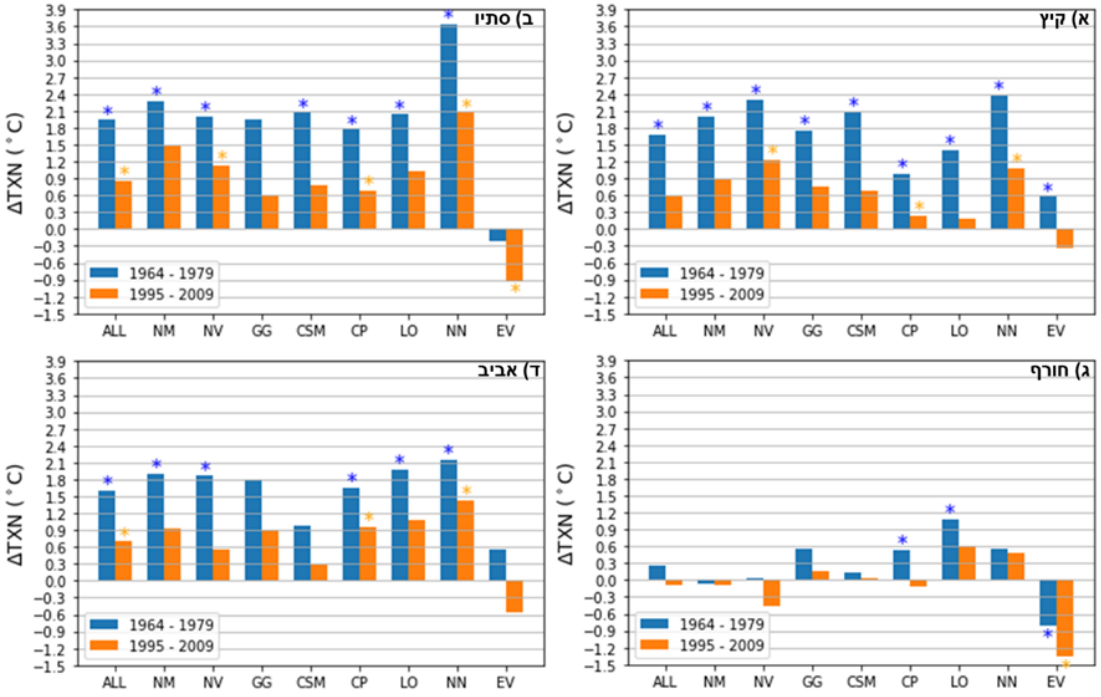
איור 13. ההפרש של TNN ממוצע חודשי בכל אחד מהאזורים האקלימיים השונים בין התקופה 2006-2020 לבין התקופה 1964-1979 (בכחול) ובין 1995-2009 (בכתום), בעונות (א) קיץ, (ב) סתיו, (ג) חורף, (ד) אביב. האזורים המסומנים ב-* מציינים תוצאות מובהקות סטטיסטית.

איור 14 בוחן את השינויים בטמפרטורה בלילות החמים ביותר (TNX) בכל עונה בנפרד. נמצא כי ההפרש המשמעותי ביותר נמדד במישור החוף (CP) בקיץ (איור 14א') עם עלייה של 3.1 מ"צ ובסתיו (איור 14ב') עם עלייה של 2.6 מ"צ. כמו כן, בשתי עונות אלו מרבית התוצאות הינן מובהקות ביחס לשתי התקופות הנבדקות. גם הטמפרטורה של הלילות החמים בחורף נמצאת במגמת עלייה.



איור 14. ההפרש של TNX ממוצע חודשי בכל אחד מהאזורים האקלימיים השונים בין התקופה 2006-2020 לבין התקופה 1964-1979 (בכחול) ובין 1995-2009 (בכתום), בעונות (א) קיץ, (ב) סתיו, (ג) חורף, (ד) אביב. האזורים המסומנים ב-* מציינים תוצאות מובהקות סטטיסטית.

איור 15 בוחן את השינויים בטמפרטורה של הימים הקרים ביותר (TXN) בחלוקה עונתית. עונות הקיץ (איור 15א'), הסתיו (איור 15ב') והאביב (איור 15ד') בולטות בשיעור ההתחממות. בעונת הסתיו באזור צפון הנגב (NN) קיים הפרש של 3.6 מ"צ שהוא ההפרש הגבוה ביותר מכל המדדים. כמו כן גם בהשוואה לתקופה 1995-2009 באזור זה נמצא הפרש מובהק של 2.1 מ"צ. אזור זה בולט גם בקיץ עם התחממות של 2.4 מ"צ. בעונת החורף (איור 15ג') ההפרשים קטנים מאוד. באזור עמקי המזרח (EV), נמצאו הפרשים שליליים מובהקים בהשוואה לשתי התקופות הקודמות.



איור 15. ההפרש של TXN ממוצע חודשי בכל אחד מהאזורים האקלימיים השונים בין התקופה 2006-2020 לבין התקופה 1964-1979 (בכחול) ובין 1995-2009 (בכתום), בעונות (א) קיץ, (ב) סתיו, (ג) חורף, (ד) אביב. האזורים המסומנים ב-* מציינים תוצאות מובהקות סטטיסטית.