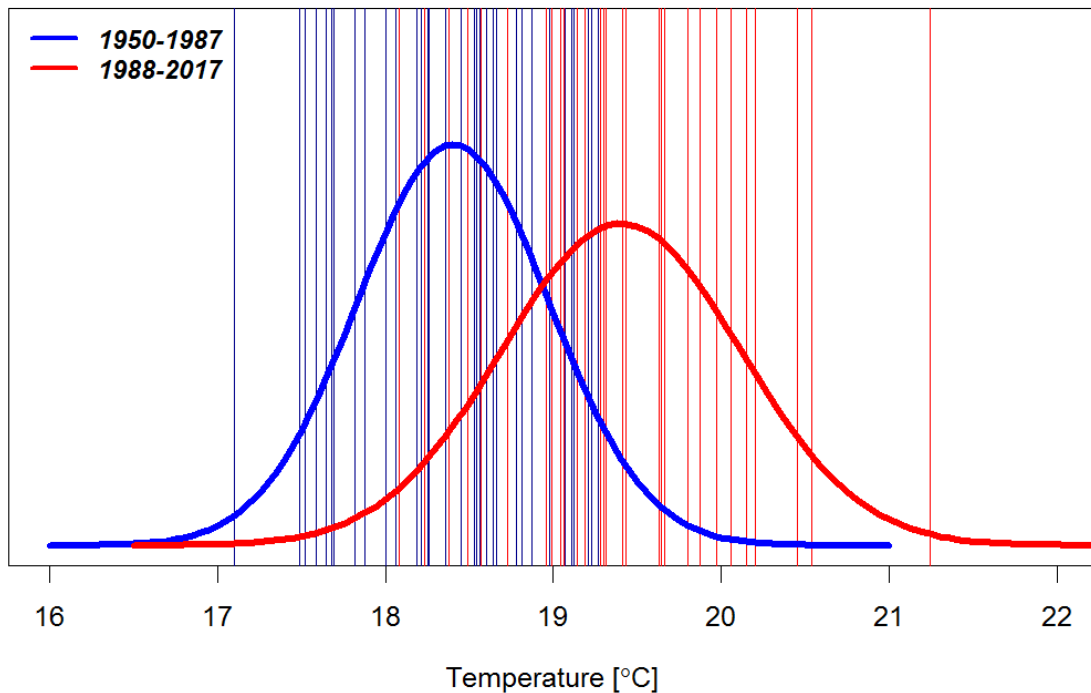


שינוי האקלים בישראל

מגמות עבר ומגמות חזויות במשטר הטמפרטורות והמשקעים

(דו"ח מחקר מס' 0000075-2019-0804-4000, נובמבר 2019)

יצחק (איציק) יוסף, ענת בהר"ד, לינס און, איזבלה אוסטינסקי-צדקי, יצחק
כרמונה, נועם חלפון, אבנר פורשפן, יואב לוי, ניר סתיו



התפלגות טמפרטורת המינימום הממוצעת בקיץ בירושלים בתקופה 1950-1987 (בכחול) ו-1988-2017 (באדום).

הקדמה

שינויי האקלים אינו עוד תיאוריה אלא חלק מהמציאות של תקופתנו והשלכותיו ניכרות בכל רחבי כדור הארץ. זה מספר עשורים חוקרי האקלים מזהים שינויים של ממש בתבניות האקלים. התחזיות, המתבססות על המשך העליה בריכוזם של גזי החממה, מראות כי שינויים אלו הם רק ההתחלה של תהליך אשר עתיד להתעצם במהלך המאה ולטלטל את כל מגזרי החברה, את ענפי המשק השונים וככל הנראה גם את מערך היחסים הבינלאומיים.

ביוני 2018 קיבלה ממשלת ישראל את החלטה 4079 "היערכות ישראל להסתגלות לשינויי אקלים". ההחלטה מבוססת על ההבנה כי "ההסתגלות לשינויי אקלים הינה תהליך ארוך טווח, הדורש מחויבות, תיאום וגמישות על מנת להגיב למציאות המתהווה ולמידע חדש המתקבל ממחקר מתמשך" וקוראת למשרדי הממשלה לבנות תוכניות היערכות מתאימות – "המטרה היא כי על-ידי יישום צעדי מדיניות, תוך הסתייעות בעקרונות תוכנית ההסתגלות, מדינת ישראל תגיע למוכנות גבוהה להשפעות של אקלים משתנה, תקטין את הסיכון הבריאותי, הסביבתי והכלכלי, ותמקסם את התועלות מתוך ההזדמנויות שיעלו". השירות המטאורולוגי הוא אחד הגופים החברים במנהלת ההיערכות לשינויי אקלים, אשר הוקמה בעקבות החלטה זו, והוא חותר להעמיד בפני הגופים הציבוריים השונים והציבור הרחב את ממצאי המחקר האקלימי הנדרשים לצורך ניתוח סיכונים מושכל וגיבוש תוכנית פעולה מותאמת למגמות הצפויות (מטרה מס' 3 של תוכנית ההיערכות הלאומית – "בנייה ועדכון בסיס הידע המדעי לצורך קבלת החלטות").

חוקרי האקלים בשירות המטאורולוגי עוסקים הן בניתוח מגמות האקלים בארץ ישראל, על בסיס מדידות העבר וההווה, והן בהפקת הערכות לשינויים הצפויים עד לסוף המאה. בשנים האחרונות פרסם השירות מספר דו"חות בנדון, המתבססות על ניתוח מדידות עבר¹. בזכותו של פרופ' אשבל (האוניברסיטה העברית) ודור המייסדים של השירות המטאורולוגי, התבררנו במספר רב של תחנות מטאורולוגיות אשר פעלו כבר במחצית הראשונה של המאה ה-20 בכל חלקי הארץ, כך שהרקורד ההיסטורי ממושך דיו לצורך זיהוי תנודות ומגמות אקלימיות.

היות והמערכת האקלימית העולמית היא מערכת מורכבת, גם השינויים בה אינם צפויים להיות פשוטים – באזורים מסוימים על פני כדור הארץ תחול התחממות במידה ניכרת יותר מאשר באזורים אחרים, תבניות הזרימה האטמוספיריות ומסלולי מערכות מזג האוויר ישתנו ולפיכך באזורים מסוימים יתרבו הסערות ובאזורים אחרים יפחתו, באזורים מסוימים יתרבה הגשם ובאזורים אחרים יתמעט וכו'. התפתחות האקלים עם הזמן גם היא אינה פשוטה או לינארית – כבר במבט על הרקורד ההיסטורי ניתן לזהות כי היו עשורים בהם היתה עליה בטמפרטורה והיו עשורים בהם לא היתה עליה כזו, היו עשורים בהם היתה הפחתה במשקעים והיו עשורים בהם לא היתה הפחתה כזו וכו' (decadal climate variability). כיום אנו מבינים כי בנוסף למגמה הדרגתית

¹ "מגמת השינוי בטמפרטורה בישראל בתקופה 1950-2016" (מרץ 2018). דו"ח מחקר מס': 01221828, השירות המטאורולוגי.

"מגמות באירועי מזג אוויר קיצוניים בישראל" (ספטמבר 2016). דו"ח מחקר מס': 21921416, השירות המטאורולוגי.

שינויים אקלימיים בישראל, ממצאי השירות המטאורולוגי (מרץ 2015). דו"ח מחקר, השירות המטאורולוגי.
שינויים אקלימיים בישראל, ממצאי השירות המטאורולוגי (דצמבר 2011). דו"ח מחקר, השירות המטאורולוגי.

ארוכת הטווח הנובעת מעליית ריכוז גזי החממה, בתוך המערכת האקלימית יש תנודות דקדליות טבעיות (תנודות המשפיעות על מהלך האקלים בסקלה של עשרות שנים). לפיכך, אקסטרפולציה פשטנית של מגמות העבר אינה האופן הראוי לבניית התחזיות האקלימיות ותוכניות ההיערכות. הכלי המתאים יותר לבניית התחזיות הוא ביצוע סימולציות ממוחשבות של התפתחות האקלים על בסיס נתוני ההווה והמשוואות המתארות את התהליכים הפיזיקליים האטמוספריים ("המודלים האקלימיים"). ככל שסימולציות כאלו יהיו ברזולוציה גבוהה יותר, הן צפויות להיות מדויקות יותר ולאפשר להבחין בין השינויים הצפויים בחבלי הארץ השונים. לפיכך, קבעה החלטת הממשלה כי יש להקים "מרכז חישובים לאומי בעל יכולת עיבוד גבוהה אשר ישמש להרצת סימולציות אקלימיות ברזולוציה גבוהה, לבחינת תסריטים שונים והשפעותיהם האפשריות, לסימולציה של הנגזרות על ענפים שונים ולסימולציה של מידת האפקטיביות של פעולות הסתגלות שונות". עד להקצאת המשאבים הנדרשים להקמת מרכז חישובים זה, התחזיות האקלימיות לישראל מבוססות עדיין על מודלים גסים יותר.

בדו"ח זה לראשונה מציג השירות המטאורולוגי ניתוח בהיקף נרחב של מגמות הטמפרטורה וכמויות המשקעים על בסיס נתוני העבר מכל רחבי הארץ וניתוח תחזיות של מודלים אקלימיים אזוריים לעשורים הקרובים. במסגרת העבודה הופק רצף מתוקן של נתוני העבר בתחנות המדידה השונות ורצף מתוקן של תחזיות לאזורים אלו – סדרות נתונים אשר זמינות כבר היום לכל חוקר הזקוק להם ובמהלך החודשים הקרובים גם יוגשו לכלל הציבור באתר השירות המטאורולוגי החדש. בשנים הקרובות תורחב עבודה זו גם לרכיבים אקלימיים נוספים.

מסמך זה יש לצטט כך:

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.

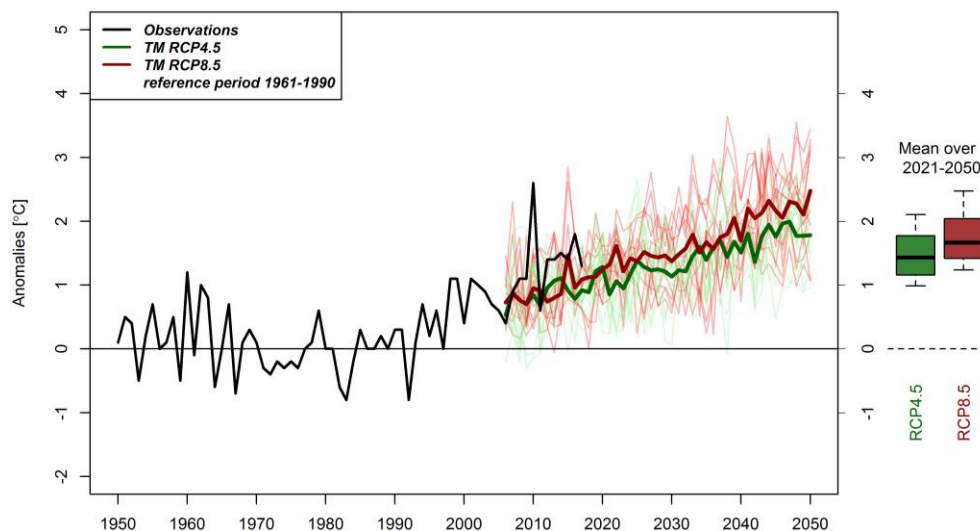
Yosef, Y., Baharad, A., Uzan, L., Osetinsky-Tzidaki, I., Carmona, I., Halfon, N., Furshpan, A., Levi, Y., Stav, N. (2019). Climate change in Israel – historical trends and future predictions of temperature and precipitation. Research Report No. 4000-0804-2019-0000075, Israel Meteorological Service.

1. מגמות השינוי בטמפרטורה

- הטמפרטורה הממוצעת בישראל עלתה בכ-1.4 מ"צ בתקופה 1950-2017 (שלושים השנים האחרונות תרמו תרומה מכרעת לעליה זו).
- הטמפרטורה הממוצעת בישראל צפויה לעלות מהתקופה הנוכחית (מ-2018) ועד סוף 2050 בעוד כ-0.9 מ"צ בתרחיש האופטימי (RCP4.5) או בכ-1.2 מ"צ בתרחיש הפסימי (RCP8.5).
- נמצאה עליה בתדירות מספר הימים והלילות החמים ביחד עם ירידה בתדירות הימים והלילות הקרים, מגמה שצפויה להימשך.
- מגמת ההתחממות בולטת יותר בעונת הקיץ, הן במדידות העבר והן בתחזיות.

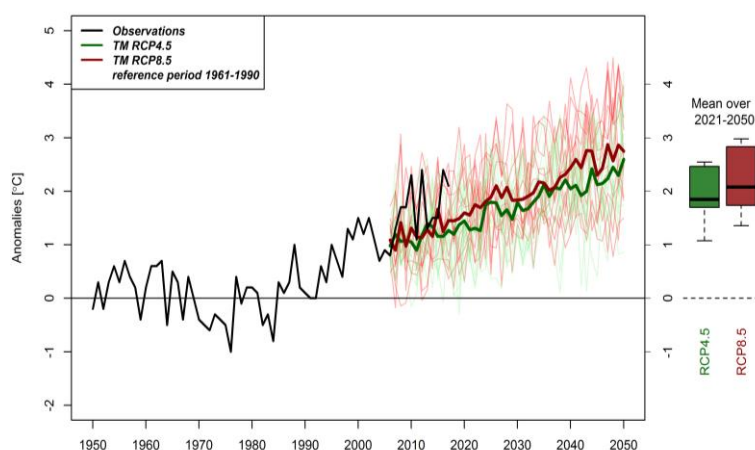
1.1. השתנות הטמפרטורה הממוצעת ברמה הארצית

בדומה להתחממות הגלובלית, גם אזורנו מתחמם ואף בשיעור גבוה יותר. איור 1 מתאר את השינוי בטמפרטורה הממוצעת מ-1950 ועד 2050 תחת שני תרחישים: RCP4.5 (קו ירוק), הנחשב למתון, בו פליטות גזי החממה העולמיות תגענה למקסימום בין השנים 2030 ל-2040 ולאחר מכן תפחתנה, לצד התרחיש RCP8.5 (קו אדום), בו האנושות אינה נוקטת בשום פעולה לצמצום פליטות גזי החממה².

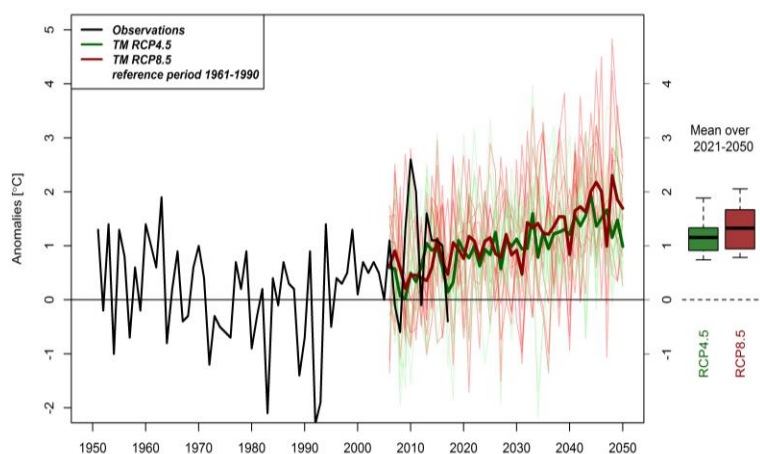


איור 1. השינוי בטמפרטורה הממוצעת (TM) השנתית בישראל ביחס לתקופת יחוס 1961-1990. ממוצע התצפיות (בשחור), ממוצע האנסמבל עבור תרחיש RCP4.5 (בירוק בולט), ממוצע האנסמבל עבור תרחיש RCP8.5 (באדום בולט). קווים דקים מציינים את פיזור תוצאות המודלים השונים בהתאם לתרחישים RCP4.5 (ירוק) ו-RCP8.5 (אדום). תרשימי הקופסה (boxplots) מתארים את התפלגות ממוצעי המודלים השונים לכל תרחיש, לתקופה 2050-2021. חציון התפלגות מצוין בקו אופקי שחור.

² יחד עם זאת, כדאי לשים לב כי ההבדל הגדול באקלים החזוי בין תרחישים שונים אלו יבוא לידי ביטוי רק לקראת אמצע המאה ובפרט במחציתה השנייה, בה בתרחיש האופטימי הפליטות מצטמצמות בעוד שבתרחיש הפסימי הפליטות ממשיכות לגדול.



איור 2. כמו איור 1 רק עבור השינוי בטמפרטורה הממוצעת בעונת הקיץ בישראל.



איור 3. כמו איור 1 רק עבור השינוי בטמפרטורה הממוצעת בעונת החורף בישראל.

במידות ההיסטוריות ניתן לזהות בבירור עליה של הטמפרטורה הממוצעת מאז שנות ה-80 (קו שחור). שיעור העלייה בטמפרטורה ב-30 השנים האחרונות עומד על כ-0.53 מ"צ/עשור. כפי שניתן לראות, שיעור העלייה בטמפרטורה הממוצעת ארוכת הטווח אינו מונוטוני. בתחילת התקופה קיימת ירידה מממוצע טמפרטורות גבוהה יחסית בשנות ה-50 וה-60 לממוצע נמוך יותר בשנות ה-70, התייצבות בשנות ה-80 ואז עלייה בולטת במהלך שנות ה-90. מהלך טמפרטורה ארוך טווח זה מניב עליה ממוצעת של 0.21 מ"צ/עשור בתקופה 1950 עד 2017.

הן מגמת החימום ארוכת הטווח והן המגמה בתקופה הקצרה מובהקות סטטיסטית עד 2017. $(p < 0.001)$. מגמת החימום צפויה להימשך בערכים שהם בין המגמה בתקופה הארוכה למגמה בתקופה הקצרה. הטמפרטורה הממוצעת צפויה להיות גבוהה ב-1.5 מ"צ³ בממוצע, לפי תרחיש RCP4.5 וב-1.8 מ"צ⁴ בממוצע לפי תרחיש RCP8.5 בתקופה 2021 עד 2050 ביחס לממוצע התקופה 1961 עד 1990.

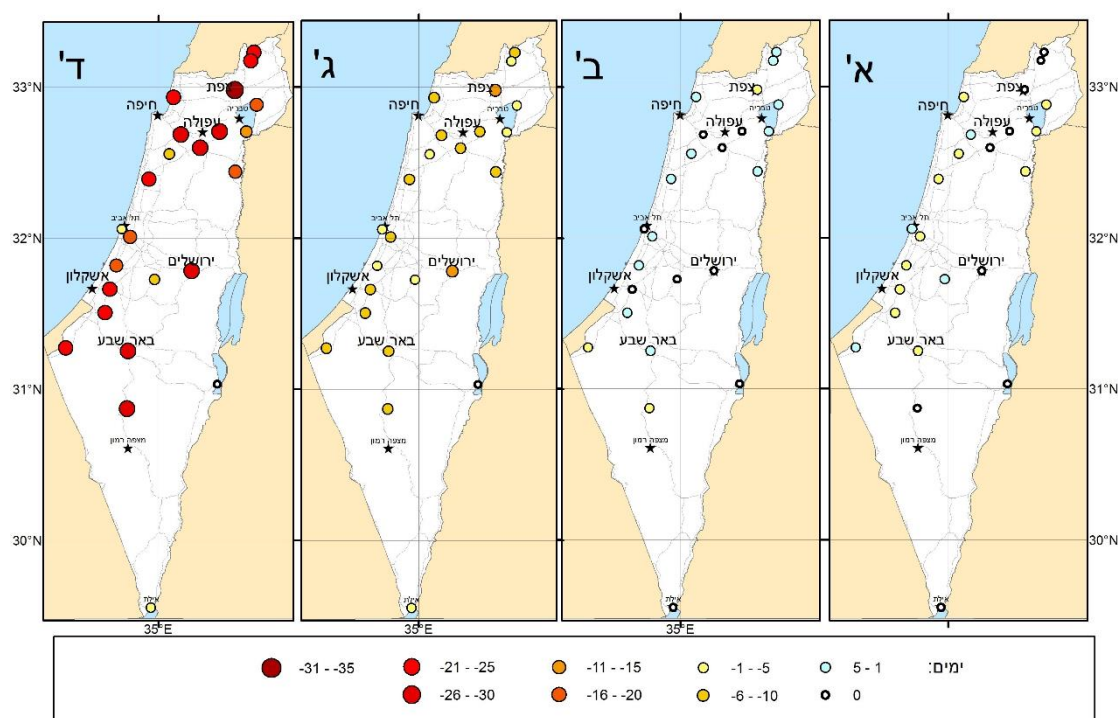
מגמת ההתחממות בולטת יותר בעונת הקיץ, הן במידות העבר והן בתחזיות. הטמפרטורה הממוצעת בקיץ בתקופה 2021 עד 2050, צפויה לעלות ב-1.9 מ"צ בממוצע בתרחיש RCP4.5 וב-2.2 מ"צ בממוצע, בתרחיש RCP8.5 (איור 2). לעומת זאת, בעונת החורף (איור 3) מגמת השינוי ארוך הטווח בולטת מעט פחות. העלייה בטמפרטורה הממוצעת בחורף צפויה להיות כ-1.3 מ"צ בממוצע, בתקופה 2021 עד 2050.

³ פיזור תוצאות המודלים נמצא בטווח של [1.2, 1.8] מ"צ, המייצג את אחוזון 25%-ו 75% בהתאמה.

⁴ פיזור תוצאות המודלים נמצא בטווח של [1.4, 2.0] מ"צ, המייצג את אחוזון 25%-ו 75% בהתאמה.

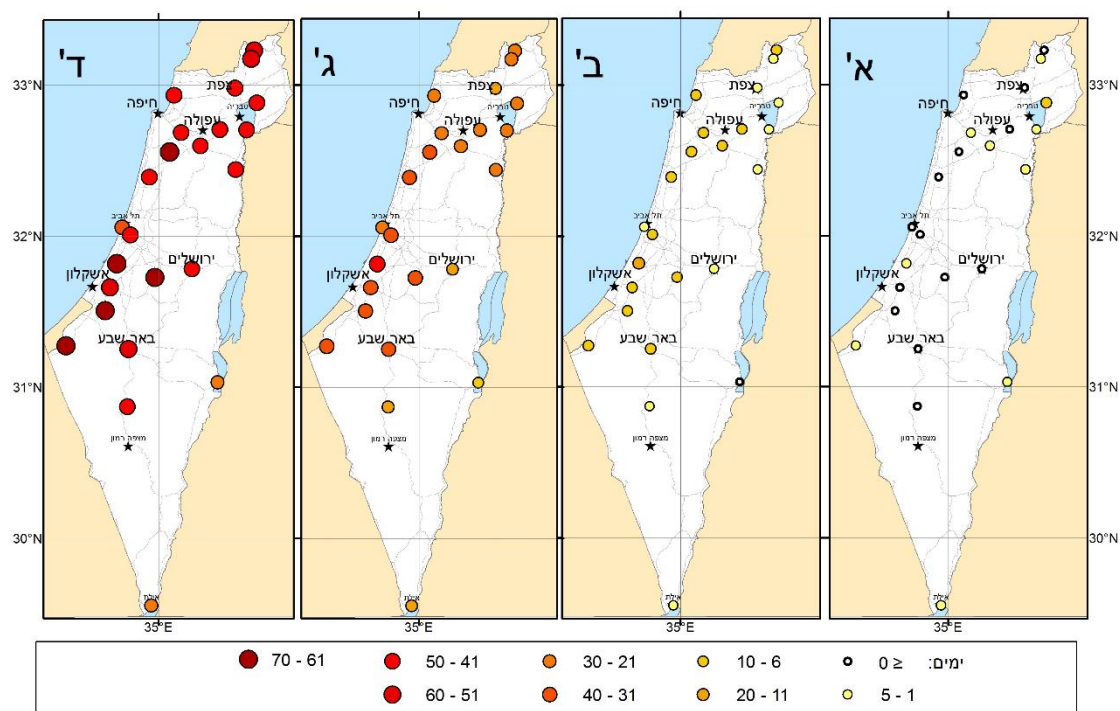
1.2. שינויים בשכיחות לילות קרים, לילות חמים וימים חמים

בחינת השינוי בתדירות מספר הימים בהם טמפרטורת המינימום קטנה מ-7 מ"צ ("לילות קרים") מעלה כי תדירותם עלתה ו/או נותרה ללא שינוי בתקופה 1971 עד 2000 (איור ב') ביחס לתקופה 1961-1990. לעומת זאת, ב-30 השנים האחרונות תדירותם ירדה (איור ג') ועל פי התחזיות האקלימיות צפויה להמשיך ולרדת גם בעתיד (איור ד'). ביחס לתקופה האחרונה 1988 עד 2017, נצפה לקבל הפחתה ממוצעת של כ-13 ימים בתקופה 2021 עד 2050.



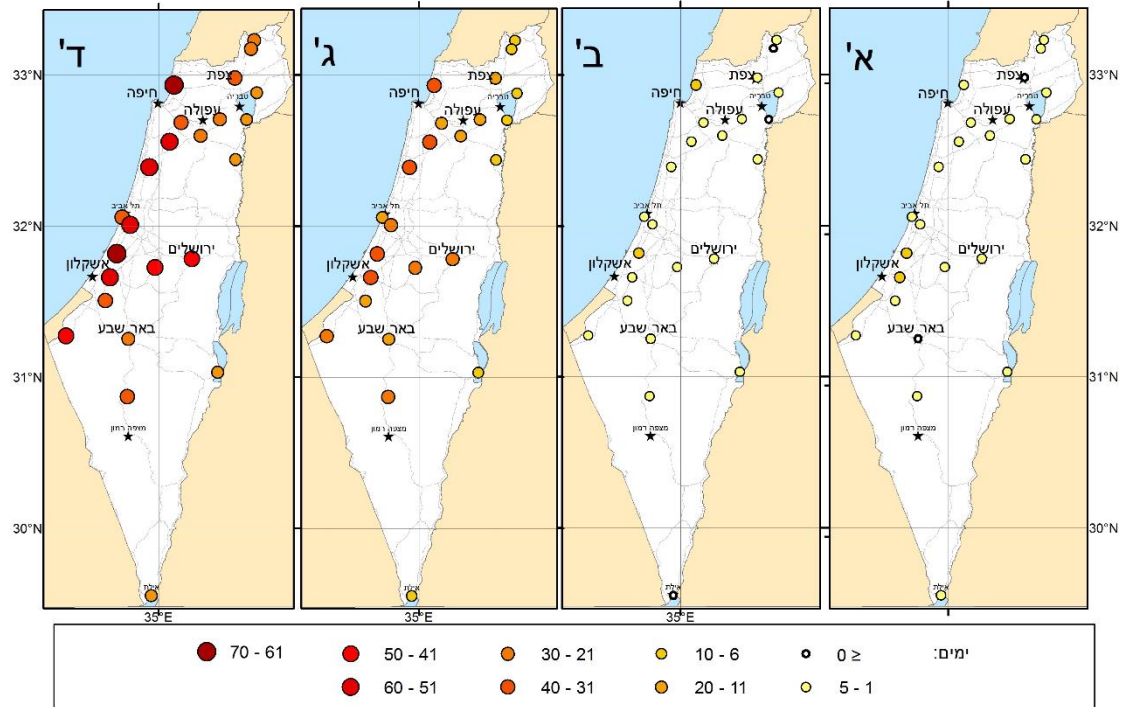
איור 4. השינוי במספר הימים בהם טמפרטורת המינימום קטנה מ-7 מ"צ בממוצע ביחס לתקופה 1990-1961 (בתקופות: א) 1979-1950, ב) 2000-1971, ג) 2017-1988, ד) 2050-2021 לפי תרחיש RCP8.5.

בניגוד לירידה במספר הלילות הקרים, נצפתה עליה מובהקת בתדירות מספר הלילות החמים בהם טמפרטורת המינימום גדולה מ-20 מ"צ (איור ב') וביתר שאת בתקופה האחרונה, בדגש על מישור החוף (איור ג'). בעתיד, בתקופה 2021 עד 2050, מגמה זו צפויה להתעצם אף יותר, כך שבמרבית מאזורי הארץ צפויה תוספת ממוצעת של מעל 40 לילות חמים בשנה ביחס למספרם בתקופה 1961 עד 1990 (איור ד') או תוספת ממוצעת של כ-21 לילות ביחס לתקופה 1988 עד 2017.



איור 5. השינוי במספר הימים בהם טמפרטורת המינימום גדולה מ-20 מ"צ במוצע ביחס לתקופה 1990-1961 בתקופות: א) 1979-1950, ב) 2000-1971, ג) 2017-1988, ד) 2050-2021 לפי תרחיש RCP8.5.

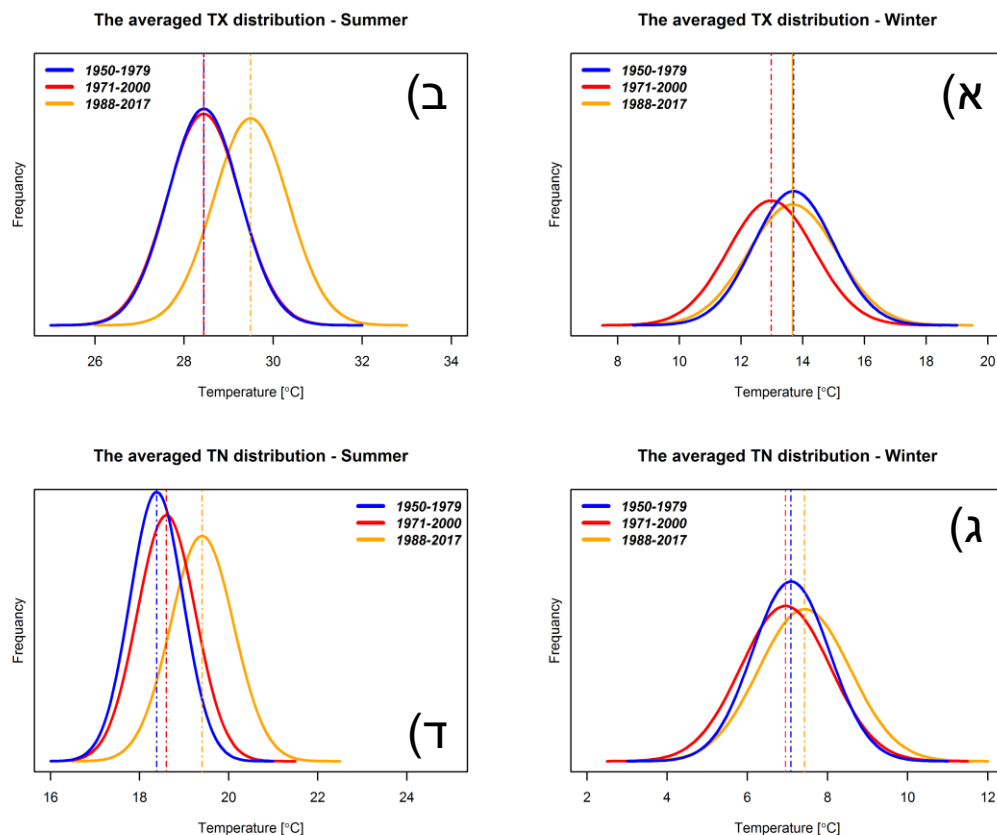
בדומה לגידול במספר הלילות החמים, נמצא גידול מובהק בעשורים האחרונים בתדירות מספר הימים בהם טמפרטורת המקסימום גדולה מ-30 מ"צ (איור ג'), מגמה שעל פי התחזיות האקלימיות צפויה להמשך גם בעשורים הקרובים (איור ד'). נראה כי מספר "הימים החמים" באזור מישור החוף והשפלה צפוי לעלות תחת תרחיש RCP8.5 בלמעלה מ-40 ימים ביחס לתקופה 1961 עד 1990 ובאזורי הבקעה והנגב (אזורי אקלים חמים) בלמעלה מ-20 ימים (איור ד'). יחד עם זאת, יש לזכור כי תקופת הייחוס 1961 עד 1990 הייתה יחסית קרה. מכאן, השוואה דומה רק ביחס לתקופה האחרונה (2017-1988), מעידה על תוספת ממוצעת של כ-23 ימים עבור אזור מישור החוף והשפלה ותוספת ממוצעת של כ-12 ימים באזורי הבקעה והנגב, באקלים החזוי לשנים 2021 עד 2050.



איור 6. השינוי במספר הימים בהם טמפרטורת המקסימום גדולה מ-30°C בממוצע ביחס לתקופה 1990-1961 בתקופות: א) 1979-1950, ב) 2000-1971, ג) 2017-1988, ד) 2050-2021 לפי תרחיש RCP8.5.

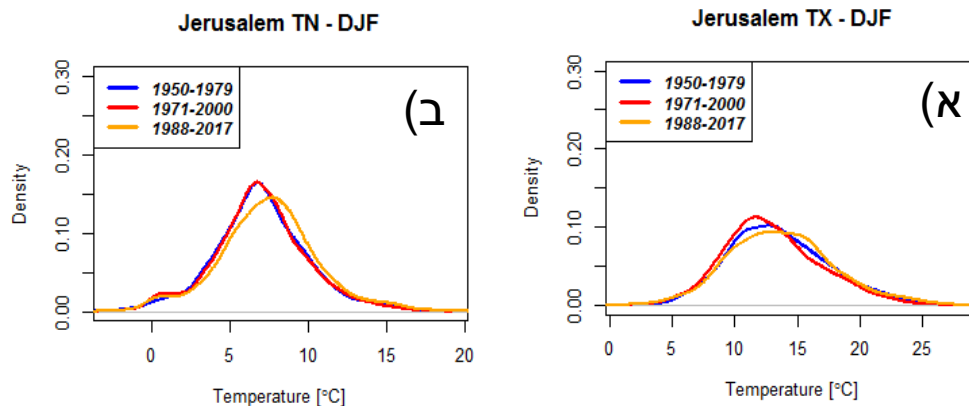
1.3. שינויים בהתפלגות הטמפרטורה בקיץ ובחורף (ירושלים)

בחינת המגמות במוצעים בלבד אינה מאפשרת להבין את מלוא מורכבות השינוי האקלימי. בחינת התפלגות הטמפרטורה מאפשרת לנתח את השינוי באופן מלא יותר. באיורים 7-9 מוצגים לדוגמה השינויים בהתפלגות הטמפרטורה העונתית הממוצעת בירושלים, קרי, עבור כל אחת מהתקופות מוצגת התפלגות המורכבת מ-30 נתונים (ניתוח דומה ניתן לבצע עבור התחנות האחרות). איור 7 מתאר את התפלגות טמפרטורת המקסימום והמינימום העונתית בעבר בירושלים על-ידי התאמת התפלגות נורמאלית בהתאם למוצע ולסטיית התקן של כל תקופה. באיורים 7' ו-7'', ניתן לראות כי בעשורים האחרונים כל פעמון התפלגות הטמפרטורה (בתחנת ירושלים מרכז) בתקופת הקיץ, מוסח לטמפרטורות גבוהות יותר ולפיכך מספר הקיצים המאופיינים בימים ולילות חמים גדל ובעוד שתדירות הקיצים המתונים קטנה. לעומת זאת, השתנות האקלים בתקופת החורף היא בעלת מאפיינים אחרים, כפי שניתן לראות באיורים 7'א' ו-7'ג'. השינוי בהתפלגות קטן יותר וההתפלגות נשארת רחבה למדי. המורכבות הזו של שינוי הטמפרטורה בחורף, נובעת מכך שגם באקלים המתחמם במוצע אנו חווים בעשורים האחרונים חדירות משמעותיות של אוויר קוטבי לאזורינו בתקופת החורף ואף אירועי שלג משמעותיים.



איור 7. התפלגות טמפרטורת המקסימום (TX) והמינימום (TN) הממוצעות לעונת החורף והקיץ בירושלים בחלוקה לפי עונת הקיץ (JJA) ועונת החורף (DJF) בשלוש תקופות: 1979-1950 (כחול), 2000-1971 (אדום), 2017-1988 (כתום). קווים מקווקוים מציינים את הערך הממוצע של כל התפלגות.

התנהגות שונה זו של השינויים בחורף הופכת ברורה יותר כאשר מתבוננים לא על התפלגות הטמפרטורה העונתית אלא על התפלגות הטמפרטורה היומית (שמורכבת מאלפי נתונים יומיים), כפי שניתן לראות באיור 8. מאיור זה עולה כי לא חל שינוי מהותי במספר הימים הקרים (מתחת ל-5 מ"צ, איור 8א') ובמספר הלילות הקרים (מתחת ל-2 מ"צ, איור 8ב') בעונת החורף, זאת על אף הגידול בערך הממוצע. כלומר, החורף בעשורים האחרונים שומר על אופיו המתבטא בהשתנות בין יומית ובין שנתית גדולה ובאירועי מזג אוויר קיצוניים, למרות מגמת ההתחממות בטמפרטורה הממוצעת.

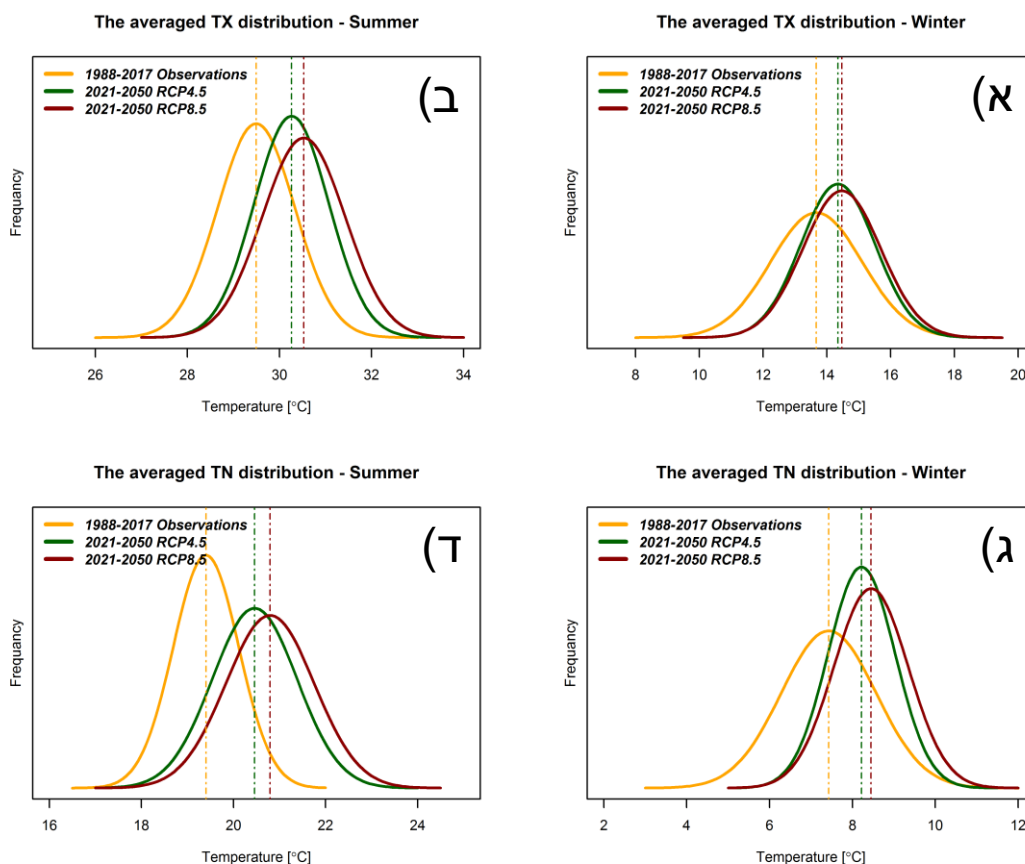


איור 8. התפלגות טמפרטורת המקסימום (TX, ימים קרים) והמינימום (TN, לילות קרים) היומית בעונת החורף (DJF) בשלוש תקופות: 1979-1950 (כחול), 2000-1971 (אדום), 2017-1988 (כתום).

בדומה לאיור 7, איור 9 מתאר את התפלגות טמפרטורת המקסימום והמינימום העונתית בעתיד⁵ עבור שני התרחישים, יחד עם התפלגות התקופה 1988 עד 2017, בירושלים. על פי המודלים האקלימיים, שינוי האקלים בעשורים הקרובים ימשיך להיות נושא מורכב. אם תחזיותיהם יתממשו, הן טמפרטורת המקסימום והן טמפרטורת המינימום יעלו כפי שניתן לראות באיור 9. התפלגות טמפרטורת המינימום בקיץ לא תוסח באופן אחיד לעבר טמפרטורות גבוהות יותר (בדומה לטמפרטורת המקסימום בקיץ, איור 9ב') אלא היא גם תתרחב ובכך השכיחות של קיצים המאופיינים בלילות חמים תעלה בצורה דרמטית (איור 9ד'). בתקופת החורף לעומת זאת המודלים חוזים הקטנה של רוחב ההתפלגות בד בבד עם ההסחה לטמפרטורות גבוהות ולפיכך השכיחות של חורפים קרים צפויה לפחות בצורה משמעותית מאוד (איור 9ג'). יחד עם זאת, כדאי להתייחס בזהירות לתחזיות אלו אשר נדמה ומרמזות על צמצום החדירות הקוטביות לאזורנו. בעשורים האחרונים, בהם חתימת השינוי האקלימי ברורה, איננו רואים במדידות מגמה שכזו וכפי שצינו בדו"ח קודם (מגמות באירועי מזג אוויר קיצוניים בישראל⁶), לא ניכרת בעשורים האחרונים ירידה בשכיחות אירועי השלג.

⁵ תחזיות המודלים מתייחסות לממוצע האנסמבל (ממוצע של כלל המודלים המשתתפים). מכיוון שהשונות של ממוצע האנסמבל אינה מייצגת נאמנה את שונות הפרמטר (ממוצע האנסמבל מאופיין בשונות קטנה מהשונות של כל מודל ומודל בנפרד), חושב מעיין "ממוצע" השונות של כלל המודלים (שונות מצורפת, pooled variance) עבור כל תרחיש.

⁶ יוסף, י', חלפון, נ', פורת, ע', אוסטינסקי-צדקי, א', פורשפן, א' (ספטמבר 2016). מגמות באירועי מזג אוויר קיצוניים בישראל. דו"ח מחקר מס': 21921416, השירות המטאורולוגי.



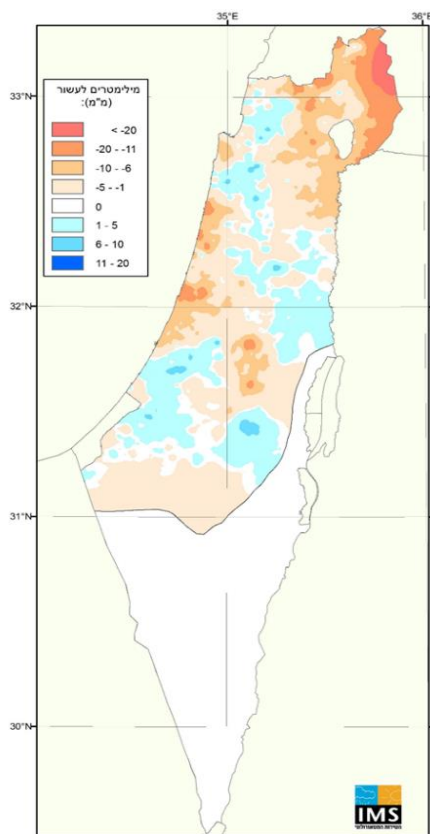
איור 9. התפלגות טמפרטורת המקסימום (TX) והמינימום (TN) הממוצעות לעונת החורף והקיץ בירושלים בתקופה 1988-2017 (כתום), 2021-2050 בתרחיש RCP4.5 (ירוק) ו-RCP8.5 לאותה התקופה (אדום כהה). קווים מקווקווים מציינים את הערך הממוצע של כל התפלגות.

2. מגמות השינוי בגשם

- בשלושים השנים האחרונות ישנה מגמת הפחתה בכמות המשקעים הכללית.
- על פי המודלים האקלימיים, כמות המשקעים צפויה לפחות בסוף המאה (2071 עד 2100) בשיעור ממוצע של כ- 10%-20% ביחס לתקופה האחרונה 1988 עד 2017 (ופחיתה של כ- 15%-25% ביחס לתקופת הייחוס 1961 עד 1990).
- נמצאה נטייה להפחתה במספר ימי הגשם בעשורים האחרונים. על פי המודלים האקלימיים מגמה זו צפויה להימשך.
- מגמות ההפחתה בכמות המשקעים ובמספר ימי הגשם בסדרות המדידה אינן מובהקות סטטיסטית*.

* השגת מובהקות סטטיסטית במגמות הגשם קשה לאור התנודתיות החזקה משנה לשנה, שיעור/עוצמת השינוי ואורך הסדרה.

2.1. מגמת השינוי בכמות הגשם 1953-2019



Theil-Sen estimator

איור 10 מתאר את המגמות בכמות המשקעים השנתית על בסיס מדידות הגשם בתקופה 1952/3 ועד 2018/9. ניתן לראות שהמגמות באזור הגליל המזרחי, הגליל העליון ורמת הגולן⁷ מצביעות על ירידה (אם כי אינה מובהקת סטטיסטית, $p \leq 0.05$). כך גם בחלקים מאזור החוף והשפלה במרכז הארץ. לעומתם, בצפון הנגב ובמישור החוף הדרומי, כמו גם בחלקו הדרום מזרחי של רכס הכרמל ובשפלת שומרון ויהודה נצפית מגמת עליה ממוצעת בכמות המשקעים. בחינת הממוצע הכלל ארצי מראה מגמת ירידה בשלושים השנים האחרונות של כ-25 מ"מ/עשור⁸, בעוד שהמגמה ארוכת הטווח בשנים 1951 עד 2017, היא הפחתה של כ-4 מ"מ/עשור⁹, שתי מגמות אלו אינן מובהקות סטטיסטית.

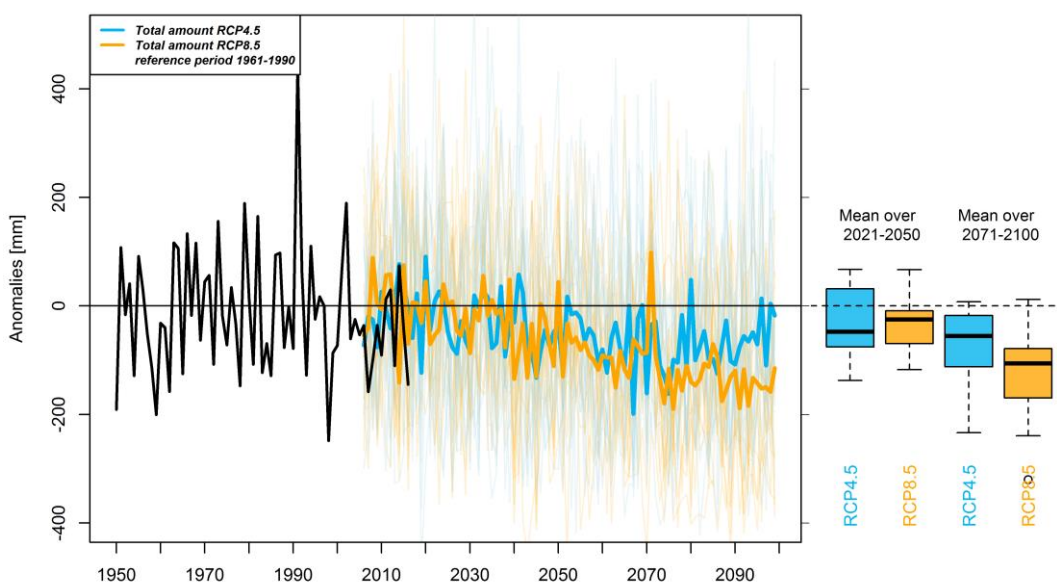
⁷ כמות הגשם ברמת הגולן לפני 1967 אינה מתבססת על המדידות באזור זה, אלא על שיעורן על בסיס המדידות מתקופה זו בגליל המזרחי.

⁸ רווח סמך של 95% הוא [-73.4, 14.3] מ"מ/עשור.

⁹ רווח סמך של 95% הוא [-17.7, 10.6] מ"מ/עשור.

2.2. מגמות השינוי במשטר הגשם

בניגוד לעליה החזויה בכמות המשקעים העולמית, תחזיות המודלים האקלימיים לאגן הים התיכון מציגות מגמת ירידה כללית בכמות המשקעים השנתית עד סוף המאה ה-21. איור 11 מתאר את השינוי בכמות הגשם הממוצעת בישראל ביחס לתקופה 1961 עד 1990 (מקו הגשם של 100 מ"מ וצפונה). התפלגות הממוצעים החזויים לפי התרחישים השונים מוצגים בתרשימי הקופסה לתקופות 2021 עד 2050 ו-2071 עד 2100. ניתן לראות שבעשורים הקרובים אין מגמת שינוי ברורה (בתקופה 2021 עד 2050 התחזיות הן להפחתה ממוצעת של כ-7% ביחס לתקופה 1961-1990, ערך שאינו שונה בהרבה מהכמות בעשורים האחרונים). לעומת זאת, בתרחיש RCP8.5, חזויה לקראת סוף המאה (לתקופה 2071 עד 2100) ירידה של כ-127 מ"מ בממוצע, יותר מ-25% מכמות הגשם הממוצעת השנתית¹⁰. עם זאת, יש לציין שמידת האי-וודאות של המודלים הולכת וגדלה ככל שמתקרבים אל סוף התקופה.



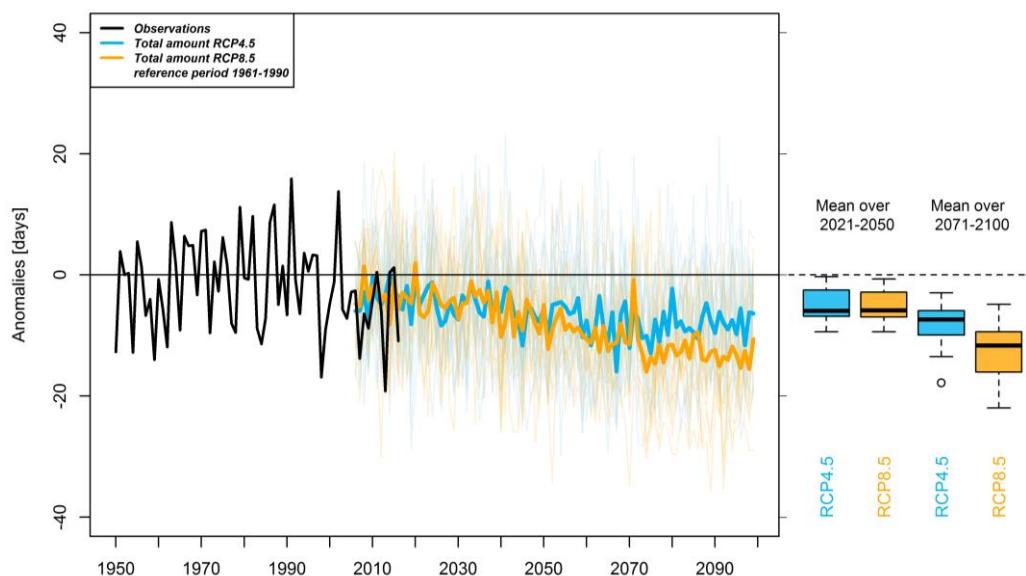
איור 11. השינוי בכמות הגשם הכללית בישראל (מ"מ) ביחס לתקופה 1961-1990. ממוצע התצפיות (בשחור). ממוצע האנסמבל עבור תרחיש RCP4.5 (בתכלת בולט), ממוצע האנסמבל עבור תרחיש RCP8.5 (בכתום בולט). קווים דקים מציינים את פיזור תוצאות המודלים השונים בהתאם לתרחישים RCP4.5 (בתכלת) ו-RCP8.5 (בכתום). תרשימי הקופסה (boxplots) מתארים את התפלגות ממוצעי המודלים השונים לכל תרחיש, לתקופה 2021-2050 ו-2071-2100. חציון ההתפלגות מצוין בקו אופקי שחור.

איור 12 מתאר את השינוי במספר ימי הגשם, כאשר יום גשם מוגדר כיום בו ירדו 1 מ"מ/יום ומעלה. תחת שני התרחישים צפוי כי בתקופה 2021 עד 2050 מספר ימי הגשם יהיה דומה לאלו שנצפו בשנים האחרונות, המבטאים ירידה של כ-5 ימי גשם בממוצע ביחס לתקופה הגשומה 1961 עד 1990. בתקופה 2071 עד 2100 צפויה תחת תרחיש RCP4.5 הפחתה של כ-8 ימי גשם ביחס לתקופת ייחוס¹¹, ותחת תרחיש RCP8.5 הפחתה של כ-12-13 ימי גשם¹².

¹⁰ פיזור תוצאות המודלים נמצא בטווח של [-33%, -24%] אחוזים, המייצג את אחוזון 25%-75% בהתאמה.

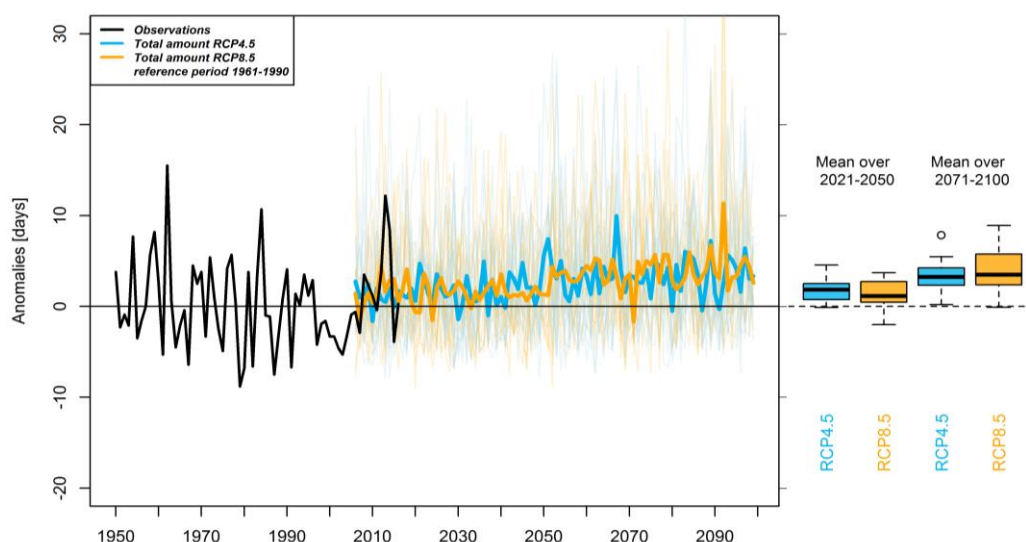
¹¹ פיזור תוצאות המודלים נמצא בטווח של [-10%, -6.5%] ימים, המייצג את אחוזון 25%-75% בהתאמה.

¹² פיזור תוצאות המודלים נמצא בטווח של [-14%, -11.5%] ימים, המייצג את אחוזון 25%-75% בהתאמה.



איור 12. כמו איור 11 רק עבור מספר ימי הגשם (יום גשם מוגדר להיות 1 מ"מ/יום ומעלה).

איור 13 מתאר את השינוי שחל במדד הבוחן את פרקי היובש (רצף ימים בהם לא ירד גשם של 1 מ"מ/יום ומעלה) במרכז עונת הגשם, בחודשים דצמבר עד פברואר. בתקופה האחרונה (1988 עד 2017) קיימת מגמה (לא מובהקת סטטיסטית) של התארכות של כחצי יום לעשור במדד זה. בתקופה 2021 עד 2050 נראה כי פרקי היובש צפויים להיות ארוכים יותר בשיעור ממוצע של עוד כיום וחצי. שינוי זה מתכתב עם המגמות הנצפות ב-30 השנים האחרונות. עבור התקופה 2071 עד 2100 ניתן להבחין בהתארכות ממוצעת של כארבעה ימים בפרקי היובש תחת שני התרחישים.



איור 13. כמו איור 11 רק עבור משך הימים הרצופים בהם לא ירד גשם (1 מ"מ/יום ומעלה) בלב עונת החורף (דצמבר-פברואר).

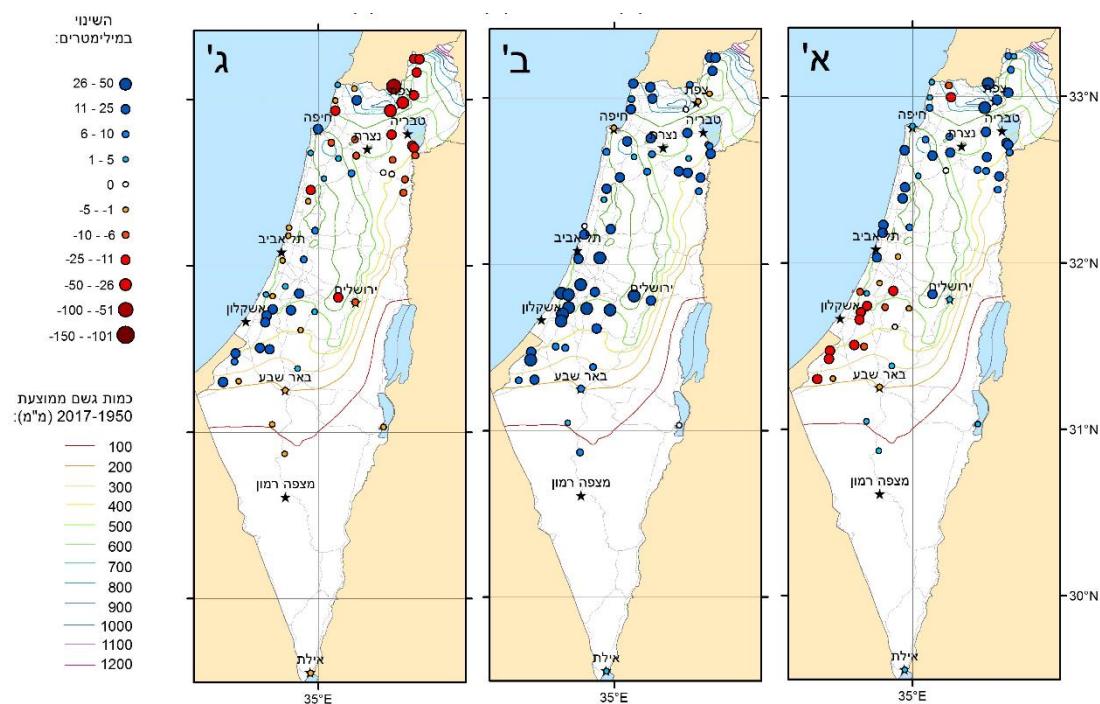
2.3. שינויים בתפרוסת הגשם בתקופה 1950-2100

הגשם הוא משתנה בעל שונות גבוהה במרחב ובזמן. בחלק זה אנו מציגים מפות המתארות את השינויים המרחביים בכמות הגשם הממוצעת בתקופות שונות. כל מפה מציגה את השינוי (במ"מ) ביחס לממוצע הרב שנתי 1951 עד 2017 בתחנות השונות. כדי שיהיה ניתן להעריך בצורה טובה את גודל/שיעור השינוי ביחס לכל תחנה, הסטיות מוצגות על רקע המפה הממוצעת לתקופה 1951 עד 2017 (מפת קונטורים צבעונית). איור 14 מתאר את השינויים ביחס לשלוש תקופות בעבר בעוד שאיורים 15 ו-16 מתארים את השינויים בשלוש תקופות זהות בעתיד תחת תרחיש RCP4.5 ו-RCP8.5 בהתאמה.

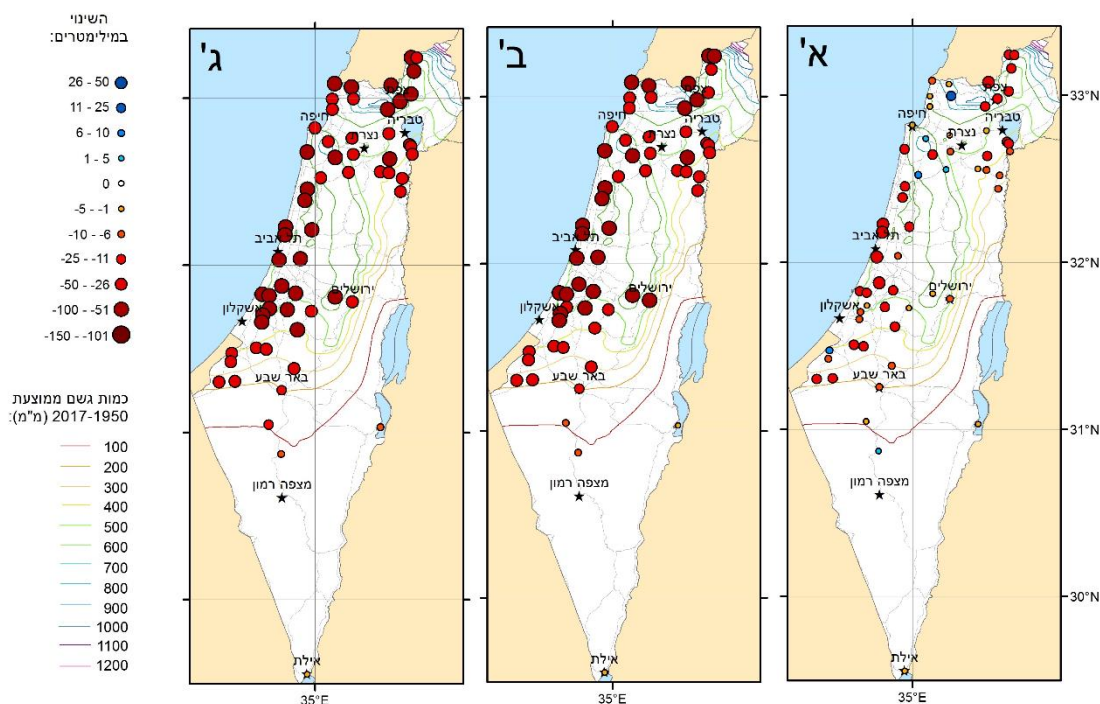
בתקופה 1951 עד 1980 (איור 14א'), צפון ומרכז הארץ מאופיינים באנומליות חיוביות (קרי, ירד יותר גשם בממוצע ביחס לתקופת ההשוואה באזורים אלו) בעוד שמישור החוף הדרומי מאופיין באנומליות שליליות בהשוואה לאותו ממוצע ארוך הטווח (קרי, ירד פחות גשם בממוצע ביחס לתקופת ההשוואה באזור זה). בתקופה 1971 עד 2000 (איור 14ב') כל הארץ נמצאת בסטיות חיוביות מהממוצע (קרי, תקופה גשומה יותר, בממוצע). איור 14ג' מתאר את 30 השנים האחרונות (1988 עד 2017) בהן רואים שבמרכז הארץ ובמישור החוף הדרומי הסטיות בממוצע המשקעים הן חיוביות (גשום יותר) לעומת סטיות שליליות (גשום פחות) באזור הגליל המזרחי והגליל העליון.

איורים 15א' ו-16א' מציגים את השינוי בגשם החזוי לעתיד הקרוב (2021 עד 2050). ככלל, תחת שני התרחישים מסתמנת במודלים האקלימיים שניתחנו מגמת הפחתה דומה, ביחס לממוצעי התקופה 1951 עד 2017. מגמת ההפחתה נמשכת גם לתוך התקופה 2051 עד 2080. הפחתה ניכרת בכמות המשקעים הממוצעת מתקבלת לקראת סוף המאה (בתקופה 2071 עד 2100) וביתר שאת תחת תרחיש RCP8.5 (איור 16ג'), בו ישנן תחנות המאבדות יותר מ-100 מ"מ ביחס לממוצע שלהן בתקופה 1951 עד 2017. מרבית התחנות צפויות לאבד בין 18%-ל-23% בממוצע בתקופה 2071 עד 2100.

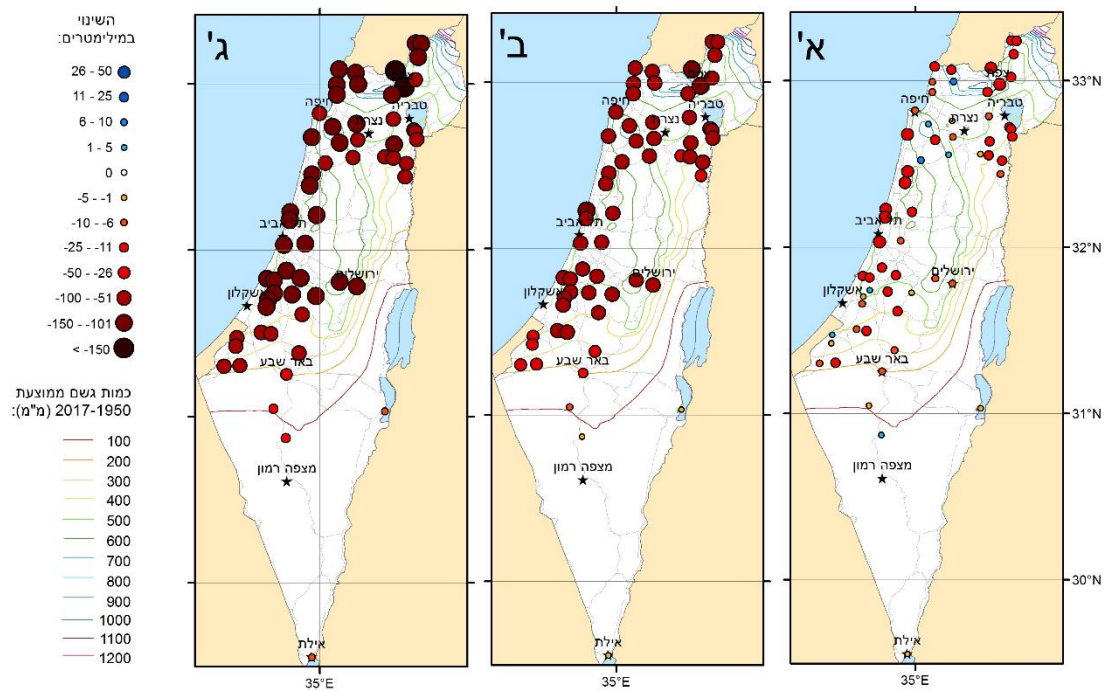
מידת ההפחתה הדומה בצפון מזרח הארץ ובדרום מערב הארץ במפות חזויות אלו (בעיקר באיורים 15ב' ו-16ג') אינה מתאימה לשינויים בתפרוסת המרחבית שנמדדו עד כה (איור 10 ואיור 14) ולפיכך מעוררת חשד כי המודלים האקלימיים הגסים מתקשים בזיהוי התהליכים המשפיעים על המשקעים באזור צפון מערב הנגב ומישור החוף הדרומי.



איור 14. השינוי בכמות המשקעים השנתית הממוצעת (מ"מ) ביחס לתקופה 1951-2017 בתקופות: א) 1951-1980, ב) 1971-2000, ג) 2000-2017.



איור 15. השינוי בכמות המשקעים השנתית הממוצעת (מ"מ), לפי תרחיש RCP4.5, ביחס לתקופה 1951-2017 בתקופות: א) 2021-2050, ב) 2051-2080, ג) 2081-2100.



איור 16. השינוי בכמות המשקעים השנתית הממוצעת (מ"מ), לפי תרחיש RCP8.5, ביחס לתקופה 2017-1951. בתקופות: (א) 2050-2021, (ב) 2080-2051, (ג) 2100-2071.

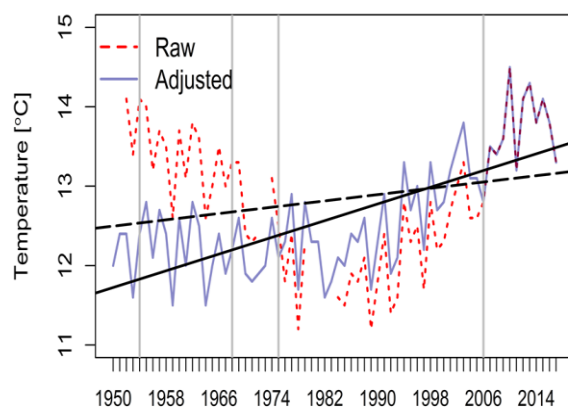
נספח טכני

א. מגמות טמפרטורה וגשם מבוססי תצפיות עבר

את שינוי האקלים שהתרחשו עד כה יש לבחון באמצעות סדרות נתוני מדידה ארוכות ככל שניתן, אולם סדרות ארוכות אלו מכילות בתוכן גם שינויים מלאכותיים שאינם חלק מתנודות האקלים הטבעיות. שינויים אלו עשויים לנבוע ממגוון גורמים כגון הזזת הסוכה המטאורולוגית, החלפת ציוד המדידה, שינויים שחלו בסביבת התחנה ועוד. נטרול/מזעור השפעות אלו הינו תנאי הכרחי לבחינת מגמות האקלים והימנעות ממסקנות שגויות בדמות שינוי אקלימי מלאכותי. לטובת איתור השפעות מלאכותיות ותיקון, יושם בשירות המטאורולוגי תהליך הנקרא "הומוגניזציה", המשלב שיטות סטטיסטיות מתקדמות יחד עם מטה-דטה (metadata), המידע ההיסטורי על התחנה. פרוט מלא של התהליך ואופן יישומו על סדרות נתונים בישראל ניתן למצוא בפרסום Yosef et al.¹³ (2019).

כך ניבנה מערך נתונים "הומוגני" (כלומר: ללא התנודות הנובעות משינויים בתחנה ובסביבתה הקרובה) ברמה יומית לתקופה 1950-2017 לנתוני הטמפרטורה (34 תחנות) והגשם (60 תחנות). על בסיס מערך זה חושבו ונותחו מגמות העבר בטמפרטורה ובגשם. בנוסף, מערך זה שימש לטובת לימוד הקשרים בין חיזוי המודלים האקלימיים לתצפיות בפועל ובהמשך להחלת תיקונים על התחזיות לעתיד (ראה פירוט בסעיף ב' בנספח זה).

באזור 17 ניתן לראות דוגמה לאופן בו נראית סדרת זמן לפני ואחרי הומוגניזציה, עבור טמפרטורת המינימום בעין החורש. הסדרה בצבע אדום הינה נתוני המקור והסדרה בצבע סגול הינה הסדרה המתוקנת (הסדרה ההומוגנית).



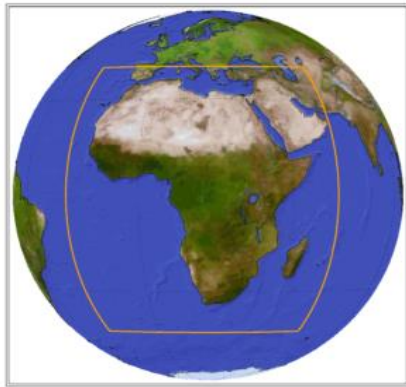
איור 17. מהלך טמפרטורת המינימום הממוצעת בעין החורש. נתוני מקור (באדום מקווקוו) מול הסדרה המתוקנת (בסגול) לאחר הומוגניזציה. קווים מאונכים (באפור) מציינים נקודות שבר שאותרו בסדרה. קווי המגמה חושבו בשיטת Theil-Sen estimator. (Yosef et al., 2019).

בחינת שיעור השינוי (באמצעות Theil-Sen estimator) מראה כי קיים הבדל משמעותי בין שתי הסדרות. סדרת המקור מציגה מגמה לא מובהקת של התחממות בשיעור של 0.1 מ"צ/עשור לעומת מגמה מובהקת מאוד של 0.26 ($p < 0.001$) של התחממות בשיעור של 0.26 מ"צ/עשור בסדרה המתוקנת. התיקונים בסדרת הנתונים בתהליך ההומוגניזציה במקרה זה נדרשו כתוצאה משלוש הזזות של תחנת המדידה בעבר והחלפת חיישן בשנת 2006 (קווים אפורים מאונכים).

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

ב. תחזיות ממודלים אקלימיים ו-Statistical Downscaling

תחזיות אקלימיות מתקבלות מהדמיות ממוחשבות של האטמוספירה. היות ומערכות מזג האוויר באזורים שונים בעולם משפיעות זו על זו, יש לבצע לכל כדור הארץ הדמיה של השינויים באטמוספירה והשינויים בפני הים ("מודלים אקלימיים גלובליים"). אלא שבשל המאמץ החישובי העצום הכרוך בהרצת מודלים אקלימיים לטווח של עשרות שנים קדימה, המכסים את כל שטח הכדור, המודלים הגלובליים היו עד כה ברזולוציה מרחבית גסה (סריג עם מרווחים של 100-200 ק"מ בין נקודה לנקודה). ברזולוציה כזו לא ניתן לתאר כראוי את תהליכי מזג האוויר בארץ, כיוון שהטופוגרפיה הופכת מוחלקת והמעבר בין הים ליבשה לאורך קו החוף לוקה בחסר. המשמעות היא שתופעות מטאורולוגיות המשפיעות על מאפייני האקלים באזורינו לא יכולות להתבטא כראוי במודל אקלימי גלובלי. לפיכך, התחזית האקלימית נשענת על מודלים אקלימיים אזוריים (Regional Climate Models) ברזולוציה גבוהה יותר (כ-50 ק"מ). בעבודה זו נעשה שימוש בתוצאות ההרצות של מודלי CORDEX AFRICA (Coordinated Regional Downscaling Experiment) על מודלים גלובליים שהשתתפו ב-



איור 18. תחום הרצת המודלים האזוריים (RCMs) ב-CORDEX אפריקה.

CMIP5 (Experiment - Coupled Model Intercomparison Project - Phase 5). את תחום הרצת המודלים האזוריים הללו ניתן לראות באיור 18. נעשה שימוש ב-12-15 מודלים שונים (בהתאם לזמינות הנתונים שהייתה עבור התרחישים השונים), ברזולוציה של 0.44 מעלות – כ-50 ק"מ בין נקודת סריג אחת לשניה.

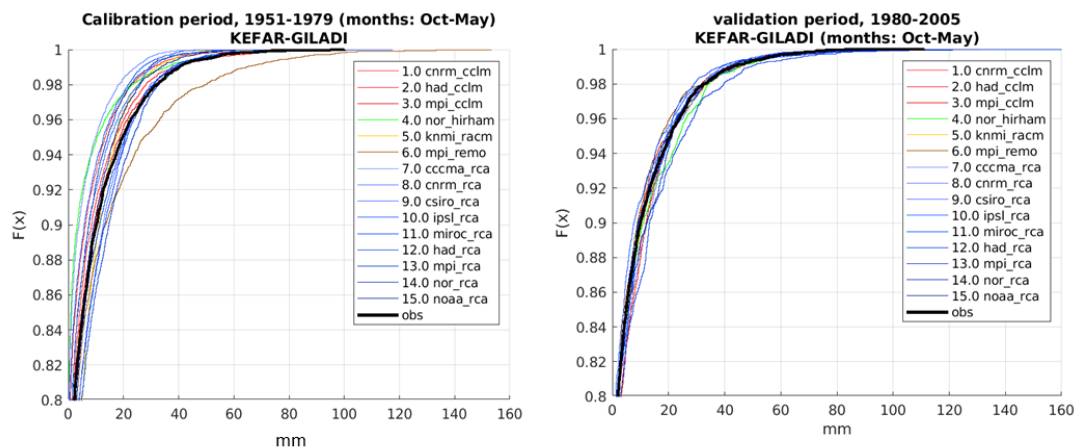
יחד עם זאת, גם מודלים אזוריים אלו הם ברזולוציה מרחבית גסה מדי לצורך הדמיה ראויה של מזג האוויר בארץ. בין השאר הם לא מצליחים לתאר כהלכה את ערכי הטמפרטורה האבסולוטית בארץ וכן אינם מצליחים לתאר כראוי את כמויות המשקעים השונות (לדוגמה: כמות המשקעים השנתית באזור ירושלים במודלים אלו נמוכה במאות מ"מ מערכה בפועל). למעשה, קיים פער בין האקלים, כפי שבא לידי ביטוי במודלים אלו, לבין הערכים שנמדדו בפועל בעיקר עבור הגשם.

הנחת עבודה מקובלת היא שסטיות שיטתיות גדולות אלו של המודלים האקלימיים, הנובעות ככל הנראה בעיקר מהייצוג הגס מדי של פני הקרקע, יחולו על הדמיות העתיד בצורה דומה לזו שבה הם בוטאו בעשורים האחרונים (באקלים הנוכחי). לאור זאת, הנחת העבודה היא שניתן לתקן את התחזיות השגויות לעתיד על ידי זיהוי הסטייה בתיאור האקלים הנוכחי.

לפיכך, באמצעות נתוני התחנות (תצפיות היסטוריות, לאחר תהליך "הומוגניזציה") הערכנו את ביצועי המודל בעבר (קרי, עד כמה התפלגות תחזיות המודל דומה להתפלגות נתוני העבר או במילים אחרות עד כמה המודל הצליח לדמות את העבר). כך, על-ידי לימוד הקשרים בין פונקציית הצפיפות המצטברת (CDF) של התצפיות לאלו של נתוני המודל בעבר החלנו תיקונים על פונקציית הצפיפות

המצטברת של נתוני המודל לעתיד (איור 19). בעבודה זו בחרנו בשיטת QDM – Quantile Delta Mapping (Pierce et al., 2015; Cannon, 2016; Cannon, 2018).

יחד עם זאת, כדאי להתייחס בזהירות לתחזיות המתקבלות מיישום תהליך תיקון סטטיסטי זה. כפי שצוין, למודלים האקלימיים הללו יש מגבלות המקשות על תיאור/מידול האקלים האמתי, בין אם בשל הרזולוציה המרחבית הגסה ובין בשל תיאור לא מדויק של תהליכים פיזיקליים תת-סריגיים ("פרמטריזציות"). קושי בשחזור העבר ראוי שיעלה את הספק לגבי יכולתם לתיאור נכון של העתיד. אנו תקווה כי בשנים הקרובות יתאפשר לבצע הרצות של מודלים אקלימיים אזוריים ברזולוציה מרחבית גבוהה (מסדר גודל של 10 ק"מ) על בסיס הדור החדש של המודלים האקלימיים הגלובליים (CMIP6) וכך ניתן יהיה לצמצם את אי ההתאמה בין אקלים המודלים לבין האקלים בפועל.



איור 19. דוגמה מתחנת כפר גלעדי, לתיקון המודלים השונים באמצעות QDM, עבור כמויות הגשם, בתקופת האימות. בפאנל השמאלי ניתן לראות את התפלגות התצפיות בשחור ואת האופן בו המודלים השונים (בגווני צבעוניים) דימו את כמויות הגשם בתקופה 1979-1951. בפאנל הימני מוצגת התפלגות התצפיות מול התפלגויות המודלים השונים לאחר תיקון, בתקופת האימות 2005-1980. התפלגויות המודלים לאחר התיקון הרבה יותר דומות למדידות שהיו בתחנה (הדבר גם נתמך אמפירית באמצעות שימוש ב-Kolmogorov-Smirnov test).

Cannon, A.J. (2018). Multivariate quantile mapping bias correction: An N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables. *Climate Dynamics*, 50(1-2):31-49. doi:10.1007/s00382-017-3580-6

Cannon, A.J. (2016) Multivariate bias correction of climate model output: Matching marginal distributions and inter-variable dependence structure. *Journal of Climate*, 29:7045-7064. doi:10.1175/JCLI-D-15-0679.1

Pierce David W. Daniel R. Cayan, Edwin P. Maurer, John. T. Abatzoglou and Katherine C. Hegewisch. (2015) Improved Bias Correction Techniques for Hydrological Simulations of Climate Change. *Journal of Hydrological*, Vol. 16, 2421-2442.