2024

מדינת ישראל
משרד התחבורה
השירות המטאורולוגי

ניתוח מגמות אקלימיות ואירועי קיצון בישראל לאורך המאה ה-21

Analysis of climatic trends and extreme events in Israel through the 21st century

סימוכין: 4000-0804-2024-0000017
בית דגן, תמוז התשפ"ד - יולי 2024

מדינת ישראל
משרד התחבורה
השירות המטאורולוגי

תמוז התשפ"ד
יולי 2024
סימוכין: 4000-0804-2024-0000017

ניתוח מגמות אקלימיות ואירועי קיצון בישראל לאורך המאה ה-21

Analysis of climatic trends and extreme events in Israel through the 21st century

יצחק יוסף, אסף צפורי, איל אילוטוביץ, יצחק כרמונה, נועם חלפון, לינס אוזן,
ענת בהר"ד, אבנר פורשפן, יואב לוי, עמיר גבעתי

תקציר

עבודה זו מציגה ניתוח מקיף של מגמות אקלימיות נצפות וחזויות בישראל עד סוף המאה ה-21. המחקר מתמקד לראשונה בבחינת תדירות אירועי אקלים קיצוניים בהם טמפרטורות קיצוניות, עומסי חום ועוצמות גשם עזות לפרקי זמן שונים. כמו כן, הושם דגש על בחינת השינויים בהסתברות לקבלת אירועים אלו מהתקופה הנוכחית ועד שנת 2100. הניתוח ההיסטורי בוצע ברובו באמצעות מדידות מתחנות מטאורולוגיות והתחזיות לעתיד באמצעות מערך מודלים אקלימיים שכוילו לאזור ישראל. בעבודה זו מוצגות בעיקר התחזיות על בסיס התרחיש האקלימי החמור יותר (RCP8.5), לשישה אזורי אקלים שונים בישראל.

מזרח אגן הים התיכון בו נמצאת ישראל, הינו אזור בעל רגישות אקלימית גבוהה. בשלושים השנים האחרונות הטמפרטורה בישראל עלתה בשיעור של כ-0.6 מ"צ/עשור וזאת ביחס לעלייה של כ-0.22 מ"צ/עשור בממוצע עולמי לשנים 1991-2020. כמו כן, חלה עלייה ניכרת במספר הימים והלילות החמים מאוד בישראל לצד הפחתה בולטת במספר הימים והלילות הקרים מאוד. בנוסף, חלה עלייה במספר ובמשך גלי החום, יחד עם גידול משמעותי במספר שבירת שיאי טמפרטורת המקסימום בשלושת העשורים האחרונים. תוצאות העבודה הנוכחית מצביעות על כך שלצד המגמה המתמשכת של עליית הטמפרטורה בישראל, אנו חווים יותר ויותר אירועי חום קיצונים תוך עלייה בתדירותם, במשכם ובעוצמתם.

טמפרטורה ממוצעת: ישראל תמשיך להתחמם בשיעור של כ-0.5-0.6 מ"צ בכל עשור. לקראת סוף המאה הטמפרטורה הממוצעת תהייה גבוהה בכ-3.5 מ"צ ביחס לממוצע עשרים השנים האחרונות ברוב חלקי הארץ.

טמפרטורה קיצונית: במישור החוף, עמקי הצפון והנגב זמן החזרה לטמפרטורה קיצונית של 45 מ"צ ומעלה יתקצר פי 5 כבר בשני העשורים הקרובים ולקראת סוף המאה יעמוד על בין 1 ל-3 שנים. טמפרטורה של 50 מ"צ ומעלה תהייה אפשרית ולקראת סוף המאה תעמוד על זמן חזרה של 15 ו-25 שנה בעמקי הצפון והנגב בהתאמה. באזור ים המלח והערבה, זמן החזרה לסף זה יתקצר משמעותית ויהיה מדי שנתיים בסוף המאה.

שיאי טמפרטורה: השיאים צפויים להישבר ולהיות גבוהים בכ-6-7 מ"צ עבור טמפרטורת המקסימום ובכ-5-6 מ"צ עבור טמפרטורת המינימום (לילות חמים מאוד) לקראת סוף המאה, בהשוואה לשני העשורים האחרונים, באזורי הארץ השונים.

עומס חום ממוצע: צפויה עלייה הדרגתית בעומס החום הממוצע בכל חלקי הארץ. לקראת סוף המאה כל אזור בארץ יחווה עלייה משמעותית של 2 קטגוריות במדרג עומס חום בהשוואה לממוצע עשרים השנים האחרונות. באזור ים המלח והערבה כבר כיום שורר בממוצע עומס חום כבד, באמצע המאה עומס החום הממוצע יהיה קיצוני והוא ימשיך להקצין עד לסוף המאה.

עומס חום קיצוני: מספר השעות בהן שורר עומס חום כבד יעלה בצורה דרמטית לצד הפחתה משמעותית באחוז הזמן בו לא שורר עומס חום. זמן החזרה לעומס חום קיצוני (33 יא"נ – יחידות אי נוחות) יתקצר פי 3 בעשורים הקרובים ולקראת סוף המאה יעמוד על 3-1 שנים. באזורים החמים (נגב, עמקי הצפון וים המלח והערבה) סף זה כבר כיום הינו די שכיח ומתרחש כמעט מדי שנה. השכיחות של סף קיצוני יותר (35 יא"נ) יתקצר פי 3 בעשורים הקרובים ביחס למצב כיום ולקראת סוף המאה יעמוד על 2-1 שנים באזורים אלו. במישור החוף והרי המרכז סף זה אינו מתרחש כיום אך יהיה אפשרי לקראת סוף המאה ויעמוד על תקופת חזרה ממוצעת של כ-10 שנים.

כמות גשם ממוצעת ומספר ימי גשם: לקראת סוף המאה צפויה הפחתה כללית בשיעור ממוצע של כ-25-20% ביחס לממוצע הגשם הכללי ב-20 השנים האחרונות. שיעור ההפחתה משתנה בין חלקי הארץ השונים. כך גם עבור מספר ימי הגשם אשר צפויים לפחות בכ-30-20% בסוף המאה.

עוצמות גשם גבוהות: נצפתה באזור מישור החוף מגמת עלייה משמעותית בעוצמות הגשם, בעיקר בפרקי הגשם הקצרים של 30 ו-60 דקות ב-30 השנה האחרונות. מגמה זו הביאה לתוספת של כ-26% ו-40% בעוצמת הגשם למשך של 60 ד' בזמני החזרה הנדירים יותר של 50 ו-100 שנה בהתאמה, ביחס לתקופה מוקדמת יותר 1993-1964. על פי המודלים האקלימים מגמה זו צפויה להימשך ואף להאיץ ככל שטמפרטורת כדור הארץ תמשיך לעלות.

ממצאי דו"ח זה מהווים אינדיקציה ברורה למגמות אקלימיות שכבר משפיעות על ישראל ואת אלו הצפויות להמשיך ולהשפיע בעשורים הקרובים. למגמות המוצגות בעבודה זו השלכות ניכרות על כל תחומי החיים בישראל: בריאות, מים, תשתיות, ניקוז, שירותי חירום, חקלאות, אנרגיה, סביבה ועוד ולכן מחייבות הערכות מקדימה. האקלים בעשורים הקרובים בישראל צפוי להראות אחרת מזה שאנחנו מכירים כיום. הבנת השינויים שמתחוללים ואלו החזויים, יאפשרו למקבלי החלטות במגזרי המשק השונים לתכנן ולהיערך בצורה טובה יותר לשינויים האקלימיים כל אחד בתחומו.

Abstract

This study presents a comprehensive analysis of observed and projected climate trends in Israel up to the end of the 21st century. For the first time, this research focuses on examining the frequency of extreme climate events, including extreme temperatures, heat stress, and intense rainfall, over various time durations. Additionally, the study emphasizes changes in the probability of occurrence of these events from the present period until 2100. The historical analysis primarily utilizes measurements from meteorological stations, while future projections are based on an ensemble of climate models calibrated for the Israel region. This work predominantly presents forecasts under the more severe climate scenario (RCP8.5) for six different climate zones in Israel.

The eastern Mediterranean basin, where Israel is located, is an area of high climatic sensitivity. In the last thirty years, the temperature in Israel has increased at a rate of about 0.6 °C/decade compared to the global average increase of about 0.22 °C/decade for the years 1991-2020. Additionally, there has been a significant increase in the number of very hot days and nights in Israel, alongside a noticeable reduction in the number of very cold days and nights. There has also been an increase in the number and duration of heat waves, along with a significant rise in the number of maximum temperature records broken in the last three decades. The results of the current work indicate that, alongside the ongoing trend of temperature rise in Israel, we are experiencing increasingly frequent, prolonged, and intense extreme heat events.

Average temperature: Israel will continue to warm at a rate of about 0.5-0.6 °C each decade. By the end of the century, the average temperature will be about 3.5 °C higher than the average of the last twenty years in most parts of the country.

Extreme temperature: In the coastal plain, northern valleys, and the Negev, the return period of an extreme temperature of 45°C or higher will be reduced by a factor of five within the next two decades, and by the end of the century, it will be between one and three years. A temperature of 50 °C or higher will be possible, with a return period of 15 to 25 years in the northern valleys and the Negev, respectively. In the Dead Sea and Aravah, the return period for this threshold will significantly shorten to every two years by 2100.

Temperature records: The temperatures are expected to be record-shattering, with increases of approximately 6-7 °C for maximum temperatures and about 5-6 °C for minimum temperatures (very warm nights) towards the end of the century, compared to the last two decades, across various regions of the country.

Average heat stress: A gradual increase in average heat stress is expected in all parts of the country. By the end of the century, the average heat stress index in every region of Israel will increase by two categories compared to the average of the last twenty years. In the area of the Dead Sea and the Aravah, where there is already heavy heat stress today, the average heat stress is projected to become extreme by mid-century and even more sever by the end of the century.

Extreme heat stress: The number of hours with heavy heat stress will increase dramatically, with a significant reduction in the percentage of time without heat stress. The return period for extreme heat stress index (33 Discomfort index) is expected to decrease by a factor of three in the coming decades, and by the end of the century, it may occur every one to three years. In the hot areas (the Negev, northern valleys, Dead Sea and Aravah), this threshold is already quite common and occurs almost every year. The frequency of a more severe threshold (35 Discomfort index) will be three times shorter in the coming decades compared to today, and by the end of the century, it will be one to two years in these areas. In the coastal plain and central mountains, this threshold does not occur today but will be possible by the end of the century with a return period of ten years.

Average rainfall and number of rainy days: By the end of the century, an overall decrease of approximately 20-25% is expected in the average rainfall compared to the general average of the past 20 years. The rate of decrease varies across different regions of the country. Similarly, the number of rainy days is expected to decrease by approximately 20-30% by the end of the century.

High precipitation intensities: A significant increase in precipitation intensities has been observed in the coastal plain area, especially in short precipitation episodes of 30 and 60 minutes over the last 30 years. This trend has resulted in an increase of approximately 26% and 40% in the intensity of 60-minute precipitation for rare return periods of 50 and 100 years, respectively, compared to the earlier period of 1964-1993. According to climate models, this trend is expected to continue and even accelerate as the Earth's temperature continues to rise.

The findings of this report provide clear indications of the current climate trends that are already affecting Israel and those expected to continue impacting the country in the coming decades. These trends have significant implications for all areas of life in Israel, including health, infrastructure, drainage, emergency services, agriculture, energy, environment, water, and more. Therefore, preliminary assessments are required. The climate in the coming decades is expected to differ significantly from what we know today. Understanding the changes that are occurring and those that are projected will allow decision-makers in various sectors of the economy to better plan and prepare for climatic changes in their respective fields.

מסמך זה יש לצטט כך:

יוסף, י', צפורי, א', אילוטוביץ, א', כרמונה, י', חלפון, נ', אוזן, ל', בהר"ד, ע', פורשפן, א', לוי, י', גבעתי, ע' (2024). ניתוח מגמות אקלימיות ואירועי קיצון בישראל לאורך המאה ה-21. דו"ח מחקר מס' 4000-0804-2024-0000017, השירות המטאורולוגי.

Yosef, Y., Zipori, A., Ilotoviz, E., Carmona, I., Halfon, N., Uzan, L., Baharad, A., Furshpan, A., Levi, Y. and Givati, A. 2024. Analysis of climatic trends and extreme events in Israel through the 21st century. Research Report No. 4000-0804-2024-0000017, Israel Meteorological Service.

תוכן עניינים

א. כללי

ביולי 2018 התקבלה החלטה 4079 של ממשלת ישראל, בנושא "היערכות ישראל להסתגלות לשינויי אקלים". החלטה זו 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. השירות המטאורולוגי פועל להעמיד בפני משרדי הממשלה, מגזרי המשק השונים והציבור הרחב את ממצאי המחקר האקלימי הנדרשים לצורך ניתוח סיכונים מושכל, קבלת החלטות וגיבוש תוכנית פעולה מותאמת למגמות הצפויות.

מטרתה של עבודה זו היא להציג את השינויים האקלימיים הנצפים והחזויים בישראל בדגש על המגמות וזמני החזרה עבור מספר פרמטרים אקלימיים חלקם קיצוניים. לשינויים בפרמטרים אלו קיימת השפעה על מדינת ישראל מטווח הזמן המיידי, דרך העשורים הקרובים ועד לסוף המאה. בכוחם של ניתוחים אלו לסייע למקבלי ההחלטות לגזור את המשמעויות הנדרשות לצורך היערכות מיטבית לשינויים החזויים.

העבודה הנוכחית מבוססת ברובה על נתונים בהם עשינו שימוש במספר מחקרים קודמים בנושא שינויי אקלים בשירות המטאורולוגי (להלן: שמ"ט), הניתנים להורדה מאתר השמ"ט. בשונה מהעבודה המרכזית הקודמת (יוסף וחוב', 2019), אשר בחנה בעיקר את השינוי בערכים הממוצעים ובמספר ספים לא קיצוניים מאוד, הפעם בחרנו להתמקד בשינויים ובמגמות של אירועים אשר חלקם נמצאים בזנבות ההתפלגות הכוללים גם חישובי ההסתברויות / זמני החזרה לאירועי קיצון של טמפרטורה, עומס חום וגשם. הניתוח ההיסטורי בוצע ברובו באמצעות מדידות מתחנות מטאורולוגיות וחלק קטן כלל גם שימוש בראנליזה[1] (ERA5-Land). התחזיות לעתיד בוצעו באמצעות מספר מודלים אקלימיים (בין 10 ל-15) מבוססי CMIP5, לאחר ביצוע כיול סטטיסטי (statistical downscaling). ניתוח התחזיות ברוב חלקי העבודה מבוסס בעיקר על התרחיש האקלימי החמור (RCP8.5). יש לציין כי התחזית המובאת כאן, מבוססת עדיין על רזולוציה מרחבית גסה (כ-50 ק"מ) של מודלים מהדור הקודם (CMIP5) וכי בשנה הקרובה אנו עתידים להתחיל לעבד תוצאות של מודל ברזולוציה מרחבית גבוהה (כ-2.5 ק"מ), לתרחישים העדכניים ביותר מבוססי CMIP6. מחקר זה מבוצע בימים אלו על-ידי השמ"ט, באמצעות מרכז החישובים האקלימי.

בנוסף, לראשונה הושם דגש מיוחד על ניתוח מגמות בעוצמות גשם גבוהות, לפרקי זמן שונים כך מ-10, 30 ועד 60 דקות, לאזור מישור החוף, המעודכנות עד החורף האחרון 2023/4. לעוצמות הגשם השפעה קריטית על ניהול הנגר, הניקוז העירוני ושגרת החיים ככלל בסביבה העירונית.

כלל העיבודים הנ"ל, מספקים מידע חשוב המהווה נדבך משמעותי נוסף בהבנת השינוי האקלימי והתכנון הנדרש לאורם מצד כל משרדי הממשלה ומגזרי המשק השונים. הדו"ח מתחיל בסקירת מערכי הנתונים והשיטות בהן השתמשנו, אחר כך מוצגות תוצאות הניתוח ברמה הארצית וברמה אזורית (נותחו שישה אזורים).

ב. מתודולוגיה

בעבודה זו נעשה שימוש בנפח נתונים גדול מאוד המכיל תצפיות מהעבר ונתונים ממספר מודלים אקלימיים (10-15 מודלים), עד שנת 2100, שהורצו בתרחישים אקלימיים שונים. כמו כן, יושמו מספר רב של שיטות מתמטיות וסטטיסטיות לבקרת נתונים, איתור ותיקון השפעות שאינן אקלימיות לאור שינויים שחלו בתנאי המדידה בתחנות (הומוגניזציה) וכן אימות, כיול וניתוח התחזיות לעתיד במודלים האקלימיים. הניתוחים השונים בוצעו גם לנתוני העבר, כדי להבין את המגמות בתקופה האחרונה ולשמש כנקודות ייחוס לתחזיות. בחלק זה נציין בקצרה את עיקרי השיטות בהן השתמשנו.

[1] הראנליזה מתייחסת לתהליך בו נעשה שימוש במודלים ממוחשבים כדי לחשב מחדש וליצור תיעוד מקיף ועקבי של נתוני מזג אוויר ואקלים בעבר. בתהליך זה נעשה שימוש בנתוני תצפיות היסטוריים ממקורות שונים כמו תחנות מזג אוויר, לוויינים ובלונים מטאורולוגיים, יחד עם מודלים ממוחשבים, כדי לייצר מערך נתונים מפורט ורציף של האופן שבו התנהגה האטמוספירה של כדור הארץ בעבר. בעבודה זו עשינו שימוש בראנליזה של ERA5.

בסיס הנתונים והמדדים האקלימיים

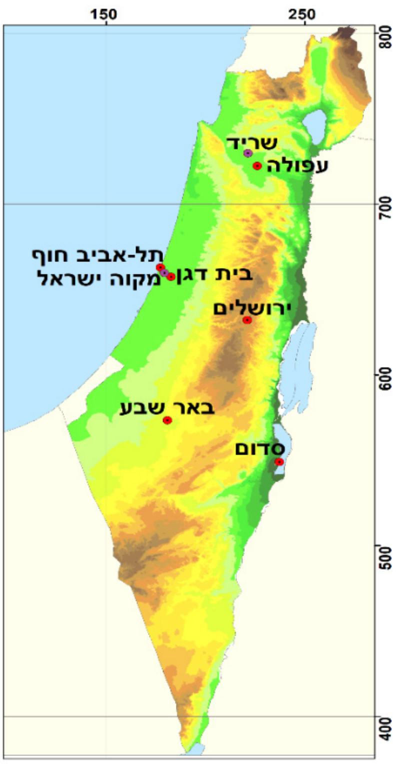
ניתוח המגמות האקלימיות בוצע לששה אזורים שונים בארץ, כאשר לכל אזור נבחרה תחנה מייצגת לתיאור האקלים בעבר ובעתיד (טבלה 1, איור 1). במחקר זה נעשה שימוש בנתוני טמפרטורה וגשם יומי המוגניים, אשר מביאים בחשבון את השינויים שחלו בתנאי המדידה לאורך השנים, דוגמת שינויים בהצבת התחנה, שינויים במכשור, שינויים בסביבת התחנה ועוד (Yosef et al., 2018; Yosef et al., 2019), יחד עם נתוני מודלים אקלימיים יומיים (יוסף וחוב', 2019; יוסף וחוב', 2020) ושעתיים. מעבר לאזורים הנ"ל, בוצע גם ניתוח של המגמות לממוצע הטמפרטורה והגשם הארצי. בסיס הנתונים לממוצע הטמפרטורה הארצי הורכב מ-24 תחנות ובגשם השתתפו 58 תחנות (מקו 100 מ"מ וצפונה) להן חושב ממוצע משוקלל, כך שכל תחנה קיבלה משקל שונה בהתאם לשטח אותו היא מייצגת (Yosef et al., 2019). חישוב זה יושם הן לתצפיות ההיסטוריות והן לנתוני המודלים החזויים.

עומס החום הינו מדד המבטא את מידת אי הנוחות לאדם הנובעת מהשילוב בין טמפרטורת האוויר ללחות המצויה בו. בעבודה זו מדד עומס החום[2] חושב כממוצע חשבוני של הטמפרטורה היבשה והטמפרטורה הלחה; מדד אי הנוחות = 0.5TD+0.5TW. מדד זה מכונה גם "מקדם אי הנוחות" – (Discomfort Index) ומבוטא באמצעות "יחידת אי-נוחות" - יא"נ (למרות שערכיו המקוריים נתונים במ"צ). קיימות שש קטגוריות של עומס חום המוגדרות על פי הערכים המספריים הבאים:

ללא עומס חום	מדד אי הנוחות קטן מ-22.0 מ"צ
עומס חום קל	מדד אי הנוחות בין 22.0 מ"צ ל-23.9 מ"צ
עומס חום מתון	מדד אי הנוחות בין 24.0 מ"צ ל-25.9 מ"צ
עומס חום בינוני	מדד אי הנוחות בין 26.0 מ"צ ל-27.9 מ"צ
עומס חום כבד	מדד אי הנוחות בין 28.0 מ"צ ל-29.9 מ"צ
עומס חום קיצוני	מדד אי הנוחות 30.0 מ"צ ומעלה

טבלה 1. האזורים השונים והתחנות המייצגות אותם.

אזור	תחנה מייצגת טמפרטורה	תחנה מייצגת גשם
עמקי הצפון	עפולה	שריד
רצועת החוף	תל אביב	מקווה ישראל
מישור החוף	בית דגן	מקווה ישראל
הרי המרכז	ירושלים	ירושלים
נגב	באר שבע	באר שבע
ים המלח והערבה	סדום	סדום



איור 1. פריסת התחנות לייצוג הטמפרטורה והגשם באזורים השונים.

השינויים והמגמות נבחנו באמצעות שורה של מדדים אקלימיים המפורטים בטבלה 2. רשימת המדדים כוללת מעקב אחר ערכים ממוצעים בטמפרטורה ובגשם וכן הסתברויות לאירועים קיצוניים של טמפרטורה ועומס חום.

2 מדד עומס החום בו אנו משתמשים, נמצא בשימוש צה"ל ואומץ על-ידי השמ"ט, נוסח על-ידי פרופ' עזרה זוהר, על בסיס עבודתו של Thom, 1959.

טבלה 2. המדדים שנבחרו לתיאור השינוי האקלימי [יחידות].

	מדד אקלימי
1	**טמפרטורה** – מקסימלית, מינימלית, ממוצעת [מ"צ]
2	**ימים חמים מאוד** – מספר ימים מעל סף 38 מ"צ [יום]
3	**לילות חמים** – מספר לילות מעל סף 20 מ"צ [יום]
*4	**גלי חום** – תדירות [מספר גלים], משך [מספר ימים], טמפרטורה מקסימלית [מ"צ]. גל חום הינו מצב בו הטמפרטורה המקסימלית גבוהה ב-4 מ"צ לפחות בהשוואה לערך הממוצע באותו החודש, במשך לפחות 3 ימים רצופים.
5	**עומס חום**[אחוז הזמן בו אין עומס חום ואחוז הזמן בו שרר עומס חום כבד ומעלה] בין החודשים יוני לספטמבר בלבד ועומס חום ממוצע [יא"נ]
6	**טמפרטורה קיצונית** – הסתברות ליום של 40, 45 ו-50*** מ"צ ומעלה [זמן חזרה בשנים]
7	**עומס חום קיצוני** – הסתברות לעומס חום של 33 ו-35 יא"נ ומעלה [זמן חזרה בשנים]
8	**כמות גשם שנתית** [מ"מ]
9	**מספר ימי גשם** – כמות הגשם הגדולה או שווה ל-1 מ"מ/יום [מספר ימים]
***10	**עוצמות גשם** – לפרקי זמן של 10, 30 ו-60 דקות [מ"מ/שעה]

*** הניתוח נעשה רק ברמה הארצית מכיוון שהמגמות באזורי הארץ השונים הן די דומות.**
**** הניתוח נעשה רק לאזורים החמים מאוד.**
***** הניתוח נעשה רק לאזור מישור החוף אך הוא נכון גם לרצועת החוף.**

חישוב ממוצעים, מגמות והסתברויות

כדי לאמוד את השינויים במדדים המופיעים בטבלה 2, חילקנו את מערך הנתונים למספר תקופות. תקופה היסטורית המתייחסת לממוצע התקופה 2000-2020 (בגשם 1991-2020), בה הנתונים מבוססים על תצפיות הומוגניות לטמפרטורה ולגשם. עומס החום לתקופה זו מבוסס על נתוני הראנליזה ERA5-Land (רזולוציה מרחבית של כ-9 ק"מ), לאחר כיולם (באמצעות statistical downscaling) בהתאם לאזורי העניין. תקופת העתיד חולקה לארבע תתי-תקופות: 2020-2040, 2040-2060, 2060-2080 ו-2080-2100. לטובת חישובי ההסתברויות, התבססנו על תקופות מעט ארוכות יותר, 1990-2020 (נתונים היסטוריים), 2020-2050, 2050-2080 ו-2070-2100, זאת בשל רגישות עיבוד זה למשך התקופה (ניתוח לפרקי זמן קצרים עשוי להניב תוצאות פחות יציבות).

ככלל, כל הניתוחים לעתיד בוצעו באמצעות מודלים אקלימיים אזוריים (RCMs) מבוססי CMIP5 (בין 10 ל-15 מודלים שונים, תלוי באלמנט המטאורולוגי), בעלי רזולוציה מרחבית של כ-50 ק"מ. מודלים אלו עברו תיקון סטטיסטי בשיטת Quantile Delta Mapping (Canon et al.,2015).

את רשימת המודלים המלאה ומכוני המחקר שהריצו אותם ניתן למצוא בנספח א'. יש לציין כי ברב חלקי עבודה זו, הדגש הושם בעיקר על ניתוח התרחיש האקלימי החמור (RCP8.5). תחת תרחיש זה, האנושות ממשיכה לפלוט גזי חממה באותו השיעור של התקופה האחרונה (תרחיש "עסקים כרגיל"). בניתוח הארצי התייחסנו גם לתרחיש האקלימי המתון יותר (RCP4.5), בו שיא פלטות גזי החממה הינו לקראת אמצע המאה ומנקודה זו מתחילה ירידה הדרגתית עד לסופה.

הערכים הממוצעים, המגמות וההסתברויות חושבו לכל תת-תקופה. במקרה של המודלים, החישוב בוצע לכל מודל בנפרד. בחלק מהעיבודים לעתיד המגמה מתוארת באמצעות ערך ממוצע או חציוני, המשקלל את תוצאות המודלים השונים, למדד הנבחן (Ensemble median או Ensemble mean). בחלקים אחרים של העבודה, ניתן ללמוד גם על פיזור התוצאות של המודלים השונים.

חישובי המגמות בוצע באמצעות Mann-Kendall and Sen's slope estimator, שיטה אפרמטרית שפחות מושפעת מערכים קיצוניים ואינה מניחה דבר על צורת ההתפלגות ולכן נחשבת ליציבה יותר.

חישוב ההסתברויות (זמני חזרה) נעשה בשיטת Block-Maxima. בשיטה זה מחלקים את בסיס הנתונים ל"בלוקים" של זמן (שנה, חודש, מספר חודשים) ומכל בלוק נלקח הנתון המקסימאלי. ניתוח זה בוצע לכל סדרה בעבר ולכל אחת מסדרות המודלים בעתיד. לסדרות אלו הותאמה התפלגות GEV (Generalized Extreme Value) והתאמת המקדמים בוצעה בשיטת L-Moments, על בסיסם חושבו זמני החזרה לטמפרטורה, עומס חום ועוצמות הגשם.

בדומה לערכים הממוצעים גם הערכים הקיצוניים, הנמצאים בזנבות ההתפלגות הצריכו בדיקה של יכולת המודלים לדמות אירועי קיצון. יכולת זו נבדקה על פני תקופת האימות 1980-2005 (מכיוון שבשנת 2006 המודלים מתפצלים לתרחישים האקלימיים השונים). היכן שהערכת תוצאות אנסמבל המודלים (הערך החציוני שלהם), היתה מסדר גודל דומה לאלו של התצפיות, יכולנו להתבסס עליהם כדי לתאר את הצפי לעתיד. היכן שהתוצאות לא היו טובות, שערכנו רק את השינוי היחסי החזוי במודלים לתקופות שונות בעתיד. מכאן, שלא בכל אזור מופיעים כל ניתוחי ההסתברויות בצורה מלאה לאירועי הקיצון. כמו כן, יש לציין, שחרף העלייה הברורה בטמפרטורה הממוצעת, לא תמיד שיאי הטמפרטורה נשברים מדי כל כמה עשורים בעתיד, בדומה למצב במדידות ההיסטוריות.

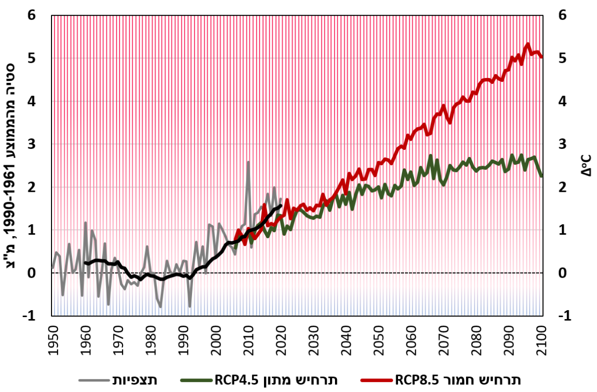
יש לציין שבשל הרזולוציה המרחבית הגסה יחסית של המודלים בהם השתמשנו (כ-50 ק"מ), מודלים אלו אינם מזהים בצורה טובה את הטופוגרפיה המורכבת של ישראל וכן מתקשים בתיאור קו החוף ותהליכים פיזיקליים (דוגמת בריזה וגשם קונווקטיבי) לכן היה צריך לכיילם. בנוסף, אופן הרכבת האנסמבל ממודלים אקלימיים ופיזור תוצאות הסימולציות השונות, מגלם בתוכו אי-וודאות נוספת. בעיות אלו עשויות להוביל לעיתים להערכות חסר ו/או יתר במגמות הניצפות במודלים אקלימים וכן בממוצע האנסמבל ככלל ובערכים קיצונים בפרט.

מרבית הערכים המוצגים בדו"ח זה, רוכזו בטבלאות מסכמות הנמצאות בנספחים ב' ו-ג', למדדים השונים בחלוקה לתקופות העניין. בתחילת הדו"ח כאמור מוצגת התחזית הכללית ברמה הארצית ואחר כך ניתוח פרטני לשישה אזורים (המופיעים בטבלה 1).

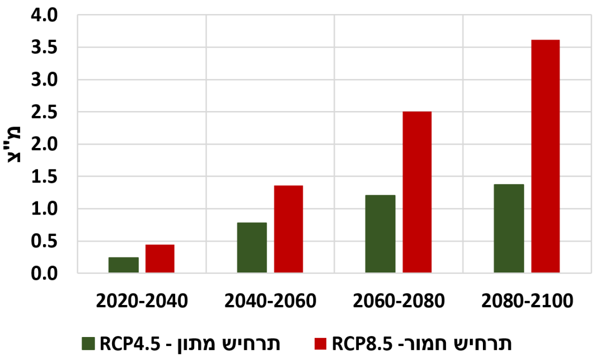
ג. ניתוח מגמות באירועי קיצון בתרחיש

1. ממוצע ארצי

ישראל מתחממת בצורה עקבית מזה כארבעה עשורים וכך גם צפוי להיות בעשורים הקרובים. באיור 2, ניתן לראות את שינוי הטמפרטורה הממוצעת בישראל משנת 1950 ועד 2100, לתרחיש אקלימי חמור (אדום) ומתון (ירוק). הטמפרטורה הממוצעת (TM) חושבה על-ידי מיצוע טמפרטורות המקסימום (TX) והמינימום (TN) היומית (TM=[TX+TN]/2), בתצפיות ובמודלים כדי לשמור על אחידות חישובית משנות ה-50 של המאה הקודמת ועד שנת 2100. מאיור זה עולה כי הטמפרטורה איננה עולה באופן מונוטוני (קבוע) משנות ה-50 של המאה הקודמת. תחילת התקופה מאופיינת בשנים חמות, אחר כך ישנה ירידה קלה והתייצבות סביב שנות ה-70 וה-80 ומתחילת שנות ה-90, נצפתה עלייה קבועה ומובהקת בשיעור של כ-0.6 מ"צ/עשור. המשך עלייה בשיעור דומה חזוי גם לשני העשורים הבאים, בשני התרחישים הנבחנים. תחת התרחיש החמור, עלייה זו תימשך בשיעור דומה ובסוף המאה היא תוביל לעלייה ממוצעת כוללת של יותר מ-3.5 מ"צ ביחס לממוצע הטמפרטורה בשני העשורים האחרונים (2000-2020), כפי שניתן לראות באיור 3. הטמפרטורה הינה משתנה רציף במרחב ולכן כל הארץ מתחממת בשיעור פחות או יותר דומה. באיור 4 ניתן לראות את השינויים המרחביים ואת העלייה בטמפרטורה השנתית הממוצעת ככל שנעים מזרחה ועד הבקעה. עם זאת, השינוי המרחבי באחוזים הינו די דומה בין חלקי הארץ השונים עם הבדלים של אחוזים בודדים בין האזורים.



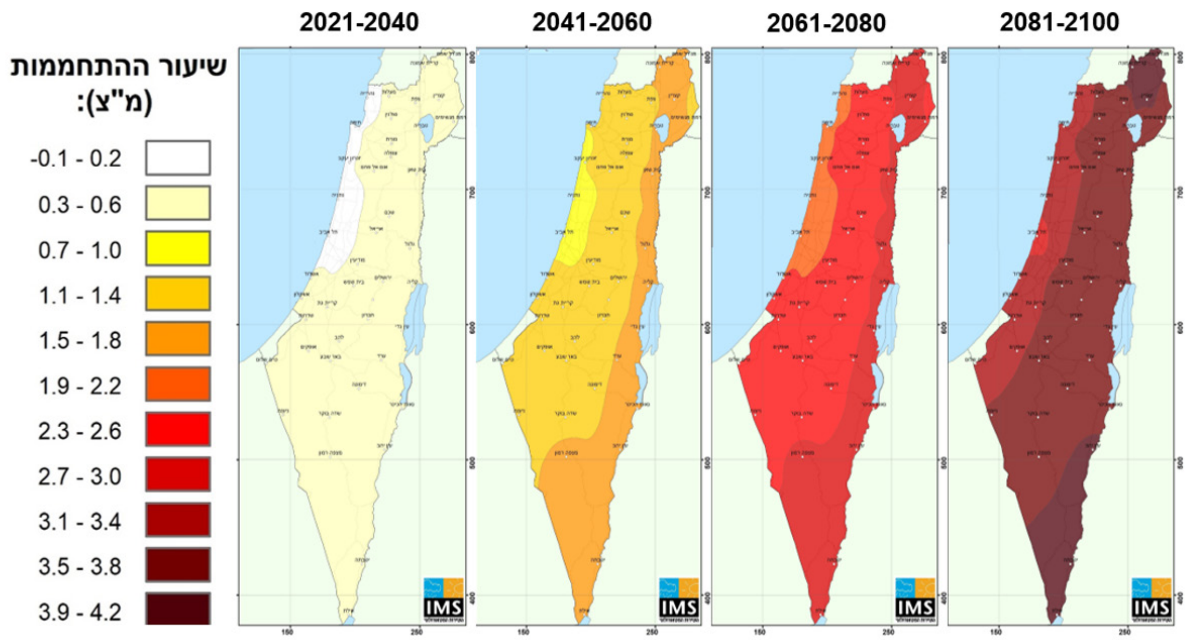
איור 2. השינוי באנומליית הטמפרטורה הממוצעת בישראל בתקופה 1950-2100 ביחס לממוצע התקופה 1961-1990. השינוי בטמפרטורה בתצפיות (באפור) עם ממוצע נע ל-11 שנה (בשחור). הטמפרטורה החזויה עד שנת 2100 תחת שני תרחישים אקלימיים, מתון – RCP4.5 (ירוק) וחמור – RCP8.5 (אדום).



איור 3. אנומליה בטמפרטורה השנתית הממוצעת לארבע תקופות חזויות, ביחס לממוצע התקופה 2000- 2020. בירוק תרחיש מתון (RCP4.5) ובאדום תרחיש חמור (RCP8.5).

ככלל ישנה עלייה מובהקת בשכיחות הופעתם של ימים ולילות חמים מאוד (אחוזון 90) לצד הפחתה במספר הימים והלילות הקרים (מתחת לאחוזון 10; Yosef et al., 2019). ביטוי לכך ניתן לראות גם בתדירות ובמשך גלי החום. באקלים הנוכחי, בממוצע הארצי, שכיחות גלי החום הממוצעת הינה כ-4 גלים בשנה. גל חום אופייני נמשך בממוצע כ-4-5 ימים ומתאפיין בטמפרטורה מקסימלית ממוצעת המתקרבת לכ-36 מ"צ. בשיאו של כל גל חום, הטמפרטורה אף עשויה לחצות את ה-39 מ"צ. בשני העשורים הקרובים מספר גלי החום יעלה ויעמוד על כ-5 גלים בממוצע בשנה וסביב אמצע המאה התחזית היא לממוצע של 6 גלי חום בשנה. משכם של גלי החום יתארך ויעמוד על כ-5 ימים בממוצע בעשרים השנים הבאות ו-6 ימים בממוצע סביב 2050. הטמפרטורה המקסימלית הממוצעת האופיינית לגלי החום תעלה לכ-37 מ"צ בעשרים השנים הבאות ותישאר סביב ערך ממוצע זה גם באמצע המאה. שיא הטמפרטורה בגלי החום צפוי להגיע לערכי שיא גבוהים יותר מהתקופה הנוכחית, עם טמפרטורה של מעל ל-40 מ"צ בשני העשורים הקרובים ומעל 42 מ"צ סביב אמצע המאה.

מאמצע המאה ועד סופה תדירות גלי החום תמשיך לעלות ותגיע לכ-7 גלי חום בממוצע. הטמפרטורה הממוצעת של גל החום תישאר גבוהה סביב ערך ממוצע של 37 מ"צ, אך זו תלווה בהתארכות משמעותית של משך גל החום האופייני. כך, בתקופה 2060-2080 משך גל חום ממוצע יעמוד על כ-11 ימים ובסוף המאה יתארך בשבוע נוסף ויעמוד על כ-18 ימים.



איור 4. אנומליות מרחביות בטמפרטורה השנתית הממוצעת, לארבע תקופות חזויות, ביחס לממוצע התקופה 2000-2020, בתרחיש החמור (RCP8.5).

גלי החום יהיו מאופיינים בערכי שיא גבוהים של כ-45 מ"צ בממוצע הארצי.

טבלאות 3 ו-4 מפרטות את ערכי טמפרטורת השיא של הימים והלילות החמים ביותר בהתאמה, בשני העשורים האחרונים ואת אלו החזויים על פי המודלים על לסוף המאה. תחנות נוספות ניתן למצוא בנספח ב'. מטבלה 3 (ונספח ב') עולה כי סביב אמצע המאה ערכי שיא הטמפרטורה צפויים להיות גבוהים יותר בהשוואה לערכים בשני העשורים האחרונים, כאשר בעמקי הצפון הערכים עשויים לעלות ביותר מ-5 מ"צ, בהרי המרכז בכ-2 מ"צ ובשאר האזורים בכ-3-4 מ"צ. לקראת סוף המאה ערכי הטמפרטורה ימשיכו לעלות, כאשר בעמקי הצפון חזויה העלייה הגדולה ביותר בשיעור של כ-6-7 מ"צ, אחר כך ברצועת החוף, מישור החוף והנגב עם תוספת של כ-5-6 מ"צ, ים המלח והערבה בין 4-5 מ"צ ושדרת ההר (מרכז וצפון) בכ-3-4 מ"צ, בהשוואה לערכים בתקופה 2000-2020. מטבלה 4 עולה כי גם שיאי טמפרטורת המינימום בלילות החמים, צפויים לעלות בכ-3-4 מ"צ סביב אמצע המאה ולהמשיך ולעלות בכ-2 מ"צ נוספות עד לסופה.

טבלה 3. ערכי שיאי טמפרטורת המקסימום ביום באזורים השונים (ימים חמים). בתקופה 2000-2020, הערך מבוסס על נתוני התחנה המייצגת של האזור. בשאר התקופות, הנתון המרכזי הינו הערך החציוני מתוך כלל תוצאות המודלים האקלימיים (בתרחיש החמור, RCP8.5), לתחנה המייצגת ובסוגריים אלו תוצאות המודלים באחוזון 10 ו-90.

אזור	2000-2020	2020-2040	2040-2060	2060-2080	2080-2100
מישור החוף (בית דגן)	43.5	44.2 (43.7, 45.2)	47.4 (46.0, 48.8)	46.7 (45.3, 49.5)	48.6 (47.1, 50.5)
רצועת החוף (תל אביב)	41.5	42.4 (41.0, 42.8)	44.2 (42.2, 46.5)	44.5 (42.2, 46.2)	47.4 (45.4, 49.4)
עמקי הצפון (עפולה)	44.1	47.5 (46.2, 48.9)	49.4 (47.5, 50.4)	49.5 (48.5, 51.7)	51.0 (50.1, 52.2)
הרי המרכז (ירושלים)	42.7	43 (40.8, 44.4)	44 (42.5, 45.8)	45.3 (44.0, 46.4)	46.1 (44.1, 48.0)
נגב (באר שבע)	44.6	45.8 (45.1, 47.5)	48.3 (45.9, 50.6)	48.4 (47.4, 50.3)	50.3 (47.8, 52.2)
ים המלח והערבה (סדום)	49.9	50.5 (48.7, 52.2)	51.1 (50.4, 53.4)	52.9 (51.3, 53.9)	53.9 (51.7, 54.7)

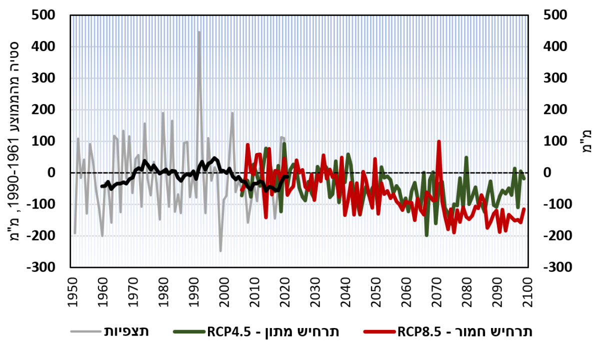
*** רשימה תחנות מורחבת ניתן למצוא בנספח ב'.**

טבלה 4. כמו טבלה 3 רק לערכי שיאי הטמפרטורה המינימלית הגבוהה ביותר בלילה באזורים השונים (לילות חמים).

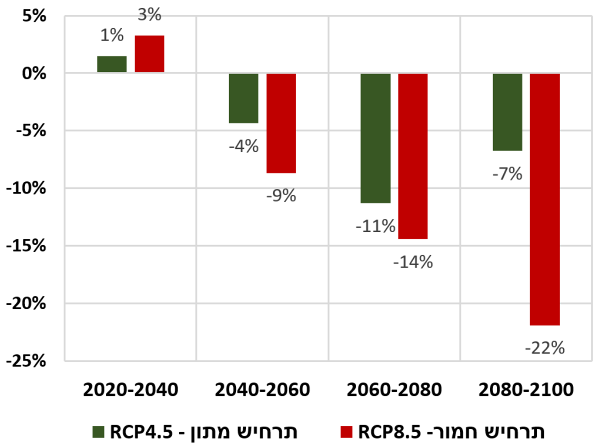
אזור	2000-2020	2020 - 2040	2040 - 2060	2060 - 2080	2080 - 2100
מישור החוף (בית דגן)	28.9	30.2 (29.3, 32.9)	31.3 (28.8, 34.7)	31.8 (30.8, 33.5)	33.3 (32.0, 34.9)
רצועת החוף (תל אביב)	29.2	31.4 (30.0, 33.7)	32.6 (30.3, 35.6)	32.9 (31.9, 34.4)	34.3 (33.3, 35.8)
עמקי הצפון (עפולה)	28.5	30.6 (29.6, 32.1)	31.8 (30.3, 35.7)	33.1 (31.5, 34.6)	33.5 (32.2, 34.6)
הרי המרכז (ירושלים)	31.6	33.1 (31.1, 35.2)	36.1 (32.9, 38.0)	35.3 (33.9, 36.9)	36.5 (34.5, 38.4)
נגב (באר שבע)	27.1	29.9 (27.7, 31.1)	31.5 (29.6, 34.2)	31.7 (30.9, 34.3)	32.8 (31.6, 34.2)
ים המלח והערבה (סדום)	36.5	38.2 (36.2, 41.7)	40.7 (39.0, 42.6)	40.7 (38.9, 41.3)	42.4 (41.1, 44.4)

*** רשימה תחנות מורחבת ניתן למצוא בנספח ב'.**

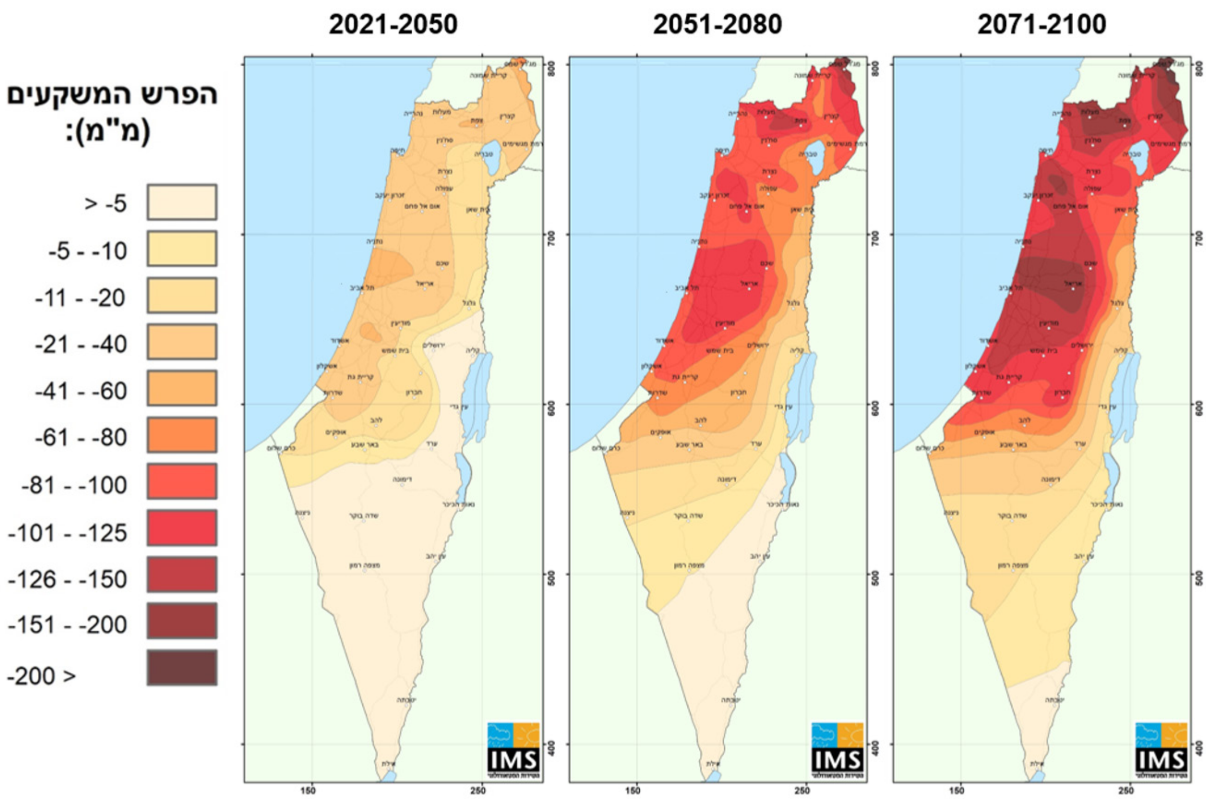
כתוצאה מהמשך ההתחממות הצפויה, יהיו שינויים גם בכמויות ובפיזור המשקעים. על-פי התחזית, כמות המשקעים הממוצעת עד שנת 2040 תהיה די דומה לשני העשורים האחרונים. בהמשך, צפויה הפחתה בכמות המשקעים הארצית הממוצעת עד סוף המאה ביותר מ-20% בהשוואה לתקופה 2000-2020, כפי שניתן לראות באיורים 5 ו-6. בחינת השינוי המרחבי בכמות הגשם הממוצעת, חוזה הפחתה ניכרת בעיקר מאמצע המאה וביתר שאת לקראת סופה, בין 18% ל-23% במרבית התחנות, בתקופה 2071-2100, ביחס לתקופה 1991-2020 (איור 7). בנוסף, קיימת הפחתה במספר ימי הגשם (1 מ"מ/יום ומעלה) בעשורים האחרונים שצפויה להימשך ולהתגבר ככל שמתקרבים לסוף המאה (יוסף וחוב', 2019; חלפון ויוסף, 2021; Yosef et al., 2019). כמו כן, צפוי גידול משמעותי בשכיחות הבצורות ובהיתכנות לבצורות שלא נראו כדוגמתן ב-70 השנה האחרונות (ונגר וחוב', 2021). הערכות דומות לעליית הטמפרטורה ושכיחות גלי החום, בהפחתה בכמות הגשם, בתחזית לבצורות קשות יותר לאזור מזרח הים התיכון, ניתן למצוא גם במחקרים של חוקרים נוספים (Hochman et al., 2018; Hochman et al., 2022; Zittis, et al., 2022).



איור 5. השינוי באנומליית כמות הגשם השנתית הממוצעת בישראל בתקופה 1950-2100 ביחס לממוצע התקופה 1961-1990. השינוי בגשם בתצפיות (באפור) והממוצע הנע של 11-ל שנה (בשחור). כמות הגשם החזויה עד שנת 2100 תחת שני תרחישים אקלימיים, מתון – RCP4.5 (ירוק) וחמור – RCP8.5 (אדום).



איור 6. השינוי באחוזים בכמות הגשם הממוצעת, לארבע תקופות חזויות, ביחס לתקופה 2000-2020. בירוק תרחיש מתון (RCP4.5) ובאדום תרחיש חמור (RCP8.5).



איור 7. אנומליות מרחביות של כמות הגשם השנתית הממוצעת (מ"מ) בשלוש תקופות חזויות, ביחס לתקופה 1991-2020, בתרחיש החמור (RCP8.5).

1.1. מגמות חזויות בעוצמות הגשם

על פי המודלים האקלימיים לצד ההפחתה בכמות המשקעים הכללית ובמספר ימי הגשם, צפויה הקצנה בעוצמות הגשם בעיקרי בפרקי הזמן הקצרים, עד לסוף המאה הנוכחית. הבסיס התיאורטי של הקשר בין טמפרטורת האוויר ללחות, ניתן על ידי משוואת קלאוזיוס-קלפיירון (Clausius-Clapeyron), לפיה על כל עלייה של מעלת צלסיוס אחת, כמות אדי המים באוויר עשויה לעלות בכ-6%-7 (Allen & Ingram, 2002; Pumo et al., 2019). ניסיון להעריך את השינוי העתידי בעוצמות הגשם על סמך שינויים בטמפרטורה מראה כי אכן עלייה בטמפרטורה מובילה לעוצמות גשם גדולות יותר כך גם עלייה בסטיית התקן. כך למשל, גידול של 20% בסטיית התקן מקביל להתחממות של 3 מ"צ מבחינת ההשפעה על עוצמות הגשם (10 דקתי), כמו כן, קיימים הבדלים משמעותיים בין אזורים שונים (Marra et al., 2024).

מרבית המודלים האקלימיים הם בעלי רזולוציה מרחבית גסה ולכן אינם יכולים לדמות תהליכים קונווקטיביים המחוללים עוצמות גשם גבוהות בפרקי זמן קצרים. עם זאת, קיימים מספר מחקרים שבוצעו באמצעות מודלים ברזולוציה מרחבית גבוהה מאוד (2.2-2.8 ק"מ) המאפשרים קיום תהליכים אלו (convection-permitting), באמצעותם ניתן להעריך את השינויים בעוצמות הגשם. בשל הכוח המחשובי הרב הנדרש לכך, מחקרים אלו בוצעו על פני אזורים מצומצמים. כך למשל, ממחקר שנעשה בגרמניה עולה שבתרחיש הקיצוני חזויה עלייה מרבית של 6.5%-8 בזמני החזרה לכל מעלה אחת של התחממות (Hundhausen et al., 2024), כשהשינויים הגדולים ביותר נמצאו במשכים קצרים ובתדירויות הנדירות (Hundhausen et al., 2024; Dallan et al., 2024). ממצאים של מחקר שנערך בבריטניה (Kendon et al., 2023) עולה כי אירועי גשם העולים על 20 מ"מ לשעה, העלולים לגרום להצפות פתאומיות, יהיו תכופים פי 4 עד שנות ה-70 של המאה ה-21 בתרחיש החמור. עוד עולה כי לכל מעלת התחממות אזורית, עוצמת הגשם הקיצוני תגדל ב-5%-15. כמו כן, שיאים אזוריים של גשם שעתי מקומי יתרחשו בשכיחות של 40% יותר מאשר ללא התחממות. מחקרים אלו מציינים את מידת אי הוודאות בתוצאות, את השוני הגדול בין אזורים

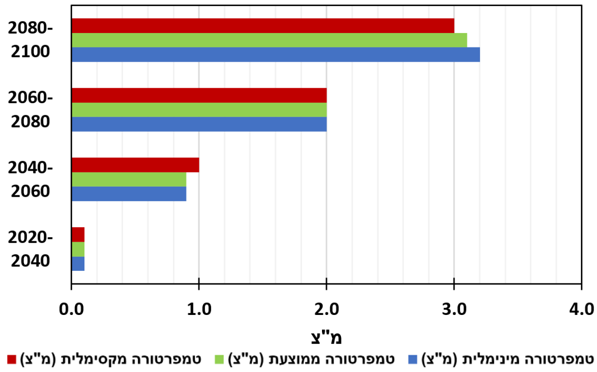
(בפרט ככל שהניתוח נעשה יותר מקומי) ואת השונות הטבעית בה יכולות להיות שנים רצופות (אפילו עשורים) ללא שיאים חדשים לצד רצף של שנים קיצוניות.

ניסיון להעריך את השינוי בעוצמות הגשם בעתיד בישראל, בוצע באמצעות מודל WRF על 41 אירועי גשם היסטוריים בארץ עליהם החילו "מעיין התחממות" הדומה לתרחיש החמור (Armon et al, 2021). בדומה למחקרים הנ"ל, גם כאן תוצאות המחקר מראות עלייה בעוצמות הגשם במשכים הקצרים עם התחזקות של כ-22% למשך של 10 דקות באזורים מצומצמים וירידה בעוצמות במשכים הארוכים, בסוף המאה.

ניתוח עוצמות הגשם בישראל על-בסיס נתוני העבר, כבר מעיד על תופעות דומות (טרם פורסם). בחינת השינוי מראה כי ברוב התחנות (בעלות רקורד היסטורי ארוך) ישנה נטייה לעלייה בעוצמות הגשם, כאשר תופעה זו הולכת ומתעצמת ככל שפרק הזמן קצר יותר וזמן החזרה נדיר יותר, בהשוואה בין שתי תקופות (ראו דוגמה בפרק 2 לאזור מרכז הארץ).

2. מישור החוף

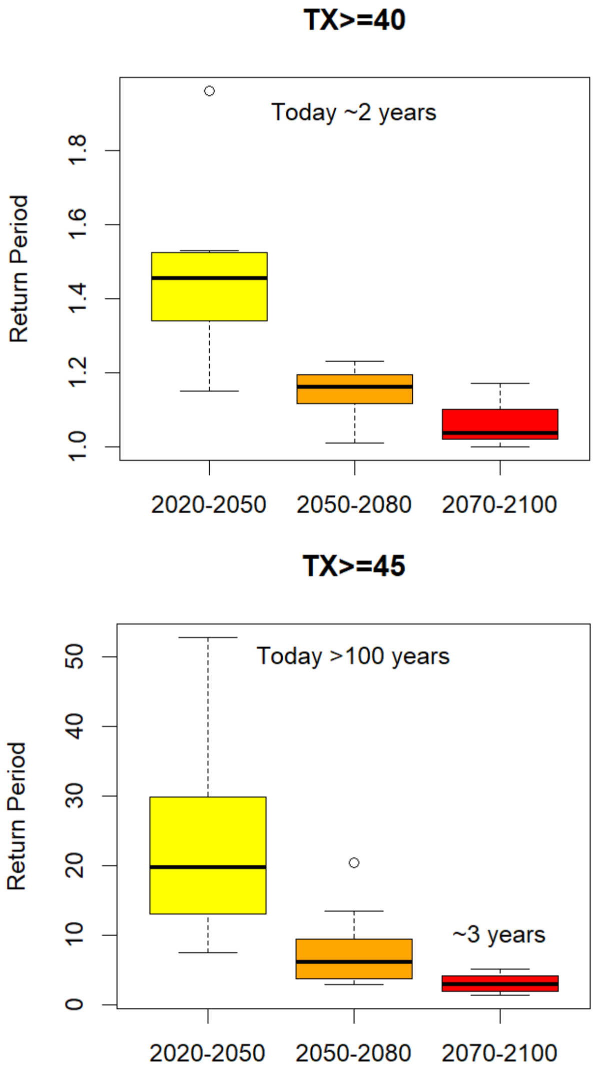
הטמפרטורה באזור זה (מקסימום, מינימום והממוצעת), צפויה לעלות בכ-0.1-0.3 מ"צ בממוצע בשני העשורים הבאים. הטמפרטורה תמשיך לעלות בקצת יותר ממעלה אחת, מדי כל שני עשורים. כך, בסוף המאה הטמפרטורה צפויה להיות גבוהה ביותר מ-3 מ"צ בהשוואה לממוצע הטמפרטורה בשני העשורים האחרונים (איור 8).



איור 8. השינוי בטמפרטורה (מקסימלית, מינימלית, ממוצעת) במישור החוף, בהשוואה לממוצע התקופה 2000-2020, בתרחיש החמור (RCP8.5).

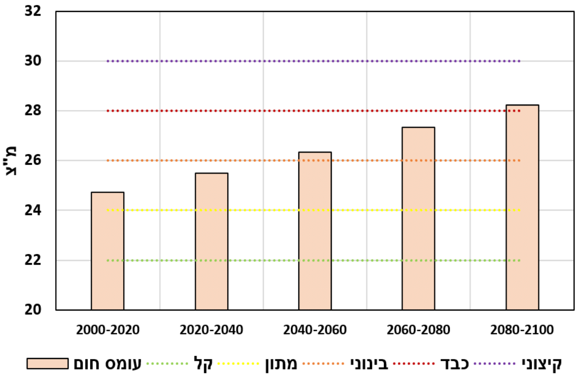
שיעור הגידול הממוצע בטמפרטורה עד לסוף המאה עומד על כמעט 0.5 מ"צ/עשור. מספר הימים החמים מאוד, צפוי להכפיל את עצמו עד אמצע המאה ביחס למספרם כיום העומד על מספר ימים בודדים. בתקופה 2060-2080 מספרם כבר יהיה גדול פי 3 והוא צפוי להמשיך לגדול לכפי 6 לקראת סוף המאה, ביחס לממוצע התקופה האחרונה. מספרם של הלילות החמים יעלה בכ-10%-20 עד לאמצע המאה ובכ-50% ומעלה בסופה, ביחס לממוצע שני העשורים האחרונים העומד על כ-110 לילות. בעוד שההסתברות לקבל ימים של 40 מ"צ ומעלה באזור זה איננה נדירה ומתרחשת כמעט מידי שנה, ההסתברות לקבל ימים של 45 מ"צ ומעלה הינה נמוכה ועומדת על זמן חזרה של יותר מ-100 שנה כיום. זמן החזרה של אירוע זה צפוי להתקצר משמעותית כבר בשלושים השנים הבאות לכ-20 שנה ולהמשיך ולרדת דרמטית עד לכ-3 שנים לקראת סוף המאה (איור 9).

איור 10, מתאר את עומס החום הממוצע בחודשים החמים (יוני-ספטמבר). מאיור זה עולה כי כיום אזור מישור החוף מאופיין בעומס חום מתון (בין 24 ל-26 יא"נ). סביב אמצע המאה ממוצע עומס החום



איור 9. תוצאות 12 המודלים לזמני חזרה (תרחיש חמור (RCP8.5), של טמפרטורות קיצוניות 40 ו-45 מ"צ, בחלוקה ל-3 תקופות, באזור מישור החוף. זמן החזרה לתקופה הנוכחית (1990-2020) מופיע בראש כל פאנל (Today). קו אופקי שחור מציין את הערך החציוני של תוצאות המודלים.

יעלה לבינוני (26 עד 28 יא"נ) ולקראת סוף המאה לעומס חום כבד (28 עד 30 יא"נ). העלייה של הערך הממוצע באה לידי ביטוי גם בגידול במספר השעות בהן שורר עומס חום כבד ומעלה, מכ-6% כיום לפי 2 סביב אמצע המאה. גם במהלך שלוש תת-התקופות הבאות, צפויה בכל אחת מהן תוספת של עוד 10% מהזמן, בהן ישררו עומסי חום אלו. כך, בסוף המאה נעמוד על תוספת משמעותית, בה בכ-45% מהזמן ישרור עומס חום כבד ומעלה. המשמעות הנוספת היא הקטנה דרמטית של אחוז הזמן בו לא שורר עומס חום כלל, ממצב אופייני של כ-15% כיום, לכ-10% סביב אמצע המאה ועד מצב בו רק בכ-2% מהזמן לא ישרור עומס חום



איור 10. השינוי בעומס החום הממוצע בחודשים יוני עד ספטמבר במישור החוף (תרחיש חמור RCP8.5). קווים אופקיים צבעוניים, מציינים את מדרג קטגוריות עומס החום.

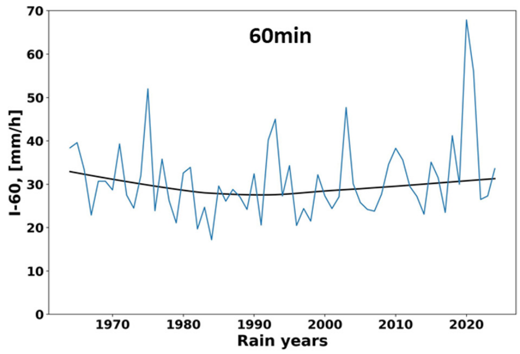
כלל לקראת סופה. זמן החזרה לקבלת עומס חום קיצוני של 33 יא"נ צפוי להתקצר משמעותית, מכ-40 שנה כיום לכ-15 שנה בשלושים השנים הבאות. מגמה זו תימשך ככל שמתקדמים לסוף המאה, עד מצב בו צפוי עומס חום קיצוני המאופיין בזמן חזרה של שנתיים. מגמה דומה נמצאה גם בזמני החזרה של עומס חום קיצוני יותר (35 יא"נ), ממצב בו עומס חום כה קיצוני לאזור זה אינו קיים כיום (זמן חזרה של כ-300 שנה), למצב בו זמן החזרה מתקצר פי 2 (סביב 150 שנה) בתקופה 2020-2050, כשלקראת סוף המאה זמן החזרה ממשיך להתקצר בצורה משמעותית ומוערך בכ-10 שנים.

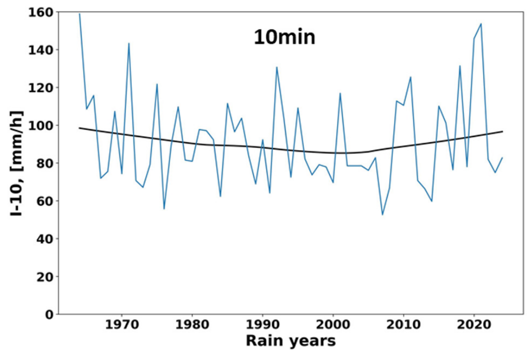
כמות הגשם השנתית ביחס לשני העשורים האחרונים צפויה לרדת בממוצע בכ-10% סביב אמצע המאה ולקראת סופה בכ-25% ביחס למצב כיום. מספר ימי הגשם האופייני לאזור זה הוא כ-40 ימים בשנה, בממוצע בתקופה האחרונה. ערך זה צפוי לרדת בכיומיים עד אמצע המאה ולקראת סופה לעמוד על כ-33 ימים. הפחתה כוללת של כ-20% ביחס לתקופה הנוכחית.

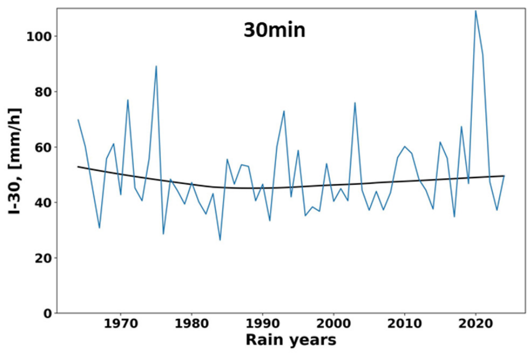
בשונה מההפחתה בכמות הגשם ובמספר ימי הגשם, אנו מזהים עלייה בעוצמת הגשם התת-יומית (sub daily). עוצמות המשקעים שנרשמו בשנים האחרונות באזור תל אביב ובאזורים אחרים לאורך החוף, השפלה והשרון הינן מהגבוהות ביותר: כ-80 מ"מ/שעה באשקלון, 67 מ"מ/שעה בתל אביב, כ-60 מ"מ/שעה בבית דגן ונגבה ו-85 מ"מ במספר שעות בודדות באזור השרון.

ניתוח ארוך טווח של עוצמות הגשם באזור מישור החוף המרכזי[3] מראה כי, בין שנות ה-50 ל-70 של המאה הקודמת היתה החלשות מסוימת, בהמשך מעיין התייצבות ואחר כך עלייה בעוצמות הגשם האופיינית בעיקר בשני העשורים האחרונים (איור 11). התנהגות דומה נמצאה גם בניתוח כמויות של גשם יומי כבד (צפורי וחוב', 2021). מגמות אלו דומות לשינוי הטמפרטורה הנראה בארץ, כפי שהראנו בפרק 1 (איור 2) ובמחקרים נוספים (יוסף וחוב', 2019; אילוטוביץ וחוב', 2024). בחינת המגמות לתקופה 1994-2024 מראה כי העלייה אף נמצאה מובהקת עבור העוצמות במשכים 30, 45 ו-60 דקות. בטבלאות 5-7 ניתן לראות את השינוי בזמני החזרה כאשר בוחנים את התקופה המוקדמת 1964-1993 מול התקופה האחרונה 1994-2024 ובאיור 12 את שיעור השינוי היחסי באחוזים. מטבלאות אלו עולה כי ככלל חלה עלייה בעוצמות הגשם בכל המשכים, בזמני חזרה של 50 ו-100 שנה. בנוסף, עבור משך של 30 דקות חלה עלייה גם בזמן החזרה של 20 שנה ובמשך של 60 דקות נמצאה עלייה גם עבור זמני חזרה של 20 ו-10 שנים. כך למשל, זמן חזרה של 50 שנה, לעוצמת גשם ב-60 דקות, בתקופה הראשונה, עמד על כ-50 מ"מ/שעה, בעוד שבתקופה האחרונה ערך זה מתאים לזמן חזרה של 20 שנה. דוגמה נוספת ניתן לראות בשינוי בעוצמות הגשם האופייניות לזמן חזרה של 100 שנה. בעוד שבתקופה 1964-1993 העוצמה עמדה על כ-54 מ"מ/שעה, בתקופה האחרונה היא עומדת על כ-76 מ"מ/שעה, גידול של כ-40% (טבלה 7 ואיור 12). גם בעוצמות למשך חצי שעה ניתן להבחין בעלייה בין התקופות אשר הולכת ועולה עד לכדי תוספת של כ-30%, ככל שזמן החזרה הופך להיות נדיר יותר. עוד עולה מטבלאות אלו שבחלק מהתוצאות, רווחי הסמך (ברמת ביטחון של 95%), הינם די גדולים ומכאן יוצא כי קיימת אי-וודאות גדולה בהערכות, בעיקר סביב זמני חזרה של 50 ו-100 שנה. עם זאת, בעשורים האחרונים מגמת ההתחממות בולטת מאוד והיא צפויה להימשך בשיעור דומה גם בעשורים הקרובים. על פי רוב המחקרים בנושא והידע הקיים בתחום, סביר להניח כי למגמה זו תהיה המשך השפעה דומה על עוצמות הגשם (ראו סעיף 1.1).

3 ניתוח עוצמות הגשם באזור מרכז הארץ מבוסס על 5 תחנות (תל אביב, בית דגן, קבוצת יבנה, אשדוד ועין החורש). משנת 1964 נלקחה עוצמת הגשם המקסימלית שנמדדה מקרב תחנות אלו. סדרות הזמן שהופקו למשכים השונים, שימשו לחישוב ההסתברויות (וזמני החזרה).







	Slope (mm/h/decade)	Sig.
10 min	3.273	0.284
15 min	3.538	0.202
20 min	3.000	0.215
30 min	**3.818**	**0.064**
45 min	**3.667**	**0.032**
60 min	**2.625**	**0.077**

איור 11. מגמות בעוצמות הגשם בפרקי זמן שונים: 10 ד׳, 30 ד׳ ו-60 ד׳, באזור מישור החוף המרכזי, לתקופה 1994-2024. קו שחור הינו מחליק LOWESS. בטבלה ניתן לראות את שיעור השינוי בעוצמת הגשם מ"מ/שעה לעשור. בעמודה Sig מופיעים ערכי המובהקות. ערכים מודגשים, מציינים p-value<0.1.

טבלה 5. עוצמות הגשם (מ"מ/שעה), למשך של 10 דקות, בתקופות 1964-1993, 1994-2024 ו-1964-2024, להסתברויות 20%, 10%, 5%, 2% ו-1% המקבילים לזמן חזרה של 5, 10, 20, 50 ו-100 שנים בהתאמה. ערכים מודגשים מציינים עלייה בעוצמה בתקופה 1994-2024 מול 1964-1993. בסוגרים מצויין רווח הסמך ברמת ביטחון של 95%.

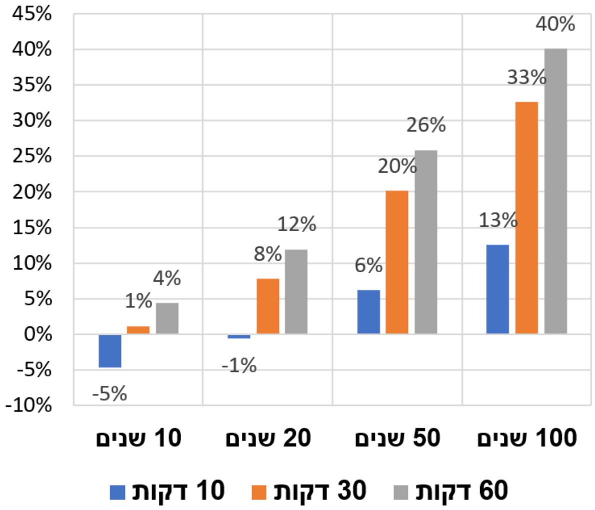
10 min	1964-1993 (מ"מ/שעה)	1994-2024 (מ"מ/שעה)	1964-2024 (מ"מ/שעה)
P-20%	113 (100-127)	105 (92-119)	109 (100-120)
P-10%	128 (110-147)	122 (102-143)	125 (112-140)
P-5%	141 (118-165)	140 (111-175)	141 (122-164)
P-2%	158 (126-198)	167 (120-239)	162 (135-201)
P-1%	170 (132-228)	191 (126-305)	179 (142-232)

טבלה 6. כמו טבלה 5 רק עבור משך של 30 דקות.

30 min	1964-1993 (מ"מ/שעה)	1994-2024 (מ"מ/שעה)	1964-2024 (מ"מ/שעה)
P-20%	61 (53-68)	59 (51-69)	60 (54-67)
P-10%	69 (60-80)	70 (57-87)	70 (61-80)
P-5%	77 (65-93)	83 (64-109)	80 (67-96)
P-2%	88 (70-113)	105 (71-160)	96 (75-124)
P-1%	95 (73-133)	126 (75-219)	108 (80-155)

טבלה 7. כמו טבלה 5 רק עבור משך של 60 דקות.

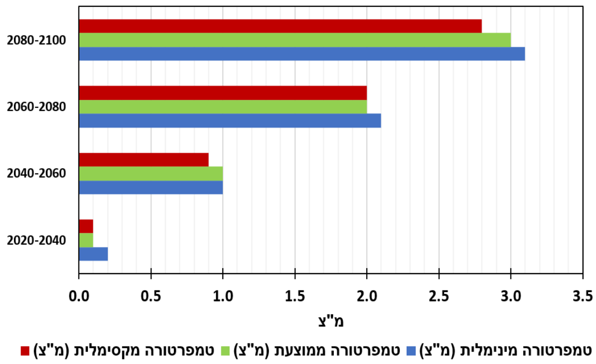
60 min	1964-1993 (מ"מ/שעה)	1994-2024 (מ"מ/שעה)	1964-2024 (מ"מ/שעה)
P-20%	36 (33-40)	36 (32-41)	36 (33-40)
P-10%	41 (36-46)	43 (36-51)	42 (38-48)
P-5%	45 (39-53)	51 (39-67)	48 (42-57)
P-2%	51 (41-63)	64 (43-105)	57 (46-74)
P-1%	54 (42-72)	76 (45-150)	64 (48-89)



איור 12. השינוי באחוזים בעוצמת הגשם באזור מרכז הארץ, בהתאם למשך וזמן החזרה, בין התקופות 1994-2024 ל- 1964-1993.

3. רצועת החוף

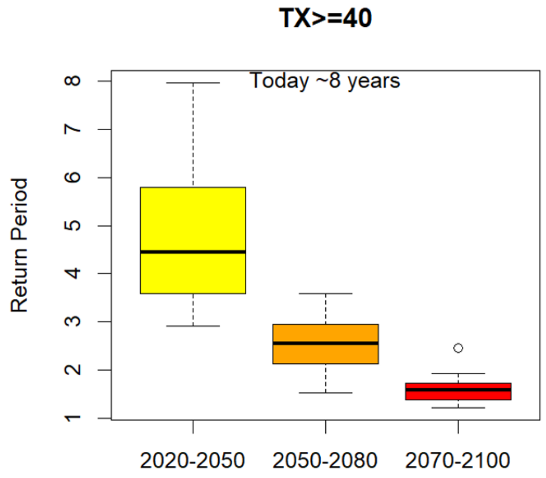
הטמפרטורה באזור זה (מקסימום, מינימום והממוצעת), צפויה לעלות בכ-0.1 מ"צ בממוצע בשני העשורים הבאים. הטמפרטורה תמשיך לעלות בשיעור של כמעלה אחת, מדי כל שני עשורים. כך, בסוף המאה הטמפרטורה צפויה להיות גבוהה בכ-3 מ"צ בהשוואה לממוצע הטמפרטורה בשני העשורים האחרונים (איור 13).



איור 13. השינוי בטמפרטורה (מקסימלית, מינימלית, ממוצעת) ברצועת החוף, בהשוואה לממוצע התקופה 2000-2020, בתרחיש החמור RCP8.5.

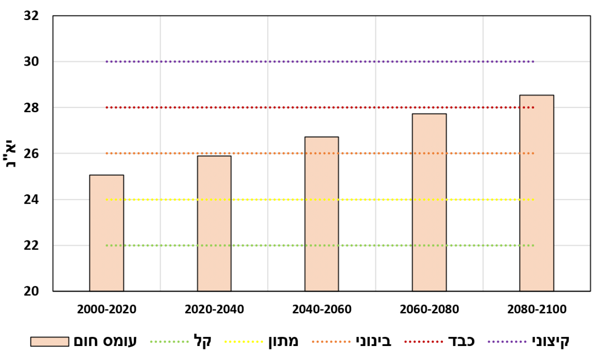
שיעור הגידול הממוצע בטמפרטורה עד לסוף המאה עומד על כ-0.4 מ"צ/עשור. מספר הימים החמים מאוד, צפוי לגדול מכיום אחד בממוצע בתקופה האחרונה לכיום וחצי סביב אמצע המאה. מספרם צפוי להמשיך לגדול לכ-4 ימים בממוצע לקראת סוף המאה, בהשוואה לממוצע התקופה האחרונה. מספרם של הלילות החמים יעלה בכ-10% עד לאמצע המאה ובכ-30% בסוף המאה, ביחס לממוצע שני העשורים האחרונים העומד על כ-155 לילות. זמן החזרה לקבלת אירוע של 40 מ"צ ומעלה באזור זה עומד על כ-8 שנים כיום. זמן זה צפוי להתקצר בכחצי כבר בשני העשורים הקרובים ולהמשיך ולהתקצר עד מצב בו זמן החזרה יעמוד על 1-2 שנים בסוף המאה (איור 14). ההסתברות לקבל ימים של 45 מ"צ ומעלה כיום כמעט ואיננה קיימת. עם זאת, על פי המודלים האקלימיים, היתכנות לאירוע כזה בזמן חזרה של 15-50 שנה עשויה להיות מאמצע מאה וככל שמתקרבים לסופה.

איור 15, מתאר את עומס החום הממוצע בחודשים החמים (יוני-ספטמבר). מאיור זה עולה כי כיום אזור רצועת החוף מאופיין בעומס חום מתון (בין 24 ל-26 יא"נ). סביב אמצע המאה ממוצע עומס החום יעלה

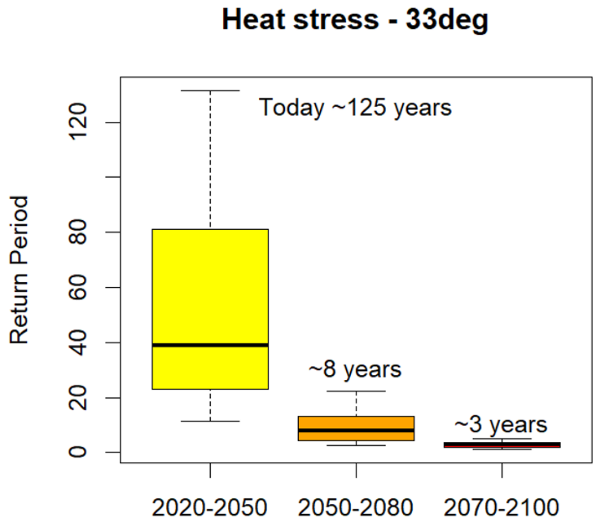


איור 14. תוצאות 12 המודלים (תרחיש חמור RCP8.5), לזמן חזרה של טמפרטורות קיצוניות של 40 מ"צ, בחלוקה ל-3 תקופות, באזור רצועת החוף. זמן החזרה לתקופה הנוכחית (1990-2020) מופיע בראש האיור (Today). קו אופקי שחור מציין את הערך החציוני של תוצאות המודלים.

לבינוני (26 עד 28 יא"נ) ולקראת סופה לעומס חום כבד. העלייה של הערך הממוצע באה לידי ביטוי גם בגידול במספר השעות בהן שורר עומס חום כבד ומעלה, מכ-3% כיום לפי 4 בשני העשורים הקרובים. סביב אמצע המאה כבר צפוי בכרבע מהזמן לשרור עומס חום כבד ובהמשך משך זה צפוי להכפיל את עצמו ולהגיע לכמעט 50% מהזמן ביחס למצב כיום. עלייה דרמטית זו תגיע לכ-65% מהזמן לקראת סוף המאה, בו ישרור עומס חום כבד ומעלה. המשמעות הנוספת של גידול זה היא הקטנה משמעותית של אחוז הזמן בו לא שורר עומס חום כלל, ממצב אופייני של כ-7% כיום, לכ-1% סביב אמצע המאה ועד מצב בו אין אף שעה ללא עומס חום.



איור 15. השינוי בעומס החום הממוצע בחודשים יוני עד ספטמבר ברצועת החוף (תרחיש חמור RCP8.5). קווים אופקיים צבעוניים, מציינים את מדרג קטגוריות עומס החום (יא"נ).

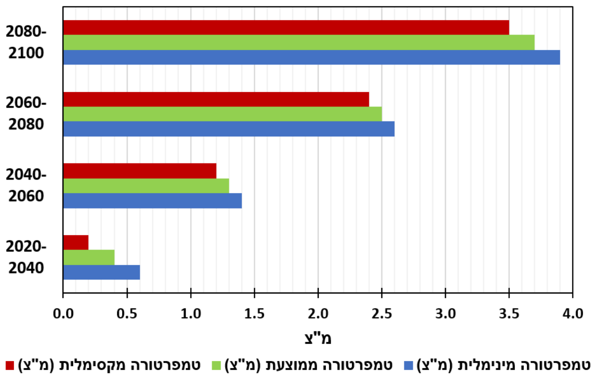


איור 16. תוצאות 12 המודלים (תרחיש חמור RCP8.5), לזמני חזרה של עומס חום קיצוני של 33 יא"נ (יחידות אי נוחות), בחלוקה ל-3 תקופות, באזור רצועת החוף. זמן החזרה בתקופה הנוכחית (1990-2020) מופיע בראש האיור (Today). קו אופקי שחור מציין את הערך החציוני של תוצאות המודלים.

זמן החזרה לקבלת עומס חום קיצוני של 33 יא"נ צפוי להתקצר משמעותית מכ-125 שנה כיום לכ-40 שנה בשלושים השנים הבאות ולהמשיך ולהתקצר ככל שמתקדמים לסוף המאה, עד מצב בו עומס חום קיצוני צפוי להיות עם זמן חזרה של כ-3 שנים (איור 16). מגמה דומה נמצאה גם בזמני החזרה של עומס חום קיצוני יותר (35 יא"נ), ממצב בו עומס חום כה קיצוני לאזור זה כמעט ואינו קיים כיום, למצב בו זמן החזרה מתקצר לכ-70 שנה בתקופה 2050-2080 ולקראת סוף המאה זמן החזרה ממשיך להתקצר בצורה משמעותית ומוערך בכ-20 שנה. כמות הגשם השנתית ביחס לשני העשורים האחרונים צפויה לרדת בכ-10% סביב אמצע המאה ולקראת סופה בכ-30% ביחס למצב כיום. מספר ימי הגשם האופייני לאזור זה, הינו דומה למישור החוף (פרק 2) ועומד על כ-40 ימים בשנה, בממוצע בתקופה האחרונה. ערך זה צפוי לרדת בכיומיים עד אמצע המאה ולקראת סופה לעמוד על כ-33 ימים. הפחתה כוללת של כ-20% ביחס לתקופה הנוכחית.

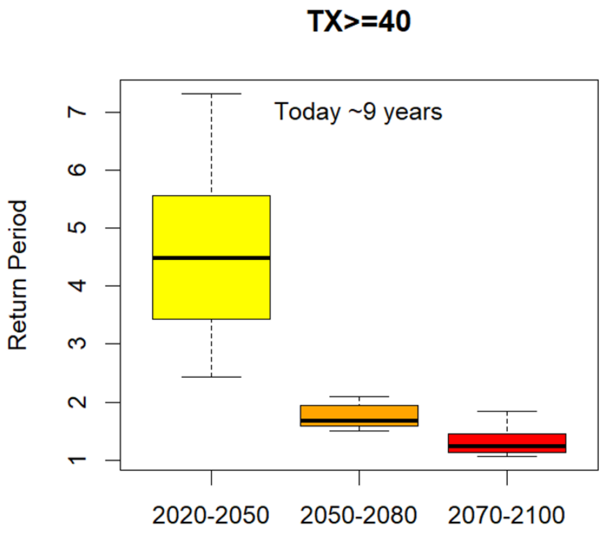
4. הרי המרכז

הטמפרטורה המקסימלית והמינימלית באזור זה, צפויות לעלות בכ-0.2 ו-0.6 מ"צ בממוצע בהתאמה, בשני העשורים הבאים. הטמפרטורה תמשיך לעלות בקצת יותר ממעלה אחת, מדי כל שני עשורים. כך, בסוף המאה הטמפרטורה צפויה להיות גבוהה ביותר מ-3.5 מ"צ בהשוואה לממוצע הטמפרטורה בשני העשורים האחרונים, כאשר טמפרטורת המינימום עולה בשיעור גדול יותר מטמפרטורת המקסימום (איור 17). שיעור הגידול הממוצע בטמפרטורה עד לסוף המאה עומד על כ-0.5 מ"צ/עשור. מספר הימים החמים מאוד, צפוי לשלש את עצמו עד אמצע המאה ביחס למספרם כיום (ממוצע של כיום אחד לממוצע של כשלושה וחצי ימים). בתקופה 2080-2060 מספרם כבר יהיה גדול פי 6 והוא צפוי להמשיך לגדול לכפי 12 לקראת סוף המאה (כ-12 ימים בממוצע), ביחס לממוצע התקופה האחרונה. מספרם של הלילות החמים כיום עומד על כ-60 והוא צפוי לעלות בכ-30% כבר בשני העשורים קרובים. תוספת דומה תהיה מדי כל שני עשורים עד 2080. בסוף המאה שיעור הלילות החמים ביחס למצב כיום צפוי לגדול כמעט פי 3 (כ-160 ימים בממוצע).



איור 17. השינוי בטמפרטורה (מקסימלית, מינימלית, ממוצעת) בהרי המרכז, בהשוואה לממוצע התקופה 2020-2000, בתרחיש החמור RCP8.5.

ההסתברות לקבל ימים חמים מאוד של 40 מ"צ ומעלה באזור עומדת על כ-10 שנים. בעשורים הקרובים זמן החזרה יקטן בחצי והוא ימשיך לרדת עד לסוף המאה ויעמוד על 2-1 שנים (איור 18). ההסתברות לקבל ימים קיצוניים של 45 מ"צ ומעלה הינה נמוכה מאוד ועומדת כיום על זמן חזרה של כ-180 שנה. זמן החזרה של אירוע זה צפוי להתקצר משמעותית כבר בשלושים השנים הבאות לכ-40 שנה ולהמשיך ולרדת דרמטית עד לכ-5 שנים לקראת סוף המאה.

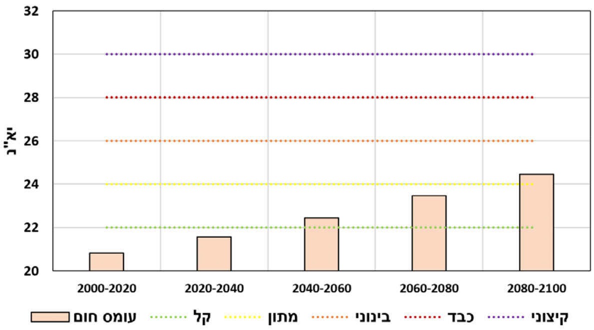


איור 18. תוצאות 12 המודלים (תרחיש חמור RCP8.5), לזמני חזרה של טמפרטורה קיצוניות של 40 מ"צ, בחלוקה ל-3 תקופות, באזור הרי המרכז. זמן החזרה לתקופה הנוכחית (2020-1990) מופיע בראש האיור (Today). קו אופקי שחור מציין את הערך החציוני של תוצאות המודלים.

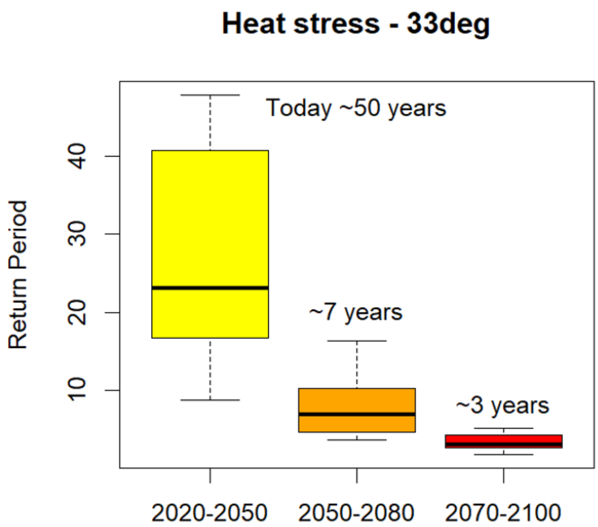
איור 19, מתאר את עומס החום הממוצע בחודשים החמים (יוני-ספטמבר). מאיור זה עולה שכיום בממוצע אזור הרי המרכז אינו נתון לעומס חום (נמצא מתחת לסף של 22 יא"נ). מצב זה צפוי להשתנות סביב אמצע המאה, בו האזור יהיה בממוצע תחת עומס חום קל ולקראת סופה יחצה מדרגת סף נוספת ויהיה מתון. העלייה ההדרגתית של הערך הממוצע באה לידי ביטוי גם בגידול במספר השעות בהן שורר עומס חום כבד ומעלה, מקצת פחות מ-1% כיום לכ-2.5% סביב אמצע המאה. בסוף המאה נעמוד כבר על תוספת משמעותית בה קצת יותר מ-10% מהזמן ישרור עומס חום כבד ומעלה. המשמעות הנוספת של גידול זה היא הקטנה דרמטית של אחוז הזמן בו לא שורר עומס חום כלל, ממצב אופייני של כ-65% כיום, לכ-50% סביב אמצע המאה ועד מצב בו רק בכ-20% מהזמן לא ישרור עומס חום כלל, לקראת סופה. זמן החזרה לקבלת עומס חום קיצוני של 33 יא"נ צפוי להתקצר פי 2 בעשורים הבאים, מכ-50 שנה, לכ-25 שנה בשלושים השנים הבאות. בהמשך זמן החזרה ירד דרמטית ל-7 שנים ולקראת סוף המאה יעמוד על כ-3 שנים (איור 20). מגמה דומה נמצאה גם בזמני החזרה של עומס חום קיצוני (35 יא"נ),

ממצב בו עומס חום כה קיצוני לאזור זה אינו קיים כיום, למצב בו זמן החזרה מתקצר פי 2 (לסביב 150 שנה), כשלקראת סוף המאה זמן החזרה ממשיך להתקצר בצורה משמעותית ומוערך בכ-10 שנים.

כמות הגשם השנתית ביחס לשני העשורים האחרונים צפויה לרדת בכ-10% סביב אמצע המאה ולקראת סופה בכ-25%, ביחס למצב כיום. מספר



איור 19. המגמה בעומס החום הממוצע בחודשים יוני עד ספטמבר בהרי המרכז (תרחיש חמור RCP8.5). קווים אופקיים צבעוניים, מציינים את מדרג קטגוריות עומס החום (יא"נ).

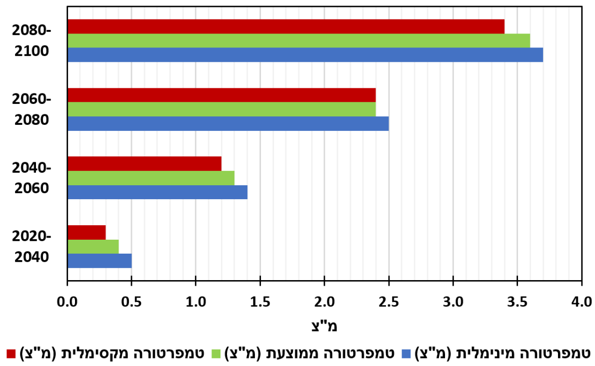


איור 20. תוצאות 12 המודלים (תרחיש חמור RCP8.5), לזמני חזרה של עומס חום קיצוני של 33 יא"נ, בחלוקה ל-3 תקופות, באזור הרי המרכז. זמן החזרה בתקופה הנוכחית (1990-2020) מופיע בראש האיור (Today). קו אופקי שחור מציין את הערך החציוני של תוצאות המודלים.

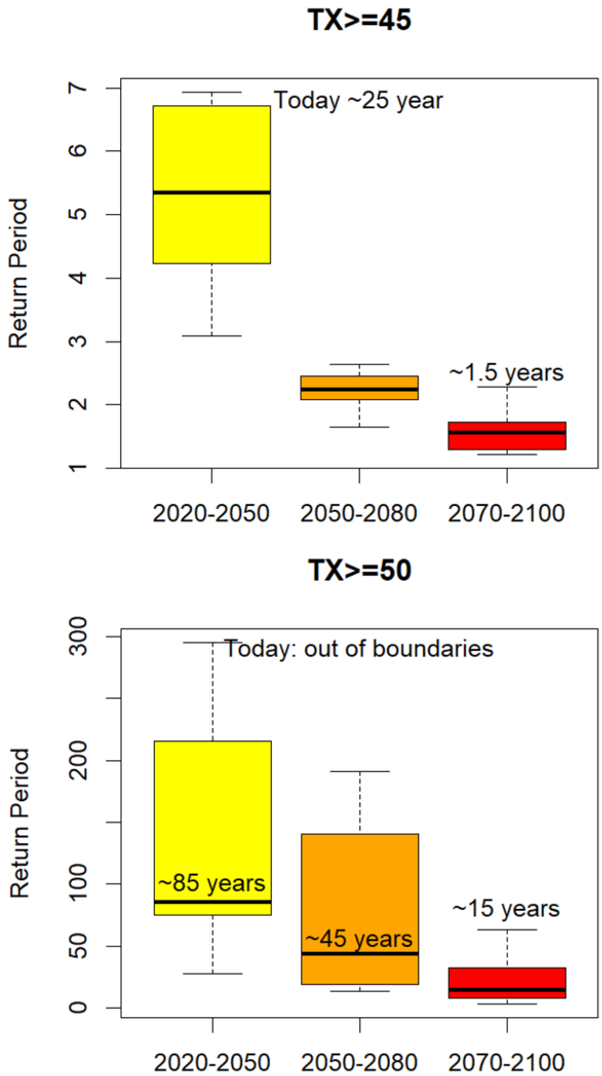
ימי הגשם האופייני לאזור זה הוא כ-40 ימים בשנה, בממוצע בתקופה האחרונה. ערך זה צפוי לרדת בכיומיים עד אמצע המאה ולקראת סופה לעמוד על כ-33 ימים. הפחתה כוללת של כ-20% ביחס לתקופה הנוכחית.

5. עמקי הצפון

הטמפרטורה הממוצעת באזור זה צפויה לעלות בכמעט חצי מעלה בממוצע בשני העשורים הבאים. הטמפרטורה תמשיך לעלות בעוד כמעלה סביב אמצע המאה. בהמשך, מדי כל שני עשורים הטמפרטורה תעלה בשיעור ממוצע של כ-1.2 מ"צ ולקראת סוף המאה תשלים עלייה ממוצעת של יותר מ-3.5 מ"צ בהשוואה לממוצע הטמפרטורה בשני העשורים האחרונים. כמו כן, טמפרטורת המינימום צפויה לעלות בשיעור גדול יותר מטמפרטורת המקסימום (איור 21). שיעור הגידול הממוצע בטמפרטורה עד לסוף המאה עומד על כ-0.5 מ"צ/עשור. ממוצע מספר הימים החמים מאוד, צפוי כמעט להכפיל את עצמו בשני העשורים הקרובים ולשלש את עצמו עד אמצע המאה ביחס למספרם כיום (המאופיין בכ-8 ימים). בתקופה 2060-2080 מספרם כבר יהיה גדול פי 5 והוא צפוי להמשיך לגדול לכפי 8 לקראת סוף המאה, עם מעל ל-60 ימים בממוצע, ביחס לממוצע התקופה האחרונה. מספרם של הלילות החמים יעלה בכ-10% כבר בשני העשורים קרובים ביחס לממוצע כיום (העומד על כ-80 לילות). סביב אמצע המאה שיעור הגידול יעמוד על כ-30% ביחס לתקופה האחרונה ובסוף המאה שיעור הלילות החמים צפוי לגדול בכ-80% (לכ-145 ימים בממוצע) ביחס לממוצע כיום. ההסתברות לקבל ימים חמים מאוד של 40 מ"צ ומעלה הינה די שכיחה ועומדת על כמעט מדי שנה. איור 22, מתאר את זמן החזרה של ימים קיצוניים של 45 מ"צ ו-50 מ"צ. מאיור זה עולה כי זמן החזרה לקבלת ימים קיצוניים של 45 מ"צ ומעלה עומד על כ-25 שנה (חישוב על-בסיס תקופה מעט ארוכה יותר מ-1980). זמן חזרה זה צפוי להתקצר משמעותית כבר בשלושים השנים הבאות בפי 5, לזמן חזרה של כ-5 שנים ולהמשיך ולרדת דרמטית עד ל-1.5 שנים לקראת סוף המאה. שינוי משמעותי ניתן לראות גם בסף קיצוני של 50 מ"צ, ממצב בו ההסתברות לקבלת ערך זה היא קטנה מאוד לזמן חזרה של כ-85 שנה בשלושת העשורים הבאים. זמן זה צפוי לרדת דרמטית לכ-45 שנה בתקופה 2050-2080 ול-15 שנה לקראת סוף המאה.



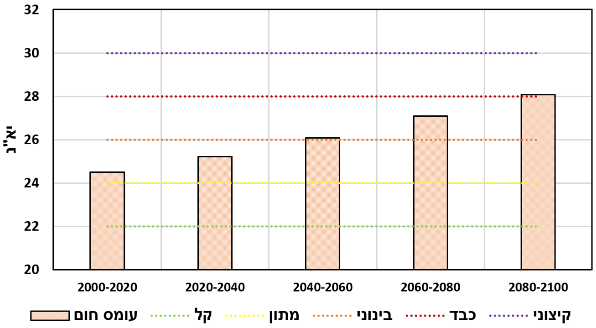
איור 21. השינוי בטמפרטורה (מקסימלית, מינימלית, ממוצעת בעמקי הצפון, בהשוואה לממוצע התקופה 2000-2020, בתרחיש החמור RCP8.5.



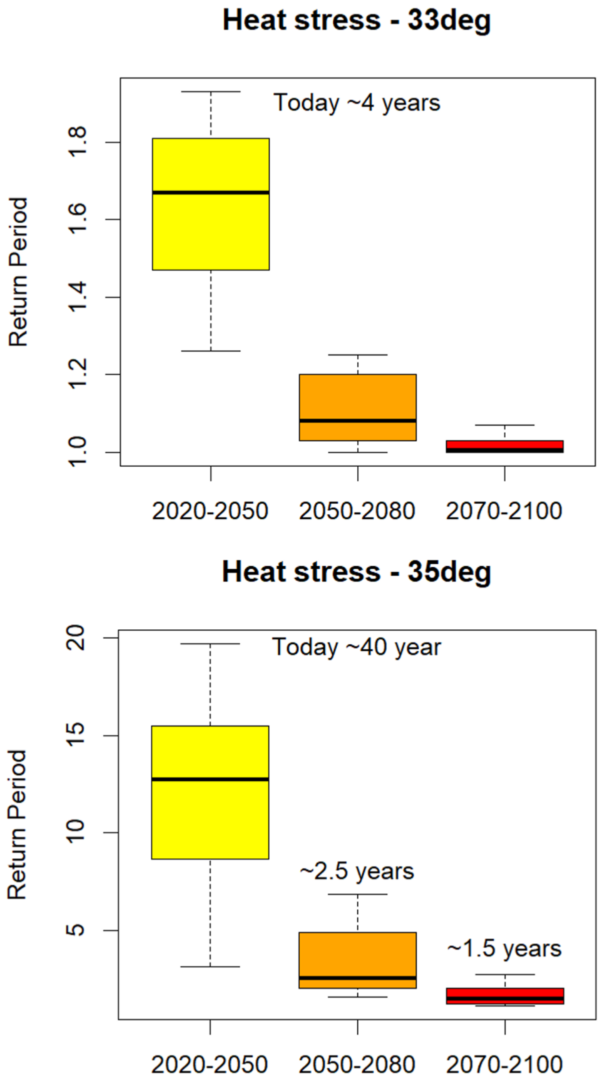
איור 22. תוצאות 12 המודלים (תרחיש חמור RCP8.5), לזמני חזרה של טמפרטורה קיצוניות של 45 ו-50 מ"צ, בחלוקה ל-3 תקופות, באזור עמקי הצפון. זמן חזרה לתקופה הנוכחית (1990-2020) מופיע בראש כל פאנל (Today). קו אופקי שחור מציין את הערך החציוני של תוצאות המודלים.

איור 23, מתאר את עומס החום הממוצע בחודשים החמים (יוני-ספטמבר). מאיור זה עולה שאזור עמקי הצפון נמצא בממוצע כיום בעומס חום מתון (בין 24 ל-26 יא"נ). מצב זה צפוי להשתנות סביב אמצע המאה, בו האזור יגיע בממוצע לעומס חום בינוני ולקראת סופה לעומס חום כבד. העלייה ההדרגתית של הערך הממוצע באה לידי ביטוי גם בגידול משמעותי של פי 2 במספר השעות בהן שורר עומס חום כבד ומעלה, מכ-15% כיום לכ-30% סביב אמצע המאה. בסוף המאה חזויה עלייה משמעותית נוספת, בה מעל 50% מהזמן ישרור עומס חום כבד ומעלה ביחס לתקופה האחרונה. המשמעות הנוספת של גידול זה היא הקטנה דרמטית של אחוז הזמן בו לא שורר עומס חום כלל, ממצב אופייני של כ-22% כיום, לכ-13% סביב אמצע המאה ועד מצב בו רק בכ-3% מהזמן לא ישרור עומס חום כלל, לקראת סופה. ההסתברות לקבל עומס חום קיצוני של 33 יא"נ צפויה לעלות פי 2 בעשורים הבאים. ממצב אופייני בו זמן החזרה כיום עומד על כ-4 שנים, לקצת פחות משנתיים בשלושים השנים הבאות. בהמשך זמן החזרה ירד דרמטית ל-1.5 שנים ולקראת סוף המאה יעמוד על מדי שנה. מגמה דומה נמצאה גם בזמני החזרה של עומס חום קיצוני יותר (35 יא"נ), ממצב בו עומס חום כה קיצוני לאזור עומד על כ-40 שנה, למצב בו זמן החזרה מתקצר לסביב ה-13 שנה. לקראת סוף המאה זמן החזרה ממשיך להתקצר בצורה משמעותית ומוערך בכשנתיים (איור 24).

כמות הגשם השנתית ביחס לשני העשורים האחרונים צפויה לרדת בכ-10% סביב אמצע המאה ולקראת סופה בכמעט 30% ביחס למצב כיום. מספר ימי הגשם האופייני לאזור זה הוא כ-45 ימים בשנה, בממוצע בתקופה האחרונה. ערך זה צפוי לרדת לכ-40 ימים בממוצע עד אמצע המאה ולקראת סופה לעמוד על כ-36 ימים. הפחתה כוללת של כ-25% ביחס לתקופה הנוכחית.



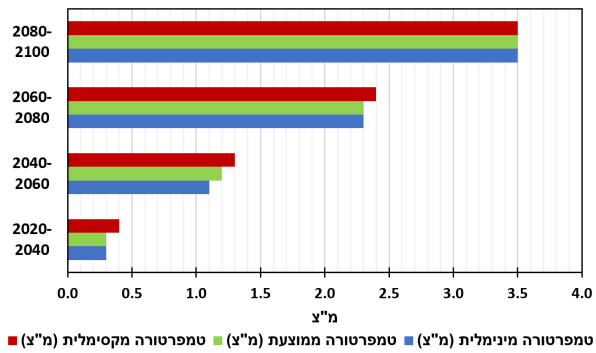
איור 23. המגמה בעומס החום הממוצע בחודשים יוני עד ספטמבר בעמקי הצפון (תרחיש חמור RCP8.5). קווים אופקיים צבעוניים, מציינים את מדרג קטגוריות עומס החום.



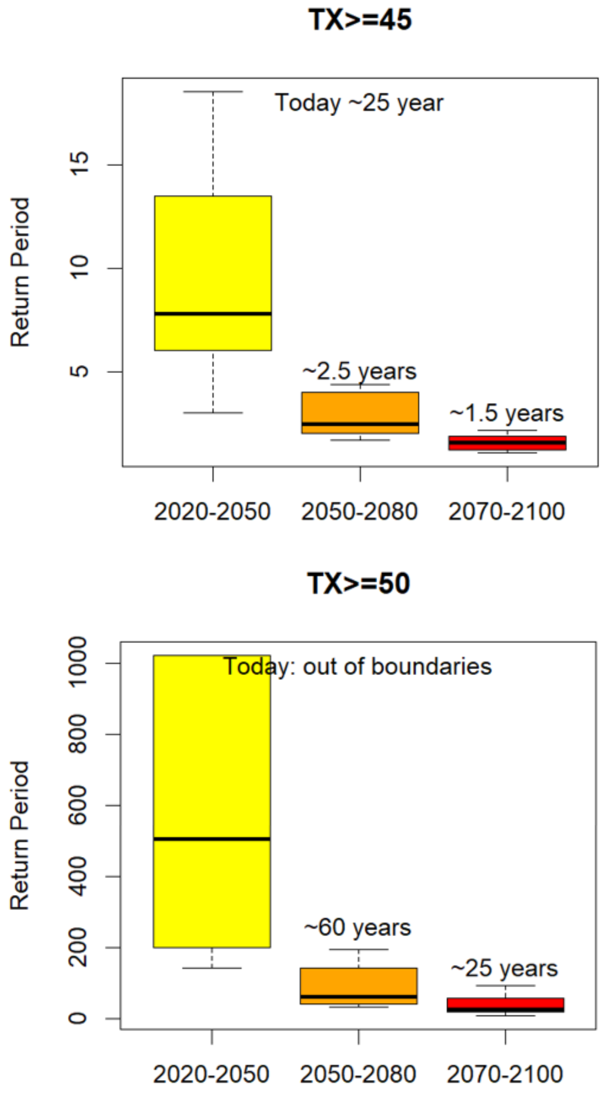
איור 24. תוצאות 12 המודלים (תרחיש חמור RCP8.5), לזמני חזרה של עומס חום קיצוני של 33 ו-35 יא"נ, בחלוקה ל-3 תקופות, באזור עמקי הצפון. זמן החזרה בתקופה הנוכחית (1990-2020) מופיע בראש כל פאנל (Today). קו אופקי שחור מציין את הערך החציוני של תוצאות המודלים.

6. נגב

הטמפרטורה הממוצעת באזור זה צפויה לעלות בכ-0.3 מ"צ בממוצע בשני העשורים הבאים. הטמפרטורה תמשיך לעלות בעוד כמעט מעלה סביב אמצע המאה. בהמשך, מדי כל שני עשורים הטמפרטורה תעלה בשיעור ממוצע של כ-1.2 מ"צ ולקראת סוף המאה תשלים עלייה ממוצעת של כ-3.5 מ"צ בהשוואה לממוצע הטמפרטורה בשני העשורים האחרונים (איור 25). שיעור הגידול הממוצע בטמפרטורה עד לסוף המאה עומד על כ-0.5 מ"צ/עשור. ממוצע מספר הימים החמים מאוד, צפוי לגדול פי 1.5 בשני העשורים הקרובים וכמעט לשלש את עצמו עד אמצע המאה ביחס למספרם כיום (המאופיין בכ-10 ימים). בתקופה 2080-2060 מספרם כבר יהיה גדול כמעט פי 5 והוא צפוי להמשיך לגדול לכפי 7 לקראת סוף המאה, עם מעל 70 ימים בממוצע, ביחס לממוצע התקופה האחרונה. מספרם של הלילות החמים יעלה בכמעט 10% כבר בשני העשורים הקרובים ביחס לממוצע כיום (העומד על כ-80 לילות). סביב אמצע המאה שיעור הגידול יעמוד על כ-35% ביחס לתקופה האחרונה ובסוף המאה צפויה הכפלה במספרם (כ-155 לילות בממוצע) ביחס למצב כיום. הסתברות לקבל ימים חמים מאוד של 40 מ"צ ומעלה הינה די שכיחה ומתרחשת כמעט מדי שנה. לעומת זאת, זמן החזרה לקבלת ימים קיצונים של 45 מ"צ ומעלה עומד על כ-25 שנה והוא צפוי להתקצר משמעותית כבר בשלושים השנים הבאות בכחצי ולהמשיך ולרדת דרמטית עד לזמן חזרה של מדי שנה לקראת סוף המאה. ההסתברות כיום לקבל סף של 50 מ"צ קטנה מאוד, אך החל מאמצע המאה ועד סופה מתחילה היתכנות לקבלה של אירוע כזה המאופיין בזמן חזרה של בין 30 ל-60 שנה (איור 26).



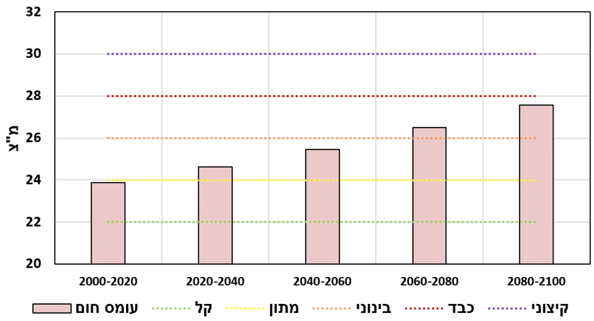
איור 25. השינוי בטמפרטורה (מקסימלית, מינימלית, ממוצעת) באזור הנגב, בהשוואה לממוצע התקופה 2020-2000, בתרחיש החמור RCP8.5.



איור 26. תוצאות 12 המודלים (תרחיש חמור RCP8.5), לזמני חזרה של טמפרטורות קיצוניות של 45 ו-50 מ"צ, בחלוקה ל-3 תקופות, באזור הנגב. זמן חזרה לתקופה הנוכחית (2020-1990) מופיע בראש כל פאנל (Today). קו אופקי שחור מציין את הערך החציוני של תוצאות המודלים.

איור 27, מתאר את עומס החום הממוצע בחודשים החמים (יוני-ספטמבר). מאיור זה עולה שאזור הנגב נמצא כיום בממוצע בגבול העליון של עומס חום קל (23.9 יא"נ). מצב זה צפוי להשתנות סביב אמצע המאה, בו האזור יגיע בממוצע לעומס חום מתון ולקראת סופה לעומס חום בינוני. העלייה ההדרגתית של הערך הממוצע באה לידי ביטוי גם בגידול משמעותי של פי 2 במספר השעות בהן שורר עומס חום כבד ומעלה, מכ-10% מהזמן כיום לכ-20% סביב אמצע המאה. בסוף המאה חזויה עלייה משמעותית נוספת, בה כמעט ב-45% מהזמן ישרור עומס חום כבד ומעלה. המשמעות הנוספת

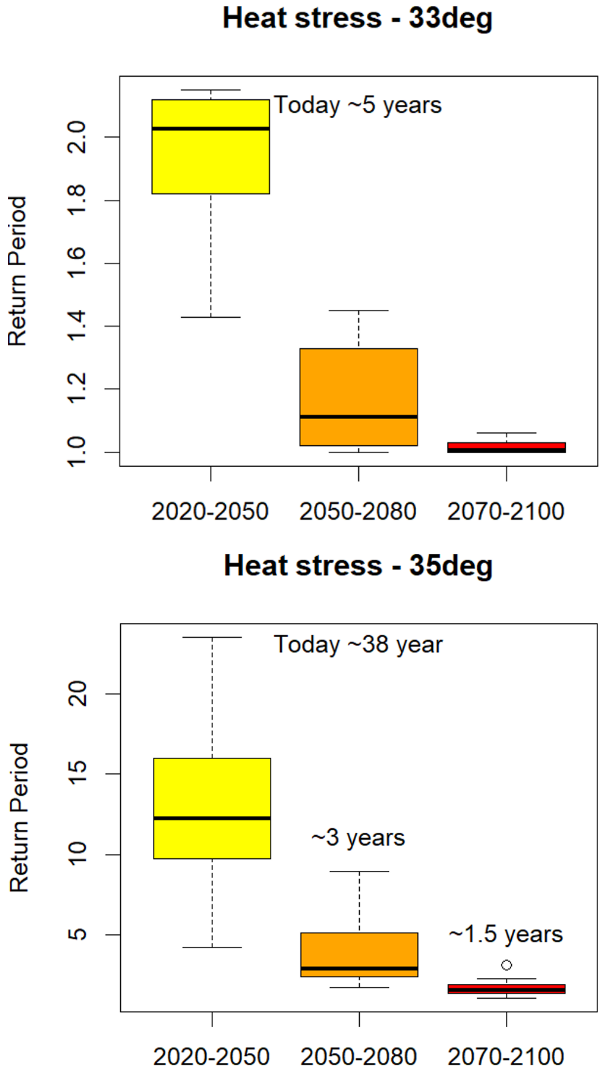
של גידול זה היא הקטנה דרמטית של אחוז הזמן בו לא שורר עומס חום כלל, ממצב אופייני של כ-27% כיום, לכ-13% סביב אמצע המאה ועד מצב בו רק בכ-3% מהזמן לא ישרור עומס חום כלל, לקראת סופה.



איור 27. המגמה בעומס החום הממוצע בחודשים יוני עד ספטמבר בנגב (תרחיש חמור RCP8.5). קווים אופקיים צבעוניים, מציינים את מדרג קטגוריות עומס החום.

ההסתברות לקבל עומס חום קיצוני של 33 ינ"א צפויה לעלות פי 2 בעשורים הבאים. ממצב אופייני בו זמן החזרה כיום עומד על כ-5 שנים, לכשנתיים בשלושים השנים הבאות ובהמשך למדי שנה. מגמה דומה נמצאה גם בזמני החזרה של עומס חום קיצוני יותר (35 יא"נ), ממצב בו עומס חום כה קיצוני לאזור עומד על זמן חזרה של כ-40 שנה, למצב בו זמן החזרה מתקצר לסביב ה-12 שנה, כשלקראת סוף המאה זמן החזרה ממשיך להתקצר בצורה משמעותית ומוערך בקצת פחות משנתיים (איור 28).

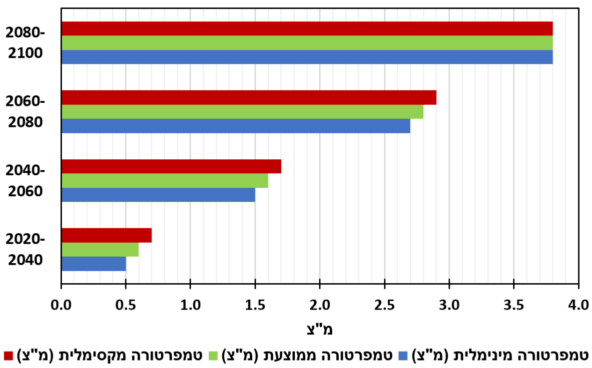
כמות הגשם השנתית ביחס לשני העשורים האחרונים צפויה לרדת בכ-10% סביב אמצע המאה ולקראת סופה בכמעט 30% ביחס למצב כיום. מספר ימי הגשם האופייני לאזור זה הוא כ-25 ימים בשנה, בממוצע בתקופה האחרונה. ערך זה צפוי לרדת בכשלושה ימים עד אמצע המאה ולקראת סופה לעמוד על כ-19 ימים בממוצע. הפחתה כוללת של כ-30% ביחס לתקופה הנוכחית.



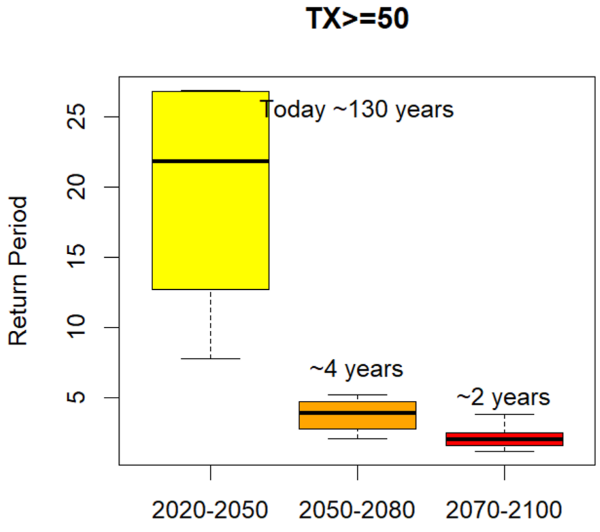
איור 28. תוצאות 12 המודלים (תרחיש חמור RCP8.5), לזמני חזרה של עומס חום קיצוני של 33 ו-35 יא"נ, בחלוקה ל-3 תקופות, באזור הנגב. זמן החזרה בתקופה הנוכחית (1990-2020) מופיע בראש כל פאנל (Today). קו אופקי שחור מציין את הערך החציוני של תוצאות המודלים.

7. ים המלח והערבה

הטמפרטורה הממוצעת באזור זה צפויה לעלות בממוצע בקצת יותר מחצי מעלה בשני העשורים הבאים. הטמפרטורה תמשיך לעלות בעוד כמעלה סביב אמצע המאה ובהמשך ממוצע הטמפרטורה יעלה בשיעור של כ-1 מ"צ, מדי כל שני עשורים. כך, לקראת סוף המאה הטמפרטורה תשלים עלייה ממוצעת של כ-3.8 מ"צ בהשוואה לממוצע הטמפרטורה בשני העשורים האחרונים, כאשר טמפרטורות המקסימום עולה בשיעור גדול יותר מטמפרטורות המינימום עד 2080-2060 (איור 29). שיעור הגידול הממוצע בטמפרטורה עד לסוף המאה עומד על כ-0.5 מ"צ/עשור. מבחינת מספר הימים החמים מאוד, יש לציין כי סף של 38 מ"צ אינו חריג לאזור זה ועומד על כ-100 ימים בממוצע בשני העשורים האחרונים. ערך זה צפוי לגדול בכ-15% בשני העשורים הקרובים ועד אמצע המאה בעוד כ-15% (בסך בכל יעמוד על כ-130 ימים בממוצע). בתקופה 2080-2060 מספרם כבר יהיה גדול בכ-50% והוא צפוי להמשיך ולעלות לכ-60%, לקראת סוף המאה, ביחס למספרם כיום, עם ממוצע של כ-160 ימים. גם הסף שנקבע ללילות חמים (20 מ"צ) אינו חריג לאזור זה ועומד על כ-230 ימים בממוצע כיום. מספרם של הלילות החמים יעלה בכמעט 10% עד אמצע המאה וימשיך לגדול בכ-10% נוספים עד לסופה (נאמד בכ-280 ימים). הסתברות לקבל ימים חמים מאוד של 40 ו-45 מ"צ ומעלה הינה די שכיחה ומתרחשת כמעט מדי שנה. לעומת זאת, זמן החזרה לקבלת ימים קיצונים ביותר של 50 מ"צ ומעלה עומד על כ-130 שנה והוא צפוי להתקצר משמעותית כבר בשלושים השנים הבאות לכ-20 שנה. בתקופה 2080-2050 זמן החזרה צפוי להמשיך ולהתקצר דרמטית ל-4 שנים ובסופה לשנתיים (איור 30).

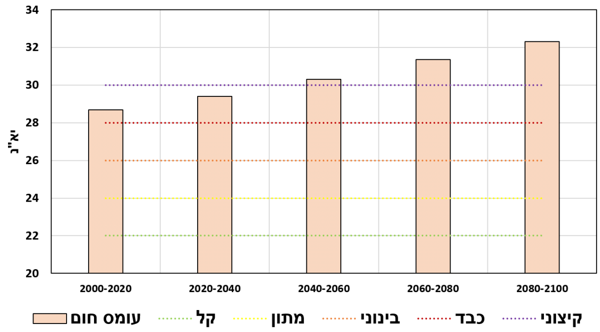


איור 29. השינוי בטמפרטורה (מקסימלית, מינימלית, ממוצעת) באזור ים המלח והערבה, בהשוואה לממוצע התקופה 2020-2000, בתרחיש החמור RCP8.5.

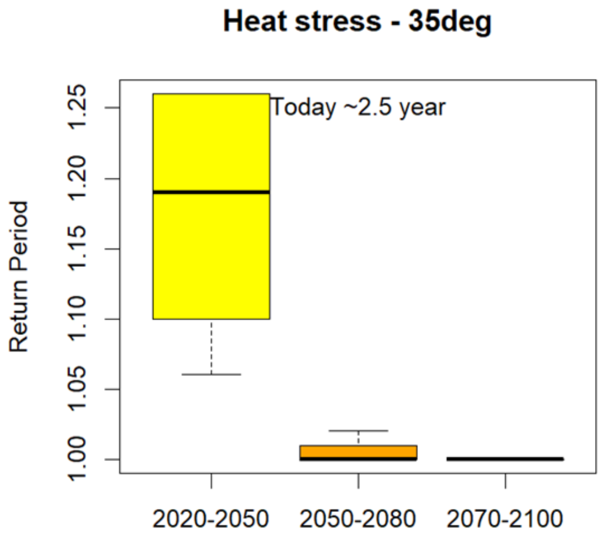


איור 30. תוצאות 12 המודלים (תרחיש חמור RCP8.5), לזמני חזרה של טמפרטורה קיצונית של-50 מ"צ, בחלוקה ל-3 תקופות, באזור ים המלח והערבה. זמן חזרה לתקופה הנוכחית (2020-1990) מופיע בראש האיור (Today). קו אופקי שחור מציין את הערך החציוני של תוצאות המודלים.

איור 31, מתאר את עומס החום הממוצע בחודשים החמים (יוני-ספטמבר). מאיור זה עולה שבממוצע אזור ים המלח והערבה נמצא בממוצע כבר כיום תחת עומס חום כבד (28.7 יא"נ). סביב אמצע המאה, עומס החום ימשיך לעלות ויגיע בממוצע לעומס חום קיצוני ולהמשיך ולעלות בצורה הדרגתית עד לסף ממוצע של 32.3 יא"נ. העלייה ההדרגתית של הערך הממוצע באה לידי ביטוי גם בתוספת משמעותית במשך הזמן בו שורר עומס חום כבד ומעלה, מכ-60% כיום לכ-80% מהזמן סביב אמצע המאה**.** עלייה זו תמשך ובסוף המאה צפוי שביותר מ-95% מהזמן עומס החום יהיה כבד ומעלה. מתחזית זו עולה כי אין ימים בהם לא ישרור עומס חום בחודשים יוני-ספטמבר, בדומה למצב כיום. ההסתברות לקבל עומס חום קיצוני כיום של 33 יא"נ הינה שכיחה (מדי שנה) וכך גם ההסתברות לקבל עומס חום קיצוני יותר של 35 יא"נ העומדת כיום על זמן חזרה של כ-2.5 שנים. זמן חזרה של האחרון צפוי לרדת כבר בשנים הקרובות לכמעט מדי שנה (איור 32).



איור 31. המגמה בעומס החום הממוצע בחודשים יוני עד ספטמבר באזור ים המלח והערבה (תרחיש חמור RCP8.5). קווים אופקיים צבעוניים, מציינים את מדרג קטגוריות עומס החום (יא"נ).



איור 32. תוצאות 12 המודלים (תרחיש חמור RCP8.5), לזמני חזרה של עומס חום קיצוני של 35 יא"נ, בחלוקה ל-3 תקופות, באזור ים המלח והערבה. זמן החזרה בתקופה הנוכחית (2020-1990) מופיע בראש האיור (Today). קו אופקי שחור מציין את הערך החציוני של תוצאות המודלים.

אזור צחיח זה מאופיין בכמות משקעים שנתית קטנה. כמות זו ביחס לשני העשורים האחרונים צפויה לרדת בכ-10% סביב אמצע המאה ולקראת סופה צפויה הפחתה ממוצעת של כמעט 30% בכמות השנתית ביחס למצב כיום. מספר ימי הגשם האופייני לאזור זה הוא כ-8 ימים בשנה בממוצע בתקופה האחרונה. ערך זה צפוי לרדת בכיום אחד עד אמצע המאה ולקראת סופה לעמוד על כ-6 ימים.

ד. סיכום ומסקנות

עבודה זו מציגה ניתוח מגמות נצפות וחזויות של מספר פרמטרים אקלימיים עיקריים בישראל. תחת התרחיש החמור (RCP8.5) התוצאות מציגות מגמה מובהקת וברורה של המשך התחממות מואצת בקצב של כ-0.6-0.5 מ"צ בכל עשור תוך שונות בין אזורית קטנה יחסית, כאשר האזוריים הפנימיים בארץ מתחממים בקצב גבוה יותר מאזורי החוף. לקראת סוף המאה ה-21 הטמפרטורה הממוצעת בישראל צפויה להיות גבוהה בכ-3.5 מ"צ ביחס לממוצע עשרים השנים האחרונות ברוב חלקי הארץ. השינוי בטמפרטורות בישראל יבוא לידי ביטוי לא רק בערכי הממוצעים אלה גם בעלייה ניכרת בתדירות ועוצמת אירועי הקיצון דוגמת ימים ולילות חמים מאוד, גלי חום ועומסי חום.

במישור החוף, בעמקי הצפון ובנגב זמן החזרה לטמפרטורה קיצונית של 45 מ"צ ומעלה יתקצר פי 5 כבר בשני העשורים הקרובים ולקראת סוף המאה יעמוד על בין 1 ל-3 שנים, כלומר כמעט מדי שנה. טמפרטורה של 50 מ"צ ומעלה, כמוה עוד לא נמדדה למעט בעמק בית שאן (יוני 1942), תהייה אפשרית ולקראת סוף המאה צפויה לעמוד על זמן חזרה של 15 ו-25 שנה בעמקי הצפון והנגב בהתאמה. באזור ים המלח והבקעה זמן החזרה לסף זה יתקצר משמעותית ויהיה מדי שנתיים בסוף המאה. במהלך העשורים הבאים וביתר שאת לקראת סוף המאה, צפויים להישבר גם ערכי השיא (ערכים אבסולוטיים) בטמפרטורה, עם עלייה של כ-7-6 מ"צ בטמפרטורת המקסימום וכ-6-5 מ"צ בטמפרטורת המינימום (מאפיין של לילות חמים מאוד), בהשוואה לשיאים שנמדדו בשני העשורים האחרונים. כך למשל שיאי טמפרטורת המקסימום והמינימום הגבוה ביותר (לילות חמים), בתחנת עפולה שבעמקי הצפון, בהם נמדדה טמפרטורת שיא של 44.1 מ"צ ו-28.5 מ"צ בהתאמה, בתקופה 2020-2000. ערכים אלו צפויים להגיע ל-51 מ"צ ו-33.5 בהתאמה, בתקופה 2100-2080.

עומסי החום גם צפויים להמשיך ולעלות בכל חלקי הארץ. לקראת סוף המאה נחווה בכל האזורים בארץ קפיצה משמעותית של 2 קטגוריות במדרג עומס החום בהשוואה לממוצע עשרים השנים האחרונות. באזור ים המלח והערבה כבר כיום שורר בממוצע עומס חום כבד, כאשר באמצע המאה עומס החום הממוצע יהיה קיצוני והוא ימשיך להקצין עד לסוף המאה. מספר השעות בהן שורר עומס חום כבד יעלה בצורה דרמטית לצד הפחתה משמעותית באחוז הזמן בו לא שורר עומס חום כלל, בכל חלקי הארץ. זמני החזרה לעומס חום קיצוני של 33 יא"נ בארץ, יתקצרו פי 3 בעשורים הקרובים כשלקראת סוף המאה זמן החזרה האופייני של סף זה, יעמוד על 3-1 שנים. מגמה דומה ראינו גם עבור סף קיצוני יותר של עומס חום (35 יא"נ) באזורים החמים (עמקי הצפון, נגב וים המלח והערבה). יש לציין, כי במישור החוף והרי המרכז אשר לא חוו עד כה עומס חום קיצוני מעין זה, לקראת סוף המאה אירוע כזה כבר אפשרי והוא צפוי להיות מאופיין בתקופת חזרה של כ-10 שנים.

שינויי האקלים בישראל לא יבואו לידי ביטוי רק בטמפרטורה. שכן, לצד מגמת ההתחממות צפויה הפחתה כללית בכמויות המשקעים בישראל שעד סוף המאה תסתכם בשיעור ממוצע של כ-20% ביחס לממוצע הגשם הכללי בעשרים השנים האחרונות. להפחתה החזויה קיימת שונות מרחבית גדולה: פחיתה גדולה יותר בכמות הגשם הממוצעת (במ"מ) בצפון מזרח הארץ וההרים ופחות בדרום ובמישור החוף. כמו כן, תהיה הפחתה של 20%-30 במספר ימי הגשם. לצד זאת, כבר עתה ניצפת באזור מישור החוף מגמת עלייה דרמטית בעוצמות הגשם, בעיקר בפרקי הגשם הקצרים של 30 ו-60 דקות ב-30 השנים האחרונות. מגמה זו הביאה לתוספת של 20% ו-33% למשך של 30 ד' ולכ-26% ו-40% בעוצמת הגשם למשך של 60 ד' בזמני החזרה הנדירים יותר של 50 ו-100 שנה בהתאמה, ביחס לתקופה מוקדמת יותר 1993-1964. על פי המודלים האקלימים מגמה זו צפויה להימשך ככל שטמפרטורת כדור הארץ תמשיך לעלות כפי שתואר בעבודה זו.

הממצאים המופיעים בדו"ח זה מהווים אינדיקציה ברורה למגמות האקלימיות שכבר משפיעות על ישראל ומתארות את המגמות הצפויות בעשורים הקרובים. למגמות אשר הוצגו בעבודה זו השלכות ניכרות על כל תחומי החיים בישראל: בריאות, מים, תשתיות, ניקוז, חירום, חקלאות, אנרגיה, סביבה ועוד המחייבות הערכות מקדימה. האקלים בעשורים הקרובים בישראל צפוי להראות

אחרת מזה שאנחנו מכירים כיום. הבנת השינויים שמתחוללים ואלו החזויים, יאפשרו למקבלי החלטות במגזרי המשק השונים לתכנן ולהיערך בצורה טובה יותר לשינויים האקלימיים כל אחד בתחומו.

מקורות

אילוטוביץ, א', חלפון, נ', יוסף, י' (2024). שינויי הטמפרטורה בישראל בראי שלושה אטלסים אקלימיים. דו"ח מחקר מס' -4000-0804-2024 0000002, השירות המטאורולוגי.

ונגר, ד', חלפון, נ', יוסף, י' (2021). מגמות היסטורית ומגמות חזויות בדפוסי המשקעים בישראל עד סוף המאה הנוכחית. דו"ח מסכם – רשות המים, 4000-0804-2021-0000112, השירות המטאורולוגי הישראלי.

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', בהר"ד, ע', אוזן, ל', פורשפן, א', לוי, י' (2020). מגמות השינוי בטמפרטורה בישראל, תחזיות עד 2100. דו"ח מחקר מס' -4000-0802-2020 0000044, השירות המטאורולוגי הישראלי.

ציפורי, א', יוסף, י', חלפון, נ' (2022). מגמות בגשם כבד בישראל בתקופה 1951-2021. דו"ח מחקר מס' 4000-0804-2022-0000004, השירות המטאורולוגי.

Allen, M. R. and Ingram, W. J. (2002). Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. Nature, 419(6903), 228–232. https://doi.org/10.1038/nature01092.

Armon, M., Marra, F., Enzel, Y., Rostkier-Edelstein, D., Garfinkel, C. I., Adam, O., Dayan, U. and Morin, E. (2022). Reduced rainfall in future heavy precipitation events related to contracted rain area despite increased rain rate. Earth's Future, 10(1), e2021EF002397.

Cannon, A. J., Sobie, S. R. and Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes?. Journal of Climate, 28(17), 6938-6959.

Dallan, E., Borga, M., Fosser, G., Canale, A., Roghani, B., Marani, M. and Marra, F. (2024). A method to assess and explain changes in sub-daily precipitation return levels from convection-permitting simulations. Water Resources Research, 60(5), e2023WR035969. https://doi.org/10.1029/2023WR035969.

Hochman, A., Marra, F., Messori, G., Pinto, J. G., Raveh-Rubin, S., Yosef, Y. and Zittis, G. (2022). Extreme weather and societal impacts in the eastern Mediterranean. Earth System Dynamics, 13(2), 749-777.

Hochman, A., Mercogliano, P., Alpert, P., Saaroni, H. and Bucchignani, E. (2018). High-resolution projection of climate change and extremity over Israel using COSMO-CLM. International Journal of Climatology, 38(14), 5095-5106.

Hundhausen, M., Feldmann, H., Kohlhepp, R. and Pinto, J. G. (2024). Climate change signals of extreme precipitation return levels for Germany in a transient convection-permitting simulation ensemble.

International Journal of Climatology, 4:1454–1471.

Kendon, E. J., Fischer, E. M. and Short, C. J. (2023). Variability conceals emerging trend in 100yr projections of UK local hourly rainfall extremes. Nature Communications, 14(1), 1133.

Marra, F., Koukoula, M., Canale, A. and Peleg, N. (2024). Predicting extreme sub-hourly precipitation intensification based on temperature shifts. Hydrology and Earth System Sciences, 28, 375–389, https://doi.org/10.5194/hess-28-375-2024

Pumo, D., Carlino, G., Blenkinsop, S., Arnone, E., Fowler, H. and Noto, L. V. (2019). Sensitivity of extreme rainfall to temperature in semi-arid Mediterranean regions. Atmospheric Research, 225, 30-44.

Thom, E. C. (1959). The discomfort index. Weatherwise, 12(2), 57-61.

Yosef, Y., Aguilar, E. and 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., and Alpert, P. (2019). Changes in extreme temperature and precipitation indices: using an innovative daily homogenized database in Israel. International Journal of Climatology, 39(13), 5022-5045. https://doi.org/10.1002/joc.6125.

Zittis, G., Almazroui, M., Alpert, P., Ciais, P., Cramer, W., Dahdal, Y., et al. (2022). Climate change and weather extremes in the Eastern Mediterranean and Middle East. Reviews of Geophysics, 60, e2021RG000762. https://doi.org/10.1029/2021RG000762.

נספח א' – מודלים אקלימיים

טבלה 8 מפרטת את שמות המודלים האקלימים בהם עשינו שימוש עבור הטמפרטורה והגשם וכן את שמות מכוני המחקר אשר הריצו מודלים אלו.

מודל מקומי (RCM)	מודל גלובלי (GCM)	גוף אחראי
CCLM4-8-17	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CLMcom
CCLM4-8-17	MOHC-HadGEM2-ES	CLMcom
CCLM4-8-17	MPI-M-MPI-ESM-LR	CLMcom
HIRHAM5	NCC-NorESM1-M	DMI
RACMO22T	ICHEC-EC-EARTH	KNMI
REMO2009	MPI-M-MPI-ESM-LR	MPI-CSC
RCA4	CCCma-CanESM2	SMHI
RCA4	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	SMHI
RCA4	CSIRO-QCCCE-CSIRO-Mk3-6-0	SMHI
RCA4	IPSL-IPSL-CM5A-MR	SMHI
RCA4	MIROC-MIROC5	SMHI
RCA4	MOHC-HadGEM2-ES	SMHI
RCA4	MPI-M-MPI-ESM-LR	SMHI
RCA4	NCC-NorESM1-M	SMHI
RCA4	NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M	SMHI

שם המוסד (גוף אחראי) שהריץ את המודל:

CLMcom – Climate Limited-area Modelling Community (CLM-Community).

DMI – Danish Meteorological Institute.

KNMI – Royal Netherlands Meteorological Institute, De Bilt, The Netherlands.

MPI-CSC – Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Climate Service Center, Max Planck Institute for Meteorology.

SMHI – Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Rossby Centre.

נספח ב' – שיאי הטמפרטורה

טבלאות 9 ו-10 מציגות הרחבה לאזורים נוספים מעבר לטבלאות 3 ו-4 המופיעות בדו"ח. בדומה לאחרונות, גם כאן לכל תחנה מצויין הערך המקסימלי אשר נמדד בשני העשורים האחרונים ואחר כך הערך החזוי על פי המודלים האקלימיים, בתרחיש החמור RCP8.5. הערך המדווח הינו הערך החציוני של תוצאות המודלים השונים ובסוגרים מופיעות התוצאות לאחוזונים 10 ו-90. טבלה 9 הינה עבור שיאי טמפרטורת המקסימום (ימים חמים) וטבלה 10 הינה עבור שיאי הטמפרטורה המינימלית הגבוהה ביותר (לילות חמים).

טבלה 9. כמו טבלה 3, שיאי טמפרטורת המקסימום (ימים חמים) בתחנות נוספות.

Station	2000-2020	2020-2040	2040-2060	2060-2080	2080-2100
Afula	44.1	47.5 (46.2, 48.9)	49.4 (47.5, 50.4)	49.5 (48.5, 51.7)	51.0 (50.1, 52.2)
Beer Sheva	44.6	45.8 (45.1, 47.5)	48.3 (45.9, 50.6)	48.4 (47.4, 50.3)	50.3 (47.8, 52.2)
Beit Jimal	43.1	45 (44.6, 47.8)	47.2 (45.1, 48.3)	47.8 (46.7, 49.7)	49.9 (47.1, 51.6)
Besor Farm	44.7	45.2 (44.7, 45.9)	46.6 (45.7, 48.4)	48 (46.2, 49.1)	48.9 (47.3, 51.2)
Bet Dagan	43.5	44.2 (43.7, 45.2)	47.4 (46.0, 48.8)	46.7 (45.3, 49.5)	48.6 (47.1, 50.5)
Bet Zayda	47	49.9 (46.9,51.8)	51.5 (49.8, 53.6)	52.5 (51.3, 54.7)	53.4 (51.5, 54.7)
Dafna	46.9	48.3 (45.0, 48.9)	49.2 (47.6, 51.2)	50.3 (49.0, 51.7)	51.3 (50.4, 52.8)
Dorot	45	46.2 (45.4, 46.9)	47.2 (46.2, 49)	48.6 (46.9, 50.9)	49.3 (47.9, 51.8)
Elat	48.9	49.5 (48.8, 51.2)	51 (49.7, 51.9)	52.7 (51.9, 53.3)	53.6 (52.5, 55.3)
En Hahoresh	42.6	44.4 (43.2, 46.3)	46 (45.0, 47.9)	46.3 (45.1, 49.3)	48.1 (46.4, 49.0)
Galed	43.5	45.5 (44.3, 46.8)	46.3 (45.1, 49.7)	47.3 (46.6, 49.9)	49.3 (46.5, 50.0)
Jerusalem	42.7	43 (40.8, 44.4)	44 (42.5, 45.8)	45.3 (44.0, 46.4)	46.1 (44.1, 48.0)
Kefar Blum	47	48.3 (45.9, 49.8)	49.9 (48.2, 51.8)	50.5 (49.7, 53.1)	51.5 (49.6, 53.7)
Kefar Yehoshua	44.4	47.2 (45.8, 48.5)	48.1 (46.4, 50.6)	49.0 (48.0, 52.3)	50.6 (49.1, 51.1)
Lahav	43	44.1 (43.8, 46.3)	46.7 (44.4, 47.9)	46.7 (45.6, 48.2)	48.4 (46.2, 50.2)
Negba	45.3	45.2 (44.0, 46.2)	46.2 (45.3, 48.4)	47.3 (46, 49.4)	49.3 (47.4, 51.8)
Qevuzat Yavne	43.8	44.8 (43.7, 45.4)	46.0 (44.7, 48.0)	47.0 (46.1, 48.5)	48.7 (47.0, 51.4)
Sede Boqer	43.2	44.8 (43.0, 46.4)	46.0 (44.6, 47.7)	46.2 (45.7, 47.7)	47.9 (46.3, 49.6)
Sede Eliyyahu	47.5	50.8 (49.0, 51.9)	51.3 (50.1, 53.8)	53.2 (51.6, 55.4)	54.1 (51.4, 55.6)
Sedom	49.9	50.5 (48.7, 52.2)	51.1 (50.4, 53.4)	52.9 (51.3, 53.9)	53.9 (51.7, 54.7)

Station	2000-2020	2020-2040	2040-2060	2060-2080	2080-2100
Tavor	44.9	47.6 (46.2, 48.7)	48.6 (47.7, 50.8)	49.7 (48.3, 51.7)	52.6 (50.9, 53.5)
Tel Aviv	41.5	42.4 (41.0, 42.8)	44.2 (42.2, 46.5)	44.5 (42.2, 46.2)	47.4 (45.4, 49.4)
Yotvata	47.7	49.1 (47.7, 51.1)	50.4 (49.2, 51.5)	52 (50.2, 52.4)	53.5 (51.3, 54.1)
Zefat	40.6	42.3 (39.8, 43.1)	43.1 (41.5, 44.9)	44.5 (42.7, 46.2)	45.1 (43.6, 46.3)
Zemah	46	49.7 (47.8, 51.3)	50.1 (48.6, 51.8)	52.1 (50.6, 54.2)	52.7 (50.4, 54.9)

טבלה 10. כמו טבלה 4, שיאי טמפרטורת המינימום הגבוהה ביותר (לילות חמים) בתחנות נוספות.

Station	2000-2020	2020-2040	2040-2060	2060-2080
Afula	28.5	30.6 (29.6, 32.1)	31.8 (30.3, 35.7)	33.1 (31.5, 34.6)
Beer Sheva	27.1	29.9 (27.7, 31.1)	31.5 (29.6, 34.2)	31.7 (30.9, 34.3)
Beit Jimal	31	32.7 (31.3, 34.4)	34.7 (33.7, 37.7)	34.9 (34.2, 38.4)
Besor Farm	27.8	29 (28.1, 31.8)	31.9 (29.0, 34.0)	30.9 (29.4, 32.9)
Bet Dagan	28.9	30.2 (29.3, 32.9)	31.3 (28.8, 34.7)	31.8 (30.8, 33.5)
Bet Zayda	32.2	33 (30.1, 35.7)	33.5 (31.6, 35.5)	35.3 (33.9, 38.3)
Dafna	30.7	34.2 (31.4, 36.1)	34.1 (32.9, 37.9)	36.7 (33.9, 39.2)
Dorot	27.4	29.2 (27.7, 30.9)	30.1 (28.7, 33.7)	31.2 (30.1, 32.8)
Elat	34.4	35.2 (34.0, 36.5)	36.1 (35.1, 39.0)	37.5 (36.7, 39.2)
En Hahoresh	28.5	29.2 (28.6, 31.1)	30.7 (28.3, 33.8)	31.3 (30.2, 32.4)
Galed	30.2	30.7 (28.8, 32.1)	32.9 (30.3, 35.8)	32.3 (31.0, 37.4)
Jerusalem	31.6	33.1 (31.1, 35.2)	36.1 (32.9, 38.0)	35.3 (33.9, 36.9)
Kefar Blum	30.8	31.9 (29.6, 33.4)	32.2 (30.4, 34.4)	34.7 (32.0, 36.8)
Kefar Yehoshua	28.4	30.7 (29.5, 33.0)	31.6 (30.0, 36.0)	33.1 (31.5, 34.8)
Lahav	30.1	31.7 (30.8, 33.5)	33.2 (31.5, 34.3)	34.2 (31.3, 36.6)
Negba	28	29.8 (28.1, 30.9)	29.9 (29.1, 34.3)	31.2 (30.4, 32.0)
Qevuzat Yavne	28.6	29.3 (28.2, 31.1)	30.5 (29.3, 34.1)	31.3 (30.0, 32.5)
Sede Boqer	26	27.4 (26.4, 29.7)	29.8 (28.6, 31.7)	29.9 (27.9, 31.4)
Sede Eliyyahu	31	32.4 (30.2, 34.1)	33.3 (31.5, 36.6)	35.3 (32.6, 38.4)
Sedom	36.5	38.2 (36.2, 41.7)	40.7 (39.0, 42.6)	40.7 (38.9, 41.3)
Tavor	29.1	30.8 (30.3, 32.6)	32.2 (30.6, 36.3)	33.5 (31.6, 36.2)
Tel Aviv	29.2	31.4 (30.0, 33.7)	32.6 (30.3, 35.6)	32.9 (31.9, 34.4)
Yotvata	32.8	33.3 (31.8, 35.6)	34.2 (33.5, 36.7)	35.9 (34.4, 38.6)

Station	2000-2020	2020-2040	2040-2060	2060-2080
Zefat	30.3	33.0 (31.3, 34.9)	34.1 (32.0, 36.6)	35.5 (33.5, 37.8)
Zemah	32.1	32.7 (30.2, 34.3)	33.9 (32.1, 37.1)	36.1 (33.3, 38.3)

נספח ג׳ – טבלאות מרכזות של הנתונים לאזורים השונים

בנספח זה ניתן למצוא לכל אחד משש האזורים המפורטים בדו"ח, חלק גדול מהתוצאות המופיעות בדו"ח, אשר שימשו לאפיונו של כל אזור. התוצאות מרוכזות בטבלאות 11-16. כלל התחזיות לעתיד, כאמור, מבוססות על התרחיש החמור RCP8.5 ואת ההסבר המפורט למדדים בטבלאות אלו ניתן למצוא בטבלה 2.

טבלה 11. השינויים החזויים לאזור מישור החוף.

מישור החוף	2000-2020	2020-2040	2040-2060	2060-2080	2080-2100
טמפרטורה מקסימלית (מ"צ)	26.0	26.1	27.0	28.0	29.0
טמפרטורה מינימלית (מ"צ)	15.6	15.7	16.5	17.6	18.8
טמפרטורה ממוצעת (מ"צ)	20.8	20.9	21.7	22.8	23.9
מגמה בטמפרטורה המינימלית (מ"צ/עשור)	0.7	0.2	0.5	0.5	0.5
מגמה בטמפרטורה המקסימלית (מ"צ/עשור)	0.8	0.3	0.5	0.4	0.5
מספר ימים חמים מאוד מעל סף 38 מ"צ	2	3	4	6	12
מספר לילות חמים מעל סף 20 מ"צ	113	108	125	144	164
אחוז הזמן בו אין עומס חום (%)	15	9	5	3	1
אחוז הזמן בו שרר עומס חום כבד ומעלה (%)	9	17	27	42	56
כמות גשם שנתית (מ"מ)	505	509	448	413	384
מספר ימי גשם	40	40	38	34	33

טבלה 12. השינויים החזויים לאזור רצועת החוף.

רצועת החוף	2000-2020	2020-2040	2040-2060	2060-2080	2080-2100
טמפרטורה מקסימלית (מ"צ)	24.4	24.5	25.3	26.4	27.2
טמפרטורה מינימלית (מ"צ)	18.2	18.4	19.2	20.3	21.3
טמפרטורה ממוצעת (מ"צ)	21.3	21.4	22.3	23.3	24.3
מגמה בטמפרטורה המינימלית (מ"צ/עשור)	0.7	0.3	0.5	0.4	0.5
מגמה בטמפרטורה המקסימלית (מ"צ/עשור)	0.9	0.2	0.5	0.4	0.5
מספר ימים חמים מאוד מעל סף 38 מ"צ	1	1	1.5	2	4
מספר לילות חמים מעל סף 20 מ"צ	156	156	171	188	203
אחוז הזמן בו אין עומס חום (%)	7	3	1	0	0
אחוז הזמן בו שרר עומס חום כבד ומעלה (%)	3	12	25	47	64
כמות גשם שנתית (מ"מ)	505	509	448	413	384
מספר ימי גשם	40	40	38	34	33

טבלה 13. השינויים החזויים לאזור הרי המרכז.

הרי המרכז	2000-2020	2020-2040	2040-2060	2060-2080	2080-2100
טמפרטורה מקסימלית (מ"צ)	22.9	23.1	24.1	25.3	26.4
טמפרטורה מינימלית (מ"צ)	14.3	14.9	15.7	16.9	18.2
טמפרטורה ממוצעת (מ"צ)	18.6	19.0	19.9	21.1	22.3
מגמה בטמפרטורה המינימלית (מ"צ/עשור)	0.5	0.3	0.6	0.5	0.6
מגמה בטמפרטורה המקסימלית (מ"צ/עשור)	0.8	0.3	0.6	0.5	0.6
מספר ימים חמים מאוד מעל סף 38 מ"צ	1	2	3	6	12
מספר לילות חמים מעל סף 20 מ"צ	59	78	107	139	164
אחוז הזמן בו אין עומס חום (%)	66	58	47	32	20
אחוז הזמן בו שרר עומס חום כבד ומעלה (%)	1	1	3	6	11
כמות גשם שנתית (מ"מ)	511	541	476	450	402
מספר ימי גשם	39	39	37	35	32

טבלה 14. השינויים החזויים לאזור עמקי הצפון.

עמקי הצפון	2000-2020	2020-2040	2040-2060	2060-2080	2080-2100
טמפרטורה מקסימלית (מ"צ)	27.2	27.5	28.4	29.6	30.6
טמפרטורה מינימלית (מ"צ)	13.6	14.1	15.0	16.1	17.3
טמפרטורה ממוצעת (מ"צ)	20.4	20.8	21.7	22.8	24.0
מגמה בטמפרטורה המינימלית (מ"צ/עשור)	0.5	0.3	0.5	0.5	0.5
מגמה בטמפרטורה המקסימלית (מ"צ/עשור)	0.6	0.3	0.6	0.5	0.5
מספר ימים חמים מאוד מעל סף 38 מ"צ	8	14	22	41	63
מספר לילות חמים מעל סף 20 מ"צ	80	88	107	127	146
אחוז הזמן בו אין עומס חום (%)	22	18	13	7	3
אחוז הזמן בו שרר עומס חום כבד ומעלה (%)	16	22	31	42	54
כמות גשם שנתית (מ"מ)	511	519	457	428	401
מספר ימי הגשם	45	45	41	38	36

טבלה 15. השינויים החזויים לאזור הנגב.

נגב	2000-2020	2020-2040	2040-2060	2060-2080	2080-2100
טמפרטורה מקסימלית (מ"צ)	27.3	27.7	28.6	29.7	30.8
טמפרטורה מינימלית (מ"צ)	14.6	14.9	15.7	16.9	18.1
טמפרטורה ממוצעת (מ"צ)	20.9	21.3	22.2	23.3	24.5
מגמה בטמפרטורה המינ[4]ימלית (מ"צ/עשור)	0.6	0.3	0.6	0.5	0.5
מגמה בטמפרטורה המקסימלית (מ"צ/עשור)	0.8	0.3	0.6	0.5	0.5
מספר ימים חמים מאוד מעל סף 38 מ"צ	10	17	27	49	72
מספר לילות חמים מעל סף 20 מ"צ	82	89	110	135	156
אחוז הזמן בו אין עומס חום (%)	27	20	14	8	3
אחוז הזמן בו שרר עומס חום כבד ומעלה (%)	10	15	22	32	44
כמות גשם שנתית (מ"מ)	190	192	170	163	144
מספר ימי הגשם	25	25	22	21	19

טבלה 16. השינויים החזויים לאזור ים המלח והערבה.

ים המלח והבקעה	2000-2020	2020-2040	2040-2060	2060-2080	2080-2100
טמפרטורה מקסימלית (מ"צ)	31.6	32.3	33.3	34.5	35.4
טמפרטורה מינימלית (מ"צ)	23.1	23.6	24.6	25.8	26.9
טמפרטורה ממוצעת (מ"צ)	27.4	28.0	28.9	30.2	31.2
מגמה בטמפרטורה המינימלית (מ"צ/עשור)	0.6	0.3	0.6	0.5	0.5
מגמה בטמפרטורה המקסימלית (מ"צ/עשור)	0.5	0.4	0.6	0.5	0.4
מספר ימים חמים מאוד מעל סף 38 מ"צ	98	114	131	148	158
מספר לילות חמים מעל סף 20 מ"צ	233	237	249	264	282
אחוז הזמן בו אין עומס חום (%)	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
אחוז הזמן בו שרר עומס חום כבד ומעלה (%)	61	72	83	92	97
כמות גשם שנתית (מ"מ)	41	41	37	36	32
מספר ימי הגשם	8	8	7	7	6