

2025



משרד התחבורה
והבטיחות בדרכים



עוצמות הגשם התת-יומיות בישראל: מגמות ושינויים בתקופה 1970-2024

SUB-DAILY RAINFALL INTENSITIES IN ISRAEL:
TRENDS AND CHANGES OVER THE PERIOD 1970-2024

אסף צפורי ויצחק יוסף

דו"ח מחקר מס': 4000-0804-2025-0000001

פברואר, 2025



www.ims.gov.il

שבט, תשפ"ה

פברואר, 2025

סימוכין : 4000-0804-2025-0000001

עוצמות הגשם התת-יומיות בישראל: מגמות ושינויים

בתקופה 1970-2024

אסף צפורי ויצחק יוסף

תקציר

מחקר זה מציג ניתוח מקיף ראשון מסוגו בישראל של שינויים בעוצמות הגשם לאורך התקופה 1970-2024. הניתוח מתבסס על שילוב נתונים מרשמי גשם ותחנות אוטומטיות ובוחן את מידת השינוי בעוצמות הגשם למשכים של 10 עד 240 דקות. המחקר מייצג את אזורי הארץ השונים: מישור החוף (צפון, מרכז, דרום), עמקים, הרים (צפון ומרכז), האזור הצחיח-למחצה והאזור הצחיח.

ניתוח השינויים הנצפים בעוצמות הגשם התבצע באמצעות שלוש גישות מרכזיות. הגישות אשר יושמו הן, (1) ניתוח מגמות עוצמות הגשם המקסימליות בתקופה ארוכה (1970-2024) וקצרה (1995-2024); (2) השוואת הסתברויות (זמני חזרה) בין שתי תקופות עוקבות (1970-1997 ו-1998-2024); (3) שימוש לראשונה ברגרסיית אחוזונים (Quantile regression) לבחינת מגמות באחוזוני הגשם השונים, בדגש על אחוזונים קיצוניים.

הממצאים העיקריים מצביעים על מגמת עלייה בעוצמות הגשם ברוב אזורי הארץ, עם הבדלים בין האזורים:

- **מישור החוף:** נצפתה עלייה כללית של כ-20% בעוצמות הגשם המקסימליות בפרקי הגשם השונים. בשלושת העשורים האחרונים נרשמה עלייה משמעותית במשכים הקצרים בשיעור של כ-35% במישור החוף המרכזי וכ-50% במישור החוף הדרומי.
- **עמקים:** באזור זה נמצאו השינויים הבולטים ביותר, עם עלייה של כמעט 30% בעוצמות הגשם במשכים הקצרים בתקופה הארוכה וכ-20% בתקופה הקצרה.
- **הרי הצפון והמרכז:** נמצא גידול מתון יותר בהשוואה לשאר האזורים, עם עלייה של כ-5% בתקופה הארוכה, לצד עלייה של כ-10%-20% בתקופה הקצרה במשכים הקצרים. עיקר השינוי נצפה בעיקר בהרי המרכז וביחוד בפרקי הגשם הארוכים.
- **אזורים צחיחים:** נצפתה עלייה של כ-20%-30% במשכים הקצרים בתקופה הארוכה, לצד עלייה של כ-40% בתקופה הקצרה.

ההתחממות הגלובלית והשינויים האקלימיים הנלווים לה ככלל והתחממות הים התיכון בפרט, תורמים להגברת הפוטנציאל לאירועי גשם עוצמתיים, במיוחד באזורים הקרובים לחוף ולשפלה. זאת בשל האפשרות

לתוספת אדי מים ככל שהאטמוספירה חמה יותר, בנוסף להגברת אי היציבות האטמוספרית. המודלים האקלימיים צופים המשך מגמת התחממות והמשך עלייה בעוצמות הגשם לפרקי הזמן השונים באזורים רבים בישראל.

לעלייה של עשרות אחוזים בעוצמות הגשם ישנה משמעות אדירה על תכנון תשתיות עתידי ולהתנהלות המשק והכלכלה. ממצאי המחקר, המספקים תובנות חשובות להבנת השינויים במשטר הגשמים בישראל, יכולים לסייע בתכנון מיטבי וארוך טווח של מערכות ניקוז ותשתיות עירוניות תוך התחשבות בתרחישי ההתחממות העתידיים.

Abstract

This study presents for the first time, a comprehensive analysis of changes in rainfall intensities across Israel over the period 1970-2024. The analysis is based on combined data from pluviographs and automatic weather stations, assessing changes in rainfall intensities for durations ranging from 10 to 240 minutes. The study focuses on eight regions of the country: Coastal Plain (north, central, south), Valleys, Mountains (north and central), Semi-Arid region, and Arid region.

Analysis of observed changes in rainfall intensities was conducted using three primary approaches: (1) trend analysis of maximum rainfall intensities over both long (1970-2024) and short (1995-2024) periods; (2) probability comparisons (return periods) between two consecutive periods (1970-1997 and 1998-2024); and (3) the implementation of quantile regression, for the first time in Israel, to examine trends in different rainfall quantiles, with a focus on extreme percentiles.

The key findings indicate an increasing trend in rainfall intensities across most regions of Israel, with variations among the regions:

- **Coastal Plain:** A general increase of approximately 20% in maximum rainfall intensities across different rainfall durations. Over the past three decades, short duration rainfall has significantly increased, with an approximately 35% rise in the Central Coastal Plain and around 50% in the Southern Coastal Plain.
- **Valleys:** The most notable changes were observed in this region, with short duration rainfall increasing by nearly 30% over the long period and approximately 20% over the short period.

- **Northern and Central Mountains:** A more moderate increase was found compared to other regions, with a rise of about 5% over the long period, alongside an increase of 10%-20% in short duration rainfall over the short period. The most notable changes were observed in the central mountains, particularly for longer rainfall durations.
- **Arid Regions:** Short duration rainfall increased by approximately 20%-30% over the long period, alongside a rise of about 40% over the short period.

Global warming and the resulting climate changes, particularly the warming of the Mediterranean Sea, contribute to enhanced potential for intense rainfall events, especially in coastal and lowland regions. This is attributed to increased atmospheric moisture content potential in a warmer atmosphere, coupled with enhanced atmospheric instability. Current climate models project continued warming trends and further intensification of rainfall at various temporal scales across many regions in Israel.

The increase of tens of percentage points in rainfall intensities has significant implications for future infrastructure planning, the economy, and resource management. The findings of this study provide valuable insights into the evolving rainfall patterns in Israel and can contribute to optimal long-term planning of drainage systems and urban infrastructure, while considering future climate warming scenarios.

עבודה זו יש לצטט כך :

צפורי, א' ויוסף, י' (2025). עוצמות הגשם התת-יומיות בישראל : מגמות ושינויים בתקופה 1970-2024. דו"ח מחקר מס' 4000-0804-2025-0000001, השירות המטאורולוגי הישראלי.

Zipori, A. and Yosef, Y. (2025). Sub-daily rainfall intensities in Israel: Trends and changes over the period 1970-2024. Research Report No. 4000-0804-2025-0000001, Israel Meteorological Service.

תוכן עניינים

1	מבוא
2	מתודולוגיה
2.1	בסיס הנתונים
2.1.1	חלוקה אזורית ומערכי נתונים
2.1.2	סדרות עוצמות גשם מקסימאליות שנתיות (Block Maxima)
2.2	ניתוח השינויים בעוצמות הגשם
2.2.1	ניתוח מגמות בסדרות ה-Block Maxima
2.2.2	השוואת עוצמות גשם בהסתברויות שונות בשתי תקופות
2.2.3	ניתוח מגמות מבוסס רגרסיית אחוזונים (Quantile regression)
3	תוצאות
3.1	אזור מישור החוף הצפוני
3.1.1	מגמות בעוצמות גשם מקסימליות
3.1.2	השוואת עקומות עוצמות-משך-הסתברות לגשם (IDF's)
3.1.3	ניתוח מגמות באחוזוני הגשם השונים (Quantile regression)
3.2	אזור מישור החוף המרכזי
3.2.1	מגמות בעוצמות גשם מקסימליות
3.2.2	השוואת עקומות עוצמות-משך-הסתברות לגשם (IDF's)
3.2.3	מגמות באחוזוני הגשם השונים (Quantile regression)
3.3	אזור מישור החוף הדרומי
3.3.1	מגמות גשם בעוצמות מקסימליות
3.3.2	השוואת עקומות עוצמות-משך-הסתברות לגשם (IDF's)
3.3.3	מגמות באחוזוני הגשם השונים (Quantile regression)
3.4	אזור העמקים
3.4.1	מגמות בעוצמת גשם מקסימלית
3.4.2	השוואת עקומות עוצמות-משך-הסתברות לגשם (IDF's)
3.4.3	ניתוח מגמות באחוזוני הגשם השונים (Quantile regression)
3.5	אזור הרי הצפון
3.5.1	מגמות בעוצמות גשם מקסימליות
3.5.2	השוואת עקומות עוצמות-משך-הסתברות לגשם (IDF's)
3.5.3	ניתוח מגמות באחוזוני הגשם השונים (Quantile regression)

24	3.6. אזור הרי המרכז
24	3.6.1. מגמות גשם בעוצמות מקסימאליות
25	3.6.2. השוואת עקומות עוצמות-משך-הסתברות לגשם (IDF's)
25	3.6.3. מגמות באחוזוני הגשם השונים (Quantile regression)
26	3.7. אזור צחיח למחצה
27	3.7.1. מגמות בעוצמות גשם מקסימאליות
27	3.7.2. השוואת עקומות עוצמות-משך-הסתברות לגשם (IDF's)
30	3.7.3. מגמות באחוזוני הגשם השונים (Quantile regression)
30	3.8. אזור צחיח
30	3.8.1. מגמות בעוצמות גשם מקסימאליות
32	3.8.2. השוואת עקומות עוצמות-משך-הסתברות לגשם (IDF's)
33	3.8.3. מגמות באחוזוני הגשם השונים (Quantile regression)
34	4. סיכום ומסקנות
39	מקורות

1. מבוא

מודלים אקלימיים המשמשים לתחזיות ארוכות טווח מצביעים על כך שכמויות הגשם השנתיות הממוצעות צפויות לרדת עד סוף המאה באזור מזרח הים התיכון והלבנט, עקב ההתחממות הגלובאלית (Grillakis, 2019; Koutroulis, 2019; Zittis et al., 2022), ביחוד בתרחיש החמור RCP8.5 (תרחיש "עסקים כרגיל"). מגמות אלו נמצאו גם בתחזיות ממוקדות לישראל יחד עם הפחתה כללית במספר ימי הגשם (יוסף וחוב', 2019; יוסף וחוב', 2024). עם זאת, לצד ההפחתה בכמות הגשם הכוללת, התחזיות מצביעות על עלייה בעוצמות הגשם באזורים אלו. סממנים לעלייה בעוצמות נמצאו בבחינת המגמות בכמויות הגשם היומיות בתחנות המודדות גשם ברחבי הארץ. במחקרם של צפורי וחוב' (2022) עולה כי חלה עלייה בשלושה מדדים מרכזיים: כמות הגשם היומית המקסימאליות השנתית (Rx1day), כמות הגשם המצטברת בשלושה ימים (Rx3day) והכמות המצטברת בשבעה ימים רצופים (Rx7day). באזור החוף הצפוני, מגמת העלייה נמצאה מובהקת סטטיסטית, כאשר קצב השינוי אף מתעצם בעשורים האחרונים. כמו כן, נמצאה עלייה במספר המקרים בכל שנה שבהם חצו כמויות הגשם היומית ספים מוגדרים (למשל, ימים מעל 50 מ"מ/יום) ברוב אזורי הארץ.

התחממות כדור הארץ עשויה לספק הסבר יחסית פשוט לתופעה זו, בכך שככל שהאטמוספירה מתחממת, היא מסוגלת לשאת כמות גדולה יותר של אדי מים. על-פי משוואת קלאוזיוס-קלפרון, כל עלייה של מעלת צלזיוס אחת מגדילה את קיבולת אדי המים באטמוספירה בכ-7% (Pumo et al., 2019). אולם, הגידול הצפוי בכמות אדי המים עם התחממות כדור הארץ, לאו דווקא משליך על עוצמות הגשם, שכן ישנם גורמים נוספים המשפיעים על עוצמות הגשם. בין גורמים אלו ניתן למנות את: השינוי במידת אי היציבות האטמוספרית (Chen and Dai, 2023), שינויים בגובה הקיפאון בענן ובפסגת הענן ושינויים סינפטטיים ודינמיים שיתרחשו בעקבות השינויים האקלימיים באזורנו (כגון, שינוי במסלול מעבר השקעים, שינוי בתרומה היחסית של סוגי השקעים השונים לכמות הגשם השנתית וכד').

ההתחממות הגלובאלית משפיעה על החומרה והתדירות של אירועי משקעים קיצוניים (IPCC, 2021). המודלים האקלימיים מצביעים על התגברות אירועי המשקעים הקיצוניים, לצד ירידה בתדירות האירועים החלשים והבינוניים. עם זאת, מודלים אקלימיים אזוריים (RCM's) וגלובאליים (GCM's), מזהים תבנית מרחבית בעוצמות המשקעים באזור אגן הים התיכון, המאופיינת בגרדיאנט בכיוון צפון-דרום, כאשר בחלקו הצפוני צפויה עלייה בעוצמה, ואילו בחלקו הדרומי צפויה הפחתה (Zittis et al., 2022). מיקומה והאוריינטציה המרחבית של ישראל בהקשר זה יכול להיות קריטי להשפעות שנראו בעבר ואלו שצפויות בעתיד.

מחקר שפורסם לאחרונה (Marra et al., 2024) בחן את השינוי בעוצמות הגשם בשמונה תחנות מטאורולוגיות בשוויץ. המחקר השווה בין התחזית לסוף המאה ה-21 לבין תקופת הייחוס (1981-2018). החוקרים השתמשו במודל אי-סטציונרי, המתבסס על הטמפרטורה החזויה כגורם המסביר את השינויים בעוצמות הגשם לאורך זמן. תוצאות המחקר מצביעות על התגברות צפויה של 13%-38% בעוצמות הגשם באירועים בעלי זמן חזרה של 10 שנים, תחת התרחיש החמור יותר – RCP8.5.

מחקר אחר השוואה תוצאות ממודל WRF על 41 אירועי גשם היסטוריים בישראל, כאשר פעם אחת המודל הורץ תחת התנאים המקוריים ובפעם השנייה אותם אירועים הורצו עם שיעור התחממות הדומה לתרחיש

האקלימי RCP8.5 (פסאדו התחממות). תוצאות המחקר מעידות כי כמויות הגשם הכוללת (סך הגשם שירד בכל המרחב לאורך כל האירועים) פחתה בכ-30% בהרצת הפסאדו התחממות לעומת ההרצה בתנאים המקוריים. הפחתה זו נבעה בעיקר מירידה בשטח ובמשך הגשם. לצד זו, בהרצות ה-"פסאדו התחממות" נצפתה עלייה בעוצמות הגשם של כ-20% במשכים הקצרים וירידה בעוצמות במשכים הארוכים (Armon et al., 2021). תוצאות מחקר זה תומכות בתיאוריה שבה אי היציבות האטמוספרית תגדל עם ההתחממות הגלובאלית, דבר שיגרום להתגברות הרכיב הקונבקטיבי בגשם שמאופיין בתאי עננות ממוקדים שממטירים בעוצמה לאורך זמן קצר.

עוצמת גשם מתייחסת לקצב ירידת הגשם ומקובל למדוד אותה ביחידות של מ"מ/שעה. לדוגמה, כאשר נמדדים 10 מ"מ גשם במשך 30 דקות, עוצמת הגשם היא 20 מ"מ/שעה. השירות המטאורולוגי פרסם לאחרונה דו"ח מקיף (צפורי וחוב', 2024) המציג נתונים מעודכנים על עוצמות הגשם בישראל, מידע בעל חשיבות תכנונית ויישומית מרכזית. הדו"ח והמיפוי הנלווה לו, מציגים את עוצמות הגשם במספר רב של תחנות ברחבי הארץ, בהסתברויות שונות. אף שהדו"ח לא התמקד במגמות בעוצמות הגשם לאורך זמן, נמצא שכל התחנות בצפון הארץ שזוהו בהן שינויים (תחנות אי-סטאציונאריות), הצביעו על מגמת עלייה בעוצמות הגשם. הדו"ח גם משווה את הנתונים העדכניים לאלו שפורסמו בדו"ח קודם משנת 1998, עבור פרקי זמן של 10, 30, 60, 120 ו-240 דק'. ככלל, נמצא כי ברוב התחנות ישנה נטייה להתגברות בעוצמות הגשם למשכים שנבחנו (אם כי לא תמיד באופן מובהק סטטיסטי).

מטרת המחקר הנוכחי הינה לבחון את השינוי בעוצמות הגשם בתקופה 1970-2024. הניתוח נערך לשמונה אזורים בארץ, בפרקי זמן שונים (10 עד 240 דקות), תוך שימוש בשלוש גישות עיקריות: בחינת המגמות בעוצמות הגשם בתקופה כולה, השוואת זמני חזרה של עוצמות גשם בשתי תקופות עוקבות וניתוח מגמות העוקב אחר אחוזונים שונים. זהו המחקר הראשון העוסק בבחינת מגמות עוצמות גשם בעבר בישראל, המתבסס על מדידות היסטוריות ארוכות טווח.

2. מתודולוגיה

2.1. בסיס הנתונים

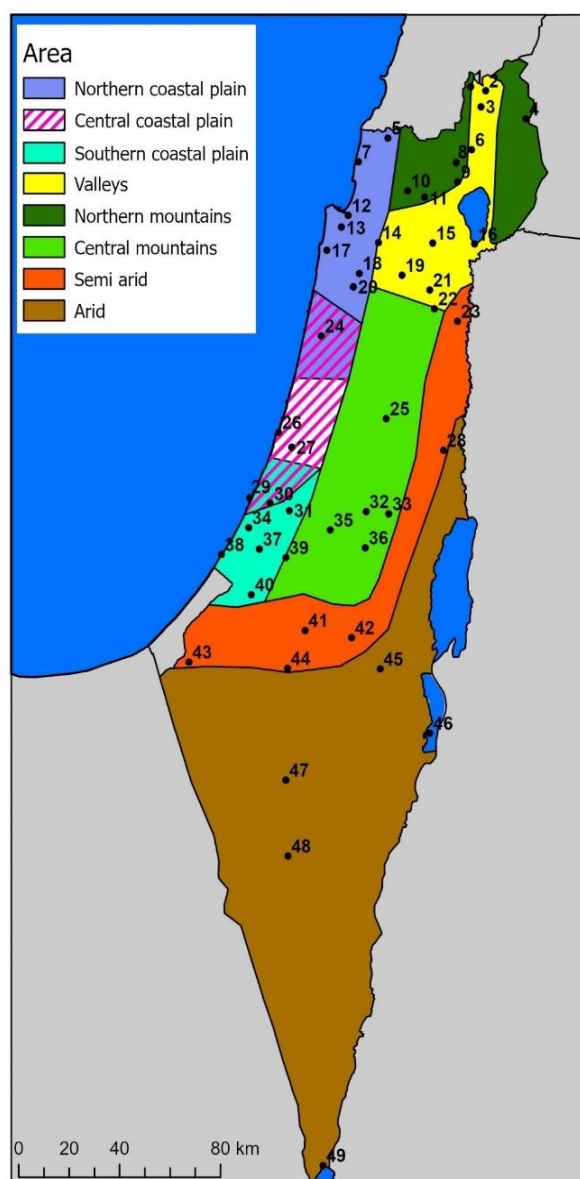
2.1.1. חלוקה אזורית ומערכי הנתונים

בסיס הנתונים לעבודה זו הוכן ברמה אזורית ולא על-בסיס תחנות בודדות. גישה זו נובעת מההבנה ששינויים בעוצמות הגשם מתבטאים במרחב ובחינת אזור הכולל מספר תחנות מדידה מפחיתה את השפעת האקראיות הקיימת בתחנה בודדת (לדוגמה, מעבר של תא עננות ממטיר חזק מעל תחנה אחת, ולא מעל תחנה סמוכה, עלול ליצור הטיה בניתוח). בהמשך למחקרם של צפורי וחוב' (2024), חולקה הארץ באופן דומה לשמונה אזורים (איור 1): מישור החוף הצפוני, המרכזי והדרומי, עמקים, הרי הצפון, הרי המרכז, מדברי למחצה ומדברי. כל אזור הורכב ממספר תחנות מייצגות, למידע על התחנות המרכיבות כל אזור, ראו טבלה 1.

טבלה 1. רשימת התחנות והאזורים שאליו הן משתייכות.

No.	Station name	Area
1	Kefar Giladi	Northern mountains
2	Dafna	Valleys
3	Kefar Blum	Valleys
4	Merom Golan	Northern mountains
5	Elon	Northern Coastal plain
6	Ayyelet Hashahar	Valleys
7	Shave Ziyon	Northern Coastal plain
8	Zefat Har Kenaan	Northern mountains
9	Ammiad	Northern mountains
10	Eshhar	Northern mountains
11	Deir Hanna	Northern mountains
12	Haifa Refineries	Northern Coastal plain
13	Haifa University	Northern Coastal plain
14	Newa Yaar	Valleys
15	Tavor Kadoorie	Valleys
16	Zemah	Valleys
17	En Karmel	Northern Coastal plain
18	En Hashofet	Northern Coastal plain
19	Afula Nir Hameq	Valleys
20	Galed	Northern Coastal plain
21	Tel Yosef	Valleys
22	Maale Gilboa	Central mountains
23	Sede Eliyyahu	Semi-Arid
24	En Hahoreh	Northern & Central Coastal plain
25	Ariel	Central mountains
26	Tel Aviv Coast	Central Coastal plain
27	Bet Dagan	Central Coastal plain
28	Gilgal	Semi-Arid
29	Asdod Port	South & Central Coastal plain
30	Qevuzat Yavne	South & Central Coastal plain
31	Hafez Hayyim	South Coastal plain
32	Zova	Central mountains
33	Jerusalem Centre	Central mountains
34	Nizzan	South Coastal plain
35	Beil Jimal	Central mountains
36	Rosh Zurim	Central mountains
37	Negba	South Coastal plain
38	Ashqelon	South Coastal plain
39	Gat	South Coastal plain
40	Dorot	South Coastal plain
41	Lahav	Semi-Arid

No.	Station name	Area
42	Shani	Semi-Arid
43	Besof Farm	Semi-Arid
44	Beer Sheva	Semi-Arid
45	Arad	Arid
46	Sedom	Arid
47	Sede Boqer	Arid
48	Mizpe Ramon	Arid
49	Elat	Arid



איור 1. תפרוסת התחנות בחלוקה לשמונה אזורים. שמות התחנות מופיעות בטבלה 1 בהתאם למספור שעל-גבי המפה.

באזור מישור החוף המרכזי, עקב מחסור בתחנות מדידה עם היסטוריית נתונים ארוכה, נעשה שימוש גם בתחנות מדידה השייכות לאזור מישור החוף הדרומי (אשדוד נמל וקבוצת יבנה), ומישור החוף הצפוני (עין החורש) לניתוח וייצוג המגמות באזור זה.

לכל אזור נבנה בסיס נתונים של אירועי גשם, באשר ההפרדה בין אירוע גשם אחד למשנהו הוגדרה באמצעות פרק זמן של לפחות 24 שעות ללא גשם, בכל התחנות, באזור העניין. אירוע גשם הוגדר כאירוע שבו כמות הגשם הכוללת עלתה על 2 מ"מ בלפחות אחת מהתחנות השייכות לאותו אזור. מכל אירוע גשם נבחרה העוצמה המרבית שנמדדה באחת מתחנות האזור, עבור כל אחד מהמשכים שנבדקו.

2.1.2. סדרות עוצמת גשם מקסימלית שנתית (Block Maxima)

לכל אחד מהאזורים הוכנו סדרות נתונים למשכים של 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240 דק'. סדרות הזמן נבנו בשיטת Block Maxima (BM), כאשר לכל משך, מכל שנת גשם, נלקח הערך המקסימאלי מבין כל התחנות השייכות לאותו אזור. כדי להימנע מהטיה בניתוח אשר עלולה להיגרם כתוצאה משימוש במספר לא אחיד של תחנות לאורך התקופה, בוצעה בחינה של מספר התחנות הפעילות בכל אזור בכל שנה. תוצאות הבדיקה מעידות כי מ-1970, מספר התחנות נשמר די אחיד בכל האזורים ולפיכך הוחלט כי ניתוח המגמות לכל האזורים יחל בעונת הגשם 1970/1.

בסדרות הנתונים של אזור החוף הצפוני נכלל אירוע הגשם מה-04/12/2001, בו נמדדו ערכי שיא 126 מ"מ ו-176 מ"מ, במשכים 180 ו-240 דקות, בהתאמה. יש לציין, שערכים אלו לא נמדדו באף אחת מהתחנות המוגדרת לאזור זה, אולם עקב חריגותם הוחלט לכלול אותם בניתוח. ערכים אלו היוו את השיא הארצי למשכי זמן אלו, עד לאירוע השיא בנובמבר 2024 באזור בנימינה, שאיננו כלול בניתוח הנוכחי (194 מ"מ בשלוש שעות בתחנת נחל תנינים).

2.2. ניתוח השינויים בעוצמות הגשם

לכל אחד משמונת האזורים שנבחרו, נעשו שלושה ניתוחים מעמיקים לשם הערכת השינויים ושיעורם בעוצמות המשקעים.

2.2.1. ניתוח מגמות בסדרות ה-Block Maxima

ניתוח המגמות לסדרות ה-BM נעשה באמצעות רגרסיה לינארית על ידי שימוש במבחן Mann-Kendall ו-Sen Slope estimator (MKSS). שיטות אלו הינן מקובלות מאוד ונמצאות בשימוש נרחב בתחום ההידרולוגיה וניתוח מגמות משקעים (Yue and Wang, 2004; Valdes-Abellan et al., 2017; Folton et al., 2019; Yosef et al., 2019). שתי שיטות אלו הן שיטות א-פרמטריות ויתרוןן הוא בכך שאין צורך להניח דבר על האופן בו הנתונים מתפלגים (למשל, שהנתונים מתפלגים נורמאלית). בנוסף, מעצם היותן שיטות א-פרמטריות, הן עמידות יותר לערכי קיצון, מה שמסייע בהערכת מגמה מדויקת יותר בהשוואה לרגרסיה לינארית פשוטה (OLS), אשר עלולה להיות מוטה משמעותית על-ידי נתונים חריגים. ניתוחי המגמות נעשו לשתי תקופות: לתקופה הארוכה (החל מתחילת חורף 1969/70 ועד לסוף חורף 2023/4), ולתקופה קצרה (החל מתחילת חורף 1994/5 ועד לסוף חורף 2023/4).

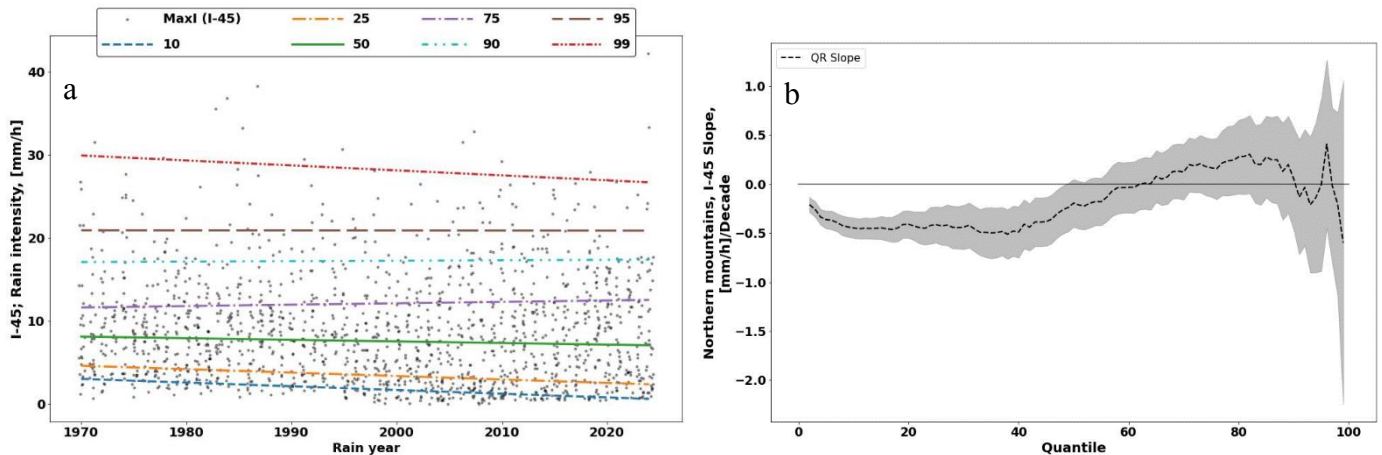
מגמות השינוי בסדרות ה-BM האזוריות נבחנו גם באמצעות פילטר Lowess (locally weighted scatterplot smoothing). זהו פילטר המשתמש ברגרסיה מקומית עם משקולות כפונקציה של המרחק משנת העניין (נעשה שימוש ב-2/3 מבסיס הנתונים לכל נקודת עניין). שימוש בפילטר זה מקובל בניתוח של נתוני אקלים ומחקרים הידרולוגיים ונעשה בו שימוש נרחב במחקרים קודמים בעולם (Satagopan and Rajagopalan, 1994; Flecker et al., 2006; Ahmad et al., 2015).

2.2.2. השוואת עוצמות גשם בהסתברויות שונות בשתי תקופות

לצורך בחינת השינוי בעוצמות הגשם, בסיס הנתונים מכל אזור (סעיף 2.1.1) חולק לשתי תקופות: תקופה מוקדמת: חורף (1969/70 עד חורף 1996/7), ומאוחרת (חורף 1997/8 עד חורף 2023/24). התאמת ההתפלגויות לטובת חישוב העוצמות בהסתברויות השונות נעשתה בשיטת Peak Over Threshold (POT), שבה כל האירועים מעל ערך סף מסוים נלקחים לטובת התאמת ההתפלגות. אנו השתמשנו ב-15% מהנתונים הגבוהים ביותר מכל תקופה לצורך כך. לכל אחת מהתקופות, ולכל המשכים הותאמה התפלגות General Pareto Distribution (GPD) בשיטת MLE (בעזרת חבילות ExtReams ו-POT בתוכנת R). לאחר התאמת ההתפלגויות, חושבו עוצמות הגשם בהסתברויות נבחרות (10%, 8%, 6.67%, 5%, 4%, 3%, 2%, 1%, ביחד עם רווחי הבר-סמך, ברמת ביטחון של 95%. הניתוח לכל תקופה נעשה בנפרד, תחת הנחת סטאציונאריות, כלומר, בכל תקופה אין שינוי מהותי בעוצמות הגשם. את זמן החזרה מחשבים באמצעות ההופכי של כל הסתברות (1 חלקי ההסתברות). לדוגמה, הסתברות של 20%, מקבילה לזמן חזרה של 5 שנים (1/0.2).

2.2.3. ניתוח מגמות מבוסס רגרסיית אחוזונים (Quantile regression)

בניגוד לרגרסיה לינארית פשוטה (OLS), המתמקדת בשינויים בערך החציוני בלבד, רגרסיית אחוזונים מאפשרת בחינה מקיפה של מגמות לאורך כל טווח התפלגות הנתונים. איור 2 מציג דוגמה לבחינת המגמות באחוזונים השונים, לעוצמות הגשם המקסימאליות בכלל אירועי הגשם, למשך של 45 דק'. ניתוח זה מאפשר ניתוח ממוקד של מגמות הגשם באחוזונים הגבוהים (כגון 90, 95 ו-99), המייצגים אירועי משקעים קיצוניים. יתרה מכך, שיטה זו מנצלת מגוון רחב יותר של נתונים בהשוואה לניתוח של סדרות נתוני עוצמת הגשם המקסימלית השנתית (BM). כך היא מספקת תמונה מקיפה יותר של התפלגות הגשם, בהתאם לאופן בו הגדרנו "אירוע גשם". במהלך השנים האחרונות נעשה שימוש הולך וגובר בשיטה זו בניתוחים הידרולוגיים ומגמות משקעים (Hassanzadeh et al., 2019; Mohsenipour et al., 2020; Treppiedi et al., 2021; Solaimani & Ahmadi, 2024). בחינה זו בוצעה לכל אזור ולמספר משכים, ותוצאותיה סוכמו בטבלאות. חישוב הרגרסיות נעשה באמצעות חבילת quantreg בתוכנת R. חשוב להדגיש, כי ניתוח המגמות בחלק זה מתייחס לאחוזונים השונים בהתפלגות הנתונים ולא להסתברויות של אירועי גשם (זמני חזרה).



איור 2. ניתוח מגמות באחוזונים למשך של 45 דקות באזור הרי הצפון. (a) עוצמות הגשם המקסימאליות שנמדדו בכל אירוע (מ"מ/שעה) יחד עם קווי הרגרסיה לאחוזונים נבחרים בצבעים שונים לתקופה 1970-2024. (b) השתנות המגמות בעוצמות הגשם (מ"מ/שעה/עשור) כפונקציה של האחוזונים, עם ערכי הבר סמך ברמת ביטחון של 95% (רקע אפור).

3. תוצאות

בחלק זה מוצגות המגמות בעוצמות הגשם על-בסיס הניתוחים השונים שבוצעו לכל אזור בנפרד: מישור החוף הצפוני, מישור החוף המרכזי, מישור החוף הדרומי, עמקים, הרי הצפון, הרי המרכז, מדברי למחצה ומדברי.

3.1. אזור מישור החוף הצפוני

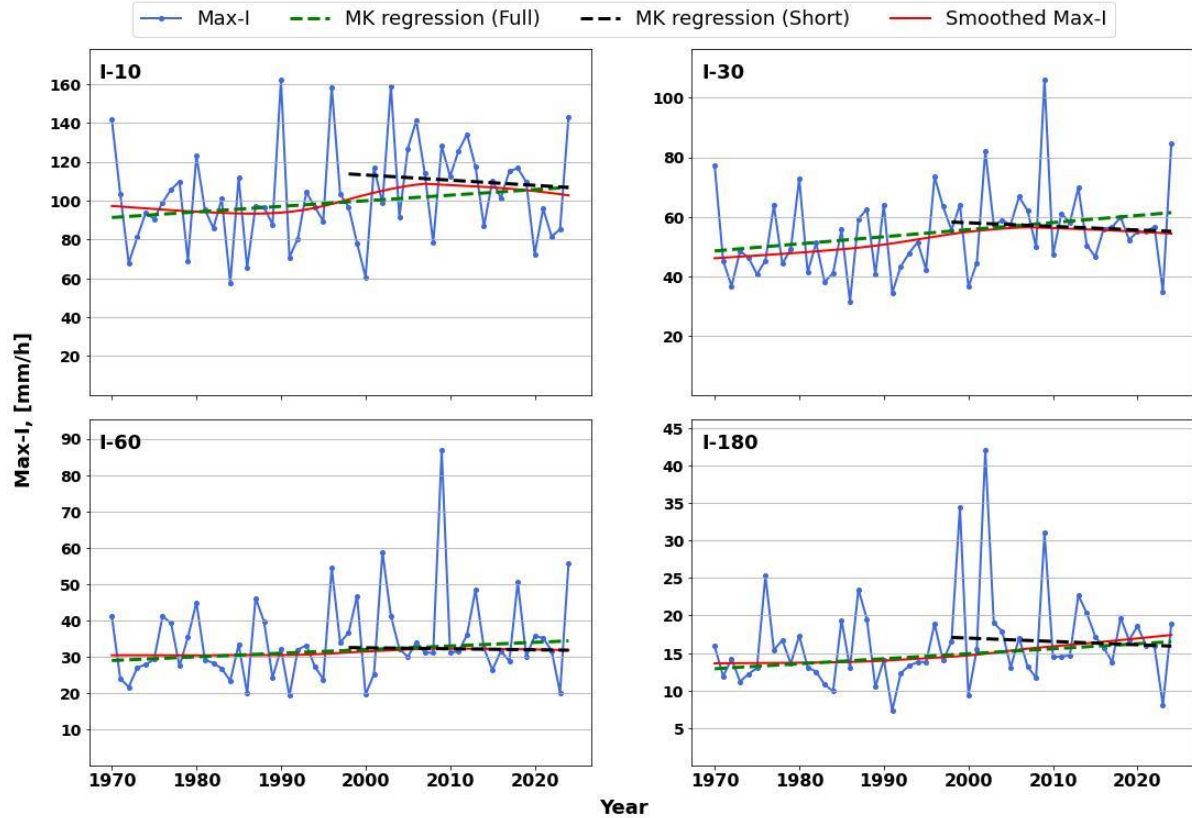
ניתוח אזור מישור החוף הצפוני מבוסס על התחנות: אילון, עין החורש, עין השופט, עין כרמל, חיפה - בזן, חיפה - אוניברסיטה, שבי ציון.

3.1.1. מגמות בעוצמות גשם מקסימליות

איור 3 מציג את המגמות והשינוי בעוצמות הגשם המקסימליות בכל שנה (BM), למשכים נבחרים (10, 30, 60 ו-180 דק'), בשילוב ערכים מוחלקים (קו אדם רציף) והמגמה לתקופה הארוכה ולקצרה (קו מקוקו ירוק ושחור, בהתאמה). טבלה 2 מציגה את שיפועי המגמות (מ"מ/שעה לעשור) של כלל המשכים המנותחים בשתי התקופות. כמו כן, מוצג שיעור השינוי באחוזים בעוצמות הגשם לאורך התקופות שחושב על פי היחס בין ערך קו המגמה בסוף התקופה לערכו בתחילת התקופה.

המגמות בעוצמות הגשם המקסימליות השנתיות, בתקופה הארוכה, מראות התגברות במישור החוף הצפוני, בעיקר במשכים קצרים (15, 20, 30, 45 דק') שבהם מתקבלות מגמות מובהקות (טבלה 2). במשכים של עד 30 דקות המגמות בעוצמות הגשם עומדות על כ-2.5 מ"מ/שעה בעשור ושיעור השינוי נאמד בתוספת של כ-20% ויותר. לעומת זאת, בתקופה הקצרה נמצאה נטייה לירידה קטנה ולא מובהקת בעוצמות הגשם במשכים הקצרים, המאופיינת בשיעור שינוי של עד 10%. חשוב לציין כי המגמה שנמצאה במשכים הקצרים

של התקופה הקצרה מושפעת במידה רבה מהערך הגבוה בתחילת הסדרה (במיוחד ב I-10, 158.4 מ"מ לשעה בשנת 1996). השפעה זו נובעת מהאופן בו הרגרסיה הלינארית מתחשבת בנקודת הפתיחה של הסדרה.



איור 3. עוצמות גשם מקסימאליות שנתיים מ"מ/שעה (בכחול) במישור החוף הצפוני לארבעה משכים: 10, 30, 60 ו-180 דק'. קיום מקווקווים (ירוק ושחור) מייצגים רגרסיה לינארית לתקופה הארוכה והקצרה, בהתאמה. קו רציף אדום מייצג את הערכים המוחלקים בשיטת Lowess.

טבלה 2. שיפועי המגמות ושיעור השינוי בעוצמות הגשם למשכים השונים, באזור מישור החוף הצפוני. מידת המובהקות מסומנת על פי המקרא מתחת לטבלה. שיעור השינוי חושב כיחס בין ערך קו המגמה ב-2024 לעומת הערך בתחילת התקופה.

Period	1970-2024		1995-2024	
	Slope [(mm/h)/Decade]	Change rate	Slope [(mm/h)/Decade]	Change rate
I-10	2.9	17%	-2.9	-7%
I-15	2.9+	22%	-3.2	-10%
I-20	2.5+	22%	-2.5	-10%
I-30	2.4*	27%	-1.5	-7%
I-45	1.6+	25%	-1.4	-10%
I-60	1	19%	-0.3	-2%
I-90	0.6	14%	0.3	3%
I-120	0.7	21%	0.4	5%
I-180	0.7*	28%	0.1	3%
I-240	0.7*	36%	0.1	2%

p-Value < 0.1 (+); p-Value < 0.05 (*); p-Value < 0.01 (**); p-Value < 0.001 (***)

כאשר מתחילים את הניתוח בשנים מאוחרות יותר, מסתמנת מגמת ירידה, ואילו כשכוללים את השנים המוקדמות יותר, המגמה מתהפכת לחיובית. עם זאת, ניכר בבירור כי ממוצע הערכים בחלקה הראשון של הסדרה (1970-1994), נמוך משמעותית ממוצע הערכים בסופה (1995 עד סופה).

במשכים הארוכים בתקופה הארוכה גם כן נמצאו מגמות חיוביות מובהקות בעוצמות הגשם, עם שיעור שינוי כללי של כ-30% למשכים של 180 ו-240 דקות. בתקופה הקצרה לא ניתן להצביע על מגמה כלשהי.

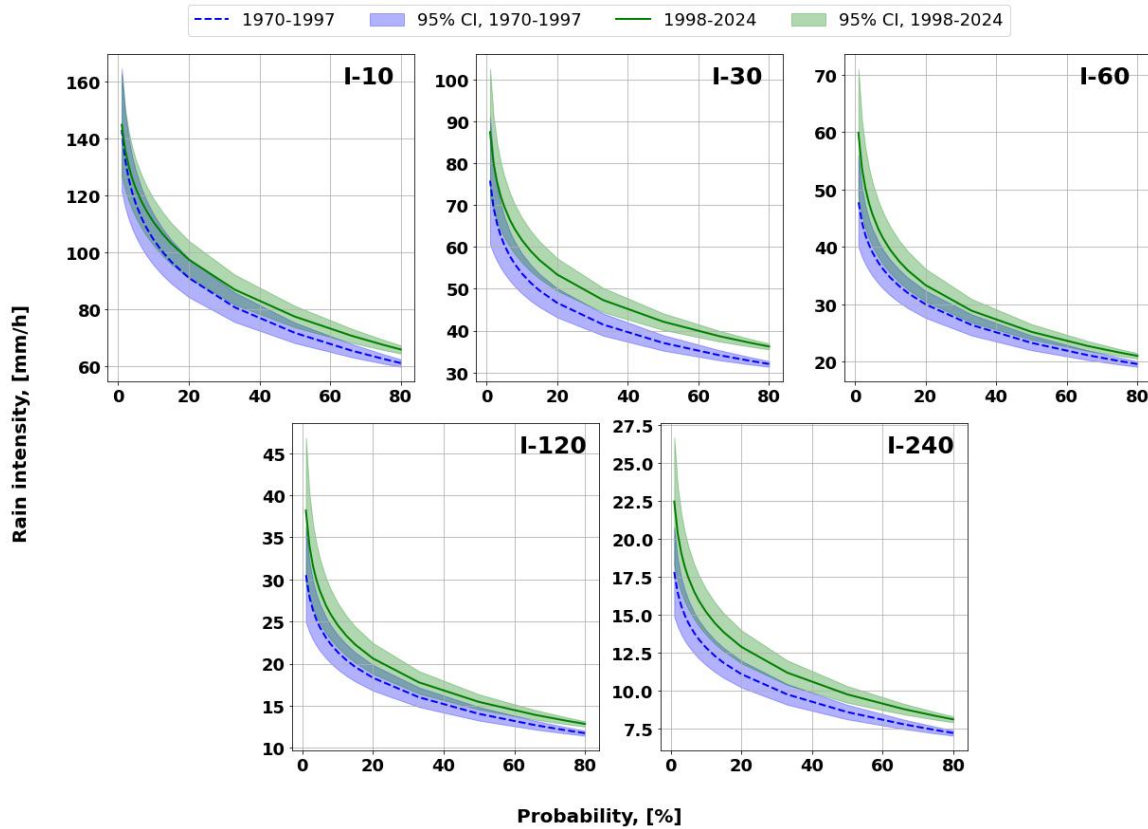
3.1.2. השוואת עקומות עוצמות-משך-הסתברות לגשם (IDF's)

בחינת השינויים בהסתברויות לעוצמות גשם במישור החוף הצפוני מצביעה על מגמת עלייה, על-בסיס השוואה בין שתי תקופות עוקבות (תקופה מוקדמת, 1970-1997; ותקופה מאוחרת, 1998-2024). אף שהמגמות ברובן אינן מובהקות סטטיסטית, הן עולות בקנה אחד עם המגמה הכללית של התגברות בעוצמות הגשם באזור זה (איור 4). השוואה בין שתי התקופות הני"ל מצביעה על הגברה משמעותית, עם עלייה של פי כ-1.5 בהסתברויות לעוצמות גשם בכלל המשכים. כך למשל, לפרק זמן של 30 דקות, עוצמות גשם שהיו בהסתברות של 20% בתקופה הקודמת (זמן חזרה של חמש שנים), עתה מתקבלות בהסתברות של כ-30%. דוגמה נוספת היא עוצמות הגשם בפרק זמן של 120 דקות, כאשר ערכים שהתקבלו בהסתברות של 10% בתקופה המוקדמת (זמן חזרה של 10 שנים) מתקבלים בתקופה הנוכחית בהסתברות של כ-15% (זמן חזרה של כ-6 שנים). באזור זה מסתמן שככל שההסתברות לאירוע גשם עולה, החפיפה בין רווחי הסמך הולכת ומצטמצמת, ולכן הבדלים נעשים מובהקים יותר. יש לציין כי באופן טבעי, עקב שיטת חישוב העוצמות, אי הוודאות בעוצמות הנדירות תמיד תהיה גדולה יותר מאי הוודאות בעוצמות השכיחות. טבלה 3 מסכמת את ההפרשים בעוצמות המחושבות להסתברויות ומשכים נתונים בין התקופה הנוכחית לתקופה המוקדמת. בכל המקרים נראית עלייה בעוצמות הגשם בתקופה הנוכחית.

3.1.3. ניתוח מגמות באחוזוני הגשם השונים (Quantile regression)

איור 5 מציג את המגמות ושיעור השינוי (פאנל שמאלי וימני, בהתאמה) באחוזונים השונים של עוצמות הגשם המקסימאליות שנמדדו בכל אירוע גשם, למשכים השונים, לתקופה הארוכה. ככלל, ניתן לראות כי באזור החוף הצפוני ישנה ירידה ברובה מובהקת, בעוצמות הגשם באחוזונים הנמוכים מהחציון. שיעורי ההפחתה מגיעים לשיעורים גבוהים מאוד של כ-80% (במיוחד באחוזון 10), אולם יש לזכור כי הערכים ההתחלתיים של אחוזון זה הם נמוכים מלכתחילה ולכן שינוי מינורי בעוצמות יכול להתבטא בשינוי דרמטי בשיעור השינוי.

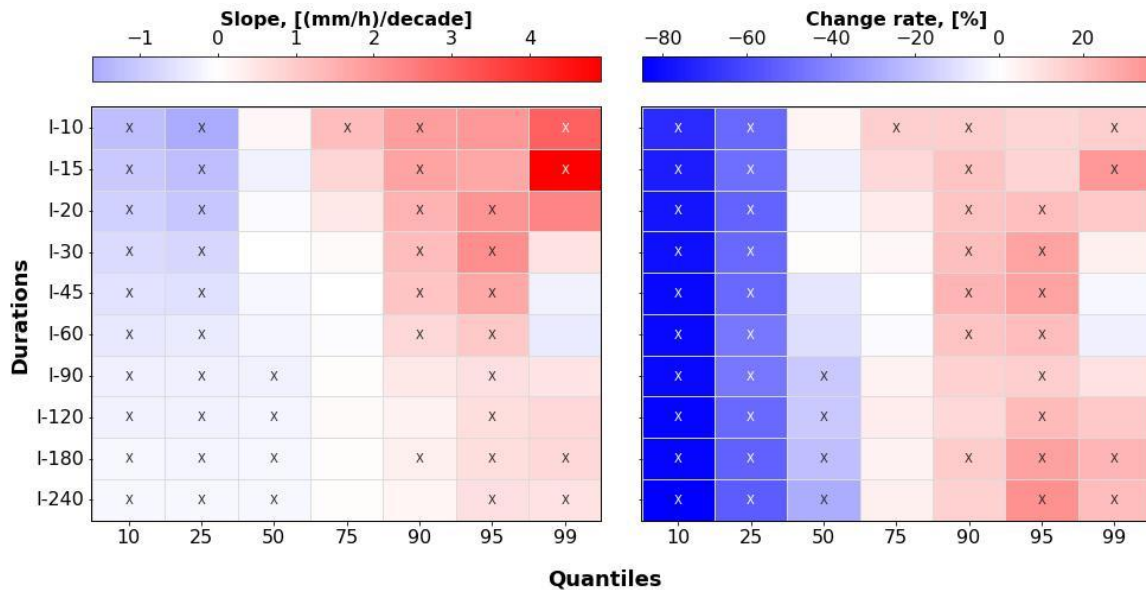
באחוזונים הגדולים מהחציון נמצאה התגברות בעוצמות, כאשר מאחוזון 90 ומעלה, היא מובהקת ברובה. עוד ניתן לראות כי באופן כללי שיעור השינוי והשיפועים גדלים ככל שמתקדמים לאחוזונים הגבוהים, המייצגים אירועי קיצון. עבור אחוזון 90 נצפתה התגברות בעוצמות בשיעור של 10%-20%, בעוד שבאחוזון 95 נרשמה עלייה כמעט כפולה, של כ-20%-30%. מבחינת שיעור השינוי בעוצמות כתלות במשכים באחוזון 99, מתקבלת תמונה דומה לתוצאות ניתוח המגמות בסדרת ה-BM, כאשר התקבלו מגמות מובהקות במשכים הקצרים והארוכים, לצד מגמות שאינן מובהקות במשכים הבינוניים.



איור 4. עוצמות גשם בהסתברויות שונות לשתי תקופות באזור מישור החוף הצפוני, 1970-1997 (סגול) ו-1998-2024 (ירוק), עם רווחי סמך ברמת ביטחון של 95%, למשכים של 10, 30, 60, 120 ו-240 דקות.

טבלה 3. הפרשים בעוצמות הגשם (מ"מ/שעה) בין התקופה הנוכחית (1998-2024) לתקופה המוקדמת (1970-1997), בהסתברויות ובמשכים שונים באזור מישור החוף הצפוני. הפרשים חיוביים ושלייליים מסומנים בצבעים אדום וכחול, בהתאמה. הפרשים מובהקים סטטיסטית (ברמה של 5%) מסומנים בצבעים כהים יותר וכוכבית (*).

	P-1%	P-2%	P-3%	P-5%	P-10%	P-20%	P-50%
I-10	1.8	3.6	4.4	5.3	6.2	6.5	5.7
I-20	7.1	6.8	6.6	6.2	5.6	5.1	4.2
I-30	11.7	10.6	10	9.1	8	6.7	5.1*
I-60	11.9	9.5	8.1	6.7	4.8	3.4	1.9
I-120	7.6	6.1	5.2	4.3	3.2	2.3	1.4
I-180	5.6	4.6	4	3.3	2.5	1.9	1.1
I-240	4.6	3.9	3.5	3	2.4	1.8	1.1*



איור 5. המגמות בעוצמות הגשם (פאנל שמאלי) ושיעור השינוי בעוצמות הגשם (פאנל ימני), כפי שהתקבל מניתוח רגרסיית האחוזונים במישור החוף הצפוני. X מצין מגמה מובהקת ברמת מובהקות של 10% לפחות.

3.2. אזור מישור החוף המרכזי

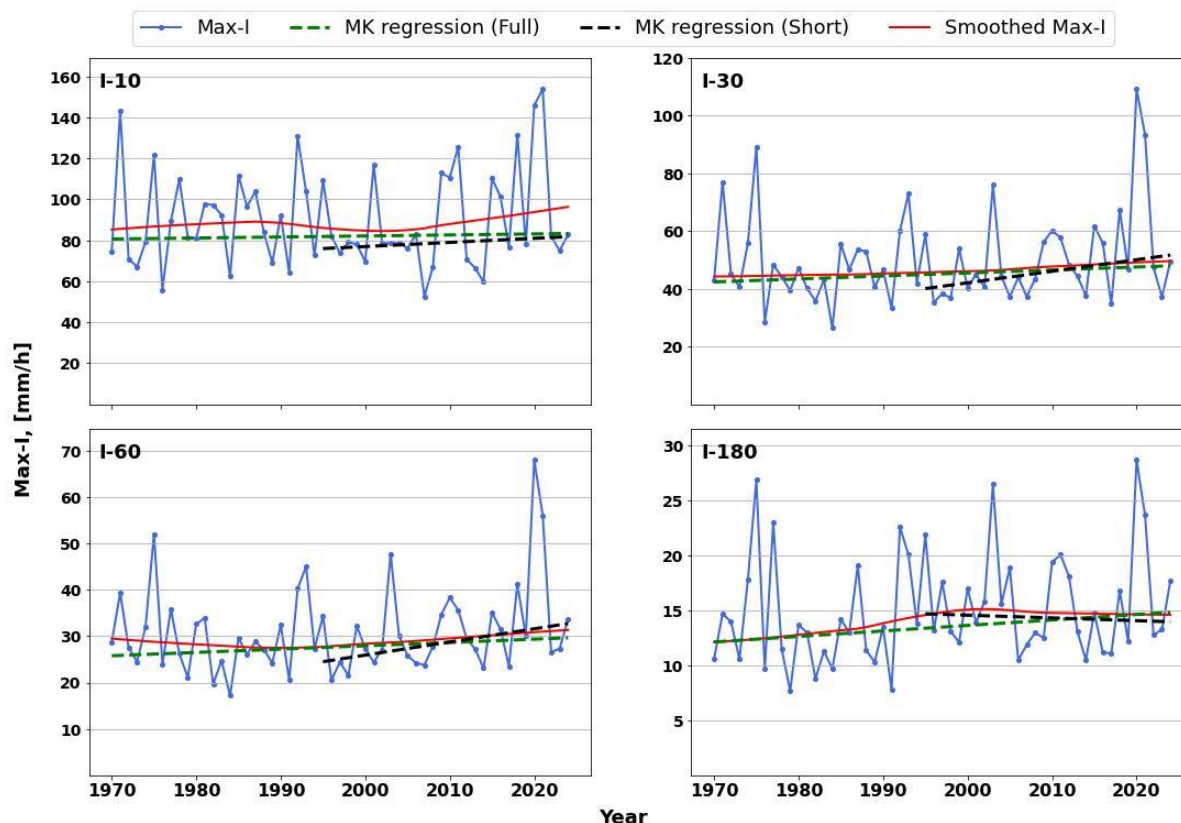
ניתוח אזור מישור החוף המרכזי מבוסס על התחנות: תל אביב, בית דגן, אשדוד נמל, קבוצת יבנה ועין החורש.

3.2.1. מגמות בעוצמות גשם מקסימאליות

בתקופה הארוכה במישור החוף המרכזי נראית נטייה להתגברות בעוצמות בכל המשכים, בשיעור המגיע ל-1 מ"מ/שעה בעשור (איור 6, טבלה 4). שיעורי ההתגברות בתקופה זו עולים ככל שעולה המשך. בתקופה הקצרה ישנה התחזקות משמעותית של המגמות, כאשר הן החזקות והמובהקות ביותר במשכים של 30 עד 60 דקות, עם שיעור שינוי ממוצע של כ-35%. לעומת זאת, במשכים ארוכים יותר חלה ירידה בשיעור השינוי, ואף היפוך המגמה לשלילי במשכים של 180 ו-240 דקות, אולם מגמות ושיעור השינוי אלה קטנים מאוד ואינם מובהקים.

3.2.2. השוואת עקומות עוצמות-משך-הסתברות לגשם (IDF's)

עוצמות הגשם המחושבות לשתי התקופות מראות ערכים דומים, עם נטייה לעלייה בעיקר במשכים של עד 60 דקות, בעיקר בהסתברויות הנמוכות (איור 7). הגידול במשכים אלו מצביע על גידול לא מובהק של עד 8 מ"מ/שעה בעשור (טבלה 5). השינויים במשכים הארוכים יותר הינם הרבה יותר קטנים.



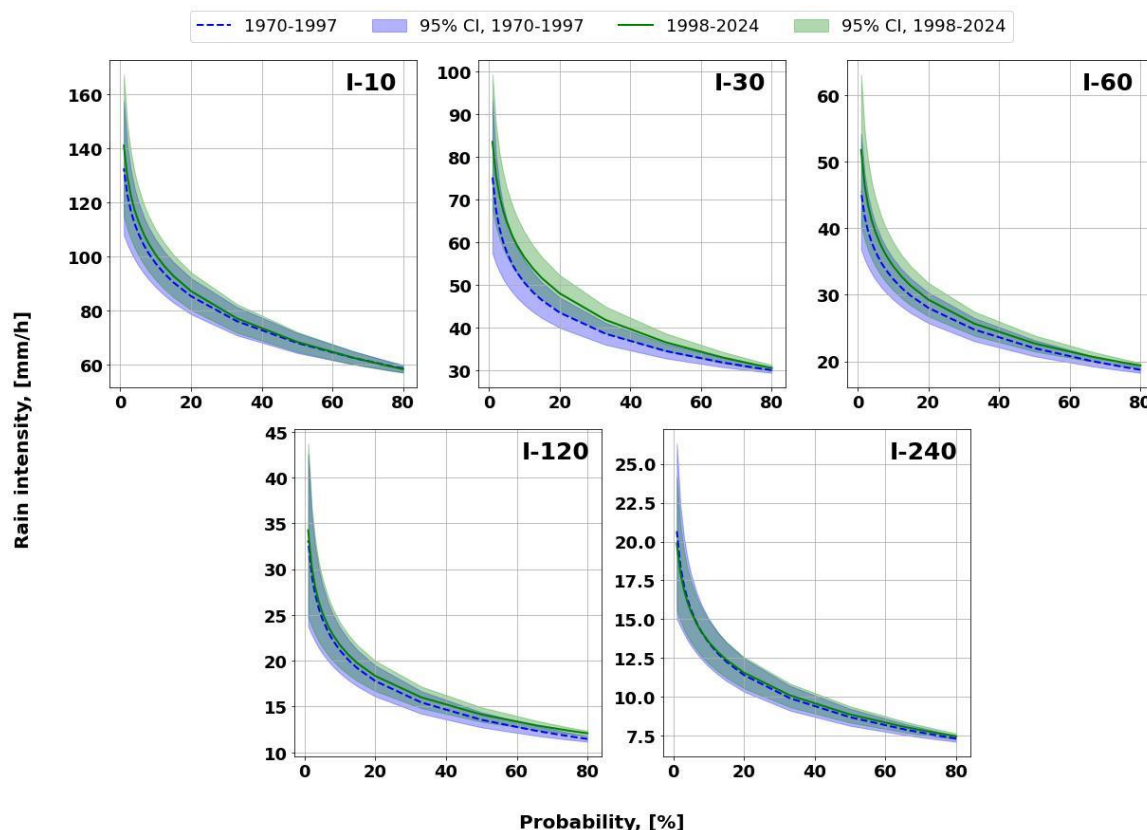
איור 6. עוצמות גשם מקסימאליות שנתיים מ"מ/שעה (בכחול) במישור החוף המרכזי לארבעה משכים: 10, 30, 60 ו-180 דק'. קווים מקווקווים (ירוק ושחור) מייצגים רגרסיה לינארית לתקופה הארוכה והקצרה, בהתאמה. קו רציף אדום מייצג את הערכים המוחלקים בשיטת Lowess.

טבלה 4. שיפועי המגמות ושיעור השינוי בעוצמות הגשם למשכים השונים, באזור מישור החוף המרכזי. מידת המובהקות מסומנת על פי המקרא מתחת לטבלה. שיעור השינוי חושב כיחס בין ערך קו המגמה ב-2024 לעומת 1970.

Period	1970-2024		1995-2024	
	Slope [(mm/h)/Decade]	Change rate	Slope [(mm/h)/Decade]	Change rate
I-10	0.5	3%	2.0	8%
I-15	0.2	2%	3.5	17%
I-20	0.7	7%	3.3	18%
I-30	1	13%	4.0+	29%
I-45	0.9	15%	3.9*	38%
I-60	0.7	15%	2.8+	34%
I-90	0.8	20%	1.4	20%
I-120	0.6	21%	0.2	3%
I-180	0.5	22%	-0.2	-5%
I-240	0.4	20%	-0.1	-2%

p-Value < 0.1 (+); p-Value < 0.05 (*); p-Value < 0.01 (**); p-Value < 0.001 (***)

משרד התחבורה והבטיחות בדרכים
השירות המטאורולוגי



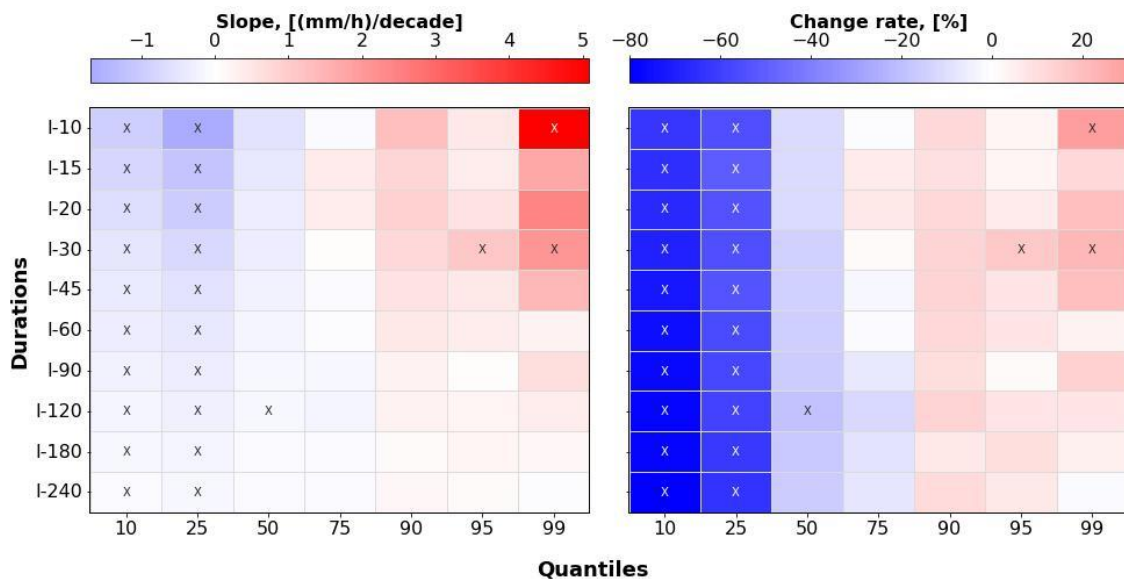
איור 7. עוצמות גשם בהסתברויות שונות לשתי תקופות באזור מישור החוף המרכזי 1970-1997 (סגול) ו-1998-2024 (ירוק), עם רווחי סמך ברמת ביטחון של 95%, למשכים של 10, 30, 60, 120 ו-240 דקות.

טבלה 5. הפרשים בעוצמות הגשם (מ"מ/שעה) בין התקופה הנוכחית (1998-2024) לתקופה המוקדמת (1970-1997), בהסתברויות ובמשכים שונים באזור מישור החוף המרכזי. הפרשים חיוביים ושליליים מסומנים בצבעים אדום וכחול, בהתאמה. הפרשים מובהקים סטטיסטית (ברמה של 5%) מסומנים בצבעים כהים יותר וכוכבית (*).

	P-1%	P-2%	P-3%	P-5%	P-10%	P-20%	P-50%
I-10	8.4	6.7	5.8	4.6	3.2	1.9	0.4
I-20	6.8	5.3	4.6	3.7	2.8	2.2	1.7
I-30	8.2	7.9	7.6	7.1	6	4.5	2
I-60	6.2	4.7	3.8	3	1.9	1.3	0.7
I-120	1.1	0.8	0.8	0.7	0.6	0.5	0.6
I-180	1.1	0.8	0.6	0.5	0.2	0.1	0.2
I-240	-0.9	-0.5	-0.3	-0.1	0.1	0.2	0.2

3.2.3. מגמות באחוזוני הגשם השונים (Quantile regression)

ניתוח המגמות באחוזונים באזור זה מצביע על ירידה מובהקת בשיעורים של עשרות אחוזים בעוצמות הנמוכות (מתחת לאחוזון 25). מנגד, נצפתה עלייה בעוצמת הגשם במרבית מהמשכים החל מאחוזון 90 ומעלה (איור 8). עלייה מובהקת סטטיסטית התקבלה בעוצמות הגשם במשך של 10 דק' באחוזון 99 עם תוספת של כ-5 מ"מ/שעה לעשור ובמשך של 30 דק' באחוזונים 95 ו-99 עם תוספת של 1-2 מ"מ/שעה לעשור. שיעור השינוי הכללי בעוצמות הגשם באחוזונים הגבוהים, במשכים השונים, מגיע לכ-20% ובפרק הזמן הקצר של 10 דק', שיעור השינוי באחוזון 99 מגיע אף ל-30%.



איור 8. שיפועי הרגרסיות בעוצמות הגשם (פאנל שמאלי) ושיעור השינוי בעוצמות הגשם (פאנל ימני) כפי שהתקבל מניתוח רגרסיית האחוזונים במישור החוף המרכזי. X מצוין מגמה מובהקת ברמת מובהקות של 10% לפחות.

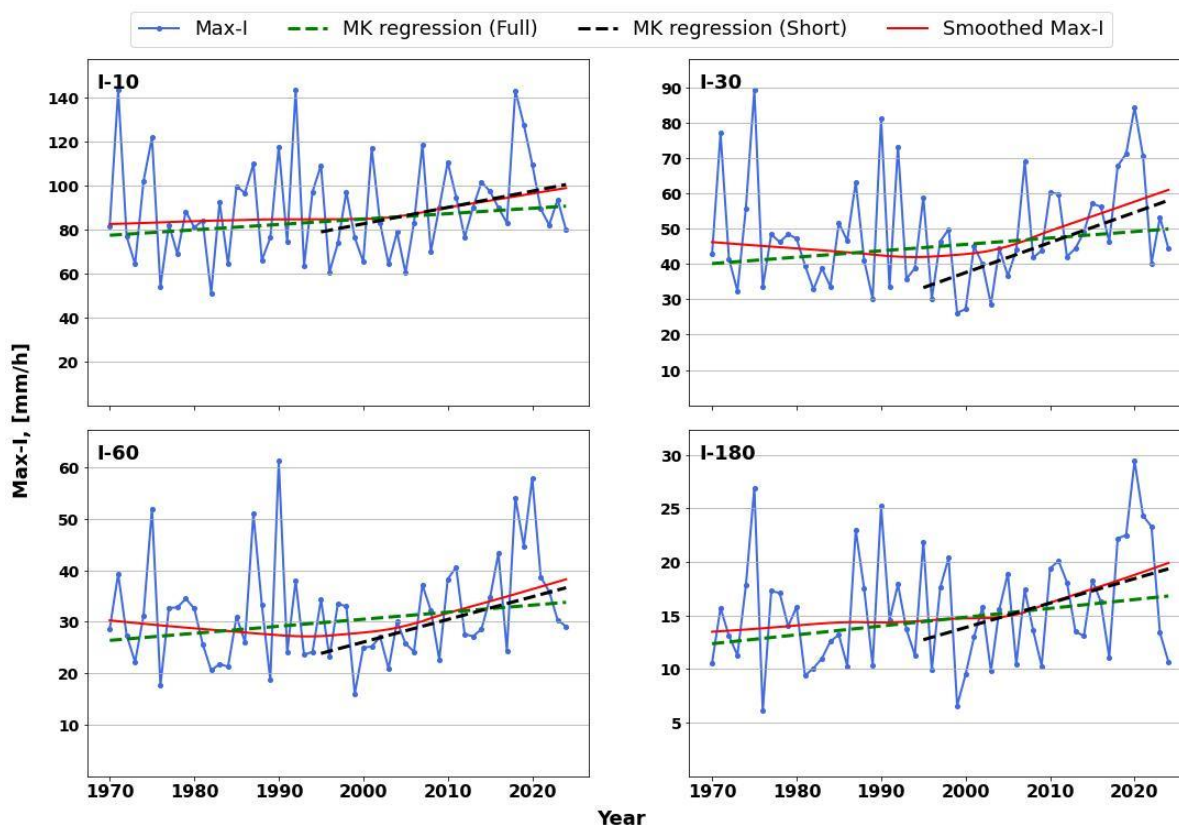
3.3. אזור מישור החוף הדרומי

ניתוח אזור מישור החוף הדרומי מבוסס על התחנות: נמל אשדוד, נמל אשקלון, דורות, גת, חפץ חיים, נגבה, ניצן וקבוצת יבנה.

3.3.1. מגמות גשם בעוצמות מקסימליות

באזור מישור החוף הדרומי נראות מגמות עולות בעוצמות השיא המדודות בכל המשכים בתקופה הארוכה, עם גידול של כ-20% עד 30% באופן גורף (איור 9, טבלה 6). מגמות מובהקות נמצאו בעיקר במשכים הארוכים של 60 דק' ומעלה. בתקופה הקצרה נראית התגברות משמעותית של המגמה, המאופיינת בגידול מובהק בשיעורי המגמות עד לכדי כ-9 מ"מ/שעה בעשור, בעיקר בעוצמות הגשם הקצרות בין 15 דק' ל-60 דק'. שיעורי השינוי בעוצמות הגשם אף עשוי להגיע אל למעלה מ-70% במשך של 30 דקות, המהווה תוספת כוללת בשיעור של כ-13 מ"מ גשם למשך זה. נמצאה גם עלייה מובהקת בעוצמות למשכים הארוכים המאופיינת

בעלייה בשיעור של למעלה מ-50%. בתקופה הקצרה ניתן לראות כי קווי המגמה מקבילים לנתונים המוחלקים, דבר המעיד על יציבות המגמות.



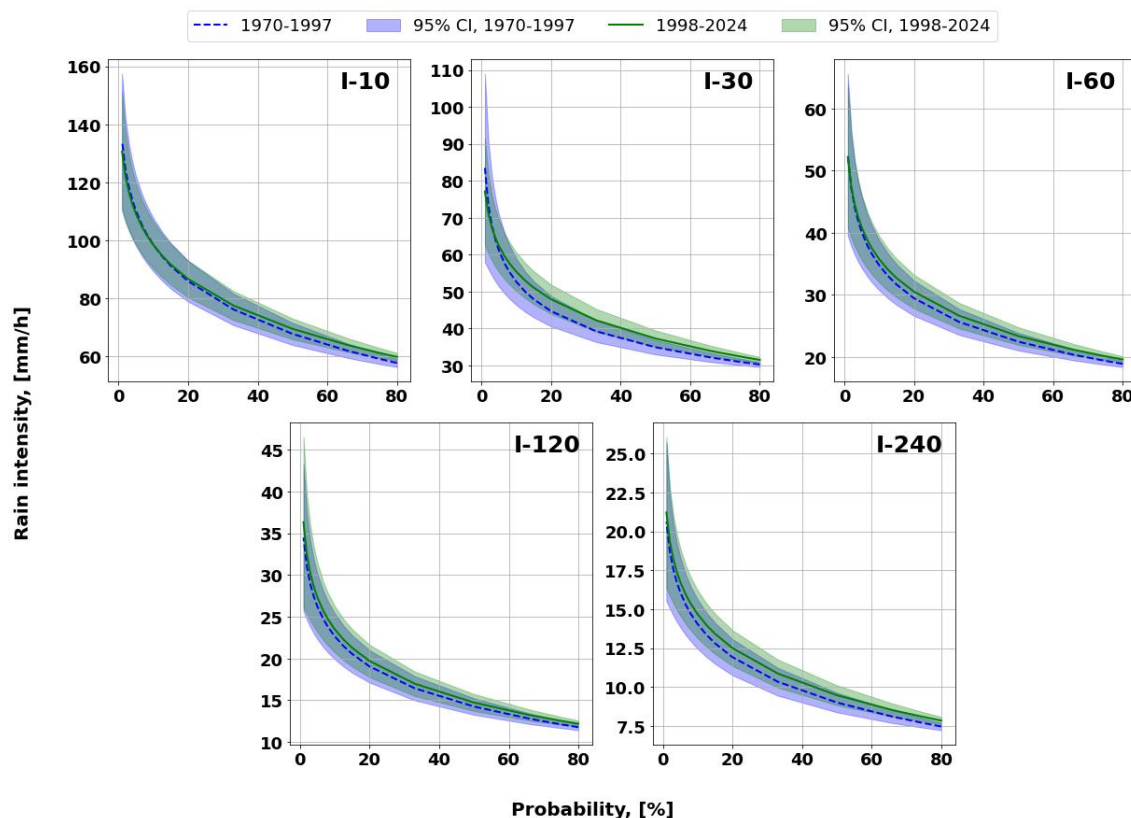
איור 9. עוצמות גשם מקסימאליות שנתיות מ"מ/שעה (בכחול) במישור החוף הדרומי לארבעה משכים: 10, 30, 60 ו-180 דק'. קוים מקווקווים (ירוק ושחור) מייצגים רגרסיה לינארית לתקופה הארוכה והקצרה, בהתאמה. קו רציף אדום מייצג את הערכים המוחלקים בשיטת Lowess.

טבלה 6. שיפועי המגמות ושיעור השינוי בעוצמות הגשם למשכים השונים, באזור מישור החוף הדרומי. מידת המובהקות מסומנת על פי המקרא מתחת לטבלה. שיעור השינוי חושב כיחס בין ערך קו המגמה ב-2024 לעומת 1970.

Period	1970-2024		1995-2024	
	Slope [(mm/h)/Decade]	Change rate	Slope [(mm/h)/Decade]	Change rate
I-10	2.5	17%	7.4	27%
I-15	2.6	23%	8.9*	42%
I-20	2.5	26%	8.1*	46%
I-30	1.8	24%	8.5*	74%
I-45	1.4	23%	6.0**	61%
I-60	1.4+	28%	4.4*	53%
I-90	0.9	24%	3.6+	56%
I-120	0.7	25%	3.4+	64%
I-180	0.8+	36%	2.3+	52%
I-240	0.6+	33%	1.8+	53%

p-Value < 0.1 (+); p-Value < 0.05 (*); p-Value < 0.01 (**); p-Value < 0.001 (***)

מדינת ישראל
משרד התחבורה והבטיחות בדרכים
השירות המטאורולוגי



איור 10. עוצמות גשם בהסתברויות שונות לשתי תקופות באזור מישור החוף הדרומי: תקופה מוקדמת 1997-1970 (סגול) ותקופה נוכחית 2024-1998 (ירוק), עם רווחי סמך ברמת ביטחון של 95%, למשכים של 10, 30, 60, 120 ו-240 דקות.

טבלה 7. הפרשים בעוצמות הגשם (מ"מ/שעה) בין התקופה הנוכחית (1998-2024) לתקופה המוקדמת (1970-1997), בהסתברויות ובמשכים שונים באזור מישור החוף הדרומי. הפרשים חיוביים ושלייליים מסומנים בצבעים אדום וכחול, בהתאמה. הפרשים מובהקים סטטיסטית (ברמה של 5%) מסומנים בצבעים כהים יותר וכוכבית (*).

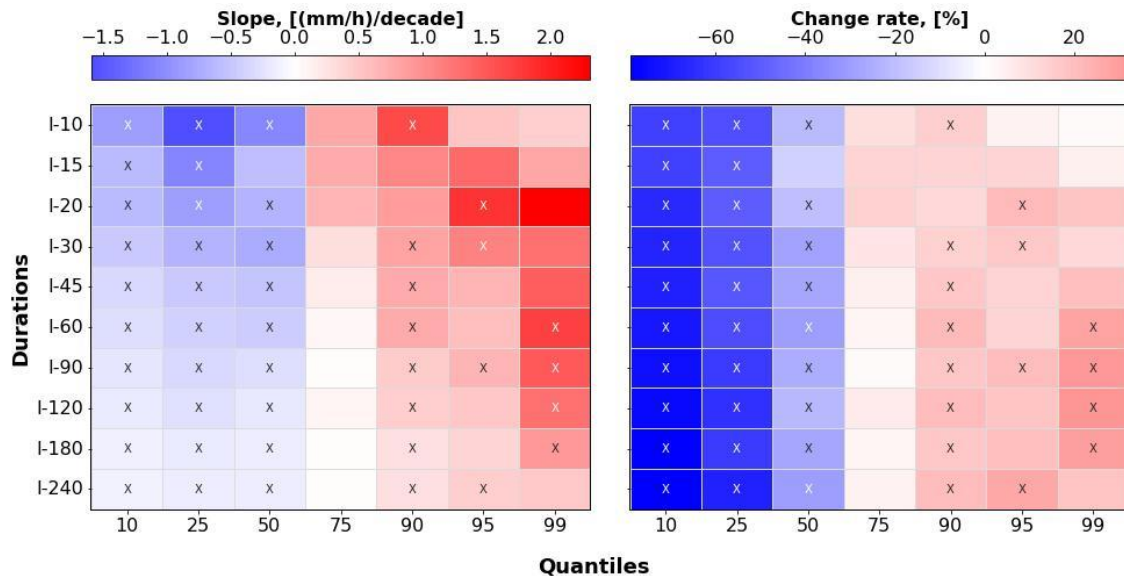
	P-1%	P-2%	P-3%	P-5%	P-10%	P-20%	P-50%
I-10	-3.6	-2.5	-1.9	-1.1	-0.1	0.8	1.7
I-20	-8.8	-4.3	-2.1	0.1	2.1	3.1	2.6
I-30	-6.3	-2.4	-0.6	1.2	2.8	3.2	2.4
I-60	-0.4	0.2	0.4	0.8	1	1	0.9
I-120	1.8	1.5	1.3	1.1	0.9	0.7	0.4
I-180	1.6	1.4	1.2	1.1	0.9	0.7	0.4
I-240	0.6	0.7	0.6	0.6	0.7	0.6	0.5

3.3.2. השוואת עקומות עוצמות-משך-הסתברות לגשם (IDF's)

השוואת עוצמות הגשם המחושבות מתוך ה-IDF בין התקופה המוקדמת למאוחרת, מצביעה על הבדלים קטנים יחסית בעוצמות. במשכים הקצרים בהסתברויות הנמוכות נצפתה נטייה להפחתה בעוצמות (איור 10, טבלה 7), ממצא הנראה לכאורה סותר את המוצג בפרק 3.3.1. הסיבה לכך נעוצה בעובדה שבתקופה המוקדמת ישנם ערכים בסדרי גודל הדומים לאלו שבתקופה המאוחרת, ביחוד לקראת סופה שבה מתרכזים הערכים הגבוהים ביותר. כתוצאה מכך, התקבלו ערכי עוצמות גשם דומים בהסתברויות השונות בשתי התקופות. חשוב להזכיר, שחישוב ההסתברויות בוצע בשתי התקופות, תחת הנחת הסטאציונאריות. ההבדל המהותי בין שתי התקופות מתבטא בתזמון הופעת הערכים המקסימליים. קרי, בתקופה המוקדמת הערכים המקסימליים התפזרו לאורך כל התקופה, מה שהוביל לקו מגמה מתון יחסית. לעומת זאת, בתקופה המאוחרת נצפה גידול מתמשך ועקבי בערכים, כאשר עיקר ערכי המקסימום התרכזו בסוף התקופה (מה שמעיד על היעדר סטאציונאריות בסדרה).

3.3.3. מגמות באחוזוני הגשם השונים (Quantile regression)

באזור החוף הדרומי ישנה הפחתה מובהקת בעוצמות הגשם באחוזונים הנמוכים בתקופה הארוכה, כאשר נראית ירידה מובהקת באופן כמעט גורף בכל המשכים עד אחוזון 50 (איור 11). מאחוזון 90 ומעלה ישנה עלייה ברובה מובהקת בעוצמות הגשם.



איור 11. שיפועי הרגרסיות בעוצמות הגשם (פאנל שמאלי) ושיעור השינוי בעוצמות הגשם (פאנל ימני) כפי שהתקבל מניתוח רגרסיית האחוזונים במישור החוף הדרומי. X מציין מגמה מובהקת ברמת מובהקות של 10% לפחות.

3.4. אזור העמקים

ניתוח אזור העמקים מבוסס על התחנות: עפולה (ניר העמק), דפנה, איילת השחר, כפר בלום, נווה יער, תבור (כדורי), תל יוסף וצמח.

3.4.1. מגמות בעוצמת גשם מקסימאלית

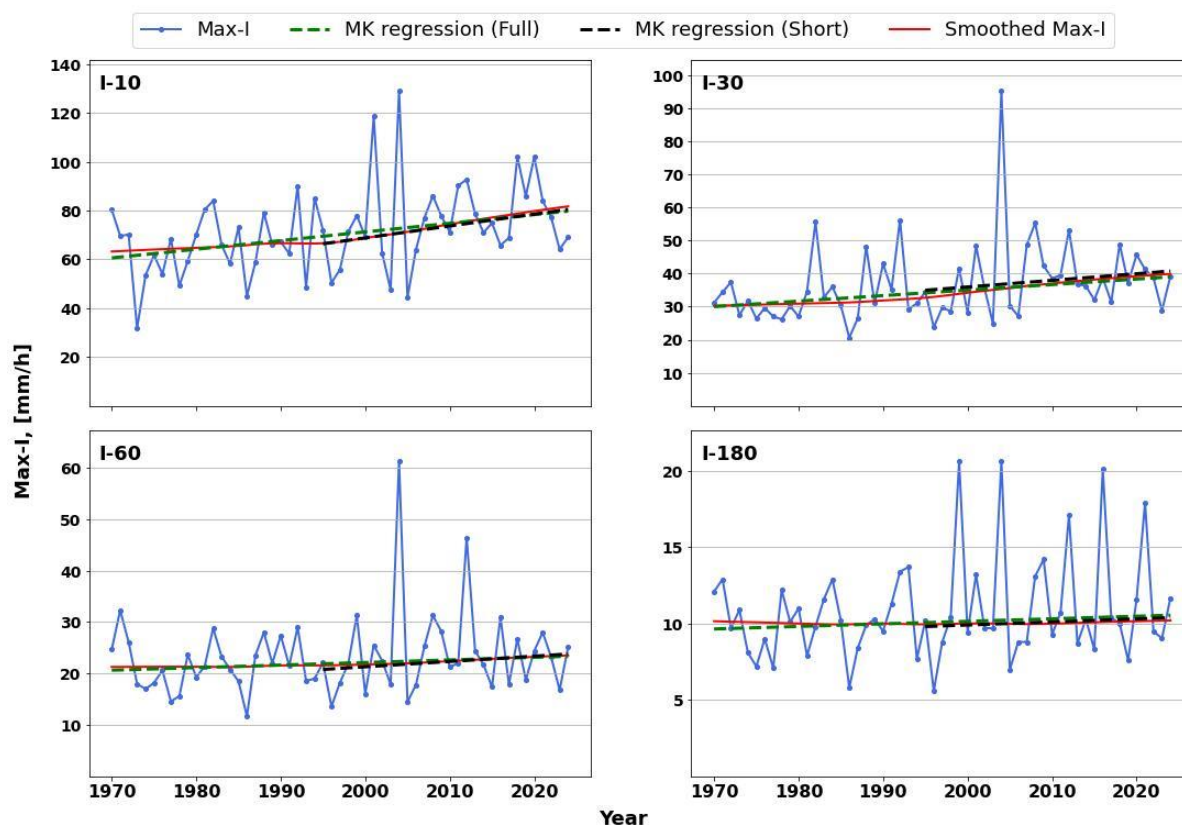
ניתוח עוצמות הגשם המקסימאליות השנתיות באזור העמקים מצביע על מגמות שינוי משמעותיות, המתבטאות בעיקר במשכים הקצרים עד 45 דקות (איור 12, טבלה 8). המגמות בתקופה הארוכה מצביעות על התחזקות מובהקת בעוצמות הגשם בשיעור של למעלה מ-3 מ"מ/שעה בעשור, במשכים של 10 ו-15 דקות, עם שיעור גידול של יותר מ-30% בעוצמות הגשם. גם עוצמות הגשם של 20 ו-30 דק' הציגו עלייה מובהקת בשיעור של 2.6 ו-1.7 מ"מ/שעה לעשור, המלווה בשיעור גידול כללי של 37%-30%, בהתאמה. בתקופה הקצרה המגמות אומנם חזקות יותר בכל המשכים, עם שיפועים של עד 4.9 מ"מ/שעה לעשור, אך הן אינן מובהקות סטטיסטית, כאשר שיעורי השינוי בתקופה זו מתונים יותר (17%-28%). במשכים הארוכים (מעל 45 דקות) נצפו שיעורי שינוי דומים יחסית בין שתי התקופות, כאשר במשך של 240 דקות נמצאה מגמה מובהקת עם שינוי של יותר מ-20% בתקופה הארוכה (שיעור דומה נצפה גם בתקופה הקצרה). במשכים של 60-120 דקות, בשתי התקופות נצפו שינויים קטנים ולא מובהקים בעוצמות הגשם, עם שיפועים נמוכים (בין 0 ל-1 מ"מ/שעה לעשור) ושיעורי שינוי של 2%-14%. במשכים אלו, ערכי השיא מתפרסים בצורה די אחידה לאורך התקופה המאוחרת ולכן אין כמעט שינוי במגמה, אולם ערכים אלו התקבלו בשיעור נמוך בהרבה (אם בכלל) בתקופה המוקדמת. לדוגמה, בתקופה המוקדמת (עד 1997) עוצמות הגשם לא עברו את סף ה-15 מ"מ/שעה למשך של 180 דקות, ואילו במחצית השנייה של הנתונים סף זה נחצה 5 פעמים. גם במשך של 60 דקות, בסף של 30 מ"מ/שעה נראית תמונה דומה, כאשר במחצית השנייה סף זה נחצה רק פעם אחת (1971), ואילו במחצית השנייה סף זה נחצה 5 פעמים (איור 12).

יש לציין כי ישנו דמיון בשיפועי המגמות שנמצאו בין התקופה הארוכה לקצרה (איור 12, טבלה 8). כאשר שני קווי המגמה מקבילים ואף חופפים לפחות את רובם של הנתונים המוחלקים, דבר המצביע על יציבות המגמה באזור זה לאורך התקופה הארוכה.

3.4.2. השוואת עקומות עוצמות-משך-הסתברות לגשם (IDF's)

עוצמות הגשם המחושבות לשתי תקופות עוקבות (מוקדמת ומאוחרת) באזור העמקים, מצביעות על הגברה בכל המשכים ובכל ההסתברויות (איור 13, טבלה 9). במשכים הקצרים, הגידול באזור זה הינו דרמטי, בו נצפתה הכפלה בהסתברות לאירוע מסדר גודל דומה וכן תוספת של יותר מ-20% בעוצמת הגשם לאותה ההסתברות בתקופה האחרונה. כך למשל, אירוע בתקופה המוקדמת, במשך של 30 דקות שהיה בהסתברות של 20% (כ-30 מ"מ/שעה), מתקבל בתקופה המאוחרת בהסתברות של כ-40%. דוגמה נוספת, בתקופה המוקדמת, עוצמת הגשם במשך 10 דקות, בהסתברות של 10% הייתה כ-65 מ"מ/שעה, בעוד שבתקופה המאוחרת הערך עומד על 82 מ"מ/שעה, קרי, גידול של 25% בעוצמות. במשכים 60 עד 120 דקות נראה גם כן גידול בעוצמות, וזאת למרות שיעור השינוי המתון מאוד שנמצא במשכים אלו (3.4.1), עקב נוכחות של עוצמות גבוהות משמעותית במהלך התקופה המאוחרת לעומת המוקדמת (איור 12). עוד עולה כי קיימת תוספת משמעותית ומובהקת גם בהסתברויות 5% - 50% במשכים הקצרים 10-30 דקות (טבלה 9). כך למשל,

אירוע במשך 10 דק', בהסתברות של 20% (זמן חזרה של 5 שנים) מקבל תוספת משמעותית של כ-14 מ"מ/שעה ואירוע בהסתברות של 50% (זמן חזרה של שנתיים) מקבל תוספת משמעותית של כ-10 מ"מ/שעה.



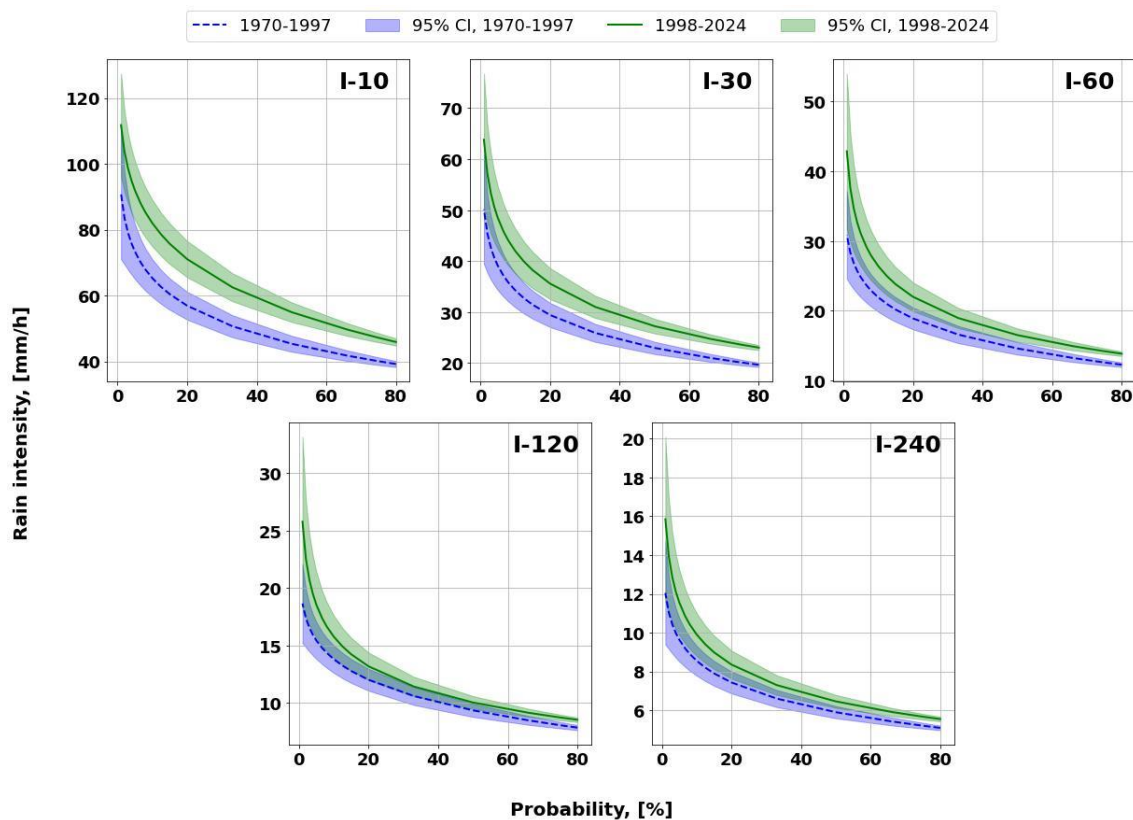
איור 12. עוצמות גשם מקסימאליות שנתיים מ"מ/שעה (בכחול) באזור העמקים לארבעה משכים: 10, 30, 60 ו-180 דק'. קווים מקווקווים (ירוק ושחור) מייצגים רגרסיה לינארית לתקופה הארוכה והקצרה, בהתאמה. קו רציף אדום מייצג את הערכים המוחלקים בשיטת Lowess.

טבלה 8. שיפועי המגמות ושיעור השינוי בעוצמות הגשם למשכים השונים, באזור העמקים. מידת המובהקות מסומנת על פי המקרא מתחת לטבלה. שיעור השינוי חושב כיחס בין ערך קו המגמה ב-2024 לעומת 1970.

Period	1970-2024		1995-2024	
	Slope [(mm/h)/Decade]	Change rate	Slope [(mm/h)/Decade]	Change rate
I-10	3.5**	32%	4.9	21%
I-15	3.0**	36%	4.8+	28%
I-20	2.6**	37%	3.6	24%
I-30	1.7**	30%	2.0	17%
I-45	0.7	16%	1.6	18%
I-60	0.5	13%	1.0	14%
I-90	0	0%	0.3	5%
I-120	0	2%	0.5	11%
I-180	0.2	9%	0.2	6%
I-240	0.3+	22%	0.6	23%

p-Value < 0.1 (+); p-Value < 0.05 (*); p-Value < 0.01 (**); p-Value < 0.001 (***)

מדינת ישראל
משרד התחבורה והבטיחות בדרכים
השירות המטאורולוגי



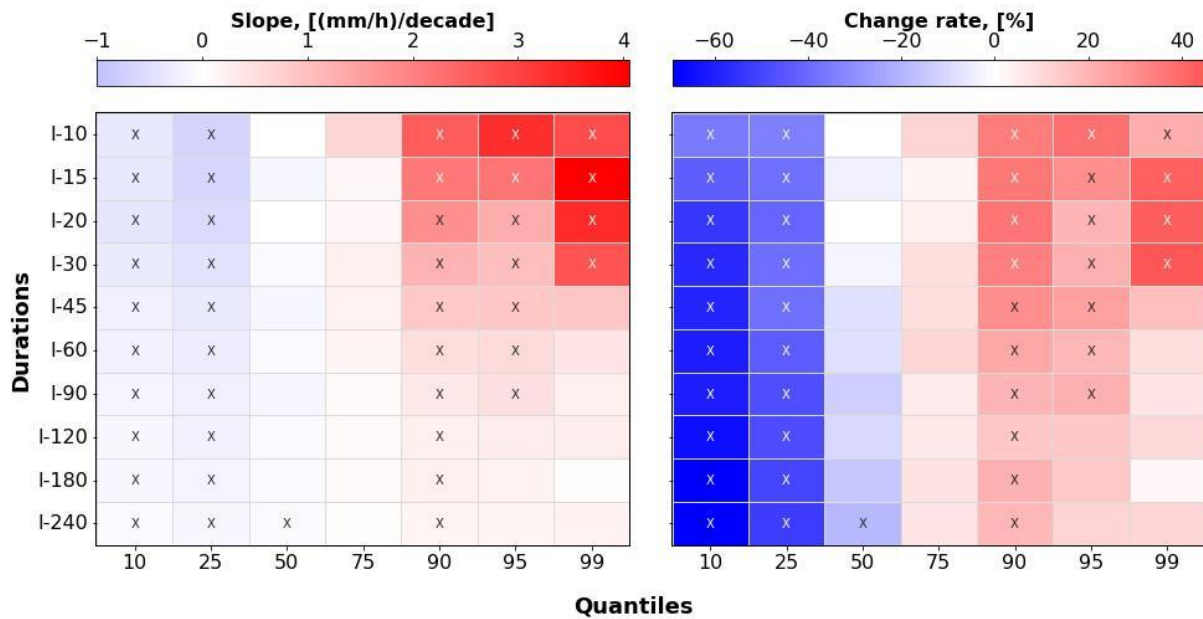
איור 13. עוצמות גשם בהסתברויות שונות לשתי תקופות באזור העמקים: תקופה מוקדמת 1970-1997 (סגול) ותקופה נוכחית 1998-2024 (ירוק), עם רווחי סמך ברמת ביטחון של 95%, למשכים של 10, 30, 60, 120 ו-240.

טבלה 9. הפרשים בעוצמות הגשם (מ"מ/שעה) בין התקופה הנוכחית (1998-2024) לתקופה המוקדמת (1970-1997), בהסתברויות ובמשכים שונים באזור העמקים. הפרשים חיוביים ושליליים מסומנים בצבעים אדום וכחול, בהתאמה. הפרשים מובהקים סטטיסטית (ברמה של 5%) מסומנים בצבעים כהים יותר וכוכבית (*).

	P-1%	P-2%	P-3%	P-5%	P-10%	P-20%	P-50%
I-10	20.9	20.3	19.6	18.6*	16.7*	14.2*	9.6*
I-20	14.4	13	12.2	11.1	9.6	7.9*	5.4*
I-30	13.6	11.7	10.7	9.4	7.7	6.2*	4.3*
I-60	12	9.2	7.9	6.3	4.5	3.1	1.9
I-120	7.1	5.1	4.2	3.1	2	1.2	0.6
I-180	5.1	3.7	3.1	2.3	1.5	1	0.6
I-240	3.9	2.9	2.5	2	1.3	1	0.6

3.4.3. ניתוח מגמות באחוזוני הגשם השונים (Quantile regression)

באזור העמקים, נצפתה מגמת ירידה מובהקת בעוצמות הגשם באחוזונים הנמוכים, בכל המשכים שנבדקו, עד לאחוזון 25. לעומת זאת, באחוזונים הגבוהים ניתן לראות עלייה ברובה מובהקת בעוצמות הגשם, אשר בולטת במיוחד העלייה במשכי הגשם של עד 60 דק'. במשכים אלו, קצב העלייה הגיע עד לכ-4 מ"מ/שעה לעשור, עם שיעור שינוי של עד כ-40% (איור 14).



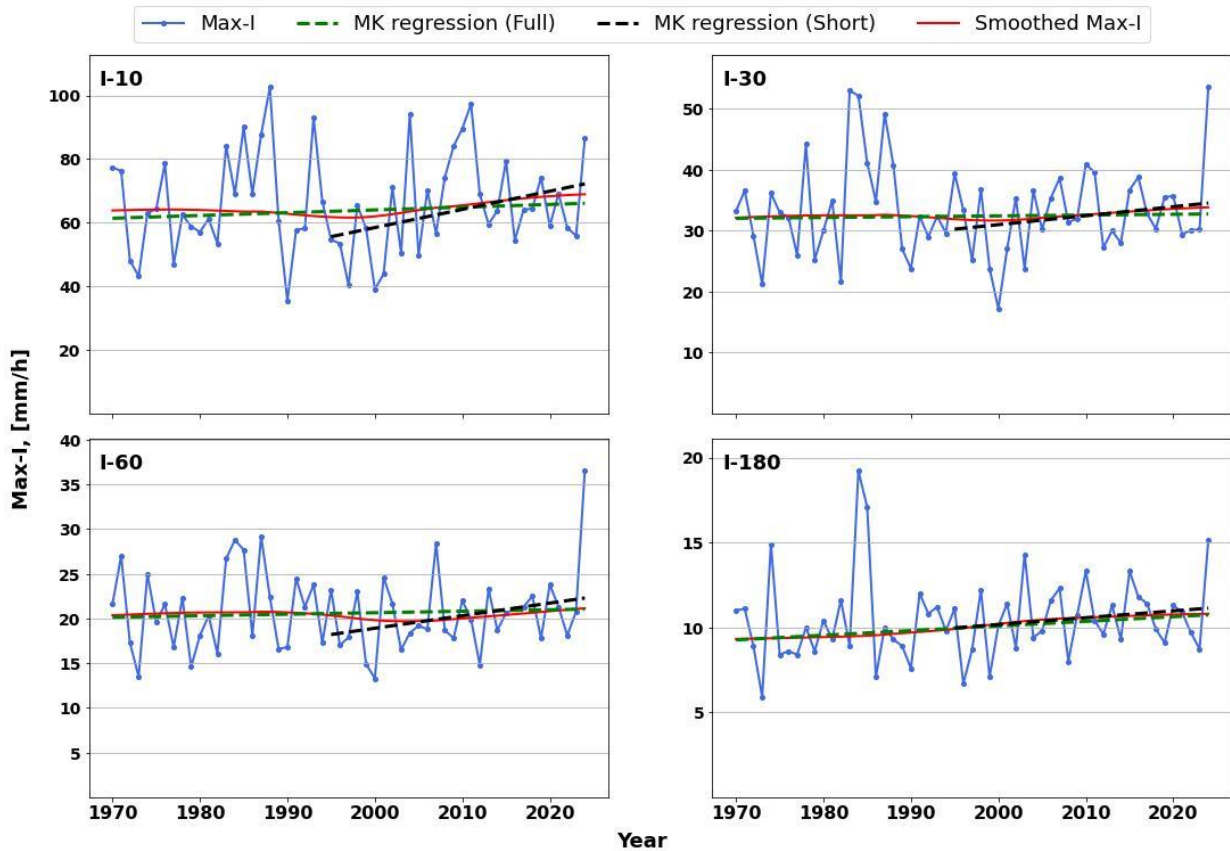
איור 14. שיפועי הרגרסיות בעוצמות הגשם (פאנל שמאלי) ושיעור השינוי בעוצמות הגשם (פאנל ימני) כפי שהתקבל מניתוח רגרסיית האחוזונים באזור העמקים. X מצוין מגמה מובהקת ברמת מובהקות של 10% לפחות.

3.5. אזור הרי הצפון

ניתוח אזור הרי הצפון מבוסס על התחנות: עמיעד, דיר-חנא, אשחר, כפר גלעדי, מרום גולן – פיכמן, צפת הר כנען.

3.5.1. מגמות בעוצמות גשם מקסימאליות

המגמות בעוצמות הגשם המקסימאליות השנתיות באזור הרי הצפון (איור 15, טבלה 10) מעידות על נטייה לעלייה קלה, כאשר המגמות הגבוהות ביותר בתקופה הארוכה נצפו במשכים הקצרים (10 ו-15 דק', בשיעור של כחצי מ"מ/שעה לעשור, עם שיעור שינוי ממוצע של כ-7%. מגמות אלו, אינן מובהקות סטטיסטית בתקופה הארוכה באף אחד מן המשכים. בתקופה הקצרה ישנו גידול בעוצמות הגשם, בעיקר במשכים הקצרים. במשך של 10 דק' נמצא גידול מובהק בשיעור של 5.7 מ"מ/שעה לעשור עם תוספת כללית של 30%. במשכים 30 עד 60 דק' נמצא גידול ממוצע של כ-1.5 מ"מ/שעה לעשור, המוביל לתוספת ממוצעת של כ-17%.



איור 15. עוצמות גשם מקסימאליות שנתיות מ"מ/שעה (בכחול) בהרי הצפון לארבעה משכים: 10, 30, 60 ו-180 דק'. קווים מקווקווים (ירוק ושחור) מייצגים רגרסיה לינארית לתקופה הארוכה והקצרה, בהתאמה. קו רציף אדום מייצג את הערכים המוחלקים בשיטת Lowess.

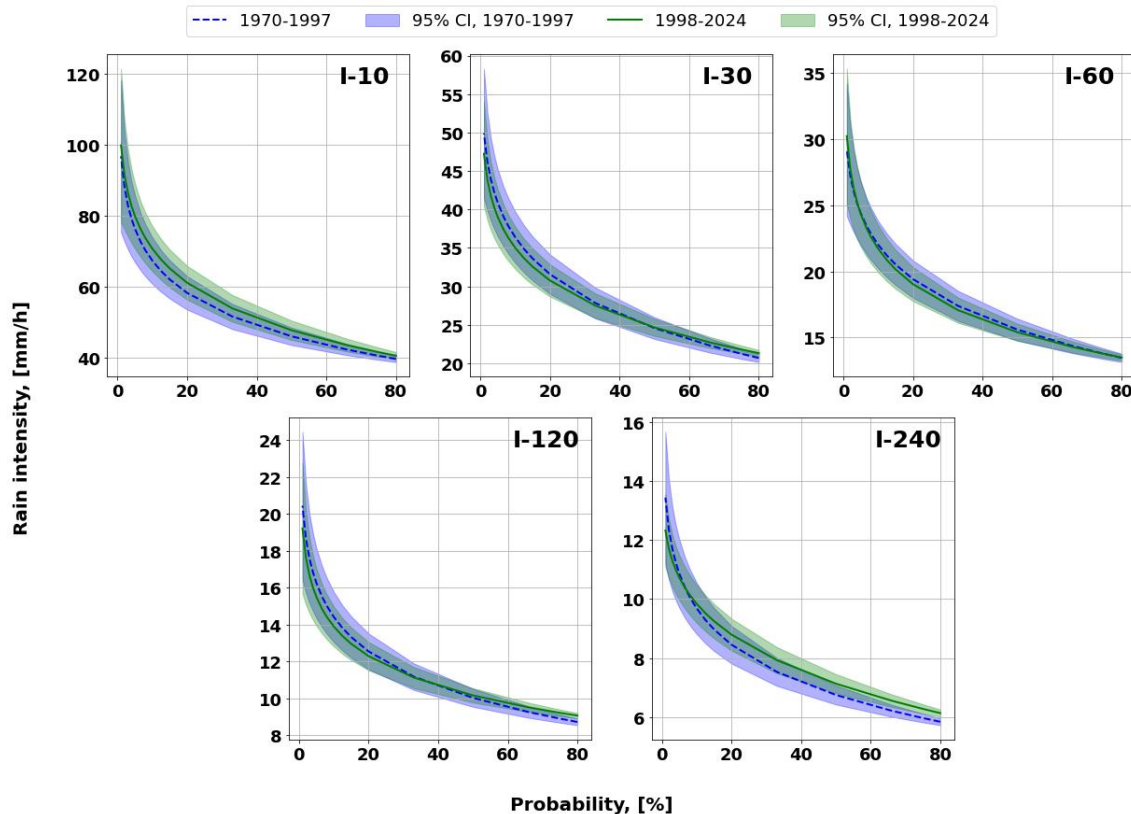
טבלה 10. שיפועי המגמות ושיעור השינוי בעוצמות הגשם למשכים השונים, באזור הרי הצפון. מידת המובהקות מסומנת על פי המקרא מתחת לטבלה. שיעור השינוי חושב כיחס בין ערך קו המגמה ב-2024 לעומת 1970.

Period	1970-2024		1995-2024	
	Slope [(mm/h)/Decade]	Change rate	Slope [(mm/h)/Decade]	Change rate
I-10	0.9	8%	5.7+	30%
I-15	0.5	6%	2.7	16%
I-20	0.2	3%	1.6	11%
I-30	0.1	2%	1.5	14%
I-45	0.2	4%	1.7+	22%
I-60	0.2	4%	1.4	22%
I-90	0.1	3%	0.6	13%
I-120	0.2	11%	0.9	23%
I-180	0.3	16%	0.4	12%
I-240	0.2	14%	0.2	7%

p-Value < 0.1 (+); p-Value < 0.05 (*); p-Value < 0.01 (**); p-Value < 0.001 (***)

3.5.2. השוואת עקומות עוצמות-משך-הסתברות לגשם (IDF's)

השוואת העוצמות המחושבות מהתקופה המאוחרת לעומת המוקדמת מראה כי ישנה עלייה קלה בעוצמות הגשם במשך של 10 דק' בכלל ההסתברויות. במשכי הגשם ל-20 ו-30 דק' קיימת נטייה להפחתה בעוצמה בהסתברויות הגבוהות. בשאר המשכים וההסתברויות קיימים שינויים מינוריים לשני הכיוונים. (איור 16, טבלה 11).



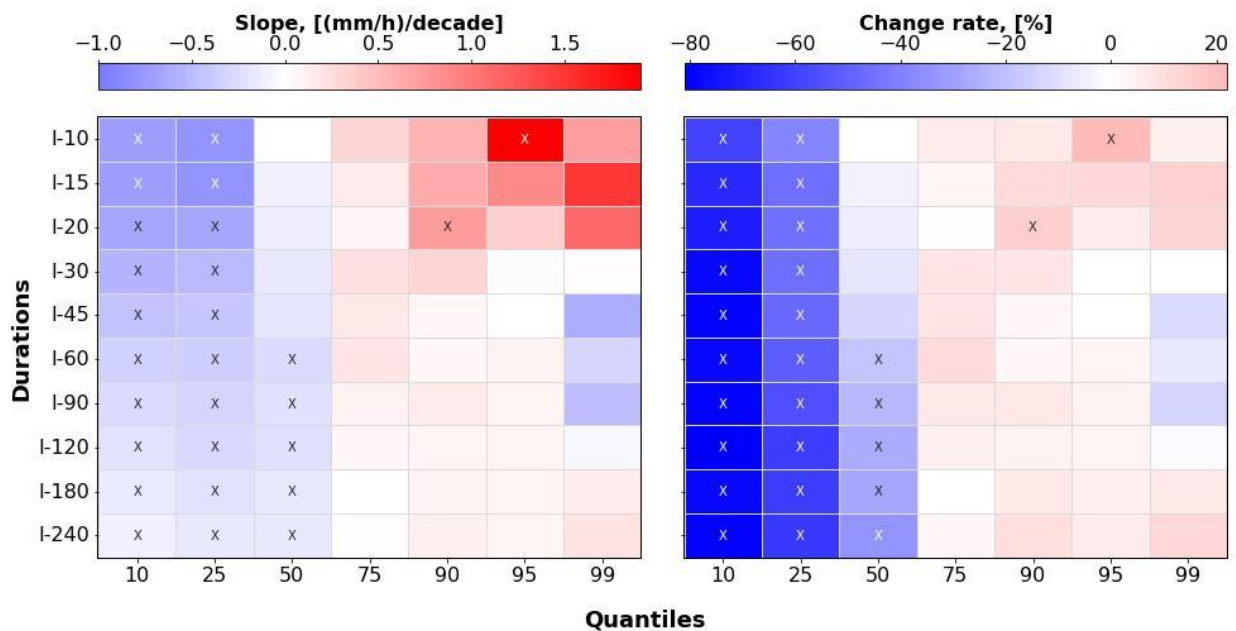
איור 16. עוצמות גשם בהסתברויות שונות לשתי תקופות באזור הרי הצפון: תקופה מוקדמת 1970-1997 (סגול) ותקופה נוכחית 1998-2024 (ירוק), עם רווחי סמך ברמת ביטחון של 95%, למשכים של 10, 30, 60, 120 ו-240.

טבלה 11. הפרשים בעוצמות הגשם (מ"מ/שעה) בין התקופה הנוכחית (1998-2024) לתקופה המוקדמת (1970-1997), בהסתברויות ובמשכים שונים באזור הרי הצפון. הפרשים חיוביים ושליילים מסומנים בצבעים אדום וכחול, בהתאמה. הפרשים מובהקים סטטיסטית (ברמה של 5%) מסומנים בצבעים כהים יותר וכוכבית (*).

	P-1%	P-2%	P-3%	P-5%	P-10%	P-20%	P-50%
I-10	3.1	3.5	3.6	3.6	3.3	2.8	1.7
I-20	-4.4	-2.6	-1.7	-0.7	0.3	1	1
I-30	-2.7	-2.3	-2.1	-1.8	-1.4	-0.8	0.1
I-60	1	0.4	0.3	0	-0.3	-0.4	-0.2
I-120	-1.3	-1.1	-0.9	-0.8	-0.5	-0.2	0.2
I-180	-1.5	-0.8	-0.5	-0.2	0.1	0.3	0.4
I-240	-1.1	-0.7	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.4

3.5.3. ניתוח מגמות באחוזוני הגשם השונים (Quantile regression)

ניתוח רגרסיית האחוזונים באזור הרי הצפון מראה כי ישנה היחלשות במגמות של עוצמות הגשם, בכל האחוזונים הנמוכים מהחציון, כאשר במרבית המקרים היא גם מובהקת ושיעורה הוא בין 40%-ל-80% (איור 17). עם העלייה באחוזונים, נראית נטייה לעלייה במגמות, כאשר באחוזון 75 מרבית המגמות כבר חיוביות. עיקר השינוי בולט במשכים הקצרים 10 עד 20 דק', עם עלייה של כ-1.5 מ"מ/שעה לעשור, המובילה לתוספת של עד כ-20% באחוזונים העליונים. בשאר המשכים, שיעור השינוי והמגמות שנמצאו באחוזונים אלו הינם נמוכים מאוד ואינם מובהקים.



איור 17. שיפועי הרגרסיות בעוצמות הגשם (פאנל שמאלי) ושיעור השינוי בעוצמות הגשם (פאנל ימני) כפי שהתקבל מניתוח רגרסיית האחוזונים באזור הרי הצפון הצפוניים. X מציינ מגמה מובהקת ברמת מובהקות של 10% לפחות.

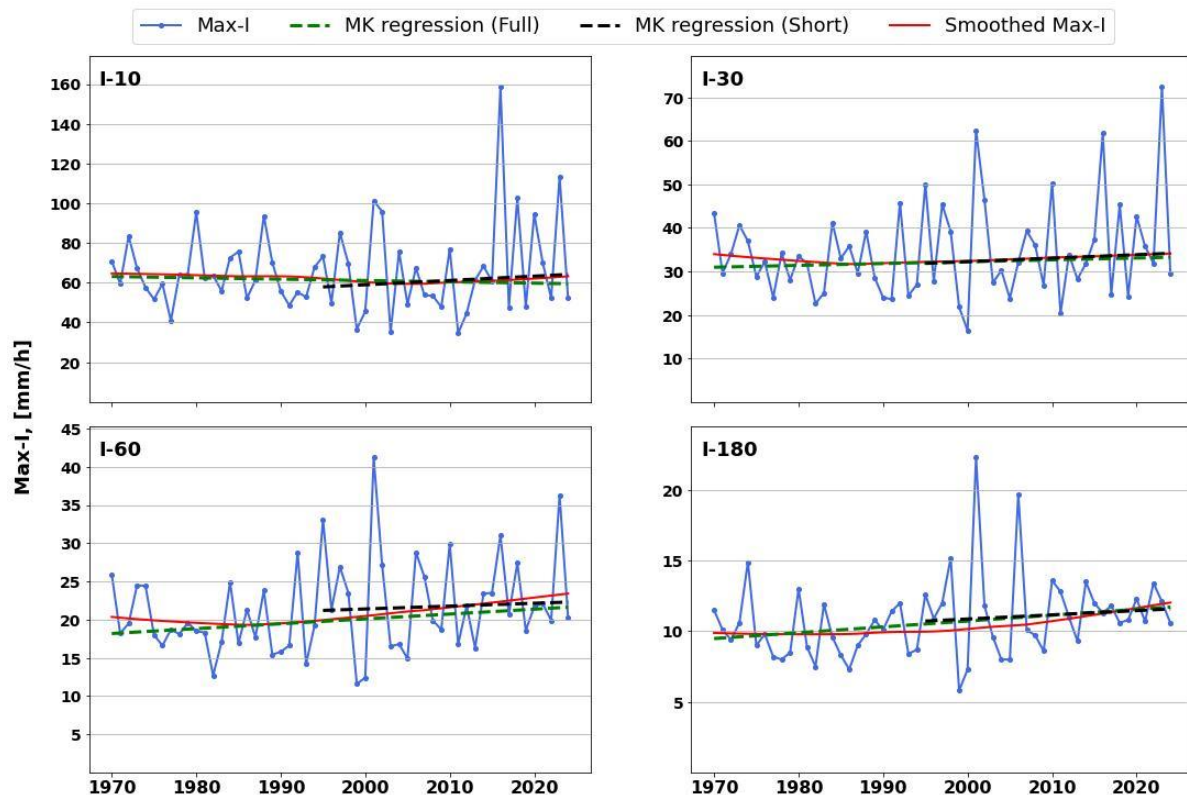
3.6. אזור הרי המרכז

אזור הרי המרכז מורכב מן התחנות: אריאל, בית-ג'מל, ירושלים (מרכז), מעלה גלבוע, ראש צורים וצובה.

3.6.1. מגמות גשם בעוצמות מקסימאליות

בהרי המרכז המגמות בעוצמות השיא השנתיות למשכים הקצרים (10 ו-15 דקות) בתקופה הארוכה נמצאות במגמת ירידה קטנה ולא מובהקת סטטיסטית בשיעור הפחתה של כ-5% בעוצמות הגשם לאורך התקופה (איור 18 טבלה 12). לעומת זאת, בתקופה הקצרה ישנה עלייה בעוצמות במשכים אלו בשיעור של כ-2 מ"מ/שעה לעשור, המוביל לתוספת כללית (לא מובהקת סטטיסטית) של כ-10%. יש לציין, כי במהלך התקופה הקצרה, נחצה סף ה-100 מ"מ/שעה במשך הגשם ל-10 דק', ארבע פעמים (2001, 2016, 2018 ו-2023), בעוד שבשנים קודמות לשנת 2000, הוא לא נחצה אף לא פעם אחת. ההתגברות הזו בעוצמות השיא נראית היטב גם במשך של 30 דק', שם סף של 60 מ"מ/שעה נחצה במהלך התקופה האחרונה 3 פעמים. עוצמות אלו לא הגיעו לסף זה אף לא פעם אחת בין 1970-1994. עם זאת, היחס בין האות לרעש (Signal to noise ratio) גבוה, במיוחד במחצית השנייה של הסדרה, דבר שמקשה על מציאת המגמה.

בתקופה הארוכה ניתן לראות בבירור כי עם התארכות המשכים ישנו גידול במגמות וכן בשיעור השינוי, כך שבמשכים ארוכים מ-60 דק' מתקבלות מגמות חיוביות ומובהקות עם עלייה כללית בשיעור של 20%-30%. בתקופה הקצרה לעומת זאת, קיימת נטייה לעלייה קטנה ולא מובהקת, המובילה לתוספת של כ-10%-15%.



איור 18. עוצמות גשם מקסימאליות שנתיות מ"מ/שעה (בכחול) בהרי המרכז לארבעה משכים: 10, 30, 60 ו-180 דק'. קווים מקווקווים (ירוק ושחור) מייצגים רגרסיה לינארית לתקופה הארוכה והקצרה, בהתאמה. קו רציף אדום מייצג את הערכים המוחלקים בשיטת Lowess.

טבלה 12. שיפועי המגמות ושיעור השינוי בעוצמות הגשם למשכים השונים, באזור הרי המרכז. מידת המובהקות מסומנת על פי המקרא מתחת לטבלה. שיעור השינוי חושב כיחס בין ערך קו המגמה ב-2024 לעומת 1970.

Period	1970-2024		1995-2024	
	Slope [(mm/h)/Decade]	Change rate	Slope [(mm/h)/Decade]	Change rate
I-10	-0.7	-6%	2.2	11%
I-15	-0.5	-6%	2.0	12%
I-20	0	0%	1.4	11%
I-30	0.4	7%	0.8	7%
I-45	0.7	16%	0.9	11%
I-60	0.6	19%	0.4	5%
I-90	0.6*	24%	0.8	14%
I-120	0.5*	21%	0.6	14%
I-180	0.4*	24%	0.3	8%
I-240	0.4*	26%	0.4	14%

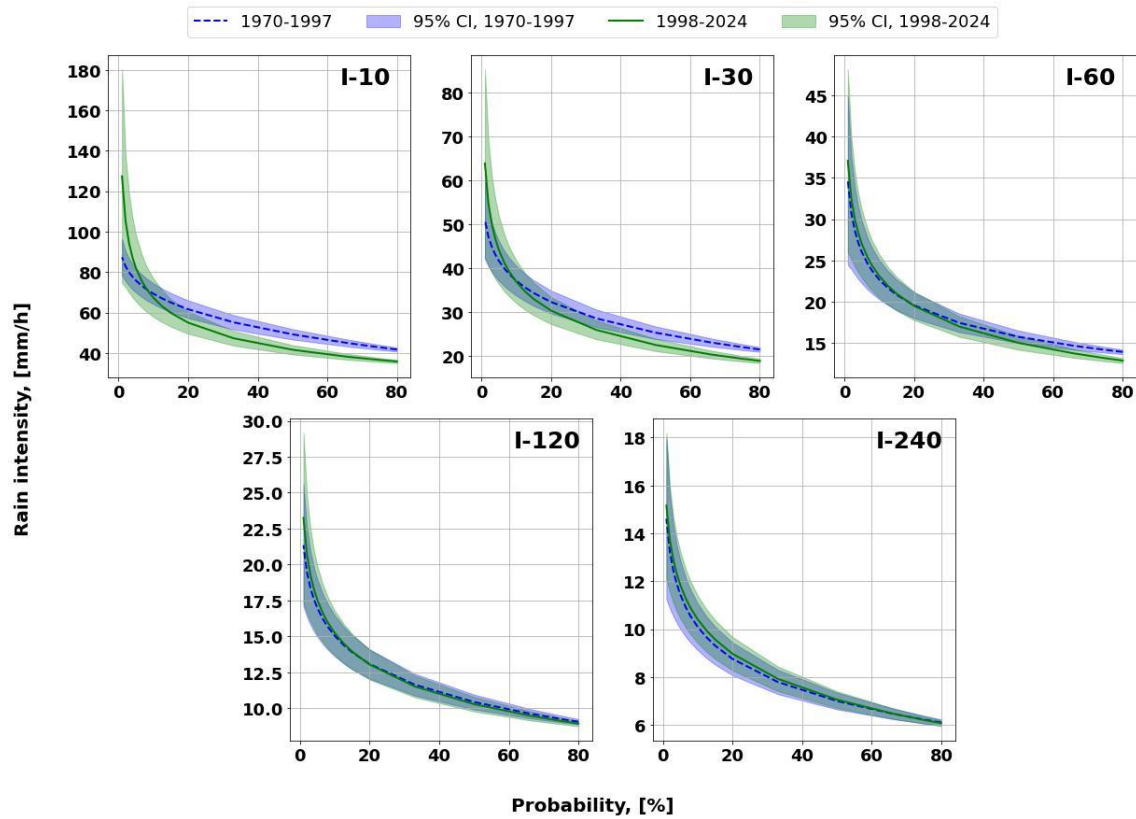
p-Value < 0.1 (+); p-Value < 0.05 (*); p-Value < 0.01 (**); p-Value < 0.001 (***)

3.6.2. השוואת עקומות עוצמות-משך-הסתברות לגשם (IDF's)

מתוך השוואת עוצמות הגשם המחושבות בין התקופה המוקדמת לנוכחית, עולה כי במשכים הקצרים בהסתברויות נמוכות, ישנה עלייה שאינה מובהקת. הדבר בולט בעיקר במשכים של עד 30 דק' (איור 19 טבלה 13). מצד שני, בהסתברויות הגבוהות יותר, נראית החלשות בעוצמת הגשם, שחלקה אף מובהקת. כך למשל, בהסתברות של 50% (זמן חזרה של שנתיים), שיעור ההפחתה הינו מובהק ונאמד בכ-8 מ"מ/שעה לעשור במשך של 10 דקות. בשאר המשכים וההסתברויות נמצאו הבדלים מעורבים קטנים ולא מובהקים.

3.6.3. מגמות באחוזוני הגשם השונים (Quantile regression)

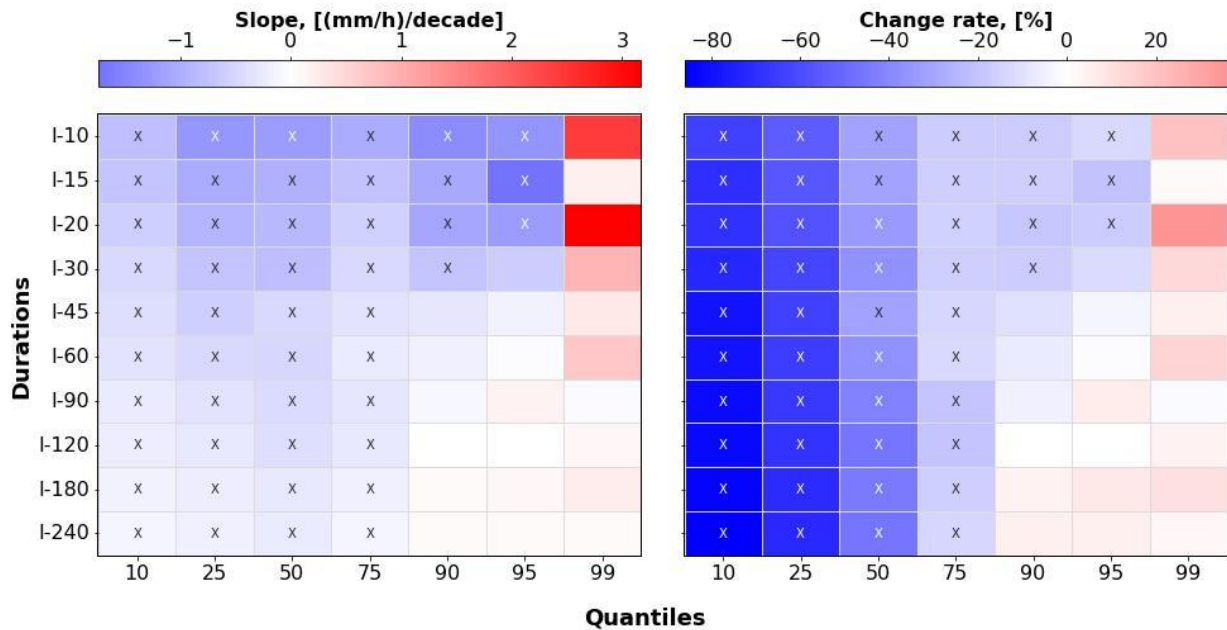
ככלל, מרבית האחוזונים מציגים מגמות שליליות (איור 20), כאשר הירידה בולטת ומובהקת במיוחד באחוזונים הנמוכים יותר. במשכים הקצרים מ-90 דקות נצפית ירידה בעוצמות הגשם בכל האחוזונים, למעט אחוזון 99. במשכים הארוכים (180 ו-240 דקות), המגמות הופכות להיות בעלות נטייה חיובית קלה ולא מובהקת, רק מאחוזון 90 ומעלה. לצד המגמות השליליות ברב האחוזונים, באחוזון 99 הקיצוני ביותר, נצפו מגמות עלייה לא מובהקות, בעיקר במשכים הקצרים, עם שיעור שינוי של עד כ-20%.



איור 19. עוצמות גשם בהסתברויות שונות לשתי תקופות באזור הרי המרכז: תקופה מוקדמת 1970-1997 (סגול) ותקופה נוכחית 1998-2024 (ירוק), עם רווחי סמך ברמת ביטחון של 95%, למשכים של 10, 30, 60, 120 ו-240 דקות.

טבלה 13. הפרשים בעוצמות הגשם (מ"מ/שעה) בין התקופה הנוכחית (1998-2024) לתקופה המוקדמת (1970-1997), בהסתברויות ובמשכים שונים באזור הרי המרכז. הפרשים חיוביים ושלייליים מסומנים בצבעים אדום וכחול, בהתאמה. הפרשים מובהקים סטטיסטית (ברמה של 5%) מסומנים בצבעים כהים יותר וכוכבית (*).

	P-1%	P-2%	P-3%	P-5%	P-10%	P-20%	P-50%
I-10	40	22.7	14.5	6.2	-2	-6.6	-7.6*
I-20	24.1	14	9.2	4.3	-0.5	-3.5	-4.6*
I-30	12.8	7.7	5.2	2.5	-0.3	-1.9	-2.8
I-60	2.4	1.8	1.5	1	0.4	-0.1	-0.8
I-120	2	1.2	0.9	0.5	0.2	-0.1	-0.1
I-180	1.4	1	0.8	0.6	0.2	0	-0.1
I-240	0.6	0.5	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1



איור 20. שיפועי הרגרסיות בעוצמות הגשם (פאנל שמאלי) ושיעור השינוי בעוצמות הגשם (פאנל ימני) כפי שהתקבל מניתוח רגרסיית האחוזונים בהרי המרכז. $\bar{X}$ מצוין מגמה מובהקת ברמת מובהקות של 10% לפחות.

3.7. אזור צחיח למחצה

התחנות המרכיבות את האזור הצחיח למחצה הן: באר שבע, בשור חווה, גלגל, להב, שדה אליהו, להב ושני.

3.7.1. מגמות בעוצמות גשם מקסימאליות

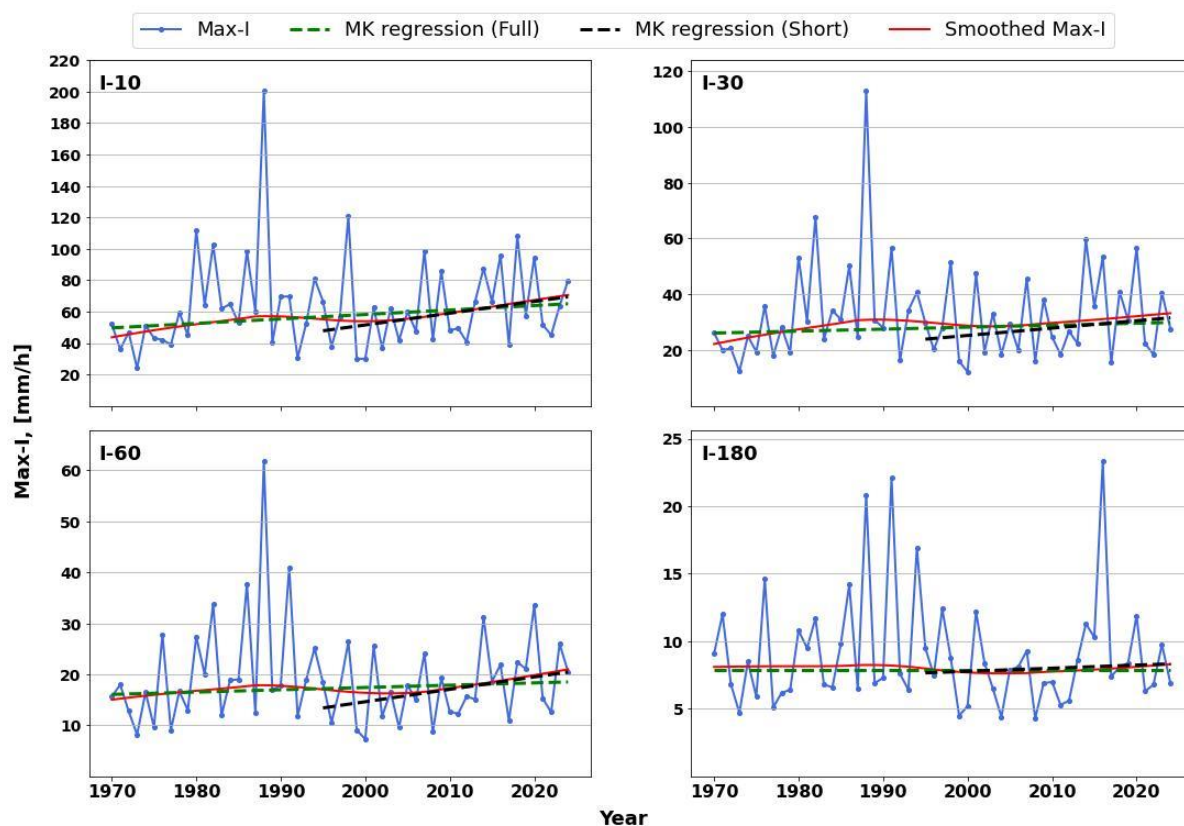
באזור הצחיח למחצה קיימת עלייה לא מובהקת סטטיסטית, בעוצמות הגשם בעיקר במשכים הקצרים של עד 60 דק' (איור 21, טבלה 14). שיעור השינוי הממוצע במשכים אלו נאמד בכ-20% ובמשך של 10 דק' בכ-30%. המגמות חזקות יותר בתקופה הקצרה עם שעורי שינוי הנעים בין 30% לכ-50%. המגמה החזקה ביותר הינה 7.5 מ"מ/שעה לעשור במשך של 10 דק'. כמו כן, ניתן לראות כי לצד התחזקות המגמות בתקופה הקצרה לעומת הארוכה, בשתי התקופות המגמות נחלשות ככל שהמשכים מתארכים, לצד ירידה בשיעור השינוי בעוצמות הגשם. למרות התחזקות המגמות בתקופה הקצרה, הן עדין אינן מובהקות.

3.7.2. השוואת עקומות עוצמות-משך-הסתברות לגשם (IDF's)

השוואת ה-IDF בין התקופה המוקדמת והמאוחרת מצביעה על מגמת היחלשות לא מובהקת בעוצמות הגשם בתקופה המאוחרת (איור 22, טבלה 15). מגמה זו נחלשת עם התארכות משכי הגשם ועם העלייה בזמני החזרה (ירידה בהסתברות).

לכאורה, ממצא זה עומד בסתירה למגמת העלייה שדווחה בסעיף הקודם. ההסבר לכך נעוץ בדפוסי הגשם השונים בשתי התקופות: בתקופה המוקדמת נצפו ערכים גבוהים ללא מגמה ברורה, עם תנודתיות משמעותית בין השנים 1975-1990 (איור 21). הערכים האבסולוטיים הגבוהים בתקופה זו הובילו לעוצמות

מדינת ישראל
משרד התחבורה והבטיחות בדרכים
השירות המטאורולוגי



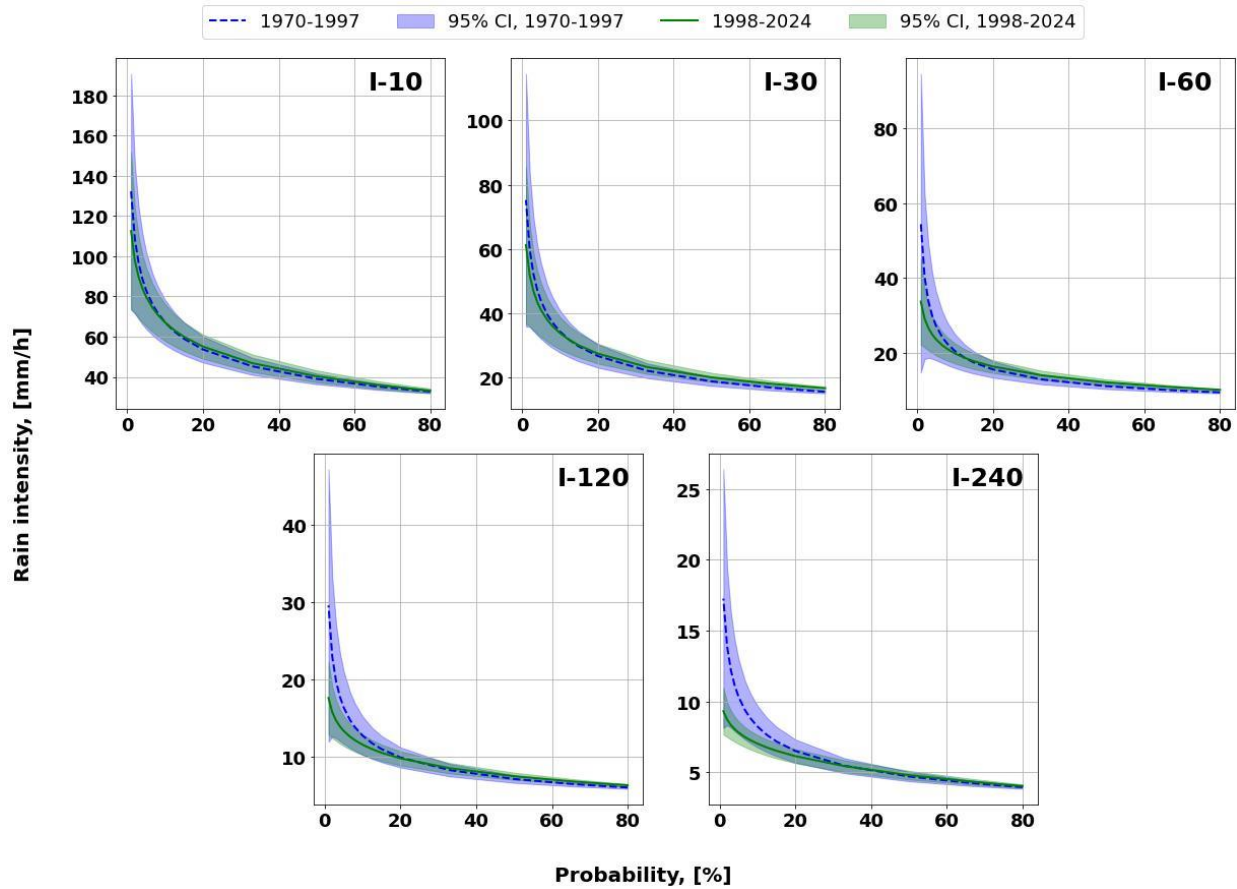
איור 21. עוצמות גשם מקסימאליות שנתיות מ"מ/שעה (בכחול) באזור הצחיח למחצה לארבעה משכים: 10, 30, 60 ו-180 דק'. קווים מקווקווים (ירוק ושחור) מייצגים רגרסיה לינארית לתקופה הארוכה והקצרה, בהתאמה. קו רציף אדום מייצג את הערכים המוחלקים בשיטת Lowess.

טבלה 14. שיפועי המגמות ושיעור השינוי בעוצמות הגשם למשכים השונים, באזור הצחיח למחצה. מידת המובהקות מסומנת על פי המקרא מתחת לטבלה. שיעור השינוי חושב כיחס בין ערך קו המגמה ב-2024 לעומת 1970.

Period	1970-2024		1995-2024	
	Slope [(mm/h)/Decade]	Change rate	Slope [(mm/h)/Decade]	Change rate
I-10	2.8	31%	7.5	45%
I-15	1.5	20%	5.3	43%
I-20	1.2	19%	4.1	38%
I-30	0.7	15%	2.6	32%
I-45	0.8	22%	2.4	38%
I-60	0.5	15%	2.4	52%
I-90	0.3	13%	1.2	30%
I-120	0.1	6%	0.7	22%
I-180	0	0%	0.2	9%
I-240	-0.1	-5%	0.1	6%

p-Value < 0.1 (+); p-Value < 0.05 (*); p-Value < 0.01 (**); p-Value < 0.001 (***)

משרד התחבורה והבטיחות בדרכים
השירות המטאורולוגי



איור 22. עוצמות גשם בהסתברויות שונות לשתי תקופות באזור הצחיח למחצה: תקופה מוקדמת 1970-1997 (סגול) ותקופה נוכחית 1998-2024 (ירוק), עם רווחי סמך ברמת ביטחון של 95%, למשכים של 10, 30, 60, 120 ו-240 דקות.

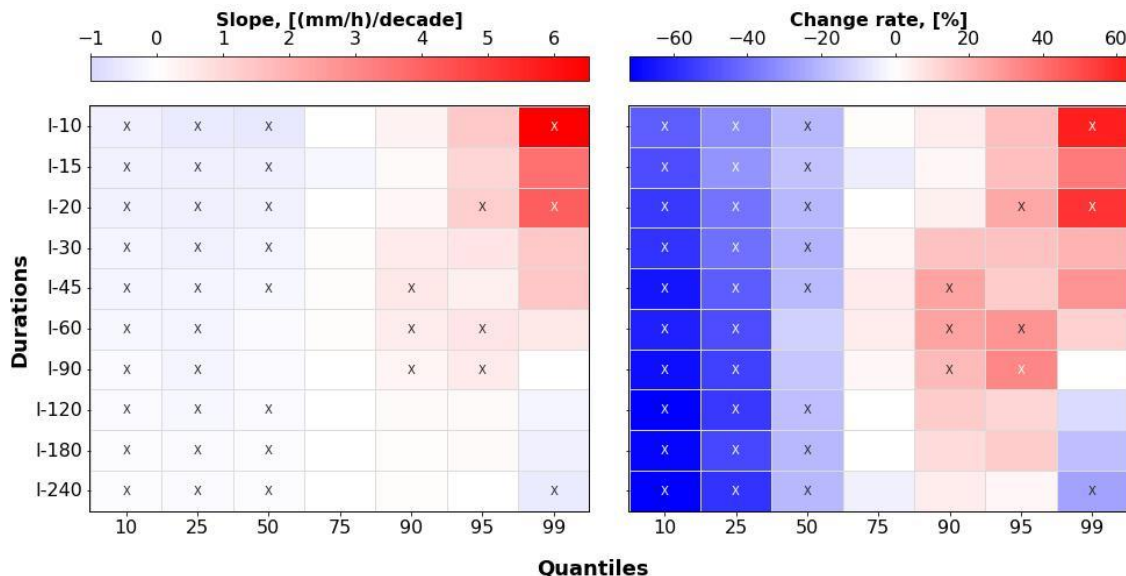
טבלה 15. הפרשים בעוצמות הגשם (מ"מ/שעה) בין התקופה הנוכחית (1998-2024) לתקופה המוקדמת (1970-1997), בהסתברויות ובמשכים שונים באזור הצחיח למחצה. הפרשים חיוביים ושליליים מסומנים בצבעים אדום וכחול, בהתאמה. הפרשים מובהקים סטטיסטית (ברמה של 5%) מסומנים בצבעים כהים יותר וכוכבית (*).

	P-1%	P-2%	P-3%	P-5%	P-10%	P-20%	P-50%
I-10	-19.8	-10.8	-6.9	-3.2	0	1.4	1.2
I-20	-21	-12.4	-8.6	-4.9	-1.5	0.3	1
I-30	-14.1	-7.9	-5.2	-2.8	-0.4	0.8	1.3
I-60	-21	-11.1	-7.3	-3.6	-0.6	0.8	1
I-120	-12	-7.2	-5.1	-3.1	-1.2	-0.1	0.4
I-180	-9.1	-5.8	-4.3	-2.8	-1.3	-0.4	0.2
I-240	-8	-5.2	-3.9	-2.5	-1.2	-0.4	0.1

גשם גבוהות יותר במרבית מההסתברויות המחושבות ובדגש על ההסתברויות הנמוכות יותר. לעומת זאת, התקופה המאוחרת מאופיינת במגמת עלייה עקבית התואמת את המגמה ארוכת הטווח ואת קו המגמה המוחלק, מה שמעיד על יציבות המגמות. דפוס דומה נצפה גם באזור הרי הצפון, שם נמצאו ערכים גבוהים בתחילת הסדרה ללא מגמה מובהקת, לעומת ערכים נמוכים יותר בסופה המלווים במגמת עלייה עקבית.

3.7.3. מגמות באחוזוני הגשם השונים (Quantile regression)

ניתוח עוצמות הגשם באזור הצחיח למחצה, מציג דפוס דומה לשאר האזורים, המאופיין בהפחתה מובהקת של העוצמות באחוזונים הנמוכים ועלייה בגבוהים (איור 23). באחוזונים הגבוהים עיקר ההתגברות הינה במשכים הקצרים, שבחלק מן המשכים נמצאה מובהקת. במשכים אלו נמצאו השינויים הבולטים יותר, בהם שיעור המגמה מגיע לכ-6 מ"מ/שעה לעשור עם שיעור שינוי של עד 70% (באחוזון 99 למשך של 10 דק'). עם זאת, נמצאה מגמה הפוכה בעוצמת השינויים במשכים ארוכים מ-90 דק' באחוזון 99, שם המגמה השלילית המובהקת הנמוכה ביותר נמצאה במשך של 240 דקות.



איור 23. שיפועי הרגרסיות בעוצמות הגשם (פאנל שמאלי) ושיעור השינוי בעוצמות הגשם (פאנל ימני) כפי שהתקבל מניתוח רגרסיית האחוזונים באזור הצחיח למחצה. X מציין מגמה מובהקת ברמת מובהקות של 10% לפחות.

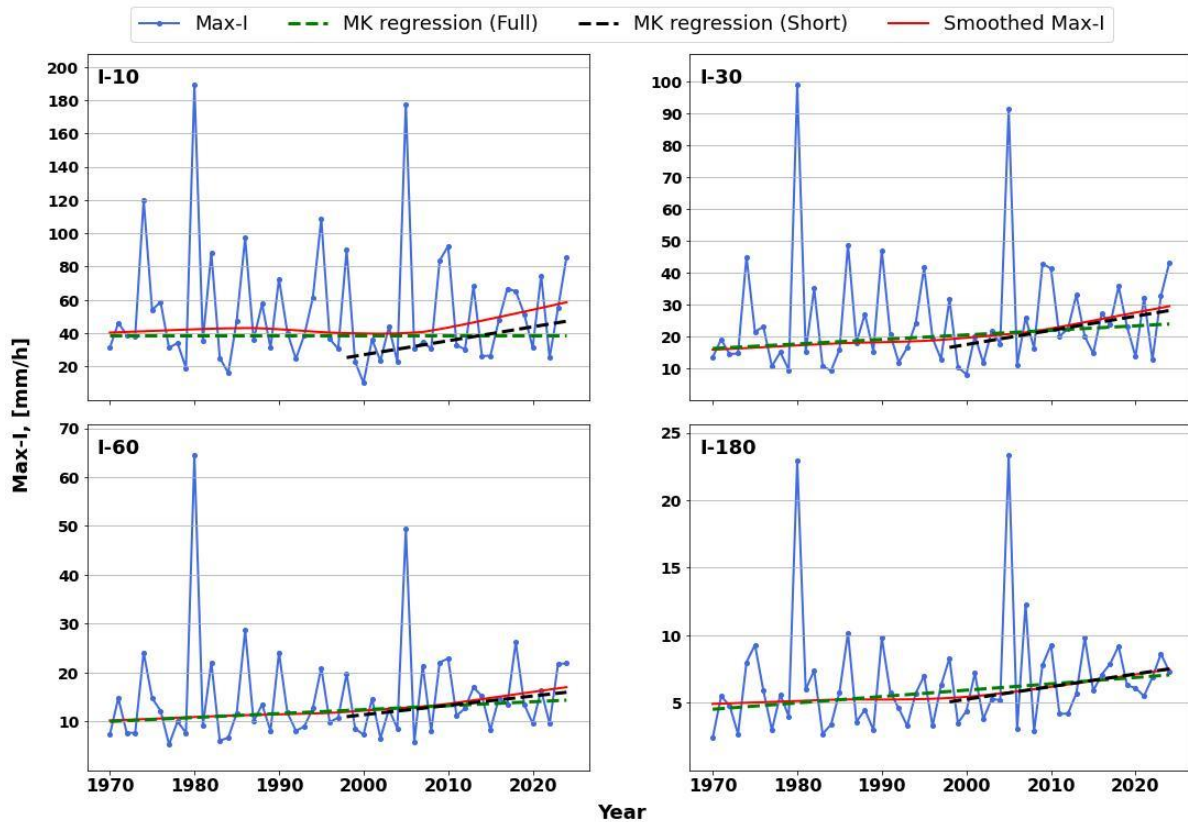
3.8. אזור צחיח

ניתוח האזור הצחיח מבוסס על תחנות: ערד, אילת, מצפה רמון, שדה בוקר וסדום.

3.8.1. מגמות בעוצמות גשם מקסימאליות

בתקופה הארוכה, האזור הצחיח מראה נטייה להתגברות העוצמות בכל המשכים, בהם חלק אף נמצאו מובהקים סטטיסטית בעיקר במשכים הארוכים יותר (60 דק' ומעלה). שיעור השינוי הממוצע בשאר המשכים עומד על כ-45%. מלבד המשך של 10 דקות, שם לא ניתן להצביע על מגמה (איור 24, טבלה 16). מגמת העלייה בתקופה הארוכה הגבוהה ביותר נמצאה במשך של 30 דק', עם תוספת מובהקת של 1.4 מ"מ/שעה בעשור ותוספת של כ-50% בעוצמות הגשם. בתקופה הקצרה נראית התחזקות (לא מובהקת

סטטיסטית) של המגמות, בעיקר במשכים הקצרים. שיעור השינוי במשכים השונים דומה בדרך כלל בין התקופות השונות ועומד על תוספת ממוצעת של כ-40%.

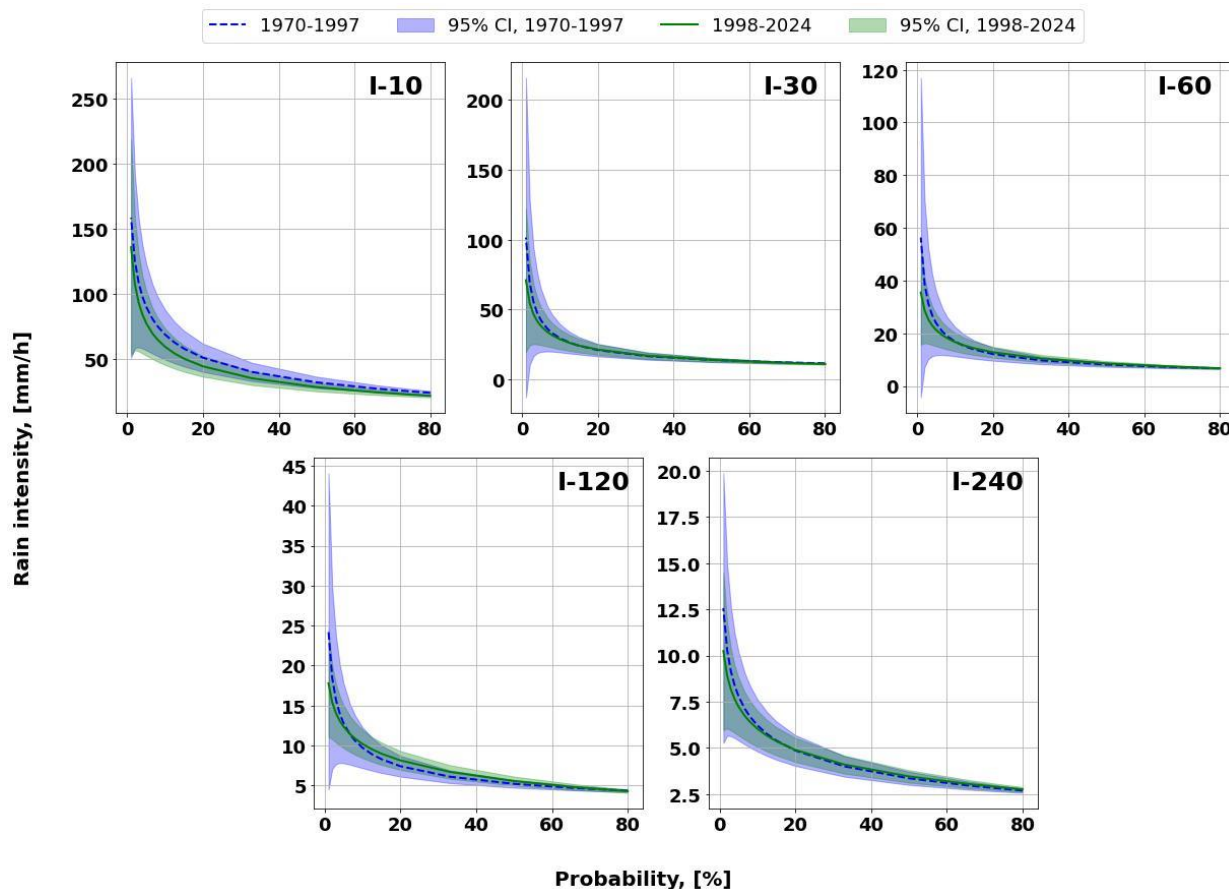


איור 24. עוצמות גשם מקסימאליות שנתיות מ"מ/שעה (בכחול) באזור הצחיח לארבעה משכים: 10, 30, 60 ו-180 דק'. קוים מקווקווים (ירוק ושחור) מייצגים רגרסיה לינארית לתקופה הארוכה והקצרה, בהתאמה. קו רציף אדום מייצג את הערכים המוחלקים בשיטת Lowess.

טבלה 16. שיפועי המגמות ושיעור השינוי בעוצמות הגשם למשכים השונים, באזור הצחיח. מידת המובהקות מסומנת על פי המקרא מתחת לטבלה. שיעור השינוי חושב כיחס בין ערך קו המגמה ב-2024 לעומת 1970.

Period	1970-2024		1995-2024	
	Slope [(mm/h)/Decade]	Change rate	Slope [(mm/h)/Decade]	Change rate
I-10	0	0%	3.6	33%
I-15	1	19%	4.2	46%
I-20	1.3	31%	3.6	45%
I-30	1.4+	48%	3.2	53%
I-45	1	43%	1.8	38%
I-60	0.8+	43%	1.3	34%
I-90	0.7*	52%	0.8	26%
I-120	0.5+	45%	0.8	30%
I-180	0.5*	56%	0.8	47%
I-240	0.3*	42%	0.5	34%

p-Value < 0.1 (+); p-Value < 0.05 (*); p-Value < 0.01 (**); p-Value < 0.001 (***)



איור 25. עוצמות גשם בהסתברויות שונות לשתי תקופות באזור הצחיח: תקופה מוקדמת 1970-1970 (סגול) ותקופה נוכחית 1998-2024 (ירוק), עם רווחי סמך ברמת ביטחון של 95%, למשכים של 10, 30, 60, 120 ו-240 דקות.

טבלה 17. הפרשים בעוצמות הגשם (מ"מ/שעה) בין התקופה הנוכחית (1998-2024) לתקופה המוקדמת (1970-1997), בהסתברויות ובמשכים שונים באזור הצחיח. הפרשים חיוביים ושליליים מסומנים בצבעים אדום וכחול, בהתאמה. הפרשים מובהקים סטטיסטית (ברמה של 5%) מסומנים בצבעים כהים יותר וכוכבית (*).

	P-1%	P-2%	P-3%	P-5%	P-10%	P-20%	P-50%
I-10	-22.8	-17.9	-15.4	-12.6	-9.3	-6.7	-3.6
I-20	-27.7	-12.6	-7.1	-2.6	0.3	1	0
I-30	-30.6	-14.6	-8.8	-4	-0.8	0.4	0.1
I-60	-20.8	-10.1	-6.1	-2.7	-0.2	0.7	0.5
I-120	-6.5	-3	-1.6	-0.5	0.5	0.7	0.3
I-180	-1.4	-0.8	-0.5	-0.2	0	0.1	0.1
I-240	-2.4	-1.4	-0.9	-0.6	-0.2	0	0.1

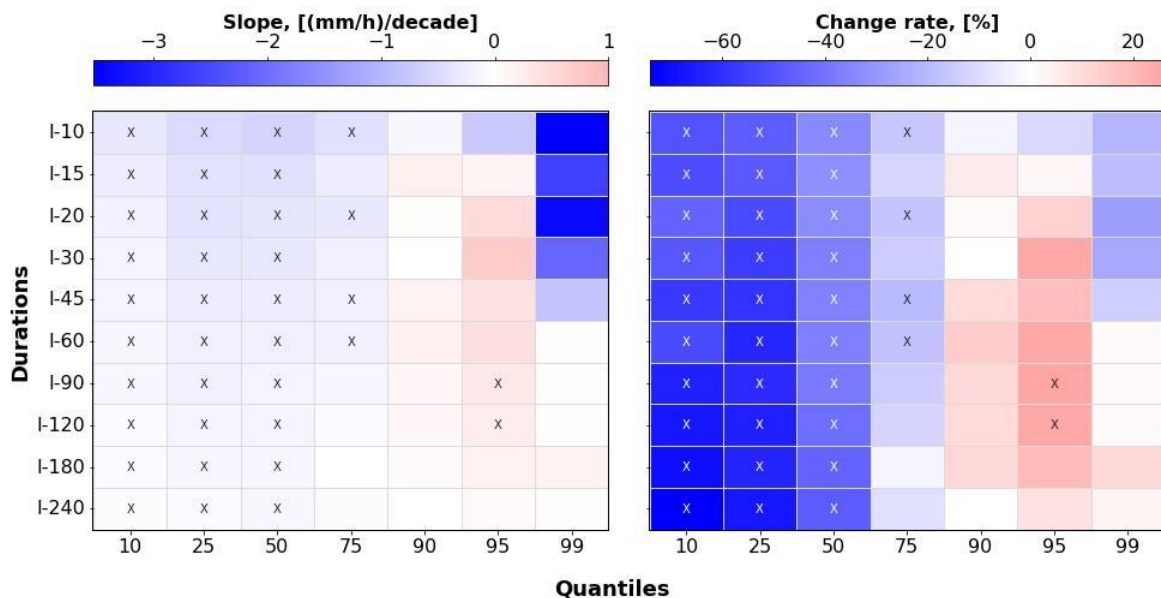
3.8.2. השוואת עקומות עוצמות-משך-הסתברות לגשם (IDF's)

השוואה ה-IDF בין התקופה המוקדמת והמאוחרת מצביעה על מגמת היחלשות לא מובהקת בעוצמות הגשם בתקופה המאוחרת בעיקר במשכים הקצרים עד 60 דק' (איור 25, טבלה 17). מגמה זו נחלשת עם התארכות משכי הגשם ועם העלייה בזמני החזרה (ירידה בהסתברות), בדומה להתנהגות האזור הצחיח למחצה (סעיף 3.7).

לכאורה, ממצא זה עומד בסתירה למגמת העלייה שדווחה בסעיף הקודם. ההסבר לכך, בדומה למה שנראה באזור הצחיח למחצה, נעוץ בכך שבתקופה המוקדמת נצפו ערכים גבוהים הפרוסים לאורך התקופה כולה (איור 24), אשר הובילו לעוצמות גשם גבוהות יותר בדגש על ההסתברויות הנמוכות. לעומת זאת, התקופה המאוחרת מאופיינת במגמת עלייה עקבית התואמת את המגמה ארוכת הטווח ואת קו המגמה המוחלק, מה שמעיד על יציבות המגמות (למעט במשך של 10 דק').

3.8.3. מגמות באחוזוני הגשם השונים (Quantile regression)

ניתוח עוצמות הגשם באזור הצחיח, מגלה כי ישנה הפחתה מובהקת בעוצמות הגשם באחוזונים הנמוכים עד אחוזון 75 (איור 26). מגמת הפחתה לא מובהקת נמצא באחוזון 99 במשכים הקצרים (עד 45 דק'). רק המגמות בעוצמות הגשם באחוזונים 90 ו-95 הציגו נטייה לעלייה, ברובן ללא מובהקת סטטיסטית, הנאמדת בשיעור שינוי של עד כ-20%.



איור 26. שיפועי הרגרסיות בעוצמות הגשם (פאנל שמאלי) ושיעור השינוי בעוצמות הגשם (פאנל ימני) כפי שהתקבלו מניתוח רגרסיית האחוזונים באזור הצחיח. X מציינ מגמה מובהקת ברמת מובהקות של 10% לפחות.

4. סיכום ומסקנות

המחקר הנוכחי עוקב אחר השינויים שחלו בעוצמות הגשם בשמונה אזורים שונים, המכסים את כל חלקי הארץ, על פני תקופה בת 55 שנים. השינויים נותחו במספר היבטים וגישות: בחינת מגמות בעוצמות הגשם המקסימליות בכל אזור בתקופה ארוכה (1970-2024) וקצרה (1995-2024), השוואת הסתברויות בין שתי תקופות עוקבות 1970-1997 ו-1998-2024 וניתוח מגמות באחוזוני הגשם השונים תוך שימוש לראשונה ברגרסיית אחוזונים. הניתוחים יושמו על פרקי גשם במשכים שונים, החל ממשכים קצרים (עד 60 דק') ועד למשכים ארוכים יותר (90-240 דק').

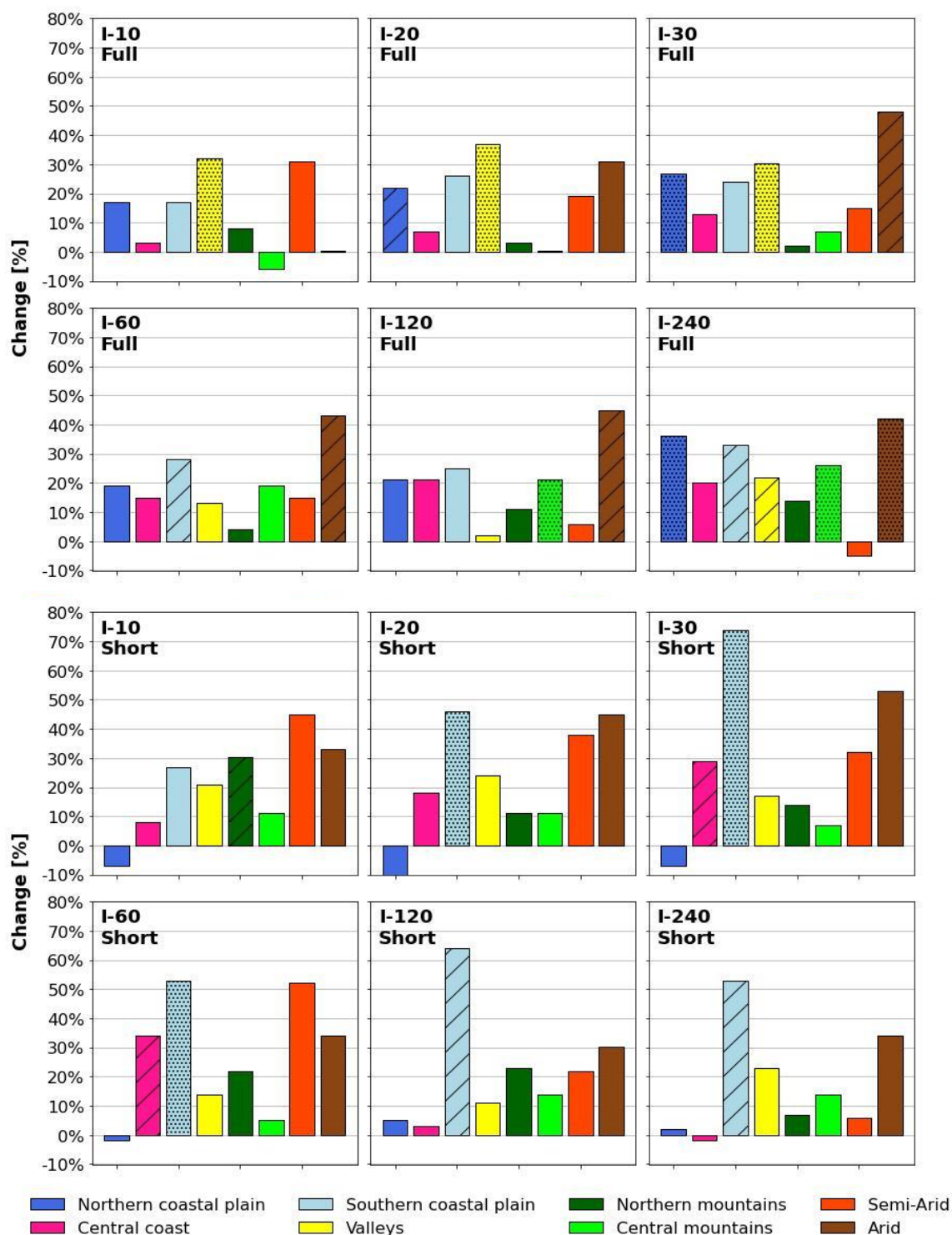
מניתוח הגישות השונות עולה שבאזור מישור החוף ככלל קיימת מגמת עלייה בעוצמות הגשם המקסימליות הנמדדות מדי שנה (איור 27). במשכים הקצרים, שיעור השינוי בתקופה הארוכה נאמד בכ-20% עם תוספת ממוצעת של יותר מ-2 מ"מ/שעה בכל עשור. בתקופה הקצרה השינוי בממוצע הינו מסדר גודל דומה לתקופה הארוכה, בדגש על אחוז השינוי במישור החוף המרכזי הנאמד בתוספת של כ-35% ובמישור החוף הדרומי בכ-50%, בפרקי הגשם הקצרים של עד שעה. יחד עם פרקי הגשם הקצרים נצפתה גם מגמת עלייה במשכים הארוכים בשיעור ממוצע של כ-25% בתקופה הארוכה. בתקופה הקצרה עיקר הגידול במשכים אלו נצפה במישור החוף הדרומי. בהמשך למגמות אלו, כך גם ראינו עלייה כללית בעוצמות הגשם בהסתברויות השונות, במיוחד במשכים קצרים ובאירועים הנדירים, בהסתברויות של עד 5% (איור 28). כמו כן, נצפתה עלייה בעוצמות הגשם השייכות לאחוזונים 90 ו-95 שחלקם אף מובהק סטטיסטית (איור 29). בתקופה הארוכה, העלייה בעוצמות הגשם באזורי מישור החוף נצפתה בעיקר במשכים הקצרים (עד ל-60 דקות) ובמשכים ארוכים מ-120 דקות.

בעמקי הצפון נצפו שינויים גדולים ומובהקים בעוצמות הגשם. שיעור הגידול בעוצמות הגשם במשכים הקצרים נאמד ב-30% לערך, ובמשכים הארוכים בקצת יותר מ-10% בתקופה הארוכה (איור 27). הדבר בא לידי ביטוי גם בהשוואת שתי תקופות עוקבות עם תוספת כללית ממוצעת של כ-13 מ"מ/שעה בהסתברויות של עד 5% (ממוצע התוספת למשכים של 10-60 דק'), וגידול ממוצע של כ-8 מ"מ/שעה בהסתברויות של בין 10%-50%, המתאימות לזמני חזרה של בין 10 לשנתיים בהתאמה (איור 28). בנוסף, נצפה גידול של כ-20% במשכים הקצרים בתקופה הקצרה. מגמות אלו עולות בקנה אחד גם עם הגידול המובהק שנמצא בעוצמות הגשם הקיצוניות של אחוזון 90 ו-95, הנאמד בכ-30% בעיקר במשכים הקצרים (איור 29).

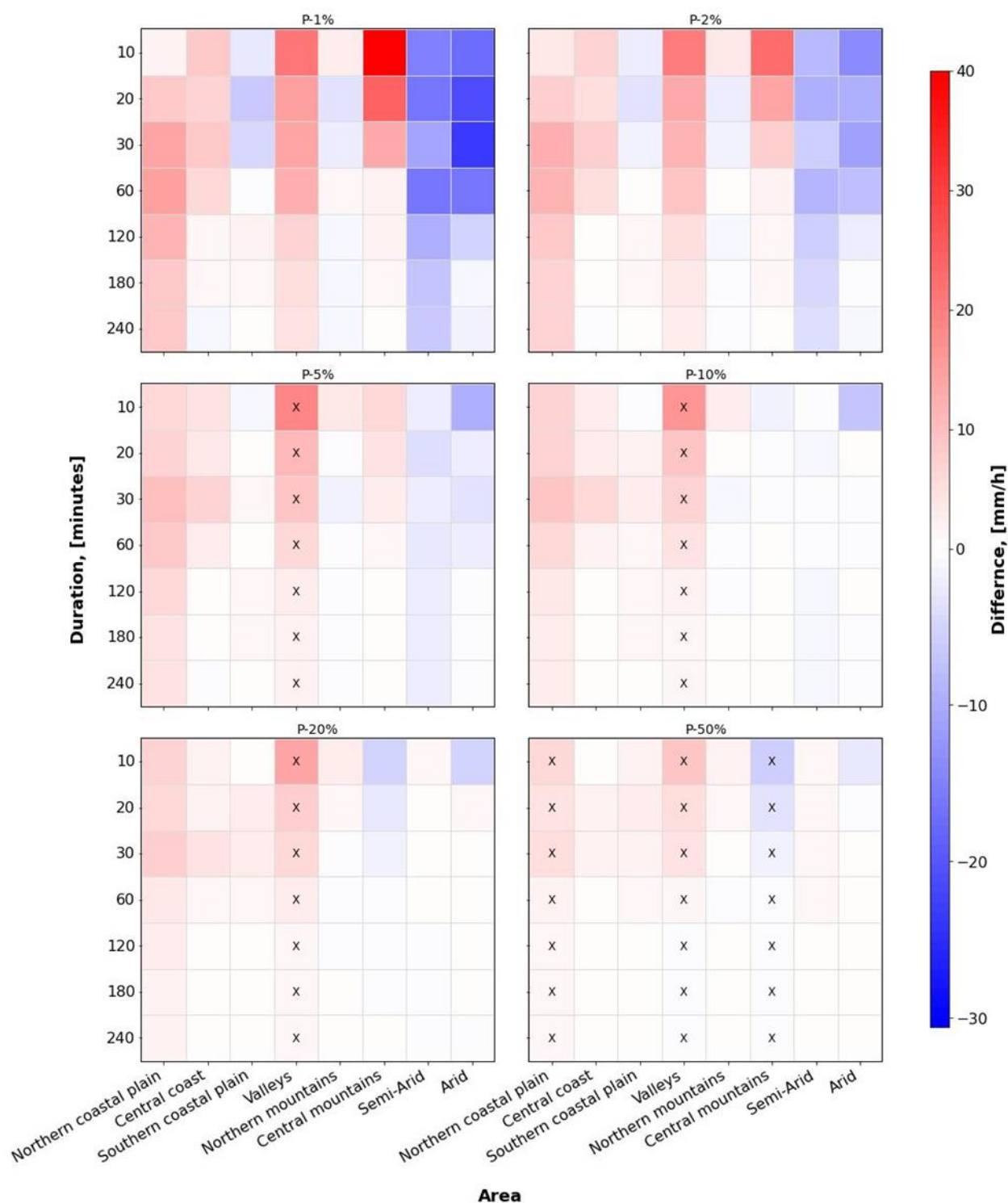
הרי הצפון והמרכז המאופיינים בגשם אורוגרפי¹, גם כן מציגים גידול בעוצמות הגשם אם כי נמצא שהוא הנמוך ביותר בהשוואה לשינוי במשכים הקצרים בשאר האזורים בארץ (איור 27). באופן כללי נראה כי בשני אזורים אלו שיעור השינוי גדל עם העלייה במשך, אולם באזור הרי המרכז הדבר נראה ביתר שאת. הגידול הממוצע במשכים הקצרים, בתקופה הארוכה באזורים אלו דומה ונאמד בכ-5%. במשכים הארוכים אזור הרי הצפון הציג מגמת גידול נמוכה יותר בכ-10% ביחס להרי המרכז אשר הציגו גידול של כ-25%. לעומת זאת, בתקופה הקצרה במשכים הקצרים, עוצמות הגשם בהרי הצפון היו גבוהות בכ-10% ביחס לאלו בהרי המרכז אשר הציגו גידול ממוצע של כ-10%. כך גם הגידול באחוזונים 90 ו-95 אשר הציגו גידול משמעותי יותר בהרי הצפון ביחס להרי המרכז, במשכים הקצרים (איור 29). השוואת עוצמות הגשם בין שתי תקופות

¹ גשם אורוגרפי: גשם שנוצר כתוצאה מעלייה של אוויר על מכשול גיאוגרפי כגון רכס הרים. מאופיין בגשם מתמשך לאורך זמן ובעוצמות חלשות יחסית.

עוקבות, מצביעה על דעיכה לכאורה של עוצמות המשקעים בהרי הצפון. אולם, בחינה מעמיקה של המגמות חושפת תמונה מורכבת יותר: בתקופה המוקדמת נצפתה יציבות בעוצמות הגבוהות (קרי, העוצמות הגבוהות מתפלגות לאורך התקופה), ואילו בתקופה הקצרה קיימת נטייה לעלייה בעוצמות עם ההתקדמות בזמן (איור 15).



איור 27. שיעור השינוי באחוזים בקו המגמה לתקופה 2024-1970 (שתי שורות עליונות, Full) ולתקופה 2024-1995 (שתי שורות תחתונות, Short) לאזורים השונים. עמודות עם פסים או נקודות מציירות ערכים מובהקים ברמת מובהקות של 10%-5%, בהתאמה.



איור 28. ההפרש בין עוצמות גשם מחולצות בהסתברויות שונות (מצוינות בראש כל פאנל), באזורים ובמשכים שונים. הסימון X מציין הפרשים מובהקים ברמת מובהקות של 5% לפחות.

האזורים הצחיח-למחצה והצחיח מציגים מגמת עלייה ממוצעת של כ-20% ו-30% בהתאמה, במשכים הקצרים בתקופה הארוכה. גידול בשיעור דומה של כ-40% במשכים אלו, נצפה בתקופה הקצרה, בשני האזורים. בפרקי הגשם הארוכים נרשמה עלייה של כ-40% באזור הצחיח, שנמצאה מובהקת, לעומת שינוי הרבה יותר קטן (ולא מובהק) באזור הצחיח למחצה, בתקופה הארוכה (איור 27). אחוזונים 90-95 של עוצמות הגשם באזורים אלו מצביעים על התחזקות כללית (מלבד למשך 10 דק' באזור הצחיח). השינוי המשמעותי, הן בעוצמה והן במובהקות הסטטיסטית, נצפה במשכי הגשם הבינוניים (45-120 דק'), כפי שמוצג באיור 29.

בחלק מהמקרים הממצאים מתוך השוואת עקומות עוצמות הגשם בין שתי תקופות עוקבות (איור 28) לא חופפים עם הממצאים של ניתוח המגמות בערכי עוצמת הגשם המקסימליים במשכים השונים (איור 27), כאשר מתקבלת דווקא הפחתה בעוצמות בתקופה המאוחרת, לצד מגמת עלייה בעוצמות הגשם המקסימאליות השנתיות (דוגמת: הרי הצפון, אזור צחיח-למחצה והצחיח). הסיבה העיקרית לכך היא שבניתוח מגמות של ערכי המקסימום השנתיים, ישנה חשיבות גבוהה לסדר שבו מופיעים הערכים המקסימליים לאורך זמן. למשל, אם ערכים מקסימאליים מתקבלים לקראת סוף הסדרה, הם ישפיעו על המגמה בצורה שונה מאשר אם היו מפוזרים לכל אורכה. לעומת זאת, בחישוב עוצמות גשם בהסתברויות שונות, חשוב רק לאיזו תקופה שייך כל ערך – מוקדמת או מאוחרת, מיקומו המדויק בזמן אינו משמעותי (במיוחד לאור העובדה ששתי התקופות נותחו תחת הנחת סטאציונאריות, פרק 2.2.2). בנוסף, בניתוח זה החלוקה לשתי תקופות קצרות משפיעה גם היא על אופן חישוב ההסתברויות (תקופות קצרות מכילות פחות נתונים ולכן הערכים המתקבלים פחות "יציבים"). לכן השתמשנו בשיטת GPD המאפשרת שימוש ביותר מערך אחד בשנה. מכלול הבדלים הנ"ל יכולים להוביל לכך שבאזור מסוים נראית מגמת עלייה בעוצמות הגשם, אולם מהשוואת עקומי עוצמות הגשם בשתי התקופות עשויות להתקבל עוצמות חזקות יותר בתקופה המוקדמת דווקא. בנוסף, יש לזכור כי עוצמות הגשם הן משתנה טבעי בעל שונות גבוהה (signal to noise ratio), דבר המקשה על מציאת מגמות ברורות ומובהקות. מאפיין זה, בשילוב סדרות זמן קצרות ושינויים יחסית מתונים, מקשה על זיהוי מגמות מובהקות סטטיסטיות.

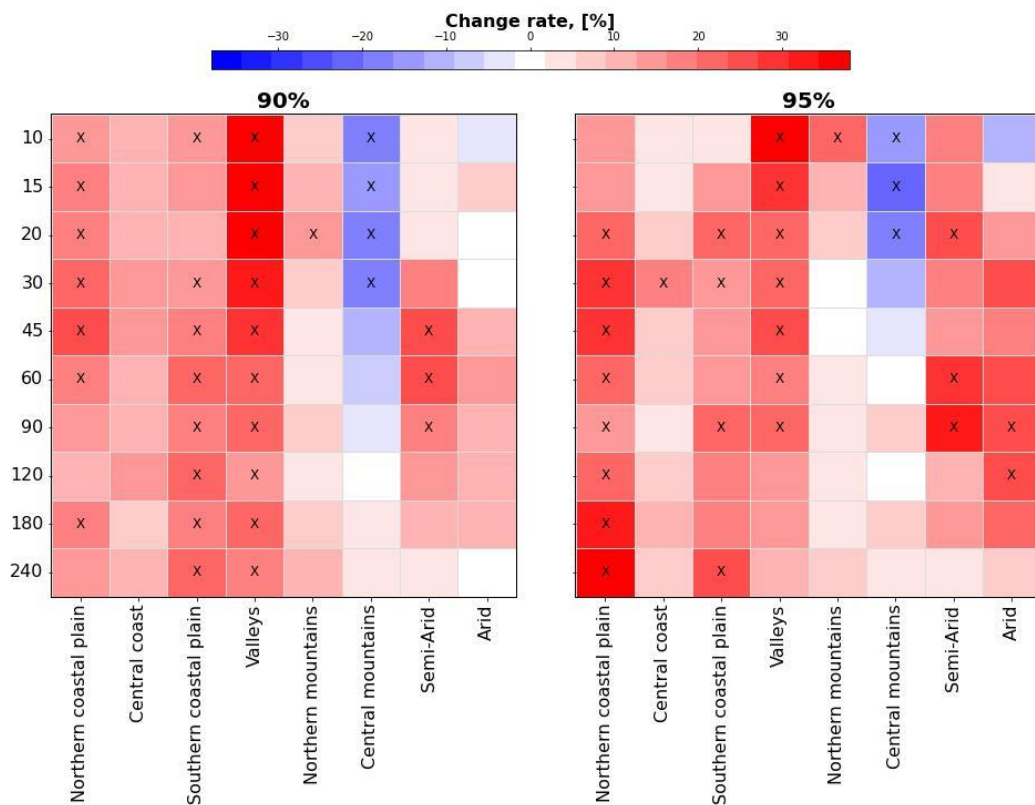
ככלל, קיימת נטייה לעלייה בעוצמות הגשם ברמות שונות בכלל הארץ. אחד הגורמים העשויים לספק הסבר לעליית העוצמות הוא ההתחממות הגלובאלית ככלל וזו של אזורנו בפרט. התחממות זו מובילה גם להתחממות הים התיכון (Grillakis, 2019; Koutroulis 2019; Zittis et al., 2022; Ozer et al., 2022), שהוא גורם משמעותי בתהליך היצירה של גשמים קונבקטיביים² (באמצעות אספקת שטפי חום ולחות לאטמוספירה). מעבר לכך, ישנן עדויות שמראות כי בעשורים האחרונים חלה הגדלת אי היציבות האטמוספרית בהמיספרה הצפונית (Rädler et al., 2019; Chen and Dai, 2023) – זהו גורם נוסף שיכול לתרום להתחזקות הנצפית. שני גורמים אלו יכולים ליצור עננים מפותחים יותר בעלי פסגות גבוהות, שעשויים להניב עוצמות גשם גבוהות בעיקר באזורים בעלי אופי קונבקטיבי (אזורי החוף, העמקים והאזורים הצחיחים). התגברות עוצמות הגשם במשכים הארוכים באזורים אלו יכולה להיות מוסברת בין היתר גם

² גשם קונבקטיבי: גשם הנגרם כתוצאה מעליית אוויר (קונבקציה) ומאופיין בעוצמות חזקות למשכים קצרים יחסית (עד כשעה) עם הפסקות בין תאים קונבקטיבים. אופייני לאזורים חופיים, בעלי לחות, ואספקת שטפי חום, שאלו התנאים באזור החוף בעונת הסתיו בעיקר.

ברצף של תאים קונבקטיבים שגורמים להצטברות כמויות גשם גדולות בפרקי זמן אלו, לצד ההתחממות האטמוספירית שמאפשרת את הגדלת כמות אדי המים באוויר בכ-7% למעלה.

באזורי ההר, המאופיינים בגשם אורוגרפי, עיקר השינוי בתקופה הארוכה נצפה במשכים הארוכים, בהתאם לאופיו הרציף של הגשם שם וליכולתו להצטבר לכמויות משמעותיות לאורך זמן. הצטברות זו עשויה להיות מושפעת מעליית תכולת אדי המים בעקבות ההתחממות, מה שמגדיל את הפוטנציאל לאירועי גשם חזקים.

התגברות בעוצמות הגשם נושאת השלכות משמעותיות לניהול נגר, מניעת הצפות, תחזוקת תשתיות וניהול משק המים. במקביל לעלייה בעוצמות, אנו עדים בשנים האחרונות להתרחבות השטח העירוני ולצמצום שטחי חלחול והשהיית מים, תהליכים שמגבירים את האתגר בניהול הנגר. שני גורמים אלו מדגישים את הצורך במעקב שוטף אחר מגמות בעוצמות הגשם, כדי לאפשר תכנון תשתיות שיתמודדו עם עוצמות הגשם הצפויות בעתיד. בנוסף, קיים צורך חיוני בפיתוח כלים לחיזוי עוצמות גשם לטווח הארוך (עד לסוף המאה), לשם תכנון מושכל של תשתיות וניהול משק המים, תוך התחשבות בתרחישי התחממות שונים.



איור 29. שיעור השינוי בקווי הרגרסיה המחוברים לפי רגרסיית האחוזונים לאחוזונים 90 (פאנל שמאלי) ו-95 (פאנל ימני), באזורים ובמשכים השונים. הסימון X מציין שיפוע מובהק ברמת מובהקות של 10% לפחות.

מקורות

- 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', 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.
- צפורי, א', חלפון, נ' ויוסף, י' (2024). עוצמות גשם בישראל. דו"ח מחקר מס' 4000-0804-2024-0000018, השירות המטאורולוגי.
- צפורי, א', יוסף, י', חלפון, נ' (2022). מגמות בגשם כבד בישראל בתקופה 1951-2021, דו"ח מחקר מס' 4000-0804-2022-0000004, השירות המטאורולוגי.
- Ahmad, I., Tang, D., Wang, T., Wang, M., & Wagan, B. (2015). Precipitation trends over time using Mann-Kendall and spearman's rho tests in swat river basin, Pakistan. *Advances in Meteorology*.
- Armon, M., Marra, F., Enzel, Y., Rostkier-Edelstein, D., Garfinkel, C. I., Adam, O., Dayan, U., & Morin, E. (2022). Reduced rainfall in future heavy precipitation events related to contracted rain area despite increased rain rate. *Earth's Future*, 10, <https://doi.org/10.1029/2021EF002397>
- Chen, J., and Dai, A. (2023). The atmosphere has become increasingly unstable during 1979–2020 over the Northern Hemisphere. *Geophysical Research Letters*, 50, e2023GL106125. <https://doi.org/10.1029/2023GL106125>
- Flecker, R., & Ellam, R. M. (2006). Identifying Late Miocene episodes of connection and isolation in the Mediterranean–Paratethyan realm using Sr isotopes. *Sedimentary Geology*, 188, 189-203.
- Folton, N., Martin, E., Arnaud, P., L'hermite, P., & Tolsa, M. (2019). A 50-year analysis of hydrological trends and processes in a Mediterranean catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(6), 2699-2714.
- Grillakis, M.G. (2019). Increase in severe and extreme soil moisture droughts for Europe under climate change. *Sci. Total Environ.* doi:10.1016/J.SCITOTENV.2019.01.001
- Hassanzadeh, E., Nazemi, A., Adamowski, J., Nguyen, T. H., & Van-Nguyen, V. T. (2019). Quantile-based downscaling of rainfall extremes: Notes on methodological functionality, associated uncertainty and application in practice. *Advances in Water Resources*, 131, 103371.
- IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-

- Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, pp 1513 – 1766. doi:10.1017/9781009157896.
- Koutroulis, A.G. (2019). Dryland changes under different levels of global warming. *Sci. Total Environ.* 655, 482–511. doi:10.1016/J.SCITOTENV.2018.11.215
 - Marra, F., Koukoulou, M., Canale, A., & Peleg, N. (2023). Predicting extreme sub-hourly precipitation intensification based on temperature shifts. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2023, 1-23.
 - Mohsenipour, M., Shahid, S., Ziarh, G. F., & Yaseen, Z. M. (2020). Changes in monsoon rainfall distribution of Bangladesh using quantile regression model. *Theoretical and Applied Climatology*, 142, 1329-1342.
 - Ozer, T., Gertman, I., Gildor, H., & Herut, B. (2022). Thermohaline temporal variability of the SE Mediterranean coastal waters (Israel)–long-term trends, seasonality, and connectivity. *Frontiers in Marine Science*, 8, 799457.
 - Pumo, D, Carlino, G., Blenkinsop, S., Arnone, E., Fowler, H., & Noto, L. V. (2019). Sensitivity of extreme rainfall to temperature in semi-arid Mediterranean regions. *Atmos. Res.*, 225, 30-44
 - Rädler, A. T., Groenemeijer, P. H., Faust, E., Sausen, R., & Púčik, T. (2019). Frequency of severe thunderstorms across Europe expected to increase in the 21st century due to rising instability. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2(1), 30.
 - Satagopan, J., & Rajagopalan, B. (1994). Comparing spatial estimation techniques for precipitation analysis. In *Stochastic and Statistical Methods in Hydrology and Environmental Engineering* (pp. 317-330). Springer, Dordrecht.
 - Solaimani, K., & Ahmadi, S. B. (2024). Spatiotemporal relationship of temperature and precipitation over southern coasts of the Caspian Sea based on quantile regression methods. *Acta Geophysica*, 72(2), 1127-1142.
 - Treppiedi, D., Cipolla, G., Francipane, A., & Noto, L. V. (2021). Detecting precipitation trend using a multiscale approach based on quantile regression over a Mediterranean area. *International Journal of Climatology*, 41(13), 5938-5955.
 - Valdes-Abellan, J., Pardo, M. A., & Tenza-Abril, A. J. (2017). Observed precipitation trend changes in the western Mediterranean region. *International Journal of Climatology*, 37, 1285-1296.
 - Yosef, Y., Aguilar, E., & 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.

- Yue, S., & Wang, C. (2004). The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series. *Water resources management*, 18(3), 201-218.
- Zittis, G., Almazroui, M., Alpert, P., Ciais, P., Cramer, W., Dahdal, Y., ... & Lelieveld, J. (2022). Climate change and weather extremes in the Eastern Mediterranean and Middle East. *Reviews of Geophysics*, 60, e2021RG000762.