2016

מגמות באירועי מזג אוויר קיצוניים בישראל

יצחק יוסף, נועם חלפון, עמוס פורת, איזבלה אוסטינסקי-צדקי, אבנר פורשפן

דו"ח מחקר מס' 21921416

אגף אקלים, השירות המטאורולוגי

21.09.2016

מדינת ישראל
משרד התחבורה
השירות המטאורולוגי

מגמות באירועי מזג אוויר קיצוניים בישראל

יצחק יוסף, נועם חלפון, עמוס פורת, איזבלה אוסטינסקי-צדקי, אבנר פורשפן

דו"ח מחקר מס' 21921416

לשאלות ולהבהרות:
יצחק יוסף, אגף אקלים, השירות המטאורולוגי, ת.ד. 25 בית-דגן 5025001
yosefy@ims.gov.il

מסמך זה יש לצטט כך:

יוסף, י., חלפון, נ., פורת, ע., אוסטינסקי-צדקי, א. ופורשפן, א. 2016: *מגמות באירועי מזג אוויר קיצוניים בישראל*. דו"ח מחקר מס' 21921416, השירות המטאורולוגי, בתוך:
http://www.ims.gov.il/NR/rdonlyres/E3BA0152-5635-4D12-A3D1-1C3B83DFFF63/0/ExtremetrendsoverIsrael.pdf

Yosef, Y., Halfon, N., Porat, A., Osetinsky-Tzidaki, I., Furshpan, A. 2016: *Trends in extreme weather events over Israel*. Research Report No. 21921416, Israel Meteorological Service, from: http://www.ims.gov.il/NR/rdonlyres/E3BA0152-5635-4D12-A3D1-1C3B83DFFF63/0/ExtremetrendsoverIsrael.pdf

© השירות המטאורולוגי הישראלי 21.09.2016

מגמות באירועי מזג אוויר קיצוניים בישראל 1920-2015

תקציר

אירועי מזג אוויר קיצונים ועוצמתיים הינם בעלי השפעה גדולה על האדם וסביבתו. סוגיה זו קיבלה ביטוי גם בפרסום האחרון של הפאנל הבין ממשלתי לשינויי אקלים (IPCC, 2013) תוך הדגשת ההתחממות הגלובלית הכללית לצד צפי לגידול במספר גלי חום וכמויות גשם קיצוניות.

מחקר זה מתמקד בבחינת המגמות במספר אירועי מזג האוויר הקיצוניים אשר פקדו את ישראל, בין השנים 1920-2015 בשלוש קטגוריות: סופות גשם חזקות, שלג כבד ואירועי חום קיצוניים. המחקר מבוסס על תחנות ותיקות שלהן רצף מדידות לאורך כל תקופת המחקר (1920-2015).

במחקר זה "אירוע קיצוני" מוגדר כאירוע בו נחצה סף משמעותי:

- **גשם (2 ספים)**: כמות גשם יומית השווה ל-110 מ"מ ומעלה; כמות סופתית מצטברת של 200 מ"מ ויותר.
- **שלג (2 ספים)**: עובי שלג של 10 ו-20 ס"מ ומעלה בתחנת ירושלים מרכז ו/או בצפת.
- **אירועי חום - גלי חום ממושכים ושרבים קצרים (3 ספים)**: טמפרטורה יומית ממוצעת העולה על הממוצע הרב שנתי 1981-2000 ב-6 מעלות צלסיוס או יותר במשך 3 ימים רצופים בחודשי הקיץ; טמפרטורה מקסימלית של 35 מעלות צלסיוס או יותר במשך שלושה ימים רצופים; טמפרטורת מקסימום הגבוהה מהממוצע הרב שנתי 1981-2000 ב-15 מעלות צלסיוס או יותר.

ספים אלו נקבעו כדי לכלול בניתוח אירועים להם היו השפעות משמעותיות מתועדות על האוכלוסיה ועל מגוון מגזרים במשק.

הנתונים נותחו במספר שיטות סטטיסטיות הכוללות הן השוואה בין תקופות שונות והן ניתוח המגמות. נמצא שחל גידול מובהק בשכיחות גלי החום, בשני העשורים האחרונים, בהם הטמפרטורה היומית הממוצעת עולה על הממוצע ב-6 מעלות צלסיוס במשך 3 ימים רצופים בחודשי הקיץ. בשאר המשתנים והספים אשר נבחנו נמצאו מגמות מעורבות אך כולן אינן מובהקות ברמת מובהקות של 5%.

תוכן עניינים

תקציר ..... **II**

רקע **1**

מבוא **1**

מתודולוגיה **3**

תוצאות **6**

1. גשמים עזים 6

1.1 כמות יומית של 110 מ״מ ומעלה 6

1.2. כמות סופתית מצטברת של 200 מ״מ ומעלה 8

2. שלגים 11

2.1. אירועים בהם עובי השלג 10 ס״מ ומעלה בירושלים 11

2.2. אירועים בהם עובי השלג 20 ס״מ ומעלה בירושלים 13

2.3. אירועים בהם עובי השלג 1 ס״מ ומעלה בירושלים 15

3. שרבים וגלי חום 16

3.1. גלי חום בהם הטמפרטורה היומית הממוצעת (1981-2000) עולה על הממוצע ב-6 מ״צ או יותר במשך 3 ימים רצופים בחודשי הקיץ בירושלים 16

3.2. גלי חום בהם נמדדה בירושלים טמפרטורה מקסימלית של 35 מ״צ או יותר במשך 3 ימים רצופים 18

3.3. שרבים קצרים בהם נמדדה טמפרטורת מקסימום הגבוהה מהממוצע (1981-2000) ב-15 מ״צ 20

סיכום ומסקנות **22**

נספח א׳: מטה דטה – מידע על התחנות אשר השתתפו במחקר **24**

נספח ב׳: שיטות סטטיסטיות לחישוב המגמה **26**

מקורות **28**

רקע

ביולי 2015 פרסם השירות המטאורולוגי (שמ"ט) סקירה[1] מקיפה בנושא אירועי מזג אוויר קיצונים אשר פקדו את ישראל בכמאה השנים האחרונות (השירות המטאורולוגי, 2015א'). הסקירה ריכזה עשרות רבות של אירועים קיצונים מראשית המאה ה-20 ועד ימינו תוך שימת דגש על חריגות המשתנים האקלימים שנמדדו לצד הנזקים והקורבנות שאירועים אלו גבו בחלק מהמקרים. סקירה זו אף שימשה את השמ"ט לבניית תרחישי יחוס של מזג אוויר קיצוני למדינת ישראל עבור רשות החרום הלאומית (רח"ל). מטרת העבודה הנוכחית היא לבחון בצורה אובייקטיבית, על בסיס מדדים כמותיים, האם יש שינוי כלשהו בתדירותם של אירועי מזג אוויר הקיצוניים. הבחינה נעשתה בשני אופנים: 1) בדיקת המגמה לאורך התקופה הנבחנת; 2) השוואה בין תקופות רב-שנתיות שונות על מנת לעמוד על ההבדל במספר השנים בהן התרחשו אירועי מזג אוויר קיצוניים.

מבוא

בדו"ח האחרון של הפאנל הבין ממשלתי לשינויי אקלים (IPCC, 2013) צוין כי התחממותה של המערכת האקלימית הגלובלית הינו חד משמעי. בניתוח הרשומות האקלימיות משנת 1850 ואילך נמצא כי כל אחד משלושת העשורים האחרונים היה חם יותר על פני כדור הארץ מאשר העשורים הקודמים. שינוי אקלימי אינו מתאפיין רק בסטייה מהממוצע והוא עשוי להוביל לשינוי בתדירות, בעוצמה, בהיקף המרחבי, במשך ובתזמון של אירועי הקיצון. בתוך כל זאת, יש לציין שמגוון רחב של אירועים קיצוניים עשוי להתקיים בצורה טבעית גם ללא שינוי אקלימי אנתרופוגני (Seneviratne et al., 2012). בעולם נצפתה מאז 1950 ירידה כללית במספר הימים והלילות הקרים לצד גידול במספר הלילות והימים החמים (ערכים קיצוניים – מעל אחוזון 90 או מתחת לאחוזון 10), במקביל לגידול בתדירות בגלי החום (בעיקר באירופה, אסיה ואוסטרליה). בנוסף נמצאו מגמות גידול מובהקות במספר אירועי הגשם הכבד באזורים יבשתיים מסוימים (בעיקר בצפון אמריקה ואירופה) בעוד שבשאר היבשות השינוי פחות ברור (IPCC, 2013).

בארץ ישראל נמצא כי קיימת התאמה כללית בין מהלך הטמפרטורה הממוצעת באזורנו למהלך הטמפרטורה העולמי כפי שצוין בדו"ח "שינויים אקלימיים בישראל"[2] (השירות המטאורולוגי, 2015ב'). עוד מדו"ח זה עולה כי שני העשורים האחרונים הם החמים ביותר בישראל מאז 1951 כאשר לעלייה בטמפרטורה הממוצעת תרם יותר הגידול הניכר בטמפרטורת המינימום מאשר הגידול בטמפרטורת המקסימום. בניתוח כמויות המשקעים השנתיות לא נמצא שינוי מהותי וכן לא בחלוקה העונתית מאז 1921. במחקר של זיו ועמיתיו (Ziv et al., 2014) נמצאה מגמת ירידה

[1] קישור לסקירה: http://www.ims.gov.il/ims/odot/news/extreme+events.htm
[2] קישור לדו"ח: http://www.ims.gov.il/NR/rdonlyres/C5A08C0E-A799-492C-ABAD-182AF72C1F53/0/שינוייםאקלימיבישראל_מרץ2015_סופי.pdf

לא מובהקת בכמות הגשמים ברב אזורי הארץ בין השנים 1975-2010, רק באביב מגמה זו נמצאה מובהקת.

מספר מחקרים באזורנו בדקו, מעבר לבחינת השינוי בממוצעים, גם את המקרים הקרובים יותר לקצות ההתפלגות. כך נמצא, בניתוח מגמות הטמפרטורות הקיצוניות (מעל אחוזון 90 או מתחת לאחוזון 10), כי שכיחות הימים והלילות החמים עלתה לצד ירידה בשכיחות הימים והלילות הקרים בין השנים 1970-2003 (Zhang et al., 2005). בדומה נמצא על-ידי זיו ועמיתיו (2011) כי בתקופה 1975-2009 חלה בקיץ עלייה במספר חריגות הטמפרטורה מסף העשירון העליון עבור טמפרטורות המינימום והמקסימום. בנוסף נמצאה התארכות במשכם של גלי החום באזור החוף, הבקעה והערבה. עבור עוצמות הגשם הקיצוניות באזורינו, ככלל, לא נמצאה מגמה מובהקת מאז אמצע המאה שעברה ועד תחילת שנות האלפיים (Alpert et al., 2002; Zhang et al., 2005). מחקרים מאוחרים יותר הראו כי קיימת מגמת גידול ברורה בגשמים קיצוניים באזור דרום-מרכז מישור החוף (זיו ועמיתיו 2011; Yosef et al., 2009).

על פי דו"ח IPCC, תחזיות המודלים לאגן הים התיכון, עד סוף המאה ה-21 תחת התרחיש RCP4.5 (בו פליטות גזי החממה העולמיות תגענה למקסימום בין 2030 ל-2040 ולאחר מכן תפחתנה) הן כי הטמפרטורה הממוצעת צפויה לעלות, בסבירות גבוהה (90%-100%), בטווח של 2.0-2.7 מעלות צלסיוס (גידול משמעותי יותר בקיץ) ביחס לתקופה 1986-2005. התחממות זו עשויה להוביל לגידול במספר גלי החום. על פי תחזיות אלו סביר כי כמות המשקעים בחודשי החורף המרכזיים (דצמבר-פברואר) תפחת באחוזים בודדים. עוד על פי דו"ח זה נמצא כי לצד ההפחתה בכמות המשקעים סביר מאוד כי מספר ועוצמת אירועי המשקעים הקיצוניים יגדל ברוב שטחי היבשה בקווי הרוחב הבינוניים (IPCC, 2013). בישראל תחת אותו תרחיש נראה כי הטמפרטורה הממוצעת צפויה לעלות בקיץ ב- 1.5-4 מ"צ ובחורף ב- 1.5-3 מ"צ (בסבירות גבוהה 90%-100%) ביחס לתקופה 1986-2005, לצד כמות משקעים אשר צפויה, במידה סבירה (66%- 100), לפחות בשיעור של בין 10%-20% (לעומת אחוזים בודדים בכלל אגן הים התיכון כפי שצוין) (IPCC, 2013). מחקרים נוספים שנעשו באזור תוך שימוש במספר מודלים והרצת תרחישים שונים של פליטת גזי חממה בעתיד הצביעו גם כן על התחממות ניכרת לקראת סוף המאה ה-21 ביחד עם הפחתה בכמויות הגשם ונטייה לקבלת אירועים קיצוניים יותר (Alpert et al., 2008; Krichak et al., 2009; Mariotti et al., 2008; Smiatek, 2011; Samuels et al., 2013; Mariotti et al., 2015).

מתודולוגיה

בסיס הנתונים

בעבודה זו התמקדנו בשלושה סוגים של אירועי מזג אוויר קיצוניים אשר היו ניתנים לניטור בצורה סבירה גם בשנות ה-20 של המאה הקודמת והם: גשמים עזים, שלגים, שרבים וגלי חום. ניטור האירועים הקיצוניים עבור הגשמים העזים בוצע ב-19 תחנות ותיקות להן יש מדידות רציפות מ-1920 ועד 2015[3]. התחנות מוצגות במפה מספר 1. האירועים אשר נותחו התבססו על תחנות אלו בלבד וזאת כדי למנוע מצב בו עליה בשכיחות מקרי הקיצון אינה נובעת משינוי אקלימי אלא מעיבוי רשת התחנות ושכלול אמצעי הניטור. נתונים חסרים באחת מ-19 התחנות, במהלך אירוע מזג אוויר קיצוני, נבחנו על-ידי תחנות הנמצאות בסמוך לאותה תחנה חסרה. עבור השלגים נותחו נתוני תחנת ירושלים (נתונים אשר התקבלו ממספר תחנות שונות אשר פעלו בעיר, ראו נספח א') בין השנים 1920-2015 ובדיקה נוספת בוצעה בשילוב תחנת צפת (הר-כנען) עבור התקופה 1940-2015. אירועי החום נבחנו בראשית התקופה, החל מ-1927 על בסיס התחנות עזה וירושלים ומ-1950 בתחנות נגבה וירושלים. תחנות אלו מאפשרות קבלת אינדיקציה טובה הן עבור גלי חום ממושכים (שלושה ימים ומעלה) והן עבור שרבים אשר חולפים את אזורנו בפרק זמן קצר יחסית (יום - יומיים). בנוסף, מכיוון שלטמפרטורה אופי רציף (לסטיית הטמפרטורה מהממוצע יש שונות מרחבית נמוכה), אירוע קיצוני יבוא לידי ביטוי ברוב אזורי הארץ, לכן בחלק זה נעשה שימוש במספר תחנות בודדות.

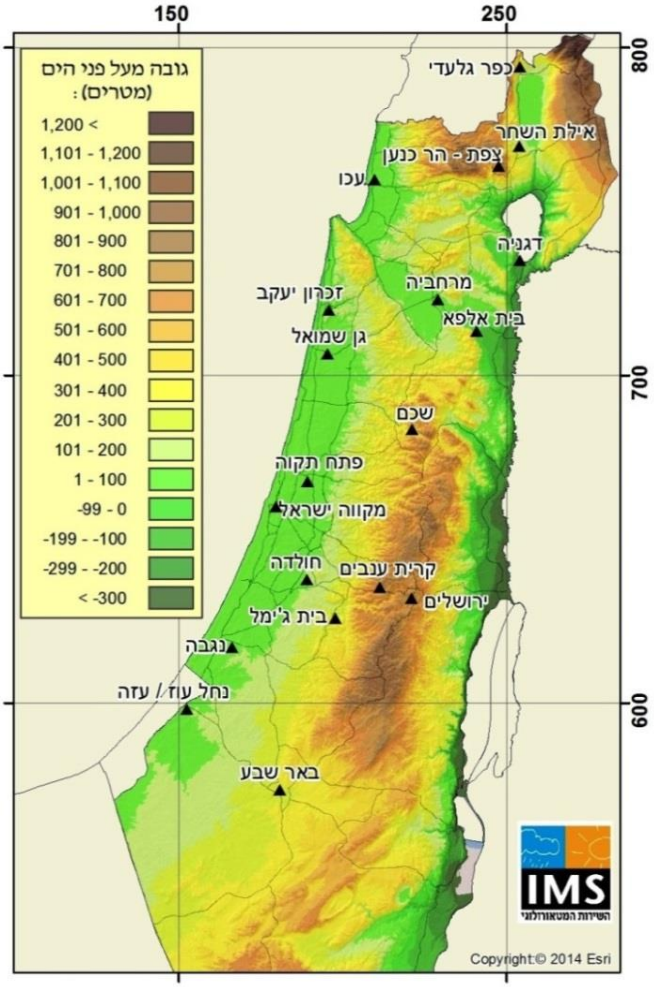
הקריטריונים על פיהם נותחו אירועי מזג האוויר הקיצוניים

- **גשמים עזים:** כמות גשם יומית השווה ל-110 מ"מ ומעלה. בנפרד נבחנה כמות סופתית מצטברת של 200 מ"מ ויותר. כמויות אלו נבחרו בעיקר בשל הנזקים שאירועים כאלו הסבו (להרחבה ראו את סקירת השירות המטאורולוגי, 2015א').
- **שלגים:** נבחנו מדידות בכל התקופה בהן עובי השלג בירושלים היה, 10 ס"מ ומעלה. בנפרד נבחן סף של 20 ס"מ ומעלה וגם סף של 1 ס"מ ומעלה. בחינה נוספת בוצעה עבור אותם הספים בשילוב עם תחנת צפת – הר כנען החל משנת 1940. ספים אלו (10 ו-20 ס"מ) נבחרו בשל הפוטנציאל שלהם לגרום לאי רציפות תפקודית באזורים מסוימים.
- **שרבים וגלי חום:** הובאו בחשבון גלי חום ממושכים ושרבים קצרים. "גל חום" אובחן על פי טמפרטורה יומית ממוצעת בירושלים שעולה על הממוצע הרב שנתי (1981-2000) באותו החודש ב-6 מ"צ לפחות במשך 3 ימים רצופים. בחינה נוספת של גלי החום הממושכים, השתמשה בסף של 35 מ"צ או יותר במשך 3 ימים רצופים לפחות בירושלים, סף בו אי הנוחות לאדם גבוהה ומורגשת במיוחד. עבור השרבים הקצרים נקבע סף בו על טמפרטורת המקסימום היומית להיות גבוהה מהממוצע הרב שנתי באותו החודש ב-15 מ"צ (בתחנות

[3] עבור חלק מהתחנות שהחלו לפעול במהלך שנות ה-20 של המאה הקודמת, אך לא ממש ב-1920, השתמשנו בשנים הראשונות בתחנות סמוכות. ראו פירוט בנספח א'.

עזה, נגבה וירושלים). שלושת הספים האלה מאפשרים ייצוג של אירועי חום קיצוניים מסוגים שונים.

יש לציין כי האירועים אותם אנו מנתחים כאן הם אירועים נפרדים, כלומר, הקפדנו לוודא כי יש ביניהם הפרדה של מספר ימים ומקורם לא מאותה מערכת סינופטית. יחד עם זאת, הפרדה זו אינה בהכרח מספקת כדי לוודא שהאירועים הינם בלתי תלויים לחלוטין, היות וקיימים מנגנונים שקבוע הזמן שלהם ארוך והמסוגלים להשפיע על מזג האוויר בטווח של מספר חודשים, כגון אנומליות בטמפרטורת פני הים או פליטת אפר וולקני על-ידי התפרצויות געשיות. לפיכך, הקפדנו לבצע גם ניתוח להתפלגות השנים בהן התרחש אירוע קיצוני (בחינה דיכוטומית), כך שלא יינתן משקל יתר למספר גדול של אירועים בשנה מסוימת, בה התקיימו תנאים אטמוספריים/אוקיינים מיוחדים. כמו כן, מספיק היה שהאירוע חצה אחד מהספים הנ"ל בתחנה אחת בלבד כדי להיכלל בניתוח, ומצד שני גם אם האירוע חצה את הסף במספר תחנות הוא נספר רק פעם אחת.



מפה 1. פריסת התחנות אשר השתתפו במחקר (ראו פירוט בנספח א').

השיטות בהן נותחו אירועי מזג האוויר הקיצוניים

בכדי לבחון האם קיים שינוי בשכיחות אירועי מזג האוויר הקיצוניים ובמגמתם ברמה הארצית, בוצעו מספר מבחנים סטטיסטים על כל אחד מהמשתנים (גשם, שלג וגלי חום):

א. **בחינת מגמות:** בוצעו מבחנים הבודקים שינוי בשכיחות האירועים לאורך כל תקופת המחקר. בשיטות אלו יש חשיבות למספר האירועים בשנה ולפרק הזמן שעובר בין אירוע לאירוע. נבחרו שתי שיטות שונות להתמודדות עם סוגיה זו (ראו הרחבה בנספח ב'):
   1. מבחן המבוסס על רגרסיה לוגיסטית (Frei and Schär, 2001).
   2. מבחן הבודק שינוי בפרקי הזמן (אינטרוול) בין אירועים עוקבים בהנחה שהנתונים עומדים במבחן להתפלגות פואסונית למספר אירועים כפי שקבעו החוקרים (Keim and Cruise, 1998).

ב. **הבדלים בין תקופות:** בוצעו מבחנים שונים לבדיקת ההבדלים במספר השנים בהן התרחשו אירועי מזג האוויר הקיצוניים בתקופות שונות. לשם כך בוצעו מבחני השוואה דיכוטומיים הכוללים את מבחן פישר וחי בריבוע/פרופורציות. במבחנים אלו כל שנה בה היו אירועים קיצוניים קיבלה את הערך 1 (ללא קשר למספר האירועים אשר נמדדו באותה השנה) בעוד ששנים ללא אירועים קיצונים כלל קיבלו את הערך 0. המבחנים בוצעו ברמת ביטחון של 95% (α=0.05). כדי לקבוע אם קיימים הבדלים בין התקופות השונות חולקה תקופת המחקר למספר תתי תקופות אשר אורכן עשוי להשתנות בהתאם למשתנה הנבחן:
   1. שתי תקופות שוות באורכן בנות כ-48 שנים כל אחת.
   2. ארבע תקופות שוות באורכן בנות כ-24 שנים כל אחת.
   3. תקופות לא שוות באורכן, 30 השנים האחרונות לעומת התקופה שקדמה להן בכדי לבחון האם חלו שינויים בתקופה האחרונה בפרט.

השערת האפס עבור מבחנים אלו היא שלא קיימים הבדלים במספר השנים עם אירועי מזג אוויר קיצוניים בין התקופות, לעומת ההשערה האלטרנטיבית בה קיימים הבדלים בין התקופות (דו צדדי) ו/או בתקופה הראשונה יש יותר/פחות שנים עם אירועי קיצון (חד צדדי).

תוצאות

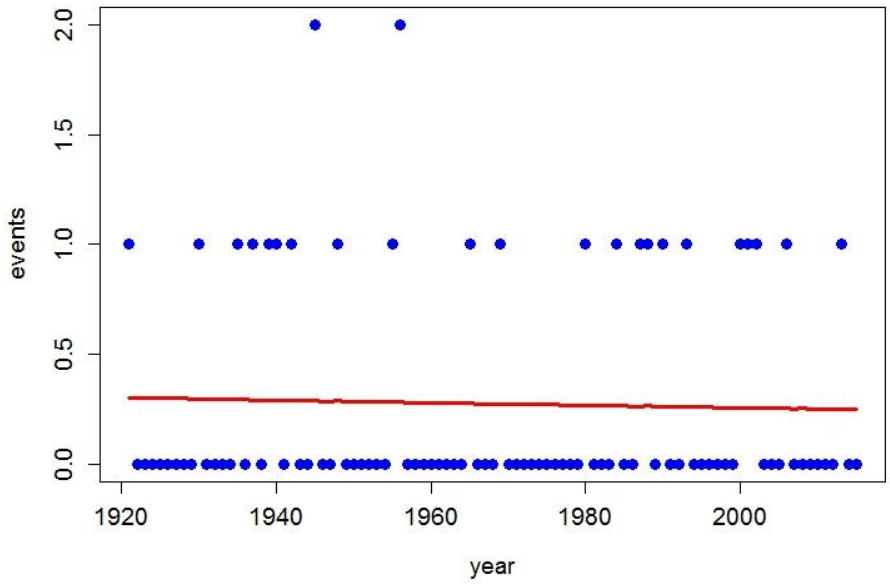
פרק התוצאות מחולק לשלושה: 1) גשמים עזים; 2) שלגים; 3) שרבים וגלי חום. בכל חלק יוצגו תוצאות הניתוחים הסטטיסטים השונים (בחינת המגמה לאורך התקופה והבדלים בין תתי התקופות השונות) עבור כל אחד מהספים.

1. גשמים עזים

1.1. כמות יומית של 110 מ"מ ומעלה

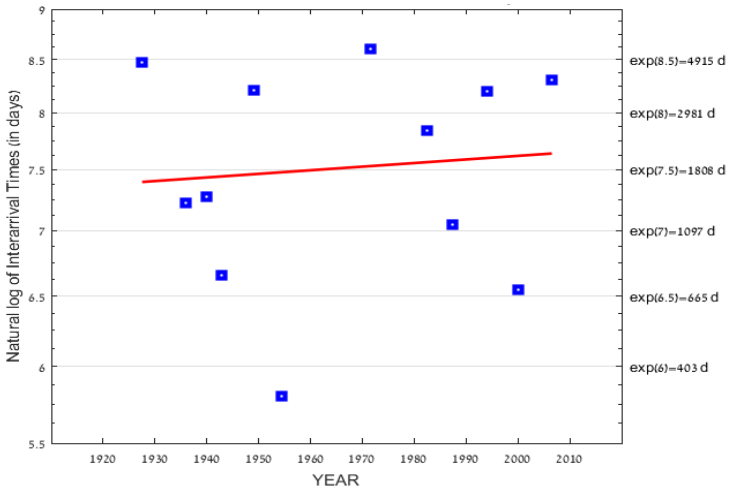
א. בדיקת מגמה לאורך כל התקופה

איור 1.א מתאר את מספר אירועי הגשם הקיצוני לחורפים 1920/1-2014/15 בהן ירדה כמות של לפחות 110 מ"מ ביום. המגמה, המתוארת על-ידי רגרסיה לוגיסטית (Frei and Schär, 2001), הינה של הפחתה מינורית והיא אינה מובהקת *(p-value=0.757)*.



איור 1.א: המגמה במספר אירועי גשם יומי קיצוני (נקודות כחולות), 110 מ"מ/יום ומעלה לאורך התקופה 1920/1-2014/15. הקו האדום מציג את המגמה (רגרסיה לוגיסטית). [odds ratio 0.82, dispersion 0.89].

בדיקת מגמה לאורך כל הסדרה המבוססת על בחינת פרקי הזמן בין האירועים (Keim and Cruise, 1998) מתארת מגמה דומה (איור 1.ב). קרי, פרק הזמן אשר עובר בין אירוע לאירוע מתארך במעט, מכאן שתדירותו יורדת במעט. גם מגמה זו אינה מובהקת *(r=0.095, p-value=0.769)*.



איור 1.ב: פרקי הזמן בין אירועי הגשם היומי בהם ירד 110 מ"מ/יום ומעלה (מקובצים לזוגות) לאורך התקופה 1920-2015. בציר האנכי מספר הימים לפי לוג טבעי. הקו האדום מציג את המגמה הליניארית.

משני איורים אלו עולה כי נמצאה מגמה שלילת מינורית שאינה מובהקת (ברמת מובהקות של 5%) במספר האירועים בהם ירדה כמות יומית של 110 מ"מ ומעלה (בתחנה אחת לפחות).

ב. בדיקת ההבדלים בחלוקה לתקופות שונות

שלוש הטבלאות הבאות מציגות את מספר השנים בהן התרחשו אירועי גשם קיצוניים מול מספר השנים בהן לא התרחשו אירועי גשם קיצוניים כאלו כלל ("ללא") עבור כל תת תקופה. בניגוד למבחני המגמה אשר פורטו בסעיף הקודם, כאן אין משמעות למספר האירועים בכל שנה. תקופות אלו נבחנו במספר מבחנים סטטיסטים (ראו עמוד 5 סעיף ב') להלן הטבלאות:

בדיקת הבדלים בין שתי תקופות שוות (בקרוב)

	1921-1967	1968-2015
גשם קיצוני	12	12
ללא	35	36
פרופורציה	0.26	0.25

בדיקת הבדלים בין שתי תקופות לא שוות (30 השנים אחרונות מול 65 השנים שקדמו להן)

	1921-1985	1986-2015
גשם קיצוני	15	9
ללא	50	21
פרופורציה	0.23	0.3

בדיקת הבדלים בין ארבע תקופות שוות (בקרוב)

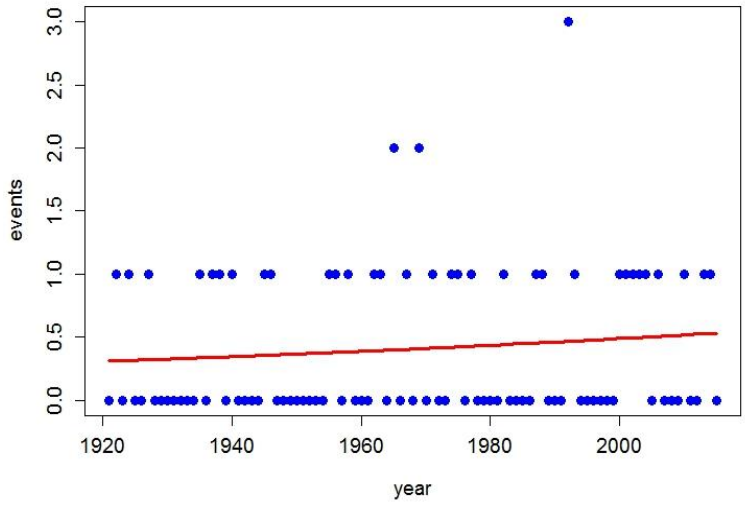
	1921-1943	1944-1967	1968-1991	1992-2015
גשם קיצוני	7	5	6	6
ללא	16	19	18	18
פרופורציה	0.3	0.21	0.25	0.25

בכל המבחנים שבוצעו ערך המובהקות הנמוך ביותר שנמצא היה $p\text{-}value \geq 0.32$. מכאן שלא נמצאו הבדלים מובהקים (ברמת מובהקות של 5%) במספר השנים עם אירועי גשם קיצוניים של 110 מ״מ/יום בין תתי התקופות השונות.

1.2. כמות סופתית מצטברת של 200 מ״מ ומעלה

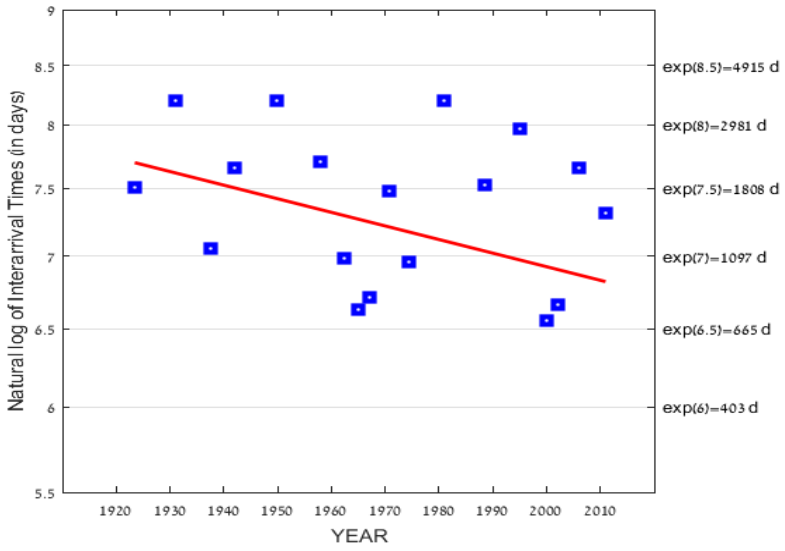
א. בדיקת מגמה לאורך כל התקופה

איור 1.ג מתאר את מספר אירועי הגשם הקיצוני לחורפים 1920/1-2014/15 בהם ירדה כמות סופתית מצטברת של לפחות 200 מ״מ. המגמה, המתוארת על-ידי רגרסיה לוגיסטית, הינה של גידול אך איננה מובהקת *(p-value=0.293)*.



איור 1.ג: המגמה במספר אירועי גשם קיצוני (נקודות כחולות), כמות מצטברת של 200 מ״מ ומעלה לאורך התקופה 1920/1-2014/15. הקו האדום מציג את המגמה (רגרסיה לוגיסטית). [odds ratio 1.714, dispersion 0.848].

בדיקת המגמה לאורך כל הסדרה המבוססת על בחינת פרקי הזמן בין האירועים מציגה תמונה דומה (איור 1.ד). קרי, פרק הזמן אשר עובר בין אירוע לאירוע מתקצר, מכאן שתדירותו עולה. אולם, גם מגמה זו <u>אינה מובהקת</u> *(r=-0.29, p-value=0.228)*.



איור 1.ד: פרקי הזמן בין אירועי הגשם בהם ירדה כמות מצטברת של 200 מ״מ ומעלה (מקובצים לזוגות) לאורך התקופה 1920-2015. בציר האנכי מספר הימים לפי לוג טבעי. הקו האדום מציג את המגמה הליניארית.

מאיור 1.ג ו-1.ד עולה כי נמצאה מגמה חיובית <u>שאינה מובהקת</u> (ברמת מובהקות של 5%) במספר האירועים בהם ירדה כמות סופתית מצטברת של לפחות 200 מ״מ.

ב. בדיקת ההבדלים בחלוקה לתקופות שונות

שלוש הטבלאות הבאות מציגות את מספר השנים בהן נמדדה כמות סופתית מצטברת של לפחות 200 מ״מ מול מספר השנים בהן לא נמדדו גשמים קיצוניים כאלו כלל (״ללא״) עבור כל תת תקופה. ההבדלים בין תקופות אלו נבחנו במספר מבחנים סטטיסטים (ראו עמוד 5 סעיף ב׳). להלן הטבלאות:

בדיקת הבדלים בין שתי תקופות שוות (בקרוב)

	1921-1967	1968-2015
גשם קיצוני	16	19
ללא	31	29
פרופורציה	0.34	0.4

בדיקת הבדלים בין שתי תקופות לא שוות (30 השנים אחרונות מול 65 השנים שקדמו להן)

	1921-1985	1986-2015
גשם קיצוני	22	13
ללא	43	17
פרופורציה	0.34	0.43

בדיקת הבדלים בין ארבע תקופות שוות (בקרוב)

	1921-1943	1944-1967	1968-1991	1992-2015
גשם קיצוני	7	9	8	11
ללא	16	15	16	13
פרופורציה	0.3	0.38	0.33	0.46

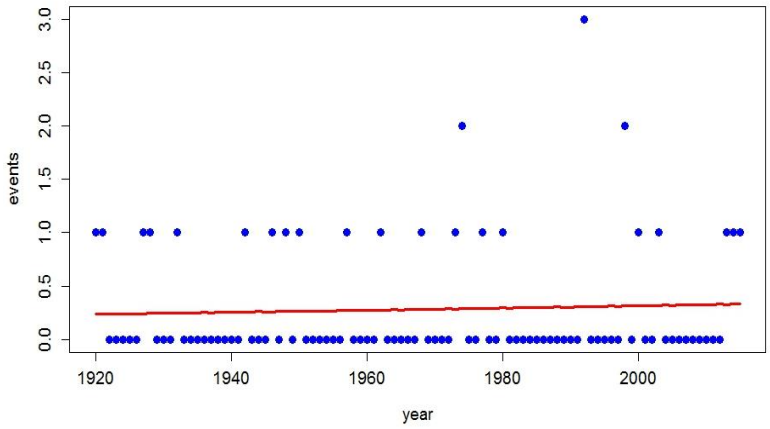
בכל המבחנים שבוצעו, ערך המובהקות הנמוך ביותר שנמצא היה $p\text{-value} \geq 0.25$. מכאן שלא נמצאו הבדלים מובהקים (ברמת מובהקות של 5%) במספר השנים עם אירועי גשם קיצוניים עבור כמות סופתית מצטברת של 200 מ״מ, בין תתי התקופות השונות.

2. שלגים

2.1. אירועים בהם עובי השלג 10 ס"מ ומעלה בירושלים

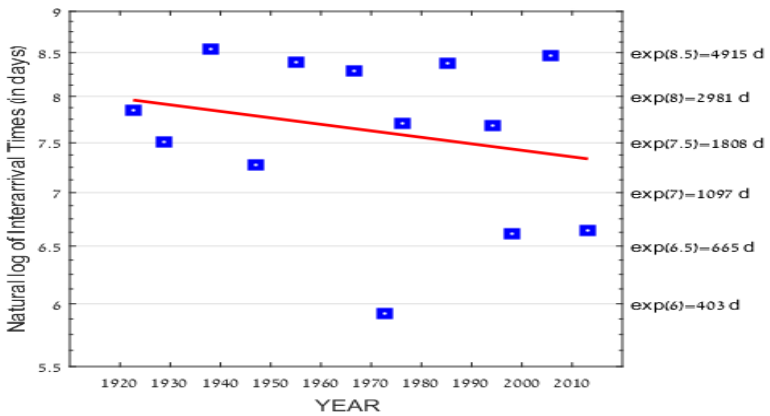
א. בדיקת מגמה לאורך כל התקופה

איור 2.א מתאר את מספר אירועי השלג בהם עוביו היה 10 ס"מ ומעלה בתקופה 1920-2015. המגמה המתוארת על-ידי רגרסיה לוגיסטית נמצאה חיובית אך לא מובהקת *(p-value=0.625)*.



איור 2.א: המגמה במספר אירועי שלג (נקודות כחולות) בהם עוביו היה 10 ס"מ ומעלה לאורך התקופה 1920-2015. הקו האדום מציג את המגמה (רגרסיה לוגיסטית). [odds ratio 1.403, dispersion 1.087].

בחינת פרקי הזמן בין אירוע לאירוע מוצגת באיור 2.ב. באיור ניתן לראות שהמגמה הינה ירידה, קרי, פרק הזמן אשר עובר בין אירוע לאירוע מתקצר. גם מגמה זו נמצאה לא מובהקת *(r=-0.246, p-value=0.412)*.



איור 2.ב: פרקי הזמן בין אירועי השלג בהם עובי השלג היה 10 ס"מ ומעלה (מקובצים לזוגות) לאורך התקופה 1920-2015. בציר האנכי מספר הימים לפי לוג טבעי. הקו האדום מציג את המגמה הליניארית.

מכאן ששני המבחנים הבוחנים את השינוי עם הזמן מצביעים על מגמת גידול בתדירות אירועי השלג בירושלים בהן ירדו 10 ס״מ ומעלה אך מגמה זו אינה מובהקת ברמת מובהקות של 5%.

ב. בדיקת ההבדלים בחלוקה לתקופות שונות

שלוש הטבלאות מציגות את מספר השנים בהם נמדד שלג בעובי של 10 ס״מ ומעלה מול מספר השנים בהן לא נמדד שלג כזה (״ללא״) בכל תת תקופה. ההבדלים בין תקופות אלו נבחנו במספר מבחנים סטטיסטים (ראו עמוד 5 סעיף ב׳). להלן הטבלאות:

בדיקת הבדלים בין שתי תקופות שוות

ירושלים	1920-1967	1968-2015
שלג ≥ 10 ס״מ	11	16
ללא	37	32
פרופורציה	0.23	0.33

בדיקת הבדלים בין שתי תקופות לא שוות (30 שנים אחרונות מול 66 שנים שקדמו להן)

ירושלים	1920-1985	1986-2015
שלג ≥ 10 ס״מ	17	10
ללא	49	20
פרופורציות	0.26	0.33

בדיקת הבדלים בין ארבע תקופות שוות

ירושלים	1920-1943	1944-1967	1968-1991	1992-2015
שלג ≥ 10 ס״מ	6	5	6	10
ללא	18	19	18	14
פרופורציה	0.25	0.21	0.25	0.42

מתוך כלל המבחנים שבוצעו, ערך המובהקות הנמוך ביותר שנמצא היה $p\text{-}value \geq 0.182$. מכאן שלא נמצאו הבדלים מובהקים (ברמת מובהקות של 5%) במספר השנים בהן עובי השלג אשר נמדד היה 10 ס״מ ומעלה בין תתי התקופות השונות.

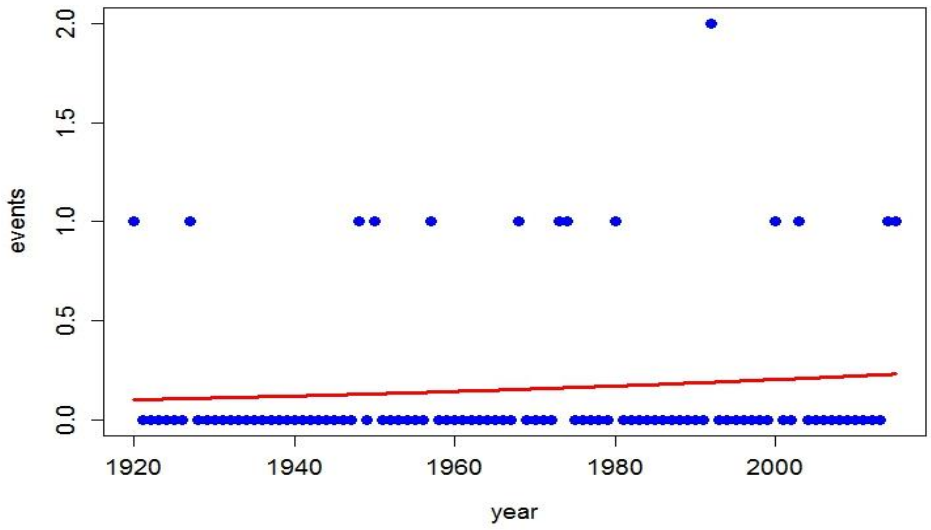
ג. בדיקת המגמות וההבדלים בין התקופות עבור ירושלים ו/או צפת

נבחנו באותן השיטות, מספר אירועי השלג בהם עוביו היה 10 ס״מ ומעלה בירושלים או בצפת (במידה וירדה באותו אירוע כמות השווה או גדולה מ-10 ס״מ, בשתי התחנות, היא נספרה רק פעם אחת) לאורך התקופה 1940-2015. בדומה לממצאים אשר הוצגו עד כה, גם בשילוב עם תחנת צפת, לא נמצאה מגמה מובהקת ולא נמצאו הבדלים מובהקים בין תתי התקופות השונות (ערך המובהקות הנמוך ביותר שנמצא היה $p\text{-value} \geq 0.32$).

2.2. אירועים בהם עובי השלג 20 ס״מ ומעלה בירושלים

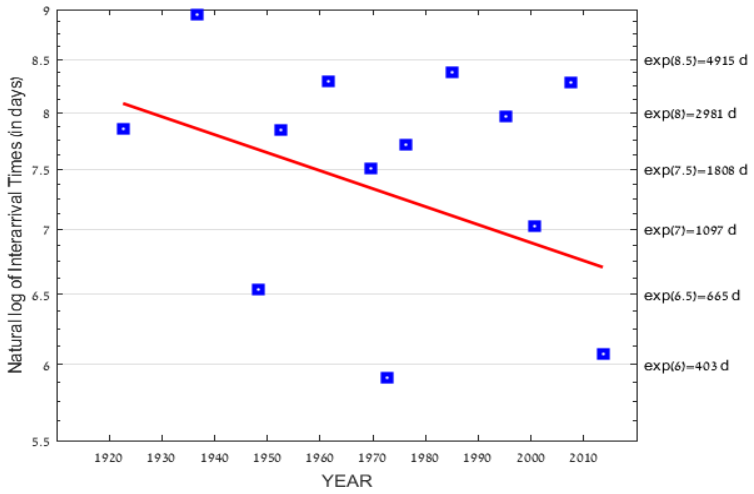
א. בדיקת מגמה לאורך כל התקופה

איור 2.ג מתאר את מספר אירועי השלג בהם עוביו היה 20 ס״מ ומעלה בתקופה 1920-2015. המגמה המתוארת על-ידי רגרסיה לוגיסטית נמצאה חיובית אך לא מובהקת ($p\text{-value}=0.35$).



איור 2.ג: המגמה במספר אירועי שלג (נקודות כחולות) בהם עוביו היה 20 ס״מ ומעלה לאורך התקופה 1920-2015. הקו האדום מציג את המגמה (רגרסיה לוגיסטית). [odds ratio 2.317, dispersion 0.979].

בחינת פרקי הזמן בין אירוע לאירוע מוצגת באיור 2.ד. באיור ניתן לראות שהמגמה הינה של ירידה, קרי, פרק הזמן אשר עובר בין אירוע לאירוע מתקצר. גם מגמה זו נמצאה לא מובהקת ($r=-0.316$, $p\text{-value}=0.271$).



איור 2.ד: פרקי הזמן בין אירועי השלג בהם עובי השלג היה 20 ס״מ ומעלה לאורך התקופה 1920-2015. בציר האנכי מספר הימים לפי לוג טבעי. הקו האדום מציג את המגמה הליניארית.

מכאן ששני המבחנים הבוחנים את השינוי עם הזמן מצביעים על מגמת גידול בתדירות אירועי השלג בירושלים בהן ירדו 20 ס״מ ומעלה אך מגמה זו אינה מובהקת ברמת מובהקות של 5%.

ב. בדיקת ההבדלים בחלוקה לתקופות שונות

שלוש הטבלאות מציגות את מספר השנים בהם נמדד שלג בעובי של 20 ס״מ ומעלה מול מספר השנים בהן לא נמדד שלג כזה (״ללא״) בכל תת תקופה. תקופות אלו נבחנו במספר מבחנים סטטיסטים (ראו עמוד 5 סעיף ב׳). להלן הטבלאות:

בדיקת הבדלים בין שתי תקופות שוות

ירושלים	1920-1967	1968-2015
שלג ≥ 20 ס״מ	5	9
ללא	43	39
פרופורציה	0.1	0.19

בדיקת הבדלים בין שתי תקופות לא שוות (30 שנים אחרונות מול 66 שנים שקדמו להן)

ירושלים	1920-1985	1986-2015
שלג ≥ 20 ס״מ	9	5
ללא	57	25
פרופורציות	0.14	0.17

בדיקת הבדלים בין ארבע תקופות שוות

ירושלים	1920-1943	1944-1967	1968-1991	1992-2015
שלג ≥ 20 ס״מ	2	3	4	5
ללא	22	21	20	19
פרופורציה	0.08	0.125	0.167	0.21

מתוך כלל המבחנים שבוצעו, ערך המובהקות הנמוך ביותר שנמצא היה $p\text{-value} \geq 0.193$. מכאן שלא נמצאו הבדלים מובהקים (ברמת מובהקות של 5%) במספר השנים בהן עובי השלג אשר נמדד היה 20 ס״מ ומעלה בין תתי התקופות השונות.

ג. בדיקת המגמות וההבדלים בין התקופות עבור ירושלים ו/או צפת

נבחנו באותן השיטות, מספר אירועי השלג בהם עוביו היה 20 ס״מ ומעלה בירושלים או בצפת (במידה וירד באותו אירוע כמות השווה או גדולה מ-20 ס״מ, בשתי התחנות, היא נספרה רק פעם אחת) לאורך התקופה 1940-2015. בדומה לממצאים אשר הוצגו עד כה, גם בשילוב עם תחנת צפת, לא נמצאה מגמה מובהקת ולא נמצאו הבדלים מובהקים בין תתי התקופות השונות (ערך המובהקות הנמוך ביותר שנמצא היה $p\text{-value} \geq 0.28$).

2.3. אירועים בהם עובי השלג 1 ס״מ ומעלה בירושלים

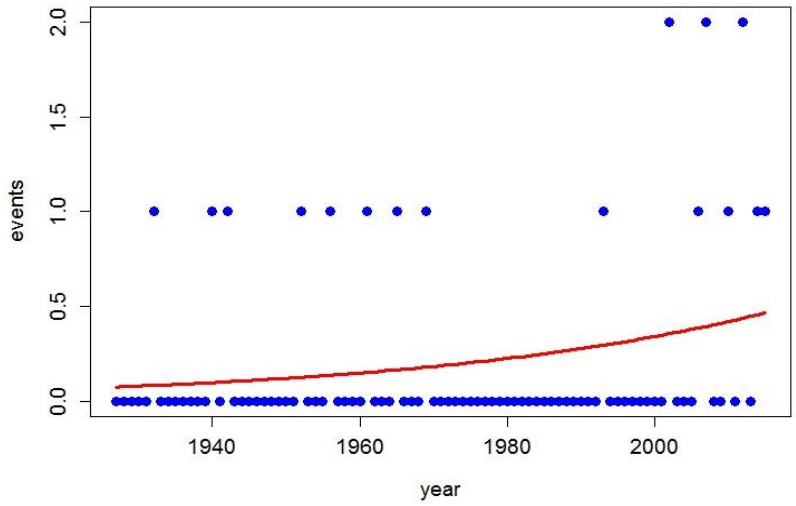
עובי שלג של 1 ס״מ ומעלה אינו סף קיצוני ומתרחש כמעט מידי שנה. בסף זה נמצאה מגמה חיובית ומובהקת ($p\text{-value}=0.044$) וכך גם בבדיקת ההבדלים בין שתי תקופות שוות בהן נמצא כי בתקופה האחרונה יש יותר שנים בהן נערם שלג בעובי של לפחות 1 ס״מ על הקרקע בירושלים.

3. שרבים וגלי חום

3.1. גלי חום בהם הטמפרטורה היומית הממוצעת (1981-2000) עולה על הממוצע ב-6 מעלות צלסיוס או יותר במשך 3 ימים רצופים בחודשי הקיץ בירושלים

א. בדיקת מגמה לאורך כל התקופה

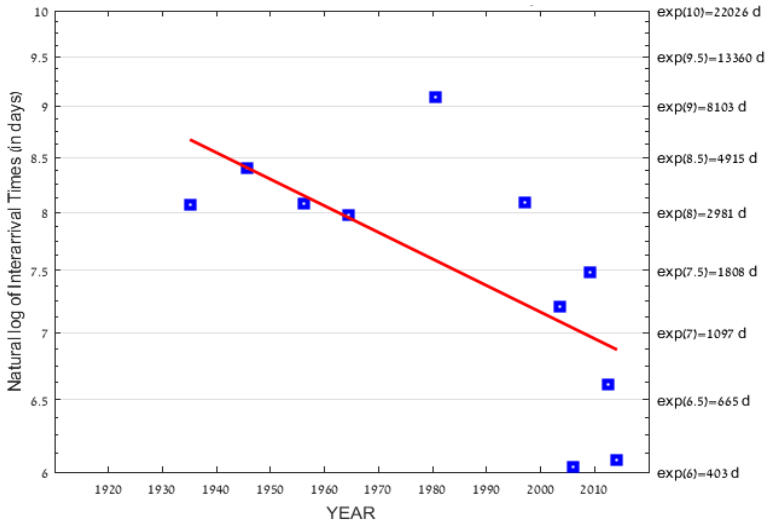
איור 3.א מתאר את מספר אירועי גלי החום הקיצוניים בהם הטמפרטורה היומית הממוצעת עולה על הממוצע ב-6 מעלות צלסיוס או יותר במשך 3 ימים רצופים בחודשי הקיץ (יוני-אוגוסט) בתקופה 1927-2015 בירושלים[4]. מהרגרסיה הלוגיסטית עולה כי קיימת מגמת עליה מובהקת (*p-value=0.037*) בשיעור חד (*odds ratio=6.3*).



איור 3.א: המגמה במספר אירועי גלי חום קיצוניים בקיץ (נקודות כחולות) לאורך התקופה 1927-2015. הקו האדום מציג את המגמה (רגרסיה לוגיסטית). [odds ratio 6.31, dispersion 1.04].

בחינת פרקי הזמן בין אירוע לאירוע מוצגת באיור 3.ב. באיור ניתן לראות שהמגמה הינה ירידה ברורה וחזקה, קרי פרק הזמן אשר עובר בין אירוע לאירוע מתקצר מכאן שתדירותו עולה. גם מגמה זו נמצאה מובהקת (*r=-0.676, p-value=0.022*).

[4] בתחילת הסדרה הנתונים נלקחו ממספר תחנות בעיר, משנת 1950 הנתונים הם מתחנת ירושלים מרכז (בניין ג'ינרלי). ראו פירוט בנספח א'.



איור 3.ב: פרקי הזמן בין אירועי גלי החום בחודשים יוני-ספטמבר (מקובצים לזוגות) לאורך התקופה 1932-2015. בציר האנכי מספר הימים לפי לוג טבעי. הקו האדום מציג את המגמה הליניארית.

איור 3.א ואיור 3.ב מראים בברור שתדירות גלי החום בירושלים גדלה בצורה משמעותית.

ב. בדיקת ההבדלים בחלוקה לתקופות שונות

שלוש הטבלאות מציגות את מספר השנים בהן התרחשו אירועי גלי חום קיצוניים בהם הטמפרטורה היומית הממוצעת עולה על הממוצע ב-6 מעלות צלסיוס במשך 3 ימים רצופים או יותר בחודשי הקיץ בירושלים מול מספר השנים בהן לא התרחשו גלי חום קיצוניים כאלו כלל ("ללא") עבור כל תת תקופה. תקופות אלו נבחנו במספר מבחנים סטטיסטים (ראו עמוד 5 סעיף ב') להלן הטבלאות:

בדיקת הבדלים בין שתי תקופות שוות (בקרוב)

	1927-1971	1972-2015
גלי חום	8	8
ללא	37	36
פרופורציה	0.18	0.18

בדיקת הבדלים בין שתי תקופות לא שוות (30 השנים אחרונות מול 58 השנים שקדמו להן)

	1927-1985	1986-2015
גלי חום	8	8
ללא	51	22
פרופורציות	0.1	0.27

בדיקת הבדלים בין ארבע תקופות שוות (בקרוב)

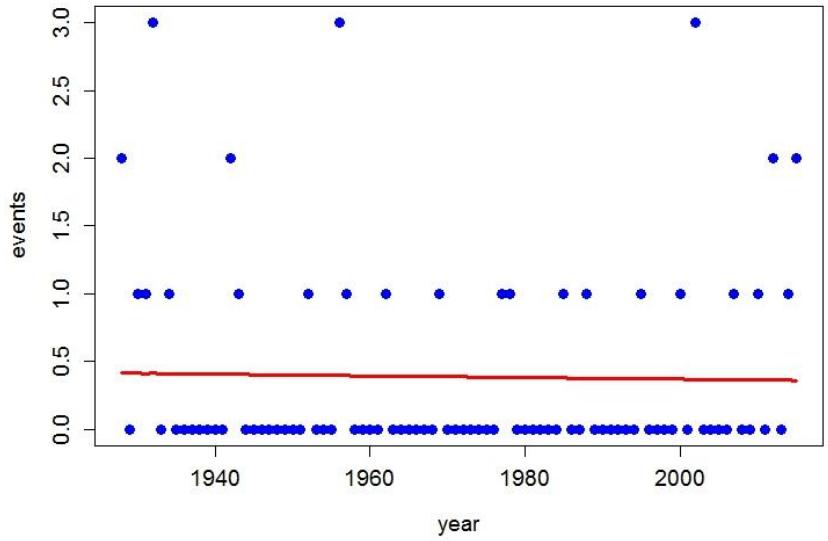
	1927-1949	1950-1971	1972-1993	1994-2015
גלי חום	3	5	1	7
ללא	20	17	21	15
פרופורציה	0.13	0.23	0.05	0.32

בכל המבחנים שבוצעו נמצא שבשני העשורים האחרונים אירעו גלי חום מסוג זה בירושלים בתדירות גדולה יותר מאשר בעשורים אשר קדמו להן, אם כי ברמת מובהקות של 10%.

3.2. גלי חום בהם נמדדה בירושלים טמפרטורה מקסימלית של 35 מעלות צלסיוס או יותר במשך 3 ימים רצופים

א. בדיקת מגמה לאורך כל התקופה

איור 3.ג מתאר את מספר אירועי גלי החום בתקופה 1928-2015 אשר בהם הטמפרטורה המקסימלית בירושלים חצתה סף של 35 מעלות במשך שלושה ימים רצופים לפחות. המגמה, המתוארת על-ידי רגרסיה לוגיסטית, נמצאה שלילית, מאוד מינורית ולא מובהקת (*p-value=0.84*).



איור 3.ג: המגמה במספר אירועי גלי חום קיצונים (נקודות כחולות) לאורך התקופה 1928-2015. הקו האדום מציג את המגמה (רגרסיה לוגיסטית). [odds ratio 0.87, dispersion 1.41].

* בדיקת מגמה לאורך כל הסדרה המבוססת על בחינת פרקי הזמן בין האירועים לא התבצעה מכיוון שהסדרה אינה ממלאת אחר הנחות השיטה (Keim and Cruise, 1998).

ב. בדיקת ההבדלים בחלוקה לתקופות שונות

שלוש הטבלאות מציגות את מספר השנים בהן התרחשו גלי חום קיצונים בהם נמדדה טמפרטורה מקסימלית של לפחות 35 מעלות צלסיוס במשך שלושה ימים רצופים ויותר בירושלים מול מספר השנים בהן לא התרחשו גלי חום מסוג זה כלל ("ללא") עבור כל תת תקופה. תקופות אלו נבחנו במספר מבחנים סטטיסטים (ראו עמוד 5 סעיף ב'). להלן הטבלאות:

בדיקת הבדלים בין שתי תקופות שוות

	1928-1971	1972-2015
גלי חום	12	12
ללא	32	32
פרופורציה	0.27	0.27

בדיקת הבדלים בין שתי תקופות לא שוות (30 השנים אחרונות מול 58 השנים שקדמו להן)

	1928-1985	1986-2015
גלי חום	15	9
ללא	43	30
פרופורציות	0.26	0.3

בדיקת הבדלים בין ארבע תקופות שוות (בקרוב)

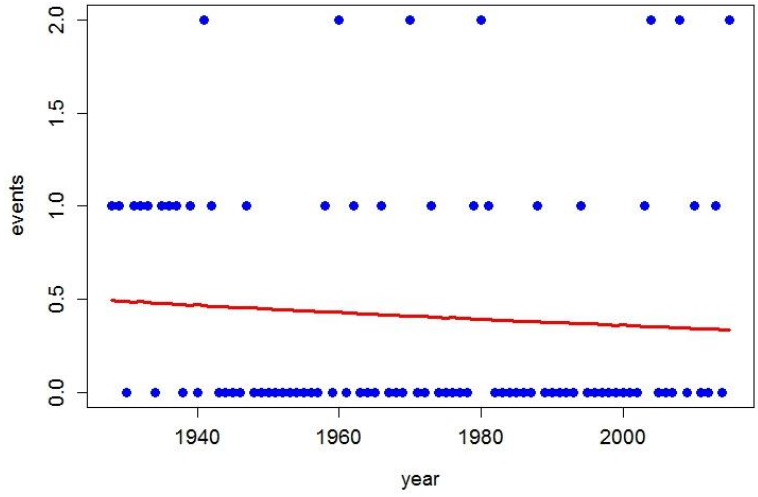
	1928-1949	1950-1971	1972-1993	1994-2015
גלי חום	7	5	4	8
ללא	14	17	18	14
פרופורציה	0.33	0.23	0.18	0.36

בכל המבחנים שבוצעו (ראו עמוד 5 סעיף ב') ערך המובהקות הנמוך ביותר שנמצא היה $p\text{-}value \geq 0.48$. מכאן יוצא שלא נמצאו הבדלים מובהקים (ברמת מובהקות של 5%) במספר השנים בהן נמדדו גלי חום קיצונים בין תתי התקופות השונות.

3.3. שרבים קצרים בהם נמדדה טמפרטורת מקסימום הגבוהה מהממוצע (1981-2000) ב-15 מעלות צלסיוס

א. בדיקת מגמה לאורך כל התקופה

איור 3.ד מתאר את מספר השרבים הקצרים הקיצוניים בהם טמפרטורת מקסימום גבוהה מהממוצע ב-15 מעלות לפחות בתקופה 1928-2015. המגמה, המתוארת על-ידי רגרסיה לוגיסטית, נמצאה שלילית ולא מובהקת *(p-value=0.521)*.



איור 3.ד: המגמה במספר אירועי השרב הקיצוניים (נקודות כחולות) לאורך התקופה 1928-2015. הקו האדום מציג את המגמה (רגרסיה לוגיסטית). [odds ratio 0.681, dispersion 1.03].

ב. בדיקת ההבדלים בחלוקה לתקופות שונות

שלוש הטבלאות מציגות את מספר השנים בהן התרחשו אירועי שרב קיצוניים בהם נמדדה טמפרטורת מקסימום הגבוהה מהממוצע ב-15 מעלות צלסיוס מול מספר השנים בהן לא התרחשו אירועי שרב קיצוניים כאלו כלל ("ללא") עבור כל תת תקופה. תקופות אלו נבחנו במספר מבחנים סטטיסטים (ראו עמוד 5 סעיף ב'). להלן הטבלאות:

בדיקת הבדלים בין שתי תקופות שוות

	1928-1971	1972-2015
שרבים	14	8
ללא	30	36
פרופורציה	0.32	0.18

בדיקת הבדלים בין שתי תקופות לא שוות (30 השנים אחרונות מול 58 השנים שקדמו להן)

	1928-1985	1986-2015
שרבים	17	5
ללא	41	25
פרופורציות	0.29	0.17

בדיקת הבדלים בין ארבע תקופות שוות

	1928-1949	1950-1971	1972-1993	1994-2015
שרבים	11	3	4	4
ללא	11	19	18	18
פרופורציה	0.5	0.14	0.18	0.18

בכל המבחנים שבוצעו נמצא ששני העשורים הראשונים בתחילת התקופה מאופיינים במספר שנים גדול יותר בהן אירעו שרבים מעין אלו, אם כי ברמת מובהקות של 10%.

סיכום ומסקנות

בעבודה זו נבחנו אירועי מזג האוויר הקיצוניים אשר פקדו את הארץ בתקופה 1920-2015 בשלושה משתנים אקלימים שונים: גשם, שלג וטמפרטורה. הניתוחים בוצעו על-ידי שימוש במגוון שיטות סטטיסטיות ואת תוצאותיהם הסופיות ניתן למצוא בטבלה מספר 1. טבלה זו מרכזת את כיוון המגמות ואת ערך המובהקות הנמוך ביותר שנמצא עבור כלל הספים שנבדקו, הן בהשוואה בין התקופות והן בבחינת המגמות. יש לציין כי הבחינה בוצעה לסדרות נתונים ארוכות אשר אינן הומוגניות, קרי, אינן נקיות מהשפעות מלאכותיות כגון: החלפת מכשור, שינוי בהצבה של סוכה מטאורולוגית, שינויים בסביבת התחנה וכד'. לסוגיה זו עשויה להיות השפעה על המסקנות של עבודה זו.

טבלה 1: ערך המובהקות (*p-value*) הנמוך ביותר אשר נמצא בכלל המבחנים הסטטיסטים (כולל מבחנים חד צדדים) עבור המשתנים השונים בהשוואה בין תקופות ובבחינת המגמות. בחלק התחתון של הטבלה, מוצג גם כיוון המגמה. חץ מודגש מציין מגמה מובהקת.

	גשם יומי 110 מ"מ/יום	גשם סופתי 200 מ"מ/יום	שלג מעל 10 ס"מ	שלג מעל 20 ס"מ	גלי חום טמפרטורה ממוצעת מעל 6 מ"צ בקיץ	גלי חום טמפרטורה של 35 מ"צ במשך 3 ימים	שרבים 15 מ"צ מעל טמפרטורת המקסימום הממוצעת
השוואה בין תקופות *p-value*	*≥0.32*	*≥0.25*	*≥0.182*	*≥0.193*	*≥0.1*	*≥0.48*	*≥0.1*
כיוון המגמה *p-value*	↓ *0.757*	↑ 0.228	↑ *0.412*	↑ *0.271*	**↑** 0.022	↓ *0.84*	↓ *0.521*

בחינת אירועי הטמפרטורה הקיצונים, מגלה שחל <u>גידול מובהק בשכיחות גלי החום עבור הסף בו הטמפרטורה היומית הממוצעת עולה על הממוצע ב-6 מעלות צלסיוס במשך 3 ימים רצופים בחודשי הקיץ</u>. נמצא כי הגידול נובע מההתחממות בשני העשורים האחרונים. בשאר הבדיקות לגלי חום ולשרבים קצרים נמצאו מגמות ירידה מינוריות שאינן מובהקות. יחד עם זאת, בניתוח ההבדלים בשכיחות שרבים קצרים עבור תקופות שונות, נמצא כי בתחילת התקופה היו בצורה מובהקת ($\alpha=0.1$) יותר שנים בהן אירעו שרבים מסוג זה. היות וסדרת הנתונים היומית אשר שימשה לבדיקה זו טרם עברה בדיקת הומוגניות, אין לפסול כי הבדל זה קשור באי-דיוק במדידות התחנה, הנושא דורש המשך בדיקה.

בספי השלג השונים (10 ס״מ ו-20 ס״מ) כיוון המגמה הינו חיובי אך אינו מובהק. יחד עם זאת נמצא כי שכיחות אירועי השלג של 1 ס״מ ומעלה נמצאת במגמת עליה מובהקת ($p=0.044$). העובדה שלצד תופעת ההתחממות שאזורינו עובר בעשורים האחרונים, ונראית בברור גם בישראל (השירות המטאורולוגי, 2015ב׳), אין אנו מזהים ירידה בשכיחות אירועים קרים מעין אלו, יתכן ומעידה על התרחבות התפלגות ערכי הטמפרטורה בחורף בנוסף לשינוי הכללי אשר חל בממוצע.

בספי הגשם השונים (110 מ״מ/יום וסופתי 200 מ״מ ומעלה) לא זיהינו מגמות מובהקות. מגמה חיובית לא מובהקת נצפתה לכמות גשם סופתית מצטברת של 200 מ״מ ומעלה לעומת מגמה שלילית מינורית לכמות גשם יומית מעל 110 מ״מ. כך גם בהשוואה בין תקופות שונות, בהן לא נמצאו הבדלים (ברמת מובהקות של 5%) במספר השנים עם אירועי גשם קיצוניים.

יש לזכור כי קיים קושי לזהות ולהעריך שינוי בתדירות ו/או בעוצמה של ערכים קיצונים מאוד. היכולת לזהות מגמה בערכי קיצון, אשר מטבעם מופיעים בתדירות נמוכה, מושפעת משלושה גורמים עיקריים: אורך הסדרה, עוצמת המגמה ועד כמה האירוע נדיר. על כן, העובדה שלא נמצאו מגמות מובהקות בעבודה זו אינה מעידה בהכרח כי הן לא קיימות (Frei and Schär, 2001; Morin, 2011). לפיכך, אנו מתעתדים לחזור על הבדיקות על בסיס נתונים יומיים הומוגניים, תוך מיקוד המשך המאמץ המחקרי בבחינת צורת ההתפלגות והשינויים בשוליה כדי ללמוד הן על שכיחות אירועי מזג אוויר נדירים יותר (המאופיינים בתקופת חזרה ארוכה יותר מאלו אשר נבחנו בעבודה זו) והן על שכיחות אירועי מזג אוויר מתונים יותר (המאופיינים בתקופת חזרה קצרה יותר מאלו אשר נבחנו בעבודה זו).

נספח א': מטה דטה – מידע על התחנות שהשתתפו במחקר

בנספח זה מפורטות התחנות המטאורולוגיות וטווח השנים בהן כל תחנה פעלה. טבלה מספר 2 מציגה את התחנות אשר שימשו לניתוח אירועי החום וטבלה מספר 3 מפרטת את התחנות אשר שימשו לניתוח אירועי הגשם.

טבלה 2: התחנות ששימשו לניתוח ספי החום השונים.

התחנה	מספר תחנה	X	Y	גובה (מ')	התקופה
ירושלים - מושבה אמריקאית	6760	221900	633000	760	1927-1935
ירושלים - מלון פאלאס	6775	221100	631600	770	1935-1947
ירושלים טלביה	6785	220850	630850	780	1948-1949
ירושלים מרכז מאוישת	6770	221080	631980	810	1950-1995
ירושלים מרכז	6771	221080	631980	810	1996-2015
עזה (ישנה)	3710	149060	601580	45	1920-1948
נגבה	3499	170100	618900	85	1950-1955
	3500	170100	618900	85	1955-1977
	3501	169700	618700	90	1977-2002
	3502	169690	618560	95	2002-2015

טבלה 3: התחנות ששימשו לניתוח ספי הגשם השונים.

התחנה	מספר תחנה	X	Y	גובה (מ')	התקופה
איילת השחר	311204	253940	769970	170	1999 - 2015
	311203	253850	769750	175	1995 - 1999
	311201	253850	769800	175	1966 - 1995
	311200	254000	769700	175	1920 - 1966
באר שבע	251691	180880	573390	279	2010 - 2015
	251690	180880	573390	279	1957 - 2009
	251850	179900	572100	270	1921 - 1957
בית אלפא	230703	240880	713520	-75	2001- 2015
	230702	240900	713850	-75	1993 - 2001
	230700	240510	713680	-70	1923 - 1993
בית ג'מל	246550	197820	625820	355	1920 - 2015
גן שמואל	131001	195460	706540	30	1990 - 2015
	131000	196180	706770	30	1926 - 1990
דגניה א'	320500	254170	735010	-200	1920 - 1999
	320502	254170	735010	-200	1999 - 2015

התחנה	מספר תחנה	X	Y	גובה (מ')	התקופה
זכרון יעקב	121703	195840	720300	165	2009 - 2015
	121700	195780	719640	160	1920 - 2009
חולדה	243150	189100	637670	125	1935 - 2015
	243050	253940	769970	145	1920 - 1935
ירושלים	244730	221080	631980	810	1950 - 2015
	245170	221950	631700	760	1920 - 1949
כפר גלעדי	210151	254170	794200	345	1999 - 2015
	210148	253880	793920	350	1975 - 1999
	210149	253880	793920	350	1974 - 1975
	210150	253970	793920	345	1922 - 1974
מקוה ישראל	136650	179790	659910	20	1920 - 2015
מרחביה	221450	229120	723160	60	1920 - 2015
נחל עוז - עזה	143952	152510	597970	75	2001 - 2015
	143951	152550	598000	80	1974 - 2001
	143950	152000	598050	80	1952 - 1974
	143000	157950	610800	50	1949 - 1951
	143500	147000	602800	40	1942 - 1948
	143400	149500	602000	40	1940 - 1942
	143650	149060	601580	45	1920 - 1940
עכו	110695	209870	759640	8	1985 - 2015
	110700	208500	760200	15	1924 - 1985
פתח תקוה	135452	187440	665200	50	1976 - 2010
	135251	189100	637670	50	1955 - 1976
	135250	189100	637670	50	1921 - 1955
צפת	211900	247740	765050	936	1939 - 2015
	211800	246700	764000	790	1922 - 1939
קרית ענבים	243500	211440	635220	660	1922 - 2015
שכם - ברכה	241145	225070	677950	865	2000 - 2015
	241061	226500	680500	600	1994 - 2000
	241080	226500	680500	600	1952 - 1994
	241050	226100	680100	550	1922 - 1948

נספח ב': שיטות סטטיסטיות לחישוב המגמה

ניתוח אירועי הקיצון נעשה בעבודה זו על-ידי הגדרת ספים מראש (Pick Over Threshold) ורק הערכים אשר חצו אותם נספרו והוכנסו לבסיס הנתונים לחישוב תוך ניסיון להקפיד על כך שהאירועים בלתי תלויים.

על מנת לנתח מגמות של אירועים בדידים נעשה שימוש בשתי שיטות:

1. **מבחן המבוסס על רגרסיה לוגיסטית** (Frei and Schär, 2001) – במבחן זה מחושבת ההסתברות לקבלת אירוע קיצוני לעומת שאר הפעמים בהם לא נמדד אירוע קיצון בתקופה מסוימת (חודש, עונה, שנה וכד'). המבחן מבוסס על כך שמספר האירועים בזמן $E(t)$ מתפלגים בינומית:

$$E(t) \sim B\big(m, \pi(t)\big) \qquad t = 0, \ldots\ldots, T$$

m – טווח התקופה בו אירוע הקיצון יכול לקרות (למשל, 90 ימים בחודשי החורף).

$\pi(t)$ – הסתברות לאירוע תלוית זמן.

על-ידי שימוש בפונקציית *logit* (הלוג הטבעי של הסיכוי) הופכים את פונקציית ההסתברות $[0, 1]$ לפונקציה בעלת ערכים בין 0 ל- ∞.

הסיכוי מתואר על ידי הביטוי: $\frac{\pi(t)}{1-\pi(t)}$ ונקרא הסיכוי (*odds*) של $\pi(t)$.

בצורה כללית (תוך דילוג על מספר פיתוחים), יחס הסיכויים (Θ, *odds ratio*) מוגדר:

$$\Theta \equiv \frac{\pi(t_2)}{1-\pi(t_2)} \Big/ \frac{\pi(t_1)}{1-\pi(t_1)} = \exp[\beta \cdot (t_2 - t_1)]$$

יחס הסיכויים מבטא את השינוי היחסי ביחס בין "האירועים" ל- "ללא אירועים" בתקופה (t_1, t_2) שהוא פונקציה אקספוננציאלית לאורך התקופה. β מציינת את עוצמת המגמה.

דוגמה: במידה ויחס הסיכויים שווה ל-1.5, המשמעות היא שחל גידול של 50% לאורך התקופה הנבחנת.

2. **מבחן המבוסס על התפלגות פואסון** (Keim and Cruise, 1998) – מבחן זה בוחן את פרקי הזמן (מספר הימים) בין אירוע (או קבוצת אירועים) לאירוע (קבוצת אירועים) הבא ובכך מאפשר לאבחן שינויים בתדירות לאורך הזמן. במידה והסדרה עומדת במבחן להתפלגות פואסונית (כפי שהגדירו החוקרים) ניתן לבחון את הופעת האירועים כפונקציה בזמן. מכיוון שלאינטרוולים בין אירוע לאירוע קיימת שונות גבוהה יש לצמד מספר אירועים לקבוצה (2 או 4, תלוי בגודל המדגם) ובכך להקטין את השונות. התוצאה הסופית היא הצגה של משך האינטרוולים (מספר הימים בין אירוע לאירוע, בצורת לוג טבעי בציר האנכי) כפונקציה של ההתקדמות בזמן (ציר אופקי). באמצעות רגרסיה ליניארית פשוטה ניתן לקבל את שיעור השינוי בזמן ומובהקותה. כך למשל, מגמה שלילית תעיד על

התקצרות האינטרוולים בין אירוע לאירוע (או בין קבוצת אירועים) לפיכך מדובר בגידול בקצב הופעת האירועים הקיצוניים ולהיפך, מגמה חיובית תעיד על מרחקים גדולים יותר בין אירוע קיצון אחד למשנהו.

מקורות

השירות המטאורולוגי, 2015א׳: סקירת אירועי מזג אוויר קיצוני בישראל, בית דגן.

השירות המטאורולוגי, 2015ב׳: שינויים אקלימיים בישראל, בית דגן.

זיו ב., סערוני ה. ואלפרט פ., 2011. תנודות ומגמות בטמפרטורה, בעומס חום ובמשקעים בישראל ב-30 השנים האחרונות – האם עדות לשינוי אקלימי? בחינה קלימטולוגית - סינופטית. דוח מס׳ 810-8, המשרד להגנת הסביבה.

Alpert, P., Ben-Gai, T., Baharad, A., Benjamini, Y., Yekutieli, D., Colacino, M., Diodato, L., Ramis, C., Homar, V., Romero, R., and Michaelides, S. (2002). The paradoxical increase of Mediterranean extreme daily rainfall in spite of decrease in total values. *Geophysical research letters*, *29*(11).

Alpert, P., Krichak, S. O., Shafir, H., Haim, D., and Osetinsky, I. (2008). Climatic trends to extremes employing regional modeling and statistical interpretation over the E. Mediterranean. *Global and Planetary Change*, *63*(2), 163-170.

Frei, C., and Schär, C. (2001). Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the Alpine region. *Journal of Climate*, *14*(7), 1568-1584.

IPCC, (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.

Keim, B. D., and Cruise, J. F. (1998). A technique to measure trends in the frequency of discrete random events. *Journal of Climate*, *11*(5), 848-855.

Krichak, S. O., Alpert, P., and Kunin, P. (2009). Projections of climate change over non-boreal east Europe during first half of twenty-first century according to results of a transient RCM experiment. In *Regional Aspects of Climate-Terrestrial-Hydrologic Interactions in Non-boreal Eastern Europe* (pp. 55-61). Springer Netherlands.

Mariotti, A., Zeng, N., Yoon, J. H., Artale, V., Navarra, A., Alpert, P., and Li, L. Z. (2008). Mediterranean water cycle changes: transition to drier 21st century conditions in observations and CMIP3 simulations. *Environmental Research Letters*, *3*(4), 044001.

Mariotti, A., Pan, Y., Zeng, N., and Alessandri, A. (2015). Long-term climate change in the Mediterranean region in the midst of decadal variability. *Climate Dynamics*, *44*(5-6), 1437-1456.

Morin, E. (2011). To know what we cannot know: global mapping of minimal detectable absolute trends in annual precipitation. *Water Resour Res 47*:W07505. doi:10.1029/2010WR009798.

Samuels, R., Harel, M., and Alpert, P. (2013). A new methodology for weighting high-resolution model simulations to project future rainfall in the Middle East. *Clim. Res*, *57*(1), 51-60.

Seneviratne, S.I., N. Nicholls, D. Easterling, C.M. Goodess, S. Kanae, J. Kossin, Y. Luo, J. Marengo, K. McInnes, M. Rahimi, M. Reichstein, A. Sorteberg, C. Vera, and X. Zhang, 2012: Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 111.

Smiatek, G., Kunstmann, H., and Heckl, A. (2011). High-resolution climate change simulations for the Jordan River area. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *116*(D16).

Yosef, Y., Saaroni, H., and Alpert, P. (2009). Trends in daily rainfall intensity over Israel 1950/1-2003/4. *Open Atmospheric Science Journal*, *3*, 196-203.

Zhang, X., Aguilar, E., Sensoy, S., Melkonyan, H., Tagiyeva, U., Ahmed, N., Kutaladze, N., Rahimzadeh, F., Taghipour, A., Hantosh, T.H. and Alpert, P. (2005). Trends in Middle East climate extreme indices from 1950 to 2003. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *110*(D22).

Ziv, B., Saaroni, H., Pargament, R., Harpaz, T., and Alpert, P. (2014). Trends in rainfall regime over Israel, 1975–2010, and their relationship to large-scale variability. Reg. Environ. Change, 14, 1751–1764.