

הדס סערני

החוג לגאוגרפיה ולסביבת האדם,
אוניברסיטת תל-אביב

ברוך זיו

המחלקה למדעי הטבע,
האוניברסיטה הפתוחה

רואי פרגמנט

החוג לגאוגרפיה ולסביבת האדם,
אוניברסיטת תל-אביב

נעם חלפון

מחלקת אקלים, השירות
המטאורולוגי

אבנר פורשפן

מחלקת אקלים, השירות
המטאורולוגי

איזבלה אוסטינסקי-צדקי

מחלקת אקלים, השירות
המטאורולוגי



חורף בפארק תמנע | צילום: יצחק גורן

תנודות בגשמי הנגב בחמישים השנים האחרונות – האם עדות לשינוי באקלים?

חזית המחקר

גיליון אביב 2012 / כרך 3(1) / הנגב

5 בפברואר, 2012

מאמר זה עבר שיפוט עמיתים

ציטוט מומלץ

סערני ה, זיו ב, פרגמנט ר ואחרים.
2012. תנודות בגשמי הנגב
בחמישים השנים האחרונות – האם
עדות לשינוי באקלים? *אקולוגיה
וסביבה* 3(1): 62–72.

על קצה המזלג

סיכום ומשמעויות

שיעור הירידה בכמויות הגשמים שנמצא באזור הצחיח שנחקר, ראוי להתייחסות כאל תמרור אזהרה לאפשרויות שטומן העתיד. יחד עם זאת, יש לזכור כי נצפה שינוי קטן ביותר, ושלאור התנודתיות הבין-שנתית הרבה בגשמי האזור, ניתן יהיה לקבוע כי מדובר בשינוי מובהק רק אם שיעורה של מגמת הירידה יהיה לפחות 30% במהלך 50 שנה.

מודלים אקלימיים חוזים מגמה של התחממות עולמית שעלולה לגרום להפחתה בכמות הגשמים באזורנו. הנגב ממוקם בצפונה של רצועת מדבריות עולמית, על גבול האזור הים התיכוני, ואם תתרחש הפחתה משמעותית בכמות הגשמים, היא תגרום להתפשטות המדבר אל תוך האזור הים תיכוני, עם כל המשתמע מכך. המאמר עוסק במשטר הגשמים בנגב ב-50 השנים האחרונות, ובוחן השפעות קלימטולוגיות וסינופטיות על משטר זה, מתוך כוונה לבחון אם קיים שינוי, ואם הוא מבטא מגמת הפחתה בכמות הגשמים. המחקר מתבסס על נתוני גשם שנמדדו בתקופה זו ב-15 תחנות מטאורולוגיות מייצגות. ברוב תחנות המדידה לא נמצאה ירידה מובהקת סטטיסטית בכמות הגשם, אך זוהו תנודות בסקלת זמן של עשרות שנים. ירידה מובהקת סטטיסטית בכמויות הגשם נמצאה רק בתחנות הממוקמות באזור הנגב הצחיח (מצפה רמון, סדום ואילת), אך השינוי מתבטא רק ב-5 מ"מ בעשור, ולכן קיים קושי להסיק מסקנות על פיו. המאמר שם דגש על התנודתיות במהלך הגשמים לאורך 50 השנים האחרונות, אך עם זאת מצביע על מגמות

ההפחתה, גם אם ברובן המכריע אינן מובהקות. כמו כן מצביע המאמר על אפשרות להתקצרות עונת גשמי החורף.

המערכת

תקציר

המחקר בוחן תנודות ושינויים באקלים בגשמי הנגב מראשית שנות ה-60. הניתוח כלל מיפוי מרחבי באזור שבין קווי 100 מ"מ ו-400 מ"מ משקעים לשנה ועיבוד של נתונים חודשיים מתחנות נבחרות. הממצאים מראים תנודתיות בולטת עם הפחתה במשקעים ברוב האזור ב-15 השנים האחרונות. המהלך הבין-שנתי מראה עלייה מתונה מראשית תקופת המחקר עד ראשית שנות ה-90, וירידה תלולה יותר לאחר מכן, בפרט בעשור האחרון. תנודות חריפות נצפו במיקום גבול הצחיחות. עם זאת, מסתמנת מגמת התפשטות בלתי מובהקת של האזורים היבשים צפונה ומערבה, על חשבון אזור האקלים הים תיכוני, בשיעור ממוצע של 1% בעשור. העובדה שמגמת ההתייבשות מלווה במגמת התחממות, משמעותה שנוסגת קווי גבול הצחיחות צפונה ומערבה גדולה בפועל מזו המשתמעת מכמות המשקעים לבדה.

התנודות בגשמי הנגב נבדקו מול שכיחות המערכות הסינופטיות והתנודות האטמוספריות בקנה מידה גדול. גשמי צפון הנגב ומרכזו נשלטים על-ידי השקעים הקפריסאיים, למרות ריחוק הנגב ממסלולם, ועל-ידי התנודות האטמוספריות השולטות במשטר החורפי באירופה ובים התיכון. גורמים אלה מסבירים את התנודתיות בגשמי צפון הנגב ומרכזו, אך לא מסבירים את הירידה העקבית בגשמי הערבה ודרום הנגב.

גשמי הערבה ודרום הנגב פחתו במקביל למגמת העלייה בתדירות אפיקי ים סוף, ואף היו מתואמים באופן שלילי ומובהק עם שכיחותה של מערכת סינופטית זו. זאת על אף שחלק נכבד מהגשמים באזור זה מתרחשים כתוצאה מהשפעתם של אפיקי ים סוף "פעילים". ממצא זה קשור ככל הנראה לירידה בשכיחות האפיקים הפעילים המלווים בגשם מתוך כלל אפיקי ים סוף.

הממצאים מעידים על כך שהמגמות בצפון הנגב ובמרכזו משקפות תנודות אקלימיות ממקור סינופטי יותר מאשר מגמת שינוי ארוכת טווח, ואילו בדרום הנגב קיימת מגמת הפחתה ארוכת טווח, שהבנת הגורמים לה מחייבת מחקר נוסף.

מבוא

ישראל ממוקמת באזור גבול אקלימי, בין האקלים הים תיכוני והאקלים היבש. אזור זה ידוע כנתון לתנודות בין-שנתיות ותוך-עונתיות גבוהות בכמויות המשקעים. הנגב גובל בצפון באזור הים תיכוני, מאופיין במפל משקעים תלול וכולל בתוכו שלושה אזורים אקלים^[6]: הצחיח למחצה (200–400 מ"מ בשנה), הצחיח (100–200 מ"מ בשנה) והצחיח הקיצוני (פחות מ-100 מ"מ בשנה). המודלים האקלימיים, גם העולמיים וגם האזוריים, חוזים התחממות והפחתה במשקעים באגן הים התיכון, ובישראל בכלל זה^[15, 21, 24, 28]. טבעי הדבר שלאור התנודות הבין-שנתיות הגדולות המאפיינות את האזור, יהיה קשה לזהות מתוך התצפיות מגמות שינוי מובהקות^[25].

מרבית המחקרים מצביעים על מגמת הפחתה בכמויות המשקעים באגן הים התיכון, אך לא בחלק המזרחי שלו, שנמצאו בו מגמות משתנות לאורך השנים. לדוגמה, Zhang ועמיתיו^[33] לא הצליחו לאתר מגמת שינוי מובהקת במזרח הים התיכון. Jones^[18] ו-Kostopoulou מצאו מגמת הפחתה, בעיקר בגשמי החורף, ביוון, בטורקיה ובקפריסין. בישראל, הצביעה שטיינברג^[5] על הפחתה בגשמי צפון הארץ לצד עלייה בגשמי הדרום בין שנות ה-60 לשנות ה-90 של המאה ה-20. מחקר שבחן את מגמות השינוי בגשמי הערבה בין השנים 1950 ו-2008^[7] הצביע על התייבשות מובהקת באזור צחיח קיצוני זה.

באשר לגורמים למגמות השינוי בגשמי הנגב, יש שייחסו את העלייה שנמצאה עד אמצע שנות ה-90 לשינויים בשימושי הקרקע ולשינויי אלבדו בצפון הנגב בעקבות הפעלת המוביל הארצי ופיתוח החקלאות בצפון הנגב^[9, 10, 11]. אחרים הציעו הסבר סינופטי למגמת ההגברה בדרום, היינו לגידול במספר הימים ששולט באזור אפיק ים סוף, משום שבחלק מימים אלה קיים פוטנציאל לגשמים בדרום הארץ ובמזרחה^[9]. הסבר אחר תלה את השינוי בגשמי צפון הנגב דווקא בשכיחות גבוהה יותר של מערכות ממקור ים תיכוני שגשמיהן מתפשטים עד הנגב^[32]. היפוך במהלך שנות ה-90 במגמת הירידה בצפון והעלייה בדרום,

יחד עם ההבנה כי התנודות ביחסי המשקעים בין צפון הארץ לדרומה הן קצרות טווח, הביאו להערכה כי הגורם העיקרי למגמות השינוי הוא סינפטו-דינמי ולא שינוי הקשור בשימושי הקרקע (בעיקר עלייה בלחות הקרקע כתוצאה מייעור ומפיתוח החקלאות בצפון הנגב) [8].

אפיון סובייקטיבי של המערכות הסינפטיות שגרמו לשיטפונות הגדולים בנגב, מצא שככל שמצפינים בנגב, עולה תרומתם היחסית של השקעים הים תיכוניים לשיטפונות, ואילו בדרום הנגב אירועים של אפיק ים סוף הם התורמים לעיקר הגשמים והשיטפונות [17]. אפיקי ים סוף שכיחים באזורנו ומונעים, על פי רוב, ירידת משקעים בכל רחבי הארץ. לתנאים הייחודיים שבהם האפיקים הופכים ל"פעילים" ומורידים גשמים משמעותיים יש מאפיינים ברורים [30]. המערכות הסינפטיות מושפעות מתנודות בדפוס זרימה אטמוספריים בקנה מידה של אלפי קילומטרים (התנודות האטמוספיריות הגדולות). התנודות האטמוספיריות הגדולות משפיעות על התנודות בכמויות הגשם ב"תיווך" של המערכות הסינפטיות [16,12]. מחקרים הראו שהשינויים התוך-שנתיים והבין-שנתיים בתנודות אלה קובעים במידה רבה את שכיחות הופעתם ואת מסלולי תנועתם של השקעים הקפריסאיים (לדוגמה, עבור הים התיכון [4]). ישנן מספר תנודות אטמוספיריות גדולות הנחשבות כשולטות במשטר החורפי באירופה ובים התיכון וכן בצפון הארץ ובמרכזה [34,31]. הקשר בין לבין תנודות בגשמי ישראל, ובכלל זה בגשמי צפון הנגב, נבחן במחקרים שונים. קשר מובהק נמצא בין שנות אל ניניו לשנים גשומות בישראל, אם כי קשר זה נמצא רק מאמצע שנות ה-70 ואילך [27]. התנודה הים תיכונית (MOI), שהוגדרה על פי הפרש גובה מפלס 500 הקטופסקל (hPa) בין אלג'יר לקהיר [13], נמצאה מתואמת עם גשמי ישראל [23]. תנודת ה-NCP (North-Sea Caspian-Sea Pattern) נמצאה אף היא מתואמת עם התנודות במשקעים באזורנו [22]. תנודה זו דומה לתנודת ה-EA-WR (East-Atlantic – Western-Russia) [16]. נוסף על כך, נמצאה השפעה משולבת של ה-EA-WR והתנודה הצפון אטלנטית (NAO) על המשקעים באזורנו [20,19]. יש המשערים כי קיים קשר בין המופע החיובי של התנודה הצפון אטלנטית בשנות ה-80 וה-90 לגשמים המרובים יחסית שפקדו את צפון הנגב בתקופה המקבילה [32].

מטרת מחקר זה היא לבחון תנודות ושינויים בגשמי הנגב בחמישים השנים האחרונות, ולהעריך את תרומתן של המערכות הסינפטיות ושל התנודות הגדולות למגמות השינוי בגשמים.



שיטפון חורף בהר הנגב | צילום: פאול פלטיניק

שיטות

תקופת המחקר כוללת את השנים 1961–2010. אזור המחקר הוא השטח שכמות המשקעים השנתית הממוצעת בו היא 400 מ"מ ומטה. ניתוח מגמות השינוי המתבססות על כמותי גשם חודשיות ושנתיות נעשה בחלקו באמצעות מיפוי (רק עבור האזור שבין קווי ה-400 וה-100 מ"מ) בהתבסס על כלל התחנות המדווחות. המיפוי המרחבי אינו כולל את דרום הנגב, את הערבה ואת אזור ים המלח (מתחת לקו ה-100 מ"מ), מחמת מיעוט התחנות והתנודתיות הגבוהה המאפיינת את האזורים האלה. המיפוי נעשה באמצעות תוכנת ArcGIS 9.3^[14] תוך שימוש בשיטת אינטרפולציה (IDW – Inverse Distance Weighted). לצורך אומדן מדויק יותר של הערכים באזורים בעלי מפל משקעים חריף, בוצעה האינטרפולציה על ערכי האנומליה היחסית בגשם^[1].

על המפות השנתיות הושלכו נקודות סריג (grid) בצפיפות של 3 ק"מ, ולכל נקודת סריג חושב השיפוע הלינארי של מגמת השתנות המשקעים לאורך תקופת המחקר ומקדם המתאם שלה. משתנים אלה מופו גם כן בשיטת IDW. נוסף על המיפוי, נותחו נתוני 15 תחנות מייצגות ששמרו על רצף תצפיות לאורך תקופת המחקר. הניתוח נעשה לכל תחנה בנפרד ועבור שלושה אשכולות של תחנות שהוגדרו עבור צפון-מערב הנגב, צפון הנגב ופנים הנגב.

מגמת השינוי הלינארי בכמות המשקעים נבחנה באמצעות רגרסיה לינארית ומובהקותה על פי Pearson. במקביל נבדקו מגמת השינוי הלינארית ומובהקותה על פי השיטה הא-פרמטרית של Mann-Kendall. מאחר שכיוון המגמה אינו ודאי, המובהקות נבחנה לפי המבחן הדו-צדדי (non-directional) המחמיר יותר.

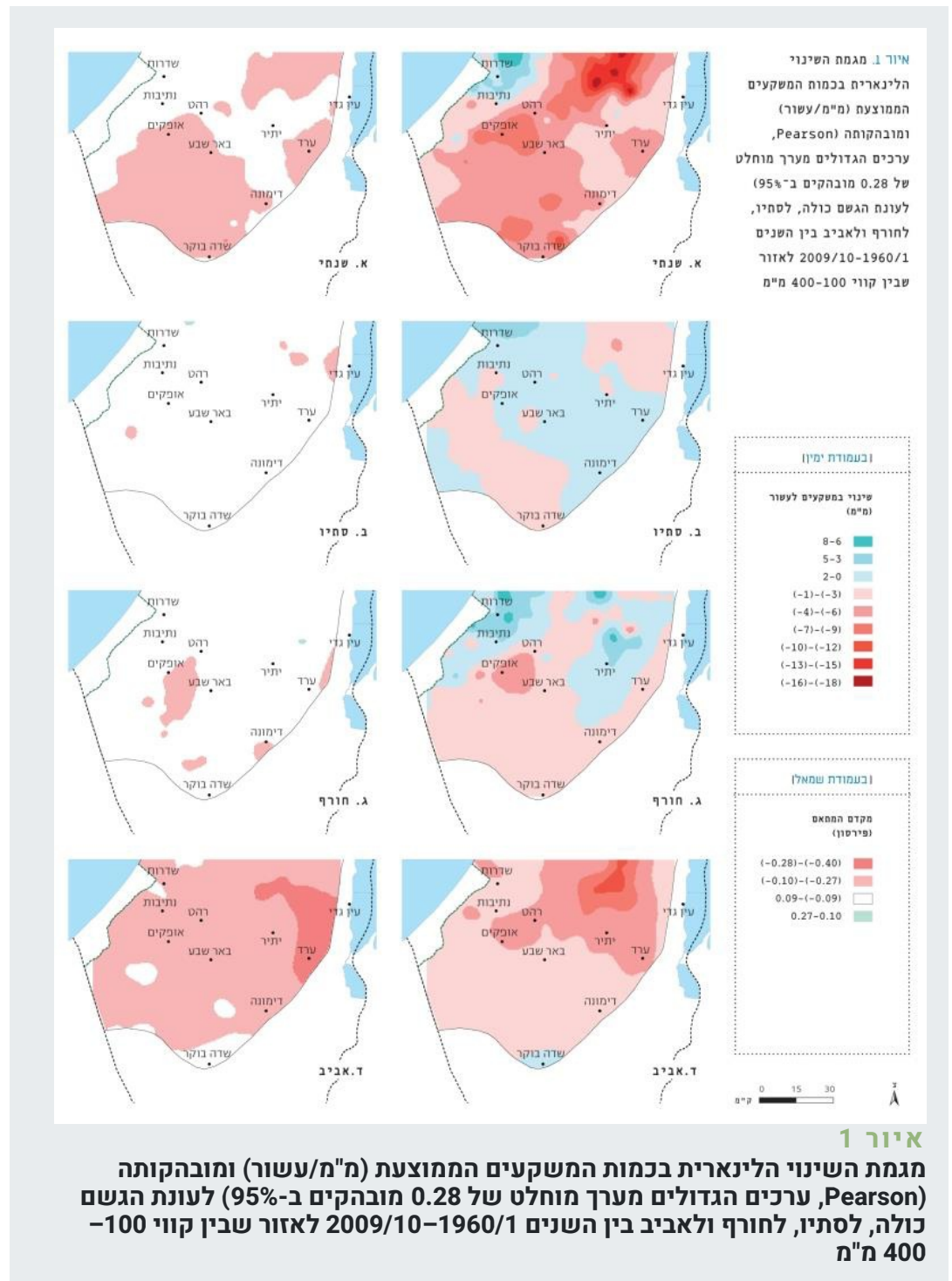
התנודות במיקומם של הגבולות האקלימיים המפרידים בין האזור הים תיכוני, הצחיח למחצה והצחיח מוצגות באמצעות מיפוי התזוזות של קווי הגשם המייצגים גבולות אלה, ומוערכות כמותית באמצעות חישוב השטחים הכלולים בכל אחד מאזורי האקלים הללו. יש להדגיש כי התוויית גבולות אלה נעשתה על סמך כלל תחנות הגשם העומדות לרשות השירות המטאורולוגי ולא על סמך התחנות המייצגות במחקר לבדן.

כדי להסביר את מקורן של התנודות ומגמות השינוי הנצפות בכמות המשקעים השנתית, בחנו את המתאם שבין המהלך הבין-שנתי של כמות המשקעים לבין אלו של משתנים העשויים להסבירו. משתנים אלה כוללים את שכיחות המערכות הסינופטיות הרלוונטיות לגשם, דהיינו הטיפוסים השונים של השקעים הקפריסאיים ואפיקי ים סוף, ואת עוצמתן של התנודות האטמוספיריות הגדולות. הגדרת הטיפוסים הסינופטיים התבססה על המיון האובייקטיבי למחצה^[9]. התנודות האטמוספיריות הגדולות שהשתנות הבין-שנתית במשקעים נבחנה מולן הן: ה-NAO, ה-EA-WR, האל ניניו (Nino 3-4), ה-MOI וה-NCP.

כדי לזהות את הגורמים המשמעותיים לכמות המשקעים השנתית, נבנו 'משוואות חיזוי' באמצעות תכנת SPSS. משוואות אלה חוזות את כמות המשקעים השנתית (המשתנה המנובא) כפונקציה לינארית של מכלול הגורמים הפוטנציאליים (המשתנים המנבאים), היינו שכיחות המצבים הסינופטיים הרלוונטיים לגשם ועוצמתן של התנודות האטמוספיריות הגדולות.

תוצאות

התפרוסת המרחבית של מגמת השינוי הלינארית בכמות המשקעים השנתית לאזור שבין קווי ה-400 וה-100 מ"מ לשנה מראה מגמה כללית של הפחתה (איור 1א). יוצאת דופן היא עלייה מזערית בנגב הצפוני-מערבי. המגמה הממוצעת לאזור כולו היא ירידה של 4 מ"מ (2%) לעשור, ללא מובהקות סטטיסטית בכל האזור המוצג במפה. המפות העונתיות (איור 1) מצביעות על ירידה באביב, שמובהקת (ב-95%) בחלק ממזרח האזור. בממוצע מרחבי מגיע שיעור הירידה במשקעים בעונה זו ל-2.9 מ"מ לעשור, שהם 7.6% לעשור ממשקעי עונה זו. לעומת זאת, בסתיו ובחורף היו מגמות השינוי מינוריות, בלתי אחידות ובלתי מובהקות.



מגמות השינוי בתחנות המייצגות (טבלה 1) משקפות ירידה (בלתי מובהקת) במשקעים, למעט תחנות צפון-מערב הנגב שלא חל בהן שינוי ממשי. מגמת הירידה מובהקת (ב-95% לפי שיטת Mann-Kendall) בשלוש התחנות הצחיחות ביותר: מצפה רמון, סדום ואילת.

לסדרת הזמן של כמויות המשקעים הותאם גם קו מגמה רב-איברי (מדרגה שלוש). כל התחנות, פרט לסדום, משקפות מגמת עלייה מתונה בחלק הראשון של תקופת המחקר ואחריה מגמת ירידה תלולה יותר. הירידה היא היפוך ממגמת העלייה בצפון הנגב שתועדה בשנות ה-90 [10, 11, 26].

בחלקים הצפוניים של אזור המחקר ניכרת תנודה בסקלת זמן של עשרות שנים (decadal oscillation), ואילו באילת ובתחנות נוספות בערבה ניכרת מגמת הפחתה עקבית מראשית תקופת המחקר, בדומה לממצאים קודמים עבור הערבה [7]. גם בסדום

ניכרת ההפחתה העקבית, למעט בעשור האחרון, שחלה בו עלייה מזערית. סביר שהדבר נובע מאירוע גשם קיצוני שהתרחש באוקטובר 2004, שירדו בו 75 מ"מ (מה שגרם לכמות עונתית של 112 מ"מ, פי שלושה מהממוצע הרב-שנתי). יש להדגיש שגם אם מגמת השינוי באזור הצחיח הקיצוני היא מובהקת, הרי שהשינוי הוא במ"מ ספורים בלבד לעשור, ואין בכך כדי לשנות את הגדרתו האקלימית.

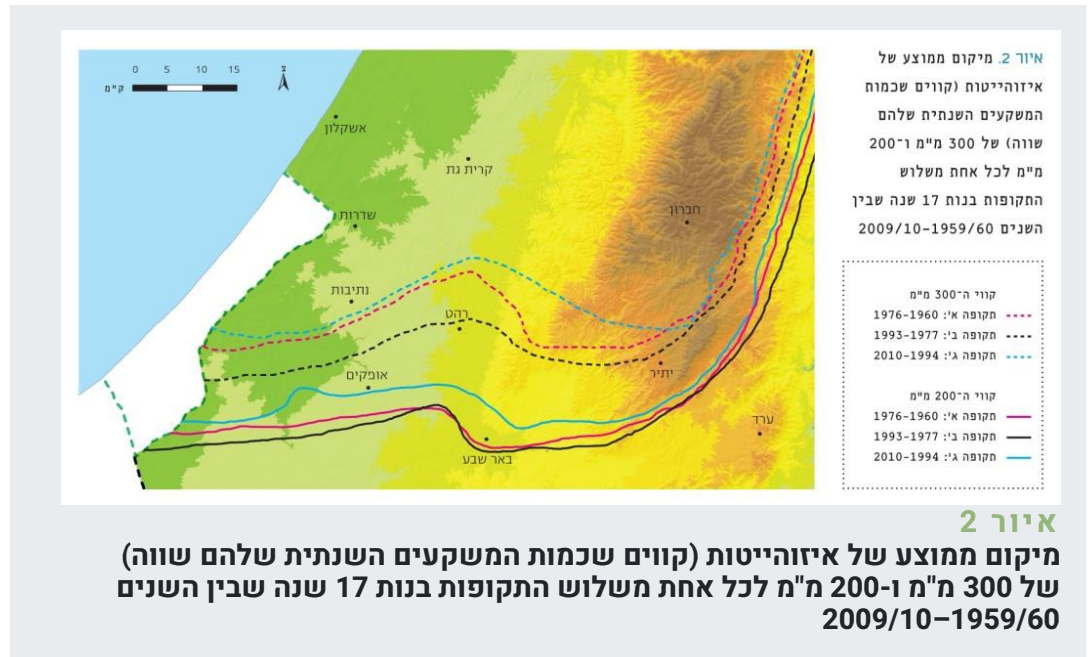
טבלה 1. כמות המשקעים השנתית הממוצעת (מ"מ), מקדם ההשתנות הבין-שנתי, שהוא סטיית התקן יחסית לכמות השנתית הממוצעת (%) והשינוי היחסי בכמות המשקעים השנתית (אחוזים לעשור) בתחנות המייצגות ובממוצע לאשכולות, על פי שיפוע קו המגמה הלינארי הפשוט והא-פרמטרי בשיטת Mann-Kendall וערכים המובהקים ב-95% מודגשים, ואלה המובהקים ב-90% מסומנים בקו תחת.

אשכול	תחנה	כמות משקעים שנתית ממוצעת במ"מ	מקדם ההשתנות (%)	רגרסיה לינארית	Mann-Kendall א-פרמטרי
צפון-מערב הנגב	מפלסים	407.5	37.1	+1.5	+0.1
	בארי	360.5	40.0	-2.1	-2.9
	רוחמה	357.6	33.9	-0.4	-1.6
	נירים	306.5	37.0	-1.6	-2.1
	ממוצע לאשכול	358.0	35.4	-0.5	-1.3
צפון הנגב	להב	304.5	34.7	-2.5	-2.5
	שובל	284.7	36.2	-1.3	-1.5
	אשל הנשיא	232.8	32.7	-3.4	-3.8
	אורים	218.6	34.2	-4.4	-5.5
	באר שבע	199.1	33.1	-3.5	-3.7
פנים הנגב	ממוצע לאשכול	247.9	33.0	-2.9	-3.2
	ערד	133.4	40.3	-2.9	-3.0
	רביבים	106.5	39.1	-3.0	-2.7
	שדה בוקר	95.1	43.7	-3.2	-3.3
	מצפה רמון	74.3	41.7	-7.0	-8.3
ים המלח	ממוצע לאשכול	102.3	36.8	-3.7	-3.4
	סדום	44.7	57.2	-10.9	-10.6
דרום הערבה	אילת	26.8	74.9	-19.2	-16.4

טבלה 1

כמות המשקעים השנתית הממוצעת (מ"מ), מקדם ההשתנות הבין-שנתי, שהוא סטיית התקן יחסית לכמות השנתית הממוצעת (%) והשינוי היחסי בכמות המשקעים השנתית (אחוזים לעשור) בתחנות המייצגות ובממוצע לאשכולות, על פי שיפוע קו המגמה הלינארי הפשוט והא-פרמטרי בשיטת Mann-Kendall וערכים המובהקים ב-95% מודגשים, ואלה המובהקים ב-90% מסומנים בקו תחת.

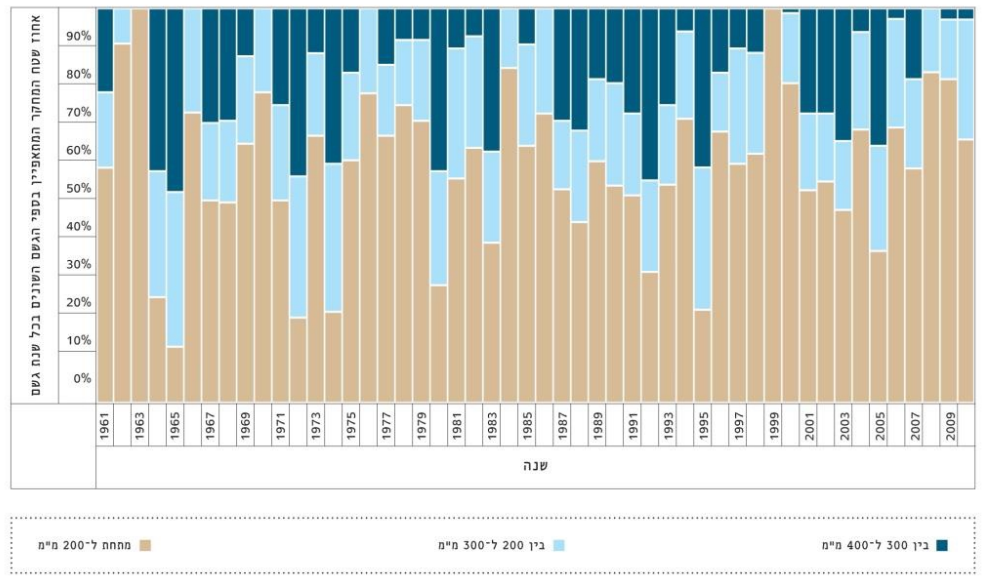
אחד ההיבטים של שינויים בכמות המשקעים הוא שינויים בגודל השטחים התואמים את תנאי האקלים הים תיכוני, הצחיח למחצה והצחיח. על פי המיון האקלימי של קפן, ובהתחשב בטמפרטורה שנתית ממוצעת של 20 מעלות צלזיוס, גבולות אזורי האקלים בישראל חופפים לקווים שכמות המשקעים השנתית שלהם היא 400 מ"מ ו-200 מ"מ, בהתאמה, ואזור הביניים שבין קווים אלה הוא האזור הצחיח למחצה [3]. מיקום קווי ה-200 וה-300 מ"מ לשנה נבחן בשלוש תקופות עוקבות בנות 17 שנים (איור 2). ניתן לראות ששני קווי הגשם נדדו דרומה, לעבר האזור היבש, בין התקופה הראשונה לשנייה, אך נסוגו, ובמידה רבה יותר, לעבר האזור הים תיכוני בין התקופה השנייה והשלישית. המהלך הבין-שנתי של השטחים שכמות המשקעים השנתית בהם קטנה מ-200 מ"מ, נמצאת בין 200 ו-300 מ"מ וגדולה מ-300 מ"מ (עד קו ה-400 מ"מ), מוצג באיור 3. המהלך מדגיש את התנדטיות הבין-שנתית הגבוהה. בשבע מחמשים שנות המחקר שררה בצורת שהתבטאה בהצפנת קו ה-300 מ"מ אל מחוץ לאזור המחקר (היעדר עמודה כחולה) ובשנתיים מתוכן, 1962/3 ו-1998/9, הגיעה הבצורת לדרגה קיצונית, שבה גם קו ה-200 מ"מ הצפין אל מחוץ לאזור המחקר (נראית עמודה חומה בלבד). מאידך גיסא, בשנה הברוכה ביותר, 1964/5, הדרים קו ה-200 מ"מ אל דרום הנגב, ורק 15% משטחי אזור המחקר קיבלו פחות מ-200 מ"מ, וזאת בהשוואה ל-60% ממנו בממוצע רב-שנתי. במהלך תקופת המחקר הייתה עלייה בגודל השטח הצחיח והצחיח למחצה בקצב ממוצע של 1% ו-0.5% בעשר שנים, בהתאמה, על חשבון השטח הים תיכוני, שהצטמצם בשיעור ממוצע של 1.5% בעשור. עלייה זו אינה מובהקת מבחינה סטטיסטית.



יש לציין שעלייה בטמפרטורה השנתית משמעותה עלייה בערכי הגבול של המשקעים המגדירים את אזורי האקלים. מכאן נובע שמגמת ההתחממות הנצפית והצפויה פירושה שהנסיגה בפועל של קווי גבול הצחיחות, צפונה ומערבה, גדולה מזו המשתמעת מכמות המשקעים לבדה. התחזיות לשינוי האקלים, על פיהן עתיד אזורנו להוסיף ולהתחמם, מחריפות את המגמה הצפויה כתוצאה מההתייבשות.

חלקו האחרון של המחקר בוחן באיזו מידה מסבירות התנודות בגורמי האקלים המשפיעים על האזור את המגמות שנצפו בחמישים השנים האחרונות. לשם כך נבחר הקשר בין כמות המשקעים השנתית לבין שכיחות המערכות הסינופטיות הגורמות לגשם והתנודות האטמוספיריות הגדולות. בשלב הראשון חושבו המתאמים בין כמות המשקעים השנתית לבין שכיחותן של המערכות הסינופטיות הרלוונטיות, השקעים הקפריסאיים ואפיקי ים סוף. ערכי המתאם משתנים בין החלקים השונים של הנגב וכן בהתאם לסוג המערכת. המתאם הגבוה ביותר נמצא בין גשמי צפון-מערב הנגב לבין מספר השקעים הקפריסאיים ($R=+0.7$, מובהק ב-0.001), ויורד לערכים אפסיים עבור סדום ואילת. הירידה במתאם מצפון-מערב לדרום ולמזרח קשורה בהגדלת המרחק מאזור מעבר השקעים, ובהיות החלק המזרחי של אזור המחקר בצל הגשם בעת מעברם של שקעים אלה. טיפוס השקעים שנמצא כמשפיע ביותר על הנגב הוא שקע קפריסאי שמרכזו ממזרח לישראל. הסיבה לכך היא שבמיקומו זה גורם השקע לרוח צפון-מערבית המחדירה לחות מהים התיכון לנגב^[29]. אפיקי ים סוף נמצאו מתואמים שלילית עם כמויות המשקעים במרכז הנגב ובדרומו (במובהקות גבולית), מה שמעיד על אפיקי ים סוף כמערכת מונעת גשם בחלקים אלה של הנגב. הדבר סותר לכאורה את הידוע לנו על אפיקי ים סוף פעילים, הגורמים לשיטפונות בדרום^[17]. ניתן להסביר סתירה זו בכך שרובם המכריע של אפיקי ים סוף אינם פעילים.

איור 3. תנודות בשיעור השטח היחסי (מאזור המחקר, ר' איור 1) של התחום הצחיח והצחיח למחצה



איור 3

תנודות בשיעור השטח היחסי (מאזור המחקר, ראו איור 1) של התחום הצחיח והצחיח למחצה

המתאם בין כמות המשקעים לבין התנודות האטמוספריות הגדולות מצביע על קשרים סטטיסטיים מובהקים בין (פרט ל-NAO) לבין גשמי צפון-מערב הנגב, צפון ומרכז. המתאמים נמוכים מאלה שהתקבלו עבור שכיחות השקעים הקפריסאיים. הדבר אינו מפתיע בהתחשב בכך שהשקעים משפיעים ישירות על משטר הגשם, ואילו התנודות משפיעות עליו בעקיפין, ב"תיווך" של המערכות הסינופטיות. אין להתפלא לפיכך על כך שבדרום הנגב והערבה, שם המתאמים בין הגשם והמערכות הסינופטיות נמוכים מראש, אין שום תנודה אטמוספרית בעלת מתאם מובהק לכמויות הגשם.

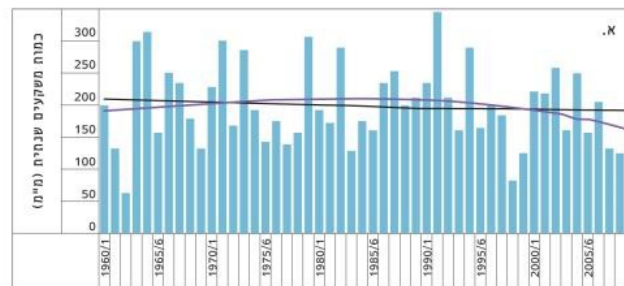
משוואות החיזוי (טבלה 2) מעידות על כך ששכיחותם של שקעים קפריסאיים ממזרח היא הגורם המובהק המשפיע על גשמי צפון הנגב. בסדום ובאילת נמצאה שכיחותו של אפיק ים סוף כגורם המובהק, ואילו בפנים הנגב נמצאו שניהם כגורמים מובהקים. אחוז השונות המוסברת יורד מצפון-מערב הנגב (40%-50%) לעבר דרומו ומזרחו (10% בסדום ובאילת).

טבלה 2. משוואות החיזוי עבור כמות המשקעים (P), והמתאם (R) בין כמות המשקעים המדודה והחזויה על פי משוואת החיזוי בחמשת אזורי המחקר בנגב

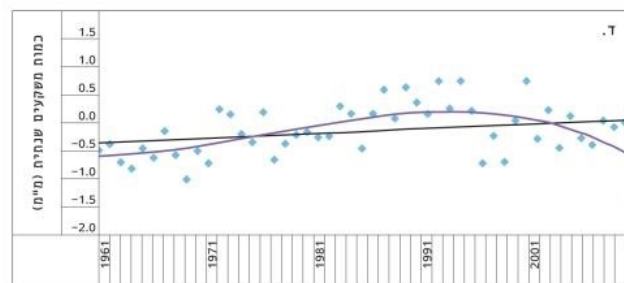
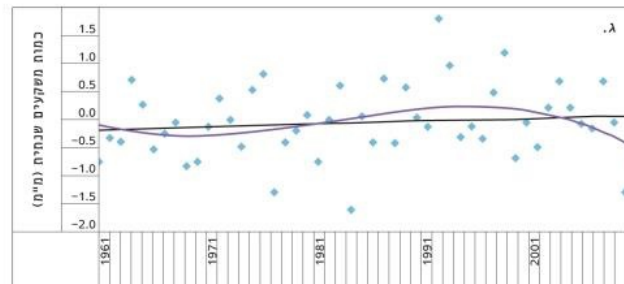
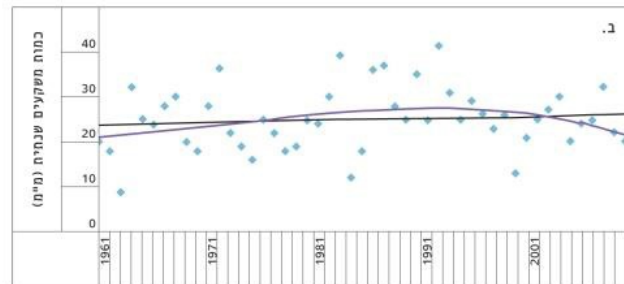
המתאם (R)	משוואת החיזוי	
0.70	$P = 36.8 + 12.9_{LowsEast}$	צפון-מערב הנגב
0.63	$P = 60.9 + 7.5_{LowsEast}$	צפון הנגב
0.60	$P = 66.9 + 2.8_{LowsEast} - 1.3_{RSTcentral}$	פנים הנגב
0.29	$P = 54.6 - 0.4_{RST}$	סדום
0.31	$P = 40.4 - 0.6_{RSTeast}$	אילת

טבלה 2
משוואות החיזוי עבור כמות המשקעים (P), והמתאם (R) בין כמות המשקעים המדודה והחזויה על פי משוואת החיזוי בחמשת אזורי המחקר בנגב

איור 4 משווה את המהלך הבין-שנתי ואת המגמה ארוכת הטווח בכמות המשקעים השנתית (א), בשכיחות השקעים ממזרח (ב) ובשתי תנודות גדולות: NAO-ה (ג), וה- EA-WR (ד). בכולם ניכר דמיון במהלך ארוך הטווח הבא לביטוי במגמה הרב-איברית (מדרגה שלוש), היינו עלייה בחלק הראשון של התקופה שמגיעה לשיא בתפר שבין שנות ה-80 וה-90 וירידה לקראת סוף תקופת המחקר. הדמיון במהלך של שתי התנודות הגדולות מפתיע לאור היעדר מתאם ביניהן ברמה הבין-שנתית. מהלך זה משקף את ההשפעה הדומה שלהן על שכיחות השקעים הקפריסאיים, הקובעים את כמות הגשמים בצפון-מערב הנגב, בצפון ובמרכז, אך לא באילת ובסדום, שהמגמה השלטת בהם היא ירידה כמעט עקבית. ירידה זו מתרחשת במקביל לעלייה העקבית והמובהקת בשכיחותם של אפיקי ים סוף [9].



איור 4. התנודות הבין-שנתיות ומגמת השינוי, לינארית (שחור) ורב-איברית מדרגה שלישית (סגול), בכמות המשקעים השנתית (מ"מ) בין השנים 2009/10-1960/1
 א. לאזור שבין קווי ה-100-400 מ"מ;
 ב. בשכיחות השקעים ממזרח (אוקטובר-מאי);
 ג. בתנודת ה- $EA-WR$;
 ד. בתנודת ה- NAO .



איור 4

התנודות הבין-שנתיות ומגמת השינוי, לינארית (שחור) ורב-איברית מדרגה שלישית (סגול), בכמות המשקעים השנתית (מ"מ) בין השנים 2009/10-1960/1

- א. לאזור שבין קווי ה-100-400 מ"מ;
- ב. בשכיחות השקעים ממזרח (אוקטובר-מאי);
- ג. בתנודת ה- $EA-WR$;
- ד. בתנודת ה- NAO .

סיכום ומסקנות

המחקר נועד לאתר תנודות ושינויים במשקעי הנגב בחמישים השנים האחרונות ולבחון את השפעתן של תנודות בשכיחות המערכות הסינופטיות ובתנודות האטמוספירות הגדולות. נמצא כי במרבית התחנות אין ירידה עקבית בכמויות הגשם, אך ישנן תנודות בסקלת זמן של עשרות שנים. ירידה עקבית בכמויות הגשם נמצאה רק בתחנות הצחיחות ביותר באזור המחקר. בהפרדה לעונות נמצאו שינויים מינוריים בגשמי עונות הסתיו והחורף ולעומתם הפחתה בגשמי עונת האביב, דבר שעשוי

להתפרש כהתקצרות עונת הגשם.

מובהקות מגמת השינוי תלויה בהשתנות הבין-שנתית בכמות המשקעים, ששיעורה נע בין 35% ל-45% בצפון הנגב ובמרכז, עולה אל מעל 50% באזור ים המלח ומגיעה עד ל-75% באילת. למרות התנודה הבין-שנתית הקיצונית בדרום הנגב, דווקא שם נמצאה מגמה מובהקת של הפחתה במשקעים אם כי השינוי הוא במ"מ ספורים בלבד לעשור, ואין בו כדי לשנות את הגדרתו האקלימית של אזור זה.

הקירוב הלינארי של מגמת השינוי באזור שבין קווי 100 מ"מ ו-400 מ"מ לשנה מראה ירידה בלתי מובהקת של 2% בממוצע לעשור. מגמה זו תואמת את מגמת ההתפשטות (הבלתי מובהקת) של האזורים היבשים צפונה ומערבה, על חשבון האזור הים תיכוני. העובדה שמגמת ההתייבשות מלווה במגמת התחממות משמעותה כי הנסיגה בפועל של קווי גבול הצחיחות, צפונה ומערבה, גדולה מזו המשתמעת מכמות המשקעים לבדה.

בחינת מהלך מגמת השינוי, על-ידי קירוב רב-איברי (מדרגה שלוש) לאורך תקופת המחקר, הראתה עלייה מתונה בכמות המשקעים החל מראשית שנות ה-60 ועד לראשית שנות ה-90, וירידה תלולה יותר לאחר מכן, ששיאה בעשור האחרון. מהלך דומה ניכר בתנודות קווי הצחיחות (300 מ"מ ו-200 מ"מ לשנה), שהדרימו מעט לעבר האזור היבש בין השליש הראשון והשני של תקופת המחקר, אך נסוגו צפונה, לעבר האזור הים תיכוני, בשליש האחרון שלה. ממצאים אלה מצביעים כי העלייה במשקעים בצפון הנגב עד ראשית שנות ה-90, שיוחסה לשינוי בשימושי הקרקע מאז הקמת המוביל הארצי ופיתוח חקלאות בצפון הנגב, הייתה למעשה תנודה אקלימית שהתהפכה ולא מגמה של שינוי באקלים.

כמות המשקעים בצפון הנגב ובמרכז נשלטת על-ידי השקעים הקפריסאיים, למרות ריחוק הנגב ממסלולם. עם זאת, אפיקי ים סוף נמצאו מתואמים שלילית עם כמות המשקעים, בפרט במרכז הנגב ובדרומו, עובדה שמשמעה כי אפיקי ים סוף יוצרים תנאים מונעי גשם. ניתן להסביר זאת בכך שלרוב, אפיקים אלה מסיעים לאזור אוויר מדברי חם ויבש, ושכיחותם של אפיקי ים סוף הפעילים, הגורמים לגשמים ולשיטפונות בדרום, נמוכה ביותר. יתרה מזו, ההפחתה העקבית בגשמי דרום הנגב עשויה לנבוע מירידה בשכיחותם של אפיקי ים סוף פעילים במהלך תקופת המחקר, ללא קשר לעלייה במספרם של כלל ימי אפיק ים סוף. נושא זה, מן הראוי שייחקר בעתיד.

נמצא כי התנודות האטמוספיריות בקנה מידה גדול, הנחשבות כשולטות במשטר החורפי באירופה ובים התיכון וכן בצפון הארץ ובמרכז, משפיעות גם על גשמי צפון הנגב ומרכז, אם כי השפעתם הישירה נמוכה מזו של שכיחות השקעים הקפריסאיים. מגמת ההפחתה העקבית במשקעי דרום הנגב והערבה אינה מוסברת על-ידי המגמות ארוכות הטווח של התנודות והטיפוסים הסינופטיים.

ממצאי מחקר זה מצביעים על כך שהמגמות בכמויות המשקעים ברובו של הנגב משקפות בעיקר תנודות בסקלת זמן של עשרות שנים, יותר מאשר מגמה ארוכת טווח.

תודות

ברצוננו להודות לקרן העובונות של הקרן הקיימת לישראל, קרנות ועזבונות מקרן אמיליו סצרוטו (מענק מחקר מס' 4-16-1440-107) ולאקדמיה הישראלית למדעים (ISF, מענק מחקר מס' 108/10) שהשתתפו במימון מחקר זה.

מקורות

1. חלפון נ. 2008. דגמי תפוסת המשקעים בישראל ומאפייניהם הסינופטיים (עבודה לתואר דוקטור). חיפה: אוניברסיטת חיפה.
2. חלפון נ, קותיאל ח, וזיו ב. 2007. על תנודה ורדידות: תנודות עתיות בין יחס המשקעים בדרום מערב הארץ וצפון מזרחה והקשרן לשינויים במשטר הלחצים ברום הנמוך. *מטאורולוגיה בישראל* 1: 56-53.
3. פוצ'טר ע וסערוני ה. 1998. בחינת מפת אזורי האקלים של ארץ-ישראל על פי מיון קפן. *מחקרים בגיאוגרפיה של ארץ ישראל ט"ו*: 179-194.
4. רומם מ. 2010. שקעי הים התיכון: השתנות מרחבית ועיתית ו"קשרים מרחוק". (עבודה לתואר

דוקטור). תל-אביב: אוניברסיטת תל-אביב.

5. שטיינברגר ח. 1999. תפרוסת הגשמים באזור ישראל. *מים והשקיה: ירחון ארגון עובדי המים* **391**: 44-38.
6. שטרן א, גרדוס י, מאיר א, קרקובר ש, וצווער ח. 1986. אטלס הנגב. באר שבע: אוניברסיטת בן-גוריון בנגב והמכון לחקר המדבר.
7. שלומי י וגנית ח. 2009. גשם בערבה 1950-2008 – דו"ח ראשוני מוגש לרשות המים ולרשות ניקוז ערבה. מרכז מדע ים המלח והערבה.
8. שרון ד ואנגרט א. 1998. השינויים ארוכי הטווח בגשמי הנגב הצפוני במבט רגיונלי רחב יותר. *מטאורולוגיה בישראל* **5**(1): 50-38.
9. Alpert P, Osetinsky I, Ziv B, and Shafir H. 2004. Semi-objective classification for daily synoptic systems: Application to the eastern Mediterranean climate change. *International Journal of Climatology* **24**(8): 1001-1011.
10. Ben-Gai T, Bitan A, Manes A, and Alpert P. 1994. Long-term changes in annual rainfall patterns in southern Israel. *Theoretical and Applied Climatology* **49**: 59-67.
11. Ben-Gai T, Bitan A, Manes A, Alpert P, and Rubin S. 1998. Spatial and temporal changes in annual rainfall frequency distribution patterns in Israel. *Theoretical and Applied Climatology* **61**: 177-190.
12. Branston AG and Livezey RE. 1987. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly Weather Review* **115**: 1083-1126.
13. Conté M, Giuffrida A, and Tedesco S. 1989. The Mediterranean Oscillation: Impact on precipitation and hydrology in Italy. In: *Conference on Climate and Water Publications of the Academy of Finland* **9/89**, 1: 121-137.
14. ESRI Inc. 2008. ArcMap™ 9.3. Environmental Systems Research Institute Inc., Redlands, CA.
15. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. [The Physical Science Basis](#), Summary for Policymakers (contribution of WG I to the 4th Assessment Report of the IPCC), Cambridge and New York: Cambridge University Press. Viewed 7 Dec 2011.
16. Jacobeit J. 1987. Variations of trough positions and precipitation patterns in the Mediterranean area. *International Journal of Climatology* **7**: 453-476.
17. Kahana R, Ziv B, Enzel Y, and Dayan U. 2002. Synoptic climatology of major floods in the Negev desert, Israel. *International Journal of Climatology* **22**: 867-882.
18. Kostopoulou E and Jones PD. 2005. Assessment of climate extremes in the Eastern Mediterranean. *Meteorology and Atmospheric Physics* **89**: 69-85.
19. Krichak SO, Kishcha P, and Alpert P. 2002. Decadal trends of main Eurasian oscillations and the Mediterranean precipitation. *Theoretical and Applied Climatology* **72**: 209-220.

- Krichak SO and Alpert P. 2005. Decadal trends in the East Atlantic-West Russia pattern and Mediterranean precipitation. *International Journal of Climatology* **25**: 183-192. .20
- Krichak SO, Breitgand JS, Samuels R, and Alpert P. 2011. A double-resolution transient RCM climate change simulation experiment for near-coastal eastern zone of the Eastern Mediterranean region. *Theoretical and Applied Climatology* **103**: 167-195. .21
- Kutiel H and Benaroch Y. 2002. North Sea-Caspian pattern (NCP) – An upper level atmospheric teleconnection affecting the eastern Mediterranean: Identification and definition. *Theoretical and Applied Climatology* **71**: 17-28. .22
- Kutiel H and Paz S. 1998. Sea level pressure departures in the Mediterranean and their relationship with monthly rainfall conditions in Israel. *Theoretical and Applied Climatology* **60**: 93-109. .23
- Lionello P and Giorgi F. 2007. Winter precipitation and cyclones in the Mediterranean region: Future climate scenarios in a regional simulation. *Advances in GeoSciences* **12**: 153-158. .24
- Morin E. 2011. To know what we cannot know: Global mapping of minimal detectable absolute trends in annual precipitation. *Water Resources Research* **47**: W07505, doi:10.1029/2010WR009798. .25
- Perlin N and Alpert P. 2001. Effects of land-use modification on potential increase of convection – A numerical study in south Israel. *Journal of Geophysical Research* **106**: 22,621-22,634. .26
- Price C, Stone L, Huppert A, Rajagopalan B, and Alpert P. 1998. A possible link between El-Nino and precipitation in Israel. *Geophysical Research Letters* **25**(21): 3963-3966. .27
- Raible CC, Ziv B, Saaroni H, and Wild M. 2010. Winter synoptic-scale variability over the Mediterranean Basin under future climate conditions as simulated by the ECHAM5. *Climate Dynamics* **35**(2-3): 473-488. .28
- Saaroni H, Halfon H, Ziv B, Alpert P, and Kutiel H. 2010. Links between the rainfall regime in Israel and location and intensity of Cyprus lows. *International Journal of Climatology* **30**: 1014-1025. .29
- Tsvieli Y and Zangvil A. 2005. Synoptic climatological analysis of "wet" and "dry" Red Sea Troughs over Israel. *International Journal of Climatology* **25**: 1997-2015. .30
- Yosef Y, Saaroni H, and Alpert P. 2009. Trends in daily rainfall intensity over Israel 1950/1-2003/4. *The Open Atmospheric Science Journal* **3**: 196-203. .31
- Zangvil A, Karas S, and Sasson A. 2003. Connection between Eastern Mediterranean seasonal mean 500 hPa height and sea-level pressure pattern and the spatial rainfall distribution over Israel. *International Journal of Climatology* **23**: 1567-1576. .32
- Zhang X, Aguilar E, Sensoy S, Melkonyan H, Tagiyeva U, Ahmed N, Kutaladze N, Rahimzadeh F, Taghipour A, Hantosh TH, Alpert P, Semawi M, Karam Ali M, Al-Shabibi .33

M, Al-Oulan Z, Zatari T, Al Dean Khelet I, Hamoud S, Sagir R, Demircan M, Eken M, Adiguzel M, Alexander L, Peterson TC, and Wallis T. 2005. Trends in Middle East climate extreme indices from 1950 to 2003. *Journal of Geophysical Research* **110**: D22104.

Ziv B, Dayan U, Kushnir Y, Roth C, and Enzel Y. 2006. Regional and global atmospheric patterns governing rainfall in the southern Levant. *International Journal of Climatology* **26**: 55-73. 34