

משה (קוקו) ארמון

המכון למדעי כדור הארץ ע"ש פרדי
ונדין הרמן, האוניברסיטה העברית
בירושלים

פרנצ'סקו מארה

המכון למדעי האטמוספירה
והאקלים, המועצה הלאומית
האיטלקית למדעים, בולוניה,
איטליה

יהודה אנזל

המכון למדעי כדור הארץ ע"ש פרדי
ונדין הרמן, האוניברסיטה העברית
בירושלים

דוריטה רוסטקייר-אדלשטיין

המכון למדעי כדור הארץ ע"ש פרדי
ונדין הרמן, האוניברסיטה העברית
בירושלים; המחלקה לפיסיקה
סביבתית, שטח מחקר סביבה, המכון
למחקר ביולוגי בישראל

חיים גרפינקל

המכון למדעי כדור הארץ ע"ש פרדי
ונדין הרמן, האוניברסיטה העברית
בירושלים

אורי אדם

המכון למדעי כדור הארץ ע"ש פרדי
ונדין הרמן, האוניברסיטה העברית
בירושלים

אורי דיין

המחלקה לגיאוגרפיה, האוניברסיטה
העברית בירושלים

אפרת מורין

המכון למדעי כדור הארץ ע"ש פרדי
ונדין הרמן, האוניברסיטה העברית
בירושלים

מאמר זה עבר שיפוט עמיתים

ציטוט מומלץ

ארמון מ, מארה פ, אנזל י ואחרים.



"עתיד משאבי המים הטבעיים באזור ברור (וקודר) הרבה יותר: הירידה בכמות הגשם ובשטחו, יחד עם התקצרות משך הסופות, צפויות להוביל להפחתה בנפחים ובספיקות של הנחלים הגדולים, בשפיעת מעיינות, וכן להקטין את המילוי החוזר של מאגרי מי התהום, ומשמעה הידלדלות ניכרת של מקורות המים הטבעיים" | צילום: Gary Nored, Flickr, CC BY-NC 2.0

השפעת שינוי האקלים על דפוסי גשם עתידיים באזור ישראל: סופות העתיד צפויות להיות מרוכזות – פחות גשם, פחות זמן, בשטח מצומצם יותר – ועוצמתן תגבר

31 בינואר, 2022

גיליון חורף 2021 / כרך 12(4)

[חזית המחקר](#)

על קצה המזלג

- תחזיות מפורטות ומדויקות של השפעת שינוי האקלים על דפוסי הגשם בזמן סופות עתירות משקעים הן הכרחיות להיערכות לשינוי האקלים.
- התחזיות הללו חשובות בייחוד באזורים שהשונות האקלימית בהם גבוהה, כמו מזרח הים התיכון, מכיוון שבהם לסופות בודדות יש השפעה מכרעת.
- החוקרים מצאו שבסופות העתידיות הגשם יומטר בעוצמה גדולה יותר ותוך זמן קצר יותר. הדבר מגדיל את החשש מנזקי הצפות וייתכן שגם משיטפונות.
- החוקרים מצאו גם שהגשם יומטר על פני שטח קטן יותר. הירידה בשטח ההמטרה היא הגורם הדומיננטי מכולם, ולכן צפויה ירידה משמעותית בכמות הכוללת של הגשם שיומטר בסופות העתידיות, ולכן משמעויות למשק המים.
- ממצאי המחקר מחייבים התייחסות מצד מקבלי ההחלטות – אלה העוסקים בתכנון משק המים ואלה

העוסקים בהפחתת נזקי הצפות.

המערכת

2021. השפעת שינוי האקלים על
דפוסי גשם עתידיים באזור ישראל:
סופות העתיד צפויות להיות מרוכזות
– פחות גשם, פחות זמן, בשטח
מצומצם יותר – ועוצמתן תגבר.
אקולוגיה וסביבה 12(4).

תקציר

באזורים כמו מזרח הים התיכון, שהשונות הטבעית של הגשם בהם גבוהה, חשיבותן של סופות גשם בודדות, ובייחוד של סופות גשם עתירות משקעים, משמעותית במיוחד. סופות אלה תורמות למילוי חוזר של מקורות מים טבעיים, אך גם עלולות לגרום לשיטפונות ולהצפות עירוניות. מכאן החשיבות היתרה להבין כיצד סופות גשם עתירות משקעים משתנות בעקבות שינוי האקלים שנותן את אותותיו כבר כעת וצפוי להימשך בעתיד. מתן תחזיות מפורטות לסופות גשם בעתיד הרחוק באמצעות מודלים אקלימיים אינו אפשרי, מכיוון שהתהליכים התוך-סופתיים שמכתיבים את אופי הסופות מתרחשים בקנה מידה קטן מהרזולוציה של מודלים אלה. לכן, במחקר זה אנו משתמשים במודל אזורי לחיזוי מזג אוויר ברזולוציה גבוהה, מהסוג שמשמש בתחזיות לטווח של ימים ספורים. המודל מאפשר לנו לזהות ולכמת את השינויים הצפויים במאפייני הגשם בסופות עתירות משקעים בסוף המאה ה-21, בתרחיש פליטת גזי חממה של "עסקים כרגיל". באמצעות המודל הדמינו 41 סופות מהעבר בשני אופנים: בתנאי האקלים ההיסטורי ובתנאי האקלים העתיד. תוצאות ההדמיות מראות שסופות העתיד ייעשו "מרוכזות" יותר: הגשם בהן ירד בעוצמה גבוהה יותר (+15%, בממוצע), על שטח קטן בהרבה (-40%) ובמשך זמן קצר יותר (-9%). הירידה הניכרת בגודלו של שטח ההמטרה ממסכת את ההשפעה של העלייה בעוצמת הגשם ומכתיבה ירידה משמעותית בכמות הגשם הכוללת בסופות (-30%), ועלולה לגרום להידלדלות ניכרת של מקורות המים הטבעיים באזור. שינויים אלה מחייבים את התייחסותם של מקבלי ההחלטות כבר בהווה, כדי שנוכל להימנע ממשברים עתידיים של אספקת מים ולהיערך טוב יותר לשינויים בדפוסי ההצפות והשיטפונות.

זאמר זה הוא גרסה מקוצרת ומותאמת לקהל הקוראים הישראלי של המאמר:

Armon M, Marra F, Enzel, Y, et al. 2022. [Reduced rainfall in future heavy precipitation events related to contracted rain area despite increased rain rate](#). *Earth's Future* **10**: 1-19.

מבוא

השפעת האנושות על אקלים כדור הארץ מאז המהפכה התעשייתית כונתה בעבר "ההתחממות העולמית", אך למעשה ההשפעה מתבטאת לא רק בעלייה בטמפרטורה, אלא גם בתמורות במאפיינים אחרים של האקלים, ובהם דפוסי המשקעים [20], ועל כן נהוג כיום לכנות את כלל השינויים הללו בשם "שינוי האקלים". המשקעים באזור מזרח הים התיכון מאופיינים בשונות גבוהה בין השנים, שנובעת מהבדלים בתדירות ובאופי של סופות הגשם הפוקדות את האזור [6]. השונות הגבוהה ממסכת את מגמת שינוי האקלים ומקשה על זיהוי מגמות היסטוריות בכמויות המשקעים [1, 11, 12]. לכן, אף על פי שתחזיות האקלים מראות שאזור מזרח הים התיכון רגיש במיוחד לשינוי האקלים וצפוי לחוות ירידה ניכרת בכמות המשקעים השנתית [8, 9], כדי להסביר את הירידה יש צורך בהבנה טובה יותר של התהליכים שגורמים לה.

סופות המשמעותיות ביותר – סופות עתירות משקעים – ממלאות מאגרי מים טבעיים [16] כמו הכינרת והאקנות (אקוויפרים), גורמות לזרימות בנחלים, לשיטפונות [5, 14] ולהצפות בערים. לכן, כדי להיערך בצורה טובה להשפעות האפשריות של שינוי האקלים על התנאים הסביבתיים ועל החברה העתידית באזור נדרשת תחזית מהימנה על אופיין של סופות כאלה בעתיד [18]. הבעיה: קנה המידה הקטן – בסדר גודל של קמ"ר ספורים – של התהליכים ששולטים על הכמות, העוצמה והתפוצה המרחבית של המשקעים במהלך סופות, מקשה על הדמייתם ועל חיזוקם בעזרת **מודלים אקלימיים**, שרזולוציית החישוב שלהם היא בדרך כלל מסדר גודל של אלפי קמ"ר. לכן, מודלים אקלימיים לא יכולים לחזות היטב שינויים בדפוסי המשקעים בעתיד [4, 13].

מאידך גיסא, **מודלים של מזג אוויר** שמטרתם חיזוי אזורי, ורזולוציית החישוב שלהם היא בסדר גודל של קמ"ר בודדים, מסוגלים לתת תחזית משקעים מפורטת ומדויקת יחסית [2, 15] – בדומה לתחזית מזג האוויר שאנחנו מכירים מאמצעי התקשורת. מודלים אלה משתמשים בקלט של נתונים מטאורולוגיים המתארים את מצב האטמוספירה, ומפיקים תחזית, למשל

של כמות הגשם, ברזולוציה גבוהה באמצעות חישובים של תהליכים פיזיקליים יסודיים. אך אליה וקוץ בה – רמת פירוט ודיוק גבוהה גוררת מחיר כבד, שכן כוח החישוב של מחשבי-על, כגון אלה המשמשים במודלים של מזג אוויר, אינו מספיק כדי לתת תחזיות ברזולוציה הרצויה עשרות שנים קדימה. נוסף על כך, חישובים מהסוג הזה צורכים הרבה מאוד אנרגיה: בניסוי שנערך לאחרונה בשווייץ מצאו חוקרי אקלים שצריכת החשמל בהדמיה של מזג האוויר למשך 30 שנה (הדמיה שתארך כשלוש שנים במחשב-על) שוות ערך לצריכת החשמל של 6,500 בתי אב במשך שנה שלמה [7].



'במצבים של תגובה הידרולוגית מהירה, כמו בהצפות עירוניות ובשיטפונות באזורים מדבריים או באגני היקוות קטנים, האירועים עשויים להפוך למסוכנים יותר ואולי אף לשכיחים יותר בעקבות עלייה בעוצמת הגשם המותנית ובעוצמת הגשם המרבית בפרקי זמן קצרים'

לכן, נראה שכדי לתת תחזית לדפוסי גשם עתידיים נחוצה גישה שונה. גישה "התחממות עולמית מדומה" (Pseudo global warming) מאפשרת לדמות אירועים ספציפיים, ולבחון את ההבדלים במאפיינים התוך-סופתיים בין סופות היסטוריות לסופות עתידיות. בגישה זו מנבאים את התנאים שנגזרים משינוי האקלים הצפוי לסופות שכבר התרחשו ושהצליחו לדמותן היטב בתנאים מדודים וידועים [10,17]. כלומר, בהדמיות מהסוג הזה תחזית מזג האוויר מחושבת פעמיים: בפעם הראשונה התחזית ניתנת לסופה שהתרחשה בעבר (כך שניתן לדעת עד כמה ההדמיה מדויקת), ובפעם השנייה התחזית מראה מה יהיו תוצאותיה של סופה זהה לחלוטין אם היא תתרחש בעולם שתנאי האקלים בו זהים לאלה הצפויים לפי תחזיות של שינוי האקלים.

במחקר זה אנחנו מזהים ומכמתים שינויים בדפוסי גשם במהלך סופות עתירות משקעים באזור מזרח הים התיכון שנובעים משינוי האקלים. אנחנו שואלים גם אם השינויים שאיתרנו קדירים – כלומר חוזרים על עצמם בסופות שונות. לצורך כך הדמינו פעמיים באמצעות מודל מזג אוויר ברזולוציה גבוהה מאוד (1 קמ"ר) 41 סופות עתירות משקעים שהתרחשו בין 1990 ל-2010 והשוונו בין ההדמיות: בפעם הראשונה הודמו הסופות ההיסטוריות באמצעות התנאים האטמוספריים שהתקיימו בזמן התרחשותן, ותכונות הגשם ה"חזויות" בהן הושושו למדידות גשם מאותן סופות שנערכו באמצעות מכ"ם גשם. בפעם השנייה הסופות הודמו בתנאים אטמוספריים שמביאים בחשבון את שינוי האקלים בסוף המאה ה-21.

שיטות

מודל מזג האוויר ששימש אותנו [19] (WRF) הוא מודל אזורי, ולכן מצריך קלט מתוך מודל מזג אוויר עולמי. בעבודה זאת התבססנו על נתונים של מודל שעורר ניתוחים מחודשים (re-analysis) ומשלב תצפיות מזג אוויר היסטוריות עם מודל מזג אוויר. לשם הדמיית התנאים העתידיים הוספנו לקלט של כל אחת מהסופות העתידיות את השינוי הצפוי בתרחיש פליטת מזהמים מסוג "עסקים כרגיל" (RCP 8.5) במשנתים המטאורולוגיים הבאים: טמפרטורה, רוח, לחות ולחץ אוויר. פלט המודל מורכב ממפות גשם ברזולוציה של 10 דקות ו-1 קמ"ר. המשתנים שבחנו הם: א. ממוצע הגשם המצטבר ברחבי האזור ובכמה תתי-אזורים: האזור הימי של מזרח הים התיכון והאזור היבשתי (ישראל וסביבתה) – שחולק בצורה גסה לאזור בעל אקלים ים תיכוני ולאזור בעל אקלים מדברי; ב. הגורמים התורמים להצטברות הגשם: עוצמת גשם מותנית – עוצמת הגשם שנמדדת רק במקומות ובפרקי הזמן שיוור בהם גשם (מעל ערך סף של 0.1 מ"מ לשעה); משך האירוע – פרק הזמן שיוורדים בו 90%

מהמשקעים; שטח ההמטרה – שטח הכיסוי של האזור שיורד בו גשם; ג. עוצמת גשם מקומית-מרבית – העוצמה הגבוהה ביותר שנמדדה באחד הפיקסלים, בכל אחד מתתי-האזורים (מסעיף ב) למשכי זמן של 10 דקות עד 24 שעות. פרטים נוספים מופיעים במאמר המקורי באנגלית^[3].

תוצאות

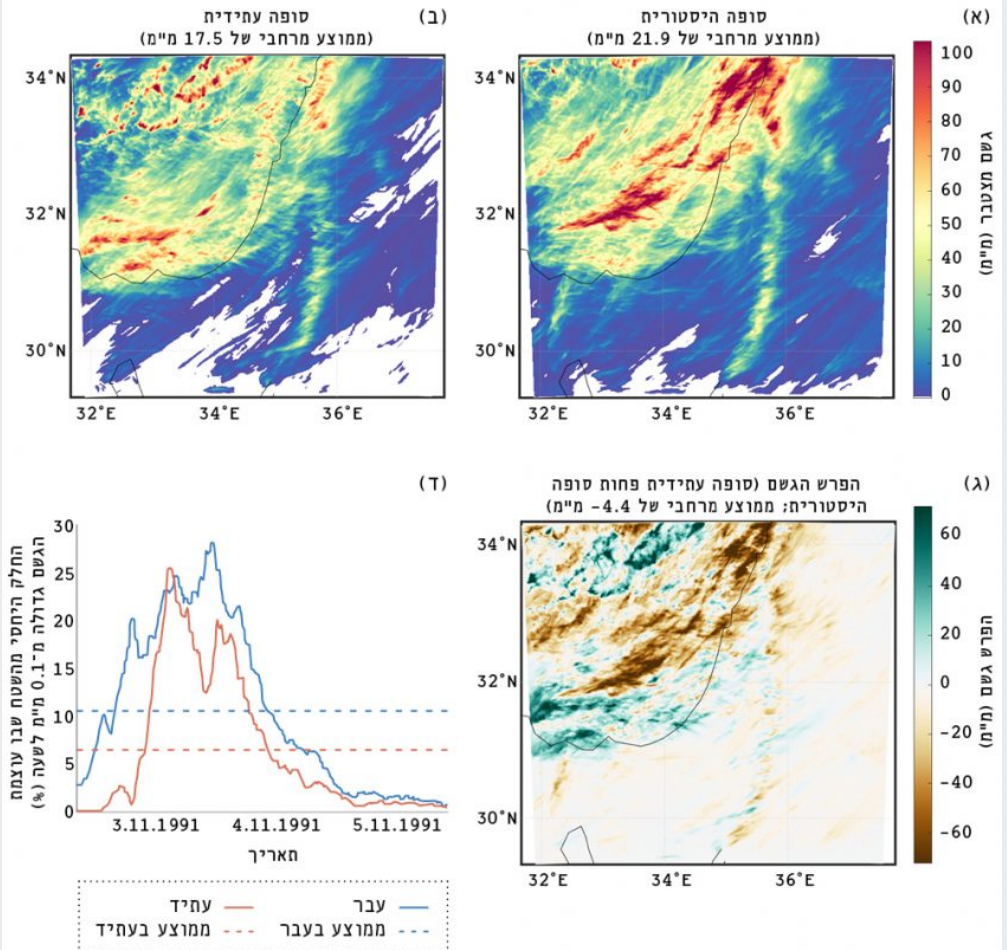
חקר מקרה

השינויים העתידיים בדפוסי הגשם מומחשים פה באמצעות תוצאות הדמיית הסופה הראשונה מבין 41 הסופות, ולאחר מכן נראה שהשינויים שמודגמים בסופה הראשונה מעידים על המגמה הכללית שנצפתה בכל הסופות שהדמינו.

בתחילת נובמבר 1991 הגיע לאזורנו שקע ים תיכוני שהמטיר גשמים נרחבים, בייחוד באזור החוף והגליל. כמויות הגשם המצטברות באירוע הגיעו במספר מקומות ליותר מ-100 מ"מ. תחזית המשקעים של מודל מזג האוויר בתנאים ההיסטוריים מתאימה בצורה טובה לגשם שנמדד באמצעות מכ"ם גשם^[2], ולפיה ישנם מוקדים בעלי כמויות גשם גבוהות בעוד שכמות הגשם הממוצעת באזור היא 21.9 מ"מ (איור 1א). חשוב לשים לב שהכמות הממוצעת כוללת בתוכה גם אזורים שכמעט לא ירד בהם גשם, כמו אזור דרום הנגב. לעומת זאת, כמות המשקעים החזויה לסופה דומה בעתיד (בתרחיש "התחממות עולמית מדומה") נמוכה ב-20% (17.5 מ"מ בממוצע על פני האזור; איורים 1ב, 1ג). בניגוד לירידה בכמות המשקעים, עוצמת המשקעים החזויה לאירוע העתידי עלתה באופן משמעותי: עוצמת הגשם המותנית הממוצעת עלתה ב-30%. מכאן, ברור שלא השינויים בעוצמת הגשם מסבירים את הירידה בכמות המשקעים הכוללת, אלא משתנים אחרים. משך האירוע העתידי קצר ב-24% מהאירוע ההיסטורי. חשוב מכך, הגורם שמסביר את עיקר הירידה העתידית בכמות הגשם בסופה זו, הוא צמצום שטח האזור הגשום. אם ממצעים את השינוי בשטח לאורך כל משך הסופה, שטח ההמטרה (איור 1ד) נמוך ב-38% בסופה העתידית מאשר בסופה ההיסטורית. כלומר, סופת הגשם העתידית מאופיינת ב"התרכזות" של הגשם לעומת הסופה ההיסטורית: עוצמות הגשם גבוהות יותר, הגשם יורד על שטח קטן יותר ובפרק זמן מצומצם יותר, וסך הגשם במהלך הסופה קטן.

איור 1. גשם בסופה הראשונה (2-5.11.1991) מבין 41 הסופות שהודמו במחקר זה

(א) תחזית הגשם המצטבר בסופה ההיסטורית (להשוואה עם הגשם המצטבר מתוך הערכת מכ"ם גשם ראו איור 7 אצל Armon ואח' (2020)^[2]); (ב) תחזית הגשם המצטבר לאירוע העתידי בסוף המאה ה-21; (ג) הפרש הגשם בין הסופה העתידית לסופה ההיסטורית; (ד) השתנות הכיסוי המרחבי של הגשם לאורך הזמן: בקו כחול רצוף – סדרת הזמן של החלק היחסי מהשטח שכוסה בגשם בעוצמה של יותר מ-0.1 מ"מ לשעה. בקו כחול מקווקו – ממוצע הכיסוי לאורך הסופה. בכתום – אותו דבר אבל לסופה העתידית. הסופה העתידית מצטמצמת משמעותית ביחס לסופה ההיסטורית, גם מבחינת שטח הכיסוי וגם מבחינת משך הסופה.



איור 1

גשם בסופה הראשונה (2-5.11.1991) מבין 41 הסופות שהודמו במחקר זה

(א) תחזית הגשם המצטבר בסופה ההיסטורית (להשוואה עם הגשם המצטבר מתוך הערכת מכ"ם גשם ראו איור 7 אצל Armon ואחרים (2020)^[2]); (ב) תחזית הגשם המצטבר לאירוע העתידי בסוף המאה ה-21; (ג) הפרש הגשם בין הסופה העתידית לסופה ההיסטורית; (ד) השתנות הכיסוי המרחבי של הגשם לאורך הזמן: בקו כחול רצוף – סדרת הזמן של החלק היחסי מהשטח שכוסה בגשם בעוצמה של יותר מ-0.1 מ"מ לשעה. בקו כחול מקווקו – ממוצע הכיסוי לאורך הסופה. בכתום – אותו דבר אבל לסופה העתידית. הסופה העתידית מצטמצמת משמעותית ביחס לסופה ההיסטורית, גם מבחינת שטח הכיסוי וגם מבחינת משך הסופה.

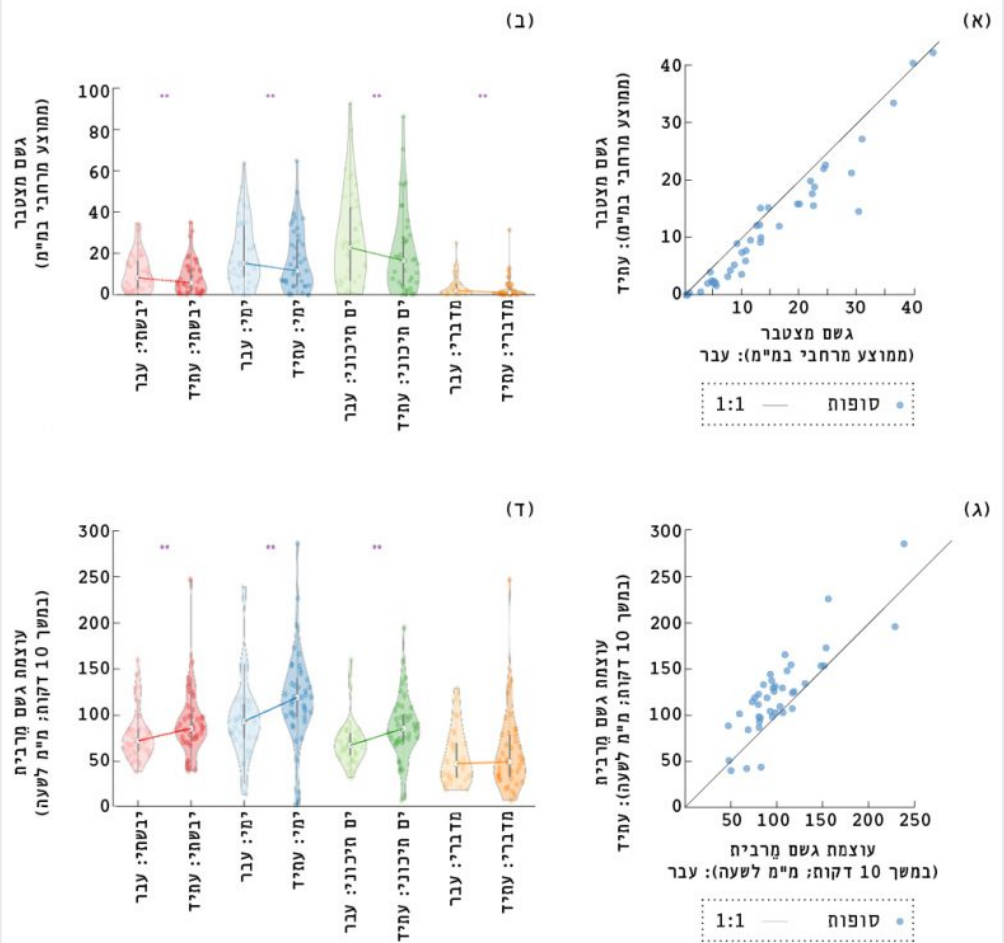
שינויים בדפוסי הגשם לאורך מגוון סופות

בדומה לממצאים מחקר המקרה, תוצאות ההדמיות של 41 סופות עתירות משקעים באקלים הנוכחי ובאקלים ה"עתידי" מעידות על הפחתה מובהקת בכמות המשקעים. ההפחתה, ששיעורה הממוצע הוא 30%, ניכרת ביותר מ-90% מסופות הגשם שהדמינו (איור 2א). ההפחתה מובהקת סטטיסטית בכל אחד מתתי-האזורים (איור 2ב). ההתייבשות ניכרת יותר באזור היבשתי, שאנו חיים בו (-36%) בהשוואה לאזור הימי שבקרבת החוף (-26%). שיעור ההפחתה דומה באזורים המדבריים והים תיכוניים.

כדי להבין את הגורמים להפחתה בכמויות המשקעים בעתיד בדקנו את השינוי בשלושה מאפיינים נוספים של הגשם בכל אחת מהסופות שהדמינו: ממוצע עוצמת הגשם המותנית, משך האירוע ושטח האזור הגשום (איור 3). עוצמת הגשם המותנית הממוצעת גבוהה יותר באופן מובהק בסופות העתידיות (+1%), וביותר מ-85% מהסופות העוצמה גבוהה יותר בהדמיה העתידית מאשר בהיסטורית. בעוד שעוצמת הגשם בסופות העתידיות עולה, המשך שלהן מתקצר. הסופות העתידיות קצרות יותר ב-9% בממוצע מאשר הסופות ההיסטוריות, ורק לכרבע מהן הודמה משך ארוך יותר מבעבר. עם זאת, המתאם הנמוך בין השינוי בעוצמת הגשם והשינוי בכמות המשקעים (מקדם המתאם של ספירמן = 0.37) ובין השינוי במשך הסופות לשינוי בכמות המשקעים (מתאם לא מובהק), מצביע על היותם גורמים משמעותיים פחות בהפחתת כמות הגשם הכוללת. לעומת זאת, לשינוי בשטח האזור הגשום יש מתאם גבוה עם השינוי בכמות הגשם (0.93). נמצא, שבכל הסופות העתידיות (מלבד אחת) שטח ההמטרה קטן, בשיעור ממוצע של 40%. כלומר, המאפיין שמשפיע בצורה החזקה ביותר על הירידה בכמות המשקעים בסופות העתידיות הוא שטח האזור הגשום.

איור 2. השוואה של הגשם המצטבר ועוצמת הגשם המקומית-מרבית בסופות ההיסטוריות והעתידיות

גשם מצטבר ממוצע בסופות ההיסטוריות והעתידיות (א, ב), ועוצמת גשם מקומית-מרבית בפרק זמן של 10 דקות (כלומר הפיקסל וצעד הזמן עם עוצמת הגשם הגבוהה ביותר; ג, ד). גרפי הפיזור (א, ג) מציגים את הנתונים ההיסטוריים בציר האופקי ואת העתידיים בציר האנכי, כך שנקודות שממוקמות מתחת לקו ה-1:1 מעידות על ערכים נמוכים יותר בעתיד. הגשם המצטבר נמוך יותר בסופות העתידיות ב-90% מהאירועים (א), אך עוצמת הגשם המקומית-מרבית גבוהה יותר ב-85% מהסופות העתידיות ביחס לסופות ההיסטוריות (ג). גרפי הכינור (ב, ד) מראים את ההתפלגות של האירועים ההיסטוריים (צבעים בהירים) לעומת האירועים העתידיים (צבעים כהים) בכל אחד מחתי האזורים שנבחנו. כל נקודה בהתפלגות מייצגת את הערך המדוד במהלך סופה אחת. נקודות לבנות מייצגות את החציונים, והקווים האפורים המודגשים הם טווח הרביעונים (25-75% מהנתונים). הבדלים בין החציונים ההיסטוריים והעתידיים מודגשים בקו מקווקו בין הכינורות. הבדלים מובהקים סטטיסטית בין האוכלוסיות המזווגות של האירועים מסומנים בכוכביות (רמת מובהקות של 0.05 במבחן t ובמבחן וילקוקסון למדגמים מזווגים).



איור 2

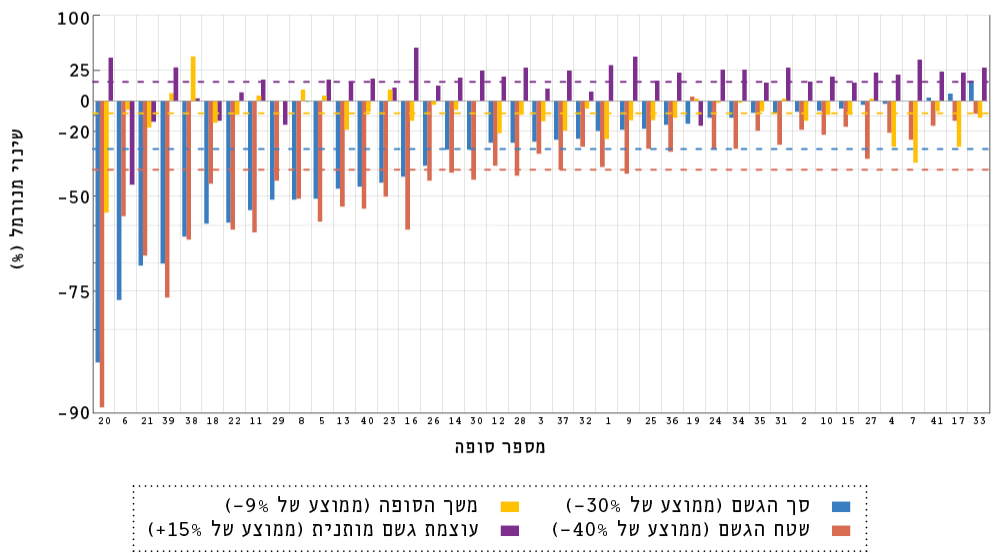
השוואה של הגשם המצטבר ועוצמת הגשם המקומית-מרבית בסופות ההיסטוריות והעתידיות

גשם מצטבר ממוצע בסופות ההיסטוריות והעתידיות (א, ב), ועוצמת גשם מקומית-מרבית בפרק זמן של 10 דקות

(כלומר הפיקסל וצד הזמן עם עוצמת הגשם הגבוהה ביותר; ג, ד). גרפי הפיזור (א, ג) מציגים את הנתונים ההיסטוריים בציר האופקי ואת העתידים בציר האנכי, כך שנקודות שממוקמות מתחת לקו ה-1:1 מעידות על ערכים נמוכים יותר בעתיד. הגשם המצטבר נמוך יותר בסופות העתידיות ב-90% מהאירועים (א), אך עוצמת הגשם המקומית-מרבית גבוהה יותר ב-85% מהסופות העתידיות ביחס לסופות ההיסטוריות (ג). גרפי הכינור (ב, ד) מראים את ההתפלגות של האירועים ההיסטוריים (צבעים בהירים) לעומת האירועים העתידיים (צבעים כהים) בכל אחד מתתי-האזורים שנבחנו. כל נקודה בהתפלגות מייצגת את הערך המדוד במהלך סופה אחת. נקודות לבנות מייצגות את החציונים, והקווים האפורים המודגשים הם טווח הרביעונים (25–75% מהנתונים). הבדלים בין החציונים ההיסטוריים והעתידים מודגשים בקו מקווקו בין הכינורות. הבדלים מובהקים סטטיסטית בין האוכלוסיות המזווגות של האירועים מסומנים בכוכביות (רמת מובהקות של 0.05 במבחן t ובמבחן וילקוקסון למדגמים מזווגים).

איור 3. השינוי בין סופות עתידיות והיסטוריות (מנורמל לערך המדוד בסופה ההיסטורית) במגוון מאפייני גשם ל-41 הסופות שהודמו במחקר זה

הסופות ממוספרות כרונולוגית – סופה מס' 1 התרחשה בשנת 1991 וסופה מס' 41 התרחשה ב-2010. הסופות מסודרות לפי גודל השינוי בכמות הגשם המצטבר (עמודות כחולות). קווים מקווקוים מייצגים את הערך הממוצע בין הסופות. עוצמת הגשם המותנית הממוצעת (עמודות סגולות) עולה כמעט בכל האירועים העתידיים ביחס להיסטוריים, ולעומתה, השטח הגשום (עמודות כתומות) יורד כמעט בכל הסופות העתידיות.



איור 3

השינוי בין סופות עתידיות והיסטוריות (מנורמל לערך המדוד בסופה ההיסטורית) במגוון מאפייני גשם ל-41 הסופות שהודמו במחקר זה

הסופות ממוספרות כרונולוגית – סופה מס' 1 התרחשה בשנת 1991 וסופה מס' 41 התרחשה ב-2010. הסופות מסודרות לפי גודל השינוי בכמות הגשם המצטבר (עמודות כחולות). קווים מקווקוים מייצגים את הערך הממוצע בין הסופות. עוצמת הגשם המותנית הממוצעת (עמודות סגולות) עולה כמעט בכל האירועים העתידיים ביחס להיסטוריים, ולעומתה, השטח הגשום (עמודות כתומות) יורד כמעט בכל הסופות העתידיות.

למרות העלייה הברורה בעוצמת הגשם המותנית בסופות העתידיות, שינויים בעוצמות הגשם המרביות בפרקי זמן שונים מציגים דפוסים מנוגדים, והם אינם אחידים במרחב. עוצמת המשקעים המקומית-מרבית למשך של 10 דקות עולה בסופות העתידיות ב-85% מהסופות (איור 12), בשיעור ממוצע של 22%, והעלייה חדה יותר באזור הימי ביחס ליבשתי ובאזור הים תיכוני ביחס למדברי (איור 12). עוצמת המשקעים המקומית-מרבית בפרקי זמן ארוכים יותר עולה גם כן, אך בשיעורים קטנים יותר (לא מוצג). בבחינת ההשתנות המרחבית של עוצמת הגשם המרבית לכל פיקסל ניכר כי בממוצע העוצמה בפרקי זמן קצרים עולה באזור מישור החוף ויורדת מעט באזור המדברי, אך בפרקי זמן ארוכים – העוצמה יורדת כמעט בכל המרחב^[3] (לא מוצג).

דיון ומסקנות

המחקר הנוכחי מציג את השינויים הצפויים בדפוסי הגשם בעקבות שינוי האקלים בתרחיש "עסקים כרגיל", תוך שימוש בהדמיות של סופות עתירות משקעים מזווגות: סופה היסטורית (מהתקופה שסביב סוף המאה ה-20) מול סופה עתידית (סוף המאה ה-21). שימוש במודל מזג אוויר ברזולוציה גבוהה אפשר את בחינת השינויים בדפוסי הגשם שלא ניתן לזהותם באמצעות מודלים אקלימיים. תוצאות המחקר מעידות על כך שסופות העתיד ייעשו "מרוכזות" יותר: הן יהיו קצרות יותר, עוצמת הגשם באזורים הגשומים תגבר, בעוד ששטח האזור הגשום יקטן בצורה משמעותית. יחד, השילוב של שלושת הגורמים האלה יגרום לירידה משמעותית בכמות המשקעים הממוצעת בכל סופה.

המגבלה העיקרית של הדמיות מסוג "התחממות עולמית מדומה" היא הטיפול הנקודתי בכל סופה, מבלי להתחשב בשינויים בתדירות הסופות ובשינויים אחרים באופיין (מלבד הפרמטרים שמגיעים מהמודלים האקלימיים). לעניין זה חשוב לזכור כי תדירות הסופות באזורנו צפויה לקטון באופן משמעותי בעקבות שינוי האקלים^[21], כך שהתרחיש שהצגנו כאן, כנראה, מעריך בחסר את הירידה בכמות המשקעים. זאת ועוד, ההדירות של התוצאות – כלומר העקביות של השינויים הצפויים בין סופות שונות – מצביעה על כך שיש סיכוי סביר לראות שינויים כאלה בתרחיש שינוי האקלים מן הסוג שנבחנו כאן. נוסף על כך, חשוב להדגיש שככל הנראה, את תחילת השינוי במאפייני הגשם אנו חווים כבר בהווה.

לשינויים הצפויים בדפוסי הגשם עשויות להיות השלכות משמעותיות, מצד אחד על משאבי המים הטבעיים באזור ומצד שני על אסונות טבע, כגון שיטפונות. אך ההשלכות תלויות בתגובה ההידרולוגית לגשם, כלומר באופן שהגשם מיתרגם לרכיבים ההידרולוגיים השונים (נגר עילי, חידור, לחלול למי תהום, אידוי ועוד). במצבים של תגובה הידרולוגית מהירה, כמו בהצפות עירוניות ובשיטפונות באזורים מדבריים או באגני היקוות קטנים, האירועים עשויים להפוך למסוכנים יותר ואולי אף לשכיחים יותר בעקבות עלייה בעוצמת הגשם המותנית ובעוצמת הגשם המרבית בפרקי זמן קצרים. עם זאת, הירידה בשטח הגשם, שגוררת עימה ירידה בתדירות של הופעת גשם בכל נקודה ונקודה, עשויה דווקא למתן את שכיחות האירועים מן הסוג הזה. כאשר התגובה ההידרולוגית איטית יותר, ההשפעה המשולבת של השינויים שמצאנו במאפייני הגשם על השכיחות והעוצמה של השיטפונות ברורה פחות, ואנו חוקרים את הנושא כיום. לעומת זאת, **עתיד משאבי המים הטבעיים באזור ברור (וקודר) הרבה יותר: הירידה בכמות הגשם ובשטחו, יחד עם התקצרות משך הסופות, צפויות להוביל להפחתה בנפחים ובספיקות של הנחלים הגדולים, בשפיעת מעיינות, וכן להקטין את המילוי החוזר של מאגרי מי תהום, ומשמעה הידלדלות ניכרת של מקורות המים הטבעיים. הידלדלות עתידית זאת מחייבת את התייחסותם של גורמי המקצוע וקובעי המדיניות כבר עכשיו כדי לאפשר אספקת מים סדירה ומיטבית על אף השלכות שינוי האקלים.**

לסיכום, במאמר זה הראינו שמבין השינויים הצפויים בדפוסי הגשם בסופות עתידיות עתירות משקעים, הירידה בשטח האזור הגשום תכתיב את ההפחתה בכמות המשקעים. סופות העתיד ייפכו ככל הנראה ל"מרוכזות" יותר – הגשם ירד בפרקי זמן קצרים יותר, על שטח קטן יותר ובעוצמה גבוהה יותר, ואילו כמות הגשם הכוללת תקטן. יחד, שינויים אלה עשויים להוביל להידלדלות מקורות המים הטבעיים באזור.

תודות

כותבי המאמר מודים ליובל שמילוביץ ולרועי דן על עזרתם בעריכת המחקר. המחקר מומן באמצעות מענק ממשד המדע והטכנולוגיה (מענק מס' 61792) ובאמצעות מלגה של רשות המים.

הלכה למעשה

ד"ר יעל סטורץ-פרץ, מנהלת אגף מים עיליים והידרוטמטאורולוגיה, חטיבת השירות ההידרולוגי, הרשות הממשלתית למים ולביוב:

נושא שינוי האקלים נמצא בחזית השיח הציבורי, בעיקר לנוכח שינויים מובהקים בטמפרטורות. עם זאת, לא נמצאו שינויים מובהקים או מגמה ברורה בכמויות הגשם השנתיות בישראל ב-90 השנים האחרונות. משק המים בישראל מתוכנן שנים רבות קדימה, ולכמויות ולמאפיינים של הגשם ישנה השפעה ישירה על משק המים. לכן, לתחזיות על מאפייני הגשם בעתיד ועל השפעתם ההידרולוגית ישנה חשיבות רבה לתכנון ולניהול של משק המים העתידי בישראל ובעולם.

תוכנית האב של משק המים לשנת 2050 מתחשבת בהפחתת המילוי החוזר לאגני מי תהום ולכינרת, בהתאם לתרחיש שינוי האקלים המקובלים בעולם. נוסף על כך, יש צורך במיקוד על רזולוציות עתידיות בפרקי זמן הקצרים משנה, בנייתו אופי הגשמים במהלך עונה, סופה ויום ובניתוח של עוצמות הגשם בפרקי זמן קצרים – כפי שנעשה

למשל במאמר זה. מאפיינים אלה מכתיבים משתנים הידרולוגיים חשובים, כמו מילוי חוזר של מי התהום, יחסי גשם- נגר וכן מקדמי נגר המשפיעים על זרימת הנחלים, על מאזני המים ועל המים הזמינים לימת הכנרת.

היבט נוסף וחשוב לא פחות הוא צמצום סיכוני הצפות ושיטפונות וניהול הנגר העילי. מטרתו היא למזער את הפגיעות בנפש וברכוש בעת אירועי גשם, והוא אכן נמצא על סדר היום של רשויות ניקוז, רשויות מקומיות ומשרדי ממשלה. בעוד ששיטפונות נגרמים בגלל כמויות גשם גדולות מהרגיל היורדות לאורך זמן ממושך, הרי ששיטפונות בזק והצפות עירוניות נגרמים בשל גשמים רבי עוצמה היורדים בפרקי זמן קצרים. תכנון ניהול הנגר והניקוז, המביא בחשבון את השינויים העתידיים במאפייני הגשם, כמו גם משתנים נוספים כגון שינויים בשימושי הקרקע ופיתוח עירוני, יוביל לניהול נגר מיטבי ארוך-טווח ולצמצום נזקי השיטפונות וההצפות.

מקורות

1. יוסף י"א, בהר"ד ע, און ל ואחרים. 2019. [שינוי האקלים בישראל – מגמות עבר ומגמות חזויות במשטר הטמפרטורות והמשקעים](#). השירות המטאורולוגי הישראלי.
2. Armon M, Marra F, Enzel Y, et al. 2020. [Radar-based characterisation of heavy precipitation in the eastern Mediterranean and its representation in a convection-permitting model](#). *Hydrology and Earth System Sciences* **24**: 1227-1249.
3. Armon M, Marra F, Enzel Y, et al. 2022. [Reduced rainfall in future heavy precipitation events related to contracted rain area despite increased rain rate](#). *Earth's Future* **10**: 1-19.
4. Ban N, Schmidli J, and Schär C. 2014. [Evaluation of the convection-resolving regional climate modeling approach in decade-long simulations](#). *Journal of Geophysical Research* **119**: 7889-7907.
5. Dayan U, Lensky IM, Ziv B, et al. 2021. [Atmospheric conditions leading to an exceptional fatal flash flood in the Negev Desert, Israel](#). *Natural Hazards and Earth System Sciences* **21**: 1583-1597.
6. Enzel Y, Bookman (Ken Tor) R, Sharon D, et al. 2003. [Late Holocene climates of the Near East deduced from Dead Sea level variations and modern regional winter rainfall](#). *Quaternary Research* **60**: 263-273.
7. Fuhrer O, Chadha T, Hoefler T, et al. 2018. [Near-global climate simulation at 1km resolution: Establishing a performance baseline on 4888 GPUs with COSMO 5.0](#). *Geoscientific Model Development* **11**: 1665-1681.
8. Garfinkel CI, Adam, O, Morin, E, et al. 2020. [The role of zonally averaged climate change in contributing to intermodel spread in CMIP5 predicted local precipitation changes](#). *Journal of Climate* **33**: 1141-1154.
9. Giorgi F and Lionello P. 2008. [Climate change projections for the Mediterranean region](#). *Global and Planetary Change* **63**: 90-104.
10. Gutmann ED, Rasmussen RM, Liu C, et al. 2018. [Changes in hurricanes from a 13-Yr convection-permitting pseudo-global warming simulation](#). *Journal of Climate* **31**:

- 3643-3657.
11. Marra F, Armon M, Adam O, et al. 2021. [Toward narrowing uncertainty in future projections of local extreme precipitation](#). *Geophysical Research Letters* **48**: 1-11.
 12. Morin E. 2011. [To know what we cannot know: Global mapping of minimal detectable absolute trends in annual precipitation](#). *Water Resources Research* **47**: 1-9.
 13. Prein AF, Langhans W, Fosser G, et al. 2015. [A review on regional convection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges](#). *Reviews of Geophysics* **53**: 323-361.
 14. Rinat Y, Marra F, Armon M, et al. [Hydrometeorological analysis and forecasting of a 3-d flash-flood-triggering desert rainstorm](#). *Natural Hazards and Earth System Sciences* **21**: 917-939.
 15. Rostkier-Edelstein D, Kunin P, Hopson TM, et al. 2016. [Statistical downscaling of seasonal precipitation in Israel](#). *International Journal of Climatology* **36**: 590-606.
 16. Samuels R, Rimmer A, and Alpert P. 2009. [Effect of extreme rainfall events on the water resources of the Jordan River](#). *Journal of Hydrology* **375**: 513-523.
 17. Schär C, Frei C, Lüthi D, et al. 1996. [Surrogate climate-change scenarios for regional climate models](#). *Geophysical Research Letters* **23**: 669-672.
 18. Sillmann J, Shepherd TG, van den Hurk B, et al. 2021. [Event-based storylines to address climate risk](#). *Earth's Future* **9**: 1-6.
 19. Skamarock WC, Klemp JB, Dudhia J, et al. 2008. [A Description of the advanced research WRF version 3](#): 1-113.
 20. Trenberth KE, Dai A, Rasmussen RM, et al. 2003. [The changing character of precipitation](#). *Bulletin of the American Meteorological Society* **84**: 1205-1218.
 21. Zappa G, Hawcroft MK, Shaffrey L, et al. 2015. [Extratropical cyclones and the projected decline of winter Mediterranean precipitation in the CMIP5 models](#). *Climate Dynamics* **45**: 1727-1738.

קריאה נוספת

מאמר המסביר בצורה ברורה ותמציתית את הבסיס המדעי לשינויים בדפוסי המשקעים בעקבות שינוי האקלים.

Trenberth KE, Dai A, Rasmussen RM, et al. 2003. [The changing character of precipitation](#). *Bulletin of the American Meteorological Society* **84**: 1205-1218.

דו"ח המנחת את השינויים הצפויים בטמפרטורה ובמשקעים בישראל במהלך המאה ה-21. הדו"ח עוזר להבין את עוצמת שינוי האקלים הצפוי בארץ, לעומת שינוי האקלים העולמי הממוצע.

יוסף י"א, בהר"ד ע, און ל ואחרים. 2019. [שינוי האקלים בישראל – מגמות עבר ומגמות חזויות במשטר הטמפרטורות והמשקעים](#). השירות המטאורולוגי הישראלי.