

מרץ 2021

מגמות היסטורית ומגמות חזויות בדפוסי המשקעים בישראל עד סוף המאה הנוכחית

דו"ח מסכם – רשות המים



דימה ונגר, נועם חלפון, יצחק (איציק) יוסף

ניסן התשפ"א

מרץ 2021

סימוכין: 4000-0804-2021-0000112

לכבוד: הרשות הממשלתית למים ולביוב

גיא רשף – סמנכ"ל, מנהל חטיבת השרות ההידרולוגי

מיקי זיידה – מנהל אגף בכיר לתכנון, אגף תכנון

הנדון: פרויקט מגמות היסטוריות ומגמות חזויות בדפוסי המשקעים בישראל עד

סוף המאה – דו"ח מסכם

כללי

על רקע חששות הולכים וגוברים משינויי אקלים ומהשפעתם על משק המים בישראל, התבקשו על ידי רשות המים להציג את השינויים ההיסטוריים והתחזית לדפוסי המשקעים עד שנת 2100 תחת תרחישים אפשריים שונים (RCP4.5 ו-RCP8.5), במגוון היבטים, ביניהם: ניתוח כמויות גשם עונתיות, התפלגות הגשם, מדד ה-SPI וכן חישוב ההסתברויות לרצפים שונים של שנים יבשות מהממוצע. מטרתו של דו"ח זה היא בעיקר להציג את מגוון התוצרים המלא של הניתוחים הסטטיסטיים שבוצעו. הדו"ח מחולק לשלושה חלקים. חלקו הראשון מתאר את המתודולוגיה, חלקו השני מביא מספר דוגמאות מהעיבוד המבוקש וחלקו השלישי מוקדש לניתוח אקלימי כללי עבור מגמות המשקעים בארצנו. בנספח ניתן למצוא הסבר טכני על האופן בו מערך הנתונים המסופק בנוי/מסודר.

אנו מקווים שמפרט נתונים רחב זה אכן יאפשר חיבור בין שינויי האקלים לנושאים ספציפיים הנמצאים במוקד העניין של משרדכם. נשמח לעמוד לרשותכם ולהדריך במידת הצורך לגבי אופן השימוש והעיון במאגר הנתונים ולהבנה ולהעמקה בנושאים ספציפיים.

תודות

ברצוננו להודות ללינס אוזן וענת בהר"ד, מהשירות המטאורולוגי, על הסיוע בהכנת התוצרים לדו"ח זה.

עיקרי הממצאים

- על פי המודלים האקלימיים, כמויות המשקעים הממוצעות צפויות לרדת במהלך המאה ה-21 בכל אגני ההיקוות. לקראת סוף המאה הירידה מוערכת בשיעור ממוצע של כ-10% תחת תרחיש RCP4.5 וכ-24% תחת תרחיש RCP8.5, ביחס לתקופה האחרונה (1988-2017).
- עיקר הירידה צפוי להתחיל לקראת אמצע המאה. עד אז השינויים צפויים להיות לא גדולים.
- לפי התרחיש הקיצוני יותר, RCP8.5, מגמת הירידה בכמות המשקעים צפויה להמשיך עד סוף המאה. לפי התרחיש המתון יותר, RCP4.5, הירידה צפויה להיעצר לקראת סוף המאה.
- כבר בתקופה הקרובה (2021-2050), חזויה עלייה קלה אך מובהקת בשכיחות של בצורת ($SPI < -1$) ברוב האגנים, ביחס לתקופה 1988-2017, למעט אגן כנרת וגליל מערבי, בהם אין מגמה חד משמעית. מאמצע המאה אף חזויה עלייה בשכיחות של כל סוגי הבצורת, ובפרט קיים סיכון לבצורות חריגות שלא נראו כדוגמתן ב-70 השנים האחרונות.
- ההסתברות (הסיכוי) לרצפים ארוכים של שנים עם משקעים מתחת לממוצע התקופה האחרונה (1988-2017), עבור אותו אגן, צפויה לעלות החל מאמצע המאה ה-21.
- למודלים האקלימיים שעליהם מבוסס הדו"ח יש מגבלות המקשות על תיאור מהימן של האקלים, אם בשל רזולוציה מרחבית גסה יחסית ואם בשל תיאור לא מדויק של תהליכים פיזיקליים תת-סריגיים ("פרמטריזציות"). כמו כן, קיים קושי להפריד בין מגמות של אגנים הידרולוגיים סמוכים.

תוכן העניינים

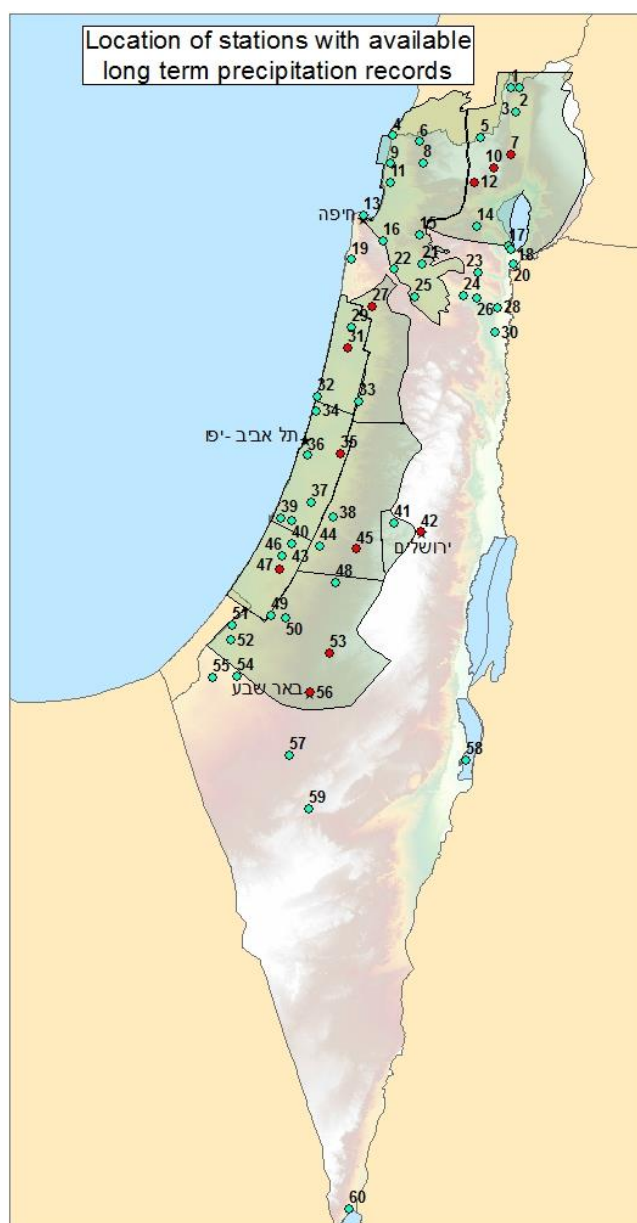
4	שיטות
4	תחזית משקעים לאגני היקוות
4	בסיס הנתונים
8	שחזור כמויות הגשם באגנים בעבר והתחזית לעתיד
11	תקופת ייחוס וחלוקה של תקופת המדידה ותקופת התחזית לתתי תקופות
12	שיטות עבודה סטטיסטיות עם נתוני מודלים ונתוני גשם שנתיים
13	אינדקס בצורת ורצף שנים יבשות מהממוצע
13	חישוב אינדקס הבצורת – SPI
13	חישוב ההסתברות לרצף שנים עם כמות משקעים מתחת לממוצע
15	דוגמאות לתוצרי עבודה זו
15	תחזית המשקעים לאגנים השונים
16	התפלגות המשקעים
17	ההסתברות לרצף שנים עם כמות משקעים מתחת לממוצע
20	תחזית ה- SPI
22	ניתוח מגמות אקלימיות ארוכות טווח במשטר המשקעים
22	מגמות משקעים רציפות לאורך המאה
25	מיפוי המגמות האקלימיות בחלוקה לתקופות
28	תחזית לקטגוריות SPI השונות
29	מקורות
30	נספחים
30	נספח א' – הערה על בחירת אנסמבל המודלים הקלימטולוגיים
30	נספח ב' – התאמת פונקציות SPI
31	נספח ג' – רשימת התוצרים המלאה

שיטות

תחזית משקעים לאגני היקוות

בסיס נתונים

בעבודה זו נעשה שימוש במערך נתונים היסטוריים המבוסס על תצפיות ובמערך נתונים המבוסס על מודלים. התחנות ההיסטוריות עברו מבחני הומוגניות (Yosef et al., 2019) כדי לנטרל השפעות שאינן אקלימיות על המדידה דוגמת: שינויים בהצבה, החלפת מכשור, שינויים שחלו בסביבתה וכד'. את פריסת התחנות, להן יש מערך נתונים הומוגני בתקופה 1950-2017, ניתן לראות באיור 1. גבולות האגנים התת-קרקעיים משורטטים באיור 2.



שם התחנה	שם התחנה
1	כפר גלעדי
2	מעין ברוך
3	נאות מרדכי
4	כפר ראש-הנקרה
5	יראון
6	אילון
7	איילת השחר
8	יחיעם
9	עברון
10	צפת (הר-כנען)
11	עכו
12	פרוד
13	חיפה (נמל)
14	לביא
15	אלון הגליל
16	יגור
17	כנרת (מושב)
18	דגניה א'
19	עין כרמל
20	אשדות יעקב
21	שריד
22	הזורע
23	גזית
24	עין חרוד
25	גבעת עוז
26	בית השיטה
27	רגבים
28	חמדיה
29	גן שמואל
30	שדה אליהו
31	עין החורש
32	גוש
33	איל
34	כפר שמריהו
35	בארות יצחק
36	מקווה ישראל
37	גן שלמה
38	חולדה
39	ניר גלים
40	קבוצת יבנה
41	קריית ענבים
42	ירושלים
43	באר טוביה
44	כפר מנחם
45	בית ג'מל
46	משואות יצחק
47	נגבה
48	בית גוברין
49	דורות
50	רוחמה
51	נחל עוז
52	בארי
53	להב
54	אורים
55	מגן
56	באר שבע
57	רביבים
58	סדום
59	שדה בוקר
60	אילת

איור 1. פריסת תחנות הגשם עם מערך נתונים הומוגני בתקופה 1950 – 2017. תחנות בהן נעשה שימוש בעבודה הנוכחית מופיעות בצבע אדום.



איור 2. גבולות האגנים ההידרולוגיים התת-קרקעיים.

החיווי לעתיד התבסס על מערך נתונים הכולל תוצאות מ-15 מודלים אקלימיים רגיונליים (RCMs), מתוך CORDEX AFRICA ברזולוציית סריג של 0.44 מעלות, כ-50 ק"מ. מודל אחד מתוכם נפסל לשימוש בעקבות ביצועים ירודים באזורנו. השיקולים המלאים לפסילת המודל מפורטים בנספח א'. המודלים האזוריים הורצו על בסיס ריצות מודלים אקלימיים עולמיים בפרויקט CMIP5 (2008-2012). התחזיות שהתקבלו הן עד שנת 2100, עבור שני תרחישים עיקריים – תרחיש RCP 4.5 (תרחיש מתון, המניח עלייה בפליטת גזי חממה עד שנת 2040 בערך, וירידה אחר כך) ותרחיש RCP 8.5 (תרחיש פסימי יחסית, המניח המשך עלייה בפליטת גזי חממה עד סוף המאה ה-21). פרטי המודלים מופיעים בטבלה 1.

טבלה 1. רשימת 14 המודלים הנבחרים של CORDEX אפריקה. עבור כל מודל מופיע מספר סודר, מכון המחקר שהריץ את המודל, המודל האקלימי הגלובאלי שעליו הוא מבוסס, והמודל המקומי שהורץ. פרטי הגוף האחראי בו הורץ כל מודל ניתן למצוא בתחתית הטבלה.

שם המודל	מודל מקומי (RCM)	מודל גלובלי (GCM)	גוף אחראי	
cnrm_cclm	CCLM4-8-17	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CLMcom	1
had_cclm	CCLM4-8-17	MOHC-HadGEM2-ES	CLMcom	2
mpi_cclm	CCLM4-8-17	MPI-M-MPI-ESM-LR	CLMcom	3
nor_hirham	HIRHAM5	NCC-NorESM1-M	DMI	4
knmi_racm	RACMO22T	ICHEC-EC-EARTH	KNMI	5
mpi_remo	REMO2009	MPI-M-MPI-ESM-LR	MPI-CSC	6
cccma_rca	RCA4	CCCma-CanESM2	SMHI	7
cnrm_rca	RCA4	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	SMHI	8
csiro_rca	RCA4	CSIRO-QCCCE-CSIRO-Mk3-6-0	SMHI	9
miroc_rca	RCA4	MIROC-MIROC5	SMHI	10
had_rca	RCA4	MOHC-HadGEM2-ES	SMHI	11
mpi_rca	RCA4	MPI-M-MPI-ESM-LR	SMHI	12
nor_rca	RCA4	NCC-NorESM1-M	SMHI	13
noaa_rca	RCA4	NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M	SMHI	14

שם המוסד שהריץ את המודל:

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

DMI – Danish Meteorological Institute

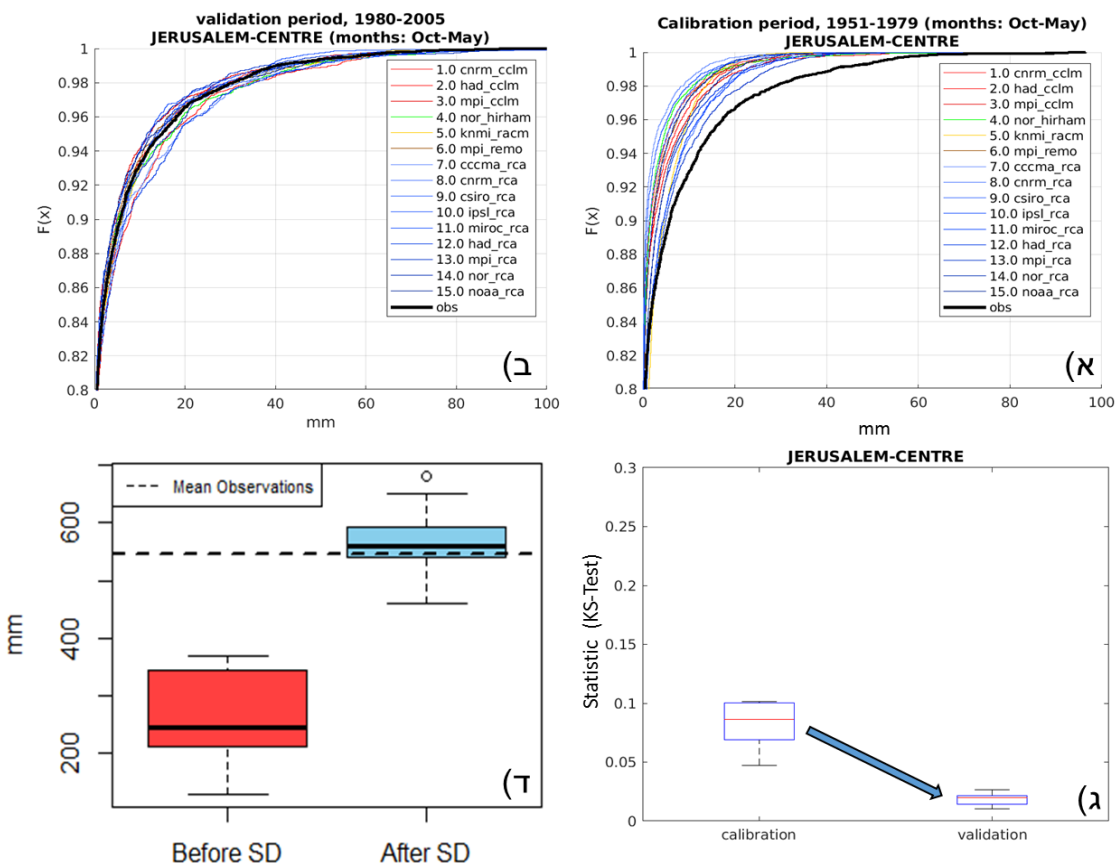
KNMI – Royal Netherlands Meteorological Institute, De Bilt, The Netherlands

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

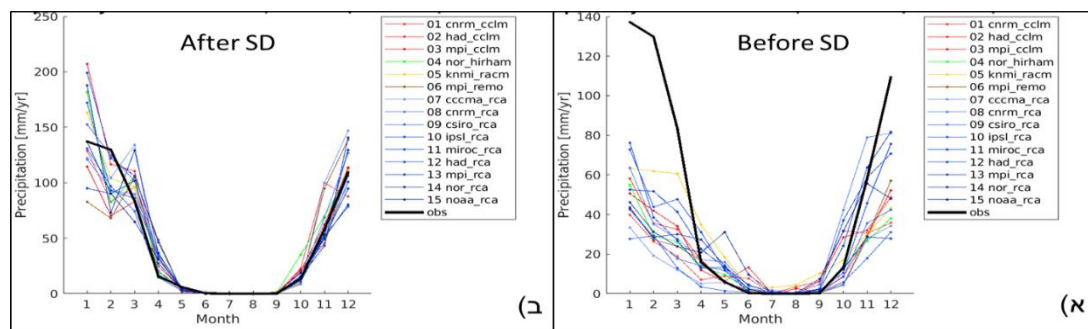
SMHI – Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Rossby Centre

למרות שמדובר במודלים אזוריים (RCMs), הם עדיין בעלי רזולוציה נמוכה יחסית, בה הטופוגרפיה אינה מיוצגת נכונה, כך גם המעבר בין ים ליבשה, היכולת לדמות תהליכי בריזה ועוד. בחינת הערכת ביצועי המודלים בעבר (ללא תיקון) אל מול התפלגות המדידות בתחנות, מראה שכלל המודלים נמצאים בהערכת חסר בכמויות הגשם, שמגיעה אף למאות מ"מ, דבר המעיד על הקושי שיש למודלים בזיהוי תהליכי המשקעים באזורנו.

באמצעות נתוני התחנות (תצפיות היסטוריות) ניתן להעריך את ביצועי המודל בעבר (קרי עד כמה התפלגות נתוני המודל דומה להתפלגות נתוני העבר או במילים אחרות עד כמה המודל מצליח לדמות את העבר). כך, על-ידי לימוד הקשרים בין פונקציית הצפיפות המצטברת (CDF) של התצפיות לזו של נתוני המודל בעבר ניתן להחיל תיקונים על פונקציית הצפיפות המצטברת של נתוני המודל לעתיד. בעבודה זו בחרנו בשיטת QDM – Quantile Delta Mapping (Pierce et al., 2015; Cannon, 2016; Cannon, 2018) אותה יישמנו עבור תחנות התצפית המפורטות באיור 1 (התחנות עבורן קיימות סדרות נתונים הומוגניות). איורים 3 ו-4 מתארים דוגמה לאופן יישום ובדיקת השיטה.



איור 3. דוגמה לאופן אימות המודלים בתחנת ירושלים. (א) התפלגות המודלים (בגוונים צבעוניים) ביחס לנתוני המקור (בשחור) ללא תיקון בתקופה הכיול 1979-1951 (חודשים אוקטובר עד מאי); (ב) התפלגות המודלים לאחר תיקון ביחס לנתוני המקור בתקופת האימות 2005-1980; (ג) מבחן Kolmogorov-Smirnov בתקופת הכיול ובתקופת האימות, ירידה מצינת התאמה טובה יותר להתפלגות נתוני המקור; (ד) התפלגות כמות הגשם הממוצעת של כלל המודלים לפני תיקון (אדום) ולאחר תיקון (תכלת), קו שחור מקווקו מציין את ממוצע התצפיות. SD – Statistical Downscaling.



איור 4. דוגמה להשפעה של תהליך התיקון על יכולת זיהוי הגשם בירושלים במשך כל חודשי השנה. (א) ממוצע כמות הגשם החודשית של המודלים (בגוונים שונים) ביחס לתצפיות (בשחור) ללא תיקון בתקופה 1979-1951; (ב) ממוצע הגשם החודשי לאחר תיקון (SD - Statistical Downscaling) בתקופת האימות 2005-1980.

למרות התיקון והשיפור המשמעותי בביצועי המודלים, כדאי להתייחס בזהירות לתחזיות המתקבלות מיישום תהליך תיקון סטטיסטי זה. כפי שצוין, למודלים האקלימיים הללו יש מגבלות המקשות על תיאור/מידול האקלים האמיתי, אם בשל הרזולוציה המרחבית הגסה ואם בשל תיאור לא מדויק של תהליכים פיזיקליים תת-סריגיים ("פרמטריזציות"). קושי בשחזור העבר ראוי שיעלה ספק לגבי יכולתם של המודלים לתיאור נכון של העתיד (יוסף וחבריו, 2019).

בנוסף, שיטות תיקון מסוג זה לא יכולות לשפר את יכולת החיזוי של המודל ביחס להבדל בין מגמות באזורים סמוכים. מבדיקה שבוצעה על מדגם של תחנות ואגנים, עולה כי היכולת של המודל להפריד בין אגנים הידרולוגיים סמוכים היא מוגבלת. כך למשל, ייתכן שהמודלים יתקשו לזהות הבדל במגמות בין אגן כנרת לאגן גליל מערבי.

לבסוף, יש לציין כי ככלל, לא ניתן לחזות באמצעות מודלים אקלימיים את המאפיינים של שנה ספציפית. כך התחזית לשנת 2071, למשל, מייצגת תחזית לשנה אפשרית בתקופה שסביב 2071, ולא בהכרח תחזית לשנה ספציפית זו. בעבודה זו חולקה תקופת התחזית ל-3 תת-תקופות של 30 שנה, והניתוח בוצע על "בלוקים" אלו, בעיקר כדי ללמוד על הקלימטולוגיה והמאפיינים של כל תת-תקופה.

שחזור כמויות הגשם באגנים בעבר והתחזית לעתיד

מרשות המים נתקבלה שכבת ממ"ג עם תיחום של 9 אגנים תת-קרקעיים. כדי להבין את המגמות ההיסטוריות בכל אחד מהאגנים, שחזרנו את סדרות הזמן הכוללות את כמות הגשם השנתית בכל אגן באמצעות מפות גשם שנתיות החל משנת 1952/3 ועד היום. מפות גשם אלו מבוססות על מכלול התחנות שהיו זמינות בכל שנת מדידה, ללא הומוגניזציה. פעולה זו אפשרה את הערכת כמות הגשם השנתית המצטברת בכל אגן בכל שנה. כך הוכנה סדרת זמן לכל אגן המתארת את השינוי בכמות הגשם השנתית בתקופה 1952/3-2016/7. סדרות זמן אלו הושאו לסדרות הזמן של 60 תחנות המדידה ההומוגניות ברחבי ישראל, שעבורן גם קיימת תחזית עד שנת 2100 על בסיס המודלים.

לטובת בחינת מידת ההתאמה בין כמות הגשם באגן מסוים לבין הכמות הנמדדת ממד הגשם, ביצענו: ניתוח אשכולות (איור 5), בחינת קורלציות בין תחנות וכן בחינת השוונות המוסברות במשוואות הרגרסיה השונות שחושבו לכל אגן. כך, לכל אגן תת-קרקעי, נמצאו בין תחנת מדידה אחת לשלוש תחנות שהן בעלות הקורלציה הגבוהה ביותר לאותו אגן היקוות. על בסיס תחנות אלו, חושבה משוואת רגרסיה המסוגלת לחזות ברמת דיוק גבוהה את כמות המשקעים בכל אחד מאגנים. השוונות המוסברות (R^2) היא מעל 90% ($R \geq 0.95$) עבור כל האגנים, מלבד ירת"ן דרום, שגם עבורו, השוונות המוסברות היא די גבוהה ($R^2 = 0.88$). את סיכום התחנות הנבחרות לייצוג של כל אגן, מקדמי הרגרסיה והשוונות המוסברות, ניתן לראות בטבלה 2. מקדמי הרגרסיה בטבלה זו (coefficients) מופיעים לפי אותו הסדר שבו מופיעות התחנות בעמודה 'stations', כך שמשוואת הרגרסיה עבור אגן כנרת, למשל, היא:

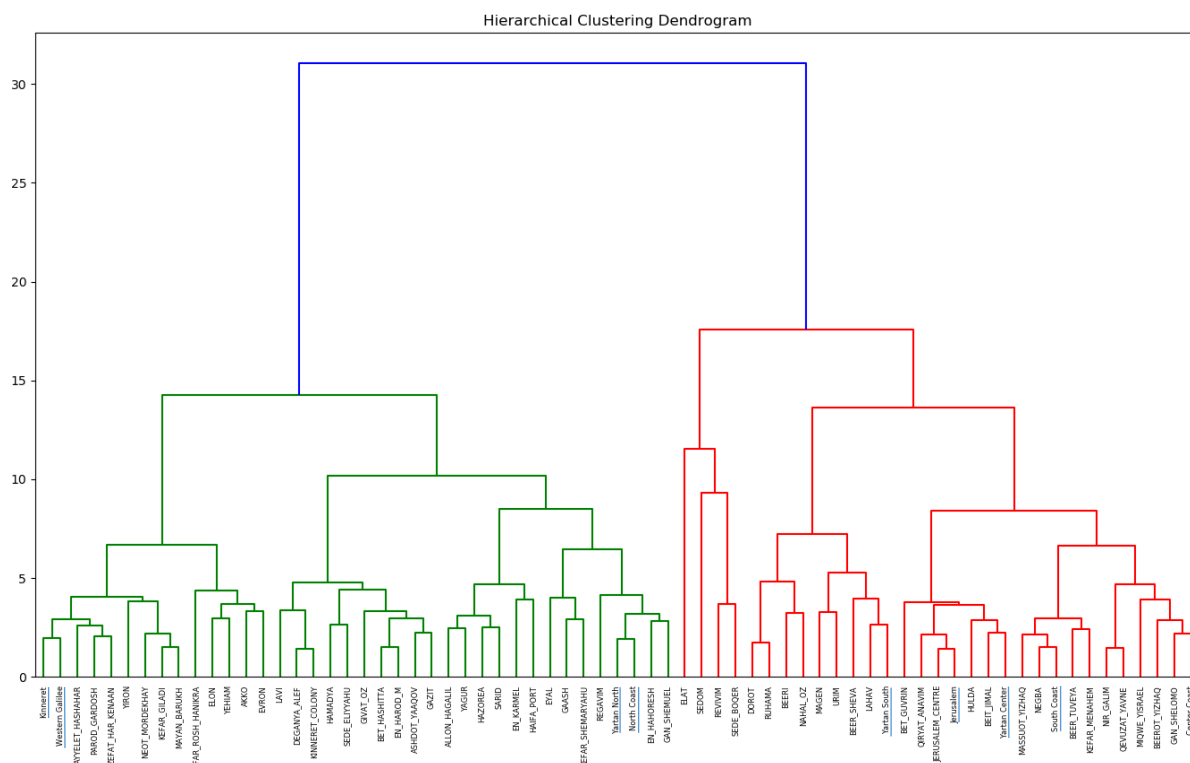
$$P_{kinneret} = 0.47 * P_{Ayyelet Hashahar} + 0.35 * P_{Parod} + 0.17 * P_{Zefat Har Kenaan}$$

כש- P מציין את כמות המשקעים השנתית במ"מ.

יש לציין, כי התחנות המתאימות לאגן כנרת ולאגן גליל מערבי הן אותן תחנות, אולם המכפילים שונים, כך שבאגן כנרת יש משקל גבוה יותר לתחנת איילת השחר, בעוד שבגליל מערבי יש יותר משקל דווקא לפרוד. הסיבה לכך היא הדמיון הרב בין האגנים עצמם, שסדרות הזמן שלהם נמצאות בקורלציה קרובה ל-1.

הבנת הקשרים בין התחנות לאגנים, אפשרה לנבא את הערכים הצפויים באגנים על סמך הערכים החזויים במודלים לתחנות השונות. שימוש במשוואות רגרסיה אלו אפשר לחשב סדרות זמן משנת 2007 עד שנת 2100 לכל אגן, לכל אחד מ-14 המודלים, ולכל אחד מ-2 התרחישים (סה"כ 252 סדרות זמן).

כדי לנתח ולהשוות את המגמות במשקעים בעבר ובעתיד, היה צורך לעבוד בשיטה דומה ככל האפשר עם הנתונים ההיסטוריים ועם נתוני המודלים. לכן, כל הניתוחים על תקופת העבר בוצעו על סדרת זמן משוחזרת של המשקעים באגן, שחושבה על בסיס משוואת הרגרסיה, עבור כל אגן בנפרד.



איור 5. דנדרוגרמה המציגה ניתוח אשכולות היררכי של אגני ההיקוות ותחנות המדידה (גירסה מוגדלת וקלה יותר לקריאה של הדנדרוגרמה מופיעה בתור אחד התוצרים, ראו נספח ג'). הדגשה בכחול מציינת את האגנים ההידרולוגיים.

טבלה 2. תחנות המדידה התואמות לכל אגן, השונות המוסברת של הרגרסיה, ומקדמי הרגרסיה.

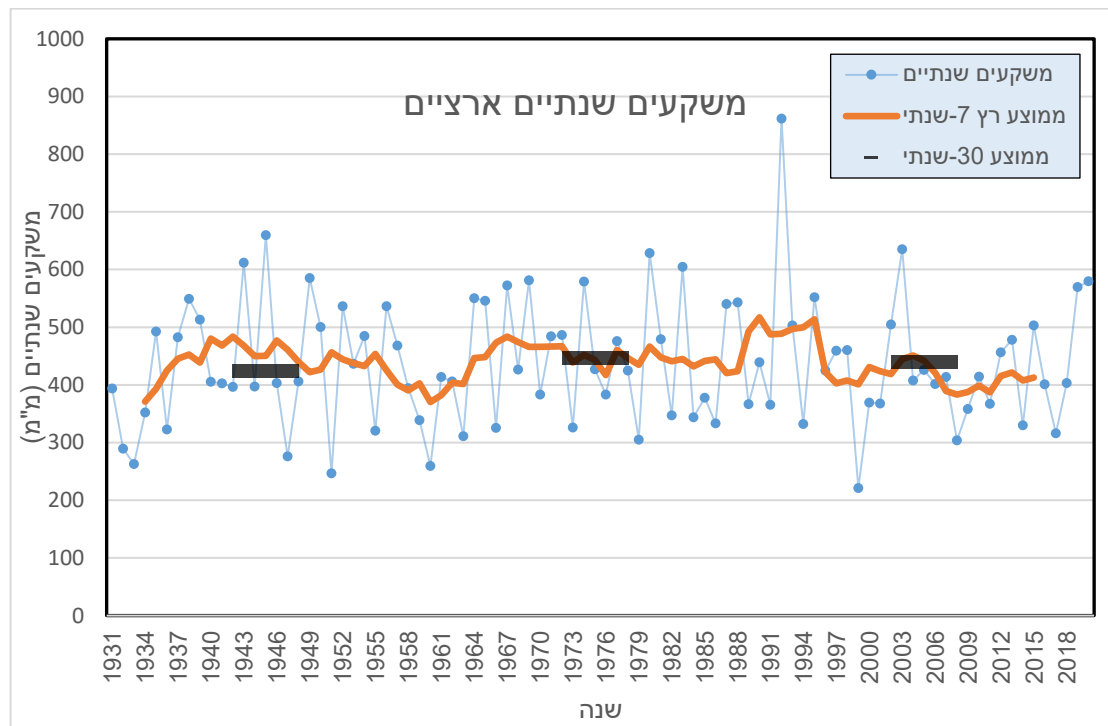
Catchment	Station/s	R ²	Coefficients
Kinneret	Ayyelet Hashahar, Parod, Zefat Har Kenaan	0.94	0.47, 0.35, 0.17
Western Galilee	Ayyelet Hashahar, Parod, Zefat Har Kenaan	0.91	0.38, 0.51, 0.13
Yartan North	En Hahores, Regavim	0.90	0.54, 0.49
Yartan Center	Beit Jimal	0.91	1.07
Yartan South	Lahav, Beer Sheva	0.88	0.82, 0.32
Jerusalem	Jerusalem Centre	0.97	1.14
North Coast	En Hahores	0.92	1.00
Center Coast	Beerot Yitzhak	0.91	0.96
South Coast	Negba	0.96	0.98

תקופת ייחוס וחלוקה של תקופת המדידה ותקופת התחזית לתתי תקופות

חלק משמעותי מהעבודה המוצגת פה, מתייחס להתפלגות המשקעים, והשינויים הצפויים בה. כדי לקבל התפלגות של משקעים בכל אגן, תקופת התחזית והמדידות המלאה חולקה ל- 5 תקופות בנות 30 שנה: 1961-1990, 1988-2017, 2021-2050, 2051-2080, 2071-2100. כיוון ש- 80 שנה (2021-2100) לא מתחלק ב- 30, ישנה חפיפה של 10 שנים בשתי תקופות התחזית המאוחרות ביותר. כמו כן, בעת ביצוע המחקר, נתונים הומוגניים היו זמינים רק עד שנת הגשם 2017, ולכן תקופת המדידות המאוחרת יותר בתצפיות היא 1988 – 2017. תקופה זו חופפת ב- 3 שנים לתקופת העבר הרחוקה יותר. כיוון ש- 3 השנים האחרונות היו גשומות יחסית ל- 3 השנים בסוף שנות ה- 80, תיתכן הטיה קלה לטובת התייבשות בבחירה זו ביחס לתקופה האחרונה, 1991 – 2020.

תקופת 1988 – 2017 היא תקופת התקן לצורך הניתוחים במסמך זה, וכל מדדי השינוי במסמך זה הינם ביחס לתקופה זו. התקופה נבחרה מכיוון שהיא מייצגת את משטר האקלים שאליו אנחנו רגילים בשנים האחרונות. עם זאת, מהשוואה שבוצעה לאחרונה בין שלוש תקופות תקן (1931 – 1960, 1961 – 1990, 1991 – 2020), נמצא כי אין הבדל משמעותי בין תקופת 1991 – 2020 לבין התקופה הארוכה 1931 – 2020, בכמות הגשם השנתית הממוצעת (ראה [דו"ח השוואת שלוש תקופות תקן סטנדרטיות בכמות גשם בישראל 1931 – 2020](#), חלפון ויוסף, 2021).

התקופה 1961 – 1990 נותנת פרספקטיבה היסטורית על השינויים שכבר התרחשו במשקעים באגנים השונים ובהתפלגותם. יש לציין כי בפרספקטיבה היסטורית רחבה אף יותר, זו הייתה תקופה גשומה יחסית, ובפרט גשומה יותר מתקופת 1931 – 1960. עם זאת, 1961 – 1990 היא תקופת התקן המוקדמת ביותר שעבורה קיימים נתונים הומוגניים במגוון רחב של תחנות. באיור 6 ניתן לראות את כמויות המשקעים השנתיות בממוצע ארצי מ- 1931 עד 2020, כולל ממוצע רץ 7-שנתי וחלוקה לבלוקים של 30 שנים. בגרף זה אפשר להתרשם מהשוונות הטבעית גם בין שנים עוקבות, וגם ברמה של עשורים ואף בתקופות בנות 30 שנה, וניתן להבחין בכך שהתקופה 1931 – 1960 היא יבשה במיוחד ביחס לתקופות שאחריה. יש לציין, כי לעיתים שינוי קל בתקופת התקן (תוספת ו/או גריעה של שנה בודדת), עשוי להשפיע על כמות הגשם הממוצעת הרב-שנתית.



איור 6. ממוצע ארצי של משקעים שנתיים מ-1931 עד 2020 (בתכלת), כולל ממוצע רץ 7-שנתי (בכתום) וממוצע ל-3 תקופות בנות 30 שנה (בשחור), התקופות הן: 1931 – 1960, 1961 – 1990, 1991 – 2020.

שיטות עבודה סטטיסטיות עם נתוני מודלים ונתוני גשם שנתיים

מרבית ניתוחי המגמות והשינויים החזויים בוצעו על פי ממוצע האנסמבל המודלים ולא על פי מודל ספציפי. סדרת הזמן של ממוצע-האנסמבל נוטה לשונות נמוכה יחסית לשונות הטבעית הקיימת בתצפיות ולשונות של סדרת הזמן של כל מודל נתון. לכן, במקומות שבהם ביצענו ניתוחים סטטיסטיים על התפלגות המשקעים לאורך תקופה (למשל, חישוב ההסתברות לשנה עם משקעים מתחת לממוצע), הניתוח הסטטיסטי בוצע עבור סדרת הזמן של כל מודל בנפרד (שהשונות בה מזכירה את שונות התצפיות), ואז חושב ממוצע של תוצאות הניתוח הסטטיסטי על המודלים.

בתוצרים הגרפיים, אנחנו מציגים לרוב לא רק את ערך ממוצע האנסמבל, אלא את פיזור התוצאות בין המודלים השונים, בצורה של בוקספלוט המציג את הערך החציוני מבין המודלים, הערך הממוצע, והטווח הבין-רבעוני (אחוזון 25 עד אחוזון 75 מקרב המודלים). פיזור תוצאות המודלים יכול לסייע באמידת אי-הוודאות של התוצאות.

מרבית מדדי השינוי בין התקופות חושבו על סמך שינויים בערך השנתי הממוצע. כיוון שהתפלגות הגשם הינה א-סימטרית, השנה הממוצעת נוטה להיות גשומה יותר מהשנה החציונית עבור אותה התקופה. מדדים המבוססים על שנה חציונית יכולים היו להביא לתוצאות שונות, לא רק בערכים הנומינליים אלא גם במגמות, אפילו עד כדי היפוך מגמה (כלומר, בעוד שהשנה הממוצעת בתקופה מסוימת צפויה להיות גשומה יותר מתקופת התקן, השנה החציונית עשויה להיות דווקא יבשה יותר, או להיפך).

מובהקות סטטיסטית של שינויים בשנה הממוצעת חושבה באמצעות מבחן Wilcoxon על אוכלוסיית 30 השנים בכל תת-תקופה.

אינדקס בצורת ורצף שנים יבשות מהממוצע

חישוב אינדקס הבצורת – SPI

כדי לקבל מדד אחיד ובר השוואה למידה שבה שנה מסוימת היא שנת בצורת או שנה גשומה בכל אגן בכל תחזית, ערכי הגשם בעבר ובעתיד הומרו לערכי SPI (Standard Precipitation Index). ה-SPI הוא מדד מקובל, המאפשר להשוות מגמות ושינויים בין אזורים שונים עם דפוסי משקעים שונים. כדי לחשב את ערך ה-SPI, יש לבחור תקופת ייחוס, שהיא התקופה שעבורה ערך של SPI השווה לאפס, נחשב לשנה ממוצעת עבור האזור. כמו בשאר הניתוחים במסמך זה, תקופת הייחוס שנבחרה היא 1988-2017. כלומר, ערך SPI שלילי החזוי לשנה מסוימת באגן מסוים מציין שהתחזית היא לכמות גשם הנמוכה מהממוצע לתקופה 1988-2017 באגן זה, בעוד שערך SPI חיובי מעיד על צפי לשנה בה כמות המשקעים גדולה מהממוצע לשנים אלו. כדי לחשב את הערך המספרי של ה-SPI, מחושבת פונקציית התפלגות המדמה בצורה המיטבית את נתוני המשקעים מתקופת הייחוס.

במסגרת העבודה הנוכחית, נבדקו שתי משפחות של פונקציות התפלגות (Pearson type III, והתפלגות Gamma), ושתי שיטות נפרדות למציאת פרמטרי ההתפלגות (השיטה הנומרית הסטנדרטית להתאמת התפלגות – Maximum Likelihood Estimation (MLE) והשיטה האנליטית – Method of Moments (MOM)). טיב ההתאמה חושב על סמך השוואה של הציון במבחן Anderson-Darling אל מול בחירות נתונים אקראיות (שיטת מונטה קרלו). בצורה כזו חושב ערך P-value, המעריך את הסיכוי לקבל את הנתונים שנמדדו אם הם לא הגיעו מההתפלגות שחושבה. כיוון שפונקציית התפלגות פירסון III עם שיטת התאמה MOM קיבלה את ציון טיב ההתאמה הטוב ביותר עבור רוב האגנים, וציונים סבירים גם עבור השאר, התקבלה החלטה להשתמש בשיטה זו לכל האגנים כדי לשמור על אחידות. טיב ההתאמה של שתי הפונקציות ושתי שיטות ההתאמה עבור כל 9 האגנים, נמצאים בנספח ב'.

חישוב ההסתברות לרצף שנים עם כמות משקעים מתחת לממוצע

לצורך ניתוח ההסתברויות לרצפים שונים של שנים עם כמות משקעים נמוכה מהממוצע באגן נתון, חושב ערך הסף לכל אגן לפי ממוצע המשקעים באותו אגן בשנים 1988-2017 (טבלה 3). בכל תקופה חושבה ההסתברות לשנה יבשה מהממוצע, על סמך מספר השנים מתוך 30 השנים שכמות המשקעים בהן הייתה מתחת לסף. לתקופות העתיד, החישוב בוצע עבור כל מודל בנפרד.

טבלה 3. ממוצע כמות הגשם השנתית בתקופת התקן 1988-2017 (מ"מ) – זהו ערך הסף לשנה בה כמות הגשם קטנה/גדולה מהממוצע בכל אחד מהאגנים ההידרולוגיים.

Catchment	Average 1988-2017 (mm)
Kinneret	564.2
Western-Galilee	609.8
Yartan-North	601.7
Yartan-Center	537.8
Yartan-South	303.5
Jerusalem	587.4
Coast-North	566.5
Coast-Center	544.6
Coast-South	482.3

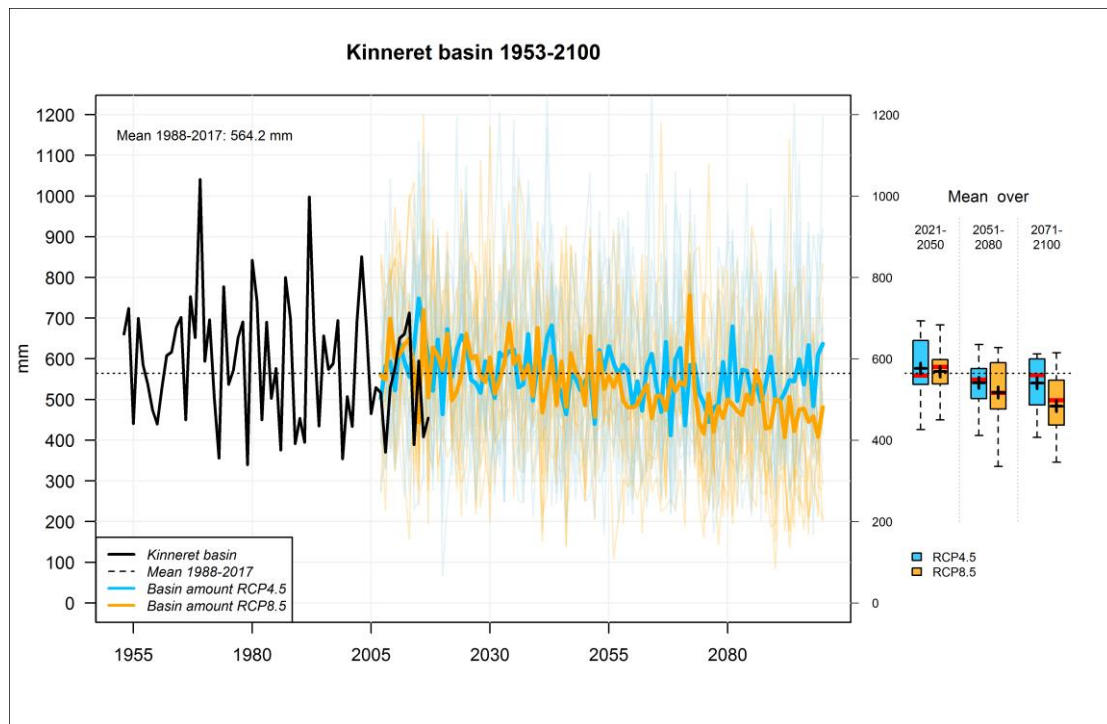
בשלב הבא, חושבה ההסתברות לרצף של שנים יבשות מהממוצע באותה תקופה של 30 שנה על ידי הגרלת 10,000 רצפים אקראיים של 30 שנים, שכל אחת מהן היא שנה יבשה מהממוצע בהסתברות הנתונה (שיטת מונטה קרלו). התוצאות עבור רצפים של 5, 7 ו-10 שנים יבשות מהממוצע הוכנסו לטבלאות מרכזות. כמו כן, חושבו הסתברויות עבור כל רצף באורך מ-3 עד 15 שנים רצופות מתחת לממוצע. עבור תקופות העתיד, חושבה ההסתברות לרצף שנים יבשות עבור כל מודל, וכן ההסתברות הממוצעת על סמך כל המודלים וההסתברות שנופלת באחוזון ה-25 וה-75 בין כל תוצאות המודלים.

דוגמאות לתוצרי עבודה זו

עבודה זו מכילה כמות גדולה מאוד של ניתוחים המסודרים בטבלאות ובגרפים המכילים מידע על השינויים החזויים במדדים המבוקשים. כמו כן, חישוב המדדים בוצע עבור כל אחד מ-9 האגנים לתקופת העבר ולשני תרחישים שונים עבור העתיד. בחלק זה של הדו"ח נציג מספר דוגמאות מתוך הניתוחים השונים.

תחזית המשקעים לאגנים השונים

באיור 7 רואים דוגמה לתחזית שינוי בכמות המשקעים לאגן כנרת מ-1952/3 עד שנת 2100. תוצאות המודלים הבודדים מוצגות לצד ממוצע האנסמבל, ואל מול תוצאות העבר. ניתן להתרשם מהשונויות הנמוכה יחסית של תחזית ממוצע האנסמבל, הן ביחס למדידות והן ביחס למודלים הבודדים. בצד ימין של התרשים, ניתן לראות את פיזור תחזית המודלים לשנת משקעים ממוצעת בתקופות בנות 30 שנה, ובפרט ניתן לראות את ההבדל בין תחזית המבוססת על ממוצע האנסמבל לתחזית המבוססת על חציון תוצאות האנסמבל.



איור 7. השינויים בכמות המשקעים (מ"מ) המדודים והחזויים באגן כנרת מ-1953 עד 2100, ביחס לתקופה 1988-2017 (קו שחור מקווקו). ערך אגני מבוסס על תצפיות (בשחור), ממוצע האנסמבל עבור תרחיש RCP4.5 (בתכלת בולט), ממוצע האנסמבל עבור תרחיש RCP8.5 (בכתום בולט). קווים דקים מציינים את תוצאות המודלים השונים בהתאם לתרחישים RCP4.5 (בתכלת) ו-RCP8.5 (בכתום). תרשימי הקופסה מימין (boxplots) מתארים את התפלגות תחזית המודלים השונים לשנה ממוצעת בכל תרחיש, לתקופה 2021 - 2050, 2051 - 2080 ו- 2071 - 2100. חציון ההתפלגות מצוין בקו אופקי אדום ופלוס (+) שחור מצוין את הממוצע. גבולות המלבן הם אחוזון 25 ו- 75 של פיזור המודלים.

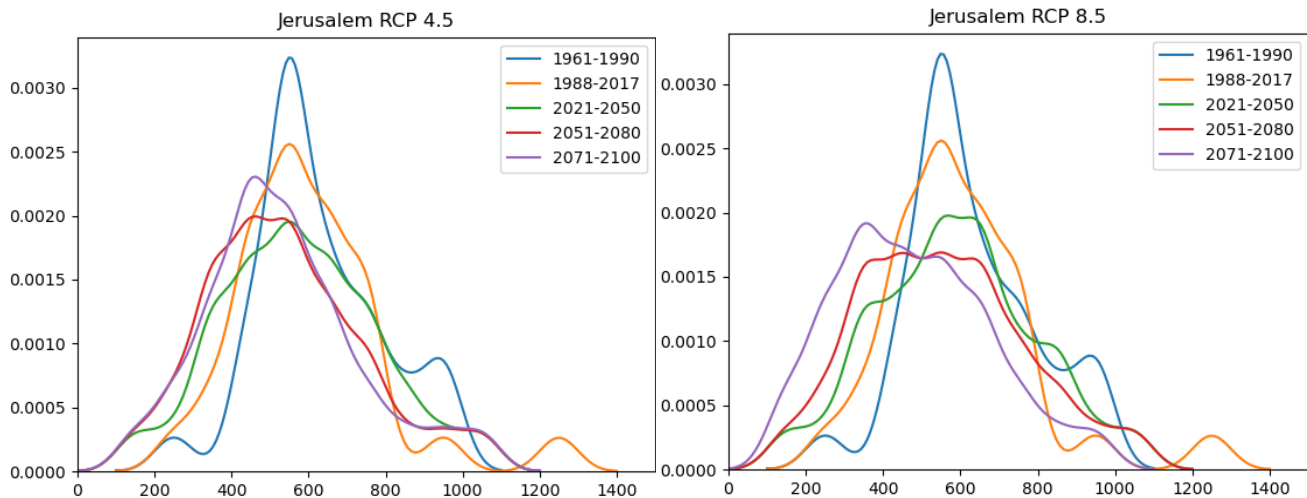
בתרחיש RCP4.5, ממוצע המשקעים באגן זה יורד בצורה מובהקת בתקופה 2051-2080 ביחס לשתי התקופות שקדמו לה ונשאר די דומה עד לסוף המאה. לעומת זאת, בתרחיש RCP8.5 ניתן לראות כי רוב המודלים צופים ירידה משמעותית יותר במשקעים בחצי השני של המאה והמשך ירידה מובהקת נוספת עד סופה. את התחזית לפי המודלים השונים לשנת משקעים ממוצעים לשלוש התקופות ניתן לראות גם בטבלאות, לדוגמה טבלה 4.

טבלה 4. פיזור התחזית לממוצע כמות הגשם (מ"מ) הרב-שנתי, באגן כנרת, בשלוש תקופות: 2050-2021, 2080-2051 ו- 2071-2100, בחלוקה לשני תרחישים (אלו התוצאות שעליהן מתבססים תרשימי הקופסה מאיור 7). ממוצע הגשם עבור תקופת הייחוס 1988-2017, הוא 564 מ"מ.

2071-2100		2051-2080		2021-2050		מספר מודל
RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	
522	531	500	574	508	627	1
437	452	477	495	540	518	2
350	486	477	509	542	513	3
346	407	335	411	450	426	4
548	594	606	555	615	671	5
391	502	477	515	588	557	6
495	612	534	574	595	560	7
615	584	590	611	571	646	8
608	581	628	635	620	645	9
555	600	598	579	683	693	10
501	469	521	499	538	537	11
440	538	513	502	598	543	12
525	606	519	542	591	595	13
443	601	465	576	521	537	14
484	540	517	541	569	576	ממוצע
498	559	516	549	580	559	חציון

התפלגות המשקעים

איור 8 מתאר את התפלגות כמות המשקעים בעבר ובעתיד עבור שני התרחישים באגן ירושלים. סה"כ הופקו 18 תרשימים כאלו (9 אגנים $2 \times X$ תרחישים). באיור זה, ניתן למשל לראות שבתרחיש הפסימי (RCP 8.5), הערך השכיח ביותר למשקעים באגן ירושלים יורד מכ-600 מ"מ בתקופה 1988 – 2017, לפחות מ-400 מ"מ בתקופה 2071-2100. לפי התרחיש האופטימי יותר (RCP 4.5), הערך השכיח בתקופה המאוחרת עומד על כ-450 מ"מ. ניתן לראות כי גם צורת ההתפלגות צפויה להשתנות ובסוף המאה ההתפלגות מאופיינת בשונות גדולה יותר. כדי לחשב התפלגויות אלו, תחילה חושבה השכיחות של כל טווח משקעים בן 100 מ"מ לכל מודל בנפרד, ואז בוצע ממוצע בין השכיחויות כדי לקבל ערך ממוצע אנסמבל שלא סובל מבעית השונות המופחתת המאפיינת את ממוצע-האנסמבל.



איור 8. התפלגות המשקעים המדודה והחזויה באגן ירושלים לאורך חמש תקופות בנות 30 שנה. מימין עם תחזית לפי תרחיש RCP 8.5 ומשמאל לפי תרחיש RCP 4.5. כל התחזיות מבוססות על ממוצע האנסמבל (בטווחים קבועים של 100 מ"מ).

ההסתברות לרצף שנים עם כמות משקעים מתחת לממוצע

טבלה 5 מציגה דוגמה לסיכום נתוני ההסתברות לרצף של חמש שנים יבשות מהממוצע 1988-2017, באגן חוף מרכז. טבלאות דומות הוכנו עבור רצפים (5, 7, 10) ושאר האגנים. ניתן לראות, כי למשל לרצף של 5 שנים יבשות רצופות, לאורך תקופה של 30 שנה באגן זה, היתה סבירות של 73% בתקופה (1988 - 2017), ורצף כזה אכן התקיים בשנים 1996 - 2000. בתרחיש RCP4.5 הסבירות למאורע כזה יורדת לכדי 57% בתקופה 2021 - 2050 וחוזרת ל- 71% בחצי השני של המאה. בתסריט הפסימי של RCP8.5 הירידה במשקעים בסוף המאה משמעותית יותר ולפיכך הסיכוי לרצף שנים נמוך מהממוצע 1988-2017 גדול יותר ומגיע ל- 79% בחצי השני של המאה. לכל ערך ההסתברות המחושב לפי ממוצע האנסמבל (בעמודה עם הכותרת mean), יש שני ערכים סמוכים המציינים את האחוזון ה- 25 והאחוזון ה- 75 מקרב המודלים, והסיכוי לרצף שנים יבשות מהממוצע לפיהם, כך למשל, בעוד ממוצע האנסמבל צופה כי קיימת הסתברות של 71% לרצף של 5 שנים יבשות מהממוצע 1988-2017 בתקופה 2051-2080, בתרחיש RCP 4.5, 75% מהמודלים צופים הסתברות של 55% או יותר לרצף של 5 שנים יבשות מהממוצע ו- 25% מהמודלים צופים הסתברות של 91% או יותר לרצף כזה.

איור 9 מציג את ההסתברות לרצף של 5 שנים בהן כמות הגשם היתה ו/או צפויה להיות מתחת לממוצע של התקופה 1988-2017, ל-5 תקופות, בכל האגנים, תחת שני התרחישים (RCP4.5 ב- 9א' ו- RCP8.5 ב- 9ב'). בדומה לטבלה 5, הופקו גרפים כאלו לרצפים של 5, 7 ו- 10 שנים, תחת שני התרחישים. בשונה מטבלה 5, הערך האמצעי באיור 9 הוא החציון מבין המודלים, ולא הממוצע (ensemble median). כפי שניתן לראות, עד אמצע המאה לא ניתן לזהות בצורה חד משמעית דפוס ארצי של שינוי בהסתברות ביחס להסתברות ב- 30 השנה האחרונות. כך למשל בתרחיש RCP8.5 יש ירידה בהסתברות לרצף של 5 שנים יבשות מהממוצע בחוף-מרכז, חוף-צפון ואגנים אחרים, בעוד

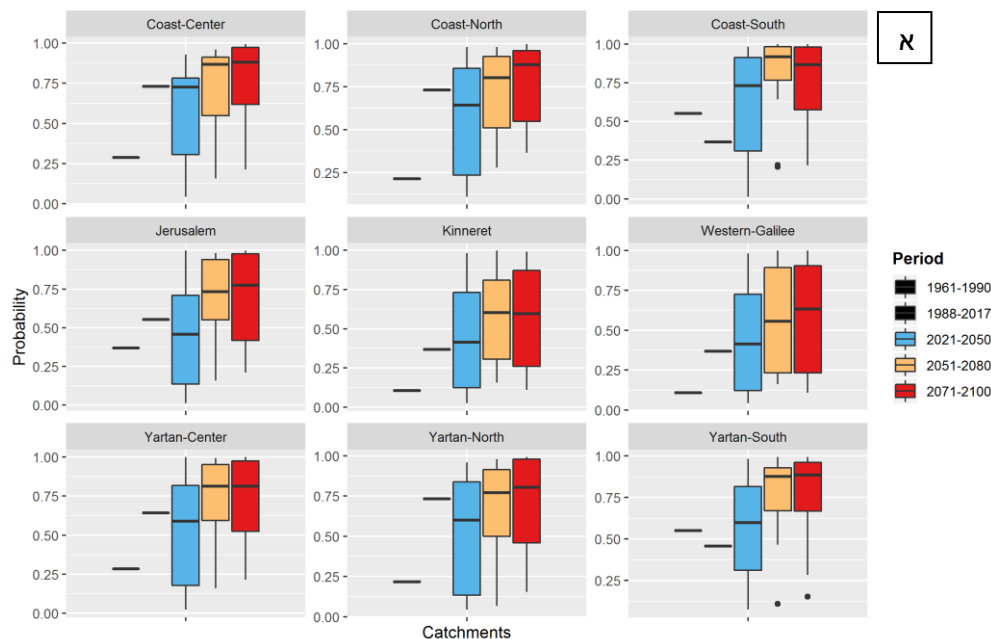
שיש עלייה בהסתברות לרצף כזה בירת"ן-דרום וחוף-דרום. לעומת זאת, בחצי השני של המאה ניתן לראות עליה בהסתברות לרצף שנים יבשות ממוצע תקופת הייחוס בכל האגנים בשני התרחישים, גם אם לא בהכרח בכל המודלים (למשל בירת"ן-צפון ב- RCP 4.5, חציון המודלים נמצא מעט מעל הערך של 1988 – 2017, המשמעות היא שכמעט חצי מהמודלים חוזים ירידה בהסתברות לרצף שנים יבשות מהממוצע). כיוון שההשוואה היא תמיד ביחס לשנה ממוצעת בתקופת הייחוס, חשוב לציין שהגורם המרכזי לעלייה בסבירות של רצף שנים יבשות הוא המגמה הכללית של פחיתה בממוצעי הגשם.

טבלה 5. הסתברות לרצף של 5 שנים מתחת לממוצע באגן חוף מרכז בתקופה 1988-2017, בחלוקה לשני תרחישים. הערכים לשתי תקופות העבר (1961 – 1990 ו- 1988 – 2017) מבוססים על התצפיות בלבד, ולכן אין בהם אחוזונים. האחוזונים בתקופות העתיד מבוססים על התפלגות תוצאות המודלים.

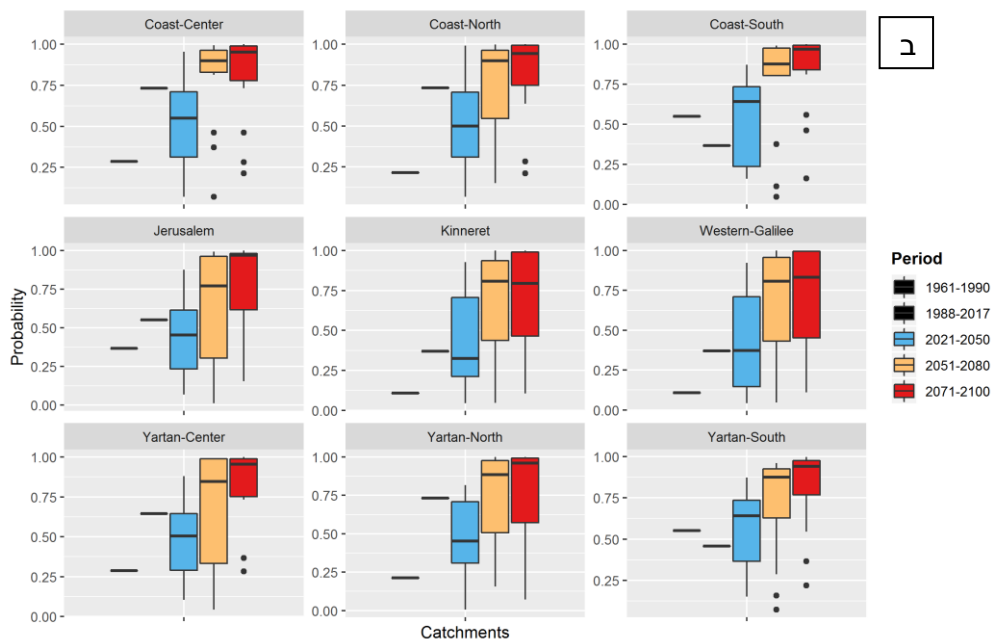
Probability for 5 consecutive years below the average

	Coast-Center RCP 4.5			Coast-Center RCP 8.5		
	25th Percentile	mean	75th Percentile	25th Percentile	mean	75th Percentile
1961-1990		0.29			0.29	
1988-2017		0.73			0.73	
2021-2050	0.31	0.57	0.78	0.31	0.53	0.71
2051-2080	0.55	0.71	0.91	0.83	0.79	0.96
2071-2100	0.62	0.79	0.97	0.78	0.81	0.99

Probability of 5 consecutive years below the average (1988-2017) - RCP4.5



Probability of 5 consecutive years below the average (1988-2017) - RCP8.5

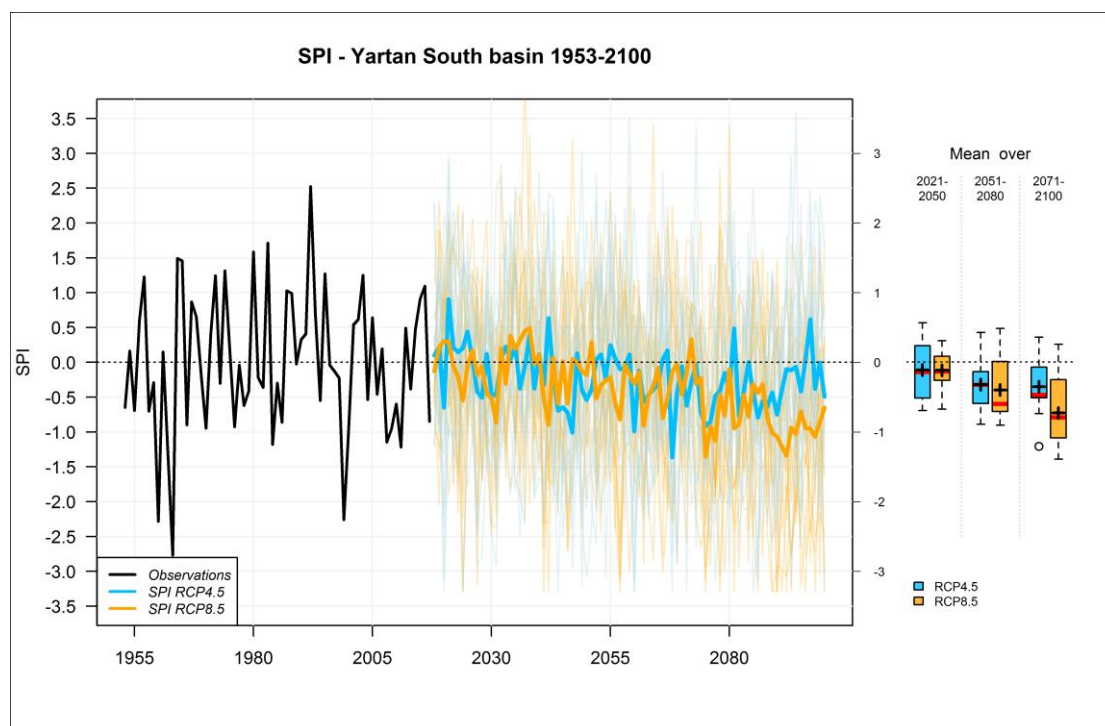


איור 9. ההסתברות לרצף של חמש שנים בהן כמות המשקעים היתה או תהיה מתחת לממוצע של תקופת התקן, באגנים השונים בחלוקה לחמש תקופות. קו שחור אופקי בודד (ללא תרשים קופסה) מייצג את ההסתברות על-בסיס התצפיות לתקופות העבר - 1961-1990 ו- 1988-2017. תרשימי קופסה בצבע כחול, כתום ואדום מציגים את התפלגות תוצאות המודלים בתקופות 2021-2050, 2051-2080 ו- 2071-2100, בהתאמה, עבור תרחיש RCP4.5 (איור 9א') ועבור תרחיש RCP8.5 (איור 9ב'). הקו האופקי השחור בתרשימי הקופסה מציין את חציון ההתפלגות (את ממוצע ההתפלגות עבור אגן חוף מרכז אפשר לראות בטבלה 5. הממוצעים האחרים קיימים בטבלאות דומות בתוצרים).

תחזית ה-SPI

איור 10 מציג דוגמה לשינויים באינדקס ה-SPI לאגן ירת"ן דרום משנת 1952/3 עד שנת 2100. כמו באיור 7, ממוצע האנסמבל מוצג על רקע פיזור המודלים השונים, ולצד נתוני התצפיות.

יש לציין כי ברמת האגן הבודד, התחזית ל-SPI נותנת מידע דומה מאד לתחזית המשקעים עצמה, ביחידות שונות.



איור 10. כמו איור 7, עבור אינדקס SPI על סמך מדידות ועל סמך מודלים באגן ירת"ן דרום מ-1953 עד 2100. תקופת הייחוס היא 1988 – 2017.

דרך נוספות להסתכל על מדד ה-SPI הינה התמקדות בסבירות או בשכיחות החזויה עבור מחלקות ספציפיות של SPI. בעבודה זו בחנו את ההשתנות בזמן של טווחי SPI הבאים:

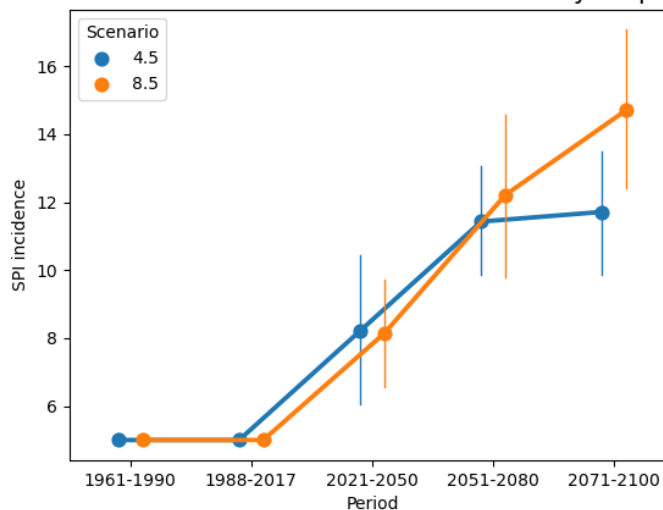
-1.0, < בצורת

-1.5, < בצורת קשה עד קיצונית

-2.5, < בצורת קיצונית

איור 11 מתאר דוגמה לשינוי בקטגוריה בצורת, -1.0, < עבור חמש התקופות.

Coast-North incidence of SPI ≤ -1.0 in 30 year period



איור 11. ההשתנות בשכיחות בצורת (שנים עם SPI מתחת ל-1.0), ב-5 תתי-תקופות, עבור שני תרחישים, RCP4.5 (כחול) ו-RCP8.5 (כתום) באגן חוף צפון. קווים אנכיים מציינים את פיזור תוצאות המודלים (בין אחוזון 25 ל-75). הערכים הם מספר שנים מתוך תקופות בנות 30 שנה כל אחת.

כפי שניתן לראות, השכיחות של שנות בצורת באגן זה צפויה לעלות במעט כבר בתקופה הקרובה. לקראת סוף המאה רואים את הפיצול האופייני בין שני התרחישים, כאשר לפי תרחיש RCP 8.5 השכיחות של בצורת תמשיך לעלות, בעוד לפי RCP 4.5 שכיחות הבצורת מתייצבת על כ-12 שנים מתוך 30.

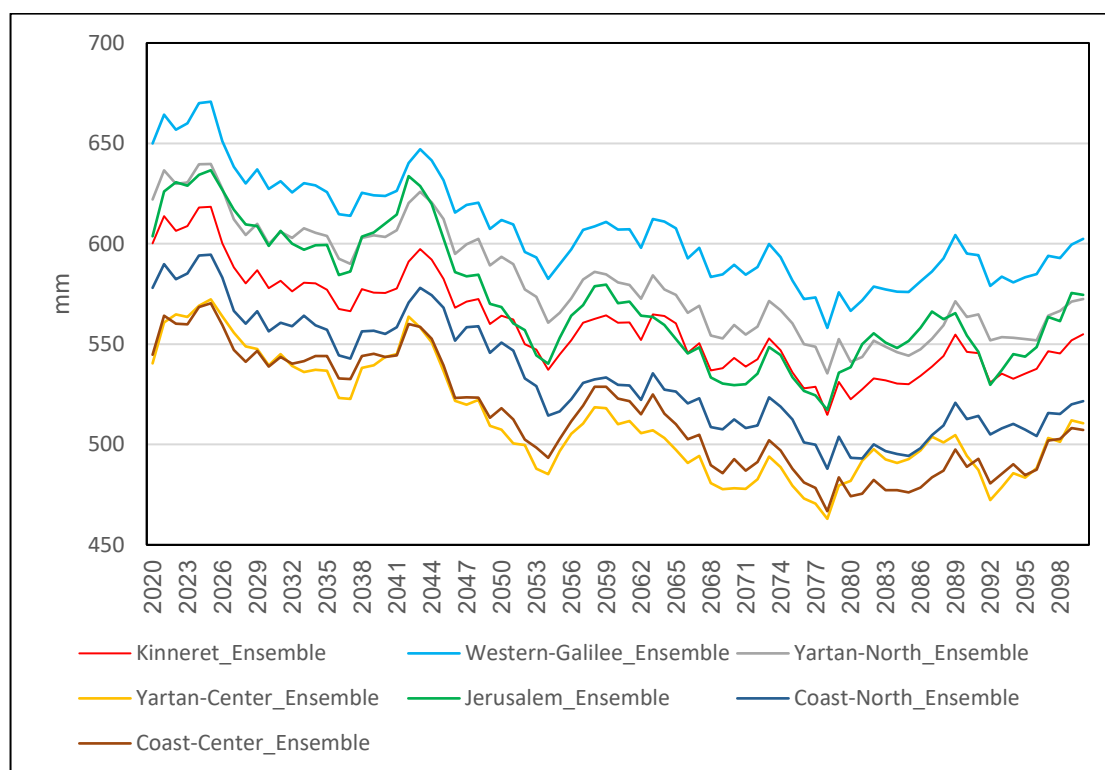
ניתוח מגמות אקלימיות ארוכות טווח במשטר המשקעים

מגמות משקעים רציפות לאורך המאה

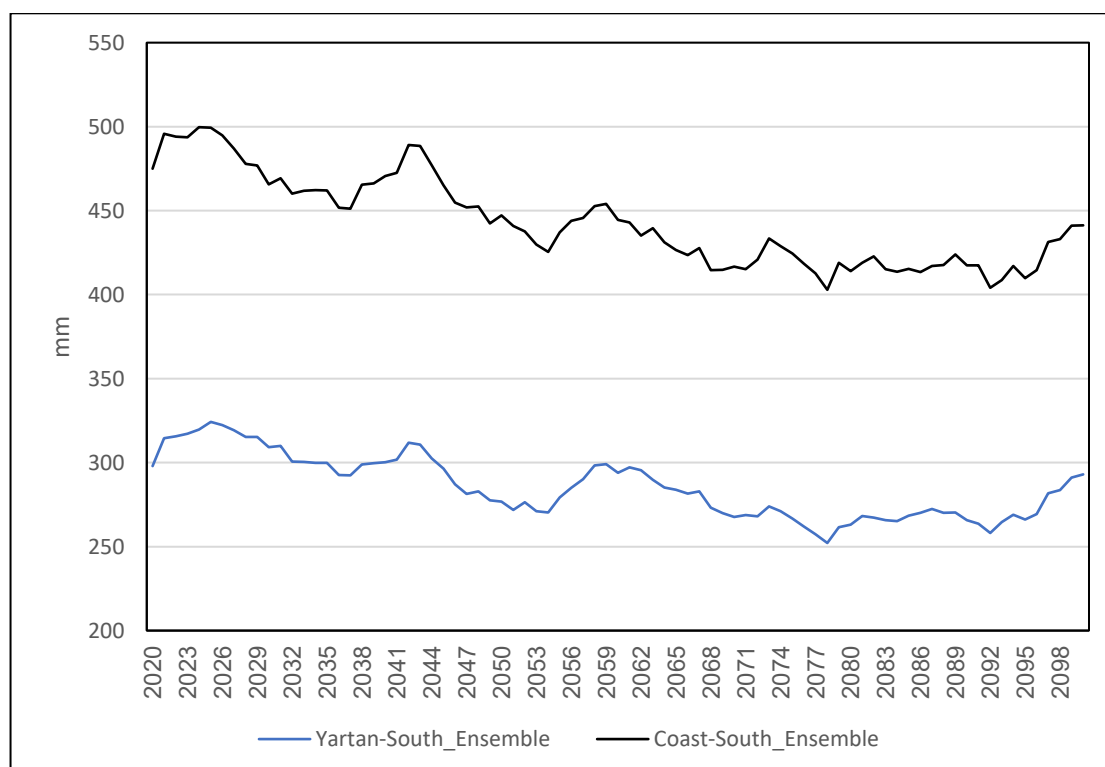
המגמות בכמות הגשם השנתית בכל אגן, על בסיס ממוצע-האנסמבל, לתרחיש RCP4.5 מתוארות באיורים 12א' ו- 12ב' ועבור תרחיש RCP8.5 מתוארות באיורים 13א' ו- 13ב'. בשני התרחישים התחזית היא להפחתה כללית בכמויות הגשם בתקופה 2020-2100. על פי תרחיש RCP4.5 חזויה הפחתה של כ-10% בממוצע באגנים השונים בין 2020 לבין סוף המאה. על פי תרחיש RCP8.5 צפויה הפחתה משמעותית יותר בשיעור ממוצע של כ-24%. תחת תרחיש RCP8.5 כמויות הגשם צפויות לרדת בעקביות לאורך כל התקופה, בעוד בתרחיש המתון יחסית RCP4.5 הירידות צפויה להתמתן בחצי השני של המאה ונראה כי לקראת סוף המאה אף מתחילה להסתמן עליה קלה.

מבחינת הפיזור המרחבי, ניתן לראות כי הירידה במשקעים באגנים הצפוניים תהיה מתונה יותר מאשר באגנים הדרומיים, אך נראה כי המודלים לא מצליחים להבדיל בין האגנים המערביים למזרחיים (גליל מערבי מפגין התנהגות דומה לאגן כנרת, חוף מרכז וירת"ן מרכז מראים התנהגות דומה וכו').

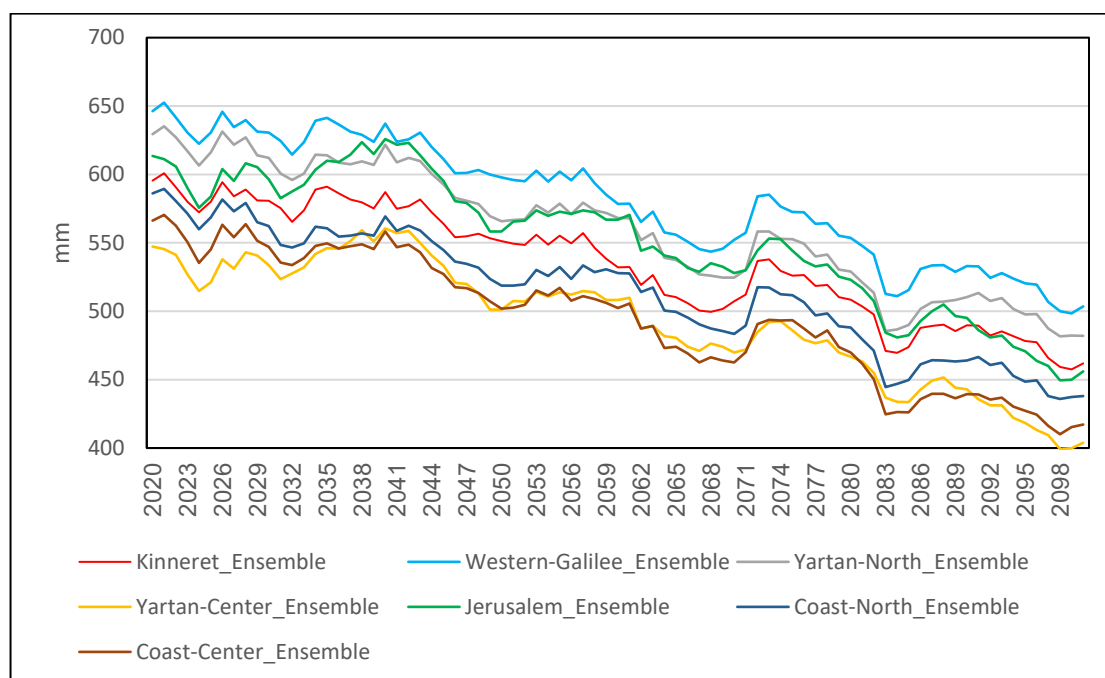
שימו לב כי על מנת שאפשר יהיה לראות את ההבדל בין האגנים השונים, וכיוון שהשינויים קטנים למדי ביחס לערך הנומינאלי, הציר האנכי מתחיל מערך של 450 מ"מ באגנים הצפוניים ומערך של 200 מ"מ באגנים הדרומיים.



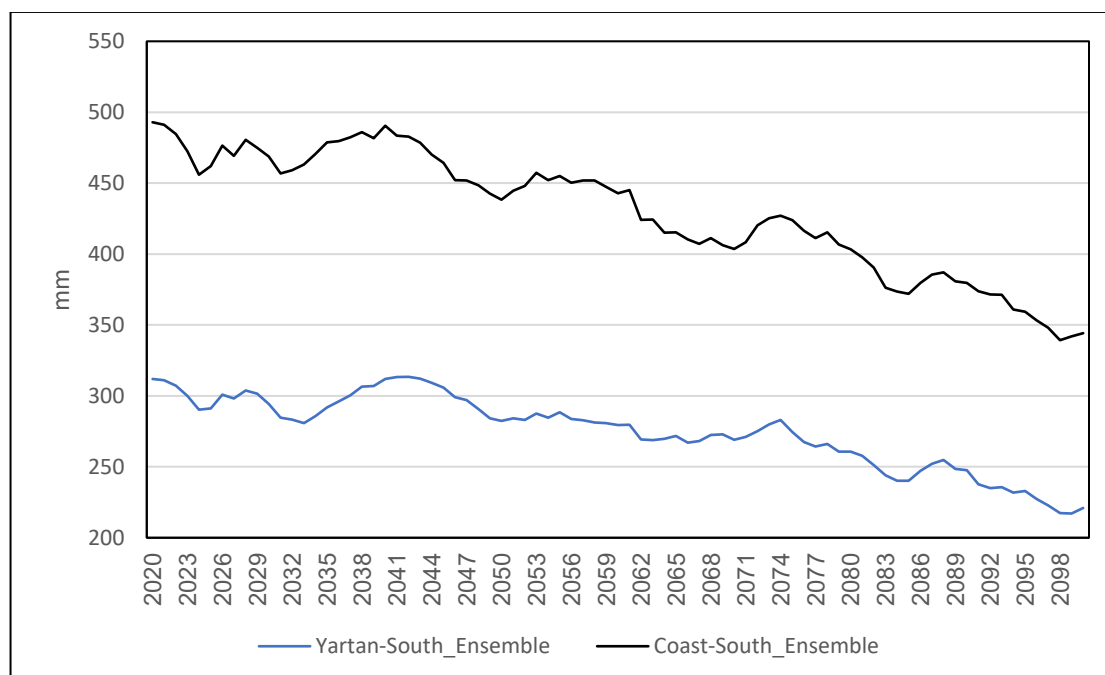
איור 12א'. השינוי הצפוי באגנים הצפוניים על בסיס ממוצע-האנסמבל, בתקופה 2020-2100 תחת תרחיש RCP4.5. ממוצע נע ל-11 שנים.



איור 12ב'. השינוי הצפוי באגנים הדרומיים על בסיס ממוצע-האנסמבל, בתקופה 2020-2100 תחת תרחיש RCP4.5. ממוצע נע ל-11 שנים.



איור 13א'. השינוי הצפוי באגנים הצפוניים על בסיס ממוצע-האנסמבל, בתקופה 2020-2100 תחת תרחיש RCP8.5. ממוצע נע ל-11 שנים.



איור 13ב'. השינוי הצפוי באגנים הדרומיים על בסיס ממוצע-האנסמבל, בתקופה 2020-2100 תחת תרחיש RCP8.5. ממוצע נע ל-11 שנים.

מיפוי המגמות האקלימיות בחלוקה לתקופות

איור 14 מציג את השינוי החזוי באחוזים של ממוצע המשקעים ל-30 שנה, בשלוש תקופות: 2021 - 2050, 2051 - 2080 ו-2071 - 2100, ביחס לתקופת הייחוס 1988 - 2017 על מפה. בטבלה 6 מופיע ערך הגשם של שנה ממוצעת לכל תקופה חזויה (לפי ממוצע אנסמבל המודלים, במ"מ). בסוגריים מופיע השינוי ביחס לשנה ממוצעת בתקופה העוקבת הקודמת (מ"מ). ערכים מודגשים (bold) מציינים הבדל מובהק סטטיסטית ביחס לתקופה העוקבת הקודמת ברמת ודאות של $P \leq 0.1$ (על פי מבחן Wilcoxon).

ניתן לראות שבתקופה הקרובה, 2021 - 2050, לא צפוי שינוי מובהק ביחס ל-30 השנה האחרונות. בתקופה של 2051 - 2080 צפויה ירידה מובהקת בכמות המשקעים ביחס לתקופה שלפניה בכל האגנים ובשני התרחישים, ובתקופה האחרונה, לקראת סוף המאה, יש הבדל דרמטי בין שני התרחישים. לפי RCP 4.5, המשקעים מתייצבים לקראת סוף המאה ואין כמעט הבדל בין אמצע התקופה לסופה, בעוד שלפי RCP 8.5 מגמת הירידה ממשיכה וקיים הבדל מובהק בין שתי התקופות האחרונות.

טבלה 6. כמות המשקעים השנתית (מ"מ) בשנה ממוצעת תחת תרחיש RCP4.5 ו-RCP8.5 לפי ממוצע האנסמבל בתקופות החזויות. בסוגריים – השינוי במ"מ ביחס לתקופה העוקבת הקודמת. בהדגשה – שינוי מובהק סטטיסטית ($P \leq 0.1$) ביחס לתקופה עוקבת קודמת.

2071-2100		2051-2080		2021-2050		Basin / RCP
RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	
484 (-33)	541 (0)	517 (-51)	541 (-35)	569 (+4)	576 (+12)	Kinneret
527 (-36)	588 (+1)	563 (-54)	587 (-38)	617 (+7)	625 (+15)	Western-Galilee
506 (-36)	559 (0)	541 (-53)	559 (-44)	595 (-7)	603 (+2)	Yartan-North
437 (-46)	496 (+5)	483 (-48)	492 (-43)	531 (-7)	534 (-4)	Yartan-Center
241 (-28)	274 (-2)	270 (-26)	276 (-21)	296 (-8)	297 (-6)	Yartan-South
490 (-51)	557 (+9)	540 (-52)	548 (-49)	592 (+5)	597 (+10)	Jerusalem
462 (-38)	510 (0)	500 (-44)	510 (-47)	544 (-22)	557 (-9)	Coast-North
441 (-39)	491 (-4)	479 (-52)	495 (-41)	531 (-13)	536 (-9)	Coast-Center
375 (-43)	424 (0)	418 (-46)	425 (-39)	463 (-19)	464 (-18)	Coast-South

2021-2050

2051-2080

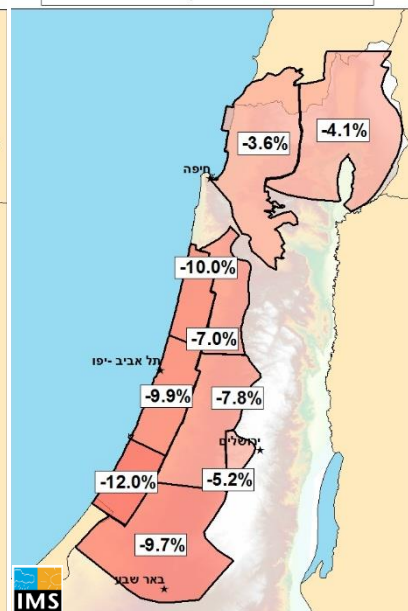
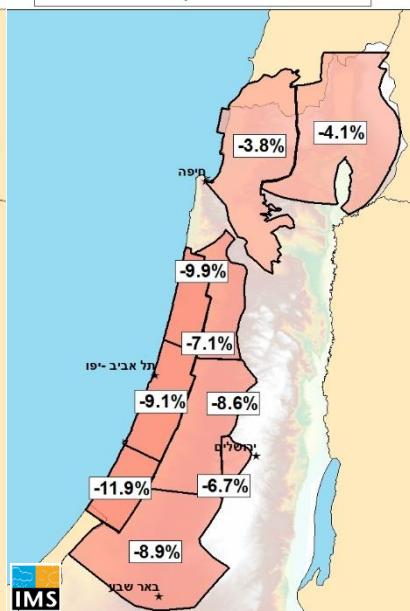
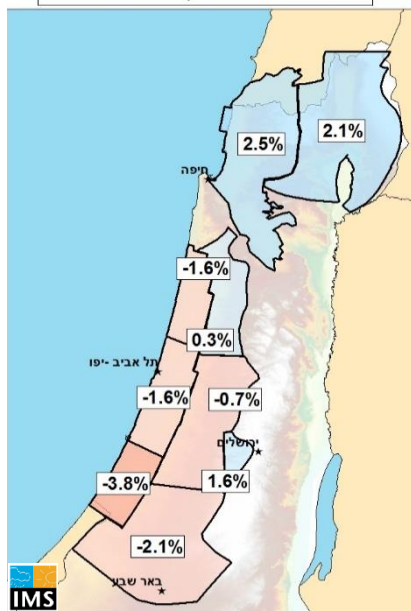
2071-2100

% Change in Rainfall under RCP 4.5
2021-2050 compared to 1988-2017

% Change in Rainfall under RCP 4.5
2051-2080 compared to 1988-2017

% Change in Rainfall under RCP 4.5
2071-2100 compared to 1988-2017

RCP4.5

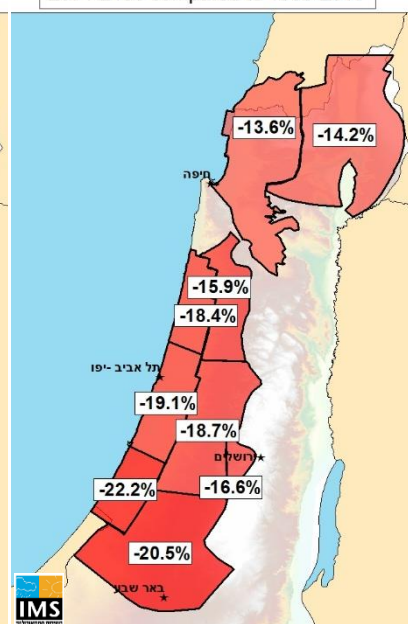
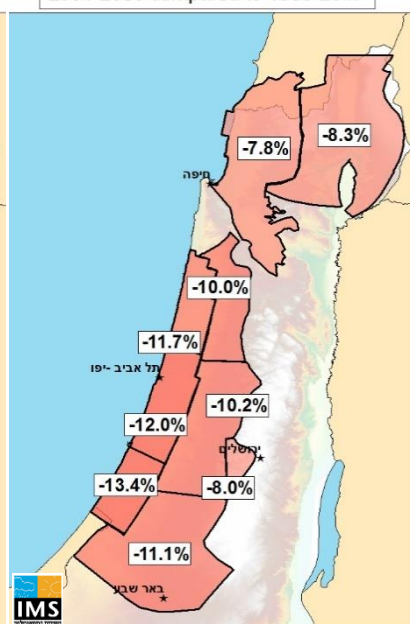
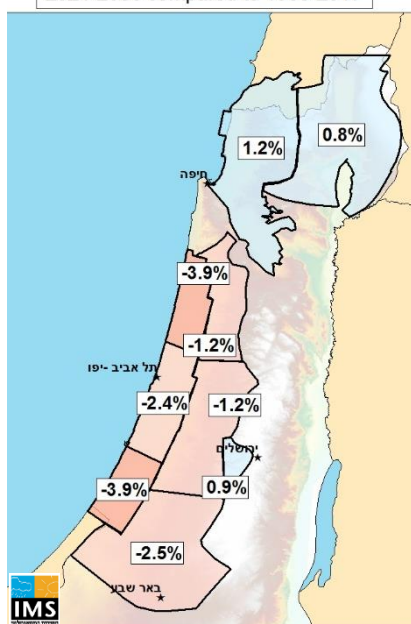


% Change in Rainfall under RCP 8.5
2021-2050 compared to 1988-2017

% Change in Rainfall under RCP 8.5
2051-2080 compared to 1988-2017

% Change in Rainfall under RCP 8.5
2071-2100 compared to 1988-2017

RCP8.5



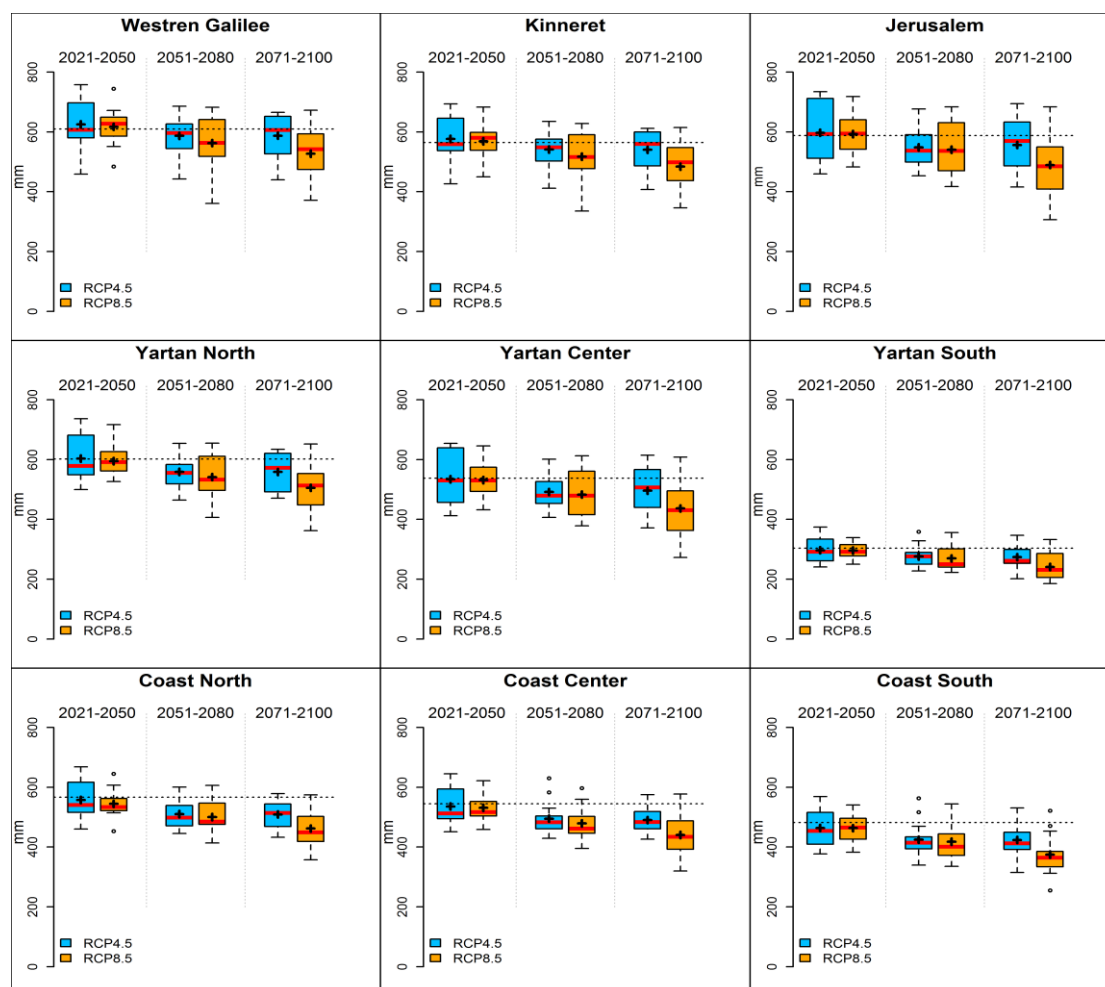
איור 14. השינויים החזויים במשקעים בשנה ממוצעת (באחוזים) בכל אגן, ביחס לתקופה 1988-2017. פאנלים עליונים עבור תרחיש RCP4.5 ופאנלים תחתונים עבור RCP8.5, בחלוקה לשלוש תתי-תקופות: 2021-2050, 2051-2080 ו-2071-2100.

פיזור המודלים סביב הממוצעים התקופתיים

איור 15 מציג את פיזור תוצאות המודלים השונים סביב הערכים הממוצעים המוצגים בטבלה 6. איור זה מאפשר להעריך את אי הוודאות של ממוצע-האנסמבל בכל האגנים ביחס לתקופה 1988-2017 וכן מאפשר השוואה של כל תקופות העתיד יחד.

לדוגמה עבור אגן גליל-מערבי (פאנל שמאלי עליון), תחת תרחיש RCP4.5, ניתן לראות שהערך החציוני מאוד דומה לממוצע 2017-1988. המשמעות היא שחצי מהמודלים נתנו תוצאה שווה או קטנה מערך זה ולכן אין מודבר בשינוי מובהק בו מרבית המודלים מתכנסים לכיוון אחד. שונה הדבר עבור התקופה 2071-2100, תחת תרחיש RCP8.5, בו יותר מ-75% מתוצאות המודלים מראות ירידה ביחס לממוצע תקופת הייחוס. הדבר אופייני לסוף המאה תחת תרחיש זה בכל האגנים.

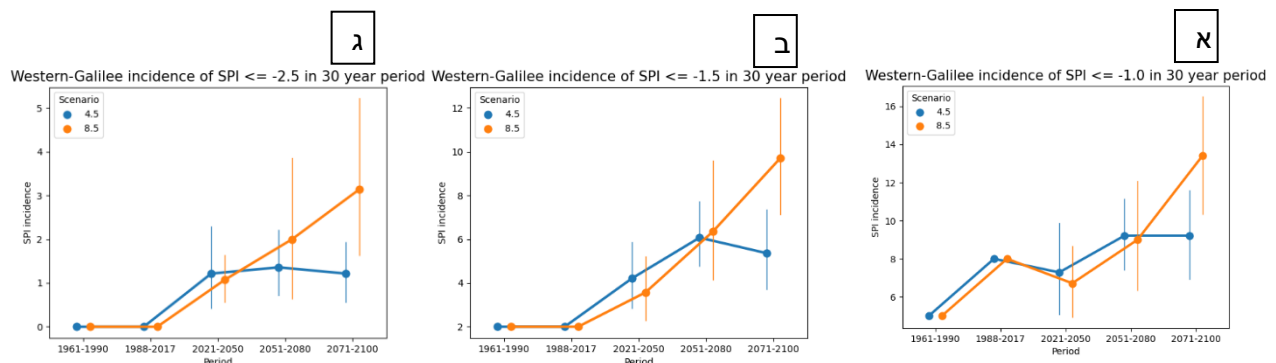
למרות שבהשוואת התקופה 2017-1988 מול 2021-2050 לא נמצא הבדל המובהק סטטיסטית, בחינת סדרות הזמן דוגמת איור 7, 12 ו-13, מראה שלקראת סוף שנות ה-30 של המאה הנוכחית מתחילה מגמת הפחתה כללית בכמויות המשקעים ביחס ל- 2017-1988. נטייה זו להפחתה מעט "מטשטשת" כאשר מסתכלים על ממוצע התקופה 2050-2021.



איור 15. פיזור תוצאות המודלים, בכל האגנים, בשלוש תקופות: 2021-2050, 2051-2080 ו- 2071-2100. תרחיש RCP4.5 (תכלת), תרחיש RCP8.5 (כתום). ביחס לממוצע התקופה 1988-2017 (קו שחור אופקי מקווקו). חציון ההתפלגות מצוין בקו אופקי אדום וממוצע ההתפלגות מצוין בפלוס (+) שחור. גבולות המלבן הם אחוזון 25 ו- 75 של התפלגות המודלים.

תחזית לקטגוריות SPI השונות

איור 16 מתאר את השכיחות בכל תקופה של שלוש קטגוריות SPI: בצורת (א'), בצורת קשה עד קיצונית (ב') ובצורת קיצונית (ג'), באגן גליל מערבי. ניתן לראות שהשכיחות של בצורת מסוג כלשהו (15א') עלתה במעט בין התקופה 1961 – 1990 לתקופת הייחוס (1988-2017), אבל צפויה להישאר קבועה יחסית עד אמצע המאה בשני התרחישים. מאמצע המאה צפויה עלייה בשכיחות של בצורת, שתלך ותתגבר עד סוף המאה לפי תרחיש RCP 8.5 אבל תישאר מתונה יחסית לפי תרחיש RCP 4.5. עבור קטגוריית הבצורת הקשה ומעלה (15ב'), צפויה עלייה בתדירותה כבר בתקופה הקרובה, שתלך ותחריף עד התקופה של 2051 – 2080, ולפי תרחיש RCP 8.5 אף עד סוף המאה (בממוצע שליש מהשנים צפויות להיות מסדר גודל זה ומעלה בתקופה 2071-2100). לבסוף בקטגוריית של בצורת קיצונית (15ג'), אנחנו רואים כי בעוד שב-60 השנים האחרונות לא היתה באגן זה אף שנה כזו, כבר החל מהתקופה הקרובה 2021-2050, המודלים צופים התכונות לבצורת כזו בהסתברות של 1:30 (כ-3.33%). יש לציין כאן כי מהידוע לנו על אקלים ארץ ישראל בשנות ה-20-30 של המאה הקודמת, בצורות ברמת קיצוניות כזו התרחשו אז באגן זה (ראו איור 6 לפרספקטיבה רחבה יותר). לפי תרחיש RCP 8.5 ההסתברות של בצורות קיצוניות תלך ותעלה בהמשך המאה עד לרמה של כ-3 שנות בצורת קיצונית ב-30 שנה בתקופה של 2071 – 2100, בעוד תרחיש RCP 4.5 צופה התייצבות בהסתברות הבצורת הקיצונית על 1 ל-30 שנה. המגמות הכלליות הללו הן די אופייניות לכלל האגנים – שינוי קטן בתקופה הקרובה, בעיקר בבצורות קשות וקיצוניות, ושינוי משמעותי יותר בתקופה 2051 – 2080, בכל סוגי הבצורת. לקראת סוף המאה התייצבות בשכיחות של כל סוגי הבצורת לפי תרחיש RCP 4.5 והמשך עלייה בשכיחות של כל סוגי הבצורת לפי תרחיש RCP 8.5.



איור 16. השתנות השכיחות של שנים עם SPI באגן גליל מערבי בשלוש קטגוריות: א. בצורת ($-1.0 \leq$), ב. בצורת קשה עד קיצונית ($-1.5 \leq$), ג. בצורת קיצונית ($-2.5 \leq$). עבור שני תרחישים, RCP 4.5 (כחול) ו-RCP 8.5 (כתום) בחמש תת-תקופות. קווים אנכיים מציינים את פיזור תוצאות המודלים בין אחוזון 25 ו-75. שתי תקופות העבר מבוססות על תצפיות. הערכים נתונים במספר שנות בצורת מתוך 30 שנים.

מקורות

יוסף, י', בהר"ד, ע', אוזן, ל', כרמונה, י', חלפון, נ', פורשפן, א', לוי, י', סתיו, נ' (2019). שינוי האקלים בישראל מגמות עבר ומגמות חזויות במשטר הטמפרטורה והמשקעים. דו"ח מחקר מס' 4000-0804-2019-0000075, השירות המטאורולוגי הישראלי.

חלפון, נ' ויוסף, י' (2021). השוואת שלוש תקופות תקן סטנדרטיות בכמות הגשם בישראל 1931-2020. דו"ח מחקר מס' 4000-0804-2021-0000106, השירות המטאורולוגי הישראלי.

Cannon, A.J. (2016) Multivariate bias correction of climate model output: Matching marginal distributions and inter-variable dependence structure. *Journal of Climate*, 29:7045-7064. doi:10.1175/JCLID-15-0679.1

Cannon, A.J. (2018). Multivariate quantile mapping bias correction: An N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables. *Climate Dynamics*, 50(1-2):31-49. doi:10.1007/s00382-017-3580-6

Pierce David W. Daniel R. Cayan, Edwin P. Maurer, John. T. Abatzoglou and Katherine C. Hegewisch. (2015) Improved Bias Correction Techniques for Hydrological Simulations of Climate Change. *Journal of Hydrometeorological*, Vol. 16, 2421-2442.

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

נספחים

נספח א' – הערה על בחירת אנסמבל המודלים הקלימטולוגיים

בתחילת העבודה, לרשותנו עמדו 15 מודלים אקלימים, מפרויקט CORDEX AFRICA, כמפורט בטבלה 1. שלב האימות תואר בסעיף "בסיס הנתונים". מעבר לבחינה זו, בדקנו גם את סטיות התקן, אוטוקורלציה והמגמה עבור כל מודל בנפרד, בתקופת האימות (1980-2005). אחר כך חושבו המדדים המבוקשים הן לעבר והן לעתיד. בחינת התוצרים העלתה כי המודל IPSL-CM5A-MR-RCA4, נותן תחזית מאוד חריגה וקיצונית למשקעים, גם בתרחיש המתון יחסית של RCP 4.5. מודל זה נתן תוצאה שנמצאת 2 סטיות תקן מתחת לממוצע המודלים ב-25 מתוך 90 אוכלוסיות שנבדקו (5 תקופות * 9 אגנים * 2 תרחישים), ונתן את התחזית הפסימית ביותר כמעט בכל התרחישים. דבר זה גרם לנו לחזור לתקופת האימות של המודל, שם גם מצאנו כי המודל נותן את התוצאה הנמוכה ביותר, לפעמים בפער של עשרות מ"מ ביחס למודל הנמוך ביותר הבא.

לאור ממצאים אלו, הוחלט שלא לכלול את המודל הזה בניתוח, ולצמצם את הניתוח ל-14 מודלים בלבד, ולבצע את כל חישובי האנסמבל על בסיס ממוצע 14 המודלים הללו.

נספח ב' – התאמת פונקציות SPI

בטבלה 7 מפורט טיב ההתאמה של שתי פונקציות שונות ושתי שיטות התאמה שונות לסדרות הזמן ההיסטוריות של האגנים השונים. הערך בכל תא הוא ה-p-value לכך שהמדידות בתחנה בתקופה 1988 – 2017 התקבלו מההתפלגות שנמצאה. למשל, הערך של 0.22 בשורה של אגן כנרת בעמודה של MOM Pearson, אומר שאחרי שמצאנו את ההתפלגות הקרובה ביותר למדידות ממשפחת ההתפלגויות Pearson type III בשיטת המומנטים (Method of Moments), יש סיכוי של 22% שאוסף נקודות אקראי שנדגם מההתפלגות הזו יהיה יותר קרוב להתפלגות התיאורטית, מאשר המדידות שנמדדו בפועל. זו רמת ביטחון לא גבוהה מאד, אך סבירה, וברוב האגנים, השיטה הזו נתנה רמת ביטחון גבוהה יותר, לפעמים באופן משמעותי (למשל 0.01 בחוף דרום). יש לציין כי, אף אחת מהשיטות האחרות לא נתנה תוצאות טובות יותר ספציפית לאגן כנרת.

טבלה 7. ערך טיב ההתאמה (P-value) לכל אגן בארבעה תרחישים שונים – שתי משפחות פונקציות, Pearson Type 3 ופונקציית גאמא, ושתי שיטות התאמה, MLE ו-MOM.

Catchment Name	MLE Gamma	MOM Gamma	MLE Pearson	MOM Pearson
Kinneret	0.27	0.27	0.39	0.22
Western-Galilee	0.26	0.27	0.43	0.22
Yartan-North	0.23	0.23	0.19	0.18
Yartan-Center	0.20	0.21	0.06	0.06
Yartan-South	0.04	0.03	0.06	0.04
Jerusalem	0.17	0.17	0.17	0.22
Coast-North	0.28	0.28	0.29	0.29
Coast-Center	0.11	0.11	0.05	0.06
Coast-South	0.11	0.11	0.02	0.01

נספח ג' - רשימת התוצרים המלאה

לדו"ח זה מצורף מכלול תוצרים הכולל את התוצרים הבאים:

תחזית משקעים:

1. קבצים בפורמט CSV עם טבלאות הכוללות את המשקעים החזויים לפי כל מודל לכל שנה מ- 2007 עד 2100. קובץ נפרד לכל אגן ולכל תרחיש, סה"כ 18 קבצים.
`\Results\Rainfall\Predicted Rain by Catchment\`
2. קבצים בפורמט CSV עם טבלאות הכוללות את התחזית לשנת גשם ממוצעת לכל תת-תקופה בת 30 שנה לפי כל אחד מהמודלים וכל אחד מהתרחישים. קובץ נפרד לכל אגן, סה"כ 9 קבצים.
`\Results\Rainfall\Predicted Average Rainfall by 30 year periods\`
3. קבצי CSV עם טבלאות המפרטות את השכיחות הצפויה לכל טווח של 100 מ"מ גשם בכל תקופה בת 30 שנה (1990-1961, 2017-1988, 2050-2021, 2080-2051, 2100-2071), כולל טווח בין רבעוני (שכיחות מינימאלית הצפויה לפי 75% מהמודלים ושכיחות מרבית הצפויה לפי 25% מהמודלים בלבד). קובץ נפרד לכל תרחיש ולכל אגן, סה"כ 18 קבצים.
`\Results\Rainfall\Predicted rain by 30 year periods\`
4. גרפים המתארים את הנתונים בטבלאות מסעיף 1 לעיל, כולל אומדן למוצק 30-שנתי עבור תקופות העתיד והפיזור של המודלים השונים סביבו (ראו איור 7 לדוגמה). קובץ נפרד לכל אגן. סה"כ 9 קבצים.
`\Results\Rainfall\Graphs\`
5. גרפים המתארים את התפלגות המשקעים בעבר ואת ההתפלגות החזויה על סמך אנסמבל המודלים (ראו איור 6 לדוגמה). קובץ נפרד לכל תרחיש ולכל אגן, סה"כ 18 קבצים.
`\Results\Rainfall\KDE plots\`
6. מפות המתארות את השינוי הצפוי במשקעים הממוצעים לשנה לפי תקופות של 30 שנה בכל אחד מהאגנים, ביחס לתקופת הייחוס – 1988 - 2017. (איור 12 במסמך זה)
`\Results\Rainfall\Maps\`
7. קובץ CSV עם טבלה המתארת את המשקעים השנתיים המחושבים בכל אגן היקוות על סמך מדידות בתחנות משנת 1953 עד שנת 2017.
`\Results\Rainfall\All_Catchments_Reconstructed_Historic_Data.csv`
8. קובץ בפורמט CSV עם טבלה הכוללת את המשקעים המשוחזרים באמצעות רגרסיה ליניארית מהמדידות בתחנות לשנים 1953 – 2017, בכל תשעת האגנים.
`\Results\Rainfall\All_Catchments_Reconstructed_Historic_Data.csv`
9. גרף המתאר את פיזור תחזית המודלים לשנת משקעים ממוצעת ל- 3 תת-תקופות ב- 9 אגנים. (ראו איור 15).
`\Results\Rainfall\All_Catchments_Model_Distribution_Boxplots.png`

תחזית SPI:

1. קבצי CSV עם טבלאות הכוללות את הערך החזוי ל-SPI לפי כל מודל לכל שנה עד 2100. קובץ נפרד לכל אגן ולכל תרחיש, סה"כ 18 קבצים.
`\Results\SPI\SPI Results Pearson MOM\`
2. קבצי CSV עם טבלאות המפרטות את השכיחות הצפויה לערכי SPI מתחת לסדרה של ערכי סף בכל תקופה בת 30 שנה (1961 - 1990, 1988 - 2017, 2021 - 2050, 2051 - 2080, 2071 - 2100), לפי כל מודל. קובץ נפרד לכל תרחיש ולכל אגן, סה"כ 18 קבצים.
`\Results\SPI\SPI Categories by 30 year periods\`
3. גרפים המתארים את ההשתנות בזמן של השכיחות לערכי SPI מתחת לערך סף מסוים (ראו איור 11 לדוגמה). 9 אגנים, 3 טווחי SPI, סה"כ 27 קבצים.
`\Results\SPI\SPI Categories Graphs\`
4. גרפים המתארים את הנתונים בטבלאות מסעיף 1 לעיל, כולל אומדן למוצק 30-שנתי עבור תקופות העתיד והפיזור של המודלים השונים סביבו (ראו איור 10 לדוגמה). קובץ נפרד לכל אגן. סה"כ 9 קבצים.
`\Results\SPI\Graphs\`
5. קובץ CSV עם טבלה המפרטת את ערך SPI מ-1953 עד 2019 בכל 9 האגנים, מחושב על סמך מדידות מתחנות תוך שימוש בגרסיה ליניארית.
`\Results\SPI\Historic_SPI_MOM_Pearson_SPI.csv`
6. קובץ אקסל עם טבלה המפרטת את פרמטרי ההתפלגות שנבחרו לצורך חישוב ה-SPI בכל אגן, ואת טיב ההתאמה של ההתפלגות עבור כל אחד מהאגנים.
`\Results\SPI\Distribution_Parameters_MOM_Pearson.xlsx`
7. גרף המתאר את פיזור תחזית המודלים ל-SPI ממוצע ל-3 תת-תקופות ב-9 אגנים. (ראו איור 15).
`\Results\SPI\All_Catchments_Model_Distribution_Boxplots.png`

תחזית לרצף שנים עם משקעים מתחת לממוצע:

1. קובץ CSV עם טבלה המפרטת את הסף שממנו שנה נחשבת לשנת יבשה מהממוצע בכל אחד מהאגנים (טבלה 3 במסמך זה).
`\Results\Dry Streaks\Dry Year Thresholds.csv`
2. קובץ CSV עם טבלה המפרטת את הסבירות לשנה יבשה מהממוצע עבור כל מודל, כל תרחיש וכל תקופה בת 30 שנה (1961 - 1990, 1988 - 2017, 2021 - 2050, 2051 - 2080, 2071 - 2100) לכל אחד מתשעה האגנים.
`\Results\Dry Streaks\Single Dry Year Chances.csv`
3. קבצי CSV עם טבלאות המפרטות את הסבירות לרצף של מספר שנים עם משקעים מתחת לממוצע עבור כל מודל, כל תרחיש וכל תקופה בת 30 שנה (1961 - 1990, 1988 - 2017, 2021 - 2050, 2051 - 2080, 2071 - 2100) לכל 9 האגנים. 13 רצפים אפשריים של שנים מתחת לממוצע (מ-3 שנים ועד 15 שנים רצופות), סה"כ 13 קבצים.
`\Results\Dry Streaks\All Streak Lengths\`

4. קבצי CSV עם טבלאות המפרטות את ההסתברות הממוצעת הצפויה לרצף באורך מסוים של שנים מתחת לממוצע בכל תקופה בת 30 שנה (1961 - 1990, 1988 - 2017, 2021 - 2050, 2051 - 2080, 2071 - 2100) ובכל אגן, כולל טווח בין רבעוני (הסתברות מינימאלית הצפויה לפי 75% מהמודלים והסתברות מרבית הצפויה לפי 25% מהמודלים בלבד). קובץ נפרד לכל רצף של שנים מתחת לממוצע, סה"כ 13 קבצים.

\\Results\\Dry Streaks\\With Quantiles\\

5. קבצי Excel עם טבלאות המציגות את ההסתברות הממוצעת הצפויה לרצף של 5 שנים מתחת לממוצע, 7 שנים מתחת לממוצע ו- 10 שנים מתחת לממוצע, כמו גם את הטווח הבין רבעוני בין המודלים. (ראו טבלה 5 לדוגמה) קובץ נפרד לכל אגן, סה"כ 9 קבצים.

\\Results\\Dry Streaks\\Selected Streak Lengths\\

6. גרפים המתארים את פיזור תחזית המודלים להסתברות לרצף שנים מתחת לממוצע בכל האגנים. (איור 9 לדוגמה). שני תרחישים, שלושה משכי רצפים (5, 7 ו- 10 שנים). סה"כ 6 קבצים.

\\Results\\Dry Streaks\\Figures

תוצרים נוספים:

1. תרשים דנדרוגרמה המציג ניתוח אשכולות היררכי של אגני ההיקוות ותחנות המדידה (איור 5 במסמך זה).

\\Results\\Normalized Dendrogram.png

2. מפה המתארת את פריסת תחנות הגשם עם רקורד הומוגני משנת 1950 עד שנת 2017 (איור 1 במסמך זה).

\\Results\\Stations map.jpg