

תכנית-מחקר המוגשת לאישור כתכנית לעבודת-דוקטורט

האוניברסיטה העברית בירושלים

14/09/2010

ו' בתשרי, התשע"א

**השפעות שינויי אקלים על סופות גשם והמשטר ההידרולוגי
באגני היקוות בישראל**

**Climate change impacts on rainstorms and hydrological
response in Israel drainage basins**

מוגשת על ידי:

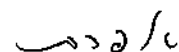
נדב פלג

Nadav Peleg

בהדרכת:

דוקטור אפרת מורין

הריני מאשרת את הנושא ואת התכנית, ומסכימה להדריך את המועמד בביצוע עבודה זו



במחקר זה תבחנה ההשלכות של שינויי האקלים החזויים בעשרות השנים הקרובות בישראל על סופות הגשם והמשטר ההידרולוגי עבור אגני היקוות מטיפוסים הידרולוגיים שונים. יבנה בסיס נתונים של סדרות משקעים ברזולוציה זמן-מרחב גבוהה יחסית המייצגות את האקלים התזוי בשלוש שיטות: (1) חישוב סדרת נתונים המבוססת על מודל מזג-האוויר WRF באמצעות downscaling דינמי; (2) חישוב צבר סדרות נתונים שיתקבלו באמצעות שיטות downscaling סטטיסטיות הנתמכות במודלים מרקוביים עבור סדרת נתונים מהמודלים האקלימיים האזוריים; (3) חישוב צבר סדרות נתונים ברזולוציית זמן-מרחב גבוהה (15 דקות ו-1 קמ"ר) על ידי מנוע מזג-אוויר סטוכסטי עבור מספר תרחישים אפשריים של שינויי אקלים, אשר פיתוחו מתבסס על ניתוח נתוני מכ"מ מטאורולוגי. מודל הידרולוגי יבנה עבור אגני היקוות ולתוכו יוזנו סופות הגשם החזויות על מנת לבחון את השפעתן הצפויה על המשטר ההידרולוגי מבחינת הזרימות העיליות, המילוי החוזר לאקוויפרים ואירועי השטפונות הקיצוניים. באמצעות המודל ההידרולוגי יזוהו פרמטרים של משקעים בעלי השפעה משמעותית על המשטר ההידרולוגי באגני היקוות בישראל. בשנת המחקר הראשונה בוצע ניתוח ואיפיון זמן-מרחב של סופות הגשם ונתוני המכ"מ המטאורולוגי עבור האקלים הנוכחי בנחל דליה ונחל תנינים. השלב הבא במחקר הינו פיתוח מנוע מזג-אוויר סטוכסטי לאזור זה לתקופה של 2025-2030.

במהלך מאה השנים האחרונות (1906-2005) נצפתה התחממות גלובלית ממוצעת של כ- 0.74°C בפני השטח בכדור הארץ (IPCC, 2007)¹. בקרב מרבית הקהילה המדעית מקובלת הדעה כי הגורם להתחממות הינו אנתרופוגני ומקורו בפליטה מוגברת של גזי חממה לאטמוספירה, דבר שעלול להוביל לשינוי עתידי באקלים כדור הארץ. מודלים שונים נערכו ונערכים על מנת לחזות את עוצמת השינויי בעשרות השנים הבאות על פי תרחישים שונים המתחשבים בכמות פליטת המזהמים, רמת התיעוש, גודל האוכלוסייה, המצב הגיאופוליטי בעולם ועוד. המחקרים, הנערכים בסקאלות שונות, בוחנים לא רק את ההשפעות על הטמפרטורות וכמויות המשקעים, אלא גם את ההשלכות על כמויות המים הזמינות בעולם, השפעות על תקלאות, זמינות מקורות אנרגיה עתידיים וכיוצא בזה (IPCC, 2007). מחקר זה מתייחס להשלכות הצפויות בישראל על סופות הגשם, המשטר ההידרולוגי ואירועי השטפונות, עבור תרחישים שונים של שינויי אקלים הצפויים בעשרות השנים הקרובות. בישראל, מעטים המחקרים שבחנו הצמדה של תרחישים שונים של אקלים עתידי עם השפעתם ההידרולוגית הצפויה.

מספר מחקרים מהשנים האחרונות התמקדו בשינויים המדודים בעוצמות ובפיוור המרחבי של המשקעים בישראל. מחקרם של Alpert et al. (2002) מצא מגמה מעורבת בכמויות הגשם לקראת סוף המאה הקודמת, כאשר מרבית תחנות המדידה ציינו ירידה בכמויות המשקעים. יוצא מהכלל הינו אזור צפון הנגב בו הובחנה עליה בכמויות המשקעים, כנראה כתוצאה מדחיקה אנתרופוגנית של קו המדבר דרומה. בנוסף, ציינו החוקרים כי למרות הירידה הקלה בכמויות המשקעים, באופן פרדוקסלי ניתן להבחין בעליה בעוצמות ובתדירות של אירועי הגשם היומיים הקיצוניים באגן הים התיכון. גם Ben-Gai et al. (1998) מצאו עליה בכמויות המשקעים בשליש האחרון של המאה הקודמת באזור באר-שבע ועליה במספר אירועי הגשם הקיצוניים באזור צפון הארץ. התצפיות מציינות גם שינוי בדפוס העיתי של המשקעים, כאשר מסתמנת עליה בכמויות הגשם בעונות המעבר (אוקטובר-נובמבר, מרץ) לעומת ירידה בחודשי החורף. מגמה של הקטנה בכמויות משקעים אורגורפים בשיעור של 15%-25% במישור החוף מיוחסת לעליה בזיהום האוויר האורבני (Givati and Rosenfeld, 2004; Givati and Rosenfeld, 2009), אך ממצאים אלו אינם מקובלים על כלל החוקרים (Halfon et al., 2009; Alpert et al., 2009; Alpert et al., 2008a).

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change

במחקרם של Alpert et al. (2004) חולקה המערכת הסינופטית האזורית ל-19 טיפוסים ואחר נבחנו השינויים שנצפו בטיפוסים סינופטיים אלו מהמחצית של המאה הקודמת ועד סופה. החוקרים מצאו כי מספר הימים בעלי אפיון סינופטי של אפיק ים-סוף הוכפל מכחמישים לכמאה ימים בתקופה זו ובנוסף נצפתה ירידה קלה בתדירות הופעת השקע הקפריסאי באזור (מ-30 ימים בממוצע לשנה לפני שנות השמונים ל-27 ימים בממוצע לשנה אחרי שנות השמונים).

באמצעות מודלים אקלימיים מנסים החוקרים לחזות את האקלים העתידי הצפוי לאור התחזיות של ה-IPCC. מודל אקלימי שנערך לאזור מזרח הים התיכון (Onol and Semazzi, 2009) לפי התרחיש הקיצוני (A2)² צופה ירידה בכמויות המשקעים השנתיות בישראל בשיעור של כ-12%, כאשר בסתיו מוערכת עליה בכמויות המשקעים בשיעור של כ-32%. מודל אקלימי נוסף לאזור הים התיכון לתקופה של סוף המאה הנוכחית חזה הפחתה בשיעור של 10%-30% בכמויות המשקעים השנתיות לחודשי החורף עבור תרחיש A2, ובנוסף חזה עליה במספר אירועי הגשם היומיים הקיצוניים (Alpert et al., 2008b). במחקר זה נבחן גם תרחיש מתון (B2)³ כאשר התוצאות הצביעו על ירידה זניחה של 0%-5% בכמויות המשקעים השנתיות בארץ. התרחיש הקיצוני A2 נבחן במודלים נוספים (Black 2009) עבור מודל אזורי ו-Evans (2009) עבור סדרת מודלים גלובלים) וגם בהם צוינו המגמות של הפחתה צפויה בכמויות המשקעים השנתיות והקטנה במספר סופות הגשם באזורנו. בנוסף, ציינו החוקרים כי הטמפרטורות החזויות בישראל הינם במגמת עליה, כאשר Onol and Semazzi (2009) מצביעים על עליה של כ-4.2°C בחודשי הקיץ לשנים 2071-2100, Alpert et al. (2008b) מציינים עליה של כ-3-5°C עבור אותה התקופה ו-Evans (2009) חוזה עליה בסביבות 4°C עד סוף המאה הנוכחית (לשנים 2090-2099).

מעטים המחקרים המתייחסים לשינויים שנמדדו במשטר הזרימות העיליות בישראל במאה האחרונה. ברקורד השטפונות של נחל ערבה שמציגים Jacoby et al. (2008) אין מובהקות סטטיסטית בעליה בתדירות או בעוצמות השטפונות עבור התקופה של אמצע עד סוף המאה הקודמת. לעומת זאת, במחקר שנערך בנחל אורן נמצא כי ישנה עליה בתדירות השטפונות החל משנות ה-90 של המאה הקודמת (Wittenberg et al., 2007). מגמה זו מוסברת על ידי קיצור משך

² ריבוי אוכלוסין גבוהה, התפתחות כלכלית וטכנולוגית איטית. ריכוז גזי חממה בשנת 2100: 1250 ppm.

³ ריבוי אוכלוסין והתפתחות כלכלית בינונית. ריכוז גזי חממה בשנת 2100: 800 ppm.

העונה הגשומה, קיצור משך התקופות היבשות בעונה הגשומה וגידול במספר אירועי הגשם הארוכים.

השינוי הצפוי באקלים העתידי עלול לגרום לשינוי במשטר הזרימות העיליות בנחלי הארץ. שינויים בכמויות ובפיזור המשקעים ישפיעו על נפחי הזרימה העונתיים בנחלים, לחיוב או לשלילה, ובמידה ויגדלו מספר אירועי הגשם הקיצוניים יוביל הדבר בסבירות גבוהה לגידול גם באירועי השטפונות החריגים. בחינת ההשפעה של שינויים אלו על ההידרולוגיה העילית נערכת באמצעות מודל הידרולוגי המייצג את תהליכי יצירת הנגר באגן ההיקוות וזרימתו על גבי המדרונות ובנחלים, כאשר המודל מוזן בנתוני משקעים חזויים על פי התרחישים האקלימיים השונים (לדוגמה: Dankers and Feyen, 2008; Dankers and Feyen, 2009; Samuels et al., 2009). הרזולוציה של נתוני המשקעים המתקבלים מהמודלים האקלימיים האזוריים⁴ בזמן ובמרחב הינה נמוכה, לדוגמה: המודל של Krichak et al. (2010) המיועד לאזור המזרח התיכון כולל רשת ברזולוציה של 50 ק"מ במרחב ושש שעות בזמן. הנגר העילי בישראל נוצר לרוב מתאי גשם קונבקטיביים קטנים בשטחם ובעלי שונות גבוהה בעוצמתם ולכן ישנה חשיבות לייצוג הגשם בסקאלות של ק"מ בודדים ולא עשרות ק"מ. בנוסף, אגני ההיקוות בישראל קטנים בשטחם ותגובתם ההידרולוגית הינה לעיתים בטווח זמן של מספר דקות ולכן יש צורך בנתוני משקעים המתאימים לסקאלת זמן זו.

תהליך המידול של השינויים ב-sub-grid מכונה downscaling ובו משפרים את הרזולוציה של המידע האגור בתאי הרשת. תהליך זה מושג בשני אמצעים: 1) downscaling דינמי: הכנת מודל מזג-אוויר דטרמניסטי לאזור המחקר המשתמש בתנאי הגבול הנגזרים ממודל מזג-אוויר גלובלי⁵ או ממודל מזג-אוויר אזורי בעל רזולוציה נמוכה יותר מהרזולוציה הדרושה. בשיטה זו מייצרים סדרת משקעים אחת תחת תנאי הגבול שהוזנו למערכת, כאשר הפעלת המודל דורשת לרוב כח מיחשוב גדול וזמן הרצה ממושך. ראו לדוגמה את מודל WRF⁶ (Lynn and Yair, 2010) המתמקד באזור ישראל, אשר תנאי השפה וההתחלה שלו מתקבלים ממודלים אקלימיים גלובליים שהוכנו על ידי סוכנות החלל האמריקאית (NASA); ו-2) downscaling סטטיסטי: הכנת מודל סטטיסטי-

⁴ RCM – Regional Circulation Model

⁵ GCM – Global Circulation Model

⁶ Weather Research and Forecasting

סטוכסטי בו מיוצרות ריאליזציות של סופות גשם (צבר, ensemble) המייצגות את השונות המרחבית של המשקעים בתת-הרשת. פיתוח המודל כולל ניתוח של שונות המשתנים בתוך הרשת, לדוגמה ניתוח שונות משקעים בין מספר תחנות מדידת גשם סמוכות, וקישור שונות זו לטיפוסים סינופטיים שונים במרחב הרשת. אחת הדרכים לבצע downscaling סטטיסטי הינה באמצעות קלסיפיקציה למצבים סינופטיים (Li and Smith, 2009; Wetterhall et al., 2009), אך שיטה זו אינה מספקת רזולוציה גבוהה דיה לצרכינו. שיטה נוספת הינה יצירת סדרות גשם סטוכסטיות לאזור המבוקש באמצעות שרשראות מרקוב (להסבר על תהליך מרקובי ראה: Rabiner, 1989; Watson and Chung Tsoi, 1992). מודל מרקובי נסתר⁷ הינו דוגמה למודל סטטיסטי בו נבחרים תחילה מספר מצבים נסתרים (כלומר, מצבים שאינם מוגדרים מראש על ידי המשתמש) על סמך ניתוח של המשתנים במרחב לתקופת בקרה. המשתנים מנותחים לפרמטרים שונים כגון: משך ועוצמת אירוע גשם, משך תקופה יבשה וכו', ולאחר מכן מוצמדים הטיפוסים הסינופטיים השונים למצבים הנסתרים. בדרך זו ניתן לייצר באופן סטוכסטי סדרות גשם חדשות לתקופת זמן השונה מתקופת הבקרה. סדרות גשם נקודתיות נבנו בהצלחה בשיטה זו כבר בסוף שנות ה-70 (Chin, 1977) ונבחנו גם עבור מודלים גלובליים (Mehrotra and Sharma, 2006; Zucchini and Guttorp, 1991). בשנים האחרונות שוכללה המתדולוגיה והשיטה הפכה לשכיחה לשימוש עבור downscaling של מודלים אזוריים במקומות שונים בעולם (Apipattanavis et al., 2007; Kioutsioukis et al., 2008; Robertson et al., 2007; Robertson et al., 2004; Samuels et al., 2009). מנועי מזג-אוויר סטוכסטים אלו ונוספים (לדוגמה, Wilks and Wilby (1999) ו-Mehrotra and Sharma (2009)) מייצרים סופות גשם הדומות מבחינה סטטיסטית (ממוצע עוצמות, משך תקופה יבשה, משך סופה וכו') לרקורד הקיים בתחנות מדידת הגשם, לרוב בסקאלה יומית. יצירת מנוע מזג-אוויר סטוכסטי המשלב מודל downscaling סטטיסטי עם נתוני מכ"מ מטאורולוגי יאפשר שיפור נוסף ברזולוציית הזמן והמרחב. באמצעות נתוני המכ"מ המטאורולוגי ניתן לאפיין את תאי הגשם באזור נתון מבחינה מתמטית (Feral et al., 2000; Feral et al., 2003a) כאשר התאים מייצגים גם את השונות המרחבית בעוצמות הגשם עבור המרחב שבין תחנות המדידה. המכ"מ המטאורולוגי של שח"ם פועל בישראל בימים גשומים ודוגם כל חמש דקות במרחב

⁷ HMM – Hidden Markov Model

של 1 קמ"ר על 1.4 מעלות (קורדינטות פולריות), המכ"מ כוייל לאזורים נבחרים בארץ (Morin and Gabella, 2007) ובעבר בוצע באמצעותו ניתוח מרחבי של תאי הגשם בדרום הארץ (Karklinsky and Morin, 2006).

קיימים מספר מודלים הידרולוגיים המתארים נגר עילי באגני היקוות נבחרים בישראל, ביניהם: נחל יעל (Bahat et al., 2009), נחלי דרגה וערוגות (Morin et al., 2009) נהר הירדן ומקורותיו (Rimmer and Salinger, 2006; Samuels et al., 2009), נחל בקע (Yakir and Morin, In preparation) ומרחביה (Rozalis et al., In Press, Corrected Proof). קלט המשקעים בשני המודלים האחרונים התבסס על נתוני מכ"מ מטאורולוגי בפירוט זמן-מרחב גבוה, בדומה למחקר שנערך על אגן ניקוז באריזונה (Morin et al., 2006). כאשר בוחנים את ההשפעה האפשרית של שינויי האקלים על משטר הזרימה העילית מתחשבים גם בפרמטרים הקשורים בהתאדות, תכסית הקרקע ובתהליכי ההרטבה והתייבשות של הקרקע. בישראל נערך מחקר מקיף לחישוב המילוי החוזר לאקוויפר ירקון-תנינים באמצעות מודל שהתחשב במאזן המים בקרקע תוך התחשבות בגשם, התאדות וחלחול לעומק (Sheffer et al., 2010).

מטרת המחקר הכוללת הינה בחינת ההשלכות של שינויי האקלים החזויים בעשרות השנים הקרובות בישראל על סופות הגשם והמשטר ההידרולוגי עבור אגני היקוות מטיפוסים שונים.

מטרות המחקר הפרטניות הן:

1. פיתוח מנוע מזג-אוויר סטוכסטי על בסיס נתוני מכ"מ מטאורולוגי לחישוב צבר סופות גשם ברזולוציית זמן-מרחב גבוהה (15 דקות ו-1 קמ"ר) עבור תרחישים אפשריים של שינויי אקלים (על פי התחזיות הקיימות) למספר אגני היקוות בארץ.
2. ניתוח השפעת השינויים ההידרולוגיים הצפויים במספר אגני היקוות מטיפוסים שונים מבחינת משטר הזרימות העיליות והמילוי החוזר לאקוויפרים.
3. בחינת השפעת שינויי האקלים החזויים על שכיחות וגודל אירועי שטפונות קיצוניים.
4. זיהוי פרמטרים של משקעים בעלי השפעה משמעותית על משטר הזרימות העיליות בישראל.

1. בחינת התרחישים החזויים לאור שינויי האקלים באזורנו

יערך סקר ספרות מקיף המרכז את התחזיות לאזורנו הנוגעות בשינויי האקלים החזויים עד 2030 עבור פרמטרים המשפיעים על הזרימות העיליות, כגון: כמויות גשם, עוצמות גשם בפרקי זמן שונים, שינוי בטמפרטורות השיא, מרווח בין סופות גשם, זמן עונת החורף ועוד.

2. יצירת בסיס נתוני משקעים חזויים

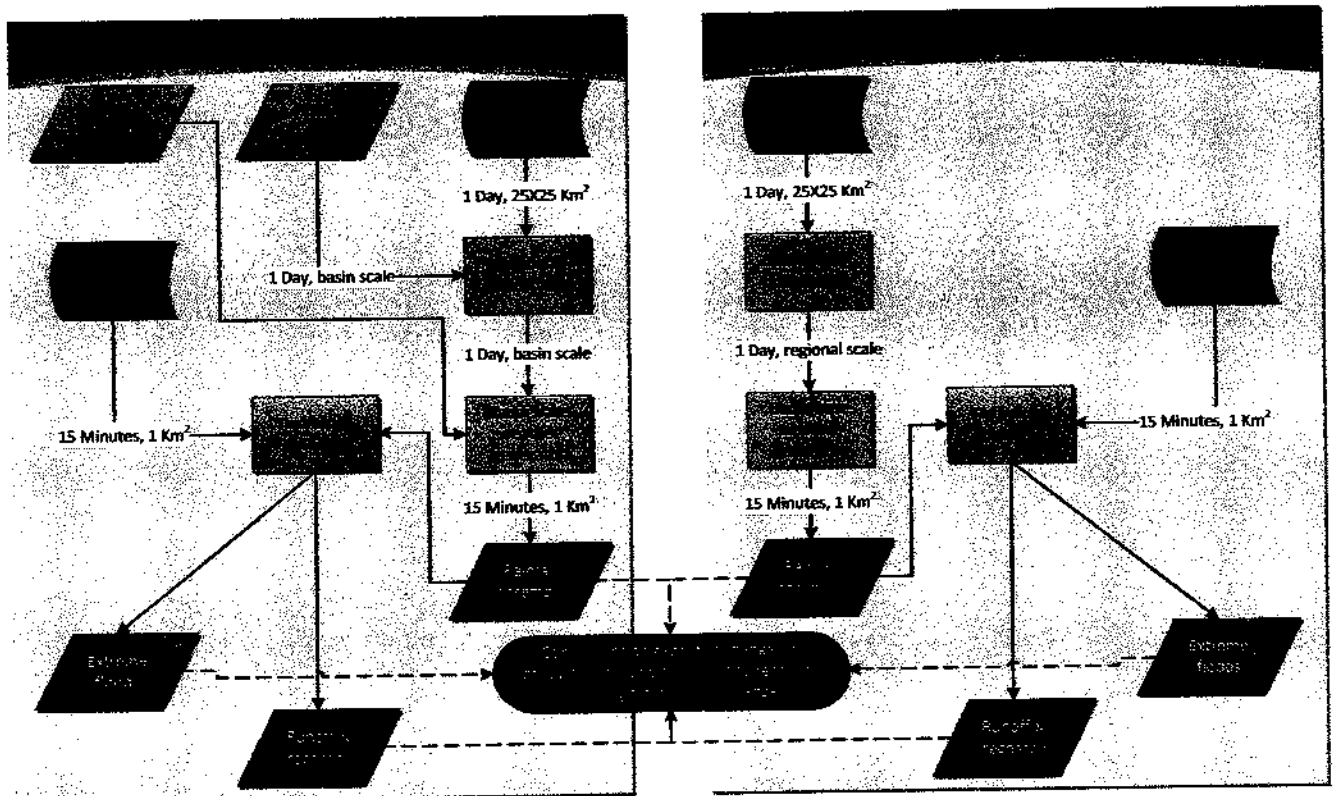
בסיס נתוני המשקעים החזויים יבנה בשלוש שיטות (איור 1):

(i) הסדרות יתבססו על מודל מזג האוויר WRF, שהוכן על ידי דוקטור בארי לין והותאם לאזורנו. באמצעות המודל ניתן לייצר נתוני גשם וטמפרטורה ברזולוציה גבוהה של 1 קמ"ר ו-15 דקות. יתקבלו שני סטים של סדרות: א) עבור התקופה של 2004-2008 המתאימה לאקלים הנוכחי לצרכי ביקורת; ו-ב) עבור התקופה של 2026-2030 המתאימה לאקלים העתידי החזוי לפי תרחיש A2. סימולציות של מספר אירועי שיטפונות יושמו לאחרונה באזורנו באמצעות מודל זה (Yair et al., 2010). שיטה זו מתבססת על גישה של downscaling דינמי.

(ii) הסדרות יתבססו על סימולציות של מודלים אקלימיים אזוריים אשר התקבלו מקבוצת המחקר של פרופ' פנחס אלפרט מאוניברסיטת תל-אביב (Alpert et al., 2008b; Krichak et al., 2010). הנתונים הינם ברזולוציה של 25 ק"מ במרחב ויממה בזמן, לפי תרחיש A1B של ה-IPCC. באמצעות שיטות downscaling סטטיסטיות הנתמכות במודלים מרקוביים יחושב צבר סופות עם נתוני מרחב ברזולוציה גבוהה יותר (לדוגמה, יממה בזמן ומרחב אגן ההיקוות – כ-50 קמ"ר) המתאימה יותר לחיזוי הידרולוגי באגן הנבחר (Apipattanavis et al., 2007; Bellone et al., 2000; Moron et al., 2008; Robertson et al., 2007).

(iii) הסדרות יתבססו על מנוע מזג-אוויר סטוכסטי מבוסס נתוני מכ"מ מטאורולוגי אשר ישפר את תהליך ה-downscaling הסטטיסטי של המודלים האזוריים (סעיף ii) לרזולוציית זמן-מרחב גבוהה (15 דקות ו-1 קמ"ר) עבור התרחישים השונים. ניתוח תאי

גשם במרחב ובזמן מנתוני מכ"מ בוצע בישראל (Goldreich et al., 2004; Karklinsky and Morin, 2006) ובמקומות שונים בעולם (Dixon and Wiener, 1993; Feral et al., 2003b), אך בסקירת הספרות לא נמצאו התייחסויות למחקרים קודמים שבהם נערך ניסיון ליצירת סדרות של תאי גשם סטוכסטיים מבוססי מכ"מ. דגימת הסגמנטיים של תאי הגשם תערך בדומה לעבודתם של Karklinsky and Morin (2006) ו-Yakir and Morin (In preparation), תוך התאמה לאופי תאי הגשם הצפוי באגן הנבחר. לצורך מעקב אחרי תאי הגשם יכתב אלגוריתם עקיבה המתאים לסקאלת זמן-מרחב גבוהה, על בסיס עקרונות עקיבה קיימים (Fulton et al., 1998; Johnson et al., 1998; Kyznarova and Novak, 2009; Mathurin and Rottembourg, 1997; Pierce et al., 2004). לאחר יצירת צבר סופות גשם עתידיות בשיטה זו, תערך השוואה בין הסופות המדחזות באקלים הנוכחי לסופות החזויות בתרחישים השונים עבור פרמטרים שונים, לדוגמה: גודל תא גשם, עוצמות ממוצעות ומקסימליות בתאי הגשם, משך חיי התא, כיוון ומהירות התקדמות ממוצעת וכו'.



איור 1 – תרשים זרימה המתאר את עיקרי תכנית המחקר. עבור האקלים הנוכחי (שמאל) נערך ניתוח של הנתונים מהמכ"מ המטאורולוגי וממדי הגשם. מנע מוג-אוויר מבוסס מכ"מ מטאורולוגי ישולב עם תהליך ה-downscaling המרקובי ליצירת סדרות גשם שיוזנו למודל ההידרולוגי. בנוסף, יוזן המודל ההידרולוגי בנתוני מודל ה-WRF עבור תרחיש אחר של שינוי אקלים. תהליך דומה יבוצע עבור האקלים העתידי (ימין), כאשר תוצרי המודל ההידרולוגי (נבר עילי, חיזור לאקוויפרים ושטפונות קיצוניים) ישוו בין התקופה הנוכחית לאקלים העתידי.

3. ניתוח פירוס עוצמות הגשם בתוך תא מכ"מ באמצעות רשת מדי גשם צפופה לאירועים

בודדים

באמצעות ניתוח פירוס עוצמות הגשם במרחב קטן (כ-1 קמ"ר), על ידי מספר מדי גשם המודדים עוצמות בפרקי זמן קצרים (כדקה), נלמד את מאפייני שונות הגשם בסקלה קטנה (מאות מטר) וניישם זאת על מנת להקטין את אי-הודאות בהערכת עוצמות הגשם מנתוני המכ"מ כפי שמתועדת היטב במחקרים השונים (Krajewski et al., 2010; Mandapaka et al., 2009; Villarini and Krajewski, 2010). הצבת מספר תחנות למדידת משקעים בתא שטח קטן המקביל לתא המכ"מ במהלך אירועי גשם בתקופת המחקר יאפשר קבלת ידע סטטיסטי על פיזור הגשם ברזולוציה גבוהה, אותו ניישם בחישוב סדרות הגשם הסטוכסטיות שנייצר לאגני היקוות השונים. מידע זה יעזור גם בשיפור כיול המכ"מ.

4. בחירת אגני היקוות "טיפוסיים" ואפיון משטר הזרימות העיליות הנוכחי

יבחרו מספר אגני היקוות בהם קיימות מדידות זרימה (של השירות ההידרולוגי או התחנה לחקר הסחף) והמייצגים טיפוסים הידרולוגיים שונים בישראל, לדוגמה: נחל דליה ונחל תנינים (מסלע קירטוני אטום-למחצה ופוטנציאל נגר עילי גבוה) במישור החוף, נחל חרוד בעמק (קרקעות סחף, חקלאות אינטנסיבית) ונחל בקע בצפון הנגב (אזור חצי מדברי, קרקעות לס, קצב חידור נמוך).

עבור אגני היקוות הנבחרים יערך ניתוח הידרומטאורולוגי של נתוני הגשם, התאדות וזרימה ויאופיין משטר הזרימות העיליות הנוכחי: נפחי נגר, אחוז נגר מגשם, מספר אירועים ממוצע בשנה, ספיקות שיא ועוד. בנוסף, תאופיין התפלגות ערכי קיצון של ספיקות הזרימה להערכת שכיחות וגודל אירועי שטפונות מהרקורד הנוכחי.

5. פיתוח והתאמת מודל הידרולוגי לאגני היקוות הנבחרים

מודל לזרימה עילית יותאם לאגני היקוות השונים על בסיס מודלים הידרולוגיים קיימים, כדוגמת מודל CASURU⁸ (Rozalis et al., In Press, Corrected Proof) המחשב את הילוך הנגר העילי על סמך סוג הקרקע, שימוש הקרקע, הטופוגרפיה, עוצמות הגשם, אירוע

⁸ Catchment Surface Runoff

הגשם הקודם ומצב גידול הצמחייה. במודל זה ישולב מודל המתאר את ההרטבה וההתייבשות של הקרקע מנתוני משקעים והתאדות תוך התחשבות במאפייני הקרקע ובכיסוי הצומח, כדוגמת מודל DREAM⁹ (Sheffer et al., 2010).

המודל המשולב יכוייל עבור אגני ההיקוות הנבחרים עבור האקלים הנוכחי באמצעות נתוני גשם שיתקבלו מהמכ"מ המטאורולוגי (Morin and Gabella, 2007; Yakir and Morin,) (In preparation). סדרות הגשם שיווצרו באמצעות מודל ה-WRF, באמצעות downscaling של ה-RCM ובאמצעות מנוע מזג-האוויר מבוסס המכ"מ לאקלים הנוכחי יאומתו במודל הזרימה על מנת לוודא התאמה במשטר ההידרולוגי המדוד והמחושב. בפרט תבחן ההתאמה בהתפלגות אירועי השטפונות הקיצוניים המדודים והמחושבים.

6. שינויים במשטר ההידרולוגי כתגובה לשינויים אקלימיים

המודל ההידרולוגי ייושם עבור סדרות הגשם המדמות אקלים עתידי באגני ההיקוות הנבחרים. משטר הזרימות העתידי יבחן במספר פרמטרים (נפח נגר שנתי, אחוז נגר מגשם, אחוז חידור לאקוויפרים, תדירות אירועי שטפונות ועוד) על מנת לאפיין את תגובת אגן הניקוז לשינויים ההידרולוגיים הצפויים בתרחישים האקלימיים השונים. בנוסף, תבחן השפעת שינויי האקלים על שכיחות וגודל אירועי השטפונות באגנים (לדוגמה, Wilby et al. (2008) ו-Fowler and Wilby (2010)).

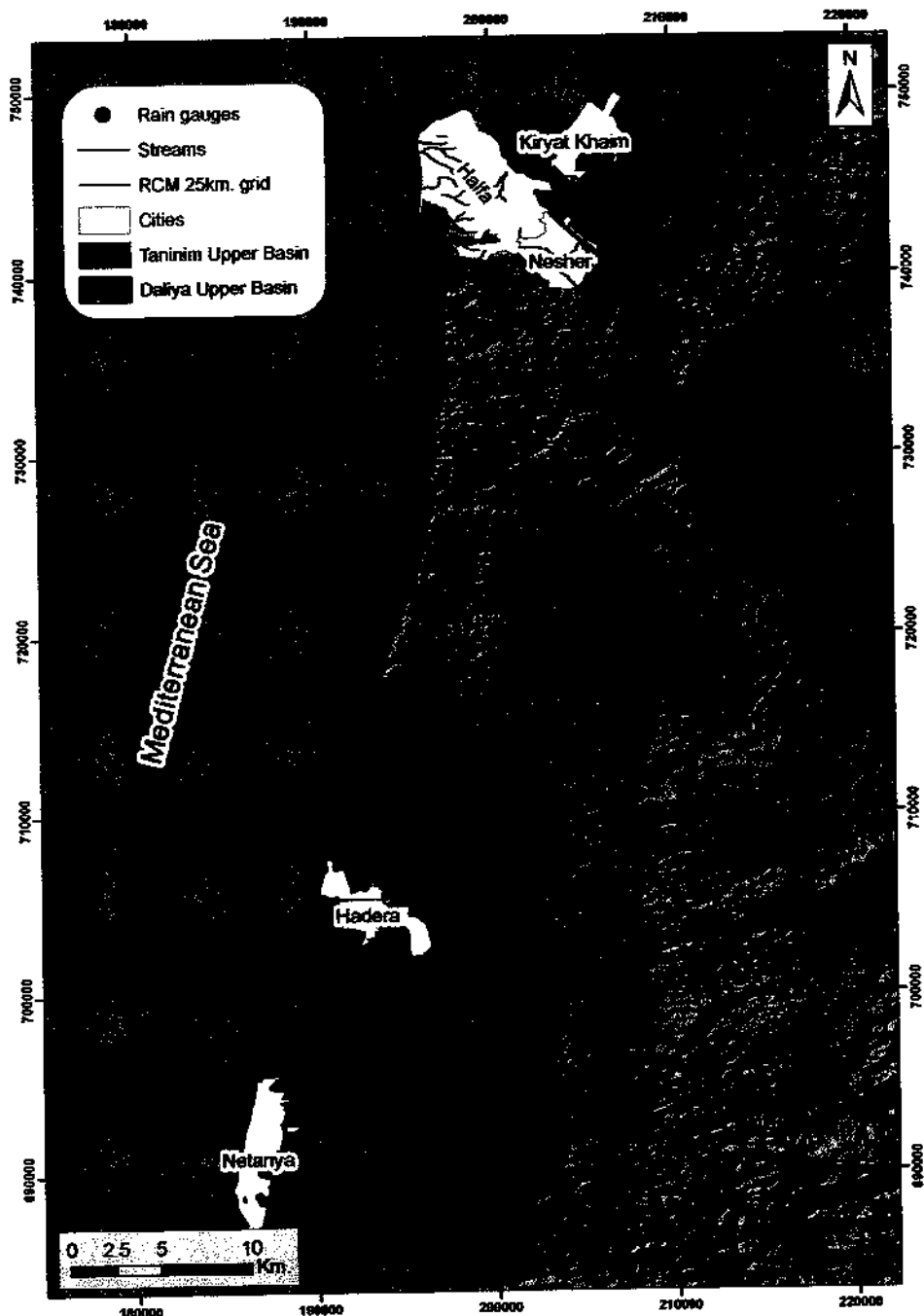
7. זיהוי פרמטרים המשפיעים על התגובה ההידרולוגית באמצעות ניתוחי רגישות

יבוצע ניתוח של נתוני עבר של משקעים, התאדות וזרימה על מנת לזהות פרמטרים אקלימיים שהשינוי בהם אינו נובע בהכרח משינויי אקלים (גורם אחר או שונות טבעית) ותבחן השפעתם על משטר הזרימה העילית המדודה.

בנוסף לכך, נבצע ניתוחי רגישות גלובליים לתוצאות המודל ההידרולוגי בכדי לזהות את הפרמטרים הקשורים במשקעים ובהתאדות בעלי ההשפעה המשמעותית ביותר על משטר הזרימות העיליות בישראל. ניתוחי הרגישות ילמדו על האינטרקציות החשובות בין הפרמטרים האקלימיים והשפעתן על משטר הזרימה.

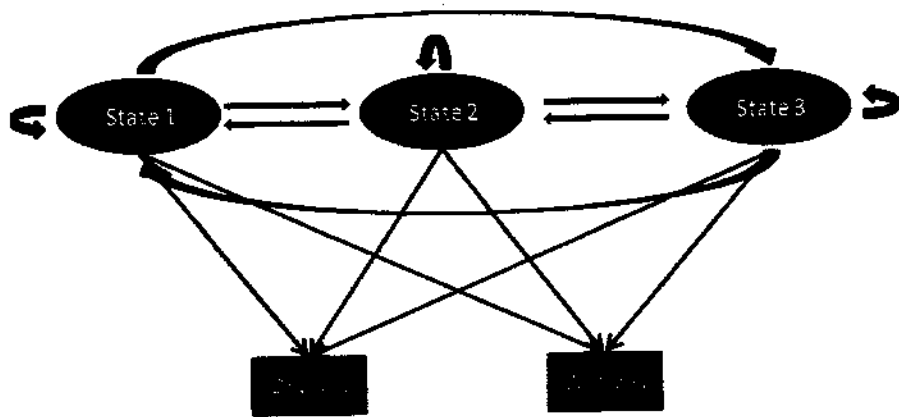
⁹ Daily REcharge Assessment Model

אגן נחל דליה ואגן נחל תנינים נבחרו לבדיקת היתכנות המחקר. אגנים אילו נמצאים מצפון תדרה, מוצאם מקו אוס-אל-פחם – אליקים כעשרים קילומטרים מזרחית לים התיכון, ועל אף מיכותם הם מייצגים ליתולוגיות ושימושי קרקע שונים לבחינת המודל ההידרולוגי. בנוסף, אתרים לו נמדדים היטב על ידי מכ"מ הגשם של שח"ם ועל ידי מספר תחנות גשם של השירות מטאורולוגי (איור 2).



איור 2 – מפת התמצאות של אזור המחקר. שטחי הניקוז המסומנים הינם של אגן תנינים (ירוק) ואגן דליה (ורוד) ו-2 תחנות המדידה העליונות. האגנים נמצאים במישור החוף הצפוני, בין תדרה לחיפה. נקודות אדומות מציינות את תחנות מדידת הגשם באזור המחקר.

מודל מרקובי נסתר נבנה על בסיס מיצוע נתוני גשם מ-13 תחנות מדידה יומיות לתקופה של 1965-2001 (30 שנות מדידה לא רצופות) באזור המחקר עבור החודשים הגשומים (דצמבר-פברואר).
 באמצעות המודל נבנתה מטריצת מעבר בין המצבים הנסתרים השונים (איור 3 וטבלה 1), נבנתה מטריצה המסכמת את ההסתברות לקבלת יום גשום או יום יבש (איור 3 וטבלה 2) ומערכה התאמה של פונקציה מעריכית-מעורבת לכמויות המשקעים בכל מצב נסתר (דוגמה באיור 4). בעזרת נתונים אלו יוצרו סדרות גשם סינתטיות יומיות המתאימות לתקופתנו (טרום-שינויי אקלים) עבור האגנים הנבחרים.

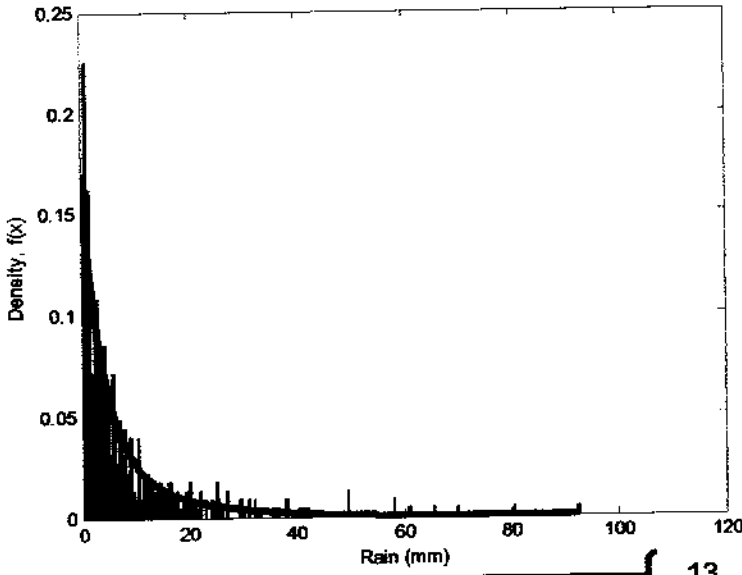


איור 3 – המחשה של המודל המרקובי. אפשרויות המעבר בין המצבים בכל צעד זמן מצויינות בחצים כחולים, האפשרות לקבל יום גשום או יבש בכל מצב מסומנת בחצים ירוקים.

Emission Matrix		
	Dry	Wet
1	0.96	0.04
2	0.12	0.88
3	0.16	0.84

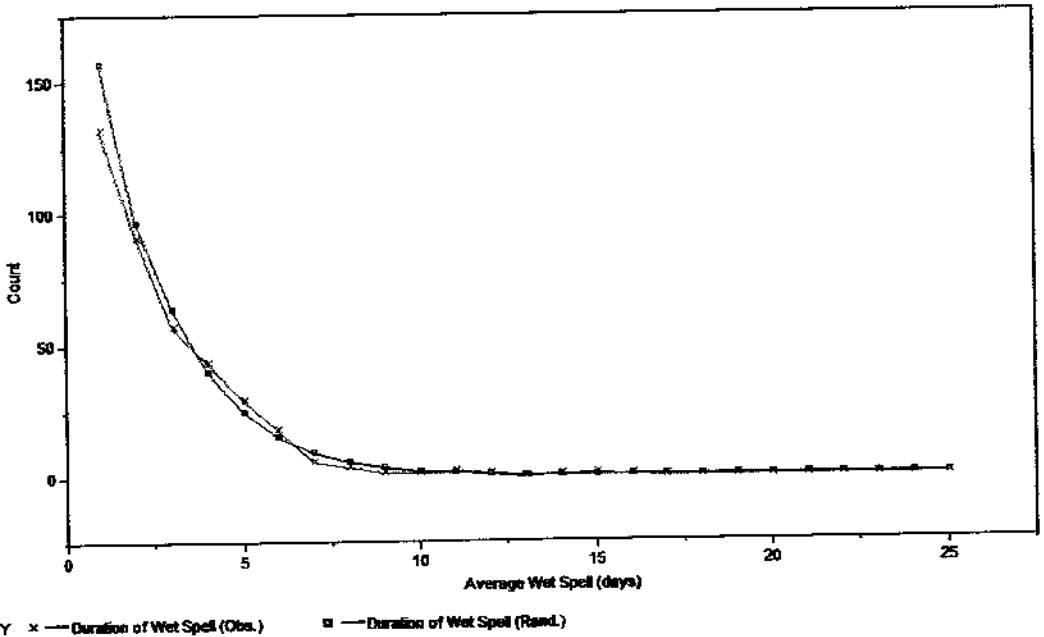
Transition Matrix			
	1	2	3
1	0.78	0.08	0.14
2	0.54	0.39	0.07
3	0.01	0.35	0.64

טבלה 1 (ימין) – מטריצת המעבר בין המצבים הנסתרים, לדוגמה: ישנו סיכוי של 7% למעבר בין מצב 3 למצב 2 בצעד זמן נתון. טבלה 2 (שמאל) – הסיכוי לקבלת יום גשום או יבש כתלות במצב הנסתר.

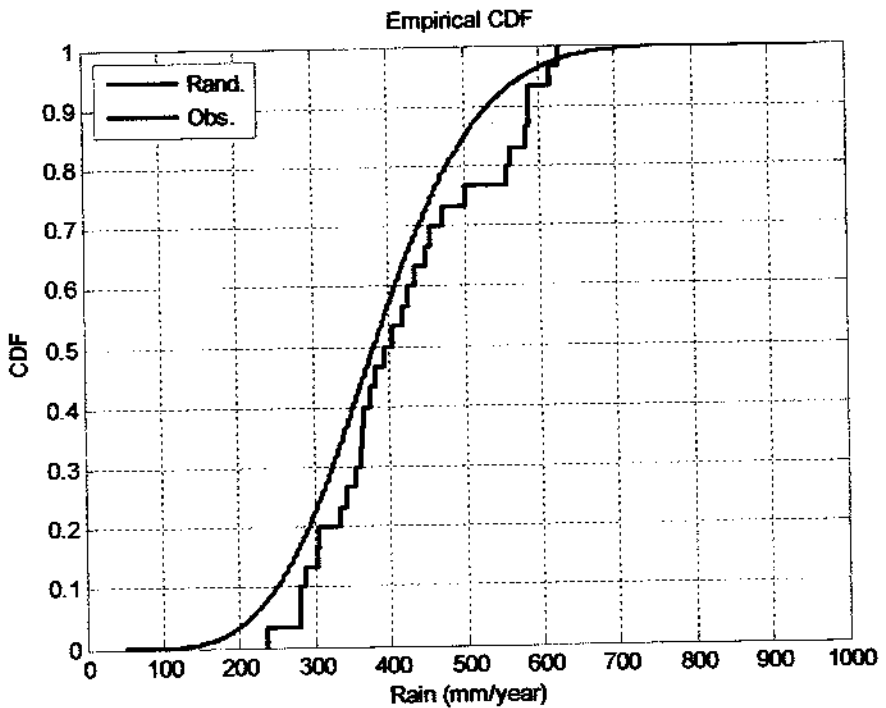


איור 4 – התאמה של פונקציה מעריכית-מעורבת (Mixed-exponential) לכמויות המשקעים עבור מצב נסתר 2. התאמה מאפשרת ייצור מקרי של כמויות גשם יומיות באגן הנבחר.

פרמטרים ומבחנים שונים נערכו לבדיקת ההתאמה בין הסדרות הסטוכסטיות והסדרות המדודות, לדוגמה: נבחן המשך הממוצע של ימים גשומים (איור 5) ונעך מבחן קולמוגורוב-סמירנוב להתאמה בין התפלגויות המצטברות של כמויות הגשמים השנתיות המחושבות לעומת המדודות (איור 6).

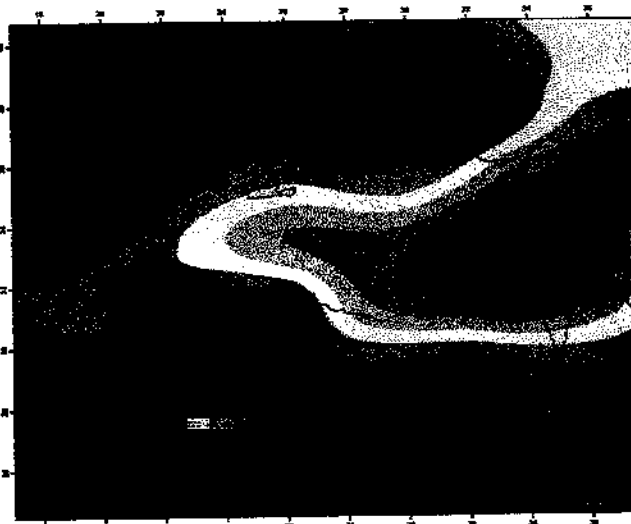
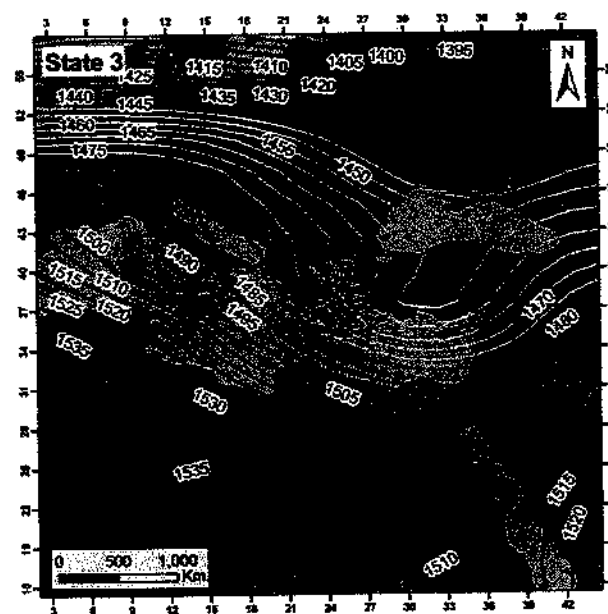
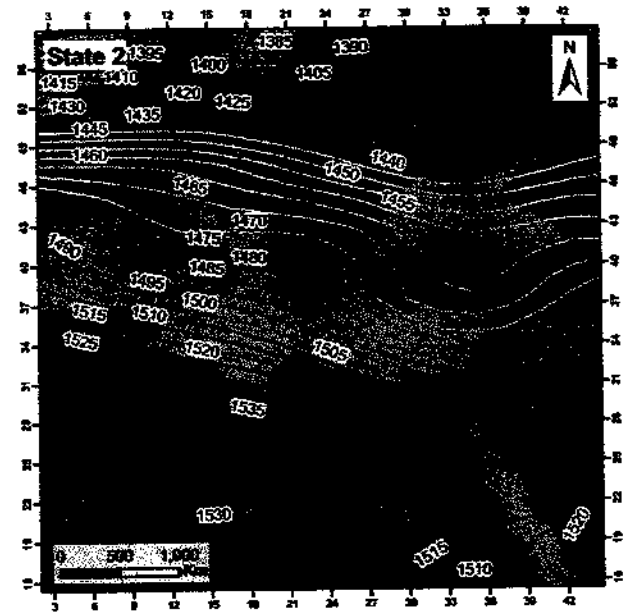
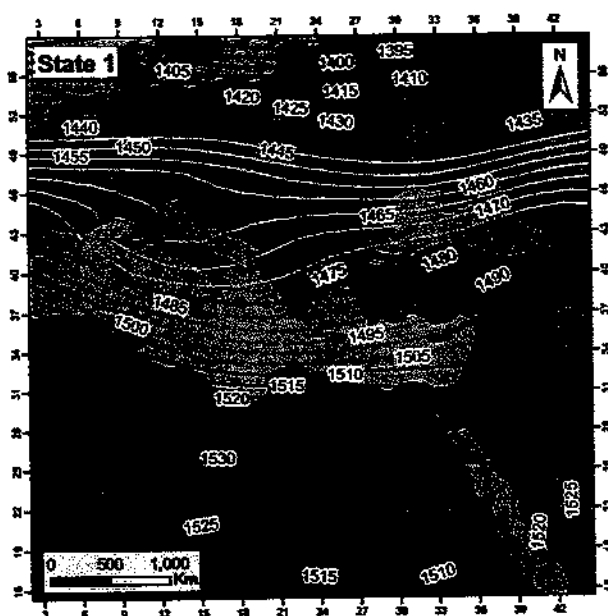


איור 5 – משך ממוצע מדוד של ימים גשומים (איסט אדום) לעומת משך ממוצע מחושב של ימים גשומים (ריבוע כחול).



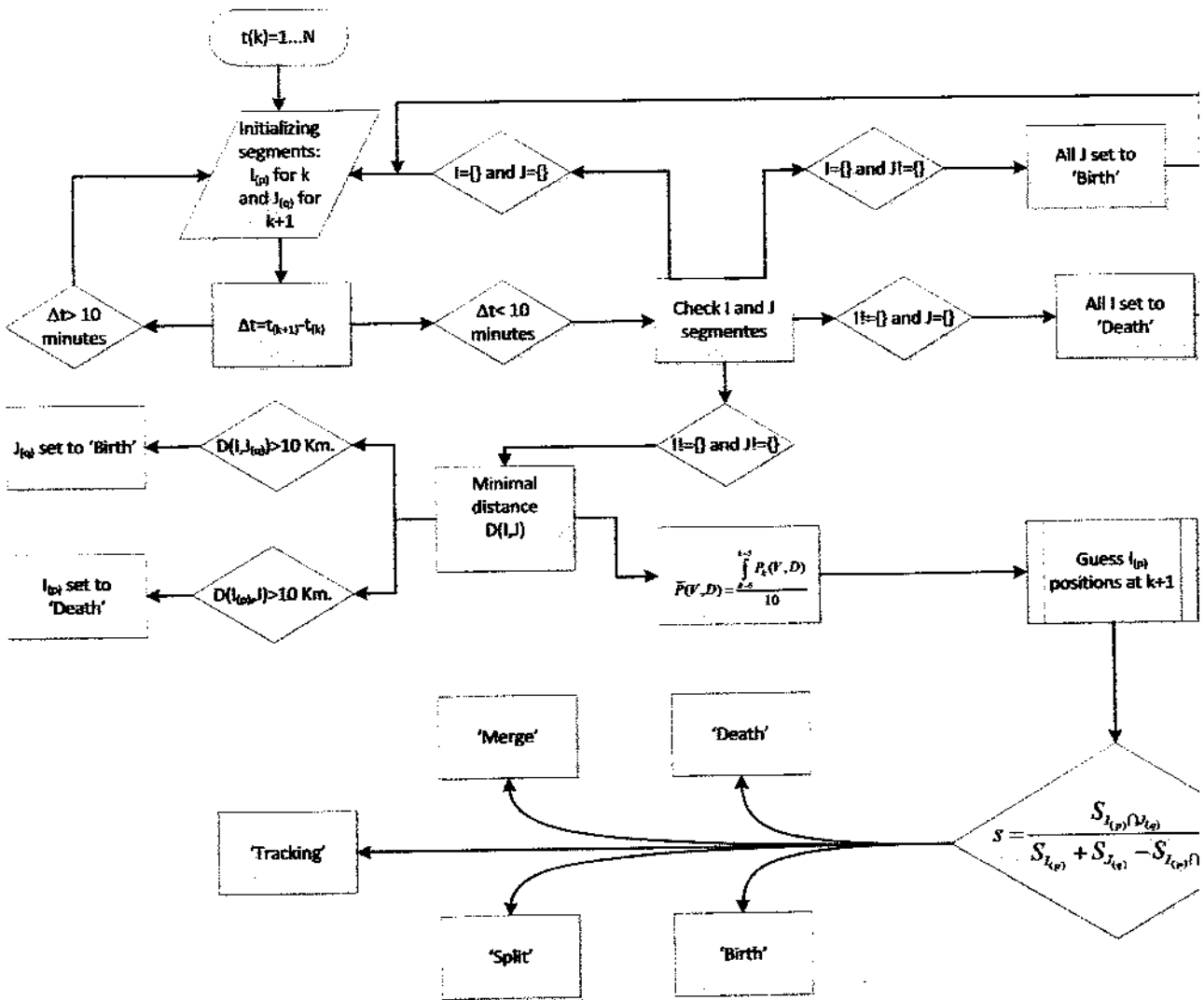
איור 6 – מבחן קולמוגורוב-סמירנוב דו-דוגמתי המשווה את כמויות המשקעים השנתיות המדודות (כחול לעומת המחושבות (אדום)). ה-CDF הינם מאותה התפלגות רציפה.

נמצא כי המצבים הנסתרים מייצגים תנאים סינופטיים שונים (איור 7: 1) מצב יבש, אין נשם באזור ישראל; (2) מצב גשום לרוב, שקע מעל טורקיה משפיע בעיקר על חלקה הצפוני של הארץ; (3-1) מצב גשום, שקע נמצא מעל קפריסין ומשפיע על חלקה הגדול של הארץ. בנוסף, ערכנו קורלציה בין המצבים הנסתרים שנמצאו במודל לבין פרמטרים שונים של נתוני NCEP/NCAR לדוגמה, קורלציה בין משקעים, איור 8) בכדי שנוכל לבצע השלכה של תוצאות המודל למודלים מקלימיים אזוריים, על מנת שנוכל להפעיל את המודל המרקובי גם לאקלים העתידי.



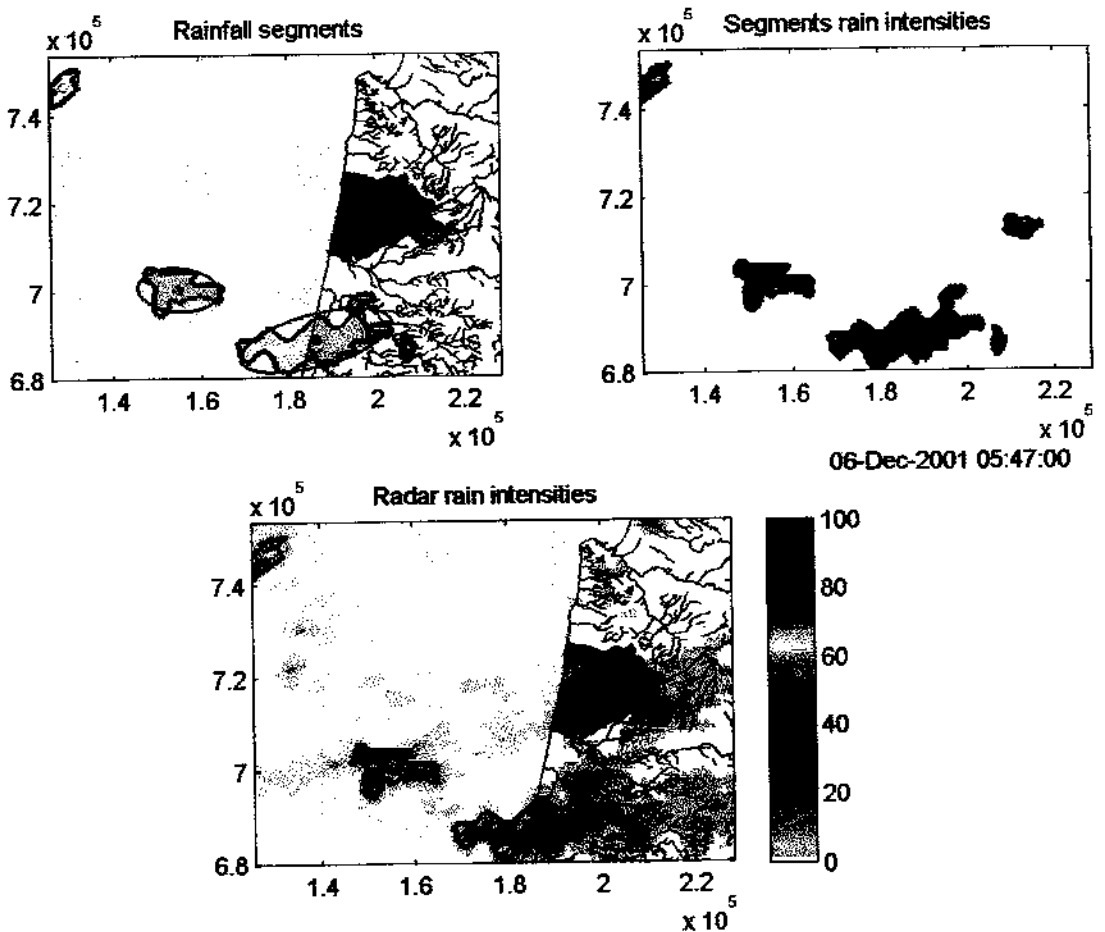
איור 7 – התאמה בין שלושת המצבים הנסתרים למצבים סינופטיים שונים: מצב 1 (שמאל למעלה) – מצב יבש, אין שקע המשפיע על ישראל; מצב 2 (ימין למעלה) – מצב גשום לרוב, שקע מעל טורקיה משפיע על ישראל מהצפון; מצב 3 (שמאל למטה) – מצב גשום, שקע הנמצא סמוך לקפריסין משפיע על ישראל מצפון-מערב. איור 8 (ימין למטה) – מידת ההתאמה לפי קורלציית פירסון בין נתוני המשקעים של NCEP/NCAR לבין המצבים הנסתרים במודל המרקובי.

שילוב המכ"מ המטאורולוגי במודל המרקובי יאפשר פיתוח מנוע גשם סטוכסטי חדש המייצר תאי גשם בסקאלת זמן-מרחב גבוהה. לצורך כך נכתב קוד המאפשר את זיהוי תאי הגשם כסגמנטים בשני רבדים במכ"מ המטאורולוגי ונכתב אלגוריתם המתאר את מחזור החיים של תאי הגשם (לידה, עקיבה, פיצול, איחוד ומוות) לביצוע מעקב אחרי התאים במרחב ובזמן (איור 9).



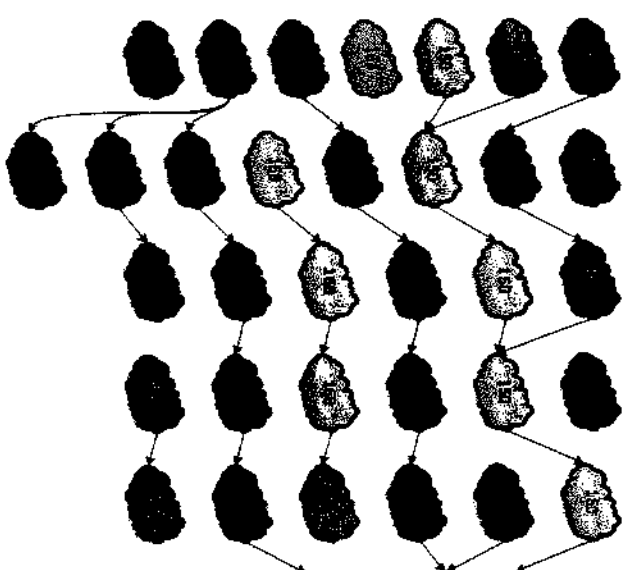
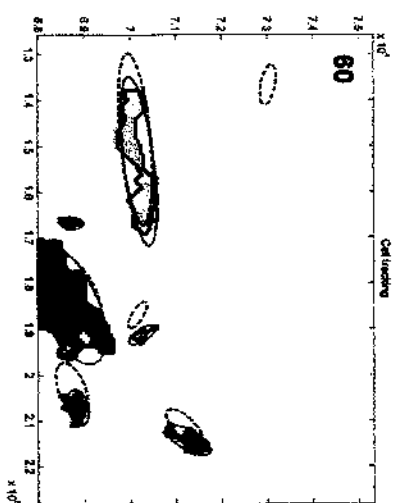
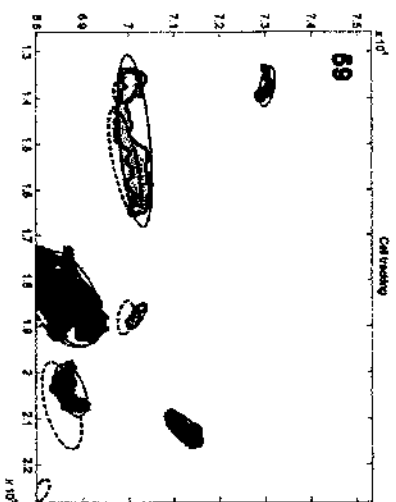
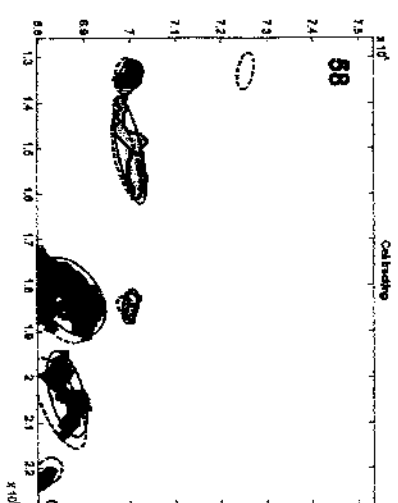
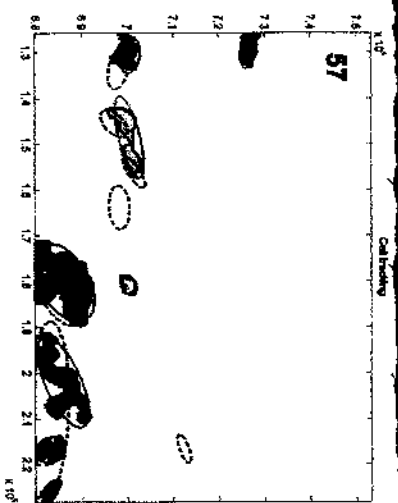
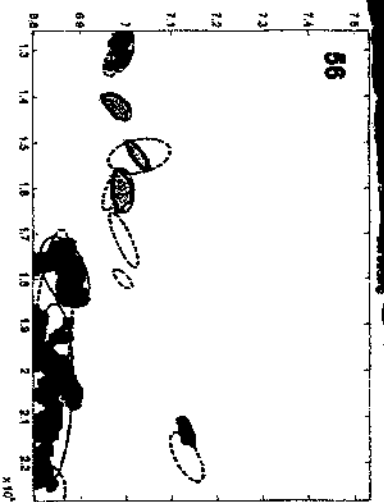
איור 9 – תרשים זרימה המתאר את אלגוריתם העקיבה לתאי הגשם. האלגוריתם בודק שאין חריגה בצעדי הזמן בין תמונות המכ"מ, מוצא את וקטור התנועה בין צעדי הזמן, מנחש את מיקום תאי הגשם בצעד הזמן הבא ולאחר משיך באמצעות פונקציית המטרה S, הבדקת חפיפה בשטחי תאי הגשם בין צעדי הזמן, את התאים לאחד מהמצבים הבאים: לידה, עקיבה, פיצול, איחוד או מוות.

הסופה שהתרחשה ב-6/12/2001 בין השעות 12 בלילה ל-12 בצהריים נבחרה לשמש כמקרה בוחן. העוצמה הגבוהה ביותר נמדדה בשעה 5:47 דרומית לאזור המחקר, מדידה זו מוצגת באיור 10 ממחישה את תהליך זיהוי תאי הגשם, מרכזי העוצמות בתאי הגשם, הסגמנטציה באמצעות אליפסות, זיהוי מרכזי התאים וכו'.



איור 10 – אנליזת תמונת המכ"מ מהסופה שהתרחשה ב-6 לדצמבר 2001, שעה 5:47 בבוקר. תמונה עליונה משמאל – תאי הגשם שנבחרו לפי הקריטריונים השונים ותחומים בקו שחור, התאמת סגמנטים אליפטיים לכל תא מסומנת באדום, נקודת אדומה מייצגת את מרכז תא הגשם. השטח האדום הצבוע במישור החוף מציין את אגני דליה ותנינים. תמונה עליונה מימין – תאי הגשם הנבחרים עם עוצמות הגשם, הקו האדום תוחם את מרכזי העוצמות הגבוהים לפי הקריטריונים שנבחרו. תמונה תחתונה – תמונת המכ"מ לפני עיבוד. עוצמות הגשם הינם במ"מ לשעה.

יור 11 מתאר את תהליך המעקב אחר תאי הגשם של חמישה צעדי זמן (כעשרים ושלוש דקות) לפני יא הסופה, ביחד עם תרשים זרימה ששימש כעזר לאימות הסובייקטיבי של האלגוריתם.



איור 11 - דוגמא לתהליך העקיבה של תאי הגוש במהלך המישה צעדי זמן : תא מספר 164 (אפר) "נולד" ו-"מת" בצעד זמן 56, "עקובד" מתבצעת על תא מספר 170 (ריקול) בין צעדי זמן 60-159, תא מספר 163 (חום) ותא מספר 150 (צהוב) "מתאחדים" בין צעד זמן 58 לתא אחד (150) ותא מספר 140 (כתום) "מתפצל" בצעד זמן 56 לשלושת תאים קטנים. ממקו מוצרף תרשים ורימה המתאר את תאי הגוש בהתאם לצעדי הזמן. אליפסה אדומה מייצגת את תא הגוש בצעד הזמן הנבחר ואלפסה מקורקרת מייצגת את הניחוש של מיקום תא הגוש בצעד הזמן הנבחר. תאים שחורים מציגים מעינים חקשר בין הסגנונים (קונטורליים) בהתאם לתוצאות האלגוריתם, חץ אדום מציין חובר צפוי שלא נעשה על ידי האלגוריתם.

- 56 05:12
- 57 05:18
- 58 05:24
- 59 05:30
- 60 05:35

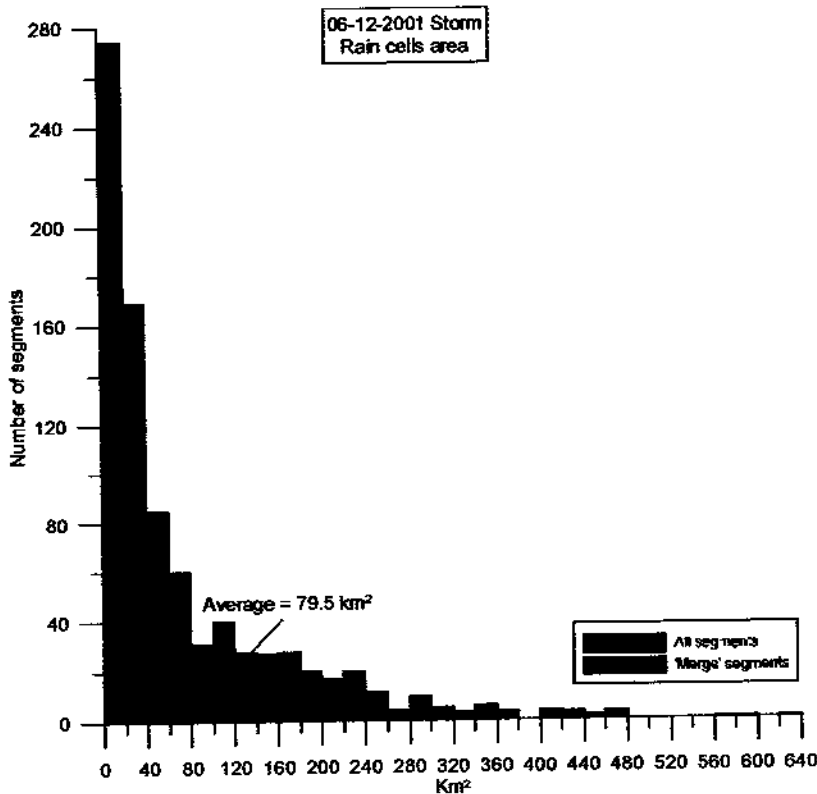
טווח השגיאה בזיהוי הקונקטורים בין תאי הגשם עבור הסופה הנוכחית עמד על 3.5%, כאשר האלגוריתם מעריך ביתר את כמות תאי הגשם הנולדים והמתים, כתוצאה מהערכת חסר בפיצול ואיחוד התאים (בהתאמה, טבלה 3).

	Model/Ref.	%	Model	Ref.	Difference
Birth	1.12	11.6%	183	164	19
Death	1.10	9.9%	144	131	13
Tracking	1.01	1.1%	464	459	5
Split	0.86	-14.2%	127	148	-21
Merge	0.94	-6.3%	177	189	-12

טבלה 3 – סיכום שגיאות המודל לסופת הגשם של ה-6 בדצמבר 2001 (חצות עד 12 בצהריים). Model מתייחס לתוצאות המודל הצפויות ו-Ref הינו רפרנס סובייקטיבי של התוצאות הצפויות. ישנה הערכת יתר של מספר התאים הנולדים והמתים (כ-12% ו-10% בהתאמה), המסתכמת בכ-20 תאים (כ-10% מכלל תאי הגשם בסופה). הערכת יתר זו נגרמת כתוצאה מהערכת חסר בפיצול ואיחוד התאים (כ-14% ו-6% בהתאמה), המסתכמת אף היא בכ-20 תאי גשם.

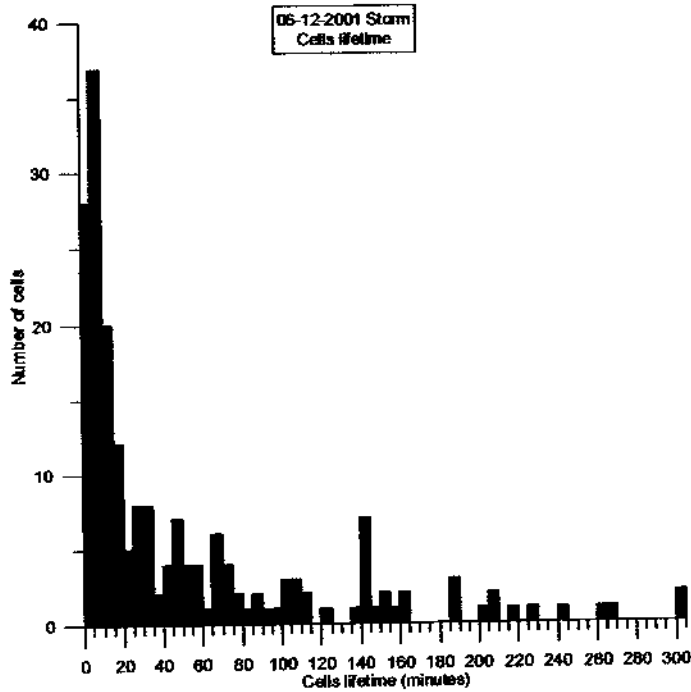
תאי הגשם בהם הטעויות שכיחות הינם התאים בעלי השטח הקטן והם אינם התאים

הדומיננטיים במרחב (איור 12, דוגמה על שטחי תאים בהם לא התבצע איחוד).

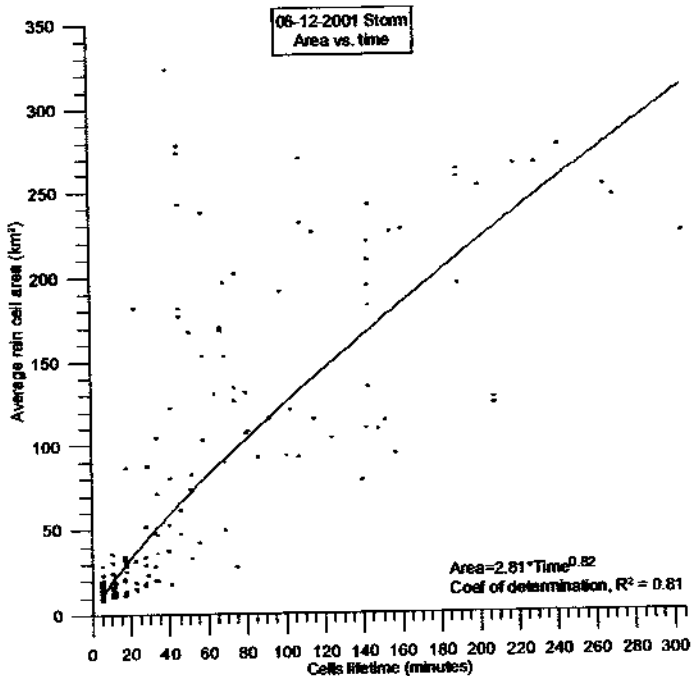


איור 12 – היסטוגרמה המתארת את שטח תאי הגשם במהלך הסופה (אדום). העמודות הכחולות מייצגות את תאי הגשם שלא אוחדו (מייצגים את השגיאה), תאי גשם אלו נמנים עם השטחים הקטנים ביותר במודל.

העקיבה אחרי תאי הגשם בזמן מאפשרת ביצוע חיתוכים סטטיסטיים שונים, לדוגמה מעקב אחרי משך חיי התא בסופה (איור 13), מציאת היחס בין משך חיי תא הגשם לשטחו הממוצע (איור 14), שינוי עוצמת הגשם הממוצעת בתא נתון למשך זמן וכו'. הנתונים הסטטיסטיים הללו ישמשו כקלט בשלב הבא עבור מנוע מזג-האוויר הסטוכסטי.



איור 13 – היסטוגרמה המציגה את משך חיי תאי הגשם במהלך הסופה עבור תאי הגשם במצב "עקיבה" בלבד (ללא פוטנציאל האיחוד).



איור 14 – היחס בין שטח תא הגשם הממוצע למשך הופעתו בסופה. קו המגמה (פונקציה בחזקה, קו שחור) מצביע על קשר כמעט-ליניארי בין גודל התא למשך הופעתו בסופה.

- Alpert, P. et al., 2002. The paradoxical increase of Mediterranean extreme daily rainfall in spite of decrease in total values. *Geophysical Research Letters*, 29(11).
- Alpert, P., Halfon, N., Levin, Z., 2008a. Does air pollution really suppress precipitation in Israel? *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(4): 933-943.
- Alpert, P., Halfon, N., Levin, Z., 2009. Comments on "Does Air Pollution Really Suppress Precipitation in Israel?" Reply. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(8): 1751-1754.
- Alpert, P., Krichak, S.O., Shafir, H., Haim, D., Osetinsky, I., 2008b. Climatic trends to extremes employing regional modeling and statistical interpretation over the E. Mediterranean. *Glob. Planet. Change*, 63(2-3): 163-170.
- Alpert, P., Osetinsky, I., Ziv, B., 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.
- Apipattanavis, S., Podesta, G., Rajagopalan, B., Katz, R.W., 2007. A semiparametric multivariate and multisite weather generator. *Water Resour. Res.*, 43.
- Bahat, Y., Grodek, T., Lekach, J., Morin, E., 2009. Rainfall-runoff modeling in a small hyper-arid catchment. *Journal of Hydrology*, 373(1-2): 204-217.
- Bellone, E., Hughes, J.P., Guttorp, P., 2000. A hidden Markov model for downscaling synoptic atmospheric patterns to precipitation amounts. *Clim. Res.*, 15(1): 1-12.
- Ben-Gai, T., Bitan, A., Manes, A., Alpert, P., Rubin, S., 1998. Spatial and temporal changes in rainfall frequency distribution patterns in Israel. *Theor. Appl. Climatol.*, 61(3-4): 177-190.
- Black, E., 2009. The impact of climate change on daily precipitation statistics in Jordan and Israel. *Atmos. Sci. Lett.*, 10(3): 192-200.
- Chin, E.H., 1977. MODELING DAILY PRECIPITATION OCCURRENCE PROCESS WITH MARKOV-CHAIN. *Water Resour. Res.*, 13(6): 949-956.
- Dankers, R., Feyen, L., 2008. Climate change impact on flood hazard in Europe: An assessment based on high-resolution climate simulations. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 113(D19).
- Dankers, R., Feyen, L., 2009. Flood hazard in Europe in an ensemble of regional climate scenarios. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 114.
- Dixon, M., Wiener, G., 1993. TITAN - THUNDERSTORM IDENTIFICATION, TRACKING, ANALYSIS, AND NOWCASTING - A RADAR-BASED METHODOLOGY. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 10(6): 785-797.
- Evans, J.P., 2009. 21st century climate change in the Middle East. *Clim. Change*, 92(3-4): 417-432.
- Feral, L., Mesnard, F., Sauvageot, H., Castanet, L., Lemorton, J., 2000. Rain cells shape and orientation distribution in south-west of France. *Phys. Chem. Earth Pt B-Hydrol. Oceans Atmos.*, 25(10-12): 1073-1078.
- Feral, L., Sauvageot, H., Castanet, L., Lemorton, J., 2003a. HYCELL - A new hybrid model of the rain horizontal distribution for propagation studies: 1. Modeling of the rain cell. *Radio Sci.*, 38(3).
- Feral, L., Sauvageot, H., Castanet, L., Lemorton, J., 2003b. HYCELL - A new hybrid model of the rain horizontal distribution for propagation studies: 2. Statistical modeling of the rain rate field. *Radio Sci.*, 38(3).
- Fowler, H.J., Wilby, R.L., 2010. Detecting changes in seasonal precipitation extremes using regional climate model projections: Implications for managing fluvial flood risk. *Water Resour. Res.*, 46.
- Fulton, R.A., Breidenbach, J.P., Seo, D.J., Miller, D.A., O'Bannon, T., 1998. The WSR-88D rainfall algorithm. *Weather Forecast.*, 13(2): 377-395.
- Givati, A., Rosenfeld, D., 2004. Quantifying precipitation suppression due to air pollution. *Journal of Applied Meteorology*, 43(7): 1038-1056.
- Givati, A., Rosenfeld, D., 2009. Comments on "Does Air Pollution Really Suppress Precipitation in Israel?". *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(8): 1733-1750.

- Goldreich, Y., Mozes, H., Rosenfeld, D., 2004. Radar analysis of cloud systems and their rainfall yield, in Israel. *Israel Journal of Earth Sciences*, 53(2): 63-76.
- Halfon, N., Levin, Z., Alpert, P., 2009. Temporal rainfall fluctuations in Israel and their possible link to urban and air pollution effects. *Environ. Res. Lett.*, 4(2).
- IPCC, 2007. Fourth Assessment Report, Climate Change, Synthesis Report.
- Jacoby, Y. et al., 2008. Late Holocene upper bounds of flood magnitudes and twentieth century large floods in the ungauged, hyperarid alluvial Nahal Arava, Israel. *Geomorphology*, 95(3-4): 274-294.
- Johnson, J.T. et al., 1998. The storm cell identification and tracking algorithm: An enhanced WSR-88D algorithm. *Weather Forecast.*, 13(2): 263-276.
- Karklinsky, M., Morin, E., 2006. Spatial characteristics of radar-derived convective rain cells over southern Israel. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(5): 513-520.
- Kioutsioukis, I., Melas, D., Zanis, P., 2008. Statistical downscaling of daily precipitation over Greece. *International Journal of Climatology*, 28(5): 679-691.
- Krajewski, W.F., Villarini, G., Smith, J.A., 2010. RADAR-RAINFALL UNCERTAINTIES Where are We after Thirty Years of Effort? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(1): 87+.
- Krichak, S.O., Alpert, P., Kunin, P., 2010. Numerical simulation of seasonal distribution of precipitation over the eastern Mediterranean with a RCM. *Clim. Dyn.*, 34(1): 47-59.
- Kyznarova, H., Novak, P., 2009. CELLTRACK - Convective cell tracking algorithm and its use for deriving life cycle characteristics. *Atmos. Res.*, 93(1-3): 317-327.
- Li, Y., Smith, J., 2009. A Statistical Downscaling Model for Southern Australia Winter Rainfall. *Journal of Climate*, 22(5): 1142-1158.
- Lynn, B., Yair, Y., 2010. Prediction of lightning flash density with the WRF model. *Adv. Geosci.*, 23: 11-16.
- Mandapaka, P.V., Krajewski, W.F., Ciach, G.J., Villarini, G., Smith, J.A., 2009. Estimation of radar-rainfall error spatial correlation. *Advances in Water Resources*, 32(7): 1020-1030.
- Mathurin, R., Rottembourg, B., 1997. A Combinatorial Approach For Rain Cell Tracking, *Applied Geologic Remote Sensing*, Denver, Colorado, USA, pp. 17-19.
- Mehrotra, R., Sharma, A., 2006. A nonparametric stochastic downscaling framework for daily rainfall at multiple locations. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 111(D15).
- Mehrotra, R., Sharma, A., 2009. Evaluating spatio-temporal representations in daily rainfall sequences from three stochastic multi-site weather generation approaches. *Advances in Water Resources*, 32(6): 948-962.
- Morin, E., Gabella, M., 2007. Radar-based quantitative precipitation estimation over Mediterranean and dry climate regimes. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 112(D20).
- Morin, E. et al., 2006. Spatial patterns in thunderstorm rainfall events and their coupling with watershed hydrological response. *Advances in Water Resources*, 29(6): 843-860.
- Morin, E., Jacoby, Y., Navon, S., Bet-Halachmi, E., 2009. Towards flash-flood prediction in the dry Dead Sea region utilizing radar rainfall information. *Advances in Water Resources*, 32(7): 1066-1076.
- Moron, V., Robertson, A.W., Ward, M.N., Ndiaye, O., 2008. Weather types and rainfall over Senegal. part II: Downscaling of GCM simulations. *Journal of Climate*, 21(2): 288-307.
- Onol, B., Semazzi, F.H.M., 2009. Regionalization of Climate Change Simulations over the Eastern Mediterranean. *Journal of Climate*, 22(8): 1944-1961.
- Pierce, C.E. et al., 2004. The nowcasting of precipitation during Sydney 2000: An appraisal of the QPF algorithms. *Weather Forecast.*, 19(1): 7-21.
- Rabiner, L.R., 1989. A TUTORIAL ON HIDDEN MARKOV-MODELS AND SELECTED APPLICATIONS IN SPEECH RECOGNITION. *Proceedings of the IEEE*, 77(2): 257-286.
- Rimmer, A., Salinger, Y., 2006. Modelling precipitation-streamflow processes in karst basin: The case of the Jordan River sources, Israel. *Journal of Hydrology*, 331(3-4): 524-542.

- Robertson, A.W., Ines, A.V.M., Hansen, J.W., 2007. Downscaling of seasonal precipitation for crop simulation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46(6): 677-693.
- Robertson, A.W., Kirshner, S., Smyth, P., 2004. Downscaling of daily rainfall occurrence over northeast Brazil using a hidden Markov model. *Journal of Climate*, 17(22): 4407-4424.
- Rozalis, S., Morin, E., Yair, Y., Price, C., In Press, Corrected Proof. Flash flood prediction using an uncalibrated hydrological model and radar rainfall data in a Mediterranean watershed under changing hydrological conditions. *Journal of Hydrology*.
- Samuels, R., Rimmer, A., Alpert, P., 2009. Effect of extreme rainfall events on the water resources of the Jordan River. *Journal of Hydrology*, 375(3-4): 513-523.
- Sheffer, N.A. et al., 2010. Hydrometeorological daily recharge assessment model (DREAM) for the Western Mountain Aquifer, Israel: Model application and effects of temporal patterns. *Water Resour. Res.*, 46.
- Villarini, G., Krajewski, W.F., 2010. Sensitivity Studies of the Models of Radar-Rainfall Uncertainties. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(2): 288-309.
- Watson, B., Chung Tsoi, A., 1992. Second order Hidden Markov Models for speech recognition, Fourth Australian International Conference on Speech and Technology, pp. 146-151.
- Wetterhall, F., Bardossy, A., Chen, D.L., Halldin, S., Xu, C.Y., 2009. Statistical downscaling of daily precipitation over Sweden using GCM output. *Theor. Appl. Climatol.*, 96(1-2): 95-103.
- Wilby, R.L., Beven, K.J., Reynard, N.S., 2008. Climate change and fluvial flood risk in the UK: more of the same? *Hydrological Processes*, 22(14): 2511-2523.
- Wilks, D.S., Wilby, R.L., 1999. The weather generation game: a review of stochastic weather models. *Progress in Physical Geography*, 23(3): 329-357.
- Wittenberg, L., Kutiel, H., Greenbaum, N., Inbar, M., 2007. Short-term changes in the magnitude, frequency and temporal distribution of floods in the Eastern Mediterranean region during the last 45 years - Nahal Oren, Mt. Carmel, Israel. *Geomorphology*, 84(3-4): 181-191.
- Yair, Y. et al., 2010. Predicting the potential for lightning activity in Mediterranean storms based on the Weather Research and Forecasting (WRF) model dynamic and microphysical fields. *J. Geophys. Res.*, 115(D4): D04205.
- Yakir, H., Morin, E., In preparation. Hydrologic Response of a Semi-arid Watershed to Spatial and Temporal Characteristics of Convective Rain Cells. The Hebrew University, Jerusalem.
- Zucchini, W., Guttorp, P., 1991. A HIDDEN MARKOV MODEL FOR SPACE-TIME PRECIPITATION. *Water Resour. Res.*, 27(8): 1917-1923.