

# שינויים בין-עשוריים באנומליות זרימת האוויר והגשמים בישראל

פבל קישצ'ה, יוסף ברקן ופנחס אלפרט  
 החוג לגיאופיסיקה ולמדעים פלנטריים, אוניברסיטת תל-אביב

## מבוא

שינויים לטווח ארוך של הגשם בישראל הם נושא למחקרים מטאורולוגיים רבים (Diskin, 1970; Goldreich & Manes, 1979; Otterman et al., 1990; Ben-Gai et al., 1993; 1996; Steinberger & Gazit-Yaari, 1994). ניתן להבחין בין שתי גישות, המנסות להסביר את הסיבות לשינויים אלה. הגישה הראשונה מתייחסת לממצאיהם של: Goldreich & Manes, 1979; Otterman et al., 1990; Ben-Gai et al., 1993; 1994 שמצאו הגברה של הגשם באזור מרכז הארץ ודרומה, בעיקר בעונות המעבר – באפריל ובאוקטובר. ממצאים אלה תומכים בהנחה, ששינויים מקומיים דומיננטיים יותר בהשוואה לפקטורים גלובליים סינופטניים. עיבוד הקרקע משנה את הפרמטרים של הקרקע, המשפיעים על עיצוב שכבת הגבול ועל תכונות זרימת האוויר הקונבקטיבית. הגישה השנייה מתייחסת לממצאיהם של שטיינברגר וגזית-יערי (Steinberger & Gazit-Yaari, 1996), שניתחו את ההבדל במגמה בין התחנות הצפוניות בישראל ובין התחנות הדרומיות. באזור הצפוני קיימת מגמת ירידה בגשם, ואילו באזור מרכז ישראל ודרומה קיימת מגמת עלייה. סברתם הייתה, שההשפעה העיקרית מקורה בגורמים בסקלה סינופטית. במחקרנו האחרונים הראינו, שכמות הגשם במזרח היס-התיכון תלויה בתנודות של שתי מערכות לחץ בסקלה גדולה: המערכת האטלנטית והמערכת האירופית (קישצ'ה ועמיתיו, 2002; Krichak et al., 2002). ערכה של תנודת המערכת האטלנטית, המכונה North Atlantic Oscillation (NAO), נקבע על-ידי הפרש בלחץ הפנים בין אזור הלחץ הגבוה שמעל האיים האזוריים (Azores Islands) ובין אזור הלחץ הנמוך, שמרכזו ליד איסלנד (Iceland). ערכה של תנודת המערכת האירופית, המכונה East Atlantic / West Russian Pattern (EA/WR), נקבע על-ידי הפרש בלחץ הפנים בין שני מרכזים: המרכז שמעל מערב אירופה וזה שמעל הים הכספי.

כוונת המחקר זה הינה לערוך ניתוח השוואתי של זרימות במטרה לברר פרטים על הגורמים המשפיעים על תנאי התפתחות הגשם, ואף להעריך את התפקיד של מערכות הלחץ הללו.

מטרתו של המחקר הנוכחי הינן:

- ניתוח הזרימות הנוצרות על-ידי המערכות EA/WR ו-NAO והקשר ביניהן ובין התנאים המתאימים להתפתחות הגשם באזור.
- בדיקת הקשר בין מגמת המערכות EA/WR ו-NAO ובין מגמת הגשם בישראל.

## ניתוח הזרימות הנוצרות על-ידי המערכות EA/WR ו-NAO

המחקר מבוסס על תוצאות שהתקבלו מה-NCEP/NCAR Reanalysis Data לתקופה של 41 שנים, משנת 1958 עד שנת 1998. הרזולוציה האופקית של הנתונים היא  $2.5^{\circ}$ . נחקרו רק חודשי החורף – מדצמבר עד פברואר – בשל היותם תקופת הגשם העיקרית באזור הדרומי-מזרחי של היס-התיכון.

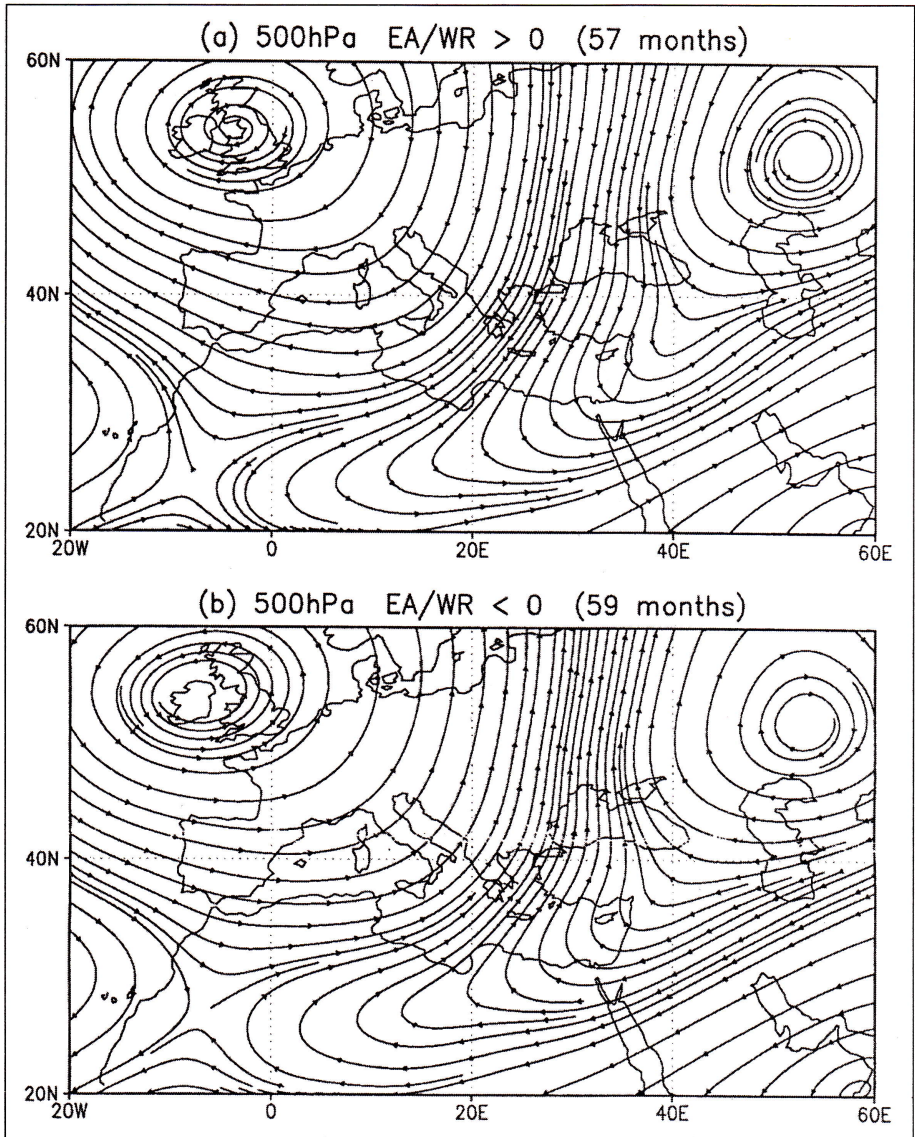
המערכות EA/WR ו-NAO קובעות בסקלה גדולה את תנאי התפתחות הגשם באזור. נשאלת השאלה, מהי מידת ההשפעה של כל המערכות ואיך השתנתה השפעתן במרוצת עשרות השנים האחרונות?

התברר, שיש תלות חיובית בין האינדקס EA/WR ובין כמות הגשם באזור: אנומליות כמות הגשם חיוביות כשאינדקס זה חיובי ושליליות – כשהאינדקס שלילי. לעומת זאת חלשה השפעת ה-NAO על כמות הגשם באזור בהשוואה להשפעת ה-EA/WR. במקרים, שבהם  $NAO < 0$  או  $NAO > 0$ , אין שינוי משמעותי בכמות הגשם באזור (קישציה ועמיתיו, 2002; Krichak et al., 2002).

מידע נוסף מתקבל באמצעות ניתוח השוואתי של השינויים בזרימות, המסביר תוצאות אלה בצורה מוחשית. מפות אנומליה של הזרימות, כאשר אינדקס EA/WR חיובי או שלילי, מוצגות במפה 1. הקווים המכונים streamlines מחברים את הנקודות, שאנומליית וקטור הרוח משיקה בהן לקווים אלה. ניתן לראות שבמקרים, שבהם  $EA/WR > 0$ , אנומליית הזרימה היא ציקלונית. כתוצאה מכך יש לאוויר קר מהאזורים הארקטיים נטייה להגיע לאזורנו מצד היס, ואז נוצרים תנאים מועדפים להתפתחות גשם. כאשר  $EA/WR < 0$  ניתן לראות, שאנומליית הזרימה היא אנטי ציקלונית ואיננה מעודדת התפתחות גשם.

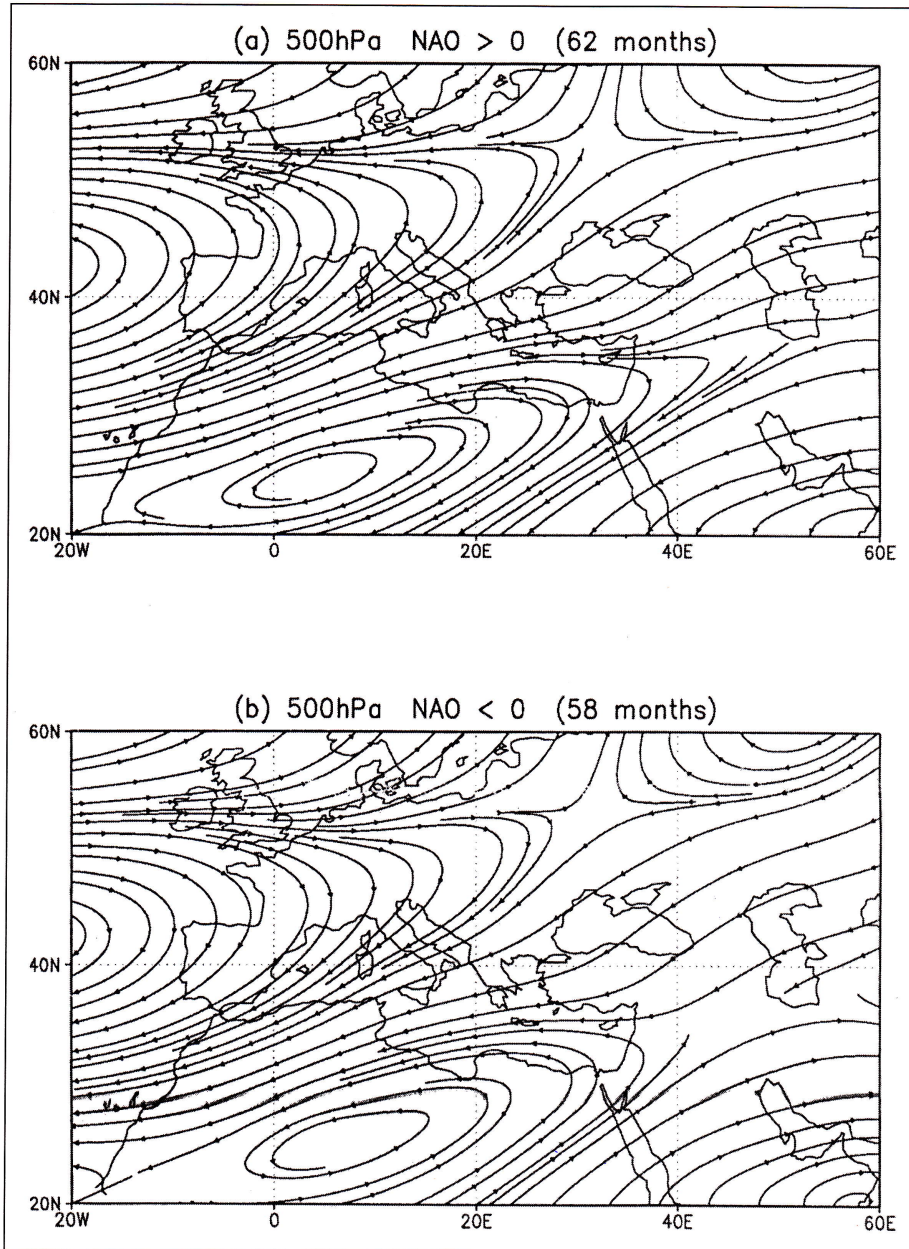
מפות ה-streamlines, המתאימות לאינדקס NAO, מוצגות במפה 2. ניתן לראות, שכאשר  $NAO > 0$  יש צירקולציה אנטי ציקלונית, שמרכזה מעל אפריקה הצפונית. כיוון שצפיפות ה-streamlines מעל האזור קטנה, הרוח חלשה מאוד. במקרה של  $NAO < 0$  מושפע האזור אמנם מזרימה ציקלונית חלשה מכיוון דרום-מזרח, אך כיוון שזרימה זו חמה ויבשה בדרך-כלל ואיננה תומכת בגשם מסתבר, שהשפעת ה-NAO בלבד על הגשם מעטה. אנומליות הזרימה מעל מזרח היס-התיכון (מפה 2) מתאימות לקורלציות גבוהות בין אינדקס NAO ובין הטמפרטורה והלחץ בישראל (Ben-Gai et al., 2001). הקורלציה בין NAO ובין הלחץ בישראל חיובית וגבוהה – כ- $+0.9$ <sup>1</sup> והסיבה לכך היא שהלחצים ב-NAO חיובי גבוהים. בד בבד הקורלציה בין NAO ובין הטמפרטורה בישראל שלילית וגבוהה ועומדת על כ- $-0.9$ . הסיבה לכך היא שב-NAO חיובי הזרימה ימית וקרירה יותר בהשוואה לזרימות הדרומיות-מזרחיות היבשות והחמות יחסית ב-NAO שלילי.

1. ערך הקורלציה הראלי ללא החלקה נמוך מעט יותר (ללא ממוצע רץ של חמש שנים).



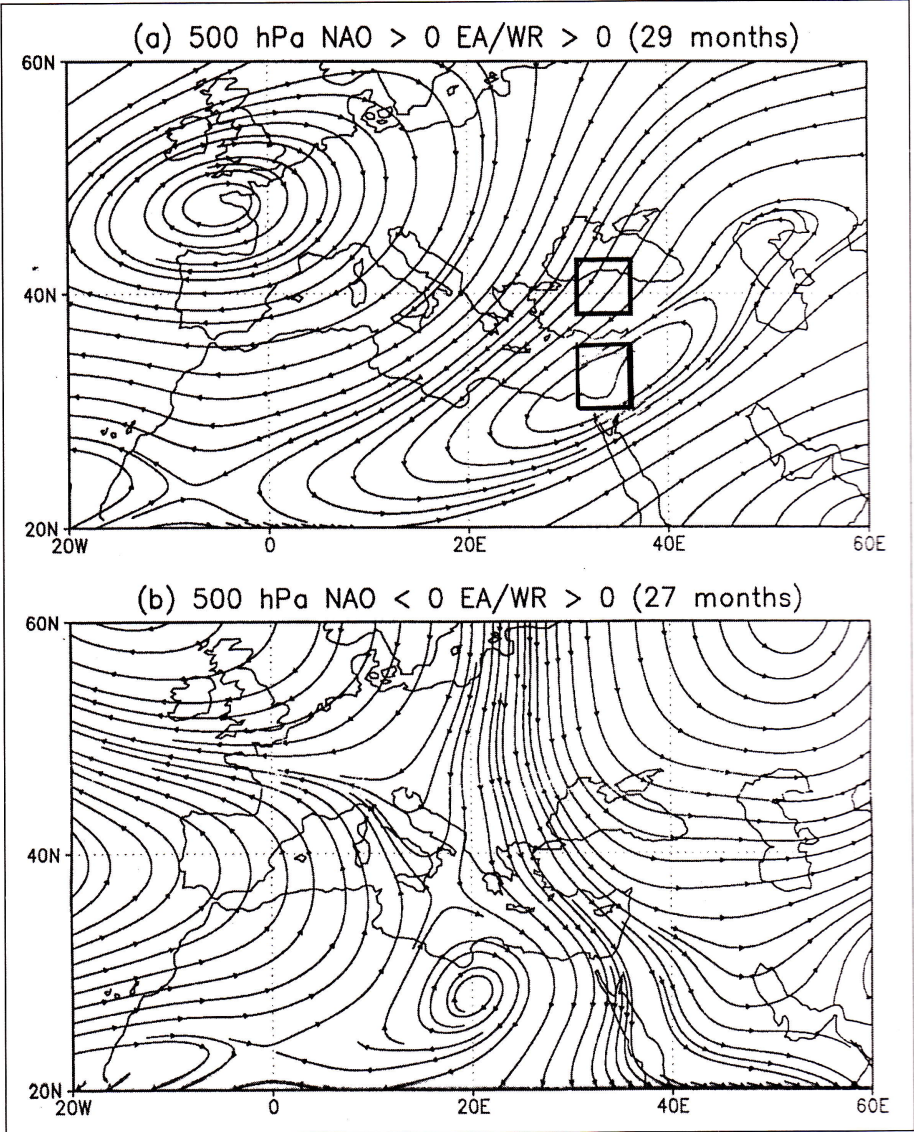
**מפה 1:** מפות האנומליה של הזרימה (הסטיות מן הממוצע) לחודשים דצמבר-פברואר, המוצגות באמצעות קווי זרימה (streamlines), כאשר אינדקס EA/WR חיובי (a) ושלילי (b). הנתונים נלקחו מתוך הניתוח החדש של NCEP.

במציאות פועלות המערכות NAO ו- EA/WR ביחד, וארבעה צירופים אפשריים קיימים ביניהם. סטיות כמות הגשם באזור הדרומי-מזרחי של הים-התיכון חיוביות ביותר כאשר שני האינדקסים חיוביים, כלומר:  $NAO > 0$  ו-  $EA/WR > 0$ , ושליליות ביותר כאשר  $NAO > 0$  ו-  $EA/WR < 0$  (קישציה ועמיתיו, 2002; Krichak et al., 2002). מפות ה- streamlines בצירוף EA/WR חיובי עם NAO חיובי או שלילי מוצגות במפה 3. ניתן לראות שינוי



**מפה 2:** מפות האנומליה של הזרימה (סטיות מן הממוצע) לחודשים דצמבר-פברואר, המוצגות באמצעות קווי זרימה (streamlines), כאשר אינדקס NAO חיובי (a) ושלילי (b). הנתונים נלקחו מתוך הניתוח החדש של NCEP.

משמעותי הודות להשפעה הנוספת של ה-NAO. במקרה של  $NAO > 0$  ו- $EA/WR > 0$  מופיע שקע מעל אזורנו בדיוק, ולכן התנאים מתאימים יותר להתפתחות גשם. צירוף של  $NAO < 0$  ו- $EA/WR > 0$  יוצר גם הוא תנאים מתאימים לגשם באזור תודות לזרימה צפונית-מערבית קרה, המגיעה מצד הים, אם כי בחלק הצפוני של האזור בלבד.



מפה 3: מפות האנומליה של הזרימה (סטיות מהממוצע), המוצגות באמצעות ה-streamlines במקרים שבהם EA/WR חיוביים (a) וכאשר EA/WR חיובי ו-NAO שלילי (b). האזור: 30°N – 35°N, 33°E – 37°E מסומן במלבן.

### השפעת המערכות NAO ו-EA/WR על הפרמטרים האחראיים לכמות הגשם

התנאים המתאימים להתפתחות הגשם מאופיינים בהתכנסות של זרימות אופקיות קרות ולחות, המלוות בזרימה אנכית חזקה. אחד התנאים החשובים ביותר להתפתחות זרימה

אנכית הוא אי יציבות סטטית של האטמוספירה, שערכה נקבע על-ידי מפל הטמפרטורה. בקירוב גס ניתן להעריך השתנות ביציבות הטרופוספירה הנמוכה באמצעות אנומליה של מפל הטמפרטורה בין מפלסי הלחץ 925 ו-500 hPa. נמצא, שכאשר  $EA/WR > 0$  ללא השפעת NAO האנומליה של מפל הטמפרטורה שלילית, כלומר האטמוספירה יציבה פחות. אולם, בצירוף  $EA/WR > 0$  עם  $NAO > 0$  גוברת אי היציבות, ולעומת זאת בצירוף  $EA/WR > 0$  עם  $NAO < 0$  נשארת האטמוספירה יציבה.

את מידת ההתכנסות באטמוספירה ניתן להעריך באמצעות הערבוליות (Vorticity). מניתוח אנומליות הערבוליות עולה, שאינדקס  $EA/WR > 0$  מתאים לערבוליות חיובית, כלומר יש באזור התכנסות וצירקולציה ציקלונית. מתברר, שצירוף של  $EA/WR > 0$  עם  $NAO > 0$  מגדיל את הערבוליות, ולעומת זאת צירוף של  $EA/WR > 0$  עם  $NAO < 0$  מקטין אותה.

טבלה 1 מסכמת את תוצאות ניתוח ההשפעה של  $EA/WR$  ו- $NAO$  על האנומליות של הפרמטרים האטמוספריים, האחראיים לכמות הגשם באזור  $30^\circ N - 35^\circ N, 33^\circ E - 37^\circ E$  (מפה 3a). שטח זה מייצג את כל האזור הדרומי-מזרחי של היס-התיכון. ניתן לראות, שאינדקס  $EA/WR > 0$  מלווה באוויר קר ולח יותר מהמוצע, וכי במקרה זה סטיות הטמפרטורה מהמוצע שליליות וסטיות הלחות חיוביות. גם הערבוליות חיובית יותר ובגובה גאופוטנציאלי ניכרת ירידה. שינוי זה בפרמטרים האטמוספריים מתאים להתפתחות גשם. צירוף של  $EA/WR > 0$  עם  $NAO > 0$  יוצר תנאים מתאימים יותר לגשם, ואילו צירוף של  $EA/WR > 0$  עם  $NAO < 0$  יוצר תנאים מתאימים פחות.

**טבלה 1:** אנומליה ( $\Delta$ ) של הפרמטרים האטמוספריים (סטייה מהמוצע) באזור  $37^\circ E, 30^\circ N - 35^\circ N, 33^\circ E$  לצירופים שונים בין האינדקסים  $EA/WR$  ו- $NAO$ .

פרמטרים אטמוספריים							צירופים של אינדקסים
$\Delta H(500)$	$\Delta RH(925)$	$\Delta T(850)$	$\Delta \zeta(500)$	$\Delta \zeta(925)$	$\Delta \Gamma$	$\Delta P$	
-14.34	0.71	-0.84	3.05	1.35	-0.039	6.14	$EA/WR > 0$
-24.48	0.96	-1.50	6.05	1.95	-0.064	9.71	$EA/WR > 0$ & $NAO > 0$
-2.51	0.41	-0.13	-0.35	0.64	-0.007	2.45	$EA/WR > 0$ & $NAO < 0$
14.97	-0.24	0.79	-2.9	-1.00	0.049	-5.25	$EA/WR < 0$
19.01	-0.37	0.55	-1.3	-0.02	0.081	-9.54	$EA/WR < 0$ & $NAO > 0$
13.57	-0.38	1.08	-4.5	-1.87	0.024	-2.23	$EA/WR < 0$ & $NAO < 0$

הפרמטרים הם:  $H(500)$  – גובה גאופוטנציאלי ב-500 hPa (מ);  $RH(925)$  – לחות יחסית במפלס לחץ 925 hPa (%);  $T(850)$  – טמפרטורה ב-850 hPa (K);  $\zeta(500)$  – וורטיסיטי ב-500 hPa ( $10^{-6} s^{-1}$ );  $\zeta(925)$  – וורטיסיטי במפלס לחץ 925 hPa ( $10^{-6} s^{-1}$ );  $\Gamma$  – מפל הטמפרטורה בין מפלסי הלחץ 925 ו-500 hPa (K/km);  $P$  – עצמת הגשם (מ"מ לחודש).

ניתן לסכם ולומר, שכמות הגשם באזור תלויה בעיקר במערכת  $EA/WR$ , ותפקידה של  $NAO$  משני. יש להדגיש, שלמרות ש- $NAO$  משפיעה רק בצירוף  $EA/WR$ , במקרים אלה (שהצירוף קיים) השפעת ה- $NAO$  משמעותית מאוד. טבלה 2 מייצגת סטיות, המתאימות לצירופים השונים בין האינדקסים  $EA/WR$  ו- $NAO$  לעומת סטיות המתאימות ל- $EA/WR > 0$

**טבלה 2:** סטיות של הפרמטרים האטמוספריים, המתאימות לצירופים השונים בין אינדקסים EA/WR ו-NAO, לעומת סטיות המתאימות ל- $EA/WR > 0$  בלבד (ב-%).

פרמטרים אטמוספריים (%)							צירופים של אינדקסים
$\Delta H(500)$	$\Delta RH(925)$	$\Delta T(850)$	$\Delta c(500)$	$\Delta c(925)$	$\Delta \Gamma$	$\Delta P$	
70.74	34.94	78.84	98.25	44.43	66.36	58.16	EA/WR > 0 & NAO > 0
-82.48	-41.95	-84.84	-111.56	-52.29	-80.83	-60.04	EA/WR > 0 & NAO < 0

בלבד. מנתוני טבלה 2 מסתבר, כי לסימן ה-NAO בצירוף  $EA/WR > 0$  יש השפעה ניכרת על הפרמטרים האטמוספריים הרלוונטיים: בכ-70%–80% בטמפרטורה, במפל הטמפרטורה ובגובה הגאופוטנציאלי, בכ-35%–40% בלחות יחסית וב-60% בעצמת הגשם. הקשר בין NAO ובין הפרמטרים האטמוספריים נובע מהשפעת ה-NAO על מיקום מרכז השקע, שנוצר

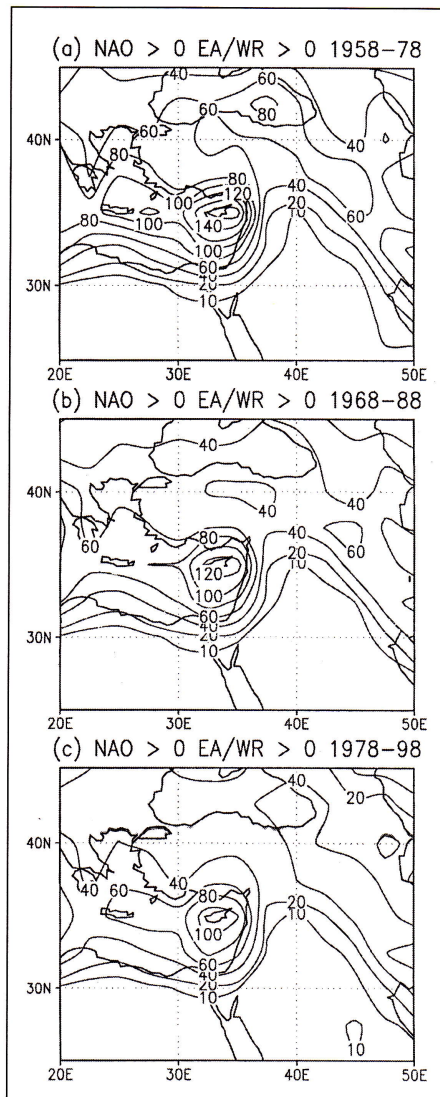
על-ידי  $EA/WR > 0$ . במקרה ש- $NAO > 0$  זז השקע דרומה מהים הכספי ומגיע לאזור, ואילו במקרה ש- $NAO < 0$  זז השקע צפונה מהים הכספי (מפה 3).

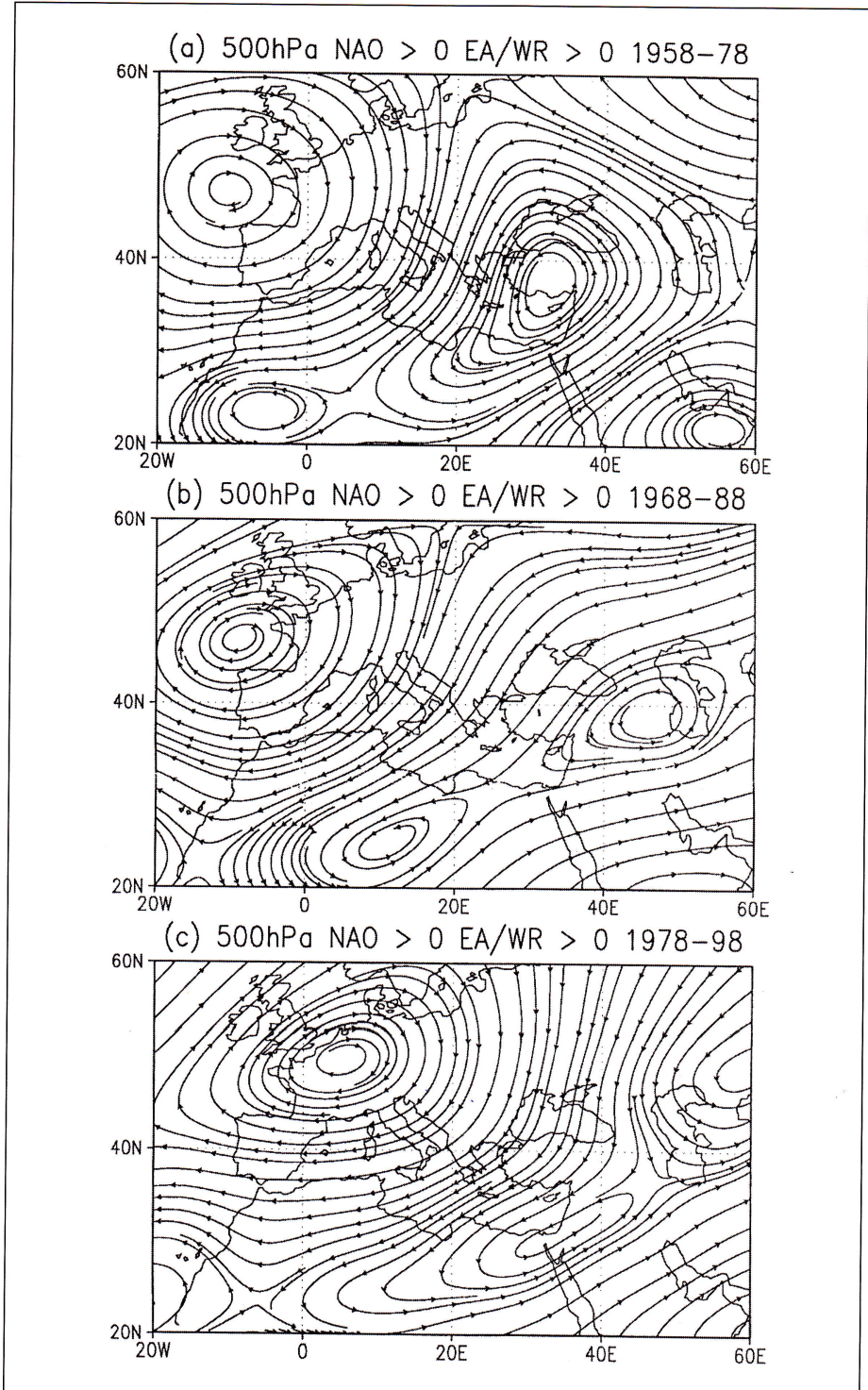
## מגמות הזרימות והגשם בישראל

ממצאים ממחקרים קודמים, שמחקר זה מתבסס עליהם, מוכיחים, שבעשורים האחרונים ניכרת מגמת עלייה באינדקס Hurrell, 1995; Hurrell & van Loon, 1997). מגמת עלייה קיימת גם באינדקס EA/WR (Loon, 1997; Krichak et al., 2002). מגמות אלה באות לידי ביטוי בשניונים של הזרימות ושל עצמת הגשם עם הזמן.

התבוננות בדינמיקה של תבניות טיפוסים של עצמת הגשם (מ"מ בחודש) בשלוש תקופות של 21 שנים, בחודשים שבהם NAO ו- $EA/WR$  היו חיוביים (תבניות הטיפוסים של עצמת הגשם מוצגות במפה 4, צד שמאל), מלמדת על מגמת ירידה בעצמת הגשם באזור, ההולכת וקטנה מ-1958 עד 1978. יש לציין, כי השינוי

**מפה 4:** מפות עצמת הגשם במקרה שהאינדקסים EA/WR ו-NAO חיוביים. המפות מוצגות לשלוש תקופות של 21 שנים a: 1978–1958, b: 1968–1988, c: 1978–1998.





**מפה 5:** מפות האנומליה של הזרימה מהממוצע, המוצגות באמצעות ה-streamlines במקרים ש-  
 EA/WR חיוביים לשלוש תקופות של 21 שנים (a): 1958-1978, (b): 1968-1988, (c):

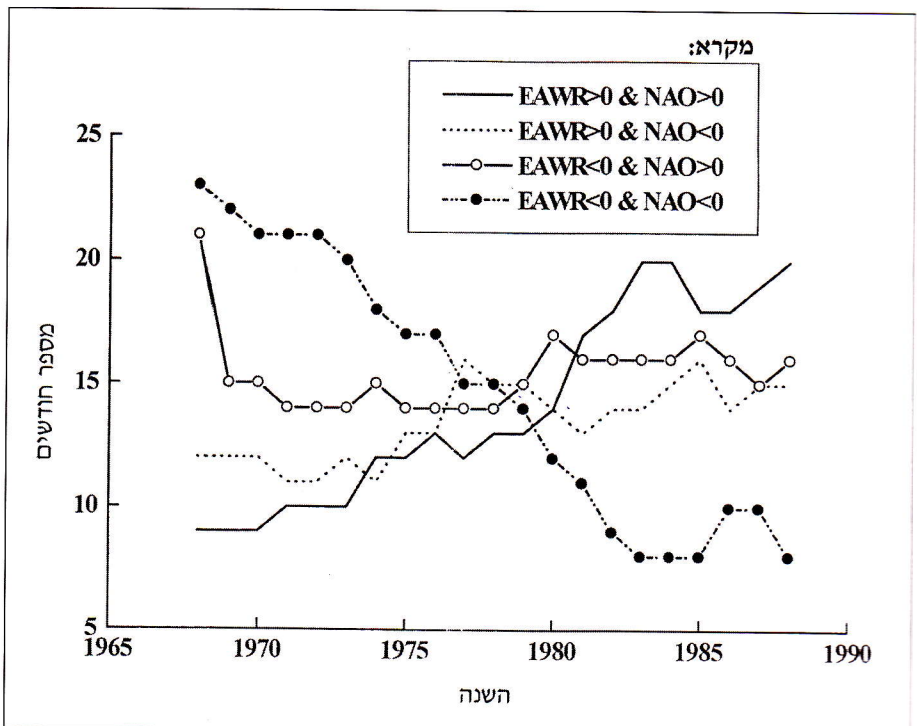
(1998-1978).



הגדול ביותר ניכר בחלק הצפוני של האזור. ירידת עצמת הגשם בחלק הדרומי חזקה פחות. התבניות של עצמת הגשם דומות מאוד לתבניות של חודשים גשומים, כאשר עצמת הגשם הייתה מעל הממוצע החודשי לכל התקופה של 41 השנים.

ממצא זה נתמך על-ידי מפות של אנומליות הזרימה לאותם חודשים ולאותן תקופות (מפה 5). בתקופה הראשונה (1958–1978) נראית זרימה ציקלונית מערבית חזקה באזור. מרכז השקע מצוי מעל טורקיה, האוויר מגיע לאזור מצד הים ונוצרים תנאים להתפתחות גשם. בתקופה השנייה (1968–1988) זוהה האנומליה הציקלונית מזרחה ונחלשה. בתקופה האחרונה ניתן לראות שמרכז האנומליה הציקלונית נמצא מעל החלק הדרומי של האזור. כתוצאה מכך קיימת בחלק הצפוני נטייה לזרימה מזרחית ומזג האוויר יבש יחסית. יש לציין, שגם מפות אנומליות הזרימה לחודשים, שהאינדקסים NAO ו- $EA/WR$  חיוביים בהם, דומות מאוד לאותן מפות לחודשים גשומים. כלומר, חודשים גשומים מתאימים לאלה ש- $EA/WR$  ו- $NAO$  חיוביים בהם.

נוסף על ההשפעה על הירידה בעצמת הגשם באות מגמות העלייה של אינדקסים  $EA/WR$  ו- $NAO$  לידי ביטוי בשינוי כמות החודשים עם צירופים שונים של אינדקסים אלה. שינויים עם הזמן במספר החודשים עם צירופים שונים של האינדקסים לטווח רץ לתקופה של 21 שנה מוצגים באיור 1. ניתן לראות, שיש עלייה הדרגתית במספר החודשים, ש- $NAO$  ו- $EA/WR$  חיוביים בהם. לעומת זאת, יש ירידה במספר החודשים, ש- $NAO$  ו- $EA/WR$  שליליים בהם. יש בכך כדי לגרום לשינויים בשיעור עצמת הגשם.



איור 1: שינויים עם הזמן במספר החודשים עם צירופים שונים של האינדקסים  $EA/WR$  ו- $NAO$  לטווח רץ לתקופה של 21 שנה.

## סיכום

ממצאי המחקר מצביעים על המסקנה העיקרית הבאה: תנאי התפתחות הגשם באזורנו תלויים בעיקר במערכת EA/WR, ואילו תפקידה של מערכת NAO משני. מערכת NAO משפיעה על מיקום מרכז השקע, המתאים לאינדקס חיובי של EA/WR ( $EA/WR > 0$ ).

## הכרת תודה

תודה מקרב לב לד"ר יעקב אשל ולבוריס סטרובינץ על עצות מועילות ועזרה. מחקר זה נתמך על-ידי EU DETECT Project Scientific Foundation, חוזה מס' 98-9470, GLOWA-Jordan River Project.

## רשימת מקורות

- קישצ'יה פ', קריצ'אק ש' ואלפרט פ', 2002;  
 "שינויים בין-עשוריים בתבניות האנומליה של לחץ הפנים והגשמים בישראל", בתוך: "אשל (עורך), מחקרי יהודה ושמרון, קובץ יא, מכללת יהודה ושומרון, אריאל, עמ' 287-300.
- Ben-Gai T., Bitan A., Manes A. & Alpert P., 1993;  
 "Long-Term Change in October Rainfall Patterns in Southern Israel", *Theor. Appl. Climatol.*, 46, pp. 209-217.
- Ben-Gai T., Bitan A., Manes A. & Alpert P., 1994;  
 "Long-Term Change in Annual Rainfall Patterns in Southern Israel", *Theor. Appl. Climatol.*, 49, pp. 59-67.
- Ben-Gai T., Bitan A., Manes A., Alpert P. & Kushnir Y., 2001;  
 "Temperature and Surface Pressure Anomalies in Israel and the North Atlantic Oscillation", *Theor. Appl. Climatol.*, 69, pp. 171-177.
- Diskin M.H., 1970;  
 "Factors Affecting Variations of Mean Annual Rainfall in Israel", *Bull. Int. Assoc. Sci. Hydrol.*, 15, pp. 41-49.
- Goldreich Y. & Manes A., 1979;  
 "Urban Effects on Precipitation Patterns in the Greater Tel Aviv Area", *Arch. Meteor. Geophys. Bioklimatol.*, 27B, pp. 213-224.
- Hurrell J.W., 1995;  
 "Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation", *Science*, 269, pp. 676-679.
- Hurrell J.M. & Van Loon H., 1997;  
 "Decadal Variations in Climate Associated with the North Atlantic Oscillation", *Climatic Change*, 36, pp. 301-326.

Krichak S.O., Kishcha P. & Alpert P., 2002;

“Decadal Trends of Main Eurasian Oscillation and the Mediterranean Precipitation”, *Theor. Appl. Climatol.*, 72, pp. 209–220.

Otterman J., Manes A., Rubin S., Alpert P. & Starr D.O’c., 1990;

“An Increase of Early Rains in Southern Israel Following Land-Use Change?”, *Bound.-Layer Meteor.*, 53, pp. 333–351.

Steinberger E.H. & Gazit-Yaari N., 1996;

“Recent Changes in the Spatial Distribution of Annual Precipitation in Israel”, *J. of Climate*, 9, pp. 3328–3336.