

מיון אובייקטיבי של מצבים סינופטיים, והשלכתו להערכות כלכליות של זמינות אנרגית רוח בתנאי מזג אויר שונים בישראל.

חיים שפיר, ברוך זיו, בני נאמן ופנחס אלפרט

החוג לגיאופיסיקה ולמדעים פלנטריים, הפקולטה למדעים מדוייקים, אוניברסיטת תל אביב.

נתקבל לאחר תיקונים 12.1993

תקציר

נערך מיון סינופטי אובייקטיבי העשוי לתרום למציאת הפוטנציאל הכלכלי של המצבים הסינופטיים מבחינת זמינות אנרגית הרוח בשילוב עם צריכת החשמל הכוללת בישראל. המיון נערך על פי נתוני ה-ECMWF בשנת 1985 בשיטת "מיון אשכולות" (Cluster analysis) ונמצאו 20 מצבים סינופטיים שונים. בכל מצב חושבו אנרגית הרוח (א.ר.) ואנרגית החשמל (א.מ.א.) הממוצעות, ולמצבים הסינופטיים ניתנו ערכים כלכליים על פי הצעתם של סגל ואלפרט (1990). נמצא כי הערך הכלכלי הרב ביותר הוא למצב "שקע קפריסאי", ערכים גבוהים גם למצבים: "הפרעה ציקלונית ממוצעת", "אפיק פרסי מתון", "שקע עמוק - אפיק רוס" ו-"אפיק ים סוף מחודד עם ציר מזרחי". המצב הגרוע ביותר מבחינת ניצול אנרגית הרוח הוא ה-"אפיק פרסי חלש", וערכים נמוכים למצבים "אפיק ים סוף מחודד עם ציר מערבי", "אזור לחץ גבוה", "אפיק ים סוף בחורף" ו-"מערכת מקומית של לחץ גבוה". נמצא כי למצבים סינופטיים עם פוטנציאל כלכלי נמוך משקל רב יותר מאשר למצבי פוטנציאל גבוה. ממצאים אלה מאפשרים תחזיות מהימנות בזמן אמיתי של א.ר. וא.מ.א. הצפויות, ועשויות לסייע בהערכות מבצעיות של אנרגית הרוח.

מבוא

הרוח הינה מקור אנרגיה עתיק יומין (טחנות רוח, סירות מפרש), אולם רק בעשור האחרון החל פיתוח נרחב של אמצעים על מנת לרתום מקור אנרגיה זה לצורך הפקת חשמל. לשם כך, מוקמות חוות רוח בארצות רבות בעולם, ולאחרונה גם בצפון ישראל. חוות הרוח ברמת הגולן החלו לאחרונה לפעול ולהפיק חשמל המשולב ברשת הארצית. בהערכות כלכליות של עלות אנרגית רוח (להלן א.ר.) שתסופק לרשת הארצית, תשומת לב מיוחדת צריכה להינתן לכמותה של א.ר. מצד אחד לעומת אנרגית החשמל הנצרכת כתוצאה מתנאי מזג האויר (להלן א.מ.א.) מצד שני. זאת מכיוון שייצור חשמל באמצעים רגילים הולך ונעשה יקר יותר בתנאי עומס גבוהים. שפיר ושות' (1992) ו-Segal et al. (1992) מצאו כי קיים קשר חזק בין התנאים המטאורולוגיים בישראל וצריכת החשמל היומית. מצד שני ידוע כי א.ר. קשורה לתנאים המטאורולוגיים הקיימים. קשר משולש בין א.מ.א. - א.ר. - המצב הסינופטי יתרום להערכות כלכליות ומבצעיות מדויקות יותר של א.ר. המסופקת לרשת הארצית, והידע שיתקבל מסיווג זה יאפשר תחזיות יומיות מהימנות ומדויקות בזמן אמיתי לגבי א.ר. וא.מ.א. הצפויים.

סגל ואלפרט (1990) ו-Segal and Alpert (1991) הציעו לכמת את יחסי הגומלין הנייל ע"י מציאת הקשר בין המצבים הסינופטיים מטאורולוגיים וצריכת א.מ.א. מצד אחד, לעומת א.ר. הזמינה במצבים אלה מצד שני.

הצעתם היתה לדרג באופן ראשוני את א.ר. הזמינה בערכים מ-1 עד 4 על פי הערך הכלכלי וביחס למצב הסינופטי. בסיווג זה מצב סינופטי בעל ערך 1 מייצג מצב בו א.ר. וא.מ.א. גבוהות, ולפיכך משמעותו הכלכלית ניכרת. לעומת זאת ערך 4 מייצג מצב בו צריכת א.מ.א. גבוהה אך זמינות א.ר. נמוכה ולכן ערכו הכלכלי נמוך ביותר. ביניהם ישנם מצבים סינופטיים בעלי ערכי ביניים של 2 ו-3. אלפרט ושות' (1987) ערכו מיון סובייקטיבי של מצבים סינופטיים עבור שנת 1985, וסגל ואלפרט (1990) הסתמכו על מיון זה כדי להעריך איכותית ולהדגים את הפוטנציאל הכלכלי של מצבים סינופטיים ידועים.

המחקר הנוכחי בא להדגים מבחינה כמותית את הפוטנציאל הכלכלי של א.ר. במצבים הסינופטיים השונים. לצורך כך נערך מיון אובייקטיבי של מצבים סינופטיים בישראל (סעיף 2). לאחר מכן, נמצאו א.ר. וא.מ.א. במצבים השונים, והמצבים הסינופטיים דורגו על פי ערכם הכלכלי בסכמה כדוגמת זו שהוצעה ע"י סגל ואלפרט (1990) ו-Segal and Alpert (1991), (סעיף 3).

מיון אובייקטיבי של מצבים סינופטיים בישראל

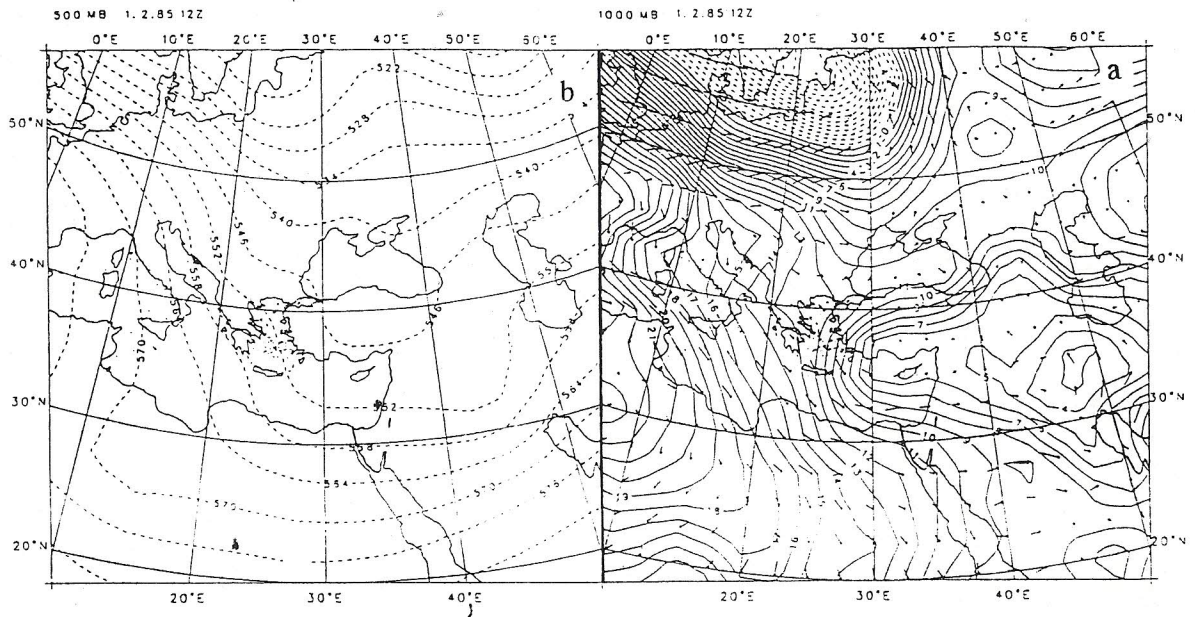
לצורך ההערכות הכלכליות הנ"ל נערך מיון אובייקטיבי של המצבים הסינופטיים. המיון נערך על פי נתוני ה-ECMWF (European Center of Medium-range Weather Forecasts) שמרכזו ברידינג, אנגליה. נתונים אלה שלמים ומכילים מידע מלווינים, מטוסים ואניות, המשולבים עם נתונים מטאורולוגיים סטנדרטיים. המיון נעשה עבור שנת 1985 על מנת להשוותו למיון הסובייקטיבי שבוצע עבור שנה זו ע"י אלפרט ושות' (1987). בכל יום בשנה קבלנו נתוני גובה גיאופוטנציאלי וטמפרטורה ב-1000 hPa וב-500 hPa בשעה 12GMT בארבע נקודות שריג בריבוע סביב ישראל. נקודות השריג הן: 35°N , 32.5°E - המייצגת בקירוב את ניקוסיה, קפריסין; 27.5°N , 32.5°E - המייצגת את קהיר, מצרים; 35°N , 40°E - המייצגת את דמשק, סוריה; ו- 27.5°N , 40°E - המייצגת את טאבוק, ערב הסעודית. כל יום אופיין לכן ב-16 פרמטרים ונערך סיווג יומי בשיטת "מיון אשכולות" (Cluster Analysis) בעזרת תוכנת BMDP (Dixon et al., 1990) על מחשב ה-CDC באוניברסיטת תל אביב. בשיטה זו מחושבים המרחקים בין הפרמטרים, וכל אשכול (cluster) מכיל את קבוצת המצבים שבהם המרחק בין הפרמטרים שלהם הקטן ביותר. התוצאה היתה 20 מצבים סינופטיים ידועים אותם נפרט בהמשך. Koplowitz (1973) ו-Ronberg (1984) ערכו אף הם מיון סינופטי אובייקטיבי בישראל, הם השתמשו בשיטות סטטיסטיות דומות לשלנו, אולם עקב מורכבות החישובים שנעשו על ידם בלתי ניתן היה להשתמש במיוןם לצרכינו. Ronberg (1984) למשל השתמש ב-200 פרמטרים מטאורולוגיים לתאר יום אחד. כמו כן, עבודתם נעשתה עבור עונת החורף בלבד וממאגר נתוני רדיוסונדות בתחנות סביב ישראל, ולפיכך נתוניהם חלקיים.

בכדי להכיר כל מצב סינופטי שהתקבל מהמיון השתמשנו ב-4 דרכים:

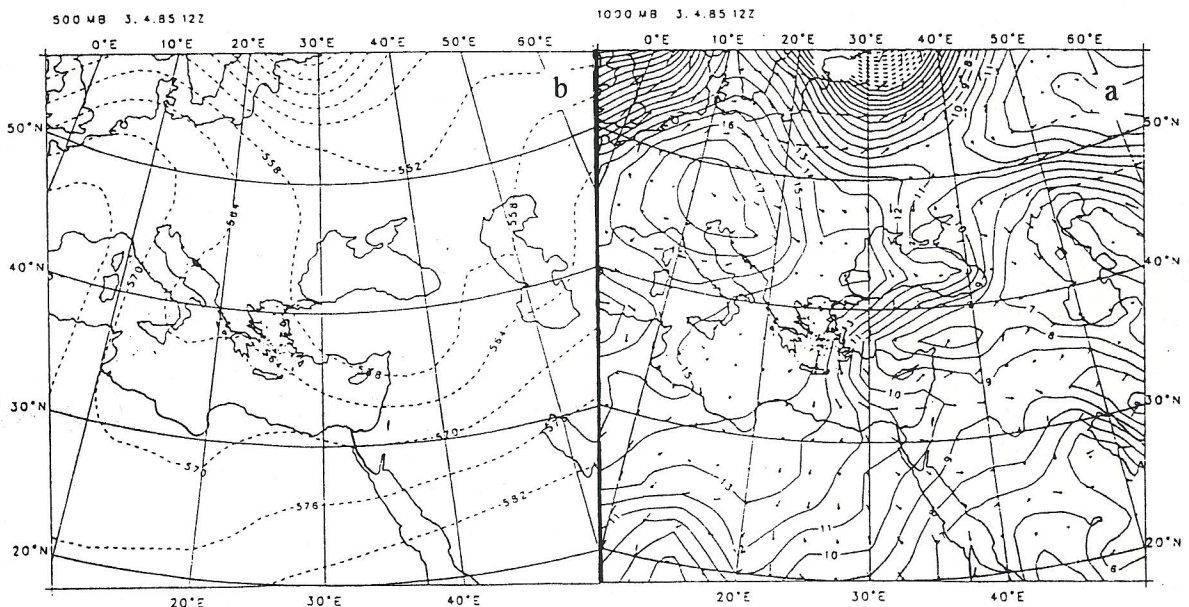
1. הישוונו את מיון המצבים שקיבלנו למיון הסובייקטיבי שבוצע ע"י אלפרט ושות' (1987). ההתאמה למצבים שזוהו על ידם נמצאה טובה ביותר. במיון שערכנו נמצאו מספר מצבים כפי שקבלו אלפרט ושות' (1987), וזה מצביע על כך שהחלוקה ל-20 מצבים אופטימלית. השמות שניתנו כאן למצבים הסינופטיים הם אותם שמות שנתנו על ידם.
2. בעזרת תוכנת Synop (Neeman and Alpert, 1990) ציירנו את המפות הסינופטיות של 1000 hPa ו-1000 hPa של היום הקרוב ביותר למרכזו של כל Cluster (איורים 1-20).
3. הסתייענו בפלט של תוכנית ה-BMDP ובפרט בממוצעים של 16 הפרמטרים במצבים הסינופטיים השונים.
4. הסתייענו בעבודה של ב. זיו (1991) המתארת את מערכות מזג האוויר באזורנו.

חורף

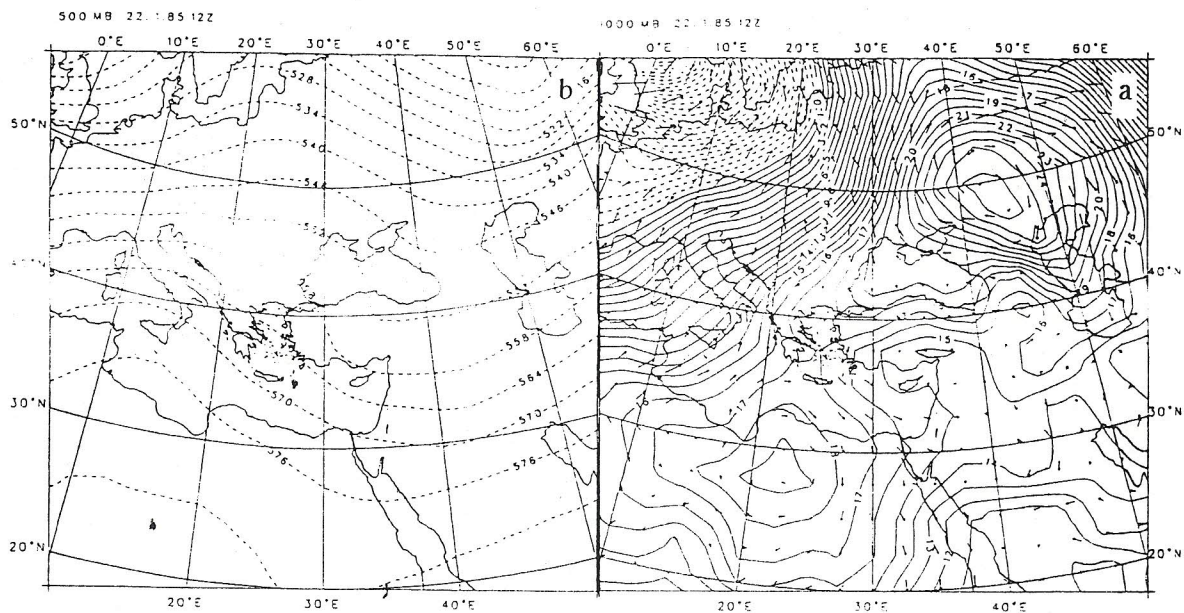
1. שקע קפריסאי: שקע בקרקע שמרכזו בקפריסין מלווה באפיק רום חזק. לחצים אטמוספריים נמוכים ביותר ב- hPa 1000 וב- hPa 500 בעיקר בקרבת ניקוסיה, גרדיאנט לחצים חיובי בולט בין ניקוסיה לקהיר, מצב טיפוסי לירידת משקעים בכמות רבה. ראה איור 1 של מפות ה- hPa 1000 וה- hPa 500 של היום הקרוב ביותר למרכז ה-Cluster.
2. הפרעה ציקלונית ממוצעת: מצב דומה ל"שקע קפריסאי" אך בעוצמה פחותה. מזרח הים התיכון נמצא בהשפעה ציקלונית עם לחצים אטמוספריים נמוכים בקרקע וברום. גרדיאנט הלחצים בין ניקוסיה לקהיר חיובי בעוצמה פחותה מאשר ב"שקע הקפריסאי", ראה איור 2.
3. תחזורת ימית חלשה: ציקלוניות פחותה מאשר במצבים הקודמים, גרדיאנט לחץ ניקוסיה-קהיר חיובי חלש, זרימה ימית. עדיין מצב פעיל אך פחות מאשר 1 ו-2, ראה איור 3.
4. קדמת שקע קפריסאי: שקע קר מתקרב לאזורנו ממערב, אנו נמצאים בסקטור החם שלו. מצב זה נדיר יחסית עם רק חמישה ימים בשנת 1985, ראה איור 4.
5. רמה סיבירית: לחץ גבוה מעל אזורנו מלווה באפיק רום עם זרימות צפוניות מזרחיות קרות ביותר באזורנו. המצב מאופיין בין היתר בטמפרטורות הנמוכות ביותר מכל המצבים בשנה, ראה איור 5.
6. אזור לחץ גבוה: לחצים גבוהים בקרקע ורכס ברום. זרימה מזרחית - דרום מזרחית יבשתית וגרדיאנט שלילי ניקוסיה-קהיר. מצב טיפוסי לתקופה שחונה, ראה איור 6.
7. מערכת מקומית של לחץ גבוה: רכס ברומטרי בקרקע וברום הנמצא בסמיכות מיידית למזרח הים התיכון. רוחות מזרחיות - דרום מזרחיות, טמפרטורות גבוהות, ראה איור 7.
8. אפיק ים סוף: מערכת לחץ נמוך שמרכזה בדרום מזרח (ים סוף), רוחות מזרחיות, טמפרטורות גבוהות, ראה איור 8.



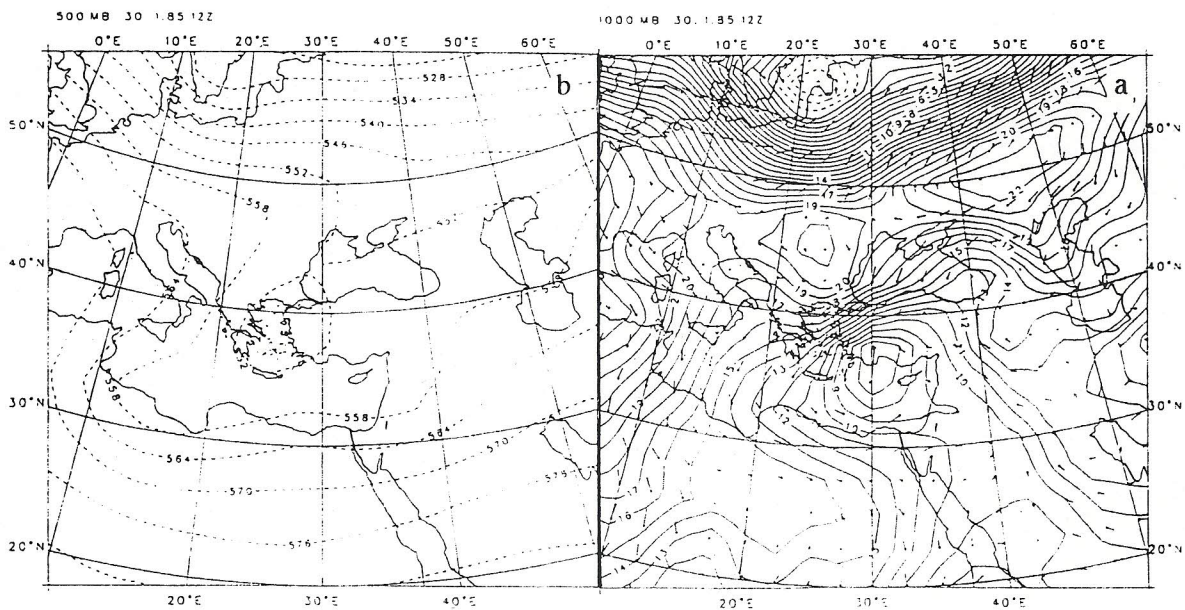
איור 1: מפות סינופטיות של מזרח הים התיכון עבור הארוע הקרוב ביותר למרכז ה-cluster של השקע הקפריסאי. a. מפת ה-1000 hPa, גובה גיאופוטנציאל בעשרות מטרים, מרחק בין קוי הגיאופוטנציאל 10 מ', ערכים נמוכים מ-0 מקווקים, וקטורי רוח בנקודות הסריג מיוצגים על פי המרחק שהרוח תעבור ב-8 שעות. b. מפת ה-500 hPa, גובה גיאופוטנציאל בעשרות מטרים, מרחק בין הקוים 60 מ'.



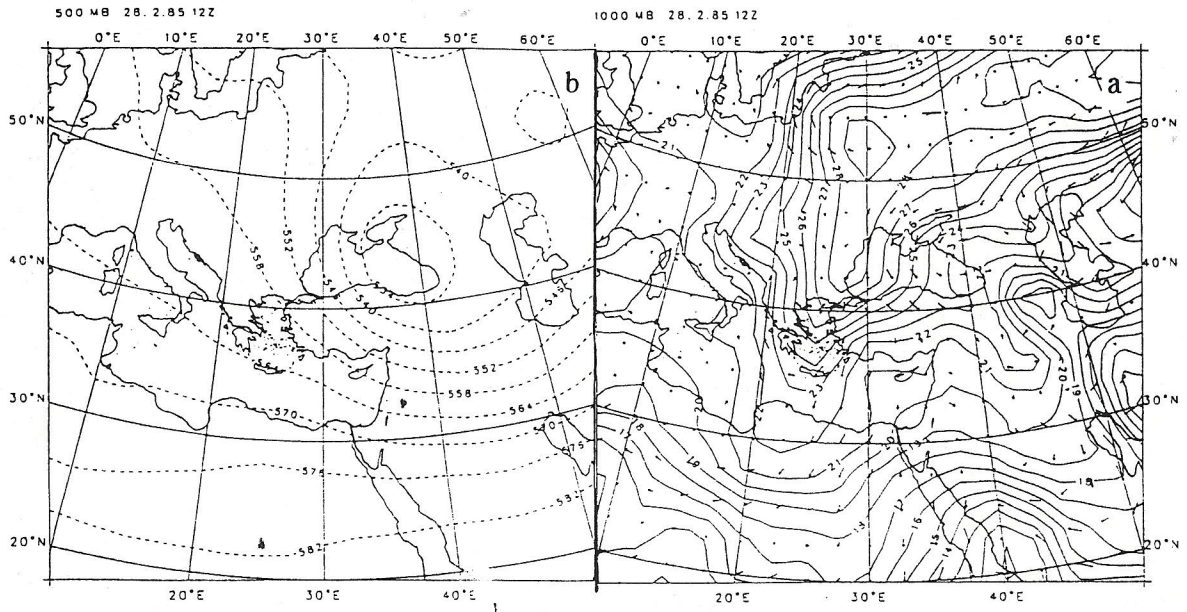
איור 2: כמו איור 1 אלא שעבור המצב הסינופטי הפרעה ציקלונית ממוצעת



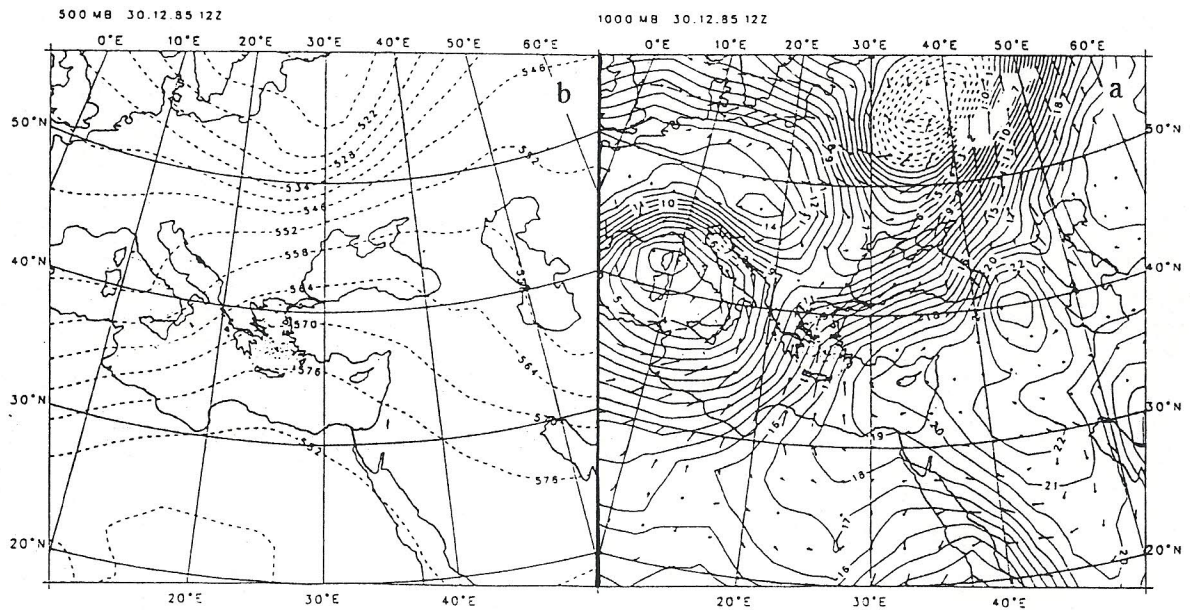
איור 3: כמו איור 1 אלר שעבור המצב הסינופטי תחזורת ימית חלשה



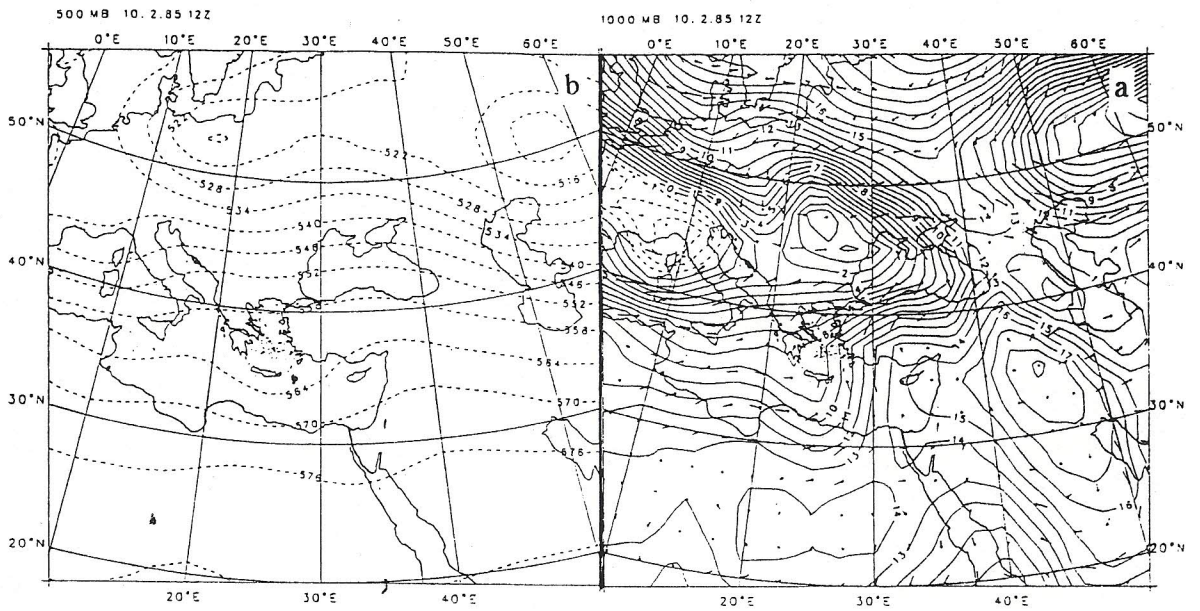
איור 4: כמו איור 1 אלא שעבור המצב הסינופטי קדמת שקע קפריסאי.



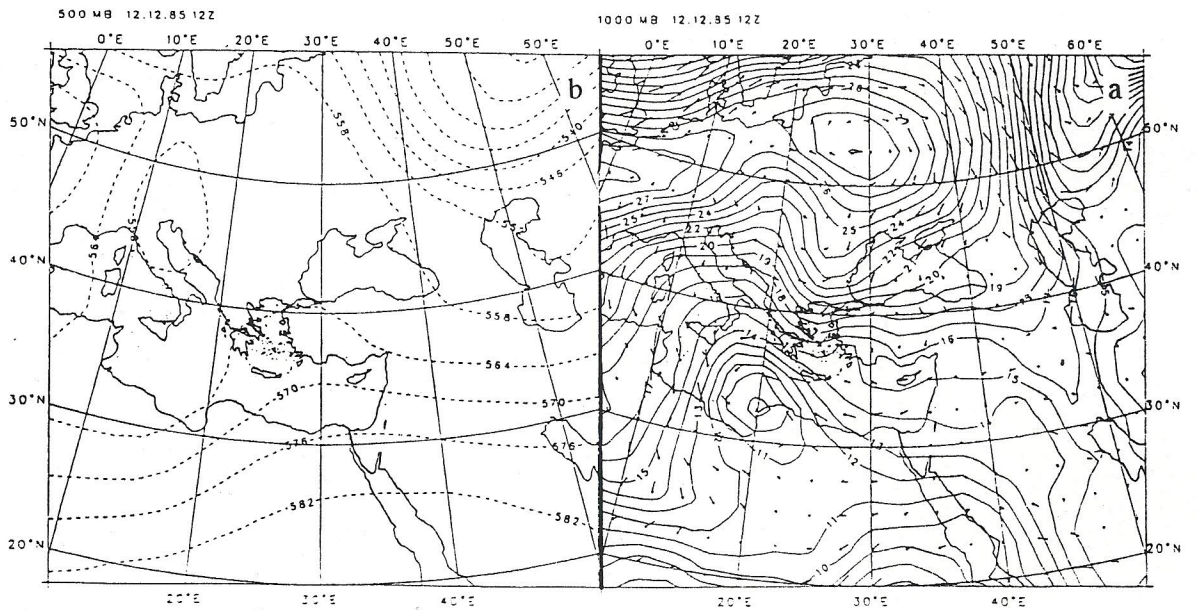
איור 5: כמו איור 1 אלא שעבור המצב הסינופטי רמה סיבירית



איור 6: כמו איור 1 אלא שעבור המצב הסינופטי אזור לחץ גבוה בחורף

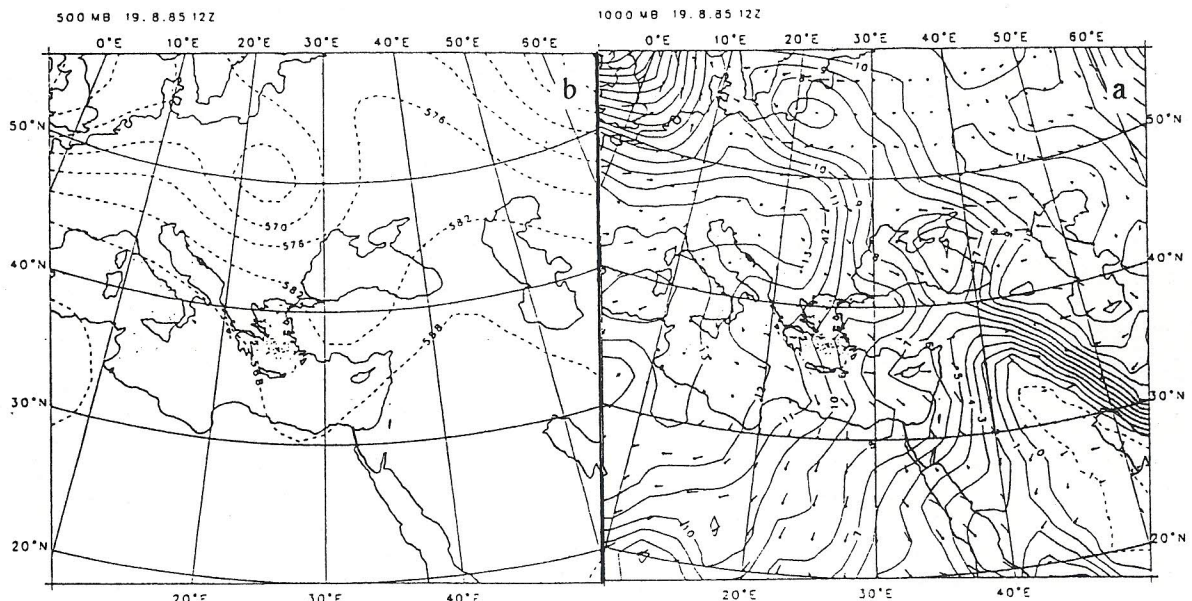


איור 7: כמו איור 1 אלא שעבור המצב הסינופטי מערכת מקומית של לחץ גבוה בחורף

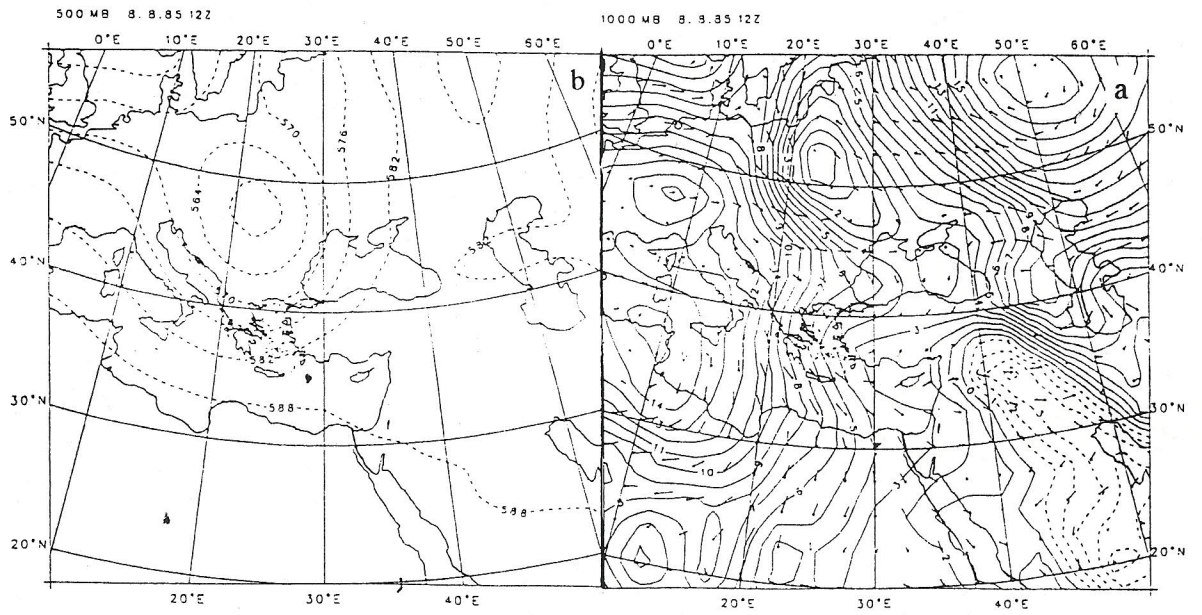


איור 8: כמו איור 1 אלא שעבור המצב הסינופטי אפיק ים סוף בחורף

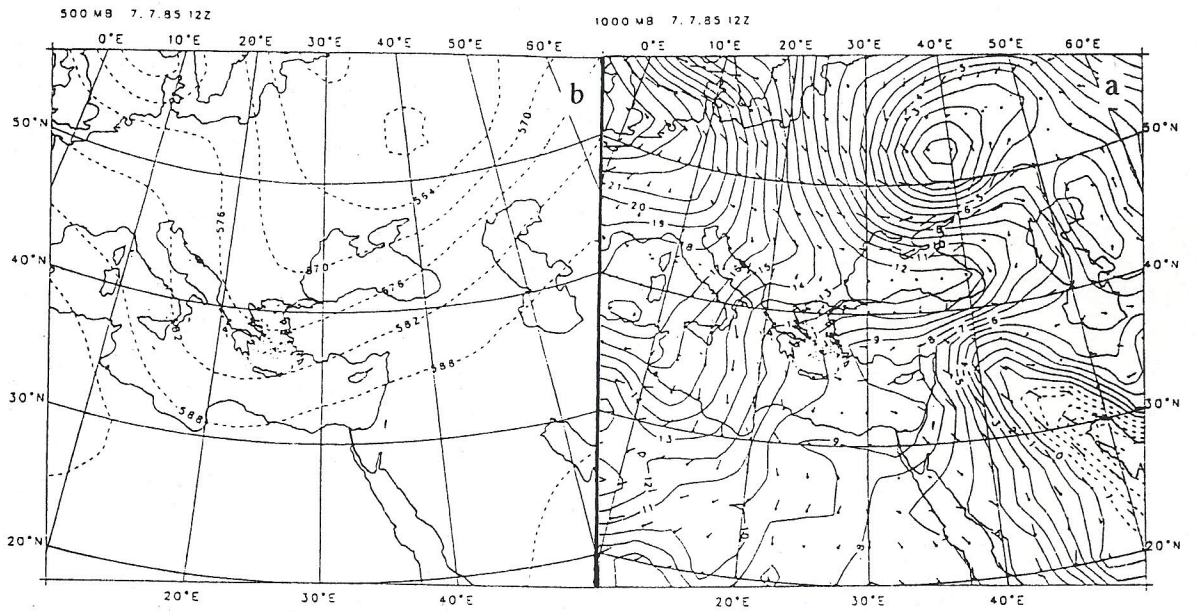
1. **אפיק פרסי חלש:** מרכז השקע המונסוני רחוק מאד מאזורנו, כיוון קוי האיזוברים ב-1000 hPa מצפון לדרום. ערכי גיאופוטנציאל גבוהים ב-1000 hPa וב-500 hPa. הטמפרטורות הגבוהות ביותר בקיץ באזורנו, רוחות צפון מערביות חלשות, ראה איור 9.
2. **אפיק פרסי מפותח:** השקע המונסוני בחדירה חזקה לאזורנו עם מרכז בדמשק. ערכי לחץ ב-1000 hPa בניקוסיה הנמוכים ביותר בשנה (כ-30 מ"מ, נמוך יותר מ"שקע קפריסאי"). מצב זה שורר בשיאה של עונת הקיץ בין אמצע יולי לאמצע אוגוסט, כאשר האפיק המונסוני מפותח ובשיא עוצמתו, ראה איור 10.
3. **אפיק פרסי מתון:** קוי האיזוברים ב-1000 hPa חודרים ממערב לקפריסין. מרכז האפיק מעל המפרץ הפרסי, ומפל לחץ חיובי בין ניקוסיה לקהיר, טמפרטורות נמוכות יותר ורוחות מתחזקות, ראה איור 11.
4. **אפיק פרסי חזק:** השקע במרכז האפיק הצפין ונמצא בדמשק, האפיק חודר עד ליוון ויוצר במזרח הים התיכון שקע סגור. מפל חיובי בולט בין ניקוסיה לקהיר, אפיק חלש ברום. טמפרטורות נוחות ורוח מתחזקת כתוצאה מתמיכת האפיק בבריזה, ייתכן גשם קל, ראה איור 12.
5. **אפיק ים סוף/פרסי:** מצב השורר בתחילת העונה ובסיומה. האפיק הפרסי עדיין לא נבנה (ביוני) או התרחק (בספטמבר), לעומתו אפיק ים סוף מתרחק (ביוני) או נבנה (בספטמבר). כתוצאה מכך מפת ה-1000 hPa מראה שילוב של האפיק הפרסי ואפיק ים סוף, ראה איור 13. האפיק מים סוף בעל השפעה חזקה יותר באזורנו מאשר האפיק הפרסי.



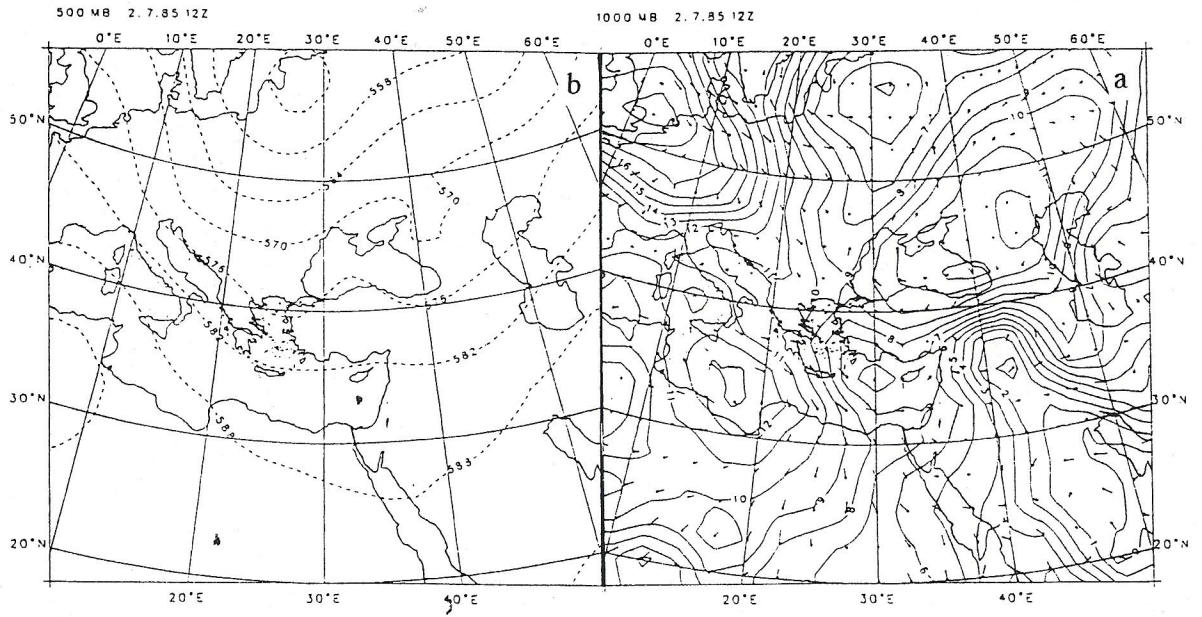
איור 9: כמו איור 1 אלא שעבור המצב הסינופטי אפיק פרסי חלש.



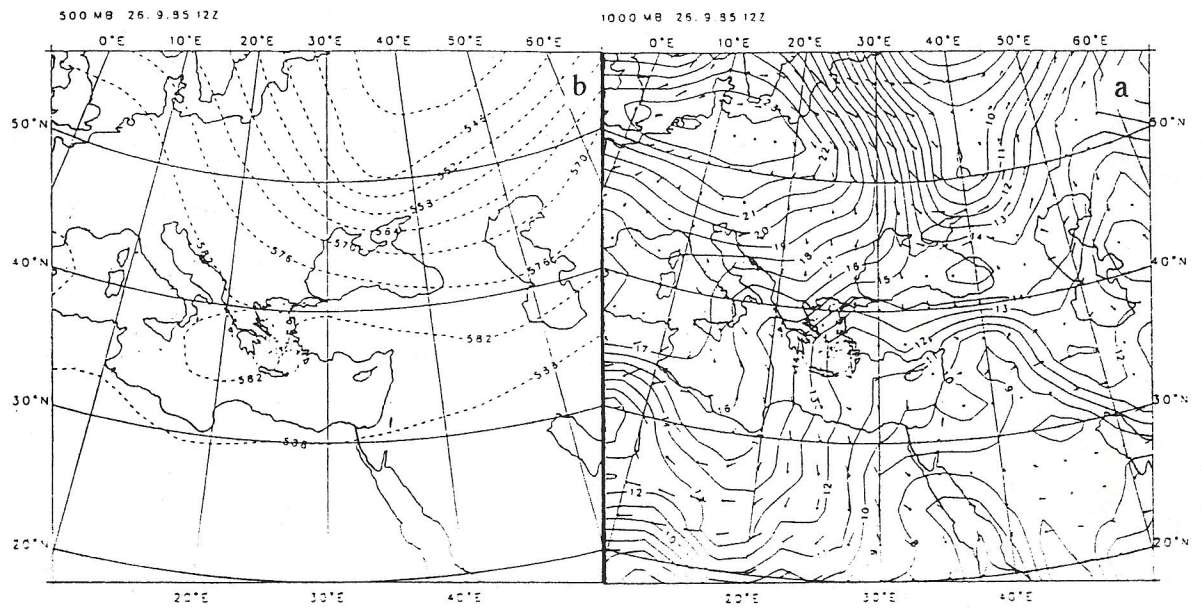
איור 10: כמו איור 1 אלא שעבור המצב הסינופטי אפיק פרסי מפותח.



איור 11: כמו איור 1 אלא שעבור המצב הסינופטי אפיק פרסי מתון.

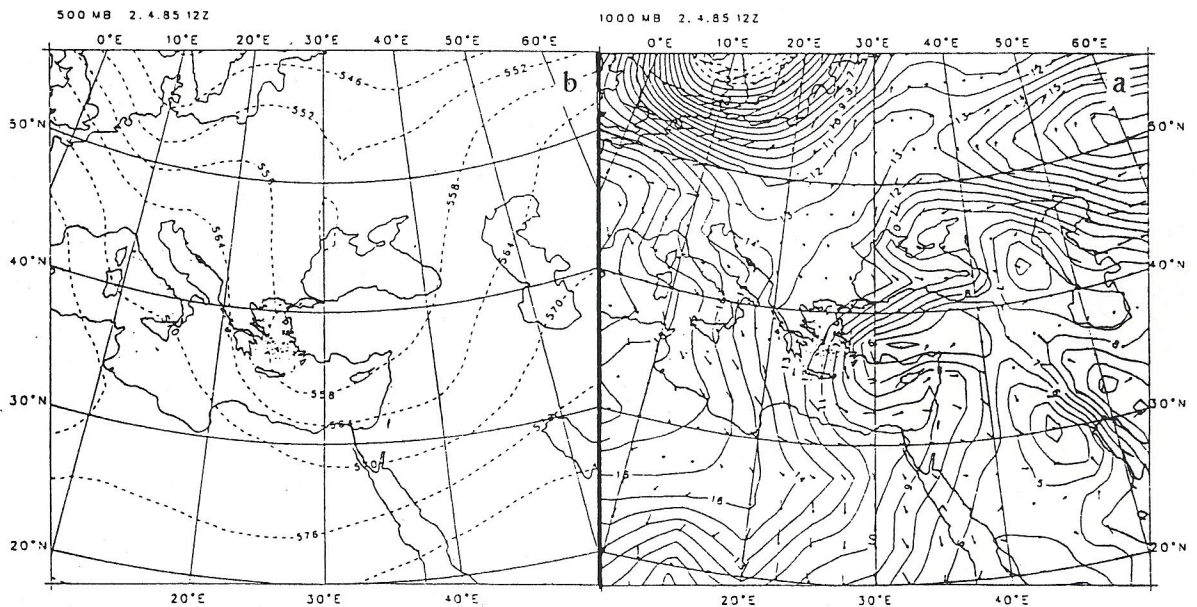


איור 12: כמו איור 1 אלא שעבור המצב הסינופטי אפיק פרסי חזק.

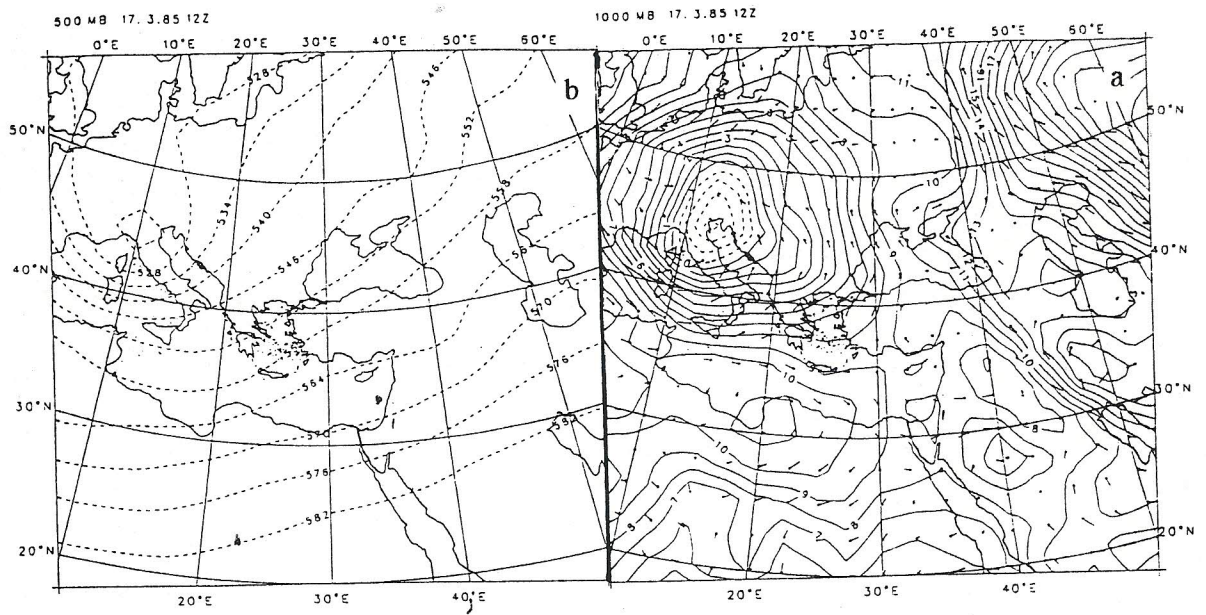


איור 13: כמו איור 1 אלא שעבור המצב הסינופטי אפיק פרסי /ים סוף.

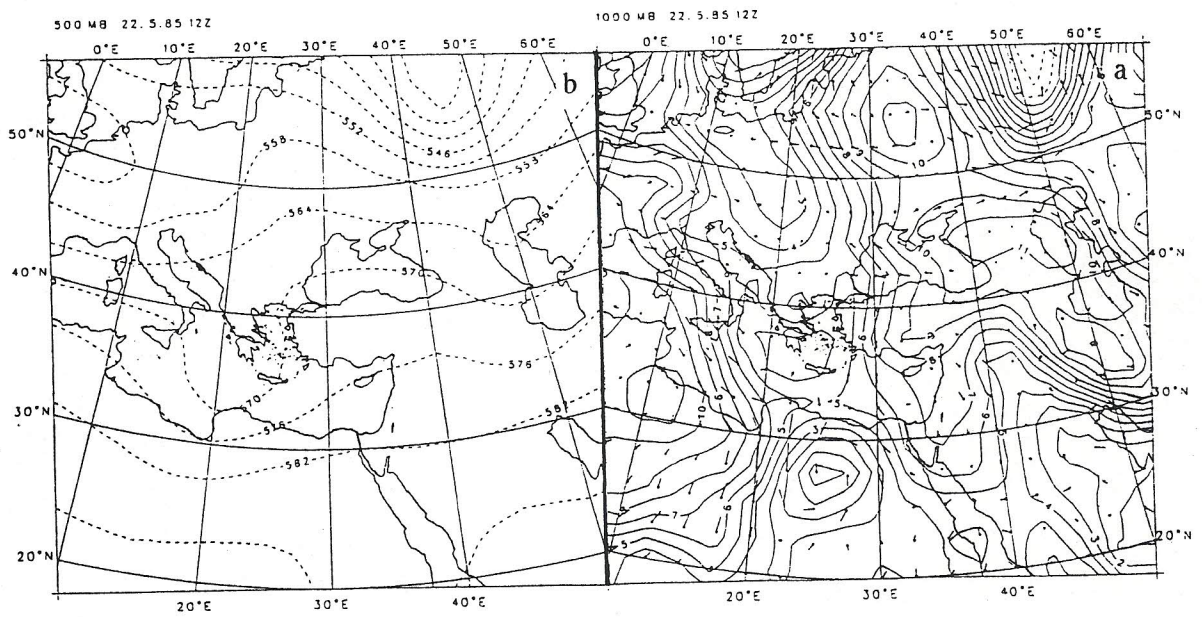
1. שקע עמוק - אפיק רום: שקע פעיל בעונות המעבר. מרכזו מצפין ונמצא בדרום טורקיה, אפיק רום חזק מצב הגורם לגשם בעונות המעבר, ראה איור 14.
2. שקע רדוד - רכס רום: ערכים נמוכים ב-1000 hPa וגבוהים ב-500 hPa. בעונות המעבר המערכות בקרקע לעיתים אינן תואמות למערכות הרום. מצב זה מתאים גם לשקע שרבי סמוך לשבירה, ראה איור 15.
3. שקע שרבי: שקע שמרכזו בקהיר מלווה במפל שלילי חזק בין ניקוסיה לקהיר, ברום - רכס חלש. רוחות דרום מזרחיות מעלות את הטמפרטורה באזורנו, המצב החם ביותר בעונות המעבר, ראה איור 16.
4. אזור לחץ גבוה: ב-1000 hPa לחצים גבוהים באזורנו ורכס רום ב-500 hPa. מפל ניקוסיה-קהיר שלילי, רוחות דרום מזרחיות עם טמפרטורות גבוהות, ראה איור 17.
5. אפיק ים סוף רחב: אפיק מים סוף מדרום לישראל ראה איור 18. מפל ניקוסיה-קהיר שלילי, בכל הימים נשבה רוח מזרחית בישראל (סערוני, 1993, עבודת דוקטורט בהכנה).
6. אפיק ים סוף מחודד - ציר מערבי: אפיק מים סוף שצירו עובר ממערב לישראל, ראה איור 19. מפל ניקוסיה-קהיר שלילי, רכס ב-500 hPa בחלק מהימים נשבה רוח מזרחית בישראל (סערוני, 1993), טמפרטורות גבוהות.
7. אפיק ים סוף מחודד - ציר מזרחי: ציר האפיק עובר ממזרח לישראל, ראה איור 20. מפל ניקוסיה-קהיר חיובי חלש. רוח מערבית שמתחזקת בהשפעת הבריזה. לא נמצאה רוח מזרחית. (סערוני, 1993).



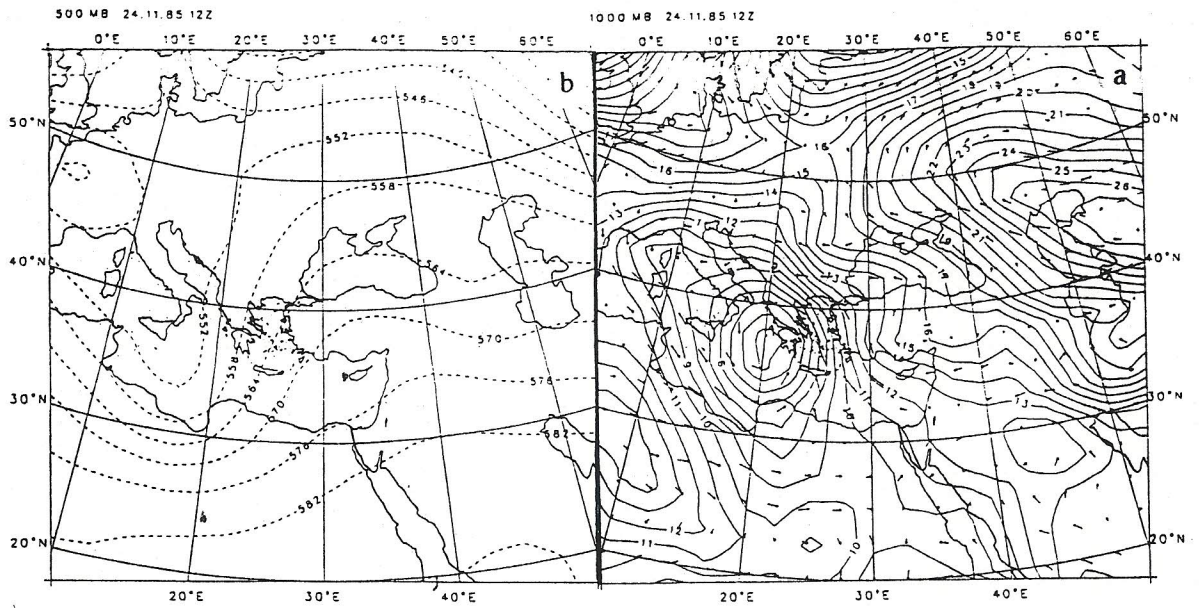
איור 14: כמו איור 1 אלא שעבור המצב הסינופטי שקע עמוק - אפיק רום



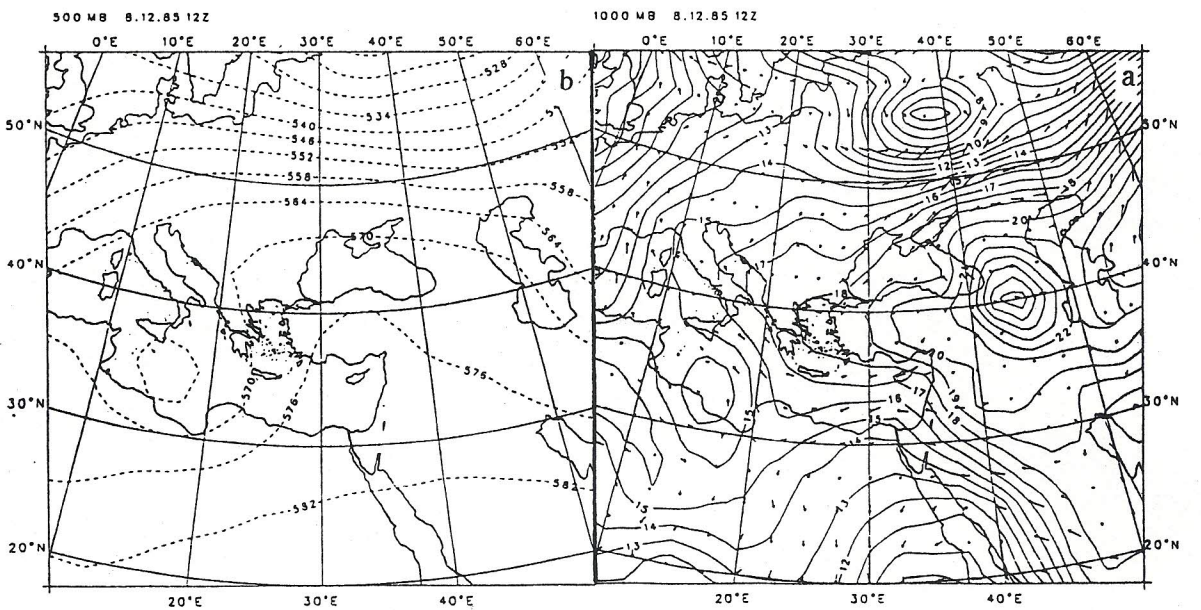
איור 15: כמו איור 1 אלא שעבור המצב הסינופטי שקע רדוד - רכס רום.



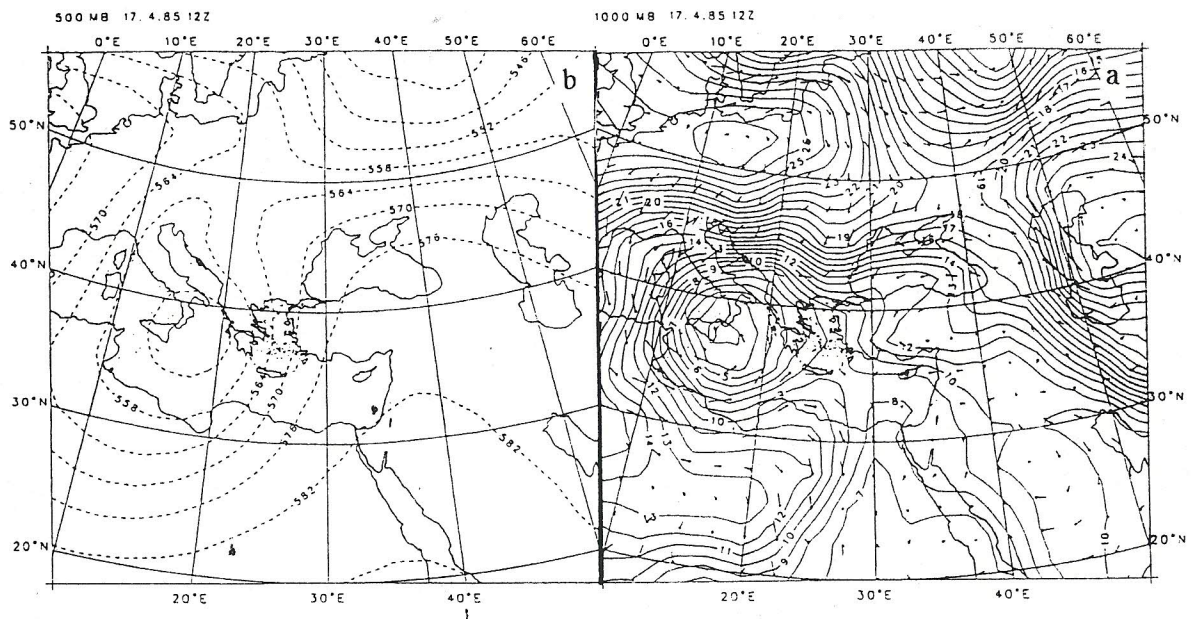
איור 16: כמו איור 1 אלא שעבור המצב הסינופטי שקע שרבי.



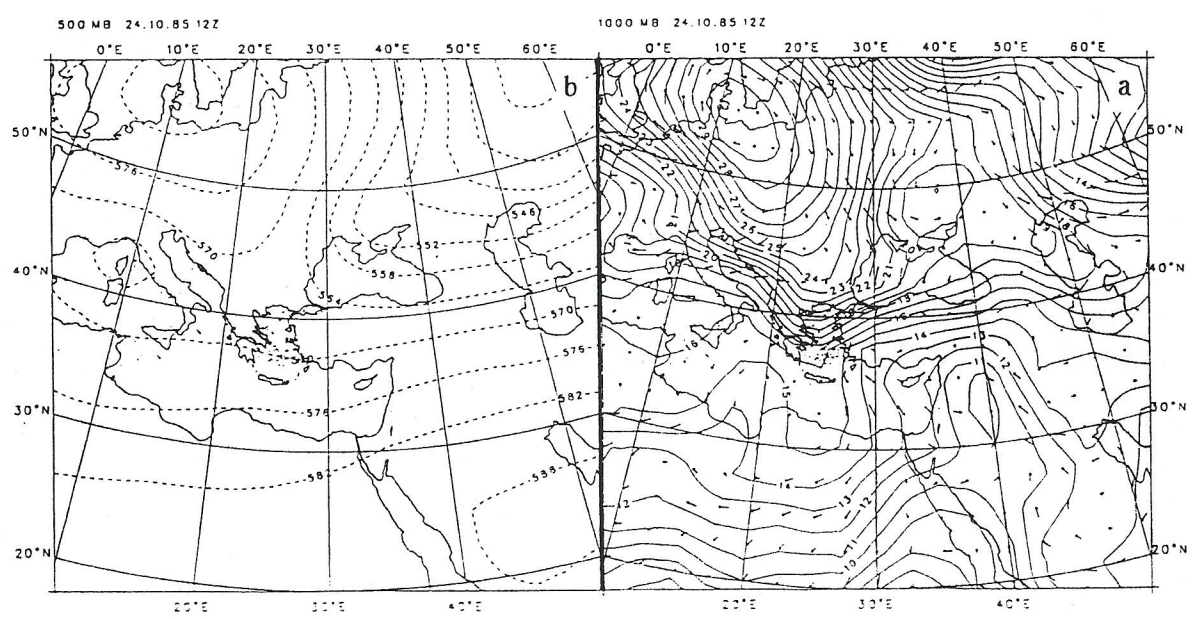
איור 17: כמו איור 1 אלא שעבור המצב אזור לחץ גבוה בעונות המעבר.



איור 18: כמו איור 1 אלא שעבור המצב אפיק ים סוף רחב.



איור 19: כמו איור 1 אלא שעבור המצב אפיק ים סוף מחודד עם ציר מערבי



איור 20: כמו איור 1 אלא שעבור המצב אפיק ים סוף מחודד עם ציר מזרחי.

הערכות כלכליות של אנרגית הרוח במצבים הסינופטיים השונים

בכל מצב סינופטי חושבו צריכת החשמל הארצית הממוצעת (המייצגת את א.מ.א.) ואנרגית הרוח. א.מ.א. חושבה הן ממוצעת יומית והן בשעות שיא העומס. הממוצעים הם רק של ימי עבודה בשבוע. א.ר. מיוצגת ע"י עוצמת הרוח בתחנת הר כנען, שהיא תחנה בעלת נתונים טובים ביותר, ואמורה לייצג את הקורה בצפון הארץ היכן שמוקמות חוות הרוח. נתוני הרוח הם מתצפיות בשעות המדידה הראשיות ביום (20, 14, 08), הם מוצעו כל יום, ולאחר מכן מוצעו על פני ימי כל מצב סינופטי. חשוב לציין שחוות הרוח מועדפות להקמה ברמת הגולן, היכן שהרוחות חזקות יותר מאשר בגליל (ממוצעים אקלימיים רב שנתיים, רוחות, 1956). ברמת הגולן לא נמצאה תחנת מדידה בעלת נתונים רציפים ומדויקים. אך, סביר שחוזקה היחסי של א.ר. בכל מצב סינופטי שווה בעוצמתה ברמת הגולן לזו שבהר כנען. בנוסף, באיורים 20a1a - מופיעות עוצמות הרוח ב-1000 hPa בנקודות שריג של מודל ה-ECMWF. ניתן להתרשם מעוצמות הרוח גם מהאיורים. קיימת התאמה מושלמת בין עוצמות הרוח בישראל באיורים לעוצמות הרוח הממוצעות בהר כנען.

בכל עונה חושבו צריכת החשמל ועוצמת הרוח הממוצעת וסטית התקן (σ) שלהם. א.מ.א. גבוהה/נמוכה של מצב סינופטי הוגדר כמצב בו צריכת החשמל היתה גבוהה/נמוכה מ- $(1/2)$ + ממוצע/ $(1/2)$ - ממוצע. א.ר. גבוהה/נמוכה של מצב סינופטי הוגדרה כמצב בו עוצמת הרוח היתה גבוהה/נמוכה מ- $(1/3)$ + ממוצע/ $(1/3)$ - ממוצע (ההבדל בקריטריון נובע מהשונויות הגבוהה של עוצמות הרוח). טבלאות 1-3 מתארות את א.מ.א. ו-א.ר. בעונות השונות. לא נמצא הבדל משמעותי בדרוג בין א.מ.א. ממוצעת יומית לממוצע בשעות העומס, הדרוג של א.מ.א. בטבלאות 1-3 הוא על פי הממוצע היומי.

סגל ואלפרט (1990) ו-Segal and Alpert (1991) הציעו לדרג את המצב הסינופטי בסיווג בין ארבעה ערכים בהם א.מ.א. ו-א.ר. מדורגות כגבוהות או נמוכות. אך הם קבעו ש"יידרש עידון של הדירוג המוצע". מוצע כאן סיווג בן 9 ערכים המורכב מהערכים גבוה, ממוצע או נמוך. טבלה 4 מציגה את הסיווג החדש המוצע, שעל פיו ערכנו את הדירוג. בסיווג זה לא.מ.א. ו-א.ר. גבוהות הדרוג הגבוה ביותר, ול-א.מ.א. גבוהה ו-א.ר. נמוכה הדרוג הנמוך ביותר, א.ר. גבוהות בעלי סיווג טוב מנמוכות. סיווג זה אמור לשקף את פוטנציאל א.ר. כפי שהוצע ע"י סגל ואלפרט (1990).

טבלה 1א: ממוצע א.מ.א. ו-א.ר. בעונת החורף, סטית התקן והערך העליון והתחתון לפיו נקבע הקריטריון לסיווג. ערך עליון של א.מ.א., $\sigma + (1/2)$ ממוצע; ערך תחתון, $\sigma - (1/2)$ ממוצע; ערך עליון של א.ר., $\sigma + (1/3)$ ממוצע; ערך תחתון, $\sigma - (1/3)$ ממוצע.

המשתנה	אנרגית חשמל (מגה ואט)	אנרגית רוח (קשרים)
ממוצע	1777.6	6.45
סטית התקן (σ)	101.4	3.36
ערך תחתון	1726.9	5.33
ערך עליון	1828.3	7.57

טבלה ב': מספר ימים, ערכי א.מ.א. ו-א.ר. של המצבים הסינופטיים בחורף, והקטגוריה של א.מ.א. ו-א.ר. אליה שייך כל מצב על פי טבלה 1 א'.

אנרגיית רוח		אנרגיית חשמל		מספר ימים	המצב הסינופטי
קטגוריה	ממוצע (קשרים)	קטגוריה	ממוצע (מגה ואט)		
גבוהה	10.80	גבוהה	1880.0	10	שקע קפריסאי
גבוהה	7.59	ממוצעת	1743.4	12	הפרעה ציקלונית ממוצעת
ממוצעת	6.78	גבוהה	1828.6	18	תחזורת ימית חלשה
ממוצעת	6.88	ממוצעת	1771.3	5	קדמת שקע קפריסאי
ממוצעת	6.65	גבוהה	1916.1	11	רמה סיבירית
ממוצעת	5.98	ממוצעת	1743.9	12	אזור לחץ גבוה
נמוכה	4.90	נמוכה	1700.0	17	מערכת מקומית של לחץ גבוה
נמוכה	5.01	ממוצעת	1728.1	25	אפיק ים סוף

טבלה א': כמו טבלה 1 א' אלא שבעבור הקיץ.

אנרגיית רוח (קשרים)	אנרגיית חשמל (מגה ואט)	המשתנה
4.99	1979.4	ממוצע
1.91	71.8	סטית התקן (ס)
4.35	1943.5	ערך תחתון
5.63	2015.3	ערך עליון

טבלה 2ב: כמו טבלה 1ב' אלא שבעבור הקיץ.

אנרגית רוח		אנרגית חשמל		מספר ימים	המצב הסינופטי
קטגוריה	ממוצע (קשרים)	קטגוריה	ממוצע (מגה ואט)		
נמוכה	3.45	גבוהה	2022.3	24	אפיק פרסי חלש
ממוצעת	5.31	גבוהה	2019.5	28	אפיק פרסי מפותח
גבוהה	6.43	ממוצעת	1969.9	23	אפיק פרסי מתון
ממוצעת	5.47	נמוכה	1941.7	24	אפיק פרסי חזק
ממוצעת	4.36	נמוכה	1903.9	26	אפיק פרסי / ים סוף

טבלה 3א: כמו טבלה 1א' אלא שבעבור עונות המעבר.

אנרגית רוח (קשרים)	אנרגית חשמל (מגה ואט)	המשתנה
5.36	1698.6	ממוצע
2.26	81.4	סטית התקן (σ)
4.61	1657.9	ערך תחתון
6.11	1739.3	ערך עליון

טבלה 3ב': כמו טבלה 1ב' אלא שבעבור עונות המעבר.

אנרגיית רוח		אנרגיית חשמל		מספר ימים	המצב הסינופטי
קטגוריה	ממוצע (קשרים)	קטגוריה	ממוצע (מגה וואט)		
גבוהה	6.38	ממוצעת	1662.2	12	שקע עמוק - אפיק רום
ממוצעת	5.83	נמוכה	1641.6	23	שקע רדוד - רכס רום
ממוצעת	5.01	גבוהה	1801.7	24	שקע שרבי
נמוכה	4.13	ממוצעת	1658.0	22	אזור לחץ גבוה
ממוצעת	5.71	ממוצעת	1686.0	15	אפיק ים סוף רחב
נמוכה	4.37	ממוצעת	1734.9	18	אפיק ים סוף - ציר מערבי
גבוהה	6.94	נמוכה	1657.7	16	אפיק ים סוף - ציר מזרחי

טבלה 4: סכמה מוצעת לסיווג כלכלי של מצבים סינופטיים על פי א.מ.א. ו-א.ר.

זמינות א.ר.	צריכת א.מ.א.	דירוג
גבוהה	גבוהה	1
גבוהה	ממוצעת	2
גבוהה	נמוכה	3
ממוצעת	ממוצעת	4
ממוצעת	גבוהה	5
ממוצעת	נמוכה	6
נמוכה	נמוכה	7
נמוכה	ממוצעת	8
נמוכה	גבוהה	9

טבלה 5: דירוג המצבים הסינופטיים על פי הסכמה המוצעת בטבלה 4 בהסוזמך על נתוני טבלאות 1-3.

דירוג	המצבים הסינופטיים	העונה
1	שקע קפריסאי	חורף
2	הפרעה ציקלונית ממוצעת אפיק פרסי מתון שקע עמוק - אפיק רוס	חורף קיץ עונות המעבר
3	אפיק ים סוף - ציר מזרחי	עונות המעבר
4	קדמת שקע קפריסאי אזור לחץ גבוה אפיק ים סוף רחב	חורף חורף עונות המעבר
5	תחזורת ימית חלשה רמה סיבירית אפיק פרסי מפותח שקע שרבי	חורף חורף קיץ עונות המעבר
6	אפיק פרסי חזק אפיק פרסי/ים סוף שקע רדוד - רכס רוס	קיץ קיץ עונות המעבר
7	מערכת מקומית לחץ גבוה	חורף
8	אפיק ים סוף אזור לחץ גבוה אפיק ים סוף - ציר מערבי	חורף עונות המעבר עונות המעבר
9	אפיק פרסי חלש	קיץ

המצבים הסינופטיים השונים דורגו על פי א.מ.א. ו-א.ר. הממוצעות שלהם בהתאם לטבלה 4. טבלה 5 מסכמת את המחקר:

דרוג 1: המצב הסינופטי בעל הפוטנציאל הכלכלי הטוב ביותר הוא "שקע הקפריסאי" בחורף. במצב זה א.מ.א. וא.ר. גבוהות ביותר.

דרוג 2-3: מצבים של א.ר. גבוהה וא.מ.א. ממוצעות/נמוכות הם המצבים הפעילים עליהם נימנים "ההפרעה הציקלונית" בחורף, "אפיק פרסי מתון" בקיץ, "שקע מלווה באפיק רוס" ו"אפיק ים סוף עם ציר מזרחי" בעונות המעבר.

דרוג 4-5-6: מצבי הביניים הם בחורף: "קדמת שקע", "אזור לחץ גבוה", "תחזורת ימית חלשה" ו"רמה סיבירית", בקיץ: "אפיק פרסי מפותח", "אפיק פרסי חזק" ו"אפיק פרסי/ים סוף", ובעונות המעבר: "אפיק ים סוף רחב", "שקע שרבי" ו"שקע רדוד". במצבים אלה בדרך כלל עוצמת הרוח ממוצעת.

דרוג 7-8: מצבים פחות טובים כלכלית הם מצבים פחות פעילים בהם א.ר. נמוכה. על אלה נימנים: "מערכת מקומית של לחץ גבוה" ו"אפיק ים סוף" בחורף, "אזור לחץ גבוה" ו"אפיק ים סוף בעל ציר מערבי" בעונות המעבר.

דרוג 9: המצב הירוד ביותר מבחינה כלכלית הוא ה"אפיק הפרסי החלש" בקיץ. זהו מצב בו א.ר. נמוכה מאידך א.מ.א. גבוהה כתוצאה מהפעלת מזגני אויר בתנאי חום קשה (ראה Segal et al., 1992).

סיכום ומסקנות

מיון סינופטי אובייקטיבי נערך על מנת למצוא את הפוטנציאל הכלכלי של א.ר. בהשוואה ל-א.מ.א. במצבים הסינופטיים השונים. המיון נערך בשיטת "מיון אשכולות" - Cluster Analysis. כל יום אופיין ב-16 פרמטרים מטאורולוגיים, ונמצאו 20 מצבים סינופטיים שונים ידועים. בכל מצב נמצאו א.ר. וא.מ.א. הממוצעות, ולמצבים ניתנו ערכים כלכליים בהתאם למוצעים שהתקבלו. נמצא כי הערך הרב ביותר הוא של מצב ה"שקע הקפריסאי" בעונת החורף, ואילו הנמוך ביותר הוא של ה"אפיק הפרסי החלש" בעונת הקיץ. קיים הבדל מובהק ביותר בעוצמות הרוח בין מצבי פוטנציאל גבוה למצבי פוטנציאל נמוך. ב"שקע הקפריסאי" עוצמת הרוח הממוצעת היא 10.80 קשרים, בעוד במצב "אפיק פרסי חלש" עוצמת הרוח הממוצעת היא רק 3.45 קשרים. מספר הימים בשנת 1985 בהם הפוטנציאל הכלכלי של אנרגית הרוח נמוך גדול מהימים בהם הפוטנציאל גבוה. נמצאו 106 ימים בעלי דרוג נמוך 7-9, לעומת 83 ימים בעלי דרוג גבוה 1-3. מימצאים אלה יכולים לסייע להחלטות כלכליות ומבצעיות בנושא א.ר., ומאפשרים תחזיות יומיות מהימנות ומדויקות יותר בזמן אמיתי לגבי א.מ.א. ו-א.ר. הצפויים, ועשויים לסייע בשיקולים של בנית חוות רוח. העבודה הנוכחית מקילה על הצורך לערוך השוואה יומית לאורך מספר שנות מדגם בין א.ר. ל-א.מ.א. כדי להעריך פוטנציאל כלכלי של א.ר.

הבעת תודה

מחקר זה נערך בסיועו ומימונו של מרכז גורדון. המחברים מבקשים להביע תודתם למוטי סגל, ד"ר אילן סתר, רוני לימן, משה מנדל והדס סערוני עבור הערות והארות מועילות, לשרות המטאורולוגי עבור נתוני הרוח וליעקב בלמור מחברת החשמל עבור נתוני עומס החשמל הארציים.

רשימת ספרות

אלפרט, פ., זיק, ר., גטניו, ב., סתר, א. ודקר, ד., 1987. חיזוי שדה הרוחות על פני הקרקע באמצעות מודל חד-רמתי מלווה במיון מצבים סינופטיים בעונות הקיץ והחורף. אוניברסיטת תל אביב והשרות המטאורולוגי, דו"ח למשרד האנרגיה והתשתית, 59 עמ'.
זיו, ב., 1991. מזג האויר בישראל. קורס במבוא למטאורולוגיה - יחידה 5. האוניברסיטה הפתוחה. 86 עמ' (בהכנה).

ממוצעים אקלימיים רב שנתיים, רוחות, 1956: רשימות מטאורולוגיות, סדרה א', מס' 15, השרות המטאורולוגי, עמ' 77.

סגל, מ., אלפרט, פ., 1990. צריכת החשמל בשעות השיא היומי בישראל ותלותה בתנאי מזג אויר לעומת אנרגיית הרוח הזמינה - הערכה איכותית. מטאורולוגיה בישראל, 3-4: 29-40.
שפיר, ח., אלפרט, פ. וסגל, מ., 1992. תלות שיא עומס החשמל היומי במשתנים מטאורולוגיים, ומשמעותה לגבי ניצול אנרגיית הרוח לצרכי הפקת חשמל בישראל. מטאורולוגיה בישראל, 2 (27): 8-23.

- Dixon, W. J., Brown, M. B., Engelman, L. and Jennrich, R. I., 1990. BMDP statistical software manual., vol 2, University of California Press, 1384 pp.
- Koplowitz, R., 1973. An objective classification of synoptic pressure field patterns of the Eastern Mediterranean basin for use in synoptic- climatological studies. M. Sc. Thesis, Hebrew University, (Geography Dept.) 145 pp.
- Neeman, B. U. and Alpert, P., 1990. Visualizing atmospheric fields on a personal computer: Application to potential vorticity analysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2: 154-160.
- Ronberg, B., 1984. An objective weather typing system for Israel ,A synoptic climatological study. Ph. D. Thesis, Hebrew University, 126 pp.
- Segal, M. and Alpert, P., 1991. Scheme for evaluating usage of wind energy by electric utilities. *Applied Energy*, 39: 235-240.
- Segal, M., Shafir, H., Mandel, M., Alpert, P. and Balmor, Y., 1992. Climatic related evaluations of the summer peak hours electric load in Israel. *J. Appl. Meteor.*, 31: 1492-1498.