

דצמבר 2023

## מגמות במהירות הרוח מעל הים – דרום מזרח אגן הים התיכון

(מבוסס על דו"ח מחקר מס' 0000029-2023-0804-4000)

**איל אילוטוביץ ויצחק יוסף, אגף אקלים, השירות המטאורולוגי**

### תקציר

בספטמבר 2023, הוכנה עבודה מקיפה באגף אקלים שהוזמנה על-ידי משרד האנרגיה, בנושא "הערכת פוטנציאל אנרגיית הרוח מעל הים" (אילוטוביץ ויוסף, 2023). העבודה דנה במגמות ארוכות (1959-2022) וקצרות (1983-2022) במהירות הרוח וכן במאפיינים נוספים הרלוונטיים לייצור אנרגיה באמצעות נשיבת רוח בגובה (100, 150, 200 ו-800 מטרים). השינויים במהירות הרוח נבדקו בעזרת נתונים מהראנליזה<sup>2</sup> ERA5. בדו"ח הנוכחי נביא בעיקר את המסקנות הנוגעות למגמות במהירות הרוח בתוספת התייחסות גם לגובה 10 מטרים, שלא נכללה בדו"ח המורחב. למתודולוגיה המלאה, פרטים נוספים והרחבה, יש לפנות לדו"ח המלא.

להלן סיכום עיקרי הממצאים:

- האזור מעל הים, הנמצא צפון-מערבית לחיפה, הינו בעל ממוצע מהירות הרוח הגבוהה ביותר במרחב הנבדק, לאורך קו חופה של ישראל.
- ככלל המגמות ארוכות הטווח במהירות הרוח השנתית הממוצעת נמצאות במגמת האטה בכל הגבהים שנבדקו, בשיעור של 0.02- עד 0.04- מ"ש/שנייה/עשור. תוצאות מובהקות נמצאו בגבהים 100, 150 ו-200 מ'.
- מגמות אלו אינן מונוטוניות ומאופיינות בירידה בעיקר בתחילת התקופה בעוד שבארבעת העשורים האחרונים, קיימת מעין התייצבות ומהירות הרוח השנתית הממוצעת נותרת כמעט וללא שינוי.
- מהירות הרוח מעל הים בנקודות העניין (וגם במרחב הכללי), בעונת הקיץ, נמצאת במגמת האטה מובהקת בשיעור של 0.05- מ"ש/שנייה/עשור בגובה 10 מ', ו-0.08- מ"ש/שנייה/עשור בגובה 100 מ'. מגמות אלו אופייניות הן לתקופה הארוכה והן לתקופה הקצרה.
- קיימת מגמת עלייה במהירות הרוח (לא מובהקת) בעונת החורף והאביב בארבעת העשורים האחרונים.
- המגמה במספר השעות של רוחות חזקות מצביעה על עלייה בכל הגבהים הנבדקים. העלייה נמצאה מובהקת בתקופה הארוכה בגבהים 100, 150 ו-200 מ' עם תוספת של 1.8, 2.9 ו-2.8 שעות/עשור בהתאמה. עיקר העלייה נצפה ב-3 העשורים האחרונים.

<sup>1</sup> אילוטוביץ, א' ויוסף, י' (2023). [הערכת פוטנציאל אנרגיית הרוח מעל הים](#). דו"ח מחקר מס' 0000029-2023-0804-4000, השירות המטאורולוגי.

<sup>2</sup> הראנליזה מתייחסת לתהליך בו נעשה שימוש במודלים ממוחשבים כדי לחשב מחדש וליצור תיעוד מקיף ועקבי של נתוני מזג אוויר ואקלים בעבר. בתהליך זה נעשה שימוש בנתוני תצפיות היסטוריים ממקורות שונים כמו תחנות מזג אוויר, לוויינים ובלונים מטאורולוגיים, יחד עם מודלים ממוחשבים, כדי לייצר מערך נתונים מפורט ורציף של האופן שבו התנהגה האטמוספירה של כדור הארץ בעבר. בעבודה זו עשינו שימוש בראנליזה של ERA5.

## **Abstract**

In September 2023, the Israel Meteorological Service conducted a comprehensive study commissioned by the Ministry of Energy and Infrastructure on ['An assessment of wind energy potential above the sea'](#) (Ilotovitz and Yosef, 2023<sup>3</sup>). The study discusses long-term trends (1959-2022) and short-term trends (1983-2022) in wind speeds, along with other features relevant to wind energy production at heights of 100, 150, 200, and 800 meters. Changes in wind speeds were analyzed using data from the ERA5 reanalysis. The current report primarily presents the conclusions regarding trends in wind speeds, with the addition of a discussion on the 10-meter height, which was not included in the comprehensive report. For the full methodology, additional details, and elaboration, please refer to the complete report.

### Key findings:

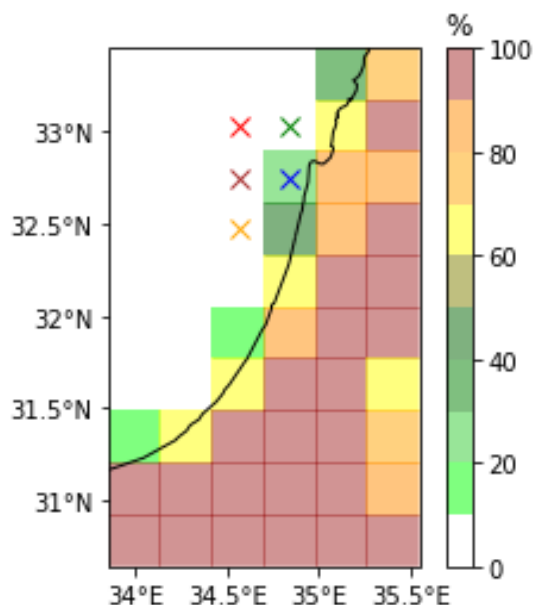
- The marine area, located northwest of Haifa, experiences the highest average wind speed in the southeastern Mediterranean Sea along Israel's coastline.
- Generally, long-term trends in average annual wind speed indicate a deceleration at all examined heights, with a rate of -0.02 to -0.04 m/sec per decade. Significant results were found at heights of 100, 150, and 200 meters.
- We have found that these trends were non-monotonic, primarily characterized by a decline at the outset of the period. However, over the last four decades, there has been stabilization, and the average annual wind speed has remained nearly unchanged.
- Summer wind speeds over the sea at points of interest (and in the overall domain) exhibited a significant declining trend, with rates of -0.05 m/sec per decade at 10 m height and -0.08 m/sec per decade at 100 m height. These trends are typical for both the long-term (1959-2022) and the short-term (1983-2022) periods.
- There is a trend of increased wind speed in winter and spring over the last four decades, although it is not statistically significant.
- The long-term trends in hours of strong winds (>17 m/sec) reveal an increase at all examined heights, but statistical significance was found only at 100, 150, and 200 meters, with rates of 1.8, 2.9, and 2.8 hours/decade, respectively.

---

<sup>3</sup> Ilotovize, E., and Yosef, Y. (2023). [An assessment of wind energy potential above the sea](#). Research Report No. 4000-0804-2023-0000029, Israel Meteorological Service.

## רקע

מטרת העבודה הינה לאמוד את השינויים במהירות הרוח בגובה ובמספר מוקדי עניין בתוך הים, תוך התייחסות לערכים הממוצעים, התפלגות הנתונים (מהירות וכיוון) ולמגמות במהירות הרוח הממוצעת במספר גבהים ובחלוקה לעונות השנה. בעבודה המלאה ניתן למצוא פרוט נרחב של המתודולוגיות השונות בהן השתמשנו, אימות בפעול של פרופיל הרוח שבוצע בין נתוני ERA5 למדידות באמצעות מכשיר המודד את פרופיל מהירות הרוח עד לגובה 200 מ' (LIDAR), סטטיסטיקה הקשורה למגוון מדדים החשובים לייצור אנרגיה מרוח ועוד. על-בסיס תוצאות האנליזות המרחביות, התמקדנו ב-5 נקודות עניין, בהן זוהו ערכי ממוצע מהירות הרוח הגבוהים בסביבה, במפלסי הגובה השונים. מוקדים אלו מוצגים באיור 1 המראה את אחוז כיסוי היבשה המוטמע ב-ERA5. בעובדה הנוכחית חלק מהתוצאות יוצגו ברמה המרחבית וחלקן יתמקדו בנקודת העניין החומה בלבד (Lon: 34.56; Lat: 32.75).



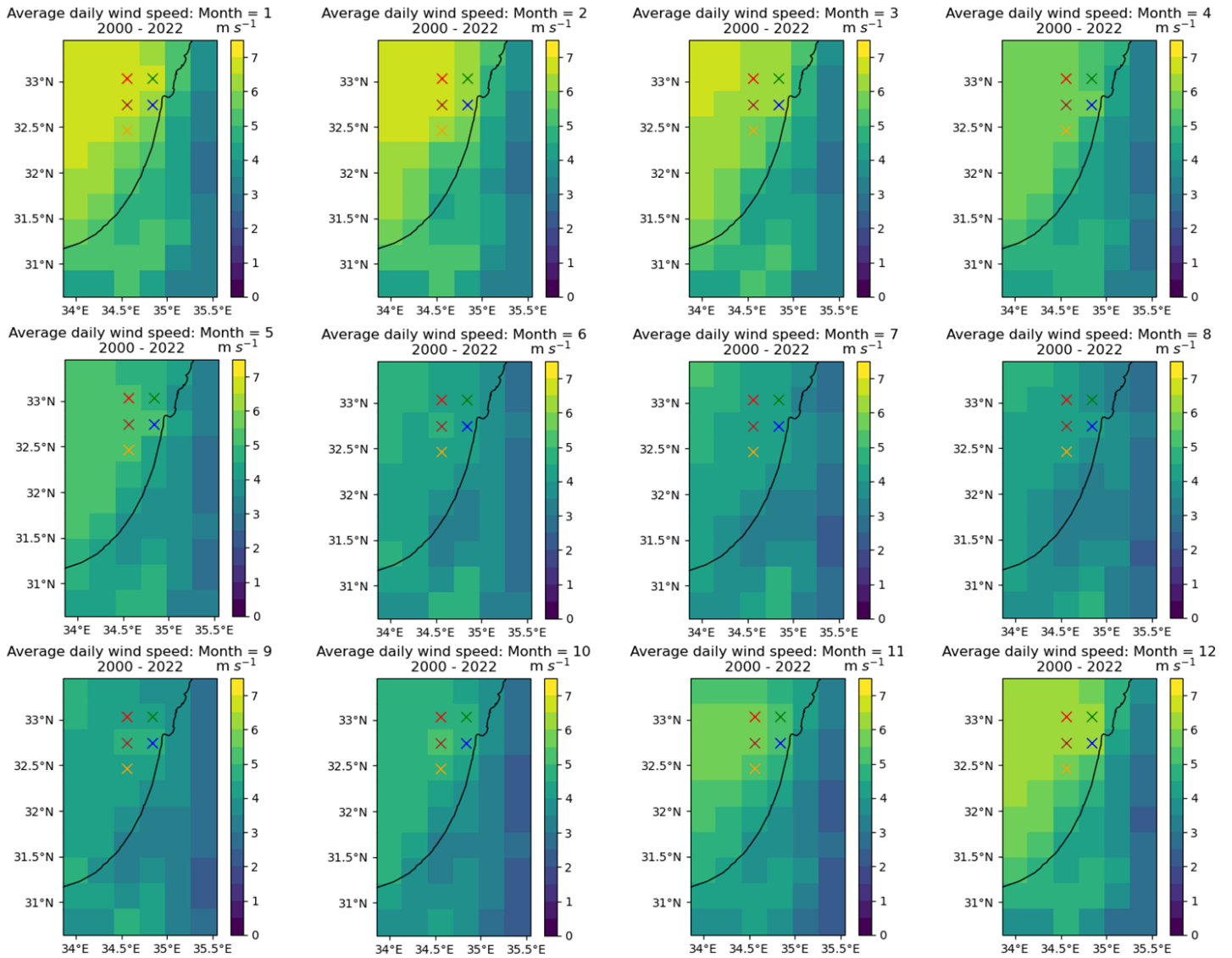
איור 1. אחוז כיסוי היבשה בכל נקודת סריג של המודל (Land Sea Mask). הנקודות המסומנות ב-X הן הנקודות שלהן בוצע מחקר נקודתי.

## עיקרי התוצאות

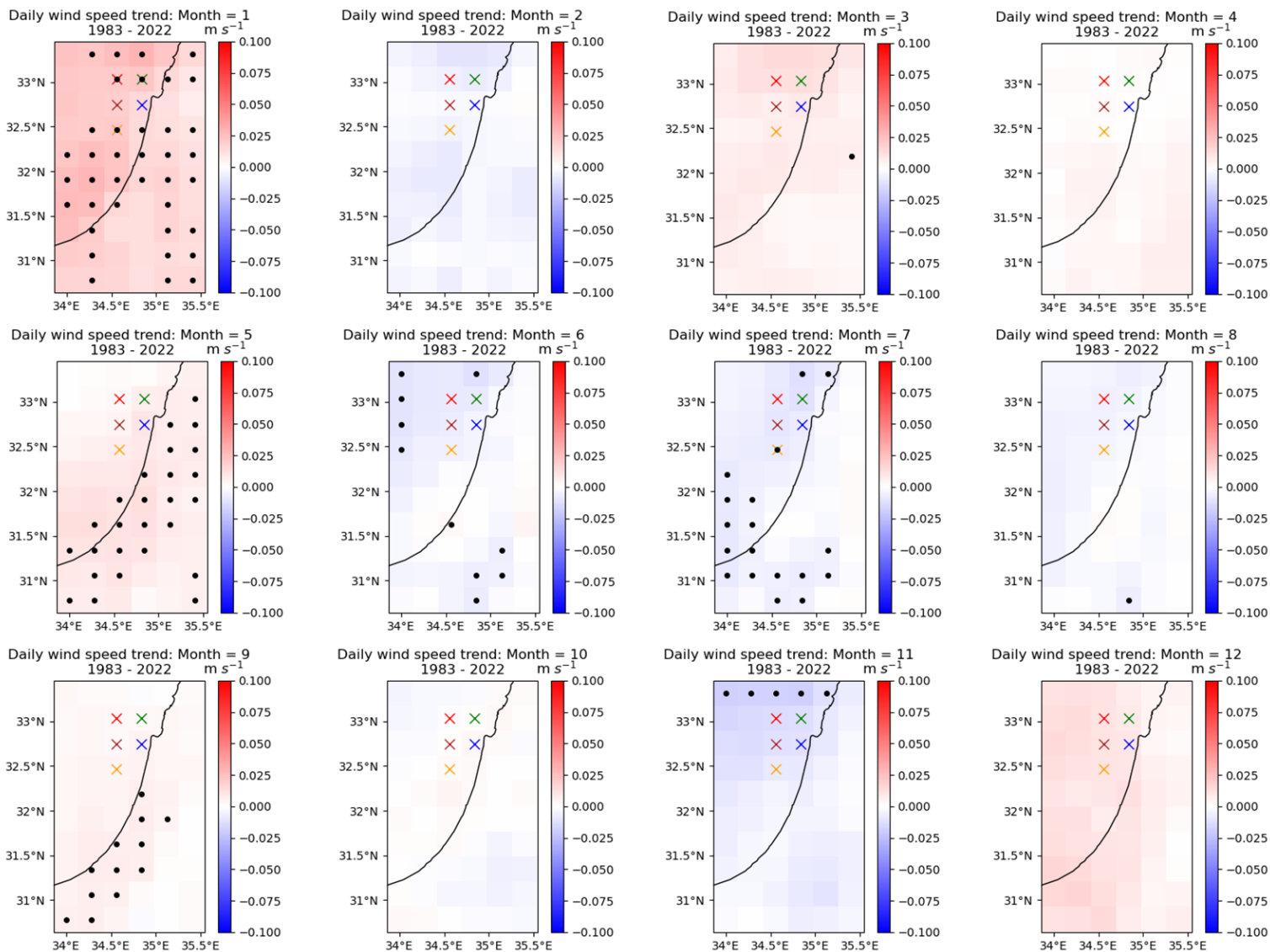
### **ניתוח מרחבי של מגמות מהירות הרוח בגובה 100 מ'**

איור 2 מציג ניתוח מרחבי של מהירות הרוח הממוצעת בגובה 100 מ' באגן המזרחי של הים התיכון בשני העשורים האחרונים (2000-2022). מאיור זה עולה שאזור הצפון-מערבי במפה נמצא כאזור בעל הרוחות החזקות ביותר במרחב הנבדק, ברוב חודשי השנה. עוד נמצא כי מהירות הרוח הממוצעת חזקה יותר בחודשי החורף מאשר בחודשי הקיץ. ההתחזקות ברוח נצפית מחודש נובמבר ונחלשת במאי. הערך הממוצע של מהירות הרוח בנקודת העניין החומה נע בין 4.2 מ'/שנייה באוגוסט ועד 6.8 מ'/שנייה בינואר.

איור 3 מציג את השינוי המרחבי במגמות מהירות הרוח בגובה 100 מ' לתקופה 1983-2022, ברמת מובהקות של 0.05 לפי מבחן Mann-Kendall ו-Sen's slope estimator. מאיור זה עולה כי המגמה בחודש ינואר מצביעה על התחזקות מובהקת במהירות הרוח הממוצעת בהרבה נקודות סריג במרחב. כך גם, נמצאה נטייה לעלייה (לא מובהקת) במהירות הרוח באזורים מעל הים בחודשים מרץ, אפריל, מאי, ספטמבר ודצמבר. לעומתם, נצפתה נטייה (לא מובהקת) להיחלשות במהירות הרוח הממוצעת בחודשי הקיץ (יוני עד אוגוסט). כמו כן, יש לציין שבחינת מגמות ארוכות הטווח במהירות הרוח הממוצעת בחודשי הקיץ (1959-2020), מצביעה על מגמת החלשות מובהקת (ראו את הדו"ח המלא).



איור 2. ממוצע מהירות הרוח (מ'/שנייה) בגובה 100 מ' לתקופה 2000-2022. נקודות הסריג המסומנות ב-X הן נקודות העניין.



איור 3. מגמות במהירות הרוח (מ'/שנייה), בגובה 100 מ' לתקופה 1983-2022 לכל חודש. נקודות הסריג המסומנות ב-X הן נקודות העניין. הנקודות השחורות מייצגות נקודות סריג בעלות מובהקות סטטיסטית ברמה של 0.05.

### מגמות במהירות הרוח בנקודת העניין

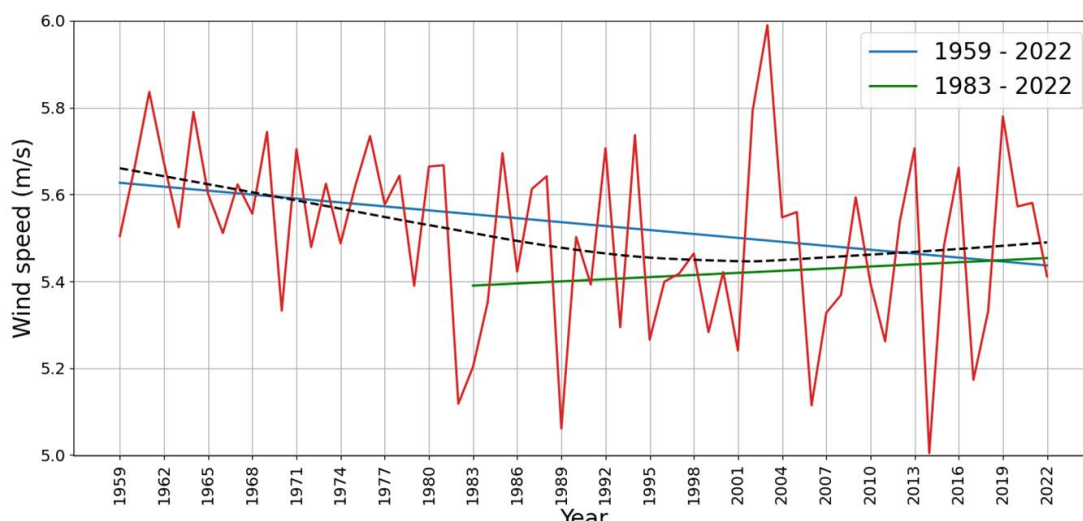
בחינת סדרת הזמן של ממוצע מהירות הרוח השנתית בנקודת העניין החומה בגובה 100 מ' (איור 4) ו-10 מ' (איור 5) בתקופה 1959-2022, מגלה כי בגובה 100 מ' קיימת ירידה מובהקת במהירות הרוח הממוצעת בשיעור של 0.03 מ'/שנייה לעשור וירידה לא מובהקת בשיעור של 0.02 מ'/שנייה לעשור בגובה 10 מ'. בתקופה הקצרה יותר, 1983-2022, קיימת מגמת עלייה לא מובהקת במהירות הרוח הממוצעת, בשני גבהים אלו ושיעורה הוא 0.02 מ'/שנייה לעשור. עוד ניתן להבחין כי המגמה איננה יורדת מונוטונית, קרי קיימת האטה במהירות הרוח מתחילת התקופה ועד סוף שנות ה-80 של המאה הקודמת ואחר כך התייצבות במהירות הרוח השנתית הממוצעת עד 2022.

בדיקת מגמות דומה, בנקודה החומה, חושבה גם לגבהים נוספים 150, 200 ו-800 מ'. סיכום הממצאים מופיע בטבלה 1. בדומה לממצאים בגובה 100 מ', גם כאן התוצאות מראות שלאורך התקופה הארוכה קיימת החלשות מובהקת בשיעור דומה במהירות הרוח השנתית בגבהים 150 ו-200 מ', בעוד שבגבהים 10 מ' (איור 5) ו-800 מ' הירידה איננה מובהקת. המגמות בתקופה "הקצרה", בכל הגבהים, מראות שינוי מינורי ולא מובהק של עלייה קטנה בעוצמת הרוח (טבלה 1) בשיעור של 0.01 עד 0.02 מ'/שנייה לעשור. יש לציין כי שיעור המגמות הארוכות ככלל ואלו הקצרות בפרט, הינו די קטן.

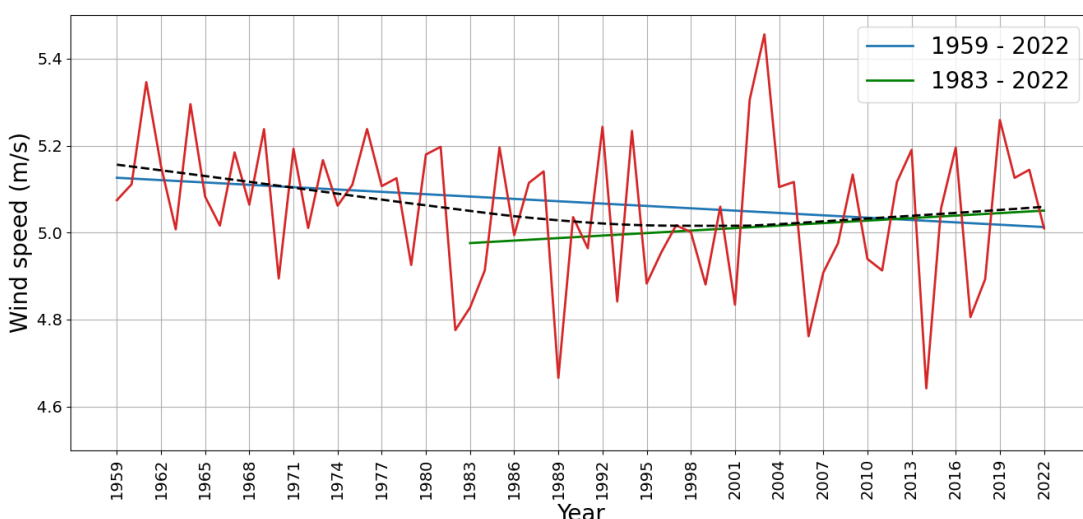
ניתוח המגמות לכל עונה בנפרד מגלה כי בקיץ בגובה 100 מ' קיימת ירידה מובהקת הן לתקופה הארוכה והן לקצרה בשיעור של 0.08 מ'/שנייה לעשור, בעוד שבשאר העונות ההאטה במהירות הרוח הממוצעת קטנה יותר ולא מובהקת בתקופה הארוכה (איור 6 וטבלה 2). לצד הירידות, נמצא כי בתקופה הקצרה, החורף בעל נטייה להתחזקות בשיעור של 0.1 מ'/שנייה לעשור (לא מובהק).

באופן דומה, בוצע ניתוח מגמות עונתי גם לגובה 10 מ' בו התקבלו מסקנות דומות (איור 7). בקיץ קיימת ירידה מובהקת הן לתקופה הארוכה והקצרה בשיעור של 0.05 מ'/שנייה לעשור (טבלה 3), בעוד שבשאר העונות אין מובהקות סטטיסטית.

לסיכום, ברמה השנתית בארבעת העשורים האחרונים ככלל, לא נצפתה מגמה משמעותית כלשהי במהירות הרוח הממוצעת, למעט האטה מובהקת בעונת הקיץ.



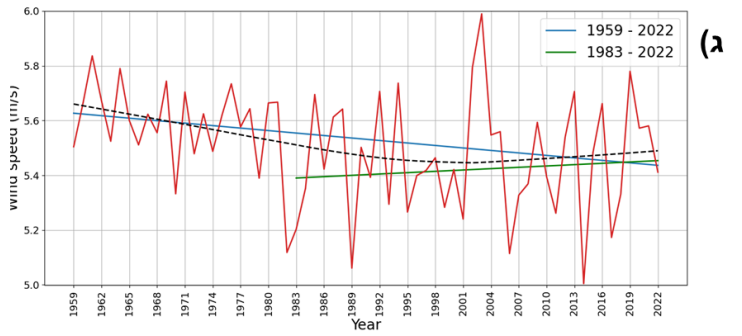
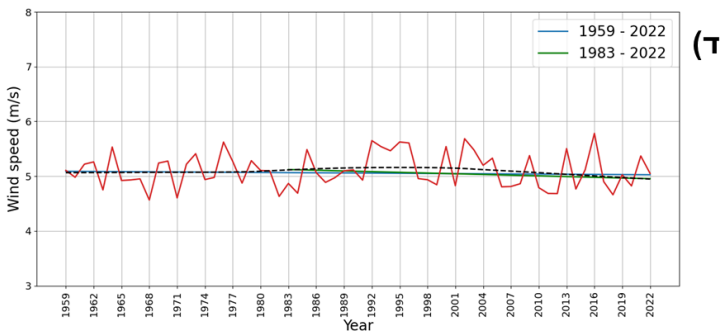
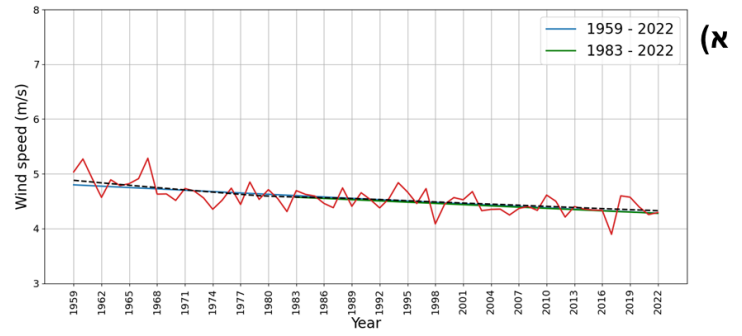
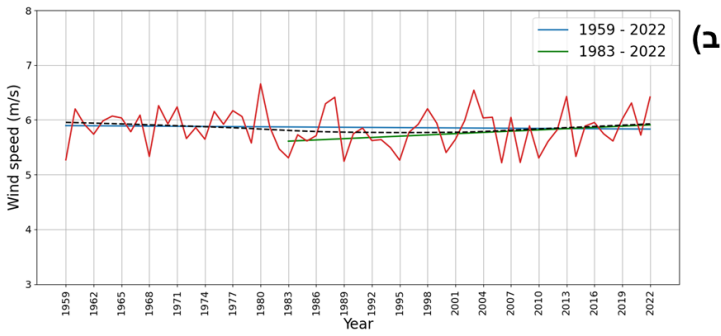
איור 4. מהירות רוח שנתית ממוצעת (אדום), בנקודת העניין החומה, בגובה 100 מ'. מגמה לינארית לתקופה 1959-2022 (כחול) ומגמה לינארית לתקופה קצרה 1983-2022 (ירוק). החלקה באמצעות שיטת Lowess (שחור מקווקו).



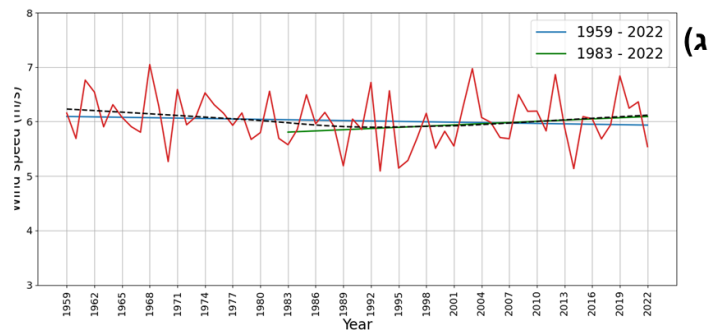
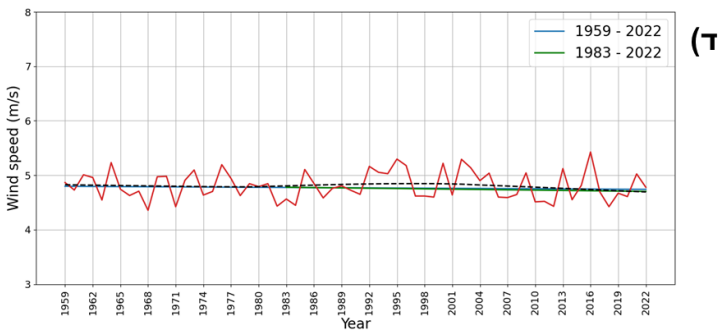
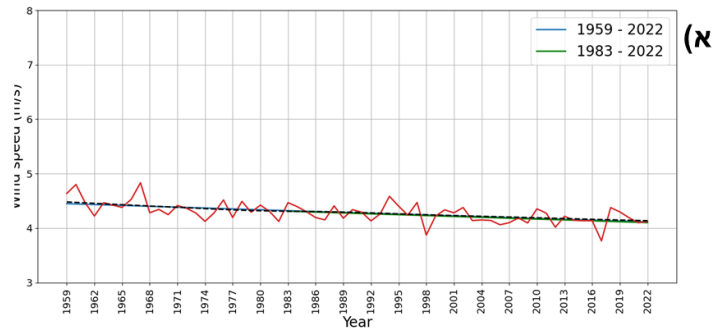
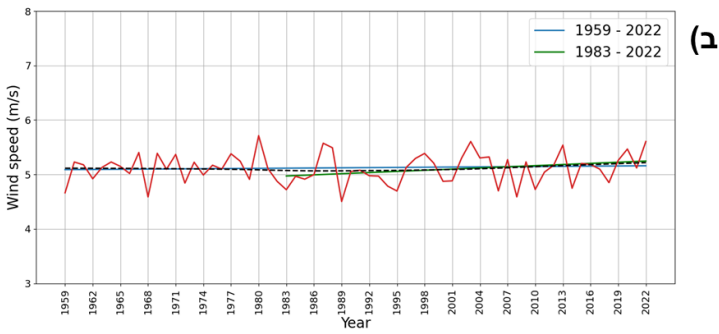
איור 5. מהירות רוח שנתית ממוצעת (אדום), בנקודת העניין החומה, בגובה 10 מ'. מגמה לינארית לתקופה 1959-2022 (כחול) ומגמה לינארית לתקופה קצרה 1983-2022 (ירוק). החלקה באמצעות שיטת Lowess (שחור מקווקו).

טבלה 1. המגמות במהירות הרוח השנתית הממוצעת (מ' שנייה/עשור), בנקודת העניין החומה, לגבהים: 100, 150, 200 ו-800 מטר, בתקופות 1959-2022 ו-1983-2022. ערכים מודגשים מובהקים סטטיסטית ברמת מובהקות של 0.05.

גובה (מ')	2022-1959 (מ' שנייה/עשור)	2022-1983 (מ' שנייה/עשור)
10	-0.02	0.02
100	-0.03	0.02
150	-0.03	0.01
200	-0.04	0.01
800	-0.04	0.02



איור 6. כמו איור 4 (גובה 100 מ') רק לכל עונה בנפרד: (א) קיץ, (ב) אביב, (ג) חורף, (ד) סתיו.



איור 7. כמו איור 5 (גובה 10 מ') רק לכל עונה בנפרד: (א) קיץ, (ב) אביב, (ג) חורף, (ד) סתיו.

טבלה 2. המגמות במהירות רוח ממוצעת (מ"/שנייה/עשור), לשתי תקופות, בנקודת העניין החומה, בגובה 100 מ', לכל עונה. ערכים מודגשים מובהקים סטטיסטית ברמת מובהקות של 0.05.

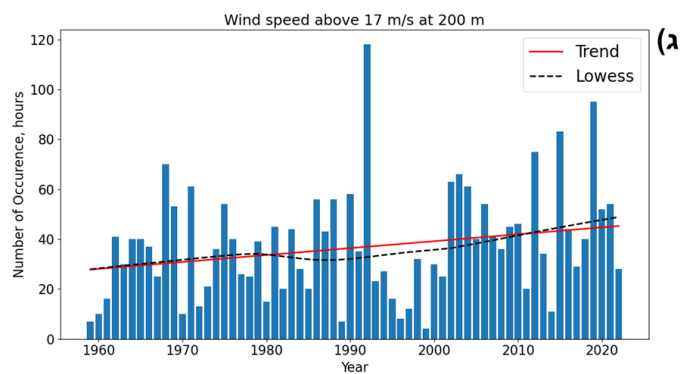
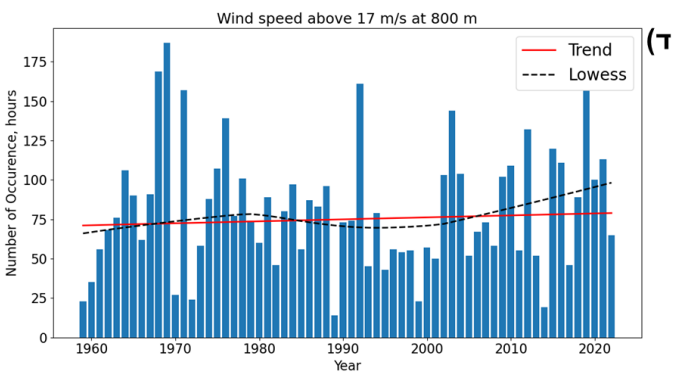
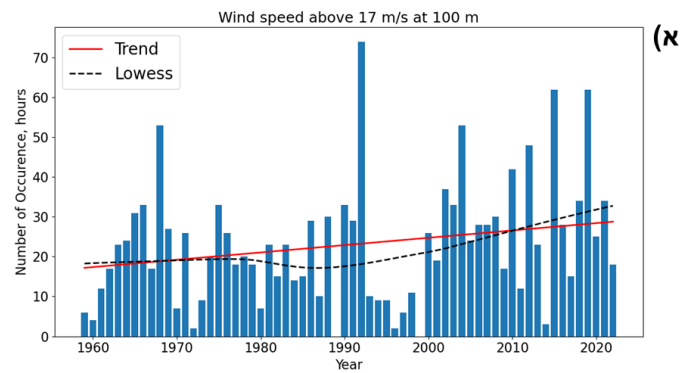
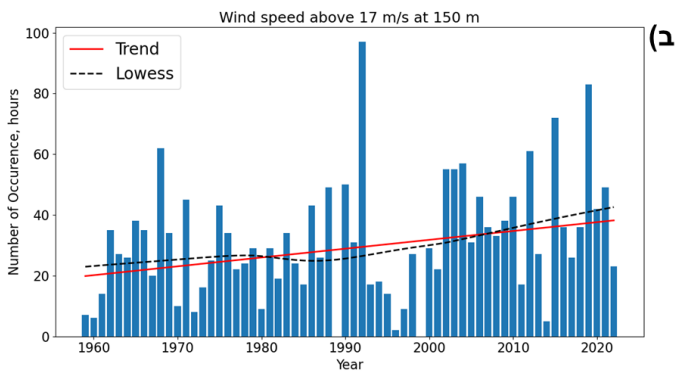
עונה	2022-1959 (מ"/שנייה/עשור)	2022-1983 (מ"/שנייה/עשור)
אביב	-0.01	0.08
קיץ	<b>-0.08</b>	<b>-0.08</b>
סתיו	-0.01	-0.04
חורף	-0.03	0.1

טבלה 3. המגמות במהירות רוח ממוצעת (מ"/שנייה/עשור), לשתי תקופות, בנקודת העניין החומה, בגובה 10 מ', לכל עונה. ערכים מודגשים מובהקים סטטיסטית ברמת מובהקות של 0.05.

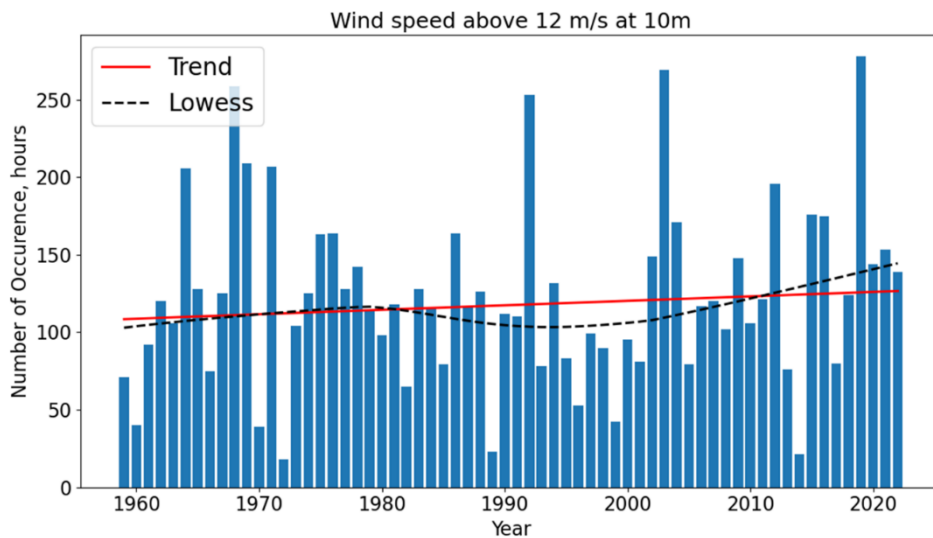
עונה	2022-1959 (מ"/שנייה/עשור)	2022-1983 (מ"/שנייה/עשור)
אביב	0.01	0.07
קיץ	<b>-0.05</b>	<b>-0.05</b>
סתיו	-0.009	-0.02
חורף	-0.03	0.07

#### מגמות במקרים של רוחות חזקות

איור 8 מציג את מספר השעות בכל שנה (2022-1959) של רוחות חזקות (מעל 17 מ"/שנייה) בנקודה החומה. המגמות הלינאריות מצביעות על עלייה מובהקת במספר השעות בשנה, בגובה 100 מ' (איור 9א'), בגובה 150 מ' (איור 9ב'), בגובה 200 מ' (איור 9ג'), למעט העלייה במגמה בגובה 800 מ' (איור 9ד'), שאיננה מובהקת סטטיסטית. טבלה 4 מסכמת את המגמות הלינאריות במספר השעות לעשור, בגבהים השונים. בנוסף, ניתן לראות שהעלייה בשכיחות איננה מונוטונית, כך בגבהים 100 עד 200 מ' מתחילת שנות ה-60 ועד סוף שנות ה-80 אין שינוי בולט במספר השעות הממוצע שבהן נשבו רוחות חזקות. לעומת זאת, בתחילת שנות ה-90 החלה עליה בשכיחותן עד לסוף התקופה הנבדקת. מגמה זו מאוד דומה לשינוי הנצפה בטמפרטורה (בעיקר בזו של טמפרטורת המינימום). בגובה 800 מ' מגמת העלייה נמצאה בעיקר מאמצע שנות ה-2000. ייתכן והעלייה המובהקת בשכיחות השעות בהן נושבת רוח חזקה מתכתבת עם הגידול הכללי באירועי הקיצון, כחלק משינויי אקלים. בגובה 10 מ' באותה נקודת סריג (איור 9 וטבלה 4), נמצאה עלייה לא מובהקת, של 2.9 שעות/עשור במספר השעות של רוחות חזקות בכל שנה (הפעם מעל 12 מ"/שנייה), בתקופה הארוכה 2022-1959. בדומה לשאר הגבהים, גם כאן ישנה מגמה של עלייה במספר השעות של רוחות חזקות, מאמצע שנות ה-90 של המאה הקודמת ועד 2022. יש לציין כי לא נבדקו משבי רוח שיכולים להיות חזקים בהרבה מהרוח השעתית שנבדקה בחלק זה של העבודה.



איור 8. התפלגות מספר השעות שבהן מהירות הרוח מעל 17 מ'/'שנייה בכל שנה לתקופה 1959-2022 בגובה 100 מ' (א), 150 מ' (ב), 200 מ' (ג) ו-800 מ' (ד), בנקודה החומה. קו מגמה לינארי (אדום) החלקה באמצעות שיטת Lowess (שחור מקווקו).



איור 9. התפלגות מספר השעות שבהן מהירות הרוח מעל 12 מ'/'שנייה בכל שנה לתקופה 1959-2022 בגובה 10 מ', בנקודה החומה. קו מגמה לינארי (אדום) החלקה באמצעות שיטת Lowess (שחור מקווקו).

טבלה 4. המגמות במספר השעות לעשור של מהירות רוח מעל ערך סף נתון (מ'/שנייה), בנקודה החומה, בהתאמה לאיורים 9 ו-10 בגבהים: 10, 100, 150, 200 ו-800 מטר, בתקופה 1959-2022. ערכים מודגשים מובהקים סטטיסטית ברמת מובהקות של 0.05.

גובה (מ')	סף מהירות הרוח (מ'/שנייה)	2022-1959 (שעות/עשור)
10	12	2.9
100	17	1.8
150	17	2.9
200	17	2.8
800	17	1.3

מסמך זה יש לצטט כך :

אילוטוביץ, א' ויוסף, י' (2023). מגמות במהירות הרוח מעל הים – דרום מזרח אגן הים התיכון, דו"ח מחקר מס' 4000-0804-2023-0000031, השירות המטאורולוגי.

Ilotovize, E., and Yosef, Y. (2023). Trends in wind speeds above the sea – Southeastern Mediterranean Basin, Research Report No. 4000-0804-2023-0000031, Israel Meteorological Service.