

## הקמת טורבינות רוח קטנות לייצור חשמל

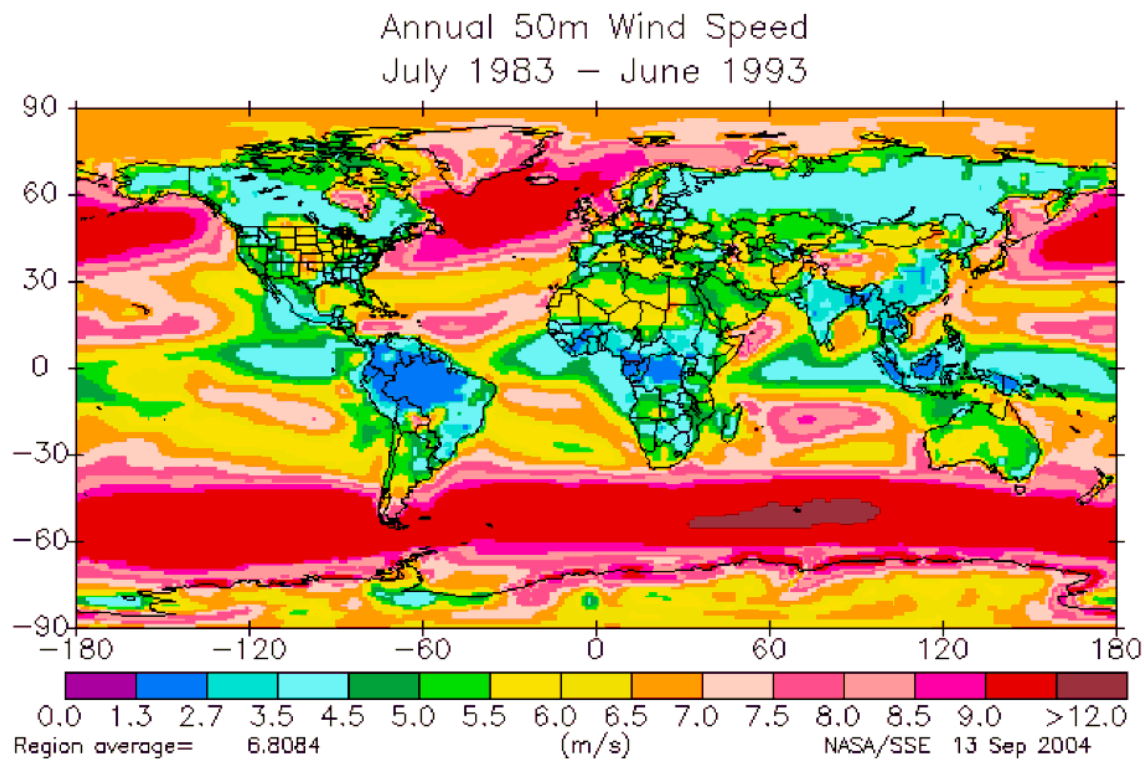
נכתב על ידי חנן עינב לוי מהקואופרטיב לאנרגיות המתחדשות [www.ecoop.org.il](http://www.ecoop.org.il)

בספטמבר פרסמה הרשות לשירותים ציבוריים תעריף מיוחד לחשמל המיוצר ע"י טורבינות רוח קטנות וקהילתיות. מהן טורבינות רוח קטנות, מהי אנרגיית הרוח הקיימת בארץ, ולמי מתאים להרים טורבינה קטנה-קהילתית? על כך בקצרה, ננסה לענות כאן.

### משאב הרוח בארץ ובעולם

השמש מחממת את פני כדור הארץ באופן לא שווה. בקו המשווה - היכן שהחימום הרב ביותר - עולה הטמפרטורה ועמה האוויר החם שמתרומם לאטמוספירה. עלייה זו של אוויר חם יוצרת סירקולציה של אוויר ברמה גלובלית. בנוסף לכך, מספר תופעות מקומיות משפיעות על מהירות וכיוון הרוח - רכסים, וואדיות, וקרבה לחוף למשל.

מבט על תמונת הרוחות בעולם בגובה נמוך - דומה למפת העולם. האזורים עם כמות הרוח הכי גדולה הם מעל האוקיינוסים - בקווי הרוחב 30-60, בחצי הדרומי ובחצי הצפוני. בחצי הדרומי של כדור הארץ אפשר לראות רצועה של מהירות רוח גבוהה - כי אין יבשות ש"מפריעות" למהלך החופשי של הרוח. עם זאת, משאב הרוח מעל היבשות ובאזורים החוף הצמודים להם חושב לאחרונה ע"י [Jacobson](#) ונמצא כעומד על 72 טרה-וואט (TW), שווה ערך לפי 5 מכל צריכת הדלקים והחשמל העולמית!

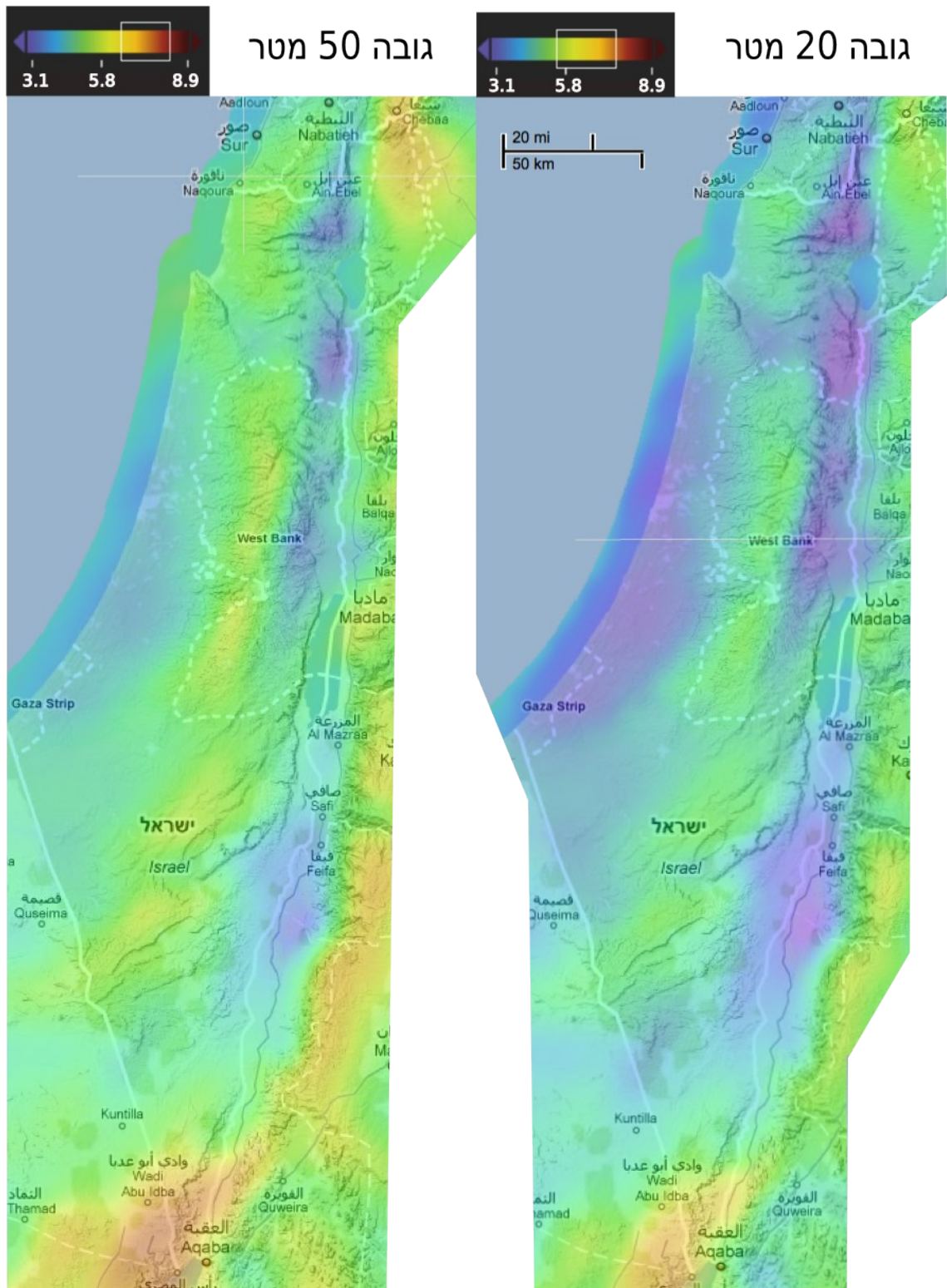


איור 1: מפת מהירויות הרוח הממוצעות בעולם בגובה 50 מטרים.

מקור - <http://www.climate-charts.com/World-Climate-Maps.html>

בישראל קיים פוטנציאל רב למשאב הרוח, אך לעומת הפוטנציאל מהשמש - הוא מתרכז באזורים מצומצמים יחסית של הארץ. ברמת הגולן (היכן שנמצאת חוות הרוח היחידה בארץ נכון לרגע כתיבת שורות אלה) פוטנציאל הרוח הגבוה ביותר בארץ. בנוסף לכך, בצפון הארץ בולטים הרי הגליל, דרום הכנרת והגלבוע. באזור המרכז בולטים אזור דרום הר חברון ושיפולי השומרון. בדרום הארץ מדובר על אזור הר הנגב הגבוה במערב, ואילת ואזור הערבה הדרומית במזרח.

## רוח שנתית ממוצעת - מטר לשניה - 3tier.com



איור 2: הערכת משאב הרוח בדרום-מרכז עד צפון ישראל, בגובה 20 ו-50 מטר. מהירות רוח במטר לשניה (בסקאלת צבעים פינה שמאלית עליונה). מבוסס על נתוני השרות המטאורולוגי. עיבוד ותמונה -

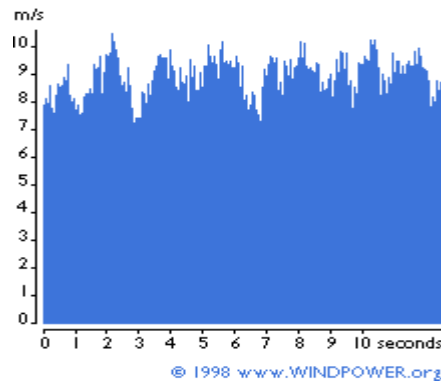
<http://www.3tier.com/firstlook>

המלבן הלבן על הסקאלה מיצג אותו אתר, בגבהים השונים. עוד על גובה ומהירות רוח בהמשך המסמך.  
(אין ציון של ערים בישראל, כך במקור)

הפוטנציאל להספק המותקן בישראל הוערך ב-600 מגאוואט על סמך מדידות חלקיות, אולם נראה כי מספר אופייני יותר מתקרב אל 1200-2000 מגאוואט. בכל מקרה אין מדובר במשאב זניח, וכל מגאוואט-שעה המיוצר ע"י אנרגיית הרוח מייתר שריפה של פחם לייצור אותה כמות אנרגיה חשמלית! המשאב הנ"ל הינו הערכה לפי מהירות רוח ממזעזעת, שנתית, בגובה ציר הטורבינה (מרכז הלהבים) של לפחות 5.9 מטרים לשנייה. המשמעות של המספר הזה תובהר למטה בחשבון כלכלי אופייני.

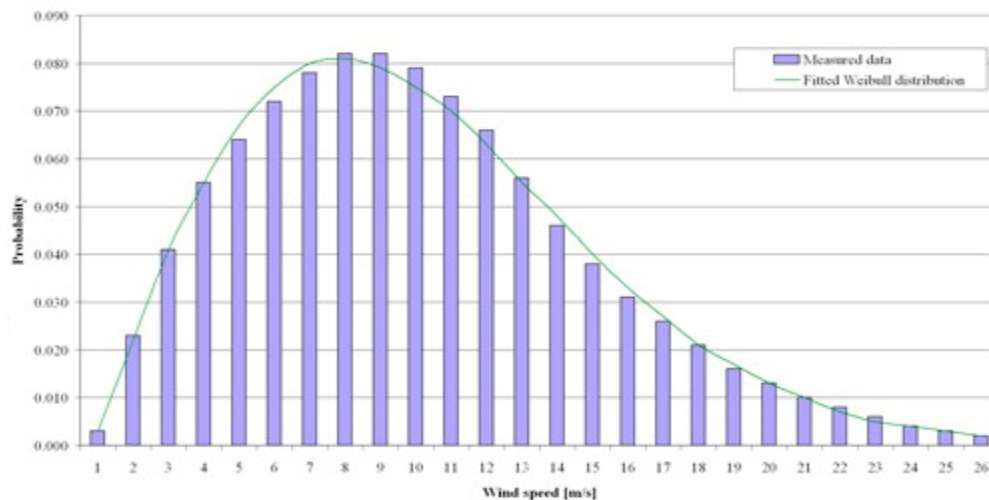
## מדידת רוח - התיאוריה

הרוח היא תופעה מאוד לא יציבה כשמסתכלים על ההשתנות קצרת הטווח שלה. מדידת רוח במקום מסוים לאורך כמה שניות יכולה להראות כך –



איור 3: שינוי מהירות הרוח לאורך 10 שניות באתר רוח אופיני

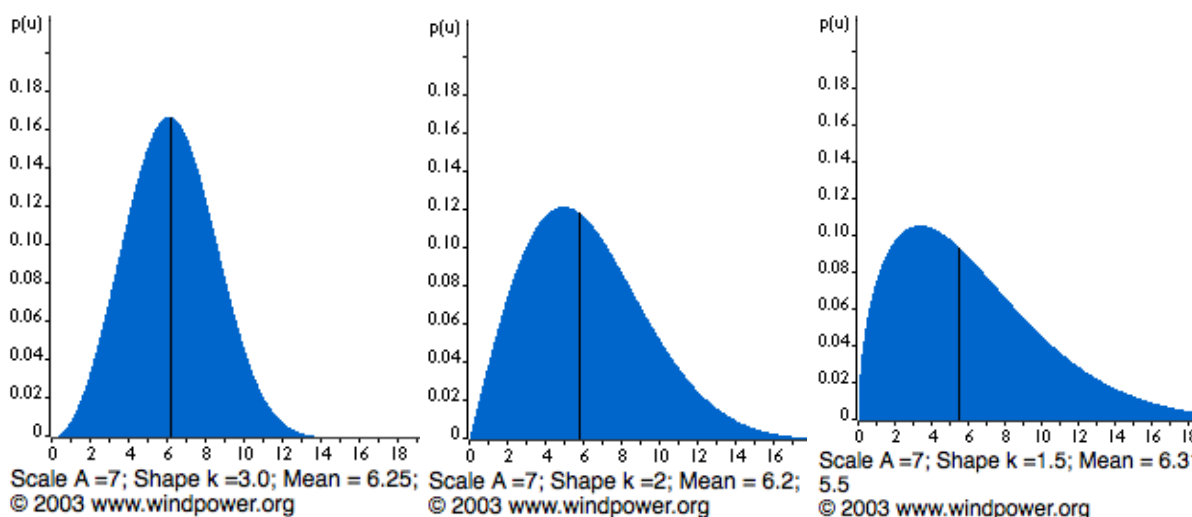
אבל, ככל שנמתין פרק זמן ארוך יותר ונביט על ההתפלגות, המדידה תראה יותר ויותר קבועה, וניתן יהיה לתאר אותה לפי התפלגות מאוד אופיינית - לפי התרשים המובא להלן:



איור 4: התפלגות הרוח במדידה ארוכת טווח באתר מסוים. המלבנים הכחולים מייצגים אחוז הזמן שהרוח הייתה במהירות מסוימת מתוך כל תקופת המדידה. הקו הירוק הוא התאמה של משוואה המכונה Weibull על שם ממציאה

מקור - <http://www.wind-energy-the-facts.org>

את נתוני הרוח נהוג לתאר לפי התפלגות על שם Weibull. התפלגות זו מתוארת לפי 2 מספרים – מהירות הרוח הממוצעת (או פרמטר סקלה) ופרמטר  $k$  בעל ערך שבין 1 ו 3. ככל שהמספר גבוה יותר, כך ההתפלגות צרה יותר סביב המהירות הממוצעת, ויש פחות אנרגיה ברוח. לשם הדוגמה, הרוח באילת מתפלגת באופן צר יותר סביב המהירות הממוצעת, ולכן כדאי להשתמש עבורה בהתפלגות זו. הערכים עבור אילת הינם  $k=2.63$ , ומהירות ממוצעת של 5.2 מטר לשנייה, בגובה מד הרוח שנמצא בגובה 5 מטרים מעל פני הקרקע. כמו כן, כהפשטה נוספת ניתן לתאר את התפלגות נתוני הרוח גם לפי התפלגות על שם ריילי (Rayleigh) - שהיא מקרה ספציפי בו  $k=2$ .



איור 5: התפלגות רוח Weibull עם פרמטר  $k$  שונה. המקרה האמצעי, בו  $k=2$  מכונה התפלגות ריילי  
 מקור - <http://guidedtour.windpower.org/en/tour/wres/weibull/index.htm>

## אפיון הפוטנציאל – התפלגות מהירות הרוח באתר

התועלת הכלכלית של התקנת טורבינת רוח נובעת בראש ובראשונה ממדידת הרוח באתר בו מותקנת הטורבינה. הודות לשרות המטאורולוגי וגופים ממשלתיים אחרים, קיים כבר "בנק" של נתוני מדידות רוח בארץ, ולפיהם אפשר להעריך את פוטנציאל הרוח באתר מסוים - תוך התחשבות בטופוגרפיה של האזור והמרחק שלו מהתחנה. מקורות אפשריים למדידות רוח הם (ללא סדר מסוים):

1. השרות המטאורולוגי
2. משרד התשתיות
3. משרד החקלאות
4. חברת החשמל
5. איגוד ערים לאיכות סביבה
6. צה"ל
7. רשות שדות התעופה
8. קיבוצים שונים

השלב השני הוא שימוש בכלים למדידת הרוח - באופן שתלוי בגודל הטורבינה אותה אנו שוקלים להתקין. טורבינה קטנה לא מצדיקה מבחינה כלכלית הקמה של מד-רוח ומדידה של נתונים לאורך שנה שלמה - כפי שמקובל בחוות הרוח הגדולות. ניתן, אם כן, להשתמש במפת רוח ובמתקין מנוסה לשם קבלת הערכה, או לחלופין להתקין מד רוח זול שמחובר למחשב - לשם איסוף נתונים אמיתיים בהוצאה מינימאלית. באם וכבר הותקנה טורבינה באזור קרוב ניתן להשתמש בניסיון של מתקין הטורבינה הזו.

## מדידות רוח

ישנן בארץ מספר חברות שנותנות שרותי מדידת רוח, וסביר שיקומו נוספות. כפי שניתן לנחש - מדידת והערכת משאב הרוח היא הכרחית לשם הקמת טורבינת רוח.

הניסיון הבריטי מהשנים האחרונות מלמד שהקמת טורבינת רוח **באזור פתוח**, על סמך אנליזה מתחנת רוח קרובה שמדדה לאורך שנים מנבאת באופן מדויק, עד כדי מספר אחוזים בודדים בלבד של הפרש בין תפוקת החשמל בפועל לבין הערכת המתקנים.

באזור עירוני לעומת זאת, בהתקנה על גגות בתים נמוכים התפוקה הייתה מגוחכת, כפי שנראה בהמשך.

ה-Energy Saving Trust הבריטית שערכה את המחקר הנ"ל ממליצה על מינימום של 3 חודשים של מדידות. כאמור, אם זה לא אפשרי, יש להשתמש בנתוני רוח קרובים והערכה של אנשי מקצוע. זמן זה הוא קצר ביחס למה שמקובל בטורבינות בינוניות וגדולות. בחוות רוח גדולות מינימום זמן המדידה עומד על שנה, ולא נדיר למצוא מדידות של מספר שנים. בטורבינות בינוניות רצוי למדוד לפחות חצי שנה עד שנה.

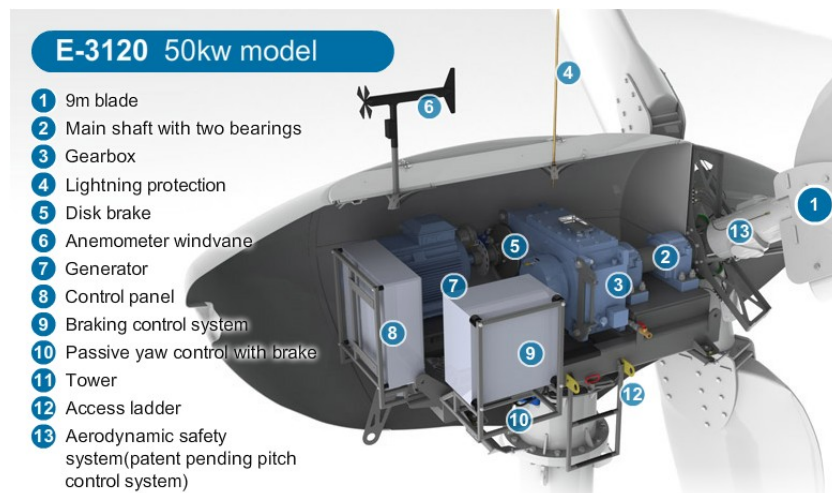
טווח השגיאה בהערכת משאב הרוח משתנה לפי זמן המדידה. כמובן שהטופוגרפיה של האתר, והמרחק מתחנת מדידה עם נתונים רב שנתיים, הם 2 גורמים בעלי משמעות רבה שאינה תלויה בזמן המדידה. אך על מנת להקטין את השגיאה בהערכת הרוח באתר, **כדאי להאריך את זמן המדידות**. עבור מדידות של שנה ויותר, ושימוש בקורלציה לתחנה קרובה עם מדידות רב שנתיות, ניתן להגיע לשגיאה בתפוקת האנרגיה השנתית של פחות מ-10%! שימו לב, שמכיוון שההספק ברוח עולה כמו מהירות-הרוח בחזקה השלישית, השגיאה במדידת הרוח קטנה יותר. באופן גס, היחס בין השגיאה בהערכת מהירות הרוח הממוצעת השנתית לשגיאה בהערכת ייצור החשמל השנתי הוא בין 2-3, כלומר אם השגיאה בהערכת מהירות הרוח הממוצעת באתר היא 5%, השגיאה בהערכת כמות האנרגיה המיוצרת תנוע בין 10-15% שנתי. כלומר על מנת לקבל שגיאה של 10% בהערכת ייצור האנרגיה השנתי, צריך שגיאה של בין 3-5% בהערכת מהירות הרוח הממוצעת השנתית.

## טכנולוגיה – טורבינת הרוח המודרנית

טורבינת הרוח המודרנית התפתחה לאורך השנים וכיום מירב הטורבינות המותקנות בעולם הן בעלות ציר סיבוב אופקי ו-3 להבים, ממוקמות בראש מגדל, מכילות מנגנון המכונן אותן אל הרוח, ומנגנון נוסף המפנה אותן הרחק מהרוח בסערות חזקות ומסוכנות. ההבדל העיקרי בין טורבינות גדולות - כפי שיש בחוות הרוח ברמת הגולן - וטורבינות קטנות או קהילתיות הוא באמצעי הכיוון אל הרוח וההגנה מרוח חזקה מדי וכן בסוג הגנראטור.

### איך עובדת טורבינת רוח?

אופן הפעולה של טורבינת רוח הוא פשוט מאוד - הרוח נושבת דרך הלהבים ומייצרת הפרש לחצים, וכוחות העילוי הנוצרים עקב כך דוחפים את הלהב. הלהבים מסתובבים, ומסובבים את הציר המרכזי - שמחובר ישירות אל גנראטור. הגנראטור המסתובב מייצר חשמל. בתמונה שלמטה ניתן להתרשם ממבנה בסיסי של טורבינת רוח להפקת חשמל.



איור 6: פרוט רכיבים של טורבינת Endurance E-3120

טורבינה קהילתית גדולה – 45 קילוואט הספק מותקן ב-9 מטרים לשנייה בעלת קוטר להבים של 18 מטרים



## הספק מותקן

המונח "הספק מותקן" מתייחס להספק של הטורבינה במהירות רוח מסוימת. כל יצרן נוקב במהירות רוח אחרת, כשמהירות אופיינית היא בין 10-12 מטרים לשנייה. וזאת מכיוון שעדיין אין סטנדרט מחייב. הבשורה היא שבמהלך 2010 אמור להיכנס סטנדרט של האיגוד האמריקאי AWEA, בארץ מהירות הרוח שנבחרה על ידי הרשות לשירותים ציבוריים חשמל - הגוף שקבע את התעריף לטורבינות רוח קטנות - היא 9 מטרים לשנייה. זוהי מהירות המתאימה הרבה יותר לתנאי הארץ, והבחירה במהירות מסוימת תאפשר לצרכנים להשתמש בה כעוגן-מהירות להשוואה ראשונית בין טורבינות שונות.

## כיוון הטורבינה אל הרוח

בטורבינות קטנות המתקן שמפנה את הלהבים את הרוח הוא זנב פסיבי (כמו בדגם - Bergey שבתמונה למטה).



איור 7: Bergey Excel 10 Kw

קוטר להבים 7 מטר, הספק מותקן כ-4.2 Kw ב-9 מטר לשניה

אפשרות נוספת לכיוון הלהבים אל הרוח בטורבינות קטנות הוא במיקום הלהבים במורד הרוח ביחס למגדל (כמו בדגם - Skystream בתמונות שלמטה), ובניית הלהבים עם הטיה היוצרת צורה של משפך. באופן זה הלהבים מתפקדים כזנב ומטים את עצמם אל הרוח.



איור 8: SouthWest windpower Skystream

קוטר להבים 3.7 מטר, הספק מותקן 1.5 Kw ב-9 מטר לשניה  
טורבינה כזו מותקנת בחוות טנא על יד שדה בוקר

בטורבינות קהילתיות בדרך כלל לא יהיה זנב, ואמצעי הכיוון אל הרוח יהיה מיקום הלהבים במורד הרוח (כמו בדגם - Endurance E-3120), או שימוש במנוע לסיבוב הלהבים אל הרוח לפי מדידה של מד כיוון רוח שיותקן מאחורי הלהבים.



איור 9: Endurance E-3120  
קוטר להבים 18 מטר, הספק מותקן כ-45 Kw ב-9 מטר בשניה

### טורבינות קטנות וקהילתיות-בינוניות

מהן טורבינות קטנות וקהילתיות-בינוניות אם כן?

הכוונה היא פשוט לסיווג הטורבינה לפי ההספק המותקן שלה. ההגדרות בעולם הן בדרך כלל במונחים mini wind, micro wind וכדומה. עבור ישראל אני מציע להתייחס לטורבינות קטנות וקהילתיות לפי התעריף שניתן ע"י הרשות.

טורבינות קטנות - פחות מ-15 קילוואט הספק מותקן - דבר שבא לידי ביטוי בקוטר הלהבים של פחות מ-10 מטרים (למשל ה-Bergey 10 Kw וה-Skystream). בהתאמה, טורבינות קהילתיות-בינוניות יסווגו בין 15 ל-50 קילוואט הספק מותקן - דבר שבא לידי ביטוי בקוטר להבים של פחות מ-20 מטרים לערך (למשל ה-Endurance E-3120). כמו כן, בטורבינות קהילתיות יש בדרך כלל גיר בין הלהבים לגנראטור, דבר שלא קיים בטורבינות קטנות.

### בחירת המוצר – מה אפשרי, מה אמיתי, ואיך משווים?

איך בוחרים טורבינה?

ישנם הרבה סוגים של טורבינות רוח בשוק, אך יש דרך אחת ברורה לסווג בין מוצר אמיתי לבין הבטחות שווא. **כדאי להתקין טורבינה שכבר יש ניסיון איתה ואפשר לקבל נתוני ביצוע אמיתיים לאורך זמן משמעותי.** אפשר להתחיל מהרשימה של טורבינות המתאימות לתמריצים בקליפורניה וניו יורק שמפרסם האיגוד האמריקאי לאנרגיית הרוח למשל (AWEA), מופיע בקישורים למטה) - היכן שנמצא השוק הכי גדול לטורבינות כאלה.

ישנן טורבינות נוספות שיכולות להיות מצוינות ועדיין לא נמצאות ברשימה הזו, כמו למשל כמה מוצרים של יצרנים סיניים - דוגמת Hammer. אולם חובת ההוכחה מוטלת עליהם! להלן שמות אופייניים של יצרנים מובילים בעולם לטורבינות בפלח הטורבינות הקטנות:

Southwest-windpower

Bergey

Proven energy

בפלח הטורבינות הקהילתיות:

Northern power systems

Endurance wind power

Entegrity wind systems

Wind Turbine Industries Corp.

דרך נוספת לסנן בין מתקנים ובין מוצרים טובים יותר ופחות היא לשאול את היצרן מספר שאלות חשובות - כפי שמציע האיגוד האמריקאי לאנרגיית הרוח. חלק מהשאלות התאמת

לישראל, לאור העובדה שהשוק פה צעיר ואין עדיין אפשרות לראות טורבינות שהותקנו לאורך זמן כמו בארה"ב למשל.

### רשימת שאלות ליצרן/מתקין הטורבינה:

- מהי תפוקת האנרגיה של הטורבינה בשנה ממוצעת עבור מהירויות רוח ממוצעות של 5-7 מטר לשנייה בגובה 10 מטר? האם זה ערך שנמדד מביצועים אמיתיים של הטורבינה בשטח (מועדף) או לפי סימולציות מחשב?
- האם אתם יכולים להפנות אותי ללקוח שבבעלותו אותו מודל שאתם מציעים לי? או להפנות למקומות בהם הותקנו הטורבינות בחו"ל?
- מהי תקופת האחריות על הטורבינה? מה האחריות מכסה? (סטנדרט בתעשייה – 5 שנים)
- מה עלויות התחזוקה ותכיפות התחזוקה השנתית? האם אתם מספקים שרות תחזוקה, ואם כן – מה העלות?
- האם הטורבינה/מגדל עברו מבחן אמינות (reliability test)? על ידי מי? מה היו התוצאות?
- כמה זמן החברה מייצרת טורבינות רוח?
- כמה זמן הדגם הנ"ל נמכר בשוק? (לא כאב טיפוס, אלא כמוצר מוגמר) ? (השאלה תהיה רלוונטית ללקוחות ברחבי העולם)
- כמה זמן נבדק אב הטיפוס? על ידי מי? בהתקנה בשטח או בתנאי מעבדה?
- כמה טורבינות מהדגם הנ"ל נמכרו? כמה מהן עדיין עובדות? (השאלה תהיה רלוונטית ללקוחות ברחבי העולם)
- איזה בעיות היו ללקוחות שלכם ואיך התמודדתם איתן? (שאלה שעדיין לא מאוד רלוונטית בשלב זה, כי חברות ההתקנה חדשות בתחום)

### חשוב מאד לציין:

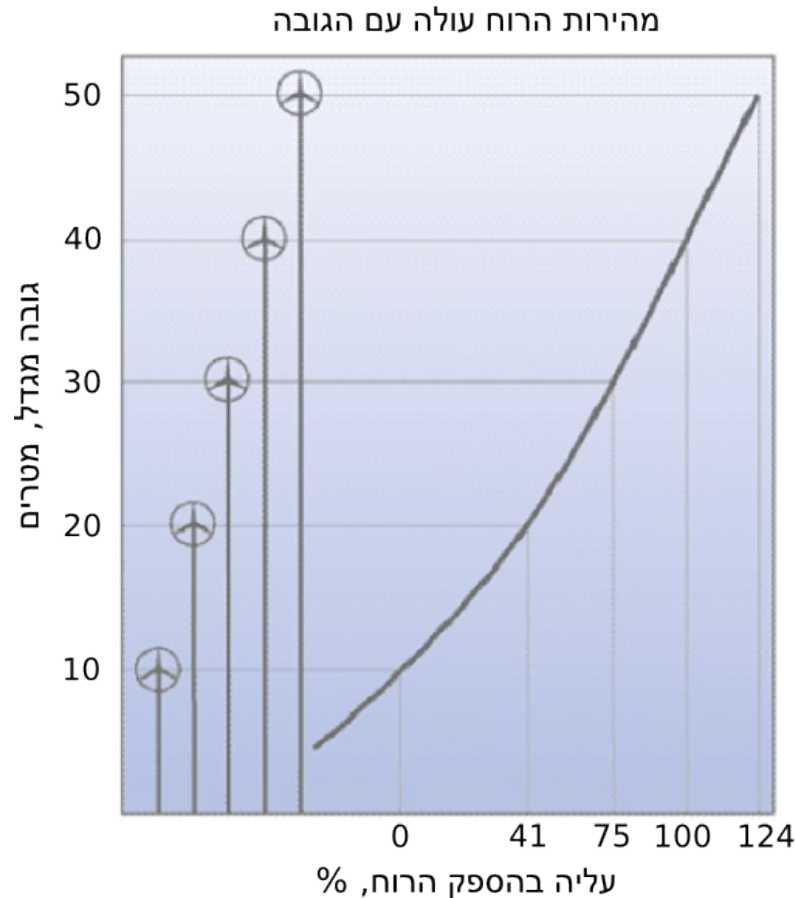
- האנרגיה הנמצאת ברוח הינה יחסית לשטח שהלהבים עוברים דרכו בזמן סיבוב שלם. כלומר, האנרגיה עולה לפי ערך הריבוע של קוטר הלהבים. יש להתייחס תמיד לקוטר של הלהבים ולא להספק המרבי של הטורבינה! עבור שתי טורבינות עם אותה גנראטור – כדאי לבחור בזו עם הלהבים הארוכים יותר.
- אין חשיבות למהירות התחלת התפוקה ((cut in speed - המהירות המינימאלית בה הטורבינה מתחילה לייצר חשמל. האנרגיה הגלומה ברוח נמצאת במהירויות הגבוהות. ההבדל בין ייצור החשמל של אותה טורבינה, שמתחילה לייצר במהירות רוח של 4 מטרים לשנייה, או מתחילה לייצר חשמל ב 2 מטרים לשנייה הוא לכל היותר כ-1.6%!
- אחת הדרכים הטובות להשוות מחיר טורבינה, היא לחלק את עלות הטורבינה (בלי המגדל, או עם מגדל אם אתם משווים טורבינות עם אותו גובה מגדל) בשטח של דיסקת הלהבים. למשל, טורבינה בקוטר 7 מטר – שטח הלהבים הוא  $3.14 \times 7^2 / 4 = 38.5$  מ"ר. ואם היא עולה 100,000 ש"ח, העלות למ"ר היא כ-2600 ש"ח למ"ר. השוואת טורבינות שונות לפי עלות למ"ר, כמדד ראשוני, נכונה יותר מאשר השוואה למחיר לקילוואט מותקן. הכי נכון זה להשוות את עלות האנרגיה, ש"ח לקוט"ש בשנה עבור מספר טורבינות שונות, באותו אתר, וזה ניתן לעשות עם retscreen כפי שמתואר למטה.

### טורבינות על מגדלים – יותר רחוק, יותר גבוה!

ככל שעולים בגובה – יש יותר רוח. כך זה בכל מקום בארץ, ובעולם. לכן – עליכם לכוון למגדל הגבוה ביותר שאתם יכולים להתקין באזור. ההשקעה הנוספת (במחיר) תמיד תהיה שווה את זה. לשם השוואה, מצורף הגרף הבא, המראה את העלייה בכמות האנרגיה (ציר תחתון, באחוזים) לעומת גובה הטורבינה (ציר שמאלי, במטרים). כפי שניתן לראות, במעבר ממגדל נמוך, בגובה 10 מטרים, למגדל בגובה 20 מטרים, אותה טורבינה תפיק 41% יותר הספק חשמלי! השינוי באנרגיה השנתית יהיה דומה אך לא זהה, כי גם התפלגות הרוח עצמה משתנה מעט עם העלייה בגובה. לעומת זאת, יש מקומות בודדים,



כגון תל עסניה, בהם העלייה במהירות רוח יכולה להיות משתנה, עקב תנאים טופוגרפיים, ואז גבוה יותר לא יהיה הרבה יותר טוב. מדידה בשטח תגלה לכם מה המצב.



**איור 10: מקור - United States Department of Energy**

גבהים של 18 מטרים נחשבים ממוצעים עבור טורבינות רוח קטנות בארה"ב! דוגמא לעלויות של מגדלים בגבהים שונים אפשר למצוא עבור סוגים שונים של מגדלים (מסבך עם כבלים -guyed truss tower, מסבך ללא כבלים, ו-monopole) באתר של Bergey (קישור מצורף למטה). להלן מחירים בארה"ב לעומת גובה עבור מגדל מסוג מסבך עם כבלים של חברת Bergey:

| גובה     | מחיר מגדל |
|----------|-----------|
| 18 מטרים | 10,150\$  |
| 24 מטרים | 10,900\$  |
| 30 מטרים | 12,900\$  |
| 37 מטרים | 15,200\$  |
| 43 מטרים | 17,200\$  |

כפי שאפשר לראות, השינוי במחיר המגדל הוא כ-2750\$ בין 18 ל-30 מטרים, אך כמות האנרגיה עולה ב-35%! מחירי מגדל כזה מצדיקים הקמה של מגדל גבוה ככל הניתן. בטורבינה הנ"ל, Bergey 10 Kw, שינוי כזה משמעותו - באתר ובו מהירות רוח ממוצעת של 5 מטרים לשנייה בגובה 10 מטרים (גובה סטנדרטי של מדידה) - תפוקה של כ-2500 קוט"ש נוספים בשנה, שהם כ-4200 ₪. כלומר עלות המגדל הנוסף תוחזר תוך פחות מ-3 שנים! התקנה של טורבינת רוח על מגדל נמוך דומה להתקנה של מערכת סולארית בצל. אל תצפו לתפוקה גבוהה....

## בחירת אתר

האם האתר שלכם מתאים להקמת טורבינת רוח?

מהו השטח המינימאלי לטורבינת רוח?

על פי ההמלצה האמריקאית מדובר בלפחות 4 דונם (AWEA). לעומת זאת הטורבינה הפופולארית של southwest windpower, ה-skystream בעלת להבים בקוטר 3.7 מטרים והספק נומינאלי של 1.6 Kw (ניתן לראות דגם כזה בחוות טנא על יד שדה בוקר/ירוחם), המתוכננת לאזורי הפרברים האמריקאיים, מיועדת להתקנה בשטח של לפחות 2 דונם. הדרישה נובעת מכמה סיבות. לדוגמא: הרמת המגדל דורשת נגישות שתלויה בשטח והטורבינה אינה מקימה רעש משמעותי רק ממרחק מינימאלי מסויים.

למעשה, השטח עצמו אינו רלוונטי כמו הגובה של הטורבינה מעל המבנים והעצים מסביבה. טורבינת רוח פועלת באופן שקט ואמין כשהרוח שמגיעה אל הלהבים שלה היא סדירה ואחידה ככל שניתן. התקנה של טורבינה על מגדל נמוך מעל גג לדוגמא, לא רק תקטין את כמות האנרגיה באופן משמעותי (ראו הניסיון הבריטי, עליו יש הרחבה בפרק נוסף למטה) אלא גם תקצר את אורך חיי הטורבינה ותחייב תחזוקה תכופה יותר. בנוסף, הטורבינה תגרום לרעש גבוה יותר מבהתקנה באזור עם רוח חלקה, כתוצאה מהזוויות בין כיוון הרוח ללהבים - רעש הנוצר תוך כדי שהטורבינה נאבקת כדי לעקוב אחרי הרוח המערבולתית באזור בנוי.

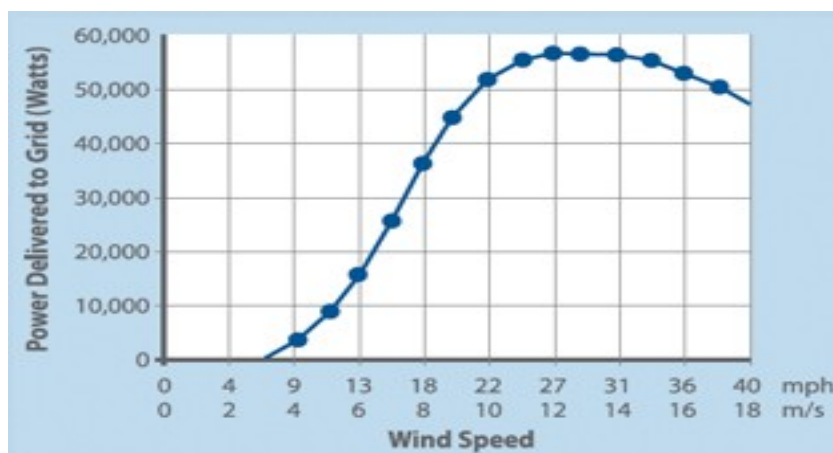
על המגדל להיות בגובה 9 מטרים מעל כל הפרעה ברדיוס של 90 מטרים (AWEA), על מנת לאפשר לטורבינה להיחשף לרוח לא מופרעת ממכשולים. אבי זעירא<sup>1</sup> מרוחות הגולן ממליץ על 6 מטרים מעל 100 מטרים רדיוס הפרעה לכל הפחות.

ככל שהזרימה תהיה יותר חלקה ולמינארית, כך תשתפר יציבות התפוקה ויקטנו המאמצים על הלהבים, והרעש אף יקטן - ובכך יתאפשר לטורבינה לשרוד זמן רב יותר. ההשקעה במגדל גבוה מתבקשת. ניתן להעריך את הטורבולנציה באתר לפי מדידות - שני אתרים יכולים להיות עם אותה מהירות רוח ממוצעת שנתית, ואותה התפלגות, אך אחד יהיה יותר טורבולנטי מהשני.

## האם זה כלכלי? הערכת תפוקת החשמל באתר

ברגע שבחרתם מקום, ובחרתם מוצר, הערכת הכלכליות נובעת קודם כל מתפוקת האנרגיה באתר. יצרן מכובד יספק לכם שני גרפים שיאפשרו חשבון כזה -

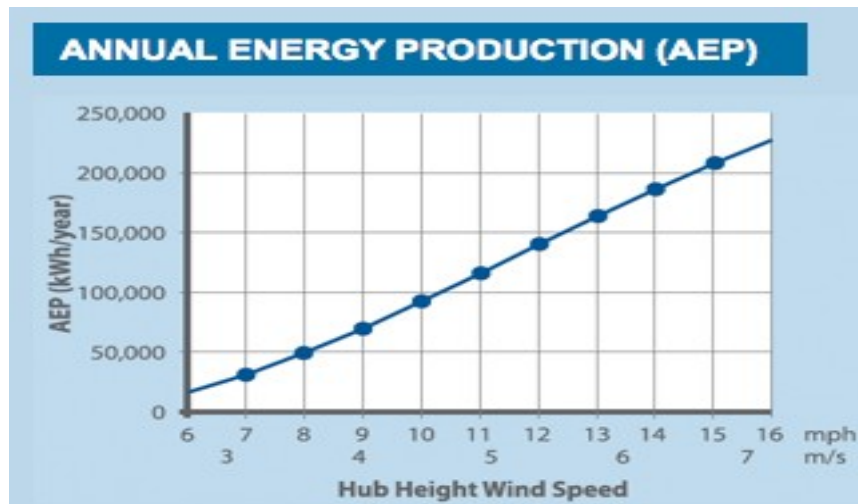
1. גרף הספק לעומת מהירות רוח



איור 11: גרף הספק לעומת מהירות רוח. מקור - <http://www.endurancewindpower.com/E3120.html>

2. גרף של תפוקת אנרגיה בשנה (AEP – Annual Energy Production), בחודש או ביום בתנאי רוח שונים - בדרך כלל מהירות רוח ממוצעת שנתית לפי התפלגות ריילי

<sup>1</sup> ראה [http://www.wind-golan.com/index.php?option=com\\_content&task=view&id=27&Itemid=57](http://www.wind-golan.com/index.php?option=com_content&task=view&id=27&Itemid=57)



גרף 12: גרף תפוקת אנרגיה שנתית לפי מהירות רוח ממוצעת והתפלגות ריילי. מקור - <http://www.endurancewindpower.com/E3120.html>

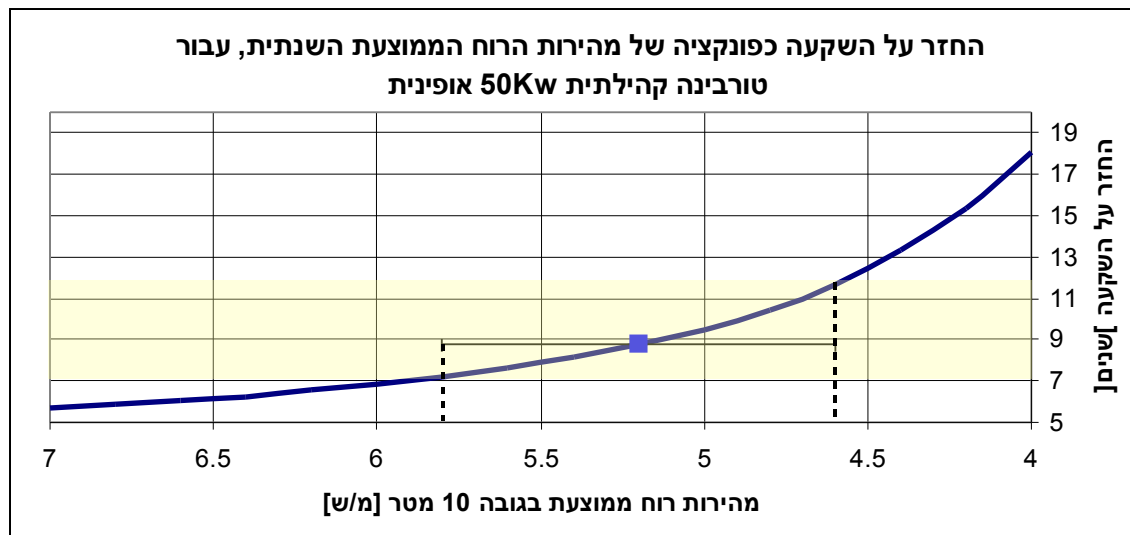
במקרה שרק הגרף הראשון מסופק, צריך לייצר את הגרף השני על ידי מכפלה של גרף ההספק (איור 8) בהתפלגות הרוח באתר (לדוגמא - אחת ההתפלגויות באיור 7).

### מדד אלטרנטיבי – צפיפות האנרגיה ברוח

ניתן לכמת את האנרגיה ברוח ע"י התייחסות לצפיפות אנרגיה שנתית ממוצעת בגובה מסוים. במפות רוח בדרך כלל נתון זה יופיע גם כן – למשל באטלס ברוח של דרום הארץ והערבה (ראו קישורים למטה). צפיפות האנרגיה השנתית הממוצעת (או ממוצע הספק האנרגיה) היא כמות האנרגיה הקיימת ברוח בממוצע במשך שנה, על שטח של מטר מרובע. ולכן היחידות שלה הן בהספק – וואט – לשטח – מטר מרובע. אם תכפילו את שטח הטורבינה בערך זה, ובנצילות האופיינית של הטורבינה (שניתן לקחת מתוך איור 18 למשל), תקבלו הערכה לכמות האנרגיה שהטורבינה יכולה להפיק. תוכנות כמו Retscreen יודעות להעריך ביצועים של טורבינה לפי התפלגות רוח, או לפי צפיפות האנרגיה השנתית הממוצעת. חשבון אופייני כזה מצורף בסוף הנספח.

### חישוב כלכלי אופייני

ברגע שידועה התפלגות הרוח באתר, השימוש בגרף ייצור החשמל נותן את כמות הקוט"ש בשנה. טורבינות קטנות מקבלות תעריף של 1.65 ₪ לקוט"ש, וטורבינות קהילתיות 1.29 ₪ לקוט"ש. כפי שתיווכחו בחשבון האופייני למטה (הוא מעט שמרני), ההבדלים נובעים מהתפיסה של הרשות שלא רוצה שגורם בודד ירוויח סכומים גבוהים, ועל כך שטורבינות קהילתיות-בינוניות יותר כלכליות מטורבינות קטנות.

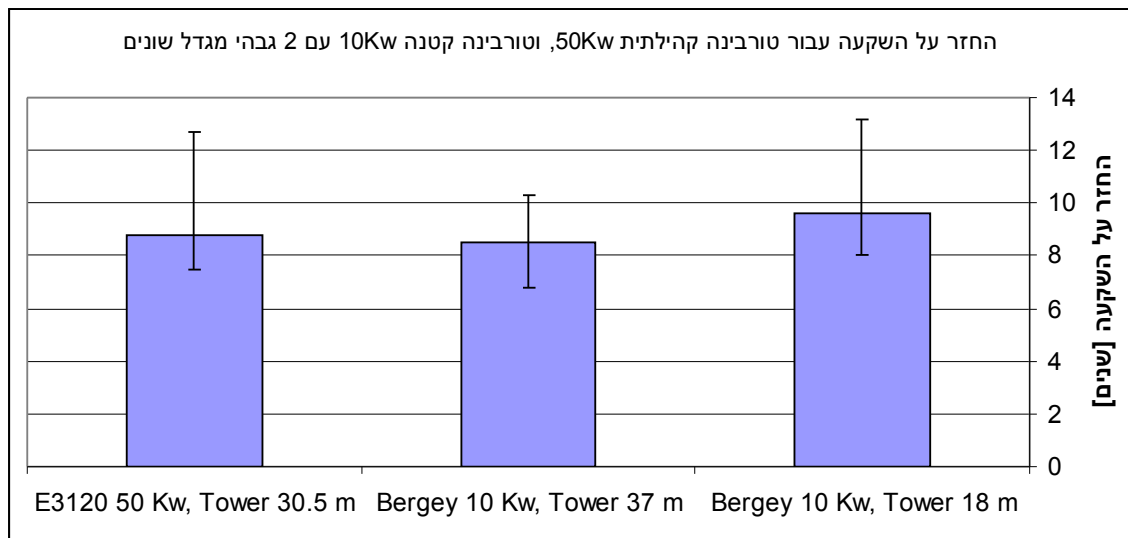


איור 13: השפעת מהירות הרוח הממוצעת באתר על החזר על השקעה המהוון. חושב על ידי תוכנת [www.retscreen.net](http://www.retscreen.net) עם נתוני הטורבינה E-3120 כפי שמופיעים בגרף ההספק למעלה וההנחות המופיעות במסמך. (הערה: חשבון שמרני, ללא מס הכנסה)

איור 13 מראה את ההשפעה של מהירות הרוח הממוצעת השנתית בגובה 10 מטרים על החזר על השקעה המהוון של טורבינת רוח קהילתית מדגם Endurance E-3120. הנקודה הכחולה וטווח השגיאה שלה מתאימים להערכה ראשונית ללא מדידות נוספות על סמך אטלס הרוח של הנגב והערבה (מצורף קישור למטה), לפי צפיפות אנרגיה ממוצעת שנתית של 153-253 וואט למטר מרובע בגובה 25 מטרים, או 5.1-6 מטרים לשנייה ממוצע מהירות רוח שנתית בגובה 25 מטרים לפי התפלגות ריילי) - עבור אתר כלשהוא באזור פתוח בסמיכות לתחנת המדידה באילת.

איור 14 גם כן משתמש בנתוני הרוח באילת, משימוש באטלס, ומשווה בין ייצור אופייני של טורבינה קטנה באותו אתר (אילת) עם מגדל ב-2 גבהים שונים. אני השתמשתי בתוכנת Retscreen הזמינה בחינם, ופותחה במיוחד לאפליקציות כאלה. דרושה הבנה על מנת למלא את הפרמטרים השונים, אך עבור כל פרמטר, יצרן הטורבינות והמתקין אמורים לדעת ולספק תשובות, על מנת שאתם תוכלו לעשות חישוב מסודר של הכלכליות לפני ההשקעה.

הוצאות התחזוקה הינן מינימאליות אך יש להן משמעות בחשבון הכלכלי. אין טורבינה בלי תחזוקה בכלל, ופעם בשנה לפחות צריך להנמיך את המגדל (אם הוא מגדל על ציר, tilt up tower) או לעלות עליו ולבדוק את מצב הלהבים וכדומה. טורבינות קטנות מכילות מעט מאוד חלקים נעים – ציר הלהבים וציר הסיבוב אל הרוח בדרך כלל. עם זאת, הן עומדות בתנאי מזג אוויר קשים, והמתקין צריך לתת לכם שירות תחזוקה שנתי לפי המלצות היצרן.



איור 14: החזר על השקעה עם טווח שגיאה עבור 3 מקרים שונים. חושב על ידי תוכנת [www.retscreen.net](http://www.retscreen.net) עם נתוני הטורבינה E-3120 כפי שמופיעים בגרף ההספק למעלה, ונתוני Bergey 10 Kw כפי שמופיעים בתוכנת Retscreen וההנחות המופיעות במסמך (הערה: חשבון שמרני)

החשבון שערכתי פה הוא שמרני, ומנבא תחומי ההחזר על השקעה בינוניים, עם טווח שגיאה גדול יחסית. עם מדידה מדויקת (שעלותה נכנסה בהערכה של הטורבינה הקהילתית, אך לא בטורבינה הקטנה), ניתן לצמצם את טווח השגיאה בצורה משמעותית. בנוסף, אפשר לראות בברור את ההשפעה של גובה המגדל – מ-18 מטרים ל-37 מטרים. ההחזר על השקעה מתקצר משמעותית, וגם טווח השגיאה קטן. זה נובע כמובן מכך שכל שתעלו בגובה, הרוח מתחזקת, ולפי איור 10 אפשר לראות שההחזר על השקעה משתנה לאט יותר, ולכן חוסר הוודאות אף הוא קטן יותר. **תמיד שווה להשקיע במגדל גבוה יותר.**

מבט נוסף על תפוקה של טורבינת רוח באזורים שונים היא דרך ה-capacity factor, מקדם התפוקה (מכונה גם power plant factor או form factor). מקדם התפוקה מוגדר כך:

$$\text{מקדם התפוקה השנתי} = \frac{\text{ייצור אנרגיה שנתי}}{\text{מספר שעות בשנה} \times \text{הספק מותקן}}$$

מקדם התפוקה הוא הדרך הכי מהירה לאפיין אתר רוח. החיסרון שלו הוא שהוא תלוי בהספק המותקן של הטורבינה.

ניקח כדוגמה עבור דגם ה-Bergey 10 Kw - טורבינת רוח בהספק מותקן של 10 קילוואט במהירות רוח של 12 מטרים לשנייה. כמו כן ניקח אתר אופייני, עם מהירות רוח ממוצעת שנתית של 5.5 מטרים לשנייה בגובה 10 מטרים, והתפלגות ריילי. על פי נתוני היצרן, עבור מגדל בגובה 24 מטרים, הטורבינה תפיק כ-16,800 קוט"ש בשנה. נחשב:

$$\text{מקדם התפוקה השנתי} = \frac{16800 \text{ קוט"ש}}{10 \text{ קילוואט} \times 8760 \text{ שעות}} = 19.2\%$$

לשם השוואה, בתחום ניצול אנרגיית השמש לייצור חשמל על ידי התקנת פאנלים פוטוולטאים, מספר אופייני עבור ייצור של מערכת בגודל 1 קילוואט הספק מותקן הוא 1600 קוט"ש. לפי אותו חשבון, נקבל מקדם תפוקה של 18.3%.

אך אליה וקוץ בה – בטורבינות רוח, ההספק המותקן אינו נקבע תמיד באותה מהירות רוח. לכן תמיד חשוב לשים לב להספק אליו מיוחס מקדם התפוקה. ניקח שוב את הדוגמה למעלה. ה-Bergey נותנת 10 קילוואט ב-12 מטרים לשנייה. לעומת זאת, ברוח של 9 מטרים לשנייה היא מספקת כ-4.2 קילוואט. אם נגדיר את ההספק המותקן לפי המספר האחרון, נקבל מספר גבוה בהרבה – מקדם תפוקה של 46%! השימוש במקדם תפוקה יכול להיות מבלבל,



ולכן חשוב להשתמש בו בזהירות ולהבין למה הכוונה. כשמשווים בין שני טורבינות זהות באתרים שונים, זהו פרמטר מאוד נח.

## היתרי בניה ושכנות טובה

לאחר שהגעתם למסקנה שיש לכם אתר מתאים לטורבינת רוח, זה הזמן לספר לשכנים. טורבינת רוח, מעצם טבעה, תראה למרחוק. למעשה – אם היא לא נראית למרחוק, סביר להניח שהיא לא תראה הרבה רוח...

לכן, כדאי לידע את השכנים מראש. טורבינות רוח הן טכנולוגיה נאותה, המפיקה חשמל ללא זיהום, ומקטינה את כמות המחלות-תלویות-זיהום-אוויר באזורים שנמצאים במורד הרוח מתחנות הכוח של חברת חשמל.

התקנת טורבינת רוח היא מעשה מוסרי מאין כמותו, מעשה שעליו צריך לברך. אך מכיוון שטורבינות רוח בולטות בנוף בסביבתן הקרובה, יש אנשים המתנגדים להם על בסיס נופי. זהו עניין מובן, שבעיקר מתייחס לטורבינות הגדולות ולחוות הרוח, ופחות לטורבינות קטנות וקהילתיות. עם זאת, הנוף המקומי ישתנה עם הקמה של טורבינת רוח קטנה או קהילתית, ולכן כדאי לידע את השכנים והקהילה, ולשתף אותם בכוונתכם לנצל אנרגיה נקייה ומתחדשת על ידי הקמת טורבינת רוח.

לאחר שהחלטתם על הקמת הטורבינה, יש להשיג היתרי בניה. אתם לא תהיו לבד בפרוצדורה הזו - המתקין ישמח לעזור לכם ולהעביר את המסמכים דרך השלבים השונים של אישור המתקן. נכון להיום שלבי האישור דומים למתקנים אחרים שיזם כלשהוא ירצה להקים, אך בימים אלו עובדים במשרד הפנים על מסלול אישור לטורבינות רוח קטנות, במרחב הכפרי והעירוני, וכולי תקווה שהם יאשרו תקנות שמאפשרות הקמה פשוטה של טורבינות רוח קטנות כמה שיותר מהר. אלו הם השלבים העיקריים כרגע בראשי פרקים:

1. **הגשת בקשת בניה** בשם בעל הקרקע לוועדה מקומית או עירייה. (גרמושקה: אישור מהנדס, סכמה של האתר. עלות מוערכת: עד 7000 ש"ח.)
2. **הוועדה**, בהתאם לתקנות שיש במקום או על בסיס חריגה, מגבילה את הגובה המותר לבניה. (זמן – מידי או עד 3 חודשים). מגבלה של 16-24 מטרים קיימת במספר מקומות – אך אינה רלוונטית עבור מתקן הנדסי (ראו אנטנות סלולאריות של 40 מטרים לדוגמה).
3. יצירת קשר עם חברת חשמל לשם אישור חיבור הטורבינה.
4. **הקמת הטורבינה**.
5. מפה והלאה – כמו באנרגיה סולארית - **הזמנת חברת חשמל**, על מנת לאשר או לתת הנחיות לשינוי החיבור.

## לגבי התקנת טורבינות רוח על גגות בתים

על מנת שטורבינת הרוח תפיק כמות משמעותית של חשמל, היא צריכה משאב רוח משמעותי.

**על גגות של בתים באזור צפוף לא תהיה כמות מספיקה של רוח.**

כמו כן, התנהגות הרוח מעל מבנים היא מאוד מערבולתית (טורבולנטית) ודורשת סוג אחר של טורבינה – טורבינה עם ציר סיבוב אנכי. ישנן כאלה טורבינות בשוק, בשלבי פיתוח שונים ומעט מוצרים קיימים. כמו כן, מחירים יקר יותר בדרך כלל. בכל התקנה על גג בית יש צורך לעשות מדידה וסימולציה על מנת להעריך היכן כדאי למקם את הטורבינה. על גורדי שחקים למשל - בתל אביב או בערים אחרות בישראל - סביר מאוד שהתקנת טורבינות רוח עם ציר סיבוב אנכי תניב כמות משמעותית של חשמל ותחזיר את ההשקעה בזמן הגיוני. על בתים פרטיים בהתקנה של טורבינה עם ציר סיבוב אופקי (כמו כל הטורבינות שהוצגו במאמר הזה) על תורן נמוך (פחות מ-3 מטרים מעל הגג) אין מקום להתקנת טורבינת רוח.

ניתן ללמוד מהניסיון (המר) של הבריטים ב-3 השנים האחרונות בנושא. המדינה תמרצה באנגליה את עצם ההקמה של הטורבינות, במקום לתמרץ את ייצור החשמל, וכך הותקנו אלפי טורבינות קטנות על גגות בתים. חלק ניכר מהטורבינות הללו לא רק שלא החזיר את ההשקעה, הוא אפילו לא החזיר את כמות האנרגיה שעלה לייצר אותו!

מקדם תפוקה אופייני לטורבינות על גגות בתים נמוכים בבריטניה הינו 3%! מדובר בבדיחה במקרה הטוב.

להלן ציטוט מתוך המחקר:

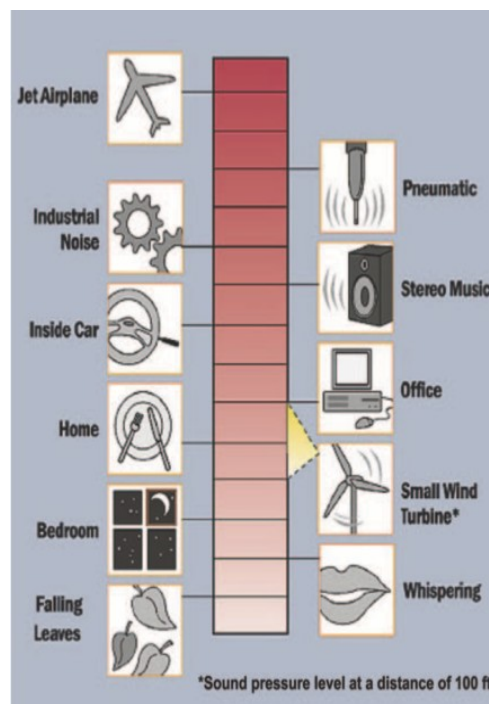
"Overall the trial has painted a picture of an industry and technology that is still at development stage and is likely to make a tangible contribution to energy and carbon saving **only on the most exposed sites and tallest buildings**. The combination of this reality, aggressive and over-optimistic marketing by some suppliers, and the enthusiasm and credulity of the market (and regulators) has potentially led to an unfortunate outcome where the wind industry as a whole is in danger of suffering from a setback in credibility."

## השפעות סביבתיות של טורבינות רוח קטנות

טורבינות רוח בולטות בשטח. את זה כבר הזכרתי למעלה, וחשוב לכן ליידע שכנים לגבי הכוונה להתקין טורבינת רוח. מה עוד חשוב לדעת לפני שמתקינים טורבינת רוח? הנה רשימה של נושאים חשובים, ונושאים שלגביהם יש תפיסה מוטעית: (לרשימה מלאה יותר – ראו קישורים למטה לאתר AWEA, על פיו נערכה רשימה זו)

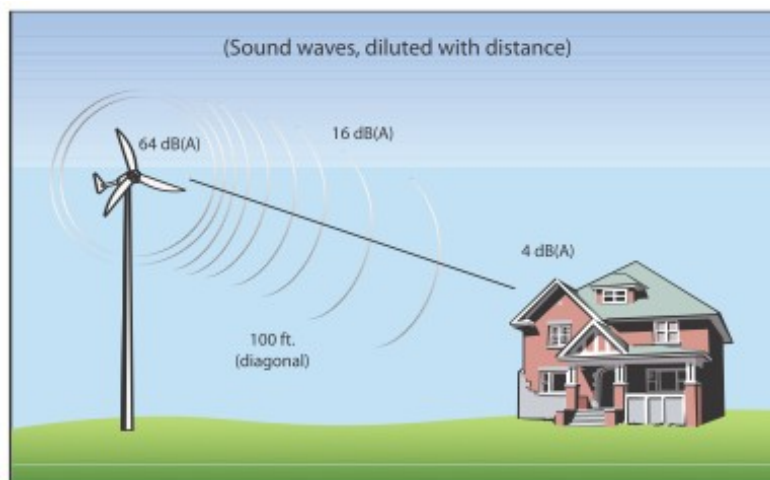
### רעש

לטורבינות רוח מודרניות יש בידוד טוב יותר סביב הגנראטור, להבים עם מהירויות סיבוב איטיות יותר ולהבים יעילים יותר מהמוצרים הראשונים שיצאו לשוק, מה שהופך אותם לשקטים בצורה משמעותית. הרעש מהסביבה, עלים מרשרשים ברוח, תנועת מכונות בכביש קרוב וכדומה יהיו מספיקים כדי למסך את הרעש הנמוך, רעש "לבן" (אחיד בכל התדרים) שטורבינות רוח קטנות מייצרות בחלק ממהירויות הרוח. את רעש הטורבינה תשמעו היטב רק בסופות רציניות, אך במקרה זה גם רעשי הרקע יעלו בהתאם. על מנת לקבל פרספקטיבה, איור 15 מראה השוואה של הרעש במרחק של כ-33 מטר מטורבינת רוח קטנה, בהשוואה לרעש מגורמים יומיומיים אחרים.



איור 15: השוואת הרעש מטורבינת רוח קטנה למקורות רעש אחרים, במרחק של כ-33 מטר ממקור הרעש  
מקור – “in the public interest – AWEA”

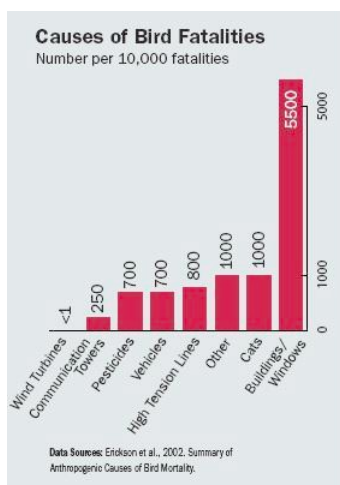
בדיקות רעש עבור טורבינות מסוימות ניתן למצוא בפרסומים של NREL (קישור למטה), והם מגלים בדרך כלל עוצמה של 40-65 דציבל, במרחק של 60 מטר, פחות מ-5 דציבל מעל רעש הרקע. הדבר הכי נכון לעשות כדי להבין כמה רעש עושה טורבינה הוא לנסוע לראות ולשמוע אחת. רצוי כמובן מהדגם שאתם מתכננים להתקין. עוד נקודה חשובה היא הדעיכה של עוצמת הרעש ככל שמתרחקים מהטורבינה – הרעש נופל כמו ריבוע המרחק, ולכן אם הרעש במרחק 16.5 מטר הוא 16 דציבל, הרעש במרחק 33 מטר הוא 4 דציבל (ראו איור 16)



איור 16: עוצמת הרעש יורדת כמו ריבוע המרחק. עבור מרחק של 33 מטר (100 רגל) העוצמה היא רבע מהעוצמה במרחק 16.5 מטר

## ציפורים

החשש העיקרי – והכי מוגזם – מטורבינות רוח הוא פגיעה בציפורים. אפילו הטורבינות הגדולות, הממוקמות בחוות רוח, אחראיות לפחות מ-0.003% ממקרי המוות של ציפורים מעשה אדם בארה"ב. חתולי בית וחלונות זכוכית לשם השוואה אחראיות ל-10,000 פעמים מקרי המוות ביחס לטורבינות רוח גדולות. השוואה עבור ארה"ב ניתנת באיור 17. גם עבור אזור הגירה של ציפורים כמו ישראל, אין סיבה לחשוש מטורבינות גדולות אם ממקמים אותן נכון. ב-1986 נעשה מחקר על ה-San Geronimo pass בארה"ב, היכן שממוקמות חוות רוח ועוברות 69 מיליון ציפורים בשנה, ונמצאו רק 38 ציפורים מתות, המהוות 0.00006% תמותה. עבור טורבינות רוח קטנות לא נעשה מחקר כזה מקיף, אך מכיוון שהן קטנות באופן משמעותי, וממוקמות בדרך כלל כטורבינות בודדות, ניתן להניח שאחוז מקרי המוות יהיה נמוך אפילו יותר מהמספר הנמוך גם ככה בטורבינות גדולות.



איור 17: גורמי המוות לציפורים, כולל טורבינות רוח גדולות (בצד שמאל). מקור – Erickson et al. 2002 (קישור מצורף בדף הקישורים)

## **ריצוד צל (shadow flicker)**

במקרים מסוימים קרני שמש נמוכות העוברות דרך הלהבים הסובבים יוצרים צל על מבנים ואדמה. בטורבינות רוח גדולות נושא ריצוד הצל הנוצר עקב התנועה האיטית של הלהבים יכול ליצור אפקט לא נעים (ראו למשל באיגוד הדני, [windpower.org](http://windpower.org)). קישור מלא מצורף בדף הקישורים). בעיה זו לא קיימת בטורבינות קטנות עקב מהירות הסיבוב הגבוהה יחסית של הלהבים, וגם בטורבינות גדולות זו בעיה הקיימת רק בקרבת הטורבינה וניתן לתכנן את מיקומה כך שאף אחד לא יושפע מהתופעה.

## **סיכום וקישורים**

לסיכום, ישנם אתרים רבים בארץ בהם מהירות הרוח בגובה 10 מטרים גבוהה או שווה לזו שבאילת, הרבה מקומות בהם כדאי וראוי להקים טורבינות רוח לייצור חשמל.

**אנו בקואופרטיב האנרגיות המתחדשות מחפשים אתר כזה  
לשם הקמת טורבינה קהילתית עם התושבים.  
ניתן לפנות ל- [hanan@ecoop.org.il](mailto:hanan@ecoop.org.il)**

## קישורים שונים

1. התעריף – <http://www.pua.gov.il> הרשות לשירותים ציבוריים חשמל
2. פוטנציאל אנרגיית הרוח בעולם – Archer & Jacobson 2005
3. סיור מודרך בתחום אנרגיית הרוח וטורבינות הרוח הגדולות, שהוכן ע"י האיגוד הדני לאנרגיית רוח <http://guidedtour.windpower.org/en/tour>
4. כולל התייחסות לריצוד צל, ציפורים ורעש בטורבינות רוח גדולות ספרים מומלצים של Paul Gipe - <http://www.wind-works.org/books/WindEnergyBasicsRevised.html>  
[http://www.wind-works.org/books/wind\\_power2004\\_home.html](http://www.wind-works.org/books/wind_power2004_home.html)
5. מסמך מדיניות לשילוב טורבינות רוח קטנות לייצור חשמל <http://www.awea.org/smallwind/pdf/InThePublicInterest.pdf>
6. כולל התייחסות לנושאים סביבתיים של רעש, ציפורים וריצוד צל בטורבינות רוח קטנות טורבינות רוח קטנות וציפורים <http://www.awea.org/faq/sagrillo/swbirds.html>  
[http://www.treehugger.com/files/2006/04/common\\_misconce.php](http://www.treehugger.com/files/2006/04/common_misconce.php)  
איור 17 [http://www.eurotrib.com/files/3/051104\\_cuases\\_of\\_bird\\_deaths.jpg](http://www.eurotrib.com/files/3/051104_cuases_of_bird_deaths.jpg)
7. בדיקות רעש וביצועים לטורבינות קטנות [http://www.nrel.gov/wind/pubs\\_research.html#turbine](http://www.nrel.gov/wind/pubs_research.html#turbine)
8. קמפיין השוואה בין הערכה לבין ביצוע בפועל של טורבינות רוח עירוניות על גגות בתים באנגליה בין 2007-2009 – <http://www.energysavingtrust.org.uk/Generate-your-own-energy/Energy-Saving-Trust-field-trial-of-domestic-wind-turbines>
9. חלק מהמידות שהוכנסו לקמפיין <http://www.warwickwindtrials.org.uk>
10. מדידות רוח בישראל – סיכום המדידות הקיימות
11. אטלס הרוח דרום הארץ והערבה, מאתר משרד התשתיות
12. טורבינות קטנות וקהילתיות – רשימת יצרני טורבינות חברי AWEA שמתאימות לקבלת הטבות מס ע"י מדינת קליפורניה, ו/או מדינת ניו-יורק <http://www.awea.org/smallwind/smsyslst.html>
13. בדיקת כלכליות פרויקט – [www.RetScreen.net](http://www.RetScreen.net)
14. מתקנים וספקים בארץ (הרשימה תתעדכן עם הזמן) [www.interdan.com](http://www.interdan.com)
- חברה משפחתית, ותיקה מאוד (1985) בתחום התקנות הסולאריות. יבואני טורבינות קטנות של southwest windpower [www.wind-golan.com](http://www.wind-golan.com)
- אבי זעירה, עוסק במדידות רוח, ייצור חשמל מהרוח ומכירה והתקנה של טורבינות רוח זה 25 שנה, בעלים של טורבינת רוח 250 קילוואט באלוני הבשן (רמת הגולן). <http://www.tswind.com>
- יצרני טורבינות רוח קטנות 2-4 קילוואט, יושבים בנתניה. מייצרים 2007 לערך. <http://www.eneright.com>
- יבואנים ומתקנים של פאנלים פוטוולטאים וטורבינות רוח hammer סיניות. <http://www.ecoq.co.il>
- יבואנים ומתקנים של פאנלים פוטוולטאים וטורבינות רוח קטנות <http://unibatt.com/winflex>
- בשלבי פיתוח מתקדמים של טורבינת רוח ייחודית לשוק טורבינות הרוח הבינוניות-קהילתיות והגדולות.
15. מדידות על ידי אנשי מקצוע אפשר לקבל מהגופים הבאים (הרשימה תתעדכן עם הזמן) <http://www.wind-golan.com>
- אבי זעירא רוחות הגולן – <http://www.wind-golan.com>
- שרות : (גובה תרנים, סוג המדים, זמן מדידה, עלויות, הערכת דיוק)
- קליין אלקטריק – 2271 747 054 , <http://clean-electric.co.il>
- שרות : (גובה תרנים, סוג המדים, זמן מדידה, עלויות, הערכת דיוק)

גופים אלה יתנו שירותי מדידה וניתוח התוצאות על סמך מדידות רב שנתיות באתר מדידת רוח קרוב.

בנוסף, ניתן לרכוש מד רוח ולהתקין בעצמכם. זו היא דרך בדוקה להוזלת עלויות. את הנתונים תוכלו לנתח בעצמכם, או להיעזר באחד הגופים למעלה.

מדי רוח ניתן להשיג מרשימת הספקים הבאה:

אגרולן - <http://www.agrolan.co.il>

מייבאים טורבינות רוח קטנות, ומערכות מדידת רוח במגוון רחב.

[/http://www.inspeed.com](http://www.inspeed.com)

ציוד מדידת רוח המתחבר למחשב הביתי.

מטאו טק - <http://www.meteo-tech.co.il>

ספקי ציוד מקצועי למדידת רוח ומדידות אקלימיות בכלל

ישראלסול - <http://www.israsol.co.il>

מפיצים מד רוח המכונה "חזאי האנרגיה"

16.

•

○

•

○

•

○

•

○

הערה –

אין כוונה בפרסום הרשימות למעלה כדי להמליץ על מוצר, מתקין או חברה ספציפיים.



## נספח – תרגיל בסיסי בחישובי רוח

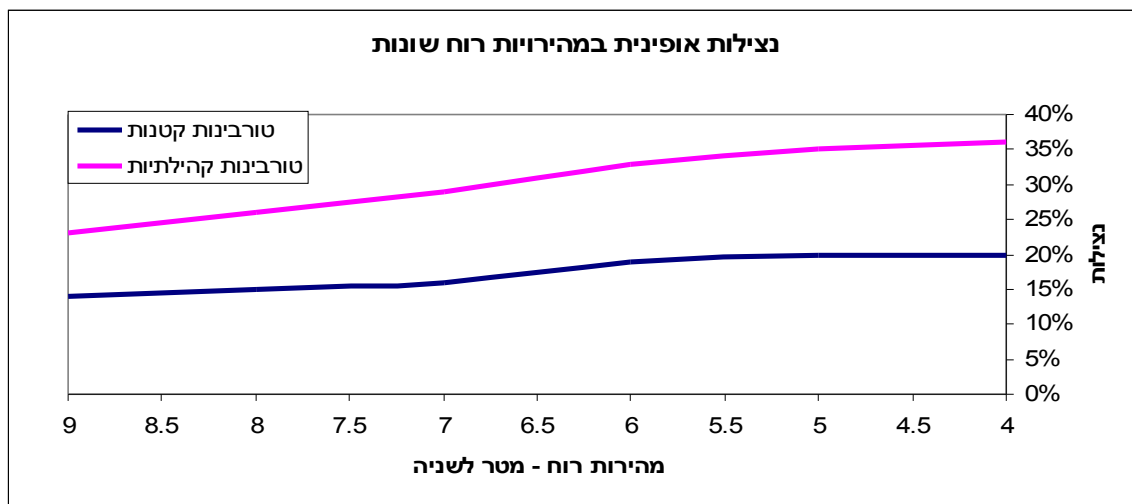
ההספק המיוצר ע"י טורבינת רוח ניתן לפי הביטוי הבא -

$$P[watt] = \frac{1}{2} \rho \left( \pi \frac{D^2}{4} \right) V^3 C_p$$

הספק הטורבינה (P, בוואט) משתנה כמו מהירות הרוח בחזקה השלישית, וכמו קוטר הלהבים בריבוע. מהירות הרוח מצוינת במשוואה למעלה באות V, במטר לשנייה, וקוטר הלהבים מסומן כ-D וניתן במטרים.

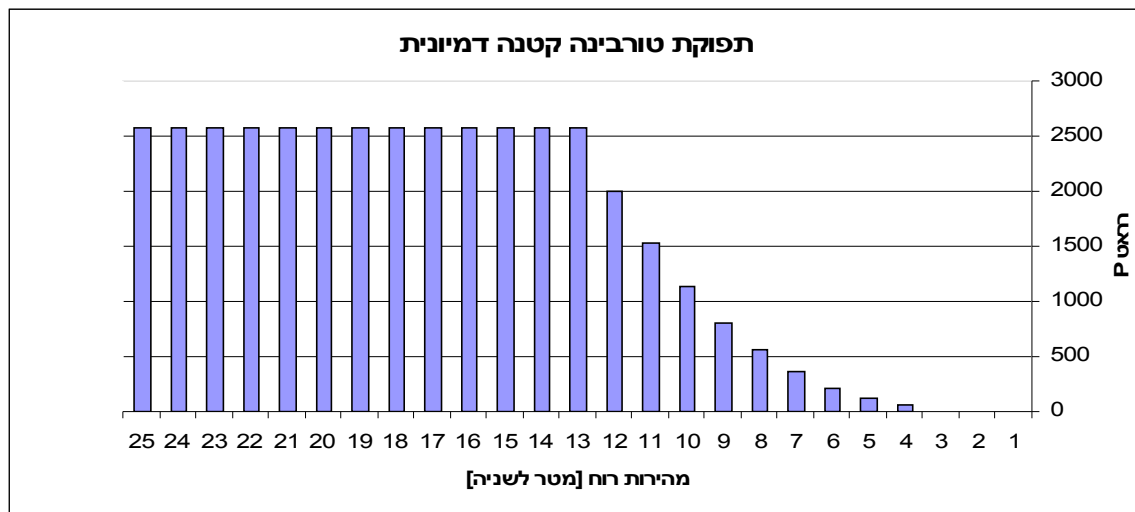
בנוסף, צפיפות האוויר המסומנת כ-  $\rho$  ונתונה בק"ג למטר בשלישית (צפיפות האוויר הסטנדרטית בגובה הים ב-20 מעלות צלזיוס היא 1.225 ק"ג למטר בשלישית) משפיעה גם כן. הפרמטר האחרון שמופיע הוא מקדם הנצילות של הטורבינה  $C_p$ . ערכים אופייניים לטורבינה קטנה הוא 0.2 ועבור טורבינה קהילתית 0.3.

אפשר לראות בגרף הבא, מתוך נתונים המפורסמים בספרו של Paul Gipe - Wind Power



איור 18: נצילות אופיינית של טורבינות רוח קטנות ובינוניות (קהילתיות) הנצילות יורדת מעט עם מהירות הרוח, אך זה פרמטר תכנון וניתן לתכנן יעילות אופטימאלית באופן שונה מהגרף הנ"ל. הנצילות התיאורטית המקסימאלית האפשרית חושבה ע"י Betz והיא 59.3%

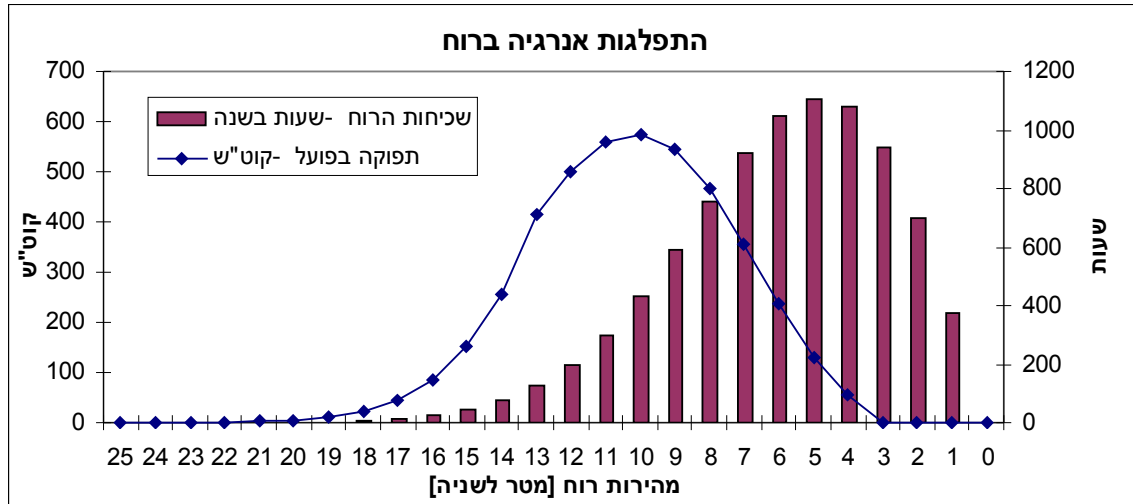
ניקח גרף הספק של טורבינת רוח דמיונית עם קוטר להבים של 3.7 מטרים ונצילות קבועה של 0.2 –



איור 19: גרף הספק דמיוני של טורבינה קטנה עם קוטר להבים 3.7 מטרים ונצילות של 0.2 מטרים לשנייה

אני החלטתי שהחל מ-13 מטרים לשנייה נכנס אמצעי הגנה מהרוח, שמגביל באופן מדהים (בפועל ההספק ירד) את ההספק וקובע אותו בערך המקסימאלי. עכשיו נבחר אתר עם התפלגות רוח אופיינית – התפלגות ריילי – סביב מהירות רוח ממוצעת של 6 מטרים לשנייה.

איך נחשב את כמות האנרגיה השנתית שתפיק לנו הטורבינה הזו? ע"י הכפלת כמות השעות השנתית בכל מהירות רוח, בתפוקה שהטורבינה נותנת בכל מהירות רוח. התוצאה שתתקבל מובאת בגרף הבא:



**איור 20:** התפלגות מהירות הרוח השנתית ריילי ומהירות ממוצעת שנתית של 6 מטר לשנייה, ותפוקת הטורבינה בכל מהירות רוח ורוח. ס"ה האנרגיה השנתית היא השטח שמתחת לעקומה הכחולה – כ-4430 קוט"ש עבור הדוגמא הזו. יצרני ה- skystream – טורבינה באותו קוטר – עבור אותם נתוני רוח צופים 5400 קוט"ש בשנה.

המלבנים האדומים מציינים את התפלגות הרוח. המהירות הממוצעת של ההתפלגות הזאת היא 6 מטרים לשנייה – לא לבלבל עם המהירות הכי שכיחה (עם המלבן הכי גבוה) שהיא 5 מטרים לשנייה. הכפלה של כל מלבן אדום, בערך המתאים של עקומת ההספק של הטורבינה (המלבנים הכחולים למעלה) נותנת את הקו הכחול שאתם רואים מסורטט על התפלגות הרוח. קודם כל – ניתן לראות בברור שמירב האנרגיה מושגת במהירויות בין 9-12 מטרים לשנייה. מכאן שהבחירה ב-9 מטרים לשנייה כמהירות לחישוב ההספק המותקן היא בחירה מצוינת בנוסף – ניתן לראות שהתפוקה במהירויות רוח מתחת ל-4.5 מטרים לשנייה קטנות מאוד. אמנם מאוד נחמד לראות את הטורבינה מתחילה לפעול במהירויות נמוכות, אך אין לזה משמעות רבה בתחשיב האנרגיה השנתי. זה נובע מכך שההספק של הרוח עולה כמו מהירות הרוח בחזקה השלישית, כפי שניתן לראות בעקומת ההספק של הטורבינה.

### שינוי מהירות הרוח עם הגובה

מהירות הרוח עולה עם הגובה. נאמר שיש לכם מדידת רוח רב שנתית ממוצעת  $V_0$  בגובה מסוים  $z_0$ . כדי להתאים את המדידה בין גובה זה לגובה אחר, ניתן להשתמש במשוואה המעריכית:

$$V_z = V_0 \left( \frac{z}{z_0} \right)^\alpha$$

כש- $\alpha$  הוא המעריך. גודל אופייני ל- $\alpha$  הוא 1/7 (מכאן השם האופייני לחוק הזה – חוק ה-1/7) או 0.143. התוצאה  $V_z$  תהיה התיקון של המדידה עבור הגובה  $z$ .

## שימוש בצפיפות אנרגיה ממוצעת להערכת תפוקה שנתית באתר

צפיפות האנרגיה באזור מסוים היא מדד נפוץ המופיע במפות רוח כגון [אטלס הרוח דרום הארץ](#) [והערבה](#). כדי להעריך תפוקת אנרגיה באתר אנו צריכים לדעת את שטח הטורבינה, ואת הנצילות הממוצעת שלה. ניתן להעריך זאת ע"י לקיחת יעילות ממוצעת של 20%-25% לטורבינות קטנות, ו-35% עבור טורבינות קהילתיות-בינוניות. את התאמת צפיפות האנרגיה שנמדדה בגובה  $z_0$  ניתן להעביר לגובה  $z$  לפי אותו חוק מעריכי, כשבמקום מהירות מכניסים את צפיפות האנרגיה, ובמקום  $\alpha$  מכניסים  $\alpha^3$ , כדי להכניס את היחס בין מהירות הרוח לאנרגיה ברוח. הקשר בין צפיפות אנרגיה ומהירות רוח ממוצעת הוא לא ישיר, ותלוי בהתפלגות הרוח. עבור התפלגות ריילי הקשר הוא:

$$E[\text{watt}/m^2] = \frac{1}{2} \rho V^3 \cdot 1.91$$

כש-1.91 הוא הפרמטר שמקשר בין מהירות הרוח הממוצעת בשלישית לבין השטח האמיתי של התפלגות הרוח סביב מהירות הרוח הממוצעת.

חישוב סכ"ה האנרגיה השנתית ינתן ע"י

$$AEP[kwh] = \frac{8760}{1000} \cdot E \cdot \frac{\pi}{4} D^2 \cdot C_p$$

כש-AEP עומד עבור Annual energy production, תפוקת אנרגיה שנתית.

דוגמא:

קוטר להבים = 3.7 מטר

שטח להבים =  $\pi/4 \cdot 3.7^2 = 3.14/4 \cdot 3.7^2 = 10.75$  מ"ר

נצילות = 0.2

צפיפות אנרגיה שנתית בגובה הטורבינה 250-350 וואט למ"ר  
= אנרגיה שנתית

$$AEP[kwh] = \frac{8760}{1000} \cdot 250 \cdot \frac{3.14}{4} \cdot 3.7^2 \cdot 0.2 = 4700$$

החישוב באותו אופן עבור 350 וואט למ"ר נותן 6600 קוט"ש בשנה, כלומר עבור הטורבינה הזו התחזית לפי נתוני אטלס הרוחות הן בין 4700-6600 קוט"ש בשנה. יצרני skystream, טורבינה באותו קוטר, חוזים תפוקה של 5400 קוט"ש בשנה עבור צפיפות אנרגיה של 250 וואט למ"ר בגובה הרוטור.