

נקודות בנוגע למידול טורבינת רוח

הניתוח האווירודינמי של טורבינת רוח מסתכם בגרף מרכזי אחד - שהוא הקשר בין ה- Tip Speed Ratio, λ , למקדם ההספק של הטורבינה - C_p .

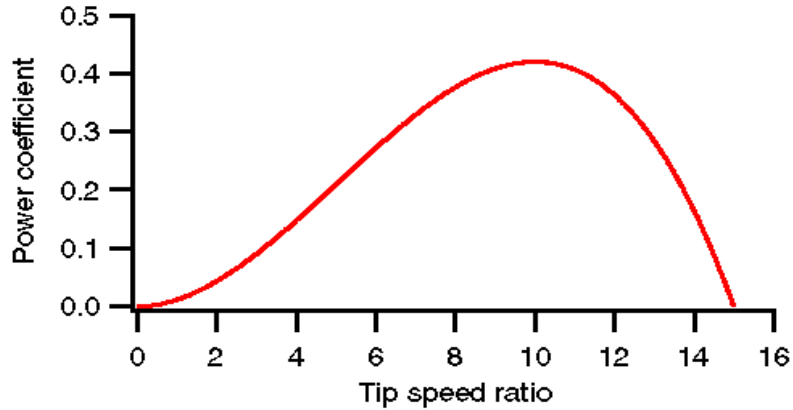


Figure 3.28 Sample $C_p - \lambda$ curve for a high tip speed ratio wind turbine

מתוך פרק 3 של Wind Energy Explained / Weily 2002 .

הקשר בין מקדם ההספק להספק עצמו $P = M \Omega$ כש- M הוא מומנט הלהבים (הטורבינה), נתון ע"י :

$$P_{rotor} = \eta \frac{1}{2} \rho \pi R^2 U^3 C_p(\lambda)$$

$$\eta = \text{gear train efficiency}$$

$$\rho = \text{air density, } \frac{Kg}{m^3}$$

$$\lambda = \text{Tip Speed Ratio (TSR)} = \frac{\Omega R}{U}$$

$$\Omega = \text{rotor angular speed } \frac{Rad}{sec}$$

במהירות רוח נתונה, ככל שה- λ עולה, כך עולה גם מהירות הסיבוב, ולהפך. הסיבה שעובדים עם ה- λ ולא עם מהירות הסיבוב עצמה היא על מנת לפשט את הצגת המצב, שכן הגרף למעלה חוזר על עצמו בכל מהירות רוח ויהיה מיותר להציג אותו שוב ושוב. ה- λ בעצם מבטא את היחס בין מהירות הרוח המציפה, U , בקצה הלהב, למהירות הרוח הנוצרת כתוצאה מסיבוב הלהב. "מהירות הרוח המציפה" - U היא מהירות הרוח הגורמת לסיבוב הטורבינה. על מנת להבין את הגרף, נסתכל על 3 נקודות אופייניות לאורכו, נצייר את זווית ההתקפה, ונסיק על הכוחות הפועלים.

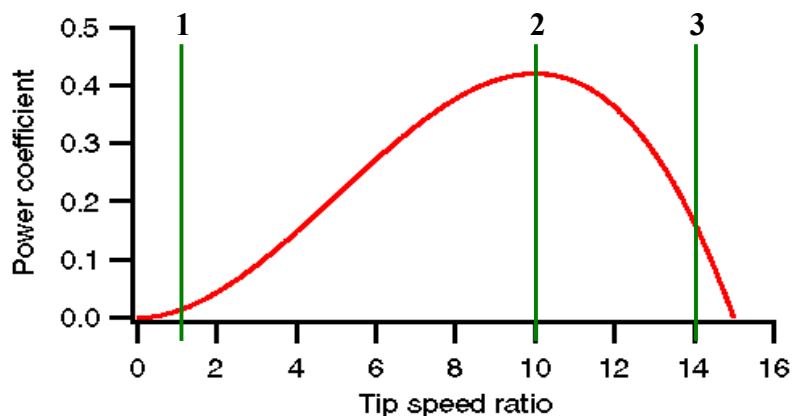


Figure 3.28 Sample $C_p - \lambda$ curve for a high tip speed ratio wind turbine

נקודה 1 : $TSR = 1$, בגלל בעיות פונטים אני רושם פעם TSR ופעם λ , כמובן ש- $TSR = \lambda$.
ה- TSR הוא הקשר בין מהירות הסיבוב בקצה הלהב למהירות הרוח המציפה : $\Omega R = TSR \cdot U$. $TSR=1$ משמע שמהירות סיבוב הלהב יוצרת רוח שחוזקה שווה למהירות הרוח המציפה
המהירות השקולה, $U_e = \sqrt{U^2 + (\Omega R)^2}$, קובעת את זווית ההתקפה האפקטיבית של הלהב. אנו מביטים בציורים הבאים על חתך קצה הלהב. יכלנו באותה מידה להביט על חתך אחר, למשל ב- $\frac{3}{4} R$, כך או כך נקבל תמונה אופינית על שינוי הכוחות עם שינוי ה- TSR .

בסרטוט דיאגרמת כוחות על חתך אופיני בקצה הלהב, $TSR = 1$, מופיע חתך הלהב ועליו בכחול שני רכיבי המהירות, שווים בגודלם ($TSR = 1$, אז $\Omega R = U$). המהירות השקולה יוצרת זווית של כ-45 מעלות עם מיתר הלהב (הקו שמחבר את תחילת הלהב, שפת הזרימה, עם קצה הלהב, שפת ההתקפה). מבט בדיאגרמה המוצגת מתחת, מראה שעבור הזווית הזאת, אנו מקבלים מקדם עילוי נמוך ממקדם הגרר. הקשר בין המקדמים לבין הכוחות נתון ע"י

$$L = \frac{1}{2} \rho S U^2 C_l(\alpha), D = \frac{1}{2} \rho S U^2 C_d(\alpha)$$

$$F = L \cos(\alpha + \gamma) + D \sin(\alpha + \gamma), T = L \sin(\alpha + \gamma) - D \cos(\alpha + \gamma)$$

$$\alpha = \text{angle of attack}, \gamma = \text{pitch angle}$$

$$S = \text{area of blade}, m^2$$

אם נפרק את הכוחות לשני הכיוונים המעניינים אותנו – כיוון הניצב לציר הסיבוב, T , והוא הכיוון המסובב את הטורבינה, וכיוון עם ציר הסיבוב, F , והוא הכיוון שמנסה לכופף את הלהב ולשוברו, נראה שבמצב הזה החתך הנ"ל לא תורם כח בכיוון הסיבוב, אלא להפך, מנסה לעצור את הטורבינה (כיוון הסיבוב הוא הפוך לחץ מהירות הרוח ΩR).

ככל שה- TSR עולה, זווית ההתקפה קטנה, ועבור המקסימום C_p , זווית ההתקפה היא אופטימאלית, כלומר אנו מקבלים מקסימום T בכיוון הסיבוב (שמאלה). סרטוט דיאגרמת כוחות על חתך אופיני בקצה הלהב, $TSR = 10$ מראה מצב כזה. כוח העילוי עכשיו גדול מאוד ביחס לכח הגרר, והוא המניע העיקרי של הטורבינה. הוא גם המרכיב העיקרי ב- F שמולו הלהבים מנסים לכמוד ולא להתכופף ולהישבר.

הגדלה של ה- TSR עוד בדיאגרמת כוחות על חתך אופיני בקצה הלהב, $TSR = 14$ (הגדלת מהירות הסיבוב ברוח קבועה) גורמת להורדת זווית ההתקפה, עד שאנו מגיעים למצב בו אין יותר רכיב עילוי המספיק למשוך את הטורבינה בכיוון הסיבוב. זה המצב אליו תגיע טורבינה ללא עומס, מצב $free\ wheeling$.

תכנון טורבינת רוח, הוא קודם כל תכנון ההתאמה בין התנהגות העומס – הגנראטור – להתנהגות הטורבינה – גרף ה- $C_p \propto TSR$. בטורבינות רוח מסוימות, בעלות גנראטור סינכרוני המכוון להסתובב במהירות כמעט קבועה, קל מאוד להעריך את שיווי משקל המומנטים. ניתן להסתכל בגרף שמקשר בין מקדם מומנט הסיבוב (אותו מומנט שיוצר הכח T) לבין מהירות הסיבוב או ה- TSR , אך ניתן באותה מידה להסתכל על שווי משקל הספקים סביב ציר הסיבוב, שכן $P = M \Omega$. על גרף כזה, אופין של גנראטור סינכרוני יהיה פשוט קו אנכי בסל"ד בו הוא יסתובב (התדר המתוכנן, מספר הקטבים, והגיר). למשל, עבור שני גנראטורים (או שני יחסי תמסורת, או ליפוף כפול) נקבל את הגרף הבא - מהירות סיבוב והספק עבור גנראטור סינכרוני בעל שני מהירויות סיבוב. הגרף הוא הכפלה של גרף אופיני של הטורבינה - $C_p \propto TSR$ במהירות הרוח, לקבלת מהירות סיבוב, ובשאר נתוני הטורבינה (רדיוס, צפיפות אוויר ונצילות גיר) על מנת לקבל את ההספק שלה. אם נסתכל על חיתוך קווי הגנראטור עם אופיני הטורבינה בכל מהירות, נקבל את גרף תפוקה עבור גנראטור סינכרוני עם שני מהירויות סיבוב, שהוא בעצם שני קווים ישרים – אחד לכל מהירות סיבוב של הטורבינה. הקו המקווקו מראה את התפוקה האופטימאלית של אותה טורבינה, אם הגנראטור היה יכול להסתובב במהירות סיבוב כלשהיא, ולאפשר לטורבינה להיות בשווי משקל מומנטים בדיוק בנקודה בה מקדם ההספק הוא מירבי, כמו ב- דיאגרמת כוחות על חתך אופיני בקצה הלהב, $TSR = 10$.

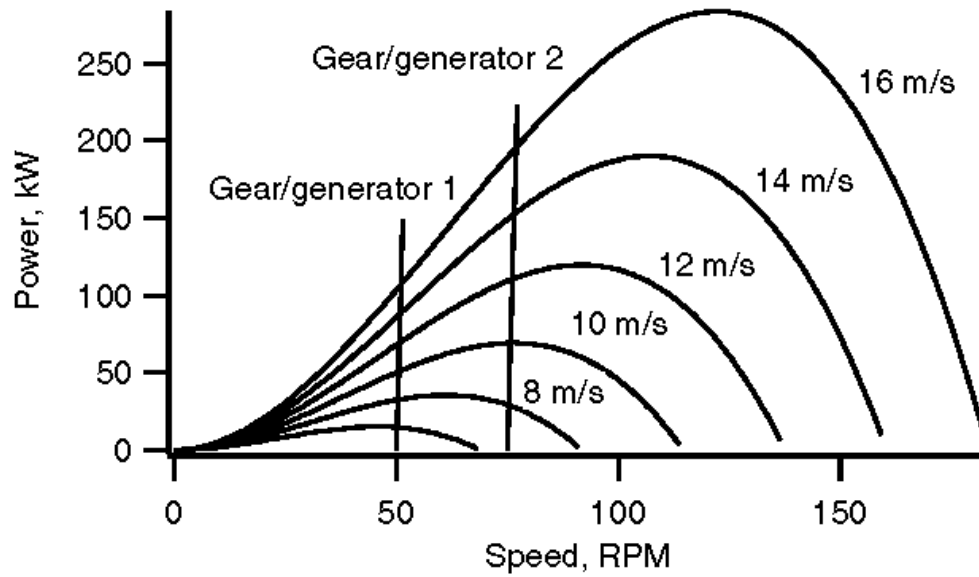


Figure 6.44 Rotor and generator power vs. rotor speed

Illustration 1: מהירות סיבוב והספק עבור גנראטור סינכרוני בעל שני מהירויות סיבוב

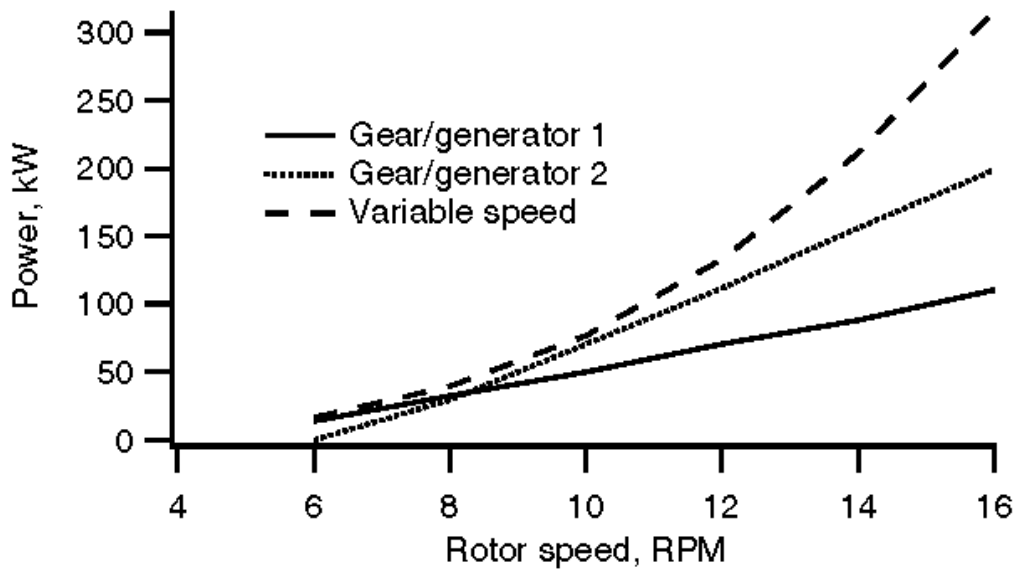


Figure 6.45 Power curves

Illustration 2: גרף תפוקה עבור גנראטור סינכרוני עם שני מהירויות סיבוב

TSR = 1

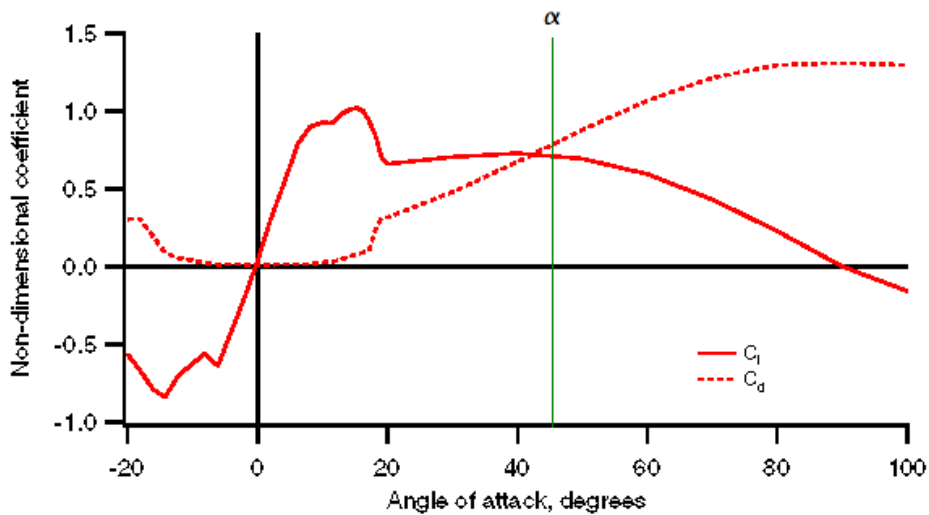
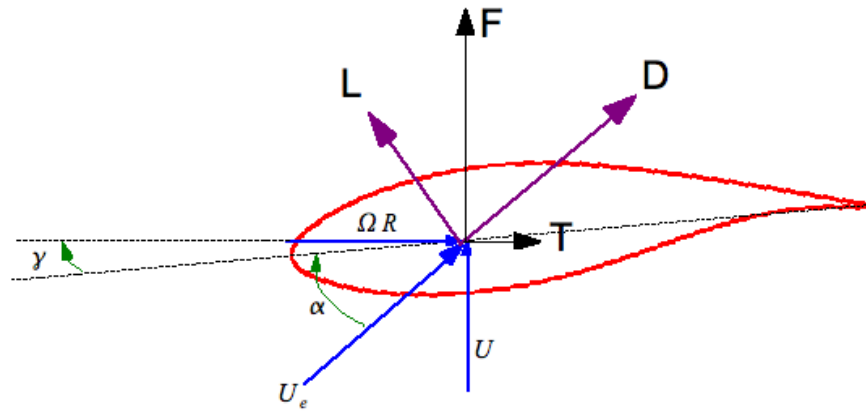


Figure 3.14 Lift and drag coefficients, C_l and C_d , respectively, for the S809 airfoil; Reynolds Number $Re = 75,000,000$.

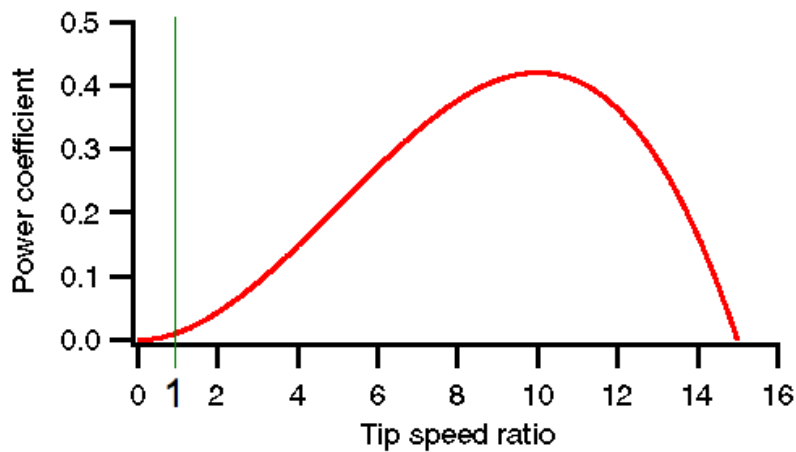


Figure 3.28 Sample $C_p-\lambda$ curve for a high tip speed ratio wind turbine

TSR = 10

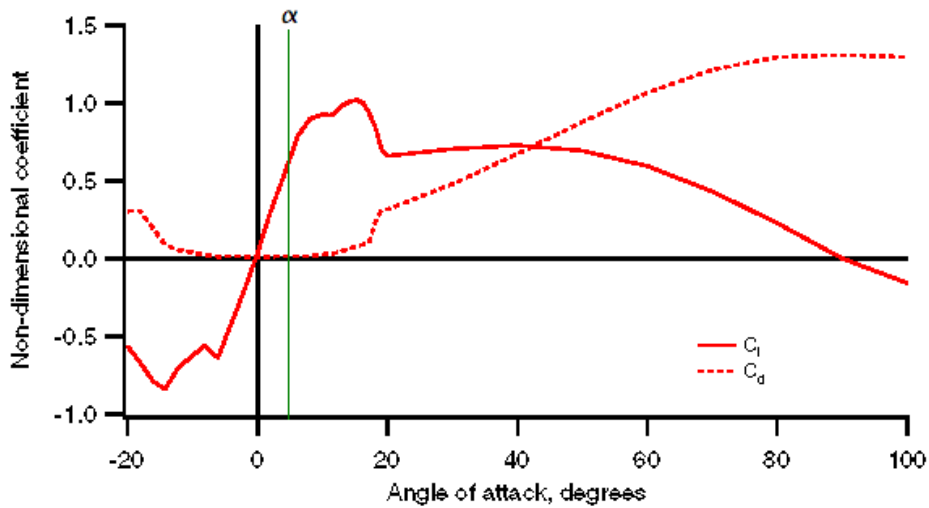
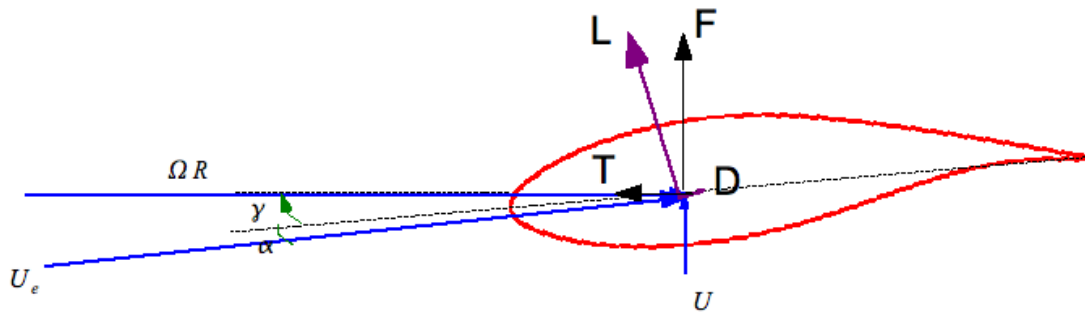


Figure 3.14 Lift and drag coefficients, C_l and C_d , respectively, for the S809 airfoil; Reynolds Number $Re = 75,000,000$.

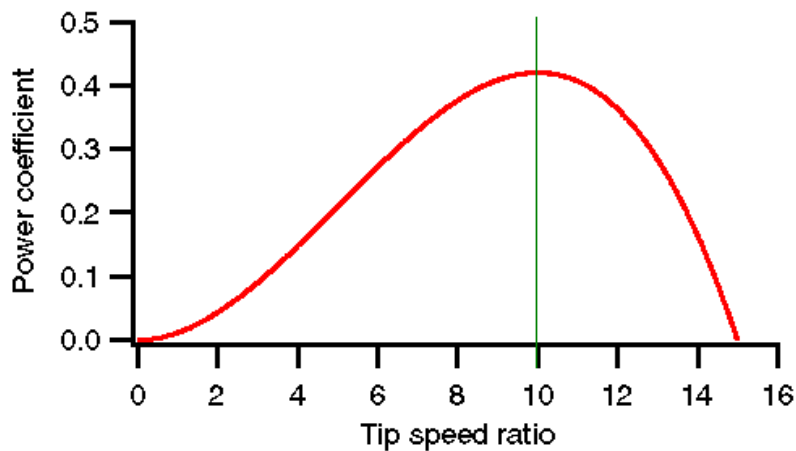


Figure 3.28 Sample $C_p - \lambda$ curve for a high tip speed ratio wind turbine

Illustration 4: דיאגרמת כוחות על חתך אופייני בקצה הלהב, $TSR = 10$

TSR = 14

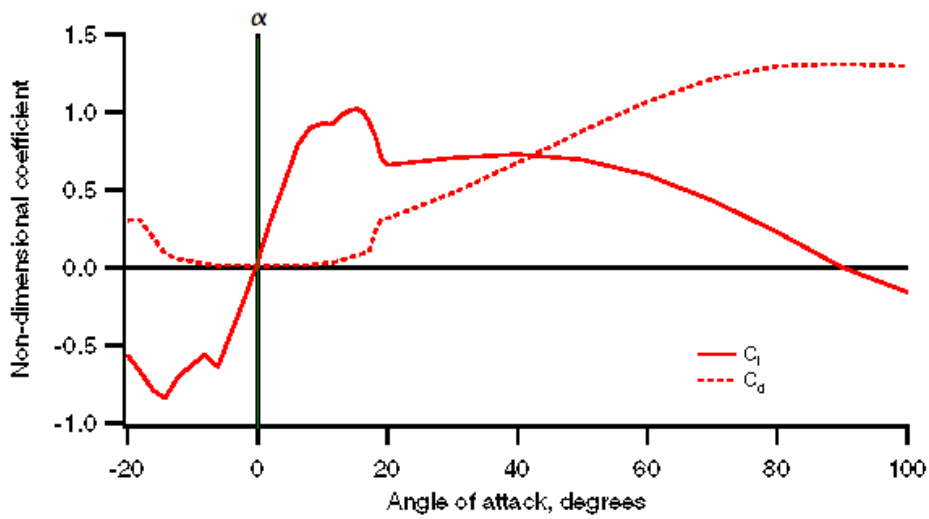
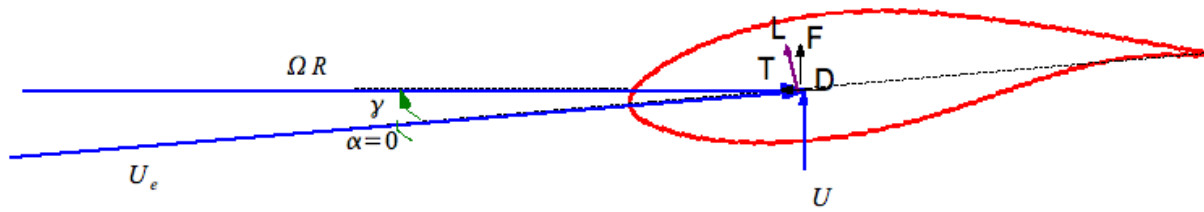


Figure 3.14 Lift and drag coefficients, C_l and C_d , respectively, for the S809 airfoil; Reynolds Number $Re = 75,000,000$.

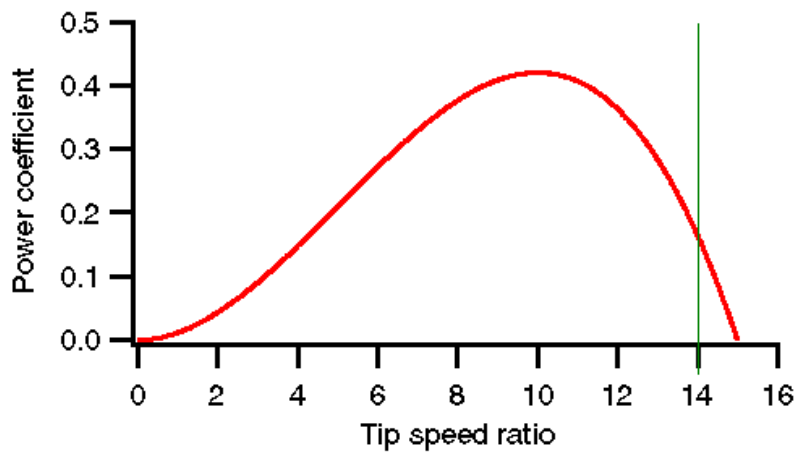


Figure 3.28 Sample $C_p-\lambda$ curve for a high tip speed ratio wind turbine

Illustration 5: דיאגרמת כוחות על חתך אופייני בקצה הלהב, $TSR = 14$