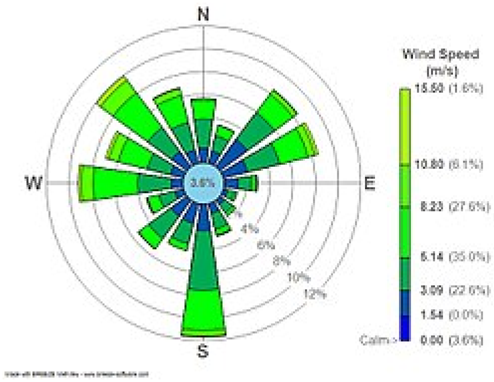
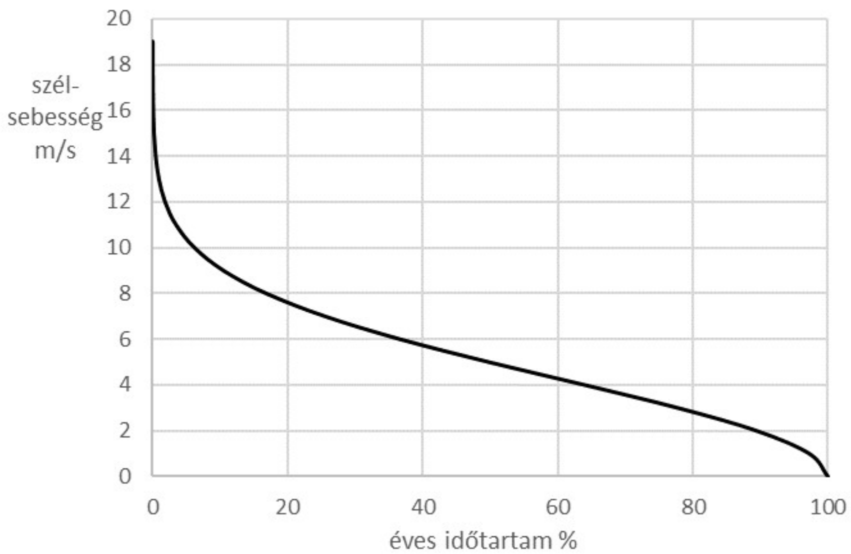
Szélturbina működési elve

Ismerni kell a szélsebesség eloszlását, illetve a szélsebesség magasság menti változását (a függőleges sebességprofilt). Előbbit jó közelítéssel a Weibull eloszlás írja le, utóbbit a logaritmikus sebességprofil. További jellemző a szélirány gyakoriság, amit a szélirányok (szélrózsa) iránymezőinek sugárirányú mérete szemléltet és a szélsebesség tartóssági görbe (az az időtartam, amig egy szélsebesség az év folyamán legalább rendelkezésre áll).

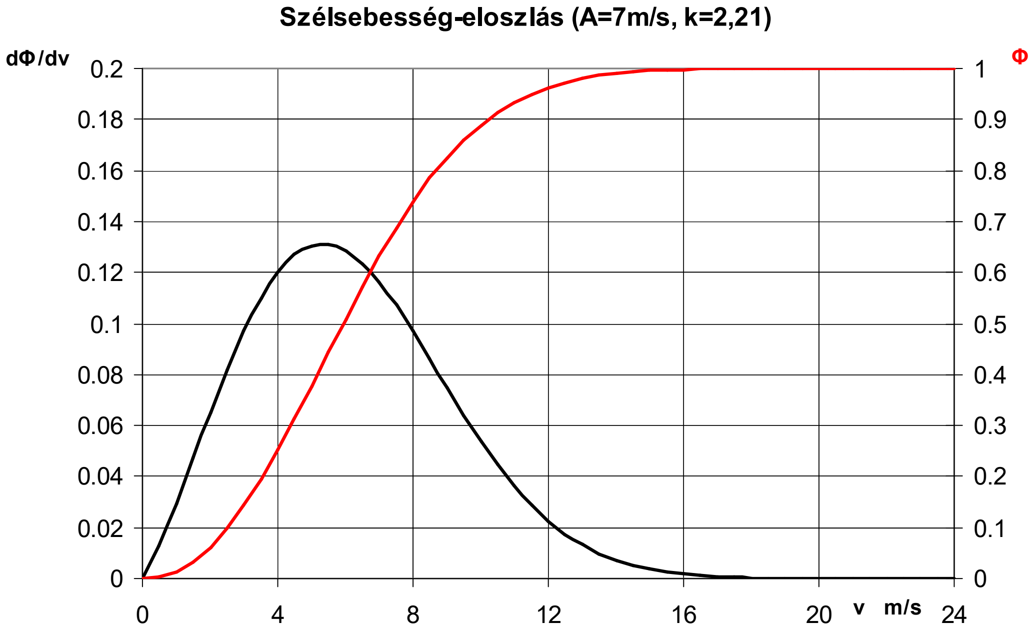


Példa szélirány-rózsára
Forrás: https://hu.wikipedia.org/wiki/Sz%C3%A9lr%C3%B3zsa



Szélsebesség tartóssági görbe

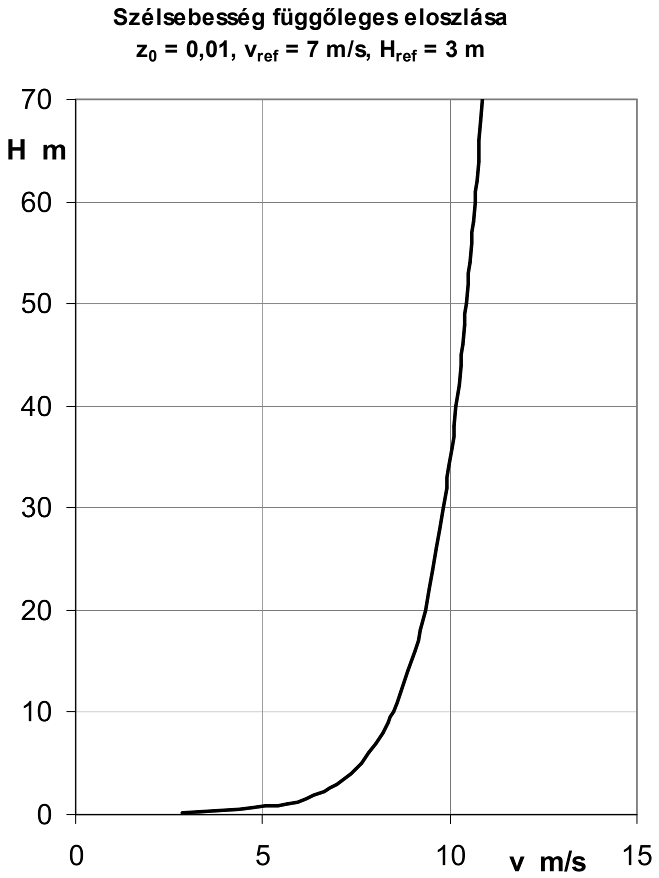
A Weibull eloszlás: $\Phi = 1 - e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k}$, ahol A a szélsebesség lépték, k az alaktényező. Ennek az eloszlásnak a deriváltja a „gyakoriság”, $\frac{d\Phi}{dv} = \frac{k}{A}\left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k}$. Ennek a sűrűségfüggvénynek a maximuma ott van, ahol $v = A\left(\frac{k-1}{k}\right)^{\frac{1}{k}}$. Az alábbi ábrán példaképpen A = 7 m/s szélsebesség lépték és k = 2,21 alaktényező esetére látható az eloszlás- és a sűrűségfüggvény grafikonja.



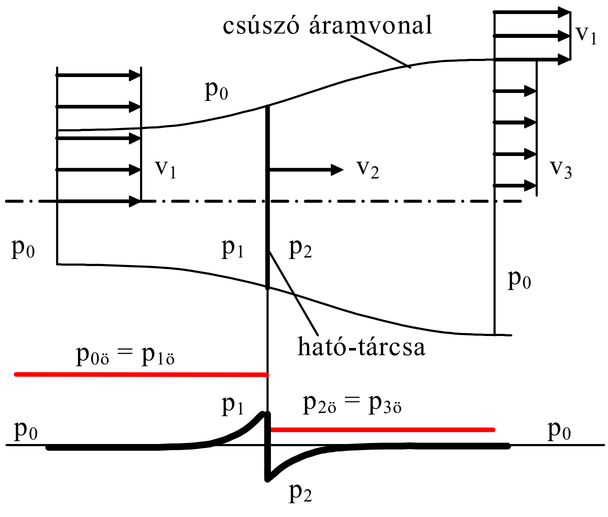
A logaritmikus sebességprofilt a $v = v_{ref} \dfrac{\ln\left(\dfrac{H}{z_0}\right)}{\ln\left(\dfrac{H_{ref}}{z_0}\right)}$ képlet írja le. Itt v_{ref} jelöli a H_{ref} magasságban mért szélsebességet, z_0 pedig az érdességi paraméter.

Felület típusa	z_0 m
tenger	0,0001
csupasz föld	0,005
mező, illetve füves repülőtér	0,01
megművelt szántóföld	0,05
bozótos	0,2
elővárosi lakott terület	0,5
város, erdő	1

Az alábbi ábra egy függőleges szélprofilt mutat egy mezőn $H_{ref} = 3$ m magasságban mért $v_{ref} = 7\,m/s$ szélsebesség esetén.



A szélturbina egy axiális átömlésű járókerék, amit a szél mozgási energiájának kinyerésére használnak. A talajhoz rögzített szélturbina áramló levegőben helyezkedik el. A szélturbinát egy ún. ható tárcsával (*actuator disc*) helyettesíthetjük.



Az ábra felső részén a szélturbinát helyettesítő tárcsa és a rajta átáramló közeget határoló forgásszimmetrikus áramfelület metszetgörbéje látható. Ez a határ-áramvonal ún. csúszó áramvonal, tehát rajta tangenciális sebességugrás lehetséges. A folyadék baloldalt lép be v_1 relatív sebességgel. Ebben a keresztmetszetben a relatív sebesség az áramcső belsejében és

azon kívül megegyezik, mint a sebességeloszlás ábrája mutatja. Az áramcsőben a közeg a szélturbinához képest lelassul és a jobb oldalon $v_3 < v_1$ sebességgel távozik, míg az áramcsövön kívül a relatív sebesség végig v_1. Ennek megfelelően kívül a nyomás végig állandó, p_0, míg belül változik, a propellert helyettesítő tárcsán p_1-ről p_2-re csökken, de az áramcsőből való folyadékkilépés keresztmetszetében már ismét p_0.
Feltesszük, hogy a sebesség változása az áramcsőben folytonos a tárcsán keresztül is, míg a **statikus nyomás** és az **össznyomás** ott ugrásszerűen csökken.

Az áramló folyadékra felírható egyenletek a következő feltevéseken alapulnak.

- az áramlás stacionárius a szélturbinához kötött nyugvó rendszerben
- a közeg összenyomhatatlan, sűrűsége $\rho =$ áll.
- a közeg súrlódásmentes
- az áramcsövön kívül a statikus nyomás mindenütt azonos
- a nehézségi erőtér elhanyagolható
- az axiális sebesség bármely szelvényben állandó
- a radiális sebesség zérus

Az áramlást leíró egyenletek

- kontinuitási egyenlet
- a tárcsára a nyomáskülönbségből ható szélerő
- Bernoulli-egyenlet a tárcsa előtti áramvonalra
- Bernoulli-egyenlet a tárcsa utáni áramvonalra
- impulzustétel az áramcsőre

A **kontinuitási egyenlet**: $\dot{m} = \rho A v =$ áll. (1)

Ez a képlet az áramcső bármely szelvényében a megfelelő indexekkel felírható. A keresztmetszetek indexe egyezzék meg az ábrán látható *sebességek* indexével.

A **tárcsára ható erő** a nyomáskülönbségből számítható, az ábra jelöléseivel és a keresztmetszetet a fenti módon indexelve:

$$F = \left(p_1 - p_2\right) A_2 . \tag{2}$$

Írjuk fel a **Bernoulli-egyenlet**et az áramcső eleje és a tárcsa előtti pont között:

$$p_0 + \frac{\rho}{2} v_1^2 = p_1 + \frac{\rho}{2} v_2^2 . \tag{3}$$

Írjuk fel a Bernoulli-egyenletet a tárcsa utáni pont és az áramcső vége között:

$$p_2 + \frac{\rho}{2} v_2^2 = p_0 + \frac{\rho}{2} v_3^2 . \tag{4}$$

Fejezzük ki a (4) egyenletből p_2-t, a (3) egyenletből a p_1-et és írjuk be értéküket a tolóerő (2) egyenletébe, ekkor azt kapjuk, hogy:

$$F = \frac{\rho}{2}\left(v_1^2 - v_3^2\right) A_2 = \rho \frac{v_1 + v_3}{2}\left(v_1 - v_3\right) A_2 . \tag{5}$$

Ezek után keressünk egy másik egyenletet a tárcsára ható erőre, ez az egyenlet az ábrán látható forgásfelülettel határolt folyadékra felírt **impulzus-tétel**. Az áramcsövön kívül feltevésünk szerint a nyomás mindenütt azonos a p_0 külső nyomással, a térerőt elhanyagoltuk, továbbá a folyadék súrlódásmentes. Ezek miatt az áramfelületbe, mint ellenőrző felületbe zárt folyadékra a tárcsán kívül más külső erő nem hat. Az áramlás stacionárius voltát is figyelembe véve a belépő, illetve kilépő folyadék impulzusának különbségét tehát csak a tárcsa által a folyadékra kifejtett erő okozhatja.

$$\dot{m}v_1 - F - \dot{m}v_3 = 0. \tag{6}$$

Innen az F erőt kifejezve és az (5) egyenlet bal oldalával egyenlővé téve, továbbá a tömegáramot a hatótárcsa szelvényének adataival felírva ($\dot{m} = \rho A_2 v_2$) kapjuk, hogy

$$\dot{m}(v_1 - v_3) = \rho A_2 v_2 (v_1 - v_3) = F = \rho A_2 \frac{v_1 + v_3}{2}(v_1 - v_3). \tag{7}$$

A (7) egyenletből egyszerűsítés után azt kapjuk, hogy a v_2 sebesség a v_1 és v_3 sebesség számtani átlagával azonos.

$$v_2 = \frac{v_1 + v_3}{2}. \tag{8}$$

További figyelmet a hasznos és bevezetett hidraulikai teljesítmény definíciója igényel, amikből kiszámítható az ideális hatásfok.
A szélturbinát helyettesítő tárcsára ható erő $v_1 - v_3 = \Delta v$ jelöléssel:

$$F = \dot{m}(v_1 - v_3) = \rho A_2 v_2 (v_1 - v_3) = \rho A_2 \left(v_1 - \frac{\Delta v}{2}\right)\Delta v = \rho A_2 v_1^2 \left(1 - \frac{\Delta v}{2v_1}\right)\frac{\Delta v}{v_1}. \tag{9}$$

A turbina által hasznosítható hidraulikai teljesítmény

$$P_h = Q\Delta p = \frac{\dot{m}}{\rho}\frac{F}{A_2} = A_2 v_2 \frac{F}{A_2} = v_2 F = \left(v_1 - \frac{\Delta v}{2}\right)F = v_1\left(1 - \frac{\Delta v}{2v_1}\right)F,$$

itt F helyébe beírva a (9) képlet jobb oldalát:

$$\boxed{P_h = \rho A_2 v_1^3 \left(1 - \frac{\Delta v}{2v_1}\right)^2 \frac{\Delta v}{v_1}} \tag{10}$$

A bevezetett hidraulikai teljesítmény azonos a tárcsa helyén zavartalan v_1 szélsebességgel átáramló levegő mozgási energiájával:

$$P_{be} = \rho A_2 v_1 \frac{v_1^2}{2} = \frac{1}{2}\rho A_2 v_1^3 \tag{11}$$

Az ideális szélturbina η hidraulikai hatásfoka – más néven C_p teljesítménytényezője – e két teljesítmény hányadosa:

$$\eta = C_p = \frac{P_h}{P_{be}} = 2\left(1 - \frac{\Delta v}{2v_1}\right)^2 \frac{\Delta v}{v_1} = 2(1-x)^2\, 2x \tag{12}$$

ahol a fajlagos sebességváltozás felét x-szel jelöltük:

$$\boxed{x = \frac{\Delta v}{2v_1}.} \tag{13}$$

Ezzel a jelöléssel a korábbi, F erőre vonatkozó (9) egyenlet módosított alakban írható:

$$F = \rho A_2 v_1^2 (1-x)\cdot 2x. \tag{9*}$$

A ***hatásfok maximum***ának szükséges feltétele a

$$\frac{d\eta}{dx} = 4(1-x)(-1)2x + 2(1-x)^2\, 2 = -8x(1-x) + 4(1-x)^2 = 4(1-x)(1-3x) = 0 \quad (14)$$

egyenlőség teljesülése.
Nyilván csak a második gyöknek van fizikai értelme: x = 1/3, amit beírva a (12) képletbe kapjuk, hogy

$$\eta_{\max} = C_{p,\max} = 2\left(1-\frac{1}{3}\right)^2 2\frac{1}{3} = \frac{16}{27} = 0{,}593\,.$$

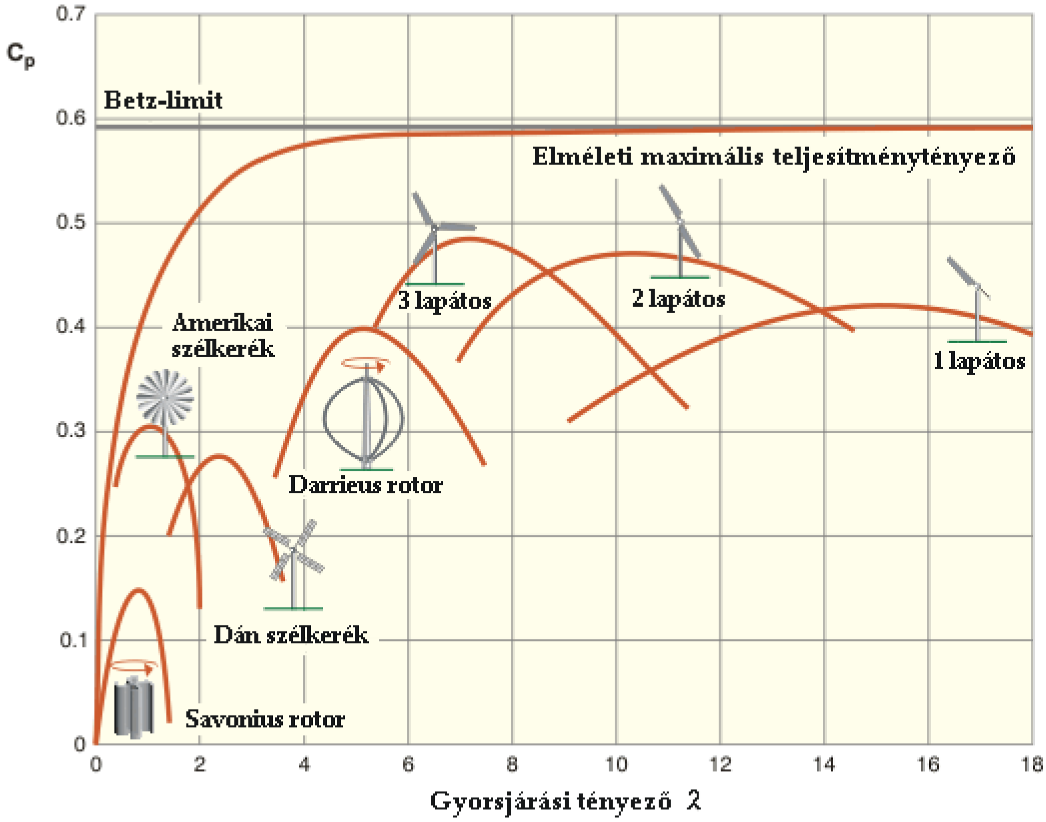
Ezt a $C_{p,\max}$ értéket **Betz-féle korlát**nak hívják. A korszerű szélerőművek két vagy háromlapátos szélturbináinak hatásfok maximuma optimális üzemállapotban eléri az 50%-ot. Mivel a szélsebesség még viszonylag állandó széljárású helyeken, például az Atlanti óceán keleti (nyugateurópai) partján sem állandó, így az éves átlagos hatásfok az optimálistól eltérő gyakori szélsebességek miatt ennél az értéknél lényegesen rosszabb, előnye viszont, hogy ez az energiaforrás kevés környezeti ártalmat okoz. Napjainkban a szélenergia kihasználása terjedőben van.

Szélturbinák tényleges hatásfokát mérésekkel lehet meghatározni és a mért hatásfokot a J **fajlagos lapátcsúcs-sebesség** függvényében szokás ábrázolni. A fajlagos lapátcsúcs-sebesség definíciója – ω a turbinakerék szögsebessége, R a turbinakerék sugara –

$$\boxed{J = \frac{\omega R}{v_1}} \quad (15)$$

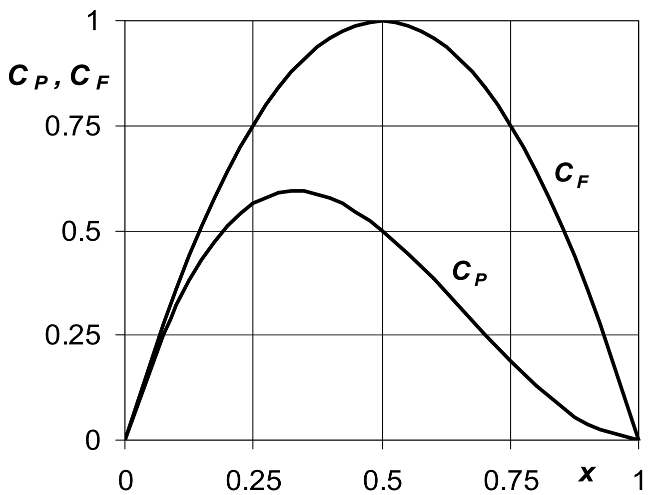
Axiális erőtényezőnek hívják és C_F-fel jelölik az F axiális erő tárcsafelület és a szél dinamikus nyomásának szorzatával dimenziótanított értékét, ami (9), (9*) és (13) helyettesítésével tovább alakítható:

$$C_F = \frac{F}{\frac{\rho}{2} v_1^2 A_2} = \frac{\rho A_2 v_1^2 \left(1-\frac{\Delta v}{2v_1}\right)\frac{\Delta v}{v_1}}{\frac{\rho}{2} v_1^2 A_2} = 4x(1-x). \quad (16)$$

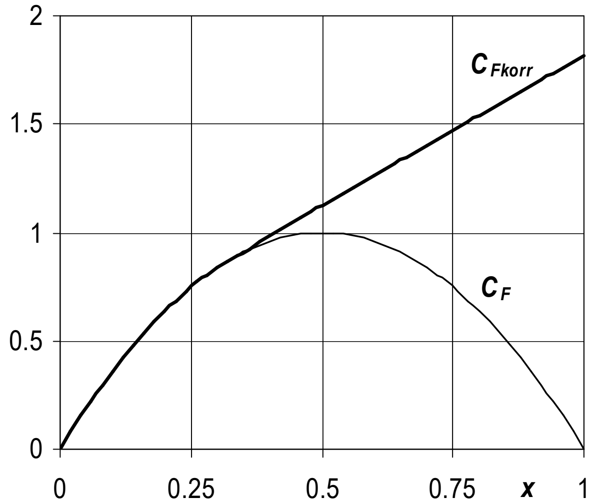


Az η = $\mathbf{C_p}$ teljesítménytényezők a $J = \boldsymbol{\lambda}$ fajlagos lapátcsúcs sebesség/gyorsjárási tényező függvényében (forrás: Google)

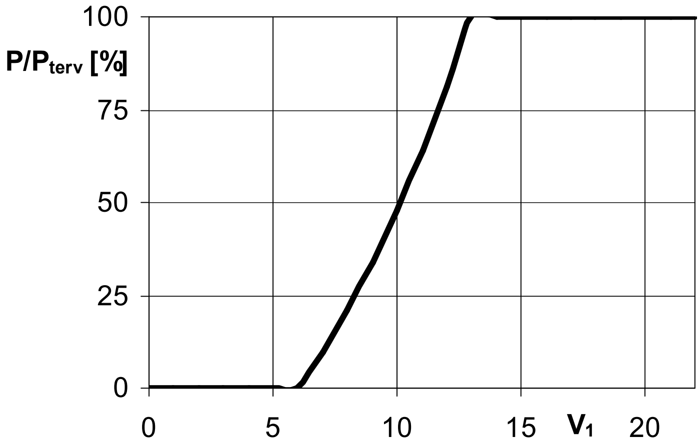
Az alábbi ábra a $C_P(x)$ és $C_F(x)$ függvénygrafikont mutatja.



Mérési tapasztalatok szerint a C_F erőtényező x = 0,32 felett lineárisan tovább nő, nem követi az elméleti görbe alakját, amint az alábbi ábra mutatja.

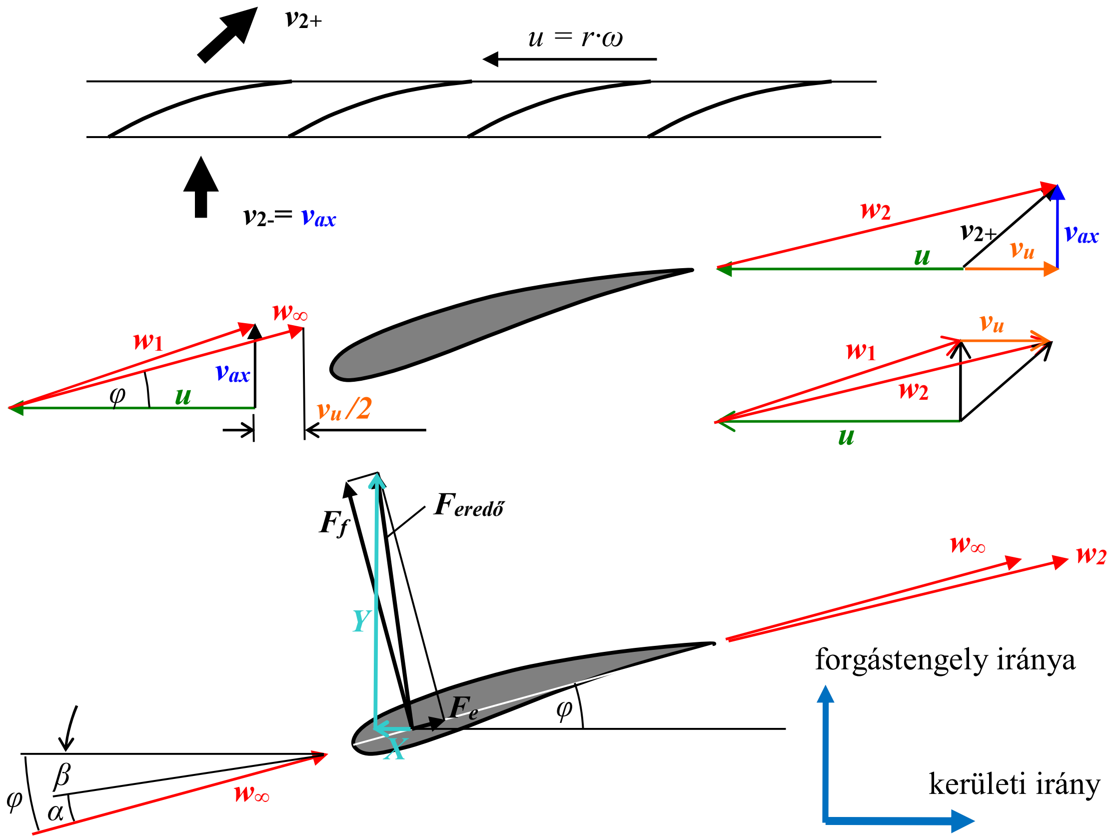


A szélben rejlő kinyerendő mozgási energia a (11) képlet szerinti, azaz a szélsebesség köbével arányos. A turbina veszteségei miatt van egy minimális **indítási szélsebesség**, ami alatt a szélturbina nem működik hatékonyan, van egy **tervezési szélsebesség**, efölött a teljesítményt a lapátszög állításával szabályozottan állandó értéken tartják és van egy **maximális szélsebesség**, ami felett a szélturbinát leállítják. A turbina teljesítménye így a szélsebesség függvényében az alábbi grafikon szerint változik.



Lapátszegmens áramlástani analízise
Az alábbi ábrán látható

- a lapátozás r sugarú hengermetszete kiterítve,
- egy lapát sebességi háromszögei és
- a lapátra ható erők.



A lapátok vázvonalával megrajzolt szélturbina lapátrács
Egy lapát a belépő és a kilépő sebességi háromszöggel, illetve utóbbi alatt a két összerajzolt sebességi háromszög
A lapát szegmens helyzetét definiáló szögek és a lapát szegmensre ható erők, az eredő erő komponensei

A fenti ábra középső rajzának jobb oldalán látható, hogy a lapátrácson az eredetileg forgásmentes levegő a járókerék forgásával ellentétes – azaz negatív – irányban forogva távozik, a forgási komponens értéke v_u. Az ábrán a w_∞ sebességet ennek a komponensnek a felével szerkesztettük meg. Jelöljük a v_u sebességkomponens és az $u = r\omega$ kerületi sebesség viszonyát (az úgynevezett áttételi szám felét) a-val:

$$\boxed{a = \frac{v_u}{2r\omega}} \tag{17}$$

A lapát egy elemi dr vastagságú lapátmetszetére ható dM nyomaték kiszámítható az impulzus nyomatéki tételből és a (17) képlet szerinti a tényezőből. Felhasználjuk, hogy a járókerék (a hatótárcsa) helyén a levegő axiális sebessége a szélsebességnél $\Delta v/2 = x \cdot v_1$ –gyel kisebb, azaz $v_{2ax} = v_1(1-x)$.

$$dM = dP/\omega = \frac{d\dot{m} \cdot v_u u}{\omega} = 2r\pi v_{2ax}\rho dr \cdot 2r\omega a \cdot r = 4\pi\rho\omega v_1 (1-x) a r^3 dr. \tag{18}$$

A járókerék teljesítménye így a nyomaték lapát menti integráljának szögsebesség-szerese.

$$P = 4\pi\rho\omega^2 v_1 \int (1-x) a r^3 dr.$$

Egy elemi lapátszeletre ható erők

A fenti ábra alsó képén megrajzoltuk a lapátmetszetre ható erőket, számítható ezek nyomatéka is.
A középső ábrában bejelöltük a φ szöget, ami a kerületi sebességirány és a $\boldsymbol{w_\infty}$ által bezárt szög. A sebességi háromszögekkel felírható e szög szinusza, koszinusza és tangense, ha figyelembe vesszük a (13) és (17) definíciót:

$$\sin\varphi = \frac{v_{ax}}{w_\infty} = \frac{v_2}{w_\infty} = \frac{v_1\left(1-x\right)}{w_\infty}, \tag{19}$$

$$\cos\varphi = \frac{u+\dfrac{v_u}{2}}{w_\infty} = \frac{u\left(1+\dfrac{v_u}{2u}\right)}{w_\infty} = \frac{r\omega\left(1+a\right)}{w_\infty}, \tag{20}$$

$$\boxed{\tan\varphi = \frac{v_1}{r\omega}\frac{1-x}{1+a}.} \tag{21}$$

A dr vastagságú lapátmetszetre ható erők az ábra alsó képe alapján ezekkel a szögfüggvényekkel felírhatók.

$$dY = dF_f\,\cos\varphi + dF_e\,\sin\varphi, \tag{22}$$

$$dX = dF_f\,\sin\varphi - dF_e\,\cos\varphi. \tag{23}$$

Igaz továbbá, hogy

$$dF_f = c_f\,\frac{\rho}{2}w_\infty^2 l\cdot dr \quad \text{és} \quad dF_e = c_e\,\frac{\rho}{2}w_\infty^2 l\cdot dr. \tag{24}$$

A felhajtóerő és ellenálláserő tényező az α állásszög függvénye. Az állásszög definíciója az ábra alsó képe szerint $\alpha = \varphi - \beta$, ahol ***β* jelöli a zérus felhajtóerőhöz tartozó megfújási irány és a lapátok keringési irányának szögét**.
A (19) és (20) szögfüggvényt, valamint a (24) erőket behelyettesítve a (22) képletbe, kapjuk, hogy

$$dY = \frac{\rho}{2}w_\infty^2\left(c_f\,\cos\varphi + c_e\,\sin\varphi\right)Zl\cdot dr, \tag{25}$$

mert a turbinakeréken Z darab lapát van. Az r sugáron lévő Z lapátmetszet dX erejének elemi nyomatéka

$$dM = ZrdX = \frac{\rho}{2}w_\infty^2\left(c_f\,\sin\varphi - c_e\,\cos\varphi\right)lZrdr. \tag{26}$$

Ismert a hatótárcsa dr szélességű elemi $2r\pi dr$ felületű gyűrűjére ható $dY = dF$ erő, mely a (9*) képlet alapján

$$dY = dF = \rho v_1^2\left(1-x\right)\cdot 2x\cdot 2r\pi dr. \tag{27}$$

A (25) és a (27) képlet egybevetéséből, felhasználva a (19) képletet is kapjuk, hogy:

$$\frac{\rho}{2}w_\infty^2\left(c_f\,\cos\varphi + c_e\,\sin\varphi\right)Zl\cdot dr = dY = \rho w_\infty^2\left(\frac{\sin\varphi}{1-x}\right)^2\left(1-x\right)\cdot 2x\cdot 2r\pi dr,$$

illetve egyszerűsítések után

$$\frac{x}{1-x} = \frac{\left(c_f\,\cos\varphi + c_e\,\sin\varphi\right)Zl}{8\pi r\sin^2\varphi}. \tag{28}$$

Teljesen hasonló gondolatmenettel az elemi nyomatékokra kapott (18), (26) (19) és a (20) képlet alapján

$$\frac{a}{1+a} = \frac{\left(c_f\,\sin\varphi - c_e\,\cos\varphi\right)Zl}{8\pi r\sin\varphi\cos\varphi}. \tag{29}$$

A vízszintes tengelyű szélturbinák fontos dimenziótlan jellemzője – hasonlóan a hajó- és légcsavarok fajlagos propulziós sebességéhez – a (15) képlet szerinti lapátcsúcs sebességi viszony:

$$J = \frac{R\omega}{v_1},$$

$R\omega$ jelöli a turbinakerék lapátok csúcsának kerületi sebességét, v_1 a szélsebességet. Kétlapátos forgórészek esetén a lapátcsúcs sebességi viszony ajánlott tartománya $9 \le J \le 10$, míg háromlapátos rotoroknál $5{,}5 \le J \le 8{,}5$.

A (21) képlet szerint

$$\frac{v_1}{r\omega}\frac{1-x}{1+a} = \boxed{\tan\varphi = \frac{R}{rJ}\frac{1-x}{1+a}} \tag{30}$$

A (28), (29) képlet még tovább alakítható, hogy az axiális ventilátorok tervezésekor használt erőtényező megjelenjen az összefüggésekben. Az ellenállás tényező és felhajtóerő tényező hányadosát (a siklószám reciprokát) ε-nal jelölve kapjuk, hogy

$$\boxed{\frac{x}{1-x}} = \frac{lc_f}{\frac{2r\pi}{Z}}\frac{\cos\varphi + \frac{c_e}{c_f}\sin\varphi}{4\sin^2\varphi} \boxed{= \frac{1}{4}\frac{l}{t}c_f\frac{\cot\varphi + \varepsilon}{\sin\varphi}}. \tag{31}$$

Teljesen hasonló gondolatmenettel az elemi nyomatékokra kapott (29) képlet alapján

$$\boxed{\frac{a}{1+a}} = \frac{lc_f}{\frac{2r\pi}{Z}}\frac{\sin\varphi - \frac{c_e}{c_f}\cos\varphi}{4\sin\varphi\cos\varphi} \boxed{= \frac{1}{4}\frac{l}{t}c_f\frac{1-\varepsilon\cot\varphi}{\cos\varphi}} \tag{32}$$

Erre a két egyenletre felépített **iterációval meghatározható** x **ás** a **értéke** tetszőleges r sugáron.

Válasszuk meg J és β értékét!

Tegyük fel, hogy $\varepsilon \approx 0$! Az iteráció induló értékei $a = x = 0$. Ezzel (30)-ból $\tan\varphi = \frac{R}{rJ}$.

J értékét a fenti ajánlásoknak megfelelően megválasztva kapunk egy φ szöget, $\varphi = \arctan\left(\frac{R}{rJ}\frac{1-x}{1+a}\right)$.

Az állásszög $\alpha = \varphi - \beta$. Az állásszöghöz meghatározható ismert profil típus esetén a c_f felhajtóerő- és c_e ellenállás-tényező. Ezzel mind az $\varepsilon = \frac{c_e}{c_f}$ viszony, mind az erőtényező már számítható, így a (31) és (32) képletből x és a jobb becslése nyerhető.

Fentiekben a β felvétele önkényes, J-re pedig egy intervallumot jelöltünk ki. Célszerű β értékét a lapát csúcsánál (ahol $r = R$) kis értékre felvenni, például $\beta = 1°$ vagy $\beta = 2°$. A β szög a sugár mentén nem állandó, az r = 0,2R helyen legyen például β = 30°, közöttük pedig lineárisan változzék.

A lapátszög helyett a c_f **felhajtóerő tényező értéke is előírható**.

Ekkor az erőtényező számítható ismert lapáthúr hossz esetén. A (31) képletből – ismét $\varepsilon \approx 0$ közelítéssel – x és a értéke becsülhető és iterációval tetszőlegesen pontosan meghatározható.

Az α állásszög a felvett c_f felhajtóerő tényezőnek megfelelően állandó, tehát $\beta = \varphi - \alpha$. A β lapátszög a lapátcsúcs közelében a legkisebb, az agy felé haladva folyamatosan nő, a lapátok el vannak csavarva.

Jó közelítéssel

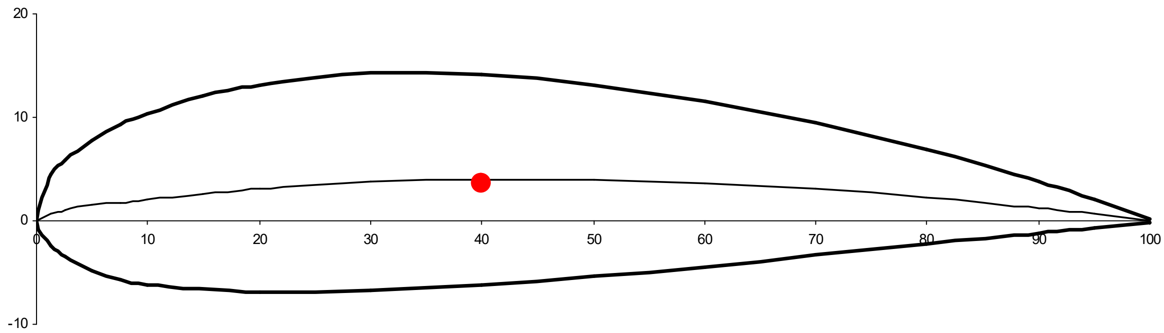
$$c_f = c''_f \cdot \sin\left(\alpha - \alpha_0\right),$$

ahol α_0 az az (ívelt profiloknál negatív) állásszög, amelynél a felhajtóerő zérus, c''_f a felhajtóerő-állásszög grafikon meredeksége ennél a zérus felhajtóerőt adó α_0 szögnél. Az α_0 szöget az irodalom fokban adja meg. Kis szögek esetén a sinus függvény értéke közelítőleg azonos a szög ívmértékével. Így $c_f \approx c''_f \cdot \frac{\pi}{180}\left(\alpha - \alpha_0\right) = c'_f \left(\alpha - \alpha_0\right)$. Az irodalomban megtalálható a c'_f meredekség, ennek 180/π –szerese a fenti képlet c''_f együtthatója.

A c_e ellenállás tényező az állásszög széles tartományában kicsi, minimumát az úgynevezett ütközés mentes belépésnél éri el, amikor a belépő torlópont a profil vázvonalának és a profilkontúrnak a metszéspontjába esik. Az ehhez tartozó felhajtóerő tényezőt az irodalom c^*_f-gal jelöli. Itt az ellenállás tényező $c_{e,\min}$.. $c^*_f = \frac{180}{\pi} c'_f \sin\left(\alpha_{e,\min} - \alpha_0\right)$, ahonnan

$$\alpha_{e,\min} = \alpha_0 + \arcsin\left(\frac{\pi}{180}\frac{c^*_f}{c'_f}\right)$$

Kisebb méretű szélturbinák esetén használják a NACA 44XX-es profilcsaládot.
Az első számjegy a vázvonal íveltségének maximuma a profil hosszának százalékában, 4%.
A második számjegy a vázvonal maximális íveltségének helye a profil hosszának tizedeiben, 0,4.
A harmadik és negyedik számjegy a maximális profilvastagság a profil hosszának százalékában. Például az alábbi ábrán látható NACA 4421 profil esetében ez az érték 21%.



A **NACA 4421** profil alakja.
A piros pont a vázvonal maximális íveltségű pontja

A Re > $3 \cdot 10^6$ esetén két szokásos szárnyprofil áramlástani jellemzői (F.W. Riegels, Aerodynamische Profile, p 132):

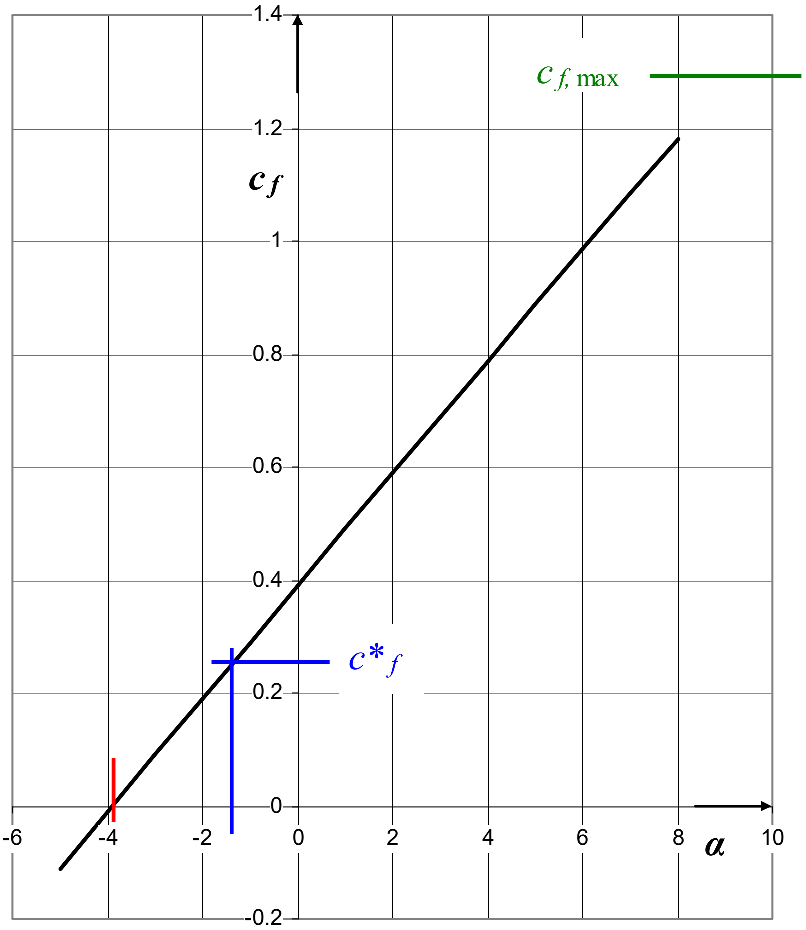
NACA 4421,	**NACA 4415**
$c_{f,max}$ **= 1,32**	**1,42**
α_0 **= -3,9°**	**-4,1°**
c'_f **= 0,1**	**0,107**
$c_{e,min}$ **= 0,0083**	**0,0073**
c^*_f **= 0,26**	**0,52**

Ezekkel például NACA 4421 profil esetén

$$c_f = c''_f \cdot \sin(\alpha - \alpha_0) = \frac{180}{\pi} c'_f \cdot \sin(\alpha - \alpha_0) = \frac{180}{\pi} 0,1 \cdot \sin(\alpha + 3,9) = 5,73 \cdot \sin(\alpha + 3,9)$$

$\alpha_{e,\min}$ = -3,9 + 2,6 = -1,3°

A lapáthúr hossza a lapáttőtől a lapátcsúcsig lineárisan csökken. A húr szokásos hossza a lapátcsúcsnál a lapáttőbeli húrhossz harmada NACA44XX lapátprofilok esetén. A járókerék fedése a lapátok összes felületének és a forgórész által súrolt körfelületnek az aránya: $fedés = \frac{A_{össz}}{A_f}$. Az agy körüli részt elhanyagolva az összes felület $A_{össz} = Zl_{köz}R$, Z a lapátszám, $l_{köz}$ a lapátprofilok húrjának hossza egy közepes sugáron. A $fedés = \frac{Zl_{köz}R}{R^2\pi} = \frac{Z}{\pi}\frac{l_{köz}}{R}$. Kétlapátos rotorok esetén $\frac{Z}{\pi} \approx 0,64$, háromlapátos rotorok esetén $\frac{Z}{\pi} \approx 0,95$. A fedés pedig kétlapátos esetben $fedés \approx 3 \div 3,5\%$, háromlapátos esetben pedig $fedés \approx 4,5 \div 5\%$. Végül ismerni kell az egyes lapátok kúposságát is. A kúposság definíciója: $kúposság = \frac{l(r = R)}{l(r = r_{agy})}$. Kétlapátos rotoroknál a $kúposság = 0,25 \div 0,45$, háromlapátos esetben a $kúposság = 0,14 \div 0,33$. Nyilván a vázvonal hossza a közepes sugáron $l_{köz} = \frac{l(r = R) + l(r = r_{agy})}{2}$, hiszen, mint említettük, a lapáthúr lineárisan csökken az agytól a lapátcsúcsig.



A **NACA 4421** profil fenti képletekkel számolt felhajtóerő tényezője az állásszög függvényében.

A **piros** abszcissza a zérus felhajtóerőhöz tartozó állásszög

A **kék** abszcissza a minimális ellenállás tényezőt adó állásszög

A **zöld** ordináta a felhajtóerő maximuma, ezután a profilról leválik az áramlás