

Szélkerék oszlop optimális méretezése

Optimal design of wind wheel column

Dr. TIMÁR Imre¹ - HORVÁTH Ákos Gergely²

^{1,2} Pannon Egyetem, H-8200 Veszprém, Egyetem u. 10.
tel.: +36 88 624 525, timar.imre@mk.uni-pannon.hu, https://uni-pannon.hu/

Abstract

The paper deals with the optimal design of wind wheel column. Have been determined the forces acting on the column. The inner diameter and wall thickness of circular tube are unknown. The minimum of mass was determined in the case of non-linear design constraints. The constraints relate to the maximal stresses and stability of column. Using a genetic algorithm, we determine the optimal geometric dimensions and minimum weight of a 50 kW wind wheel column made of different quality of steel. We calculate the required cross-section of the screws fixing the column to the concrete base.

Kivonat

A szélturbinák fontos szerkezeti eleme az oszlop, amelynek optimális méretezését mutatjuk be. Meghatározzuk az állandó keresztmetszetű hengeres csőoszlopra ható terheléseket és a célfüggvényt, ami az oszlop tömege. Ismeretlenként a cső belső átmérője és a falvastagsága szerepel. A korlátozási feltételek az oszlop tövében ébredő megengedett feszültségre, valamint a stabilitásra vonatkoznak.

Genetikus algoritmussal meghatározzuk egy 50 kW teljesítményű, különböző minőségű acélból készült szélkerék oszlop optimális geometriai méreteit és minimális tömegét. Kiszámítjuk az oszlopot a beton alaphoz rögzítő csavarok szükséges keresztmetszetét.

Kulcsszavak: szélkerék oszlop, optimális méretezés, csavarkötés

1. Bevezetés

A szélturbinák fontos szerkezeti eleme a tartóoszlop. A következőkben egy csőkeresztmetszetű szélkerék oszlop optimális méretezését mutatjuk be (1. ábra). Ismeretlennek a cső belső átmérőjét és falvastagságát tekintjük. Az oszlopra ható terhelések meghatározása után megfogalmazzuk a célfüggvényt és a korlátozási feltételeket, majd az optimálási problémát genetikus algoritmussal oldjuk meg.

2. Az oszlop optimális méretezése

2.1 A feszültségkorlátozási feltétel megfogalmazása

Az oszlopra a szélkerékre ható vízszintes erőből, az oszlopra ható szélterhelésből és az örvénylésből származó hajlítónyomaték, továbbá a szélgenerátor és az oszlop önsúlyából származó nyomóerő hat.

A szélkerékre ható erőt a következő összefüggés alapján határozhatjuk meg [2],

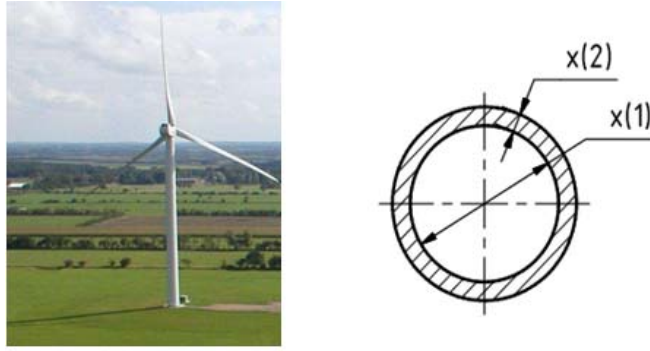
$$F_k = A_k v_{\text{át}} \rho_l (v_1 - v_2), \quad (1)$$

ahol $A_k = D_k^2 \pi / 4$ a szélkerék által súrolt terület, D_k a szélkerék átmérője, $v_{\text{át}}$ a szélkerékre belépő és kilépő levegő sebességének (v_1 és v_2) átlaga, ρ_l a levegő sűrűsége.

A kilépő szélesebbég

$$v_2 = \sqrt{1 - \eta} v_1, \quad (2)$$

ahol η a szélkerék hatásfoka.



1. ábra

Az önhordó acéloszlop [1] és keresztmetszete

A befogásnál a szélkerékre ható erő által kifejtett nyomaték

$$M_{hk} = F_k h, \quad (3)$$

ahol h az oszlop magassága.

A szélnyomást a következő összefüggéssel lehet meghatározni [3]

$$p = q_p(z)c, \quad (4)$$

ahol $q_p(z)$ a torlónyomás értéke, c az alaktényező, melynek értékét az MSZ 15021-es szabvány 11. táblázata alapján lehet meghatározni.

Az állandó keresztmetszetű hengeres oszlop vetületére ható erő

$$F_w = Dh p, \quad (5)$$

ahol D az oszlop külső átmérője, ($D = x_1 + 2x_2$, 1. ábra).

Ezt az erőt úgy tekintjük, hogy a tartó magasságának felénél hat, így a befogásnál a nyomaték

$$M_{hw} = F_w \frac{h}{2}. \quad (6)$$

Az örvényleválásból származó erő a [4] alapján

$$F_{rez} = \frac{\pi \rho_l v_{kr}^2 c_y D h}{2\delta}, \quad (7)$$

ahol v_{kr} a kritikus szélsébség a [4]-es irodalom alapján számítható (levezetését helyhiány miatt nem közöljük), δ a csillapítási tényező, c_y a keresztirányú alaki tényező.

Az F_{rez} erő nyomatéka

$$M_{hrez} = F_{rez} \frac{h}{2}. \quad (8)$$

A befogásnál a hajlításból származó feszültség

$$\sigma_h = \frac{M_{hk} + M_{hw} + M_{hrez}}{W}, \quad (9)$$

ahol W a csőoszlop keresztmetszeti tényezője.

Az oszlop legalsó keresztmetszetében a gondola súlyából (G_g) és az oszlop súlyából (G_o) származó nyomófeszültség ébred, melynek értékét az alábbi összefüggéssel határozzuk meg

$$\sigma_N = \frac{G_g + G_o}{A_o}, \quad (10)$$

ahol A_o az oszlop keresztmetszetének területe.

Mivel egyirányú összetett igénybevételről van szó, ezért a hajlításból és a nyomásból származó feszültségek algebraikailag összegezhetők

$$\sigma_{\max} = \sigma_h + \sigma_N. \quad (11)$$

A maximális feszültségnek kisebbnek kell lennie a megengedett feszültségnél (σ_{meg})

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{meg}. \quad (12)$$

2.2 A stabilitási feltétel megfogalmazása

Hajlított és tengelyirányban nyomott rudaknak ki kell elégíteni az EUROCODE 3-as szabvány által előírt feltételeket. Mivel esetünkben egy körgyűrű keresztmetszetű oszlopról van szó és a hajlítás egy tengely körül történik, ezért a szabvány szerinti stabilitási feltételek a következők lesznek [5]:

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\gamma_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{MI}}}}{\gamma_{MI}} \leq 1, \quad (13)$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\gamma_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{MI}}}}{\gamma_{MI}} \leq 1, \quad (14)$$

ahol $N_{Ed}=G_g+G_o$ a nyomóerő tervezési értéke; $M_{y,Ed}=M_{hk}+M_{hw}+M_{hrez}$ a hajlítónyomaték tervezési értéke; $\Delta M_{y,Ed}$ a súlyponteltolódásból származó nyomaték-többlet, esetünkben $\Delta M_{y,Ed}=0$; $\chi_y = \chi_z$ a kihajlási csökkentő tényezők; χ_{LT} a kifordulási csökkentő tényező, amennyiben a szerkezeti elem kifordulása nem mértékadó akkor $\chi_{LT} = 1$, esetünkben ez áll fenn; k_{yy} és k_{zy} az interakciós tényezők, meghatározásukra két alternatív módszert javasol az EC3-as szabvány; $N_{Rk} = f_y A_o$ a központosan nyomott rúdkeresztmetszet ellenállása; f_y a folyáshatár; $M_{y,Rk} = f_y W$ a keresztmetszet hajlítási ellenállása. Mivel csavarásra nem érzékeny keresztmetszetről van szó ezért a szabvány által javasolt k_{yy} kölcsönhatási (interakciós) tényezők közül biztonsági megfontolásból a következőt vesszük figyelembe

$$k_{yy} = C_{my} \left[1 + (\bar{\lambda} - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} \right]. \quad (15)$$

A k_{zy} értéke a szabvány szerint $0,6k_{yy}$, míg az ekvivalens konstans nyomatéki tényező értékét, a C_{my} -t a [5]-ös irodalom 5.18-as táblázatából lehet meghatározni, innen $C_{my}=0,6$.

A redukált karcsúság ($\bar{\lambda}$) az alábbi összefüggésekkel számítható

$$\lambda = \frac{\beta l}{i}, \quad i = \sqrt{\frac{I}{A_o}}, \quad \lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}}, \quad \bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1} \sqrt{\beta_A}, \quad (16)$$

ahol λ az oszlop karcsúsága, β a rúd megfogásától függő tényező, l a rúd hálózati hossza, i az inerciasugár, I a keresztmetszet másodrendű nyomatéka, E az acél rugalmassági modulusza, $\beta_A = 1$, ha a keresztmetszet 1., 2., vagy 3. osztályú (esetünkben ez áll fenn). A biztonsági tényező $\gamma_{MI}=1$, a kiforduláshoz tartozó csökkentő tényező $\chi_{LT}=1$.

2.3 A célfüggvény megfogalmazása

Célfüggvénynek a csőkeresztmetszetű hengeres oszlop tömegét (m) választottuk, amit az 1. ábra jelöléseinek felhasználásával a következőképpen fogalmazhatunk meg

$$m = h \rho_{ac} \frac{\left[(x_1 + 2x_2)^2 - x_1^2 \right] \pi}{4}, \quad (17)$$

ahol ρ_{ac} az acél sűrűsége. Az összefüggésben két ismeretlen, a cső belső átmérője (x_1) és falvastagsága (x_2) szerepel.

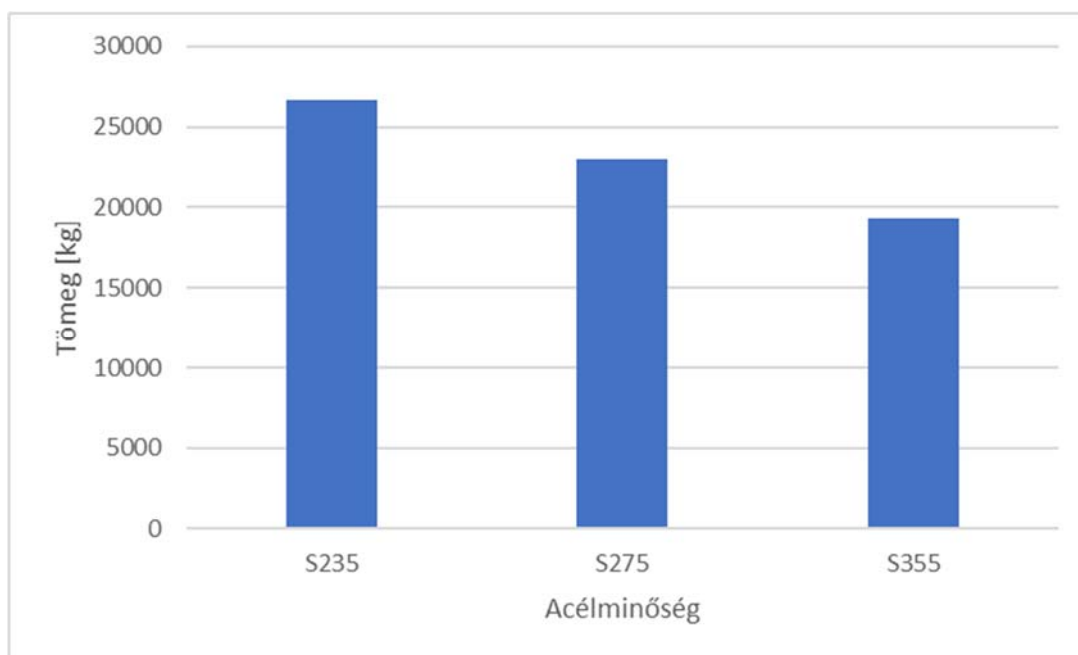
2.4 Az optimalizációs feladat megoldása

Az oszlop optimális méretezéséhez a következő adatokat vettük figyelembe: $D_k = 24$ m; $\rho_l = 1,2045$ kg/m³ 20 °C-on; $v_l = 25$ m/s; $\eta = 30$ %; $h = 36$ m; $q_p(z) = 1,154$ kN/m²; $c = 1$; $c_y = 0,225$; $\delta = 0,05$; $G_g = 30120$ N; $\sigma_F = 235; 275; 355$ MPa; $n = 2$; $\chi_{LT} = 1$; $\beta_A = 1$; $\beta = 2$; $E = 210$ GPa; $\rho_{ac} = 7800$ kg/m³.

A megfogalmazott optimalizációs problémát genetikus algoritlussal oldottuk meg [6]. Az 1. táblázatban a csőoszlop optimális belső átmérője, falvastagsága, valamint a tömegminimumok láthatók különböző acélminőségek esetén. A 2. ábra az oszloptömeg változását szemlélteti az acélminőség függvényében.

1. táblázat: Az optimalizálás eredményei

Acélminőség	S235		S275		S355	
Szélesség [m/s]	8	25	8	25	8	25
Belső átmérő [mm]	881, 7	1346 ,0	785, 1	1212 ,4	615, 2	972, 3
Falvastagság [mm]	14,2	22,0	13,6	21,0	13,9	21,9
Külső átmérő [mm]	910, 1	1390 ,0	812, 3	1254 ,4	643, 0	1016 ,1
Megengedett feszültség [MPa]	117, 5	117, 5	137, 5	137, 5	177, 5	177, 5
Ébredő feszültség [MPa]	117, 5	117, 5	137, 5	137, 5	177, 5	177, 5
Tömeg [kg]	1128 0,2	2670 4,8	962 9,3	2296 0,0	775 0,0	1935 6,9



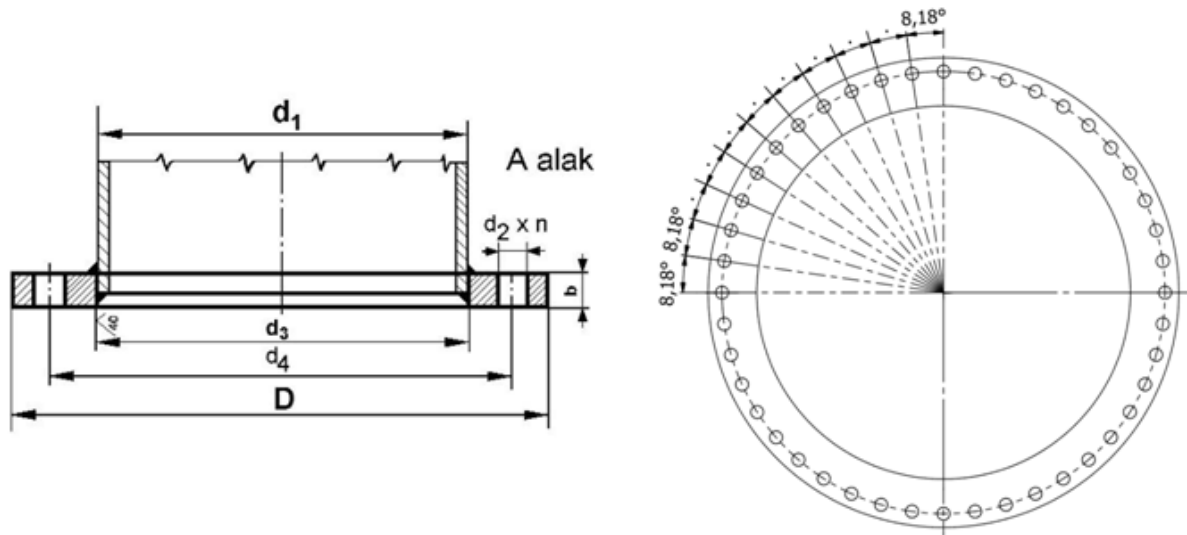
2. ábra

Az oszloptömeg változása az acélminőség függvényében 25 m/s esetén

2.5 Az oszlop alapozáshoz való rögzítése

A szélkerék alapja betonból készül, melyben csavarok vannak elhelyezve. Az oszlop alját egy karima rögzíti az alapozáshoz. A kapcsolatot csavarkötések biztosítják a betonalap és az oszlop között. A méretezési és ellenőrzési módokat átfogóan ismerteti az [5]-ös irodalom.

Az oszlop alsó részére egy lapos karimát kell hegeszteni, melynek a méreteit az interneten megtalálható katalógus alapján választottuk ki [7]. A karimán lévő furatok jellemző mérete és jelölése, valamint elrendezése a 3. ábrán látható.



3. ábra

A karima furatainak jellemző mérete és jelölése, valamint elrendezése [8]

A választott karima méreteit a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat: *A választott karima méretei [7]*

D	b	n	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄
[mm]	[mm]	[db]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1511	69,9	44	1254,4	41	1254,4	1422

A karima kialakításából következik, hogy 44 darab csavar közvetíti a fellépő nyomatékokat és erőhatásokat. A csavarok minőségi osztályából következtetni lehet a folyáshatárakra, illetve a biztonsági tényező ismeretében meghatározható a csavarok magkeresztmetszetében megengedett legnagyobb feszültség értéke is.

A biztonsági tényező értékét $n = 1,5$ -nek véve a megengedett feszültség az alábbi módon számítható:

$$\sigma_{meg,cs} = \frac{\sigma_F}{n} = \frac{900 \text{ MPa}}{1,5} = 600 \text{ MPa} . \quad (18)$$

A furatok karimán való elrendezéséből megállapítható, hogy mely csavarok mekkora nyomatékot vesznek fel.

A csavarok által még károsodás nélkül maximálisan felvehető nyomaték az alábbi módon számítható:

$$\begin{aligned} M_h = & \sigma_{meg,cs} \cdot A_{cs} \cdot \left(\frac{k}{2} + 2 \cdot \frac{k}{2} \cdot \cos(8,18^\circ) + 2 \cdot \frac{k}{2} \cdot \cos(16,36^\circ) + \right. \\ & + 2 \cdot \frac{k}{2} \cdot \cos(24,54^\circ) + 2 \cdot \frac{k}{2} \cdot \cos(32,72^\circ) + 2 \cdot \frac{k}{2} \cdot \cos(40,90^\circ) + \\ & + 2 \cdot \frac{k}{2} \cdot \cos(49,08^\circ) + 2 \cdot \frac{k}{2} \cdot \cos(57,26^\circ) + 2 \cdot \frac{k}{2} \cdot \cos(65,44^\circ) + \\ & \left. + 2 \cdot \frac{k}{2} \cdot \cos(73,62^\circ) + 2 \cdot \frac{k}{2} \cdot \cos(81,8^\circ) \right) . \quad (19) \end{aligned}$$

Az egyenlet egyszerűsítése és átrendezése után számíthatóvá válik a csavarok minimálisan szükséges keresztmetszete:

$$A_{min} = \frac{M_h}{\sigma_{meg,cs} \cdot k \cdot 6,99} = \frac{3238200000 \text{ Nmm}}{600 \text{ MPa} \cdot 711 \text{ mm} \cdot 6,99} = 1085,9 \text{ mm}^2 . \quad (20)$$

Fatbar 39 típusú lehorgonyzó csavart választottunk [9], amelynek névleges átmérője 39 mm. A csavar keresztmetszetének nagysága $A_{cs} = 1195 \text{ mm}^2$.

$A_{cs} > A_{min}$, tehát a 10.9-es minőségű csavarok megfelelnek a szerkezet rögzítéséhez.

3 Összefoglalás

Kidolgoztuk egy 50 kW teljesítményű szélkerék csőszelvényű tartóoszlopjának optimális méretezését az EUROCODE 3 acélszerkezeti szabvány előírásainak figyelembevételével. Célfüggvénynek a konstrukció tömegét választottuk. A korlátozási feltételekben a nyomásból és hajlításból származó feszültségek mellett figyelembe vettük a két igénybevétel kölcsönhatását is. Különböző acélminőségek esetén meghatároztuk az oszlop tömegének minimumát, valamint optimális belső átmérőjét és falvastagságát. Kiszámítottuk az oszlopot a beton alaphoz rögzítő csavarok szükséges keresztmetszetét.

irodalom

- [1] www.stahlbaustudium.de/druck9.pdf (2018.08.09).
- [2] Heteyi Cs.: Szélkerék energetikai helyzete. Hadmérnök. 12(2017), No. 3, p.: 265-278.
- [3] Építmények teherhordó szerkezetei elemeinek erőtani tervezése. MSZ 15021/1-86.
- [4] Alternatív energia. Szélmotorok, szélgenerátorok. (Szerk.: Tóth László, Horváth Gábor). Szaktudás Kiadó Ház. Budapest, 2003.
- [5] Ádány S., Dulácska E., Dunai L., et. al: Acélszerkezetek. Tervezés az Eurocode alapján. Artifex Kiadó Kft, Budapest, 2016.
- [6] Geike, T., Parchem, R.: Genetic algorithms for optimization of bolted joints. Konstruktion, No. 1/2, pp.: 48-52. 2003.
- [7] http://www.garthindustrial.com/pdf/FLANGE_SPECS.pdf (2019.11.10.).
- [8] http://www.szerelveny-dp.hu/lapos_karima.html (2019. 10. 12.).
- [9] <https://www.peikko.hu/termek/termek/fatbar-utofeszített-tocsavar/> (2019.11.02.).