Primljen: 06.05.2020.
Prihvaćen: 13.05.2020.

Stručni rad

https://doi.org/10.47960/2232-9080.2020.19.10.74

e-Zbornik 19/2020.

Elektronički zbornik radova
Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Mostaru

ISSN 2232-9080

Primjer konstrukcije vjetroagregata

Marija Jelčić, mag. ing. aedif.
Mladen Kožul
Sveučilište u Mostaru, Građevinski fakultet, prof. dr. sc.
mladen.kozul@gf.sum.ba

Sažetak: Cilj ovog rada je izrada projekta konstrukcije temelja i stupa vjetroagregata. Modeliranje konstrukcije izvršeno je u računalnom programu Tower 7. Svi konstruktivni elementi su proračunati prema važećim propisima Eurocode-a i Nacionalnim dodacima. Konstrukcija se sastoji od čeličnog stupa proračunatog u segmentima te armiranobetonskog temelja izvedenog monolitnom izvedbom. Stup vjetroagregata je čelični cjevasti, dok je temelj armirano betonski, kružnog oblika.

Ključne riječi: konstrukcija, opterećenje, statički proračun, plan oplate

An example of wind turbine structure

Abstract: The purpose of this paper is to develop structural design of a wind turbine foundation and tower. The structural modeling was performed in program Tower 7. All structural elements are calculated according to the applicable regulations of Eurocode and National Annexes. The structure consists of a steel tower calculated in segments and a reinforced concrete foundation made in a monolithic design. The wind turbine tower is a steel tubular tower, while the foundation is made of reinforced concrete in a circular shape.

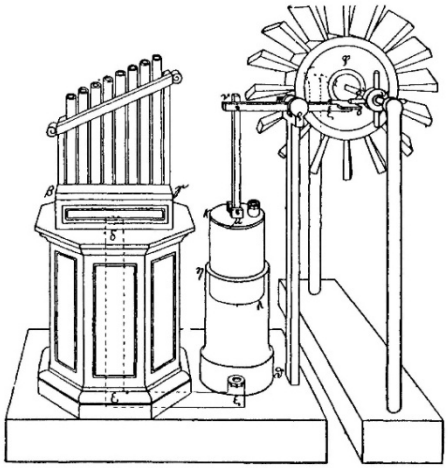
Keywords: structure, load, structural calculation, formwork plan

1. UVOD

U današnje vrijeme, kada se sve više razvija svijest o potrebi očuvanja okoliša i smanjenju konvencionalnih načina proizvodnje energije, pojavio se velik interes stručnjaka za mogućnost uporabe alternativnih izvora energije kao što su vjetar, sunce, biodizel i sl. Zalihe fosilnih goriva nestaju sve brže, klimatske promjene sve su izraženije, a primjena energije dobivene iz obnovljivih izvora sve potrebnija, pa tako veliko olakšanje i rasterećenje, između ostalih, predstavlja i vjetroenergija.

U ovom radu pažnja je posvećena načinu konstrukcije temelja i stupa vjetroagregata. Najjednostavnijom definicijom vjetroelektrana se može protumačiti kao skup blisko smještenih vjetroagregata, najčešće istog tipa, izloženih vjetru jednakih karakteristika te priključenih na elektroenergetski sustav. Vjetroagregati su rotirajući strojevi koji kinetičku energiju vjetra pretvaraju u mehaničku, a zatim preko električnih generatora u električnu energiju.

Primjena energije vjetra seže u daleku povijest kada su ljudi daleka putovanja prevaljivali brodovima na jedra, čija je uspješnost ovisila upravo o obnovljivom izvoru energije - vjetru. Od tih davnih vremena pa sve do danas, neka od morskih prijevoznih sredstava i dalje plove na potpuno isti način, koristeći isti izvor energije. Najraniji poznati slučaj korištenja vjetroenergije datira iz 1. stoljeća, kada se Heronova vjetrenjača koristila za pokretanje orgulja (Slika 1.).



Slika 1. Heronova vjetrenjača

Pretpostavlja se da su se prve vjetrenjače za praktičnu primjenu pojavile još u 7. stoljeću na području između Afganistana i Irana (Slika 2.), a odlikovali su ih vertikalni položaj osi vrtnje i pravokutne lopatice s jedrima. Upotrebljavale su se za mljevenje žita i pumpanje vode. Danas razvoj vjetroelektrana i vjetro-industrija rastu enormnim tempom. Dimenzije su se uvećale otprilike za dva puta, a snage agregata zasigurno za deset puta (Slika 3.).
U Europi je trenutno na raspolaganju kapacitet od otprilike 134.6 GW energije vjetra, od kojih 94% otpadaju na vjetroagregate na kopnu, a preostalih 6% na vjetroagregate na moru. Zemlje Europske Unije teže k cilju osiguranja 20% energije iz obnovljivih izvora već do ove godine. Da bi postigle spomenuti cilj, svaka država donijela je i donosi nacionalne zakone i pravilnike koji se odnose na ovaj predmet.

Energetska pitanja, osobito ona o obnovljivim izvorima energije, postala su vrlo važna ne samo zbog lošega ekološkog stanja, nego i zbog potreba za energijom koje stalno rastu. Tako se, na primjer, u Nizozemskoj energija vjetra koristi se već stoljećima kako bi se isušile

močvare, rezala drvena građa i eksploatirala nafta (Slika 4.).

Slika 2. Mlin na vjetar, 7. stoljeće

Slika 3. Napredak izgradnje vjetroelektrana kroz desetljeća

Slika 4. Pogled na priobalnu vjetroelektranu u Nizozemskoj

2. NEKE TEHNIČKE I RAČUNSKE KARAKTERISTIKE VJETROAGREGATA

Nadmorska visina vjetroagregata je oko 1500.0 metara. On se sastoji od čeličnoga stupa, pogonskoga dijela – elise i gondole, te temelja. Stup vjetroagregata je čelična cijev visine 78 metara. Širina stupa varira, od 4240 milimetara na spoju s temeljem, do 2302 milimetara na dodiru s pogonskim dijelom vjetroagregata. Debljine stijenki stupa iznose od 24 milimetara (27 mm) na dnu stupa pa do 15 milimetara (18,20 mm) na vrhu.

Stup se sastoji od međusobno zavarenih segmenata koji tvore tri elementa, koji se međusobno spajaju prirubnicama i vijcima. Spojevi su od visokovrijednih vijaka (VV) klase čvrstoće 10.9 raspoređenih na način: 120 M39 na temelju uz gornji i donji temeljni prsten te 142 M42 i 98 M42 na prirubnicama. Vijci na prirubnicama su prednapeti silom F_p=710 kN. Kvaliteta čelika plašta stupa jest S355 K2+N i S355 J2+N.

Konstrukcija stupa vjetroagregata proračunata je za dvije grupe opterećenja. Najprije su uzeta u obzir ekstremna opterećenja koja nastaju pri radu agregata ('Extreme loads'). Horizontalne sile na spoju stupa i temelja koje pri tome nastaju iznose respektivno -755,8 kN (veća) i -21,4 kN (manja), dok je maksimalna vertikalna sila 2486 kN. Maksimalni je torzijski moment 926 kNm, dok su momenti savijanja koji se prenose sa stupa na temelj 56404,9 kNm, odnosno 2157,9 kNm.

Druga grupa opterećenja, čije je djelovanje razmotreno, jest grupa opterećenja od djelovanja vjetra. Relevantno je opterećenje vjetrom dobiveno na osnovi lokacije vjetroagregata prema karti brzina vjetra (10-minutna na 10m visine za 50-godišnji povratni period) uz HRN EN 1991-1-4:2012+NAD., na samoj granici Republike Bosne i Hercegovine s Republikom Hrvatskom. Za ovu zonu osnovna poredbena brzina $v_{b,0}$ iznosi 30 m/s, što daje pritisak $q_{b,0}$ od 0,56 kN/m^2, i uz koeficijent izloženosti (c_e) od 4 za I. kategoriju zemljišta daje brzinu od 60 m/s.

U proračunu je dobiven vlastiti period konstrukcije T=3,28 sec iz kojega je proizašao dinamički koeficijent, kojim je osnovno opterećenje povećano za 50% (rotor i gondola uzeti su kao koncentrirana masa na vrhu stupa u iznosu od 1175 kN, masa rotora je 44 tone, a masa gondole 72,5 tona).

U proračunu je korištena ulazna vrijednost brzine vjetra od 60 m/s, koja je potom korigirana trima vrijednostima koji se odnose na dinamička svojstva, oblik i veličinu oplošja stupa. Iznos dobiven proračunom na opterećenje vjetrom u razini spoja temelja i vjetroagregata jest 66583 kNm (ova je veličina nešto manja od momenta prevrtanja koji iznosi oko 70 tisuća kNm). Stoga je izvršen proračun s brzinom od 60 m/s kao izvanrednim opterećenjem, te s 40 m/s u stalnoj kombinaciji i pripadajućim koeficijentima. Brzina od 40 m/s je odabrana kao referentna maksimalna desetominutna srednja brzina vjetra.

3. OPTEREĆENJA I KOMBINACIJE

Uobičajeno je verificirati sigurnost konstrukcije na granično stanje nosivosti, granično stanje uporabljivosti i granično izvanredno stanje.

Konstrukcija je opterećena sljedećim slučajevima opterećenja:

1. Stalno
2. Led
3. Vjetar 40 m/s
4. Vjetar 60 m/s
5. Potres u x-smjeru
6. Potres u y-smjeru

Potres je proračunat u oba smjera samo radi dokaza korektnosti proračuna, jer je očekivano za simetričnu konstrukciju i sustav s jednim stupnjem slobode isti iznos u oba

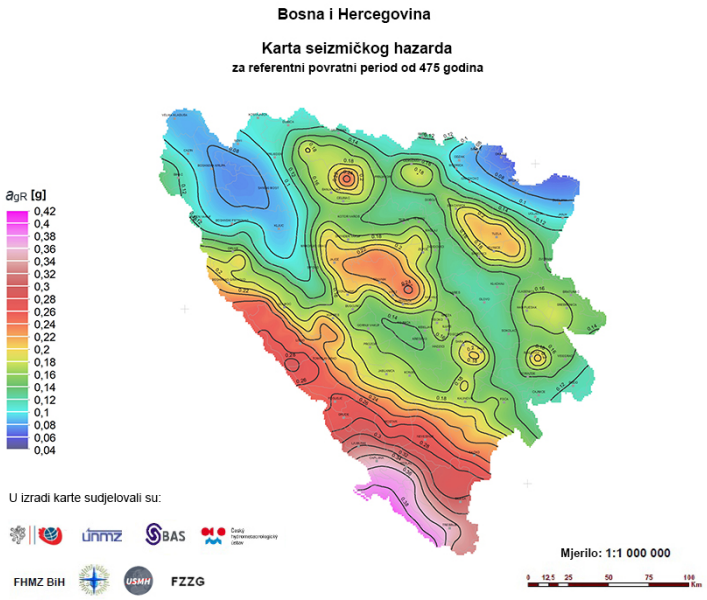
smjera.

Uzete su sljedeće kombinacije opterećenja:

1. 1,35*Stalno +1,5*led
2. 1,35*Stalno + 1,5*vjetar 40m/s
3. 1,0*Stalno + 1,0*vjetar 60m/s
4. 1,0*Stalno + 1,0*led + 1,0*potres (x)
5. 1,0*Stalno + 1,0*led + 1,0*potres (y)

Opterećenje ledom je uzeto u iznosu od 15% vlastite težine konstrukcije, na vrhu kao 15% koncentriranog tereta od gondole i lopatica (0.15×1175kN = 176 kN), a uzduž stupa kao linijsko u iznosu od 3 kN/m (15% od približno 20 kN/m mase stupa).

Nadalje, građevina je proračunata i na djelovanje potresnoga gibanja tla, prema HRN EN 1998-1:2011, pri čemu je uzeto projektno ubrzanje podloge a_g/g od 0.30 (prema karti uz HRN EN 1998-1:2011/NA:2011), minimalna vrijednost faktora ponašanja q od 1.5 te B kategorija tla s pripadnim vrijednostima. Tip spektra 1 je upotrjebljen, jer se očekuju potresi površinske valne magnitude više od 5,5 po Richteru. Usvojen je faktor važnosti $\gamma = 1.0$.



Slika 5. Karta seizmičkog rizika

Temelj je armiranobetonski kružni, promjera 18 m, visine 2.0 m, s kružnim uzvišenjem od 50 cm u sredini promjera 560 cm. Mjerodavno opterećenje za dimenzioniranje temelja jest opterećenje vjetroagregata trenutnom brzinom vjetra.

Temeljno tlo je vapnenačka stijena čija minimalna nosivost nadmašuje 1000 kN/m^2 . Temelj je projektiran od betona klase C30/37 (osim vršnog dijela C35/45) i armira se križno u obje zone rebrastom armaturom B500B, s podložnim betonom klase C20/25 debljine 10 cm. Zaštitni sloj betona iznosi 5 cm.

4. ANALIZA OPTEREĆENJA

4.1 Podaci o osnovnim djelovanjima

Osnovna djelovanja na koja se dokazuje mehanička otpornost i stabilnost građevine

podijeljena su prema sljedećem:
- stalno djelovanje (G) - vlastita težina konstrukcije
  - dodatno stalno djelovanje
- promjenjivo djelovanje (Q)
- izvanredno djelovanje (E)

4.1.1 Vertikalna opterećenja

Vlastita težina konstrukcije

Vlastita težina nosivih elemenata konstrukcije određuje se na osnovu dimenzija elemenata te specifičnih težina materijala od kojih su elementi izrađeni. Specifična težina čelika iznosi 78,50 kN/m3 i generira se kompjuterskim proračunom. U programskom paketu TOWER 7 vlastita težina je automatski uključena.

Težina opreme i antena

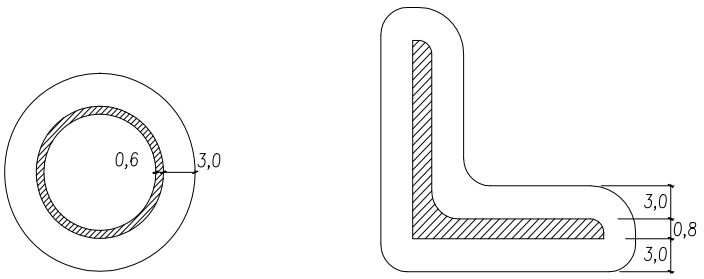
Zamjenska težina za opremu (gondolu) i rotore na vrhu stupa uzima se u iznosu od 1191 kN (rotor 471 kN, a gondola 720 kN).

Težina leda

Prema DIN-u 4131, uzeto je zaleđivanje konstrukcije u debljini 3 cm, a specifična težina leda uzeta je γ_L = 8,0 kN/m^3.

Iz odnosa debljine leda i pripadne stjenke čeličnog profila te odnosa njihovih specifičnih težina, može se uzeti da je pripadna težina leda približno jednaka ½ težine čelične konstrukcije, tj.:

$$g_{leda} \approx \alpha \times g_{čelika} \approx 0.5\, g_{čelika} \quad \text{gdje je} \quad \alpha \approx \frac{\alpha_\phi + \alpha_L}{2} \approx \frac{0.4+0.6}{2} \approx 0.5$$



$$\alpha_\varphi \approx \frac{d_L \times \gamma_L}{d_c \times \gamma_c} \approx \frac{3.0 \times 8.0}{2.35 \times 78.5} \approx 0.15 \quad \alpha_L \approx \frac{d_L \times \gamma_L}{d_c \times \gamma_c} \approx \frac{2 \times 3.0 \times 0.7}{0.8 \times 7.85} \approx 0.6$$

4.1.2 Horizontalna opterećenja

Opterećenje vjetrom

Uspoređuje se djelovanje vjetra prema hrvatskim i njemačkim propisima, te se daljnja analiza djelovanja vjetra provodi prema DIN-u 4131:

$$w = f_B \times c_f \times w_0 \times A$$

Dinamički faktor f_B , prema DIN-u 4131, uzet je za djelovanje vjetra na konstrukciju s f_B = 1.5 za T = 3.28 s, što je dobiveno modalnom analizom konstrukcije stupa programskim paketom TOWER 7.

$$\eta = 1.05 - h/1000 = 1.05 - 75.9/1000 = 0.9741 \rightarrow \text{uzeto } \eta = 0.98$$
$$f_B^0 = 1 + (0.042\,T - 0.0019\,T^2) \times \delta^{-0.63} = 1.499 \quad \text{gdje je} \quad \delta = 0.1$$
$$f_B = h \times f_B^0 = 0.98 \times 1.499 = 1.469 \rightarrow \text{uzeto } f_B = 1.5$$

Osnovno opterećenje vjetrom

Pretpostavljeno je osnovno opterećenje vjetrom uzrokovano brzinom vjetra od v_{max}= 60 m/s, što je nešto više od maksimalne očekivane trenutne brzina vjetra prema podacima. Brzina se odnosi na povratno razdoblje od 50 godina (vjetroagregati klase IIA), za prosjek od 3 sekunde, a iznosi 59.5 m/s. Inače objekt se nalazi u neposrednoj blizini vjetrovne zone sa $v_{b,o}$ od 30 m/s (na samoj granici s Republikom Hrvatskom) prema HRN EN 1991-1-4:2011+NAD NA:2011, što je 0.56 kN/m^2, i što pomnoženo koeficijentom izloženosti c_e=4 (I. kat. terena, visina 80 m) daje 2.24 kN/m^2, gotovo identično vrijednosti tlaka za pretpostavljenu brzinu od 60 m/s.

$$w_o = \frac{v_{max}^2}{1600} = 2.25 \left[\text{kN/m}^2\right]$$

Za proračun je uzeta vrijednost od w_0= 2.3 kN/m^2. Promatra se djelovanje vjetra na nezaleđenu konstrukciju i na zaleđenu konstrukciju uz reducirano opterećenje vjetra koeficijentom 0.75. Opterećenje vjetrom na konstrukciju određuje se izrazom:

$$w = f_d \times c_f \times w_0 \times A \quad \text{gdje je } c_f = \psi \times c_{f0}$$

f_d – dinamički faktor (1.5)
w_0 – osnovno pripadno opterećenje vjetrom (2,3 kN/m^2)
A – pripadna vjetru izložena ploha
c_{f0} – osnovni koeficijent oblika (1.2)
c_f – korigirani koeficijent oblika
ψ – faktor smanjenja ovisan o vitkosti i ispunjenosti (0.75)

Opterećenje od vjetra po visini stupa

Određivanje faktora λ za visine iznad 50 m:

$$\lambda = 0.7 \times \frac{h}{b} = 0.7 \times \frac{75.9}{3.52} = 15.1$$

Segment III, gornji dio stupa

75.9 m > h_3 > 46.5 m; l_3 = 29.4 m; b_3 = 2.76 m) (b^*_3 = 2.82 m)

Pripadno osnovno opterećenje vjetrom, w_0 = 2.3 kN/m^2

	Izložene površine – nezaleđene	Izložene površine – zaleđene
Stup tornja	29.4×2.76 = 81.1 m^2	29.4×2.82 = 82.9 m^2
Elise gondola	(48.5+24.2)×1,00 = 72.7 m^2	(48.5+24.2)×1.06 = 77.1 m^2
	14.0×3.50 = 49.0 m^2	14.0×3.56 = 49.8 m^2
	A_o = 202.8 m²	A_o* = 209.8 m²

Elise + gondola A_0 = 121.7 m^2
Elise + gondola A_0 = 126.9 m^2

<u>KONCENTRIRANA SILA NA VRHU STUPA:</u>
H = 1.5 × 1.2 × 121.7 × 2.3 = 503.8 kN
H = 1.5 × 1.2 × 126.9 × 0.75 × 2.3 = 394.0 kN

Stup tornja, φ =1

λ = 15.1
Ψ = 0.75 c_{f0} = 1.2
c_f = Ψ × c_{f0} = 0.75 × 1.20 = 0.90
w_3 = 1.5 × 0.90 × 81.1 × 2.3 / 29.4
w_3= 8.56 kN/m
usvojeno ... w_3 = 8.6 kN/m'

λ=15.1
Ψ = 0.75 c_{f0} = 1.2
c_f = Ψ × c_{f0} = 0.75 × 1.20 = 0.90
w_3* = 1.5 × 0.90 × 82.9 × (0.75 × 2.3) / 29.4
w_3* = 6.67 kN/m
usvojeno … w_3^* = 6.6 kN/m'

Segment II, srednji dio stupa

46.5 m > h_2 > 19.0 m; l_2 = 27.5 m; b_2 = 3.73 m) (b^*_2 = 3.79 m)

Pripadno osnovno opterećenje vjetrom, w_0 = 2.3 kN/m^2

	Izložene površine – nezaleđene	Izložene površine – zaleđene
Stup tornja	27.5×3.73 = 102.6 m^2	27.5×3.79 = 104.2 m^2
	A_o = 95.5 m²	A_o* = 97.2 m²

Stup tornja, φ =1

λ = 15.1
Ψ = 0.75 c_{f0} = 1.2
c_f = Ψ × c_{f0} = 0.75 × 1.20 = 0.90
w_2 = 1.5 × 0.90 × 102.6 × 2.3 / 27.5
w_2= 11.58 kN/m
usvojeno ... w_2 = 11.6 kN/m'

λ=15.1
Ψ = 0.75 c_{f0} = 1.2
c_f = Ψ × c_{f0} = 0.75 × 1.20 = 0.90
w_2* = 1.5 × 0.90 × 104.2 × (0.75 × 2.3) / 27.5
w_2* = 8.82 kN/m
usvojeno … w_2^* = 8.8 kN/m'

Segment I, donji dio stupa

0 m < h_1 < 19.0 m; l_1 = 19.0 m; b_1 = 4.28 m) (b^*_1 = 4.36 m)

Pripadno osnovno opterećenje vjetrom, w_0 = 2.3 kN/m^2

	Izložene površine – nezaleđene	Izložene površine – zaleđene
Stup tornja	19.0×4.28 = 81.3 m^2	19.0×4.36 = 104.2 m^2
	A_o = 81.3 m²	A_o* = 82.8 m²

Stup tornja, φ =1

λ = 15.1
Ψ = 0.75 c_{f0} = 1.2
c_f = Ψ × c_{f0} = 0.75 × 1.20 = 0.90
w_2 = 1.5 × 0.90 × 81.3 × 2.3 / 19.0
w_2= 13.28 kN/m
usvojeno ... w_1 = 13.3 kN/m'

λ=15.1
Ψ = 0.75 c_{f0} = 1.2
c_f = Ψ × c_{f0} = 0.75 × 1.20 = 0.90
w_2* = 1.5 × 0.90 × 82.8 × (0.75 × 2.3) / 19.0
w_2* = 10.15 kN/m
usvojeno … w_1^* = 10.2 kN/m'

4.2 Kombinacije opterećenja

4.2.1 Osnovna opterećenja

Opterećenje 1. Stalno opterećenje = vlastita težina + rotor + gondola
Opterećenje 2. Opterećenje ledom
Opterećenje 3. Opterećenje vjetrom od 40 m/s
Opterećenje 4. Opterećenje vjetrom od 60 m/s
Opterećenje 5. Seizmičko djelovanje – smjer x
Opterećenje 6. Seizmičko djelovanje – smjer y

Kombinacije opterećenja

Kombinacija 1. Stalno opterećenje + led (1.35; 1.5)
Kombinacija 2. Stalno opterećenje + vjetar 40 [m/s] (1.35; 1.5)
Kombinacija 3. Stalno opterećenje + vjetar 60 [m/s] (1.0; 1.0)
Kombinacija 4. Stalno opterećenje + seizmičko djelovanje (x) + led (1.0; 1.0; 1.0)
Kombinacija 5. Stalno opterećenje + seizmičko djelovanje (y) + led (1.0; 1.0; 1.0)
Opterećenje ledom se uzima u iznosu od 15% stalnog opterećenja.
Za brzinu vjetra od 40 m/s osnovno djelovanje iznosi:

$$w_o = \frac{v_{max}^2}{1600} = 1{,}0\,[\mathrm{kN/m^2}]$$ tako da djelovanja za segmente stupa jesu:

w_3 = 1.0/2.3 × 8.6 = 3.8 kN/m^2
w_2 = 1.0/2.3 × 11.6 = 5.0 kN/m^2
w_1 = 1.0/2.3 × 13.3 = 5.8 kN/m^2

5. STATIČKI PRORAČUN

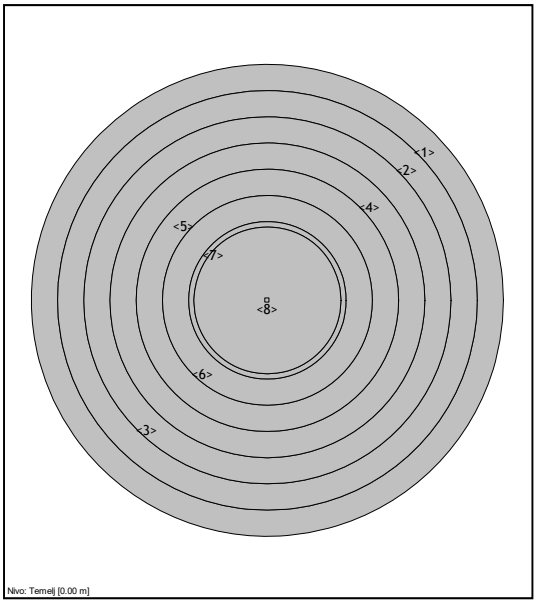
Prikazani su neki od rezultata proračuna temelja i stupa vjetroagregata.

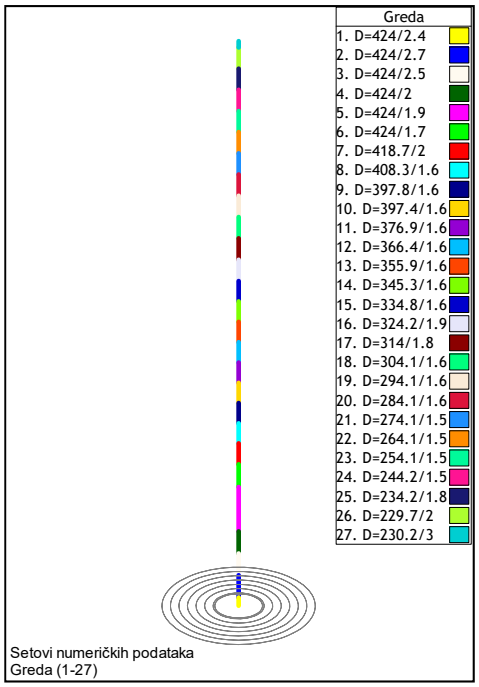
Tablica materijala

No	Naziv materijala	E[kN/m^2]	μ	γ[kN/m^3]	αt[1/C]	Em[kN/m^2]	μm
1	Beton MB 40	3.400e+7	0.20	25.00	1.000e-5	3.400e+7	0.20
2	Beton MB 45	3.500e+7	0.20	25.00	1.000e-5	3.500e+7	0.20
3	Čelik	2.100e+8	0.30	78.50	1.000e-5	2.100e+8	0.30

Setovi ploča

No	d[m]	e[m]	Materijal	Tip proračuna	Ortotropija	E2[kN/m^2]	G[kN/m^2]	α
<1>	0.620	0.310	1	Debela ploča	Izotropna			
<2>	0.860	0.550	1	Debela ploča	Izotropna			
<3>	1.100	0.790	1	Debela ploča	Izotropna			
<4>	1.350	1.040	1	Debela ploča	Izotropna			
<5>	1.590	1.280	1	Debela ploča	Izotropna			
<6>	1.830	1.520	1	Debela ploča	Izotropna			
<7>	1.980	1.670	1	Debela ploča	Izotropna			
<8>	2.500	2.190	2	Debela ploča	Izotropna			





Lista slučajeva opterećenja

LC	Naziv
1	Stalno (g)
2	Led
3	Vjetar 40 m/s
4	Vjetar 60 m/s
5	Sx
6	Sy
7	SRSS: V+VI
8	Komb.: 1.35xI+1.5xII
9	Komb.: 1.35xI+1.5xIII
10	Komb.: I+IV
11	Komb.: I+II+VI
12	Komb.: I+II+V

Točkasta opterećenja

No	LC	X [m]	Y [m]	Z [m]	Px [kN]	Py [kN]	Pz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
1	1	9.0000	9.0000	75.910			-1175.0			
2	2	9.0000	9.0000	75.910			-177.00			
3	3	9.0000	9.0000	75.910	219.00					
4	4	9.0000	9.0000	75.910	503.80					

Faktori opterećenja za proračun masa

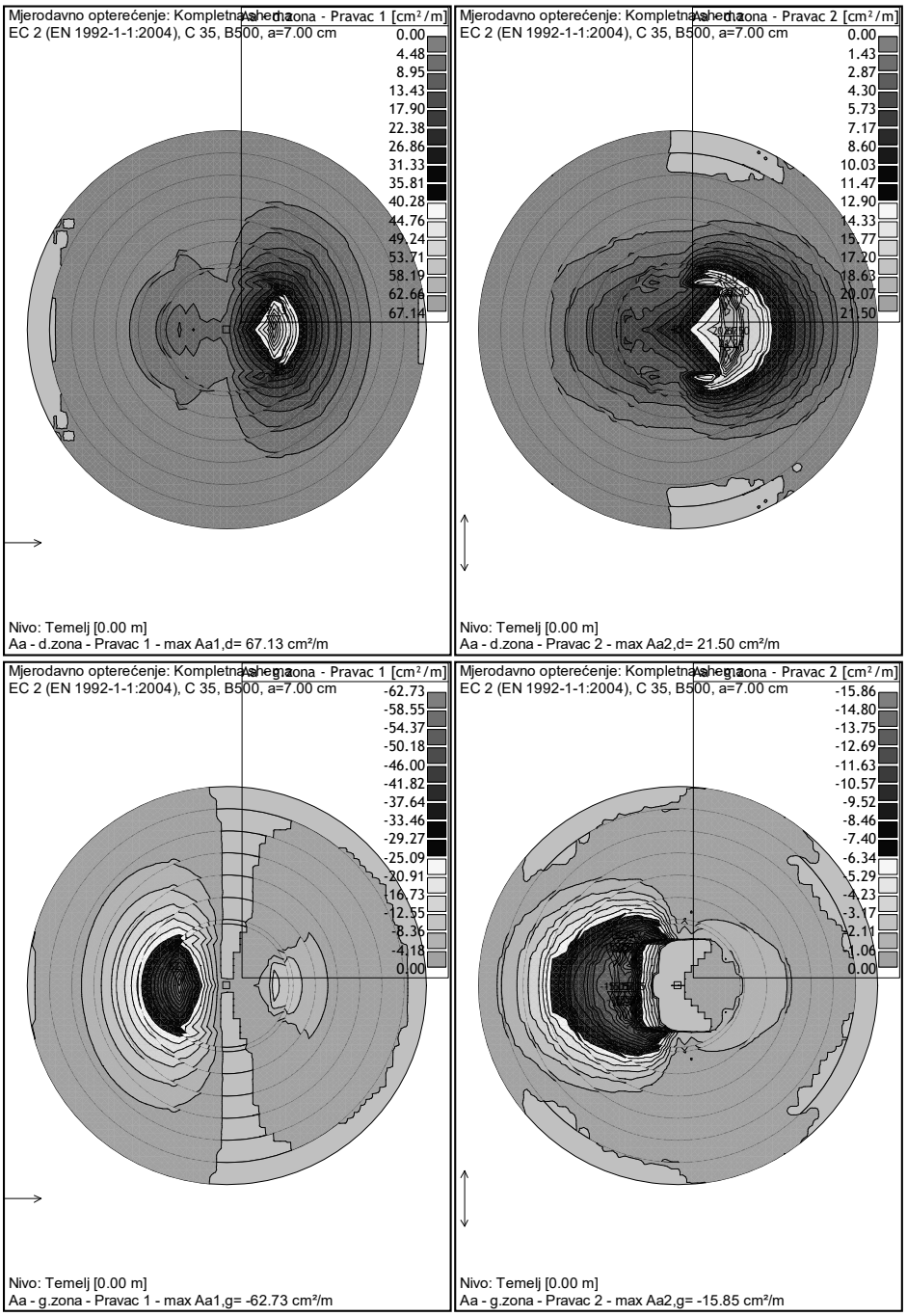
No	Naziv	Koeficijent
1	Stalno (g)	1.00
2	Led	1.00
3	Vjetar 40 m/s	0.00
4	Vjetar 60 m/s	0.00

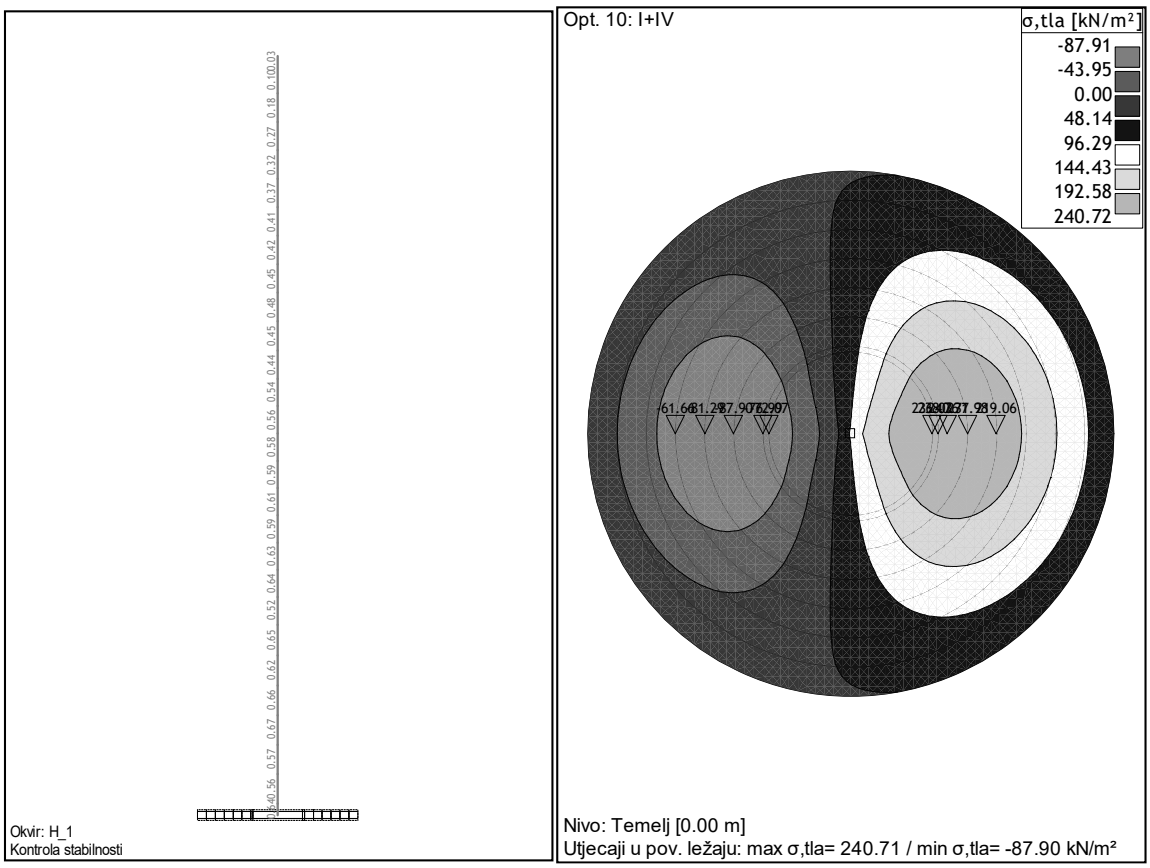
Periodi osciliranja konstrukcije

No	T [s]	f [Hz]
1	3.3231	0.3009
2	3.3231	0.3009
3	0.3980	2.5128
4	0.3980	2.5128
5	0.1381	7.2402
6	0.1381	7.2402
7	0.0700	14.2946
8	0.0700	14.2946
9	0.0430	23.2645
10	0.0430	23.2645
11	0.0297	33.6649
12	0.0297	33.6649
13	0.0268	37.2446
14	0.0268	37.2446
15	0.0263	37.9925

Jelčić, M., Kožul, M.

Primjer konstrukcije vjetroagregata





6. ZAKLJUČAK

Ovdje je izvršen preliminarni statički proračun konstrukcije (temelja i stupa) vjetroagregata. Na raspolaganju su bile karakteristike tla, podaci o opterećenju vjetrom, kao i seizmička zona u kojoj se konstrukcija nalazi. Odabir tipa konstrukcije za vjetroelektrane složena je zadaća. Na odluku utječu ekonomski i ekološki čimbenici, vrsta konstrukcije, te oblik i veličina vjetroagregata. Za ovaj objekt izabran je sustav obrnutog njihala. Stoga je cilj ovoga rada bio izvršiti proračun navedenog konstruktivnog sustava te provjeriti zadovoljava li uvjete nosivosti i stabilnosti.

Proračun je proveden prema kapacitetu nosivosti na prostornom modelu, u računalnom programu Tower 7. Taj model, rijetko kada će biti vjerna slika stvarnog ponašanja konstrukcije. To su uvijek samo više ili manje grube aproksimacije ili pojednostavljene stvarnosti.

Statički proračun proveden je na svim nosivim konstruktivnim elementima i na temelju dobivenih rezultata možemo zaključiti kako konstruktivni sustav zadovoljava propisane kriterije nosivosti i stabilnosti konstrukcije. U analizi dobivenih utjecaja, nije bilo odstupanja od, pravilnikom, dopuštenih vrijednosti. Sukladno tome, moguće je pretpostaviti da će se u stvarnosti, predmetni objekt dobro ponašati.

LITERATURA

1. Eurocode 0, Basis of structural design, CEN European Committee for Standardization, Brussels, EN 1990: 2002.

2. EN 1991: Eurokod 1 – Djelovanja na konstrukcije (EN 1991:2002).
3. Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, European Committee for Standardization, CEN, Brussels, EN 1998-1: 2004.
4. N. Čupin – Nova energetika – energetika u službi gospodarstva, Zagreb, 2013.
5. M. Čaušević – Dinamika konstrukcija – diskretni sustavi, Zagreb, 2005.
6. Građevinar 57 (2005) 6.
7. A. Štefulj – Završni rad – Vjetroelektrane, Rijeka, 2015.
8. Građevinar 70 (2018) 12.
9. Građevinar 69 (2017) 1.
10. Obnovljiva energija - https://hr.wikipedia.org/wiki/Obnovljiva_energija#Energija_vjetra.
11. D. Županić – Diplomski rad, Zagreb, 2015.
12. International Standard – IEC 61400-1; Wind turbines – part 1: Design requirements