

MOGUĆNOSTI PRIMJENE ARMIRANOBETONSKIH STUPOVA VJETROELEKTRANA

Tomislav Kišiček

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, docent

Josip Galić

Sveučilište u Zagrebu, Arhitektonski fakultet, docent

Davor Kulić

Kulić-Invest d.o.o., Vinkovci, dipl.ing.građ.

Sažetak: U posljednje vrijeme sve više se govori o obnovljivim izvorima energije. Jedan od takvih izvora je i vjetar, odnosno proizvodnja električne energije pomoću vjetroelektrana. Jedan od osnovnih dijelova vjetroelektrane je stup na kojem se nalazi generator s lopaticama. Najčešće se stupovi izvode od čelika, no postoje i oni od armiranog ili prednapetog betona. U ovom radu dana je usporedba primjene čeličnog i armiranobetonskog stupa za jednu konkretnu vjetroelektranu. Napravljen je statički proračun za četiri različita tipa armiranobetonskog stupa (razlikuju se po veličini poprečnih presjeka), te je odabran najpovoljniji. Za taj stup je napravljena procjena troškova izgradnje i dana je usporedba s čeličnim stupom. Može se zaključiti da je, u ovom slučaju, armiranobetonski stup opravdano rješenje.

Ključne riječi: armirani beton; čelik; stup; vjetroelektrana; proračun

POSSIBILITIES OF APPLICATION OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS FOR WIND POWER PLANTS

Abstract: Recently, the renewable energy sources have been an important topic in numerous discussions on energy issues. One of such sources is the wind, i.e. the production of electricity using wind power plants. One of the basic parts of a wind power plant is the column for generator with blades. Most often the steel columns are used, but also there are examples of columns made of reinforced or prestressed concrete. This paper compares the application of steel column and reinforced concrete column for a particular wind power plant. The static calculations of four different types of reinforced concrete columns (differing in cross-section size) were compared and the best type of concrete column is chosen. The construction costs for this type of column are estimated and compared to the cost of a steel column. It can be concluded that, in this case, a reinforced concrete pillar is a reasonable solution.

Key words: reinforced concrete; steel; pillar; wind power plant; calculation

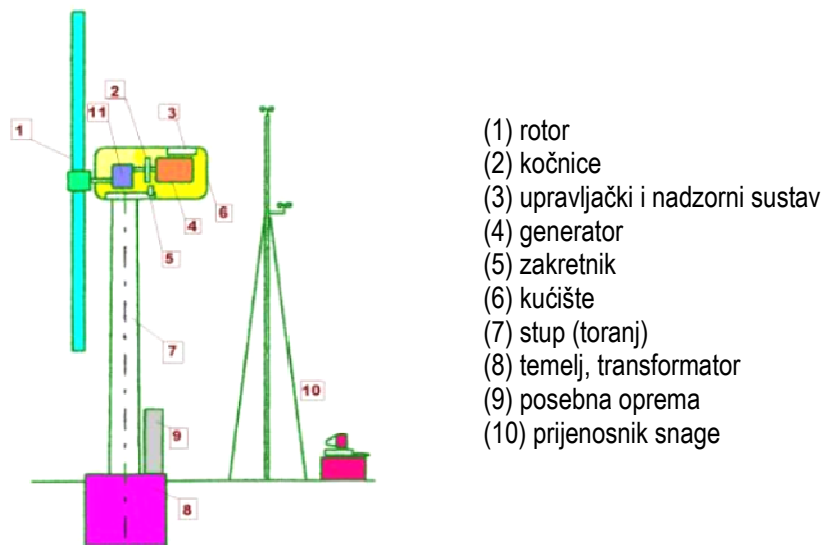
1 Uvod

U posljednje vrijeme sve više se govori o obnovljivim izvorima energije. Jedan od takvih izvora je i vjetar, odnosno proizvodnja električne energije pomoću vjetroelektrana. Za dobivanje električne energije vjetar se počeo koristiti četrdesetih godina prošlog stoljeća. Kasnije je razvoj drugih elektroenergetskih sustava u potpunosti istisnuo primjenu vjetra. No, sedamdesetih godina prošlog stoljeća, zanimanje za korištenje vjetra i njegovo istraživanje ponovno se naglo povećava.

Jedan od osnovnih dijelova vjetroelektrane je stup na kojemu se nalazi generator s lopaticama. Stupovi se najčešće izvode od čelika, no postoje i oni od armiranog ili prednapetog betona. U ovom radu dana je usporedba primjene čeličnog i armiranobetonskog stupa za jednu konkretnu vjetroelektranu. Napravljen je statički proračun za četiri različita tipa armiranobetonskog stupa (razlikuju se po veličini poprečnih presjeka), te je odabran najpovoljniji. Za taj stup je napravljena procjena troškova izgradnje i dana je usporedba s čeličnim stupom.

2 Vrste i dijelovi vjetroelektrana

Ovisno o konstrukcijskim i radnim značajkama, vjetroelektrane se dijele na: vjetroelektrane s vodoravnom osi i vjetroelektrane s vertikalnom osi; brzohodne i sporohodne; višelopatične, s nekoliko lopatica i s jednom lopaticom itd. Najveće i općeprihvaćene vrste vjetroelektrana koje se koriste za proizvodnju električne energije su one s vodoravnim vratilom, brzohodne, s dvije do četiri lopatice. Osnovni dijelovi vjetroelektrane prikazani su na slici 1.

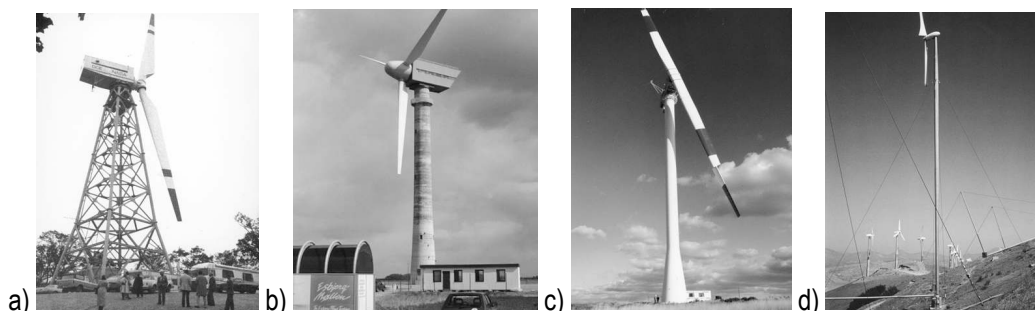


Slika 1 - Osnovni dijelovi vjetroelektrane

3 Stupovi vjetroelektrana

Stupovi nose kućište i rotor te su najteži i najveći dio vjetroelektrane. Visina stupa je od 1 do 1,8 puta veća od promjera rotora i stup može težiti nekoliko stotina tona. Cijena stupa iznosi od 15 do 25 % ukupne cijene vjetroelektrane. Stup može biti prednost i mana cjelokupne konstrukcije i zato se mora dobro pripaziti kod odabira vrste stupa i njegovog projektiranja. Stupovi za velike vjetroelektrane mogu biti (slika 2): rešetkasti (najjednostavnija metoda izgradnje visokih i krutih tornjeva), armiranobetonski ili prednapeti (za stupove visine preko 80 m), samostojeći čelični cijevni (najčešće korišteni tip stupa), pridržani čelični cijevni (nisu ekonomski isplativi), stupovi koji su kombinacija armiranog betona i čelika. Danas su najčešće korišteni tipovi stupova samostojeće rešetke, betonski ili čelični cijevni stupovi. S povećanjem visine stupa, transport, izvođenje i sastavljanje komponenata vjetroelektrane postaje sve skuplje i kompliciranije. S druge strane, s povećavanjem

visine povećava se i prinos specifične energije rotora. Optimalna visina stupa dobije se iz funkcije koštanja konstrukcije i prinosa energije, ali se ne može generalno odrediti za sve tipove stupova.



Slika 2 - Tipične vrste stupova vjetroelektrana: a) rešetkasti, b) armiranobetonski ili prednapeti, c) samostojeći čelični cijevni d) pridržani čelični cijevni [1]

Kod velikih turbina, cijena konstrukcije s povećanjem visine raste puno brže nego kod malih. Još je značajan i izbor lokacije o kojoj ovisi specifična energija vjetra.

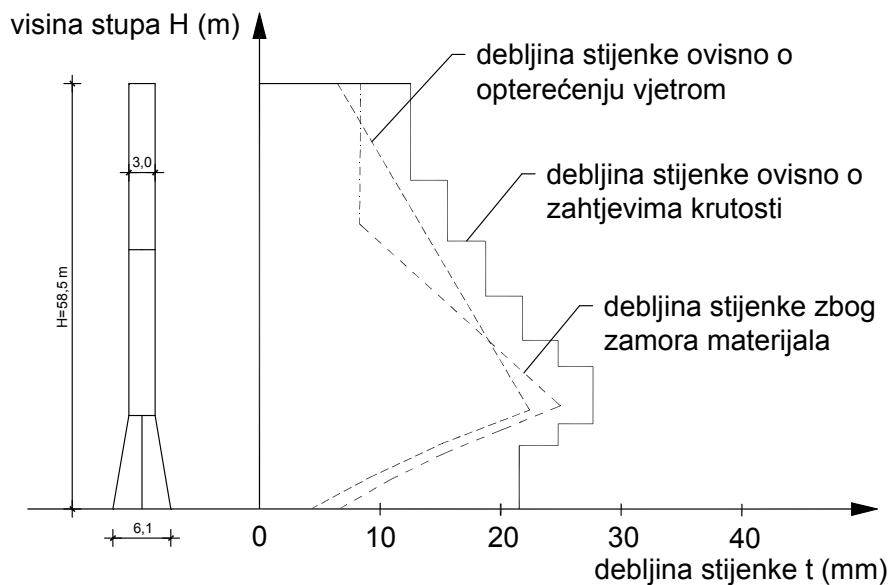
Kod projektiranja stupova, važna je i njihova krutost. Dinamika stupova određena je proračunom prve vlastite frekvencije [4] i njezinom usporedbom sa spektrom 1 P (frekvencija prolaza jedne elise). Točno ostvarivanje prve vlastite frekvencije je vrlo važan zadatak, jer ona određuje količinu potrebnog materijala, a samim time i cijenu.

Transport i način podizanja stupa postaje sve veći problem kod velikih vjetroelektrana. Visine stupova premašuju 100 m, a težine kućišta na vrhu su po nekoliko stotina tona, što zahtijeva stupove baznog promjera većeg od 5 m, pa cestovni prijevoz elemenata stupova više nije moguć. Optimalna cijena vjetroelektrane se može postići jedino točnim uklapanjem konstrukcije stupa u ostatak konstrukcije. Iako se stup vjetroelektrane, promatran odvojeno, može promatrati kao uobičajena konstrukcija, njegovo projektiranje zahtijeva poprilično poznavanje ostalih dijelova vjetroelektrane. Osim u funkcionalnom pogledu, stup, više nego kućište, određuje krajnji izgled vjetroelektrane, pa se mora pripaziti i na estetiku stupa.

3.1 Samostojeći čelični cijevni stup

Danas su samostojeći čelični cijevni stupovi daleko najkorištenije konstrukcije za komercijalne vjetroelektrane. Glavni je razlog kratko vrijeme sastavljanja i podizanja stupa na licu mjesta. Mali stupovi, visine do 20 m, mogu se u tvornici proizvesti u komadu i postaviti u gotovi temelj na gradilištu. Viši stupovi, do 100 m visine, proizvode se u dijelovima koji se spajaju na gradilištu. Učestali odabir čeličnih cijevnih stupova uzrokovan je i vrlo niskom cijenom čelika u posljednjih 20 godina.

Kod dimenzioniranja stupa u obzir treba uzeti statičko opterećenje (težina generatora i stupa), dinamičko opterećenje (aerodinamičkom navalom vjetra na rotor), utjecaj zamora materijala za 20 do 30 godina rada vjetroelektrane, dodatna opterećenja uzrokovana vibracijama u slučaju rezonancije te krutost s obzirom na vibracije. Problem nosivosti stupa svodi se na nosivost na savijanje na dnu stupa. Važan kriterij, osobito kod tankostijenih čeličnih stupova s malom vlastitom savijajućom frekvencijom (manjom od 1 P), jest otpornost na lokalno izbočivanje stijenki koja kod optimiziranja težine stupa postaje glavni čimbenik. Na primjeru stupa sa slike 3 vide se posljedice spomenutih opterećenja s obzirom na zahtijevanu debljinu stijenke. Potrebna debljina stijenke određena je iz zahtjeva krutosti. Krutost stupa okarakterizirana je s nekoliko vlastitih frekvencija, ali praktički samo prva i druga vlastita savijajuća frekvencija i prva vlastita torzijska imaju utjecaja. U slučaju standardnih dimenzija samostojećih cijevnih čeličnih stupova, prva torzijska frekvencija je oko tri puta veća od prve savijajuće. Kod projektiranja stupa s poznatom visinom i težinom kućišta, treba se rukovoditi prvom vlastitom savijajućom frekvencijom stupa. „Krući“ stupovi su uvijek jednostavnije i sigurnije rješenje, s obzirom na ponašanje pri vibracijama, ali se time povećava ukupna težina stupa. Kod stupova visine preko 80 m, kruti stup više nije ostvariv u praksi. Zbog ekonomskih razloga, krutost treba održavati na, tehnički izvedivoj, najnižoj razini.



Slika 3 - Odabir debljine stijenke čeličnog stupa [1]

Gotovo svi stupovi velikih vjetroelektrana današnjice konusnog su oblika, s promjerom koji se smanjuje od baze prema vrhu. U usporedbi s cilindričnim oblicima, ovime se ostvaruje zahtijevana krutost uz smanjenje težine. Stupovi se sastoje od niza predgotovljenih segmenata dužine do 30 m, debljine stijenke od 10 do 50 mm. Ploče širine 2 m zaobljuju se strojno u kružni oblik te se, tako kružno oblikovane, zavarivanjem spajaju u segmente (slika 4). Kvaliteta zavara se provjerava uobičajenim metodama (npr. ultrazvučno, rendgenom ili kontrolom površinskih pukotina). Primjenjuje se uobičajeni čelik S355 i rjeđe S275. Materijali veće čvrstoće koriste se za kovane spojne prirubnice i dijelove temelja. Na kraju svakog segmenta unutarnja prirubnica se zavaruje. Oblikovanje i zavarivanje prirubnica zahtijeva iskustvo i pozornost zbog točnog međusobnog nalijeganja elemenata. Stup je s temeljem spojen tzv. „*temeljnim segmentom*“ koji se proizvodi posebno i ugrađuje u temelj dok je beton svjež. Obrada površine stupova je vrlo važna radi zaštite od korozije. Nakon pjeskarenja ili sačmarenja površinu treba zaštititi termičkim nanošenjem sloja cinka. Premazivanje se sastoji od dva ili tri različita premaza boje. Proizvodnja čeličnih cijevnih stupova promjera do 4 m je uobičajena i ne zahtijeva nikakvu posebnu opremu.



Slika 4 - Proizvodnja i detalj spoja segmenta čeličnog stupa [1]

Kod visina preko 90 m, promjer baze stupa prelazi 4,5 m i zahtijeva debljinu preko 40 mm. Za oblikovanje takvih ploča potrebni su strojevi kojih nema u uobičajenim čeličanicama, a zbog velikog promjera početni segmenti se ne mogu prevoziti cestovnim putovima.

3.2 Betonski stupovi

Beton dopušta izradu vrlo visokih stupova bez problema prijevoza pa se zbog zahtjeva za sve višim stupovima sve više vraća u primjenu. Problem dugog perioda građenja može se izbjeći korištenjem predgotovljenih elemenata stupova. Stupovi mogu biti monolitni ili predgotovljeni. Može se koristiti samo nenapeta armatura ili se konstrukcija može i prednapeti (za stupove s velikim dinamičkim opterećenjem). Svaki od ovih načina ima svoje prednosti i mane. Odabir ovisi o mjestu izgradnje, te tako nije bitna jedino lokacija i pristupačnost, nego i dostupnost tehničke infrastrukture i trajanje izgradnje koje također utječe na ukupnu cijenu stupa.

Nosivost stupa određuje se opterećenjem dobivenim pri djelovanju najveće brzine vjeta na rotor. Postupak proračuna je isti kao kod ostalih stupova vjetroelektrana. Unos dinamičkih opterećenja u konstrukciju stupa ovisi o karakteristikama rotora i generatora, stupa i temelja, te o njihovim interakcijama. Unutar turbine postoje mnoge varijable pod kontrolom proizvođača koje utječu na konstrukciju. Općenito, nije ih moguće sve uzeti u obzir zbog kompleksnosti proračuna, ali zato za njih postoje reprezentativne vrijednosti koje se uzimaju u obzir kod većine opterećenja. Postoji dosta mogućnosti za podešavanje dinamičkih svojstava tijekom proračuna, ali i puštanja u pogon. Ova mogućnost betonskih stupova omogućuje smanjenje rizika nepovoljnog ponašanja konstrukcije zbog dinamičkih djelovanja. Osigurava i to da betonska rješenja konstrukcije stupa mogu biti projektirana tako da se izbjegne preklapanje sa spektrom djelovanja 1 P i da budu prilagođena posebnim zahtjevima gradilišta.

Kod monolitnih konstrukcija od armiranog betona, beton se može izrađivati na licu mjesta ili dovoziti na gradilište. Svježi beton se ulijeva u oplatu u kojoj je već postavljena armatura. Oplata može biti u odsječcima ili klizna. S obzirom da donji odsječak mora otvrdnuti da bi se prešlo na sljedeći, vrijeme izgradnje traje dugo. Stvrdnjavanje betona ovisi i o temperaturi, pa bez obzira na aditive, nije moguće raditi pri izrazito niskim temperaturama. Monolitno se mogu izvoditi i prednapeti stupovi. Kako bi se izbjeglo dugo vrijeme izgradnje, mogu se koristiti konstrukcije stupova od predgotovljenih elemenata. Njihova prednost je u mogućnosti izvedbe vrlo visokih stupova bez problema u prijevozu, što je slučaj kod čeličnih cijevnih stupova. Kod stupova srednjih visina najčešće se koriste centrifugalno lijevani betonski stupovi. Dijelovi stupa, dužine do 35 m i težine do 50 tona, proizvode se na specijalnim rotirajućim strojevima. Učinkom centrifugalnih sila tijekom rotiranja dobiva se vrlo zbijena betonska masa koja je jako prikladna za apsorpciju dinamičkih opterećenja.

Druga vrsta predgotovljenih betonskih stupova bazira se na segmentnoj proizvodnji u tvornici (slika 5).



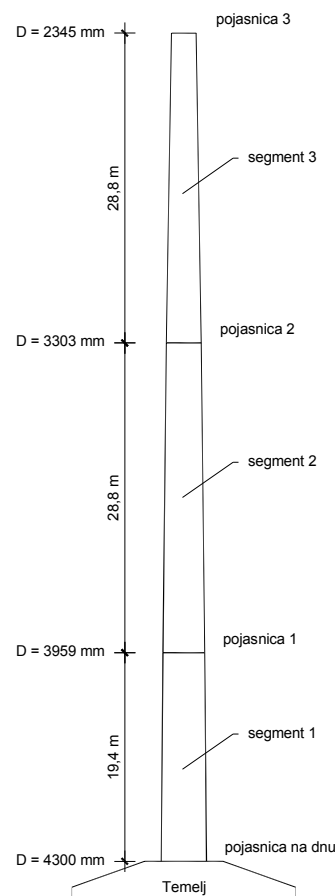
Slika 5 - Proizvodnja segmenata betonskih stupova [1]

Segmenti od otprilike 3,8 m dužine proizvode se klasičnom metodom u oplati. Pojedinačni segmenti se prevoze na lokaciju i spajaju jedan na drugi. Pojedinačni segmenti se prednapinju tijekom izvedbe. Ova vrsta predgotovljenih betonskih stupova prikladna je i za stupove visine 100 m i više.

4 Usporedba cijevnog čeličnog i armiranobetonskog stupa

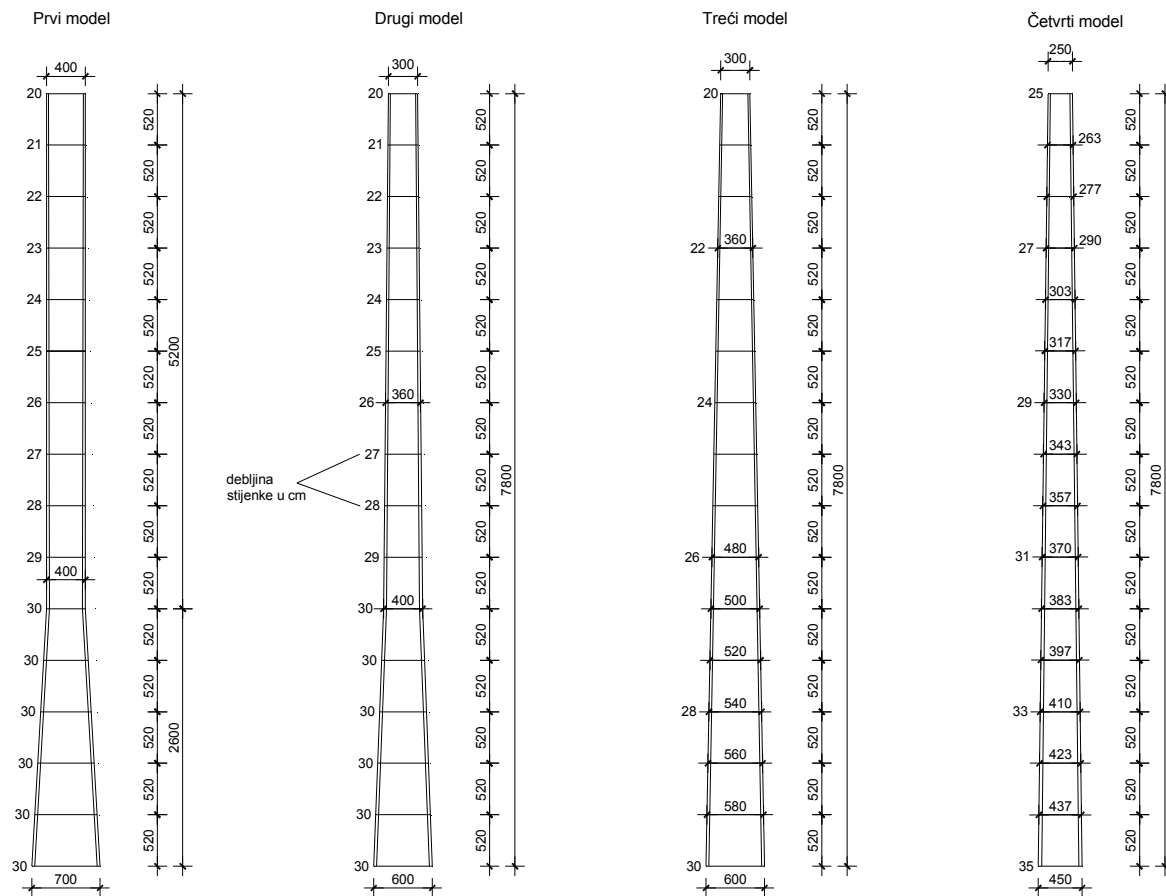
U sklopu ovog rada napravljena je usporedba cijevnog čeličnog stupa s armiranobetonskim stupom za jedan tip vjetroelektrane. Čelični stup vjetroelektrane visine je 77,0 m i služi kao nosiva konstrukcija vjetroagregata ACCIONA AW-77/1500 ili AW82/1500. Podijeljen je na 3 segmenta koji se međusobno povezuju prednapetim vijcima na gradilištu. Svaki segment je konusnog oblika te postepeno promjenjive debljine stijenke, a osim toga i svaki segment završava L pojasnicom. Stijenke stupa izrađene su od čelika S355J2+N, a pojasnice od čelika S355NL+Z25. Geometrija stupa prikazana je u tablici na slici 6. Za usporedbu su proračunana [2, 3] četiri modela armiranobetonskog stupa različitih dimenzija, od kojih je odabran najpovoljniji i uspoređen s prethodno spomenutim čeličnim stupom.

		Visina	duljina	debljina stijenke	Polumjer (srednji)	
		h	Δl	t	r	
SEGMENT 1 (51,5t)	Pojasnica na dnu	0			-	
		80	80	-	-	
	stijenka		80		26	2137
			4869	4789	26	2095
			4869		24	2095
			9662	4793	24	2054
			9662		22	2054
			14459	4797	22	2012
			14459		20	2012
			19279	4820	20	1970
	Pojasnica 1a	19279		-	-	
		19369	90	-	-	
SEGMENT 2 (50,7t)	Pojasnica 1b	19369		-	-	
		19459	90	-	-	
	stijenka		19459		20	1970
			31375	11916	20	1834
			31375		18	1834
			43308	11933	18	1699
			43308		16	1699
			48112	4804	16	1644
Pojasnica 2a	48112		-	-		
	48202	90	-	-		
SEGMENT 3 (28,6t)	Pojasnica 2b	48202		-	-	
		48292	90	-	-	
	stijenka		48292		16	1644
			50665	2373	16	1603
			50665		14	1603
			62476	11811	14	1406
			62476		12	1406
			74370	11894	12	1208
			74370		14	1208
			76759	2389	14	1166
	76759		16-18	1166		
Pojasnica 3	76849		-	-		
	76989	140	-	-		



Slika 6 - Dimenzije čeličnog stupa za usporedbu

Geometrija tih modela prikazana je na slici 7. Modeli se mogu podijeliti u dvije grupe po dva modela. Kako je dominantno opterećenje vjetar, odabran je kružni poprečni presjek stupa. U prvu grupu spadaju prvi i drugi model. Oba su oblikovana zadebljanjem u donjoj trećini visine. Prvi model je u ostatku visine konstantnog vanjskog promjera od 4,0 m, dok se drugi blago sužava s visinom, tj. s početnih 4,0 m na dnu, na 3,0 m na vrhu. Debljina stijenke se kod oba modela jednako mijenja. Donja trećina stupa je 30 cm debljine, dok se u ostatku konstrukcije linearno smanjuje s 30 cm na 20 cm. U drugu grupu spadaju treći i četvrti model. Njihov promjer se konstantno smanjuje s povećanjem visine. Kod trećeg modela početni promjer je 6,0 m, dok je na vrhu stupa 3,0 m, dok četvrti počinje s 4,5 m i završava s 2,5 m. Zbog značajno manjih dimenzija, kod četvrtog modela debljina stijenke se s 35 cm na dnu smanjuje na 25 cm na vrhu stupa, dok se kod trećeg kreće od 30 cm i završava na 20 cm.

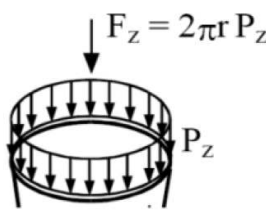


Slika 7 - Geometrija četiri modela armiranobetonskih stupova

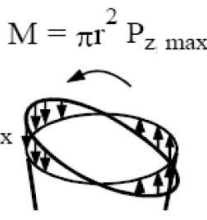
Svaki model armiranobetonskog stupa proračunava se na djelovanje stalnog opterećenja (vlastita težina + agregat vjetroelektrane), vjetra i potresnog opterećenja. Vlastita težina svakog stupa proračunava se računalnim programom za proračun i dimenzioniranje konstrukcija. Dodatno stalno opterećenje stupa čini postrojenje agregata s rotorom koje može biti zadano kao koncentrirano ili kao ekvivalentno linijsko opterećenje po obodu stupa, što je prikazano u tablici 1. Opterećenje vjetrom proračunava se u skladu s normom HRN ENV 1991-2-4 [5] za osnovnu vrijednost poredbene brzine vjetra $v_{ref,0} = 30$ m/s, dok se za seizmičko opterećenje (VIII seizmička zona) koristi norma HRN ENV 1998-3 [6]. Dimenzioniranje je napravljeno pomoću računalnog programa prema normi HRN ENV 1992-1-1 [7], a korišten je beton C30/37.

Tablica 1 - Opterećenje agregatom i rotorom na vrhu stupa vjetroelektrane

	Agregat	Rotor
Koncentrirano opterećenje		
F_z (kN)	681,75	178,60
e (m)	0,189	3,756
M_y (kNm)	128,85	670,83
Ekvivalentno linijsko po obodu		
r (m)	1,1655	1,1655
P_z (m)	93,10	24,39
$P_{z,max}$ (m)	30,19	157,19



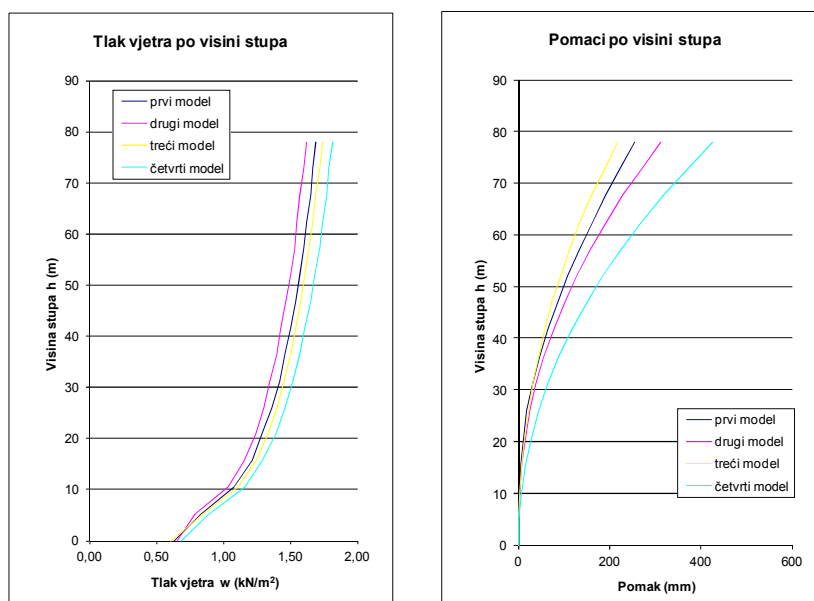
$F_z = 2\pi r P_z$



$M = \pi r^2 P_{z,max}$

Tlakovi vjetra na pojedini model armiranobetonskog stupa, kao i konačni pomaci tih stupova dani su na slici 8. Kao mjerodavna kombinacija opterećenja za dimenzioniranje stupova uzima se ona s povoljnim djelovanjem stalnog opterećenja i maksimalnim djelovanjem vjetra. Kombinacija sa seizmikom nije se pokazala kao

mjerodavna. Dobivena potrebna armatura po visini svakog stupa, potrebni volumen betona, te pomak vrha i kut zaokreta svakog stupa prikazani su u tablici 2.



Slika 8 - Tlak vjetra po visini te pomaci pojedinog modela stupa

Prvi model ima manji pomak od drugog modela, kako na vrhu tako i duž cijele konstrukcije, te također i manji kut otklona. Kao i u odnosu prvog i drugog modela, iz tablica utroška materijala vidi se veći utrošak kod trećeg modela u odnosu na četvrti model.

Tablica 2 - Potrebna armatura i volumen betona pojedinog modela stupa

H (m)	Prvi model		Drugi model		Treći model		Četvrti model	
	A_{s1} (cm ²)	$A_{s,w}$ (cm ²)	A_{s1} (cm ²)	$A_{s,w}$ (cm ²)	A_{s1} (cm ²)	$A_{s,w}$ (cm ²)	A_{s1} (cm ²)	$A_{s,w}$ (cm ²)
78	139,58	23,96	153,82	17,15	153,82	17,13	193,95	15,74
72,8	126,09	25,06	179,81	17,59	172,42	17,6	221,91	15,91
67,6	126,09	26,16	207,09	18,03	190,76	18,24	250,08	16,15
62,4	141,21	27,21	236,22	18,47	209,09	18,98	278,53	16,47
57,2	171,85	28,2	266,22	18,89	227,1	19,84	307,66	16,84
52	206,92	28,96	297,73	19,24	246,51	20,72	336,7	17,24
46,8	245,49	29,41	330,95	19,57	264,61	21,29	366,67	17,64
41,6	288,01	29,81	364,88	19,89	284,56	21,87	396,4	18,04
36,4	333,7	30,16	399,6	20,19	303,06	22,48	426,37	18,47
31,2	383,30	30,46	435,24	20,47	321,62	23,08	456,55	18,89
26	434,08	30,71	471,53	20,73	340	23,68	486,58	19,31
20,8	402,66	29,19	455,36	21,42	357,38	24,26	517,24	19,72
15,6	374,7	28,58	442,26	22,24	374,27	24,8	546,82	20,1
10,4	349,82	28,53	431,13	23,12	390,5	25,29	576,79	20,44
5,2	327,96	28,78	420,35	24,01	406,65	25,75	606,13	20,71
0	307,75	29,1	410,62	24,75	421,18	25,84	634,24	20,82
V (m ³)	280,44		249,13		266,28		239,12	
Kut na vrhu (°)	0,345		0,489		0,330		0,618	
Pomak na vrhu (mm)	254,29		311,97		218,46		426,63	

Iako grafikon djelovanja vjetra pokazuje veća djelovanja za četvrti model, mora se uzeti u obzir da je tlak prikazan po metru kvadratnom, pa s obzirom na to da je površina djelovanja vjetra kod trećeg modela veća, veći je i njegov utjecaj. Kao i u slučaju prve grupe modela, bolje ponašanje ostvaruje model većih dimenzija, tj. treći model. Iako su djelovanja na treći model većeg iznosa u odnosu na četvrti, on postiže veću stabilnost, a samim time i potrebu za manjom količinom armature. Također, ima i puno veću krutost, a samim time i manji pomak i kut otklona u odnosu na četvrti model. Četvrti model je ipak premalih dimenzija, pa iako se s njim ostvaruje ušteda betona, zahtijeva preveliku količinu armature, a i pomak vrha konstrukcije dostiže preveliku vrijednost. Prvi i treći model su vrlo različiti po svom obliku. Svaki od ova dva modela ima svoje prednosti, ali i mane. Prvi model zahtijeva nešto veći utrošak materijala, ali je možda jednostavniji za izvođenje zbog konstantnog vanjskog presjeka u gornje dvije trećine visine. Potrebna armatura kod prvog modela je dosta promjenjiva po presjecima, dok se kod trećeg modela kontinuirano smanjuje od temelja prema vrhu konstrukcije. Također je kod trećeg modela veća i ukupna količina potrebne armature. Kod modela prve skupine, pa tako i prvog modela, primjetno je i naglašeno povećanje potrebne armature u području prijelaza iz promjenjivog presjeka u konstantni, što može stvarati probleme u izvođenju i slaganju armature pri betoniranju. Što se pomaka tiče, tu prednost ima treći model jer ima značajno manji kut otklona i pomak vrha konstrukcije. Temeljem prethodnih razmatranja, za usporedbu s čeličnim stupom odabran je treći model armiranobetonskog stupa. U tablicama 3 i 4 dane su rekapitulacije cijene za armiranobetonski, odnosno čelični stup.

Tablica 3 - Potrebna količina materijala i ukupna cijena za armiranobetonski stup

Vrsta materijala	količina materijala	jedinična cijena materijala (Kn)	ukupna cijena (Kn)
beton s ugradnjom C30/37 (m ³)	266,28	1800	479304,00
armatura s obradom i ugradnjom B500B (kg)	33103,33	9,2	304550,64
oplata betona (m ²)	2182,9	95	207375,50
skela (m ²)	2182,9	23	50206,70
Ukupno (Kn):			1.041.436,84

Tablica 4 - Potrebna količina materijala i ukupna cijena za čelični stup





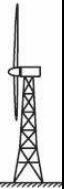



Materijal i obrada	cijena (Kn/kg)	ukupna cijena (Kn/kg)	količina čelika (kg)
čelik	5,3	15,3	130800
pocinčavanje	3,8		
zavavarivanje i savijanje	6,2		
Ukupno (Kn):			2.001.240,00

5 Zaključak

Prema tablicama 3 i 4, čelični stup je značajno skuplji od armiranobetonskog, naravno uz napomenu da to nije krajnja cijena cijele konstrukcije vjetroelektrane. Na nju utječe još mnogo čimbenika, kao što su udaljenost betonare, odnosno proizvodnog pogona od mjesta izgradnje, dostupnost mjesta izgradnje, tj. kakvo je stanje pristupnih prometnica te cijena materijala i prijevoza u vrijeme izgradnje. Također, ne smije se zanemariti da armiranobetonski stup ima puno veći volumen, a i težinu od čeličnog, zbog čega se znatno povećava i cijena temelja koja nije zanemariva. Isto tako ne smije se zanemariti i cijena demontaže stupa nakon isteka uporabnog vijeka vjetroelektrane. Za mjerodavnu ekonomsku analizu trebalo bi sve to uzeti u obzir, što bi zahtijevalo detaljnije proračune konstrukcije koji bi uključivali i zamor materijala te uključivanje stručnjaka iz područja tehnologije i organizacije građenja zbog detaljnijih procjena troškova.

Zbog svih tih utjecaja na konačnu cijenu, usporedbu primjenjivu na svim objektima jako je teško napraviti. Kao primjer, u tablici 5 prikazana je usporedba cijene vjetroelektrana s različitim tipom stupova [1].

Tablica 5 - Usporedba cijene vjetroelektrana s različitim tipom stupova [1]

Vjetroelektrana: - Rotor sa tri lopatice - Promjer rotora 60 m - Brzina rotora 23 o/min - Masa turbine 180 t - Ukupna visina 50 m - Visina stupa 46,6 m	Čelik					Beton		
								
	cilindrični	cilindrični s stožastim donjim dijelom	stožasti	cilindrični sa zategama	rešetkasti	predgotovljeni prednapeti	armirano-betonski	prednapeti
1. vlastita frekvencija (Hz)	0,567	0,577	0,570	0,551	0,6	0,65	0,941	0,947
Omjer frekvencije i brzine rotora	1,48	1,51	1,49	1,44	1,57	1,7	2,45	2,47
Promjer stupa gore (m)	3,5	3,5	3,5	2,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Promjer stupa dolje (m)	3,5	7,1	4,4	2,5	11,6	3,5	8,4	5,5
Debljina stijenke (mm)	55+15	25/15	30/15	20/15	16/10	520/250	300	300
Masa stupa (t)	150	120	111	40	110	465	485	477
Masa opreme (t)	22	22,5	22,8	20	22,5	21	22,5	22,5
Ukupna masa (t)	172	142,5	133,8	60+z	132,5	486	507,5	499,5
Približni omjer cijene (%)	100	90	85	95	70	60	75	75

Tom usporedbom dobivena je veća učinkovitost betona u odnosu na cijenu. To se posebno ističe pri korištenju predgotovljenih prednapetih stupova. Prema podacima iz [1], čelični cijevni stupovi mogu se proizvesti po specifičnoj cijeni od oko 1,5 \$ po kilogramu, dok se u slučaju betonskih cijena kreće oko 250-400 \$ po toni [1]. Iako je ukupna masa betonskih stupova 4 do 5 puta veća od čeličnih, razlike u cijeni nisu značajne zbog veće mase betonskog stupa. U ovoj analizi u obzir je uzeta cijela vjetroelektrana, za razliku od analize cijena iz ovoga rada u kojoj je promatran samo stup. Zbog toga je odnos razlika u cijeni između ove dvije analize drugačiji. Ako se usporede sve prednosti i mane betonskih i čeličnih stupova, prema podacima iz [1], a i u ovom rada, može se doći do zaključka da je u nekim slučajevima armiranobetonski stup opravdano rješenje.

Literatura

- [1] Hau, E.: Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics, 2nd edition, Springer – Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006.
- [2] Radić, J. i suradnici: Betonske konstrukcije: priručnik, Hrvatska sveučilišna naklada, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet., ANDRIS, Zagreb 2006.
- [3] Tomičić, I.: Betonske konstrukcije – odabrana poglavlja, drugo izmijenjeno izdanje, Ivan Tomičić, Zagreb 1996.
- [4] Čaušević, M., Dinamika konstrukcija, Školska knjiga, Zagreb 2005.
- [5] HRN ENV 1991-2-4 Eurokod 1: Osnove projektiranja i djelovanja na konstrukcije – 2-4. dio: Djelovanja na konstrukcije – Opterećenje vjetrom (ENV 1991-2-4: 1995)
- [6] HRN ENV 1998-3 Eurokod 8: Projektiranje konstrukcija otpornih na potres – 3. dio: Tornjevi, stupovi i dimnjaci (ENV 1998-3:1996)
- [7] HRN ENV 1992-1-1:2004. Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija – 1-1. dio: Opća pravila i pravila za zgrade (ENV 1992-1-1:1991)