

Primljen / Received: 25.11.2014.

Ispravljen / Corrected: 13.5.2015.

Prihvaćen / Accepted: 19.5.2015.

Dostupno online / Available online: 1.8.2015.

Analiza čeličnog rešetkastog jarbola izloženog djelovanju vjetra i leda

Autor:

Doc.dr.sc. **R. Tugrul Erdem**, dipl.ing. građ.

Sveučilište Celal Bayar, Turska

Fakultet tehničkih znanosti

Odjel za građevinarstvo

tugrul.erdem@cbu.edu.tr

Stručni rad

R. Tugrul Erdem

Analiza čeličnog rešetkastog jarbola izloženog djelovanju vjetra i leda

Čelični rešetkasti jarboli ubrajaju se među najučinkovitije nosive konstrukcije u području visokogradnje. U ovom radu prikazana je nelinearna analiza čeličnog rešetkastog jarbola, koji je izložen različitim debljinama leda na nadmorskoj visini od 1500 m. Analiza je provedena pomoću programa konačnih elemenata SAP 2000. Nakon što su određeni geometrijski model i svojstva presjeka, primijenjene su različite kombinacije opterećenja. Provedenim analizama dobiven je odnos brzine vjetra i debljine leda te je određena maksimalna brzina vjetra koju konstrukcija može podnijeti s obzirom na različite debljine leda.

Ključne riječi:

jarbol, nelinearna analiza, debljina leda, brzina vjetra, konačni elementi

Professional paper

R. Tugrul Erdem

Analysis of guyed steel lattice mast subjected to environmental loads

Steel lattice masts rank among the most efficient load-bearing structures in the field of high-rise construction. The non-linear analysis of a guyed steel lattice mast is conducted using the SAP 2000 finite-element program for different ice thickness values at 1500 m of altitude. After definition of the geometrical model and cross-section properties, various load combinations are analysed. Finally, the wind speed - ice thickness relationship is obtained, and the maximum wind speed that the structure can withstand is determined for varying ice thicknesses.

Key words:

mast, non-linear analysis, ice thickness, wind speed, finite elements

Fachbericht

R. Tugrul Erdem

Analyse abgespannter Stahlfachwerktürme unter Umgebungseinwirkungen

Stahlfachwerktürme zählen bei außerordentlich hohen Konstruktionen zu den effizientesten Tragwerken. In dieser Arbeit ist die nichtlineare Analyse eines abgespannten Stahlfachwerksturmes für verschiedene Werte der Eisstärke auf einer Höhenlage von 1500 m mittels finiter Elemente im Programm SAP 2000 durchgeführt. Der Festlegung von Geometrie und Querschnittseigenschaften des Modells folgend sind verschiedene Lastkombinationen aufgebracht. Letztlich ist ein Verhältnis von Windgeschwindigkeiten und Eisstärken aufgestellt und die entsprechenden maximalen Windgeschwindigkeiten, die das Tragwerk nicht gefährden, sind bestimmt.

Schlüsselwörter:

Fachwerkurm, nichtlineare Analyse, Eisstärke, Windgeschwindigkeit, finite Elemente

1. Uvod

Rešetkasti toranj općenit je naziv za različite vrste čeličnih jarbola, a odnosi se na samostojeći prostorni rešetkasti toranj. Može služiti kao dalekovod, osobito za napone veće od 100 kilovolti, kao radijski toranj (odašiljač ili nosač za antene) ili kao kontrolni toranj. Veliki i teški presjeci okvira nisu potrebni kod takvih konstrukcija, stoga su oni lakši od ostalih vrsta, a moduli se mogu jednostavno povezati [1, 2].

Čelični rešetkasti jarboli koriste se već duže vrijeme u područjima gdje su značajna opterećenja vjetrom i snijegom, a sve uslijed povećanih potreba moderne industrije (komunikacije i energija) [3-7]. Postoje različite vrste jarbola za izgradnju manjih vjetroagregata: slobodnostojeći, rešetkasti pridržani zategama i kosi. Slobodnostojeći jarboli postavljaju se bez zatega.

Kod rešetkastih jarbola sa zategama, zatege učvršćuju jarbol te ga drže uspravno, a pri tome je potrebna vrlo mala količina betona. Protežu se iz triju točaka pri vrhu jarbola do tla, na određenoj udaljenosti od temelja jarbola. Ti su jarboli relativno lagani za razliku od slobodnostojećih tornjeva, stoga su najjeftinija opcija za izradu vjetroagregata. Međutim njihovo postavljanje, zbog zatega, zahtijeva veću tlocrtnu površinu.

Tehnička učinkovitost i trajnost čeličnih rešetkastih jarbola znatno je poboljšana u posljednjih nekoliko godina. Ponašanje čeličnih rešetkastih jarbola istraženo je u navedenoj literaturi [8, 9]. S obzirom na to da je kod takvih konstrukcija postupak dimenzioniranja vrlo važan, analiza konstrukcije ovisi o geometrijskom modelu i svojstvima presjeka. Stoga proizvodnja modula i postupak montaže te ekonomski troškovi ovise izravno o načinu projektiranja.

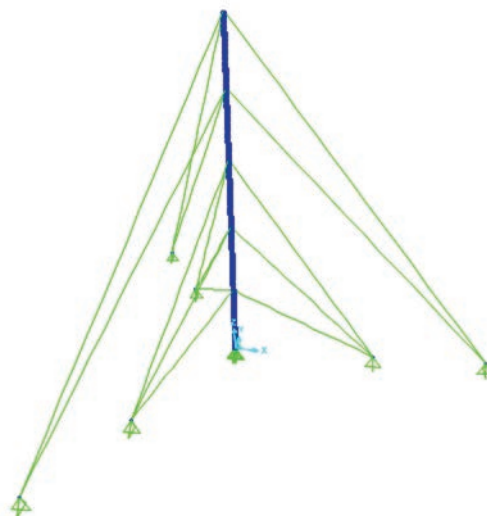
Čelični rešetkasti jarboli na tlu podložni su oštećenjima koja nastaju uglavnom zbog vanjskih djelovanja. Opterećenja vjetrom najvažniji su čimbenik kod projektiranja takvih konstrukcija. Međutim treba uzeti u obzir i utjecaj leda, osobito na velikim nadmorskim visinama. U hladnim predjelima često se pojavljuje kombinacija tih dvaju opterećenja. Stoga je potrebno istražiti međudjelovanje vjetera i leda pomoću prikladne analize metodom konačnih elemenata kako ne bi došlo do sloma takvih konstrukcija.

U ovom radu provedena je nelinearna analiza 80-metarskog čeličnog rešetkastog jarbola sa zategama u programu SAP 2000 [10]. Model je projektiran prema propisima TS 648 [11], a primijenjeni su uvjeti opterećenja iz TS 498 [12]. Pretpostavljeno je da se toranj nalazi na nadmorskoj visini od 1500 m, u snježnoj klimatskoj zoni 4, a taj slučaj je najnepovoljniji. Prema tome se ova analiza može primijeniti i na druge snježne klimatske zone. Konstrukcija je najprije analizirana bez utjecaja leda, a potom je postupno povećavana debljina leda te je određen odnos brzine vjetera i debljine leda.

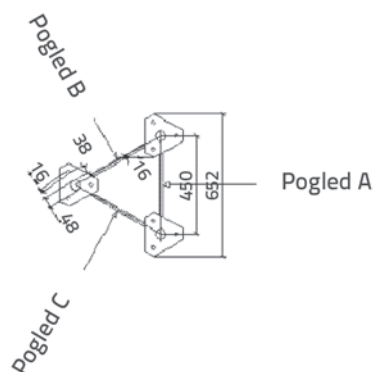
2. Materijali i metode

Prvi korak bilo je određivanje odgovarajućih presjeka i kutova čeličnog rešetkastog jarbola. Trodimenzionalni element

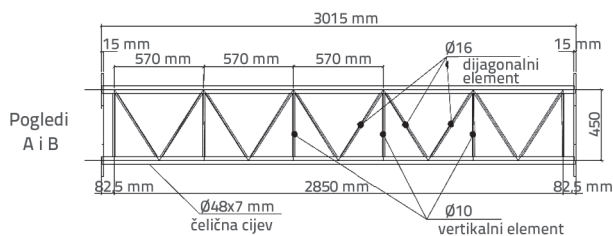
dobiven pomoću metode konačnih elemenata prikazan je na slici 1. Presjeci modela s duljinama i kutovima prikazani su na slikama 3. i 4.



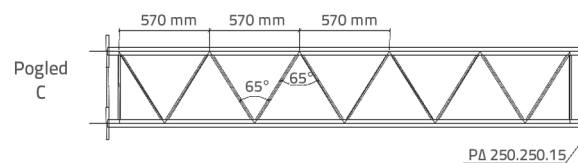
Slika 1. Prostorni model



Slika 2. Tlocrt

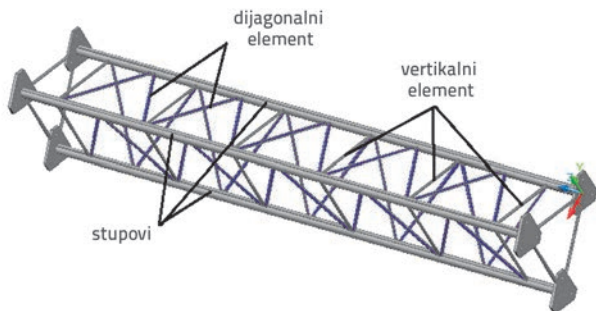


Slika 3. Pogledi A i B



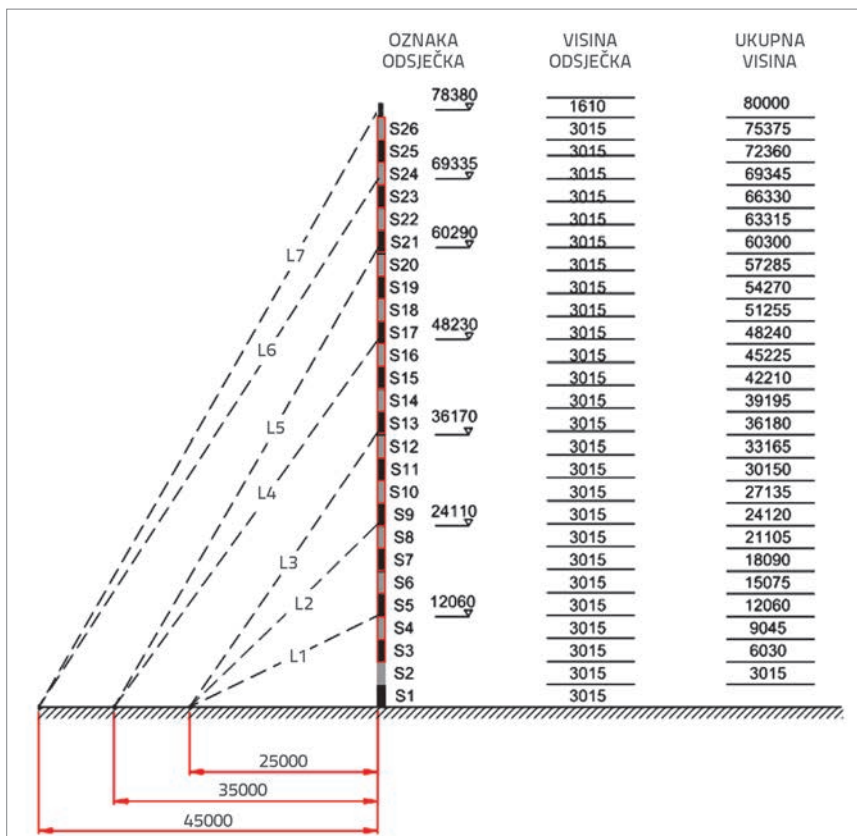
Slika 4. Pogled C

Modul duljine 3015 mm sastavljen je od čeličnih dijelova. Stupovi su postavljeni pod pravim kutom s obzirom na tlo. Vertikalni čelični elementi postavljeni su okomito u odnosu na stupove te ih povezuju. Dijagonalni elementi također povezuju stupove, a postavljeni su pod određenim kutovima u odnosu na njih. Sastavni elementi modula: stupovi, dijagonalni i okomiti elementi, prikazani su na slici 5.



Slika 5. Elementi modula

Elementi zatega i moduli imenovani su prema ukupnoj visini od tla na kojoj se nalaze (slika 6.). Oznake zatega i presjeka, zajedno s odgovarajućim visinama, prikazane su na slici 6.



Slika 6. Zatege i moduli, dimenzije u mm

3. Nelinearna analiza

Provedena su mnoga istraživanja o pravilima projektiranja i analize te su, s obzirom na to, nedavno uvrštena pojednostavljenja u dio 3.1. Eurokoda 3 [13]. Opterećenje vjetrom određeno je prema analitičkim izvještajima, a u obzir se uzeo i smjer vjetra. Brzina vjetra nije ista u svakoj zemlji, a ovisi o koeficijentu smjera vjetra i koeficijentu godišnjeg doba.

Opterećenje snijegom prenosi se po bočnim konstrukcijskim elementima. S druge strane, smatra se da su sve površine elemenata pokrivene ledom debljine od 0 do 3 cm. Jedinična težina leda iznosi 7 kN/m³ prema TS-498. Opterećenje ledom utječe na sve konstrukcijske elemente.

U ispitivanju je primijenjen program konačnih elemenata SAP 2000. Nelinearnost proizlazi iz geometrije jarbola. Uvjeti opterećenja preuzeti su iz propisa TS 498. Svojstva materijala prikazana su u tablici 1. Čelik tipa St52 odgovara standardnom europskom čeliku S355. Svojstva presjeka i slučajevi opterećenja s brzinom vjetra i svojstvima leda prikazani su u tablicama 2-5. Vrijednosti opterećenja snijegom prikazane su u TS-498 [12] za razne visinske vrijednosti i vrijednosti pokrivenosti snijegom. Vrijednosti se navode za trajanje snježnih padalina i za visine iznad razine mora. U analizi je snježno opterećenje rešetkastog tornja određeno za visinu od 1500 m i za snježno područje IV.

Tablica 1. Svojstva materijala

Kvaliteta čelika	Vlačna čvrstoća [MPa]	Granica razvlačenja [MPa]
St52 (S355)	510	360

Tablica 2. Svojstva presjeka

Vrsta elementa	Vrsta presjeka	Veličina [mm]
Stupovi	okrugla cijev	48x7
Vertikalni elementi	šipka	16
Dijagonalni elementi	šipka	16
Zatege	šipka	16

Tablica 3. Brzina vjetra i opterećenja s obzirom na visinu

Visina [m]	Brzina vjetra "v" [m/s]	Opterećenje vjetrom "q" [kg/m ²]
0-8	28	50
8-20	36	80
20-80	46	130

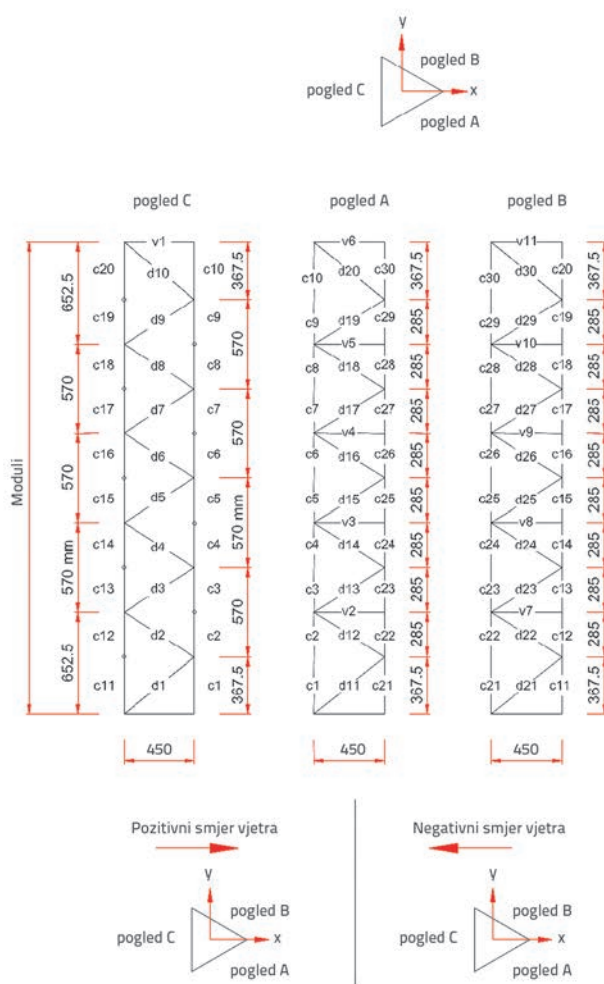
Tablica 4. Visina i svojstva snijega

Nadmorska visina [m]	Snježna klimatska zona	Opterećenje snijegom q_s [kg/m ²]
1500	IV	176

Tablica 5. Svojstva leda

Težina po jedinici volumena [kN/m ³]
7

Rešetkasti toranj sastoji se od 26 modula. Stupovi, vertikalni i dijagonalni elementi svakog presjeka modula te pozitivni i negativni smjerovi vjetra koji utječu na modul prikazani su na slici 7.



Slika 7. Tlocrti modula

Kombinacije opterećenja koje su primijenjene u analizi prikazane su u jednadžbama 1 i 2. Kombinacije su određene uzimajući u

obzir smjer vjetra, uz prisutnost opterećenja snijegom i ledom prema TS-498.

$$C_1 = G + S + W + I \tag{1}$$

$$C_2 = G + S - W + I \tag{2}$$

Navedene oznake znače sljedeće:

- G - vlastita težina
- S - opterećenje snijegom
- W - opterećenje vjetrom
- I - opterećenje ledom

Vrste i geometrijska svojstva konstrukcijskih elemenata čeličnog rešetkastog jarbola prikazani su u tablici 6.

Tablica 6. Značajke presjeka

Element	Vrsta presjeka	Promjer presjeka [mm]	Opseg presjeka [cm]	Površina presjeka [cm ²]
Stup	okrugla cijev	48x7	15,08	9,02
Vertikalni element	šipka	16	5,03	2,01
Dijagonalni element	šipka	16	5,03	2,01
Zatega	šipka	16	5,03	2,01
Stup	okrugla cijev	48x7	15,08	9,02
Vertikalni element	šipka	16	5,03	2,01
Dijagonalni element	šipka	16	5,03	2,01
Zatega	šipka	16	5,03	2,01
Stup	okrugla cijev	48x7	15,08	9,02
Vertikalni element	šipka	16	5,03	2,01
Dijagonalni element	šipka	16	5,03	2,01
Zatega	šipka	16	5,03	2,01
Stup	okrugla cijev	48x7	15,08	9,02
Vertikalni element	šipka	16	5,03	2,01
Dijagonalni element	šipka	16	5,03	2,01
Zatega	šipka	16	5,03	2,01

Opterećenja snijegom, opterećenja ledom ovisno o debljinama leda i opterećenja vjetrom koja utječu na različitim visinama rešetkastog jarbola, zajedno s brzinama

Tablica 7. Značajke opterećenja

Element	Opterećenje snijegom [kg/m ²]	Distribuirano opterećenje snijegom [kg/m]	Debljina leda [mm]	Distribuirano opterećenje ledom [kg/m]	Brzina vjetra [km/h]	Opterećenje vjetrom s obzirom na visinu [kg/m]		
						0-8 m	8-20 m	20-80 m
Stup	176	–	30	5,15	209	12,18	19,49	26,81
Vertikalni element		4,42		3,03		4,06	6,50	8,94
Dijagonalni element		4,42		3,03		4,06	6,50	8,94
Zatega		4,42		3,03		4,06	6,50	8,94
Stup	176	–	20	2,99	217	12,63	20,21	27,79
Vertikalni element		4,42		1,58		4,21	6,74	9,26
Dijagonalni element		4,42		1,58		4,21	6,74	9,26
Zatega		4,42		1,58		4,21	6,74	9,26
Stup	176	–	10	1,28	223	12,96	20,73	28,50
Vertikalni element		4,42		0,57		4,32	6,91	9,50
Dijagonalni element		4,42		0,57		4,32	6,91	9,50
Zatega		4,42		0,57		4,32	6,91	9,50
Stup	176	–	0	–	226	13,14	21,03	28,92
Vertikalni element		4,42		–		4,38	7,01	9,64
Dijagonalni element		4,42		–		4,38	7,01	9,64
Zatega		4,42		–		4,38	7,01	9,64

vjetra, prikazana su u tablici 7. Opterećenje snijegom utječe na bočne elemente. Raspoređeno snježno opterećenje izračunano je tako da je u obzir uzeta gornja površina elemenata.

3.1. Analiza naprezanja

Analizom su određene vrijednosti vlačnih i tlačnih naprezanja konstrukcijskih elemenata, a tlačna i vlačna čvrstoća izračunane su u analizi naprezanja prema propisima TS-648.

3.1.1. Vlačna čvrstoća elemenata

Vlačna čvrstoća izračunana je primjenom jednadžbe 3:

$$N_t = \sigma_{\text{tsafety}} \times A_s \quad (3)$$

gdje A_s označava površinu presjeka čeličnog elementa, σ_{tsafety} je dopušteno vlačno naprezanje, a N_t je gornja granica projektirane vlačne sile promatranog presjeka. Vrijednosti za konstrukcijske elemente prikazane su u tablici 8.

Tablica 8. Najveće dopuštene projektirane vlačne sile

Element	Presjek	A_s [cm ²]	Materijal	F_y [MPa]	σ_{tsafety} [MPa]	N_t [kN]
Stup	okrugla cijev, 48x7 mm	9,02	St52 (S355)	360	216	224
Vertikalni element	šipka, 16 mm	2,01	St52 (S355)	360	216	50
Dijagonalni element	šipka, 16 mm	2,01	St52 (S355)	360	216	50

Tablica 9. Kontrola koeficijenta vitkosti

Element	Presjek	A_s [cm ²]	Duljina L [cm]	Faktor K	r [cm]	KL/r	Kontrola vitkosti
Stup	okrugla cijev, 48x7 mm	9,02	57	1	1,47	39	< 250 ✓
Vertikalni element	šipka, 16 mm	2,01	45	1	0,40	113	< 250 ✓
Dijagonalni element	šipka, 16 mm	2,01	58	1	0,40	145	< 250 ✓

Tablica 10. Projektirane tlačne sile za koeficijente vitkosti

Element	Presjek	A_s [cm ²]	KL/r	Materijal	F_y [MPa]	σ_{ti} [MPa]	N_c [kN]
Stup	okrugla cijev, 48x7 mm	9,02	39	St52	360	196	204
Vertikalni element	šipka, 16 mm	2,01	113	St52	360	68	16
Dijagonalni element	šipka, 16 mm	2,01	145	St52	360	49	11

Tablica 11. Koeficijenti nosivosti presjeka 1, bez utjecaja leda

Presjek	Vrsta presjeka	Presjek	maks, min,	Kombinacija 1 (C1)		Kombinacija 2 (C2)		N_d [kN]	Koeficijent nosivosti	Provjera nosivosti
				Pt [kN]	Pc [kN]	Pt [kN]	Pc [kN]			
S1	stup	okrugla cijev, 48x7 mm	maks.	-	-197,25	-	-	-203,61	0,969	< 1,0 ✓
S1	stup	okrugla cijev, 48x7 mm	min.	-	-143,31	-	-	-203,61	0,704	< 1,0 ✓
S1	stup	okrugla cijev, 48x7 mm	maks.	-	-	-	-108,36	-203,61	0,532	< 1,0 ✓
S1	stup	okrugla cijev, 48x7 mm	min.	-	-	-	-64,65	-203,61	0,318	< 1,0 ✓
S1	dijagonalni	šipka, 16 mm	maks.	-	-3,86	-	-	-11,33	0,340	< 1,0 ✓
S1	dijagonalni	šipka, 16 mm	min.	1,59	-	-	-	49,94	0,032	< 1,0 ✓
S1	dijagonalni	šipka, 16 mm	maks.	-	-	-	-3,39	-11,33	0,299	< 1,0 ✓
S1	dijagonalni	šipka, 16 mm	min.	-	-	2,40	-	49,94	0,048	< 1,0 ✓
S1	vertikalni	šipka, 16 mm	maks.	2,00	-	-	-	49,94	0,040	< 1,0 ✓
S1	vertikalni	šipka, 16 mm	min.	3,38	-	-	-	49,94	0,068	< 1,0 ✓
S1	vertikalni	šipka, 16 mm	maks.	-	-	1,24	-	49,94	0,025	< 1,0 ✓
S1	vertikalni	šipka, 16 mm	min.	-	-	1,89	-	49,94	0,038	< 1,0 ✓

3.1.2. Tlačna čvrstoća elemenata

Tlačna čvrstoća izračunana je primjenom jednadžbe 4:

$$N_c = \sigma_{csafety} \times A_s \quad (4)$$

U jednadžbi je maksimalno dopušteno tlačno naprezanje označeno sa $\sigma_{csafety}$. Površina presjeka označena je sa A_s , a N_c je gornja granica projektirane tlačne sile promatranog presjeka. Dopušteno tlačno naprezanje mijenja se ovisno o vitkosti elementa. Tlačne čvrstoće presjeka računaju se s obzirom na geometriju pojedinog elementa.

Vitkost bilo kojeg elementa s obzirom na tlačnu silu ne može iznositi više od 250. Kontrola koeficijenta vitkosti prikazana je za sve presjeke u tablici 9. Projektirane tlačne sile za pojedine koeficijente vitkosti prikazane su u tablici 10.

Promjer kružnog presjeka označen je u tablici sa r. Nosivosti presjeka izloženih različitim kombinacijama opterećenja izračunane su za četiri različite debljine leda za tlačne i vlačne vrijednosti. Rezultati za najkonzervativniji presjek prikazani su u tablici 11.

Vrijednosti ukupnih pomaka na različitim visinama jarbola za različite debljine leda prikazane su u tablici 12.

Tablica 12. Vrijednosti ukupnih pomaka rešetkastog jarbola

Visina [m]	Kombinacija 1 (led = 0 mm)	Kombinacija 1 (led = 30 mm)	Kombinacija 2 (led = 0 mm)	Kombinacija 2 (led = 30 mm)
24	3,08 cm	2,92 cm	-1,44 cm	-1,36 cm
48	10,34 cm	9,78 cm	-4,54 cm	4,28 cm
78	9,76 cm	9,28 cm	-4,32 cm	4,12 cm

Tablica 13. Sile reakcije podloge za debljine leda 20 i 30 mm

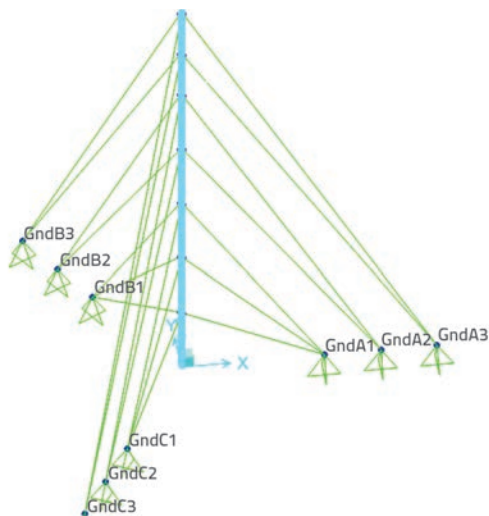
Ležaj	Kombinacija	Debljina leda 30 mm			Debljina leda 20 mm		
		Horizontalna sila X [kN]	Horizontalna sila Y [kN]	Vertikalna sila Z [kN]	Horizontalna sila X [kN]	Horizontalna sila Y [kN]	Vertikalna sila Z [kN]
GndA0	C1	-2,20	0,85	202,58	-2,26	0,89	201,02
GndA0	C2	1,10	-1,03	76,05	1,20	-1,07	70,08
GndA1	C1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
GndA1	C2	52,97	0,00	-54,86	54,94	0,00	-56,90
GndA2	C1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
GndA2	C2	47,49	0,00	-72,63	49,20	0,00	-75,25
GndA3	C1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
GndA3	C2	39,66	0,00	-64,00	41,09	0,00	-66,30
GndB0	C1	0,55	-0,45	150,75	0,055	-0,45	147,739
GndB0	C2	0,22	-0,31	118,34	0,21	-0,30	113,80
GndB1	C1	50,85	0,23	-53,41	52,75	0,24	-55,38
GndB1	C2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
GndB2	C1	48,47	0,45	-73,81	50,18	0,47	-76,42
GndB2	C2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
GndB3	C1	39,85	0,35	-64,24	41,26	0,37	-66,51
GndB3	C2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
GndC0	C1	-0,87	-0,40	150,70	-0,94	-0,45	147,33
GndC0	C2	2,03	1,34	118,20	2,09	1,37	113,70
GndC1	C1	50,85	-0,23	-53,41	52,75	-0,24	-55,38
GndC1	C2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
GndC2	C1	48,48	-0,45	-73,82	50,19	-0,47	-76,43
GndC2	C2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
GndC3	C1	39,84	-0,35	-64,24	41,25	-0,37	-66,50
GndC3	C2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Oznake spojeva zatega s tlom (ležajevi) prikazane su na slici 8. Spojevi na tlu A0, B0 i C0 zapravo su podpore rešetkastog tornja. Ti se spojevi nalaze u sredini slike 8. Sile koje se pojavljuju zbog utjecaja različitih debljina leda prikazane su u tablicama 13. i 14. Kada su konstrukcijski elementi pokriveni ledom, tada se u analizi uzima u obzir povećanje površine na koju djeluje vjetar.

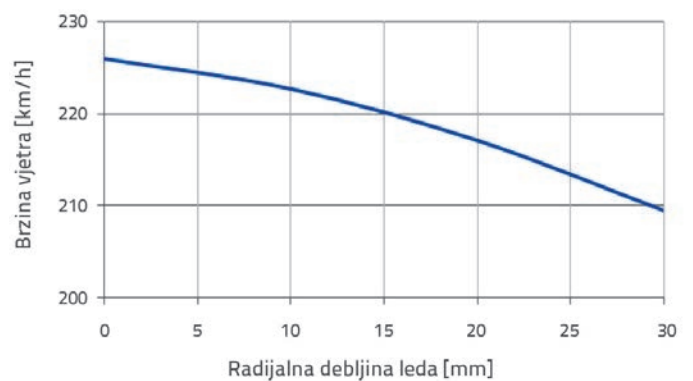
Maksimalna sila u zategama iznosi 48,8 kN. Nakon završetka analize, određen je odnos između brzine vjetra i debljine leda na 80 metara visokom rešetkastom tornju (slika 9.). Debljina leda postupno se povećava na 30 mm, a dobiva se promjena brzine vjetra uz osiguranje konstrukcijske sigurnosti rešetkastog stupa. Kapacitet presjeka osiguran je za obje kombinacije opterećenja, i to za sve vrijednosti ispod krivulje prikazane na slici 9.

Tablica 14. Sile reakcije podloge za debljine leda 10 i 0 mm

Ležaj	Kombinacija	Debljina leda 10 mm			Debljina leda 0 mm		
		Horizontalna sila X [kN]	Horizontalna sila Y [kN]	Vertikalna sila Z [kN]	Horizontalna sila X [kN]	Horizontalna sila Y [kN]	Vertikalna sila Z [kN]
GndA0	C1	-2,31	0,92	199,95	-2,33	0,94	199,14
GndA0	C2	1,27	-110	65,80	1,31	-1,12	63,14
GndA1	C1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
GndA1	C2	56,38	0,00	-58,38	57,21	0,00	-59,23
GndA2	C1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
GndA2	C2	50,44	0,00	-77,16	51,16	0,00	-78,25
GndA3	C1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
GndA3	C2	42,13	0,00	-67,98	42,73	0,00	-68,95
GndB0	C1	0,55	-0,45	145,01	0,55	-0,45	143,45
GndB0	C2	0,20	-0,29	110,57	0,19	-0,29	108,51
GndB1	C1	54,14	0,25	-56,81	54,94	0,26	-57,63
GndB1	C2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
GndB2	C1	51,43	0,49	-78,32	52,14	0,50	-79,40
GndB2	C2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
GndB3	C1	42,29	0,39	-68,17	42,88	0,40	-69,12
GndB3	C2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
GndC0	C1	-1,00	-0,48	144,96	-1,03	-0,50	143,39
GndC0	C2	2,14	1,39	110,49	2,16	1,41	108,45
GndC1	C1	54,14	-0,25	-56,81	54,94	-0,26	-57,63
GndC1	C2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
GndC2	C1	51,43	-0,49	-78,33	52,15	-0,50	-79,42
GndC2	C2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
GndC3	C1	42,28	-0,39	-68,16	42,87	-0,40	-69,11
GndC3	C2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



Slika 8. Oznake ležajeva



Slika 9. Odnos između brzine vjetra i debljine leda

4. Zaključak

U posljednje vrijeme, zajedno s napretkom tehnologije, znatno se povećala potreba građenja visokih konstrukcija. Čelični rešetkasti jarboli imaju mnogo prednosti te se zbog toga primjenjuju u različitim područjima.

Područja najčešće primjene takvih konstrukcija su naftne platforme, dalekovodi, telekomunikacijski vodovi, odašiljači, radiotelevizijski i kontrolni tornjevi. Mnogi rešetkasti jarboli u upotrebi su dugi niz godina. Takve konstrukcije ne zahtijevaju velike poprečne presjeka, stoga je njihova gradnja jednostavna i ekonomična.

U ovom radu prikazani su rezultati ispitivanja 80-metarskog čeličnog rešetkastog jarbola sa zategama. Nelinearna analiza provedena je u programu konačnih elemenata SAP2000 za različite debljine leda. Konstrukcija se nalazi na 1500 metara nadmorske visine, u snježnoj klimatskoj zoni IV, prema propisima TS 498. Opterećenja su izračunana za te slučajeve.

Prilikom projektiranja većine rešetkastih jarbola uzima se u obzir opterećenje vjetrom. Međutim, djelovanje leda jedan je od glavnih kriterija pri dimenzioniranju visokih konstrukcija, osobito onih koje se nalaze u brdovitim i hladnim područjima

gdje su jarboli izloženi utjecaju leda. U takvim se predjelima, opterećenje vjetrom povećava uslijed utjecaja leda. Stoga se, rešetkasti jarbol najprije trebalo analizirati bez utjecaja leda, a zatim se debljina leda postupno povećavala kako bi se mogao odrediti odnos između brzine vjetra i debljine leda jer je to važan parametar pri projektiranju rešetkastih jarbola. Pokazano je da, pri malim brzinama vjetra uz postupno povećavanje debljine leda, sigurnost jarbola nije ugrožena.

Takva analiza primjenjiva je za sva snježna područja do nadmorske visine od 1500 m. Odabrani promjeri zatega iznose 16 mm. Nakon analize usvojena je maksimalna sila u zategama koja iznosi 48,8 kN. Minimalni koeficijent sigurnosti za zatege mora biti najmanje 5, a treba ga uzeti u obzir prilikom odabira dimenzija.

Koeficijent nosivosti i reakcije izračunane su za sve module. Prikazani su najkonzervativniji rezultati za kritični presjek, a provedena je i kontrola nosivosti čeličnog rešetkastog jarbola. Naposljetku je zaključeno da sigurnost cijelog sustava ovisi o utjecaju projektiranih sila s obzirom na provjeru nosivosti. Ovo istraživanje može se naknadno proširiti ispitivanjem različitim presjeka rešetkastih jarbola na većim nadmorskim visinama prema drugim propisima.

LITERATURA

- [1] Jiang, W., Wang, Z., McClure, G., Wang, G., Geng, J.: Accurate Modeling of Joint Effects in Lattice Transmission Towers, *Engineering Structures*, 33 (2011), pp. 1817-1827, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.02.022>
- [2] Zhuge, Y., Mills, J., Ma, X.: Modelling of Steel Lattice Tower Angle Legs Reinforced for Increased Load Capacity, *Engineering Structures*, 43 (2012), pp.160-168, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.05.017>
- [3] Jones, K., Peabody, A.: The Application of A Uniform Radial Ice Thickness to Structural Sections, *Cold Regions Science and Technology*, 44 (2006), pp. 145-148, <http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2005.10.002>
- [4] Makkonen, L., Lehtonen, P., Hirviniemi, M.: Determining Ice/ Loads for Tower Structure Design, *Engineering Structures*, 74 (2014) 1, pp. 229-232.
- [5] Terziev, A., Antonov, I., Velichkova, R.: Wind Data Analysis and Wind Flow Simulation over Large Areas, *Mathematical Modelling in Civil Engineering*, 10 (2014) 1, pp. 38-48.
- [6] Mara, T., Hong, H.: Effect of Wind Direction on The Response and Capacity Surface of A Transmission Tower, *Engineering Structures*, 57 (2013), pp. 439-501, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.10.004>
- [7] Adhikari, R., Wood, D., Sudak, L.: Design Procedure for Tubular Lattice Towers for Small Wind Turbines, *Wind Engineering*, 38 (2014) 4, pp. 359-376.
- [8] Phill-Seung, L., Ghyslain, M.: Elastoplastic Large Deformation Analysis of a Lattice Steel Tower Structure and Comparison with Full Scale Tests, *Journal of Constructional Steel Research*, 63 (2007) 5, pp. 709-717.
- [9] Eltaly, B., Saka, A., Kandil, K.: FE Simulation of Transmission Tower, *Advances in Civil Engineering*, (2014), pp. 1-13, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/258148>
- [10] SAP2000, Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures Basic Analysis Reference Manual, *Computers and Structures Inc. Berkeley*, 1995.
- [11] TS 648, Building Code for Steel Structures, *Turkish Standard Institutes, Ankara*, 1997.
- [12] TS 498, Building Loads for Buildings, *Turkish Standard Institutes, Ankara*, 1980.
- [13] Eurocode 3, Design of Steel Structures - Part 3.1: Towers and Masts, *European Committee for Standardization*, 2006.