

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**STATIČKA ANALIZA ČELIČNO REŠETKASTOG STUPA ZA
DALEKOVODE 20 KV METODOM KONAČNIH ELEMENATA**

Rijeka, rujan 2016.

Ante Sikirica
0062053819

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**STATIČKA ANALIZA ČELIČNO REŠETKASTOG STUPA ZA
DALEKOVODE 20 KV METODOM KONAČNIH ELEMENATA**

Mentor: prof. dr. sc. Goran Turkalj

Rijeka, rujan 2016.

Ante Sikirica

0062053819

TEHNIČKI FAKULTET

Povjerenstvo za završne ispite preddiplomskog sveučilišnog studija strojarstva

Klasa: 602-04/16-01/22

Ur. br.: 2170-15-12-16-3

Rijeka, 7. 3. 2016.

Z A D A T A K

za završni rad

Pristupnik: **Ante Sikirica**

JMBAG: 0062053819

Naziv zadatka: **Statička analiza čeličnog rešetkastog stupa za dalekovode 20 kV
metodom konačnih elemenata**

Title (English): **Finite element static analysis of steel lattice tower 20 kV**

Polje znanstvenog područja: strojarstvo

Grana znanstvenog područja: opće strojarstvo (konstrukcije)

Sadržaj zadatka:

U zadatku je potrebno izvršiti analizu statičke nosivosti čeličnog rešetkastog stupa dalekovoda 20 kV metodom konačnih elemenata. Prethodno je potrebno odrediti opterećenje stupa za jedan simetričan i jedan nesimetričan oblik glave stupa. Potom je potrebno modelirati stup primjenom linijskih konačnih elemenata, odrediti unutarnje sile u stupu te izvršiti provjeru dimenzija stupa. Završni rad treba biti strukturiran na način da sadrži sljedeće dijelove: uvodna razmatranja, definiranje opterećenja rešetkastog stupa, proračun unutarnjih sila primjenom MKE, analizu naprezanja i deformacije, zaključak te popis upotrijebljene literature.

Završni rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje završnih radova koje su objavljene na web stranicama Preddiplomskog sveučilišnog studija strojarstva.

Zadano: **14. 3. 2016.**

Predati do:

6. 7. 2016. ili 12. 9. 2016. u 12 sati

Mentor:

prof. dr. sc. Goran Turkalj

Prof. dr. sc. Roberto Žigulić

Zadatak preuzeo dana: 14.03.2016.

Ante Sikirica

(potpis pristupnika)

Predsjednik Povjerenstva:

Dostaviti:

- Mentor(1x) Evidencija studija(2x) Pristupnik(1x) Predsjednik povjerenstva (1x)

IZJAVA

Sukladno članku 9. pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku preddiplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci iz lipnja 2011. godine, ja, Ante Sikirica, student preddiplomskog sveučilišnog studija strojarstva, izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad „Statička analiza čeličnog rešetkastog stupa za dalekovode 20 kV metodom konačnih elemenata“, a pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Gorana Turkalja.

Ante Sikirica
0062053819

Rijeka, rujan 2016.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Goranu Turkalju na ukazanom povjerenju i vodstvu, te ujedno velika zahvala prof. dr. sc. Domagoju Lancu na utrošenom vremenu i susretljivosti prilikom izrade ovog završnog rada.

SAŽETAK

Čelično rešetkasti stupovi za dalekovode okosnica su elektroopskrbnog sustava. Ove jednostavne rešetkaste konstrukcije imaju zadatak sigurnog prenošenja električnih vodova neovisno o vanjskim uvjetima. Cilj rada bila je statička analiza idejne izvedbe stupa dalekovoda, a prema zadanom predlošku tvrtke „Dalekovod d.o.o.“. Najveći naglasak stavio se na ispitivanje čvrstoće konstrukcije te određivanje naprezanja u korištenim profilima. Proračunate vrijednosti prema teoriji najveće distorzijske energije uspoređivane su s dopuštenim naprezanjima, a prema „Pravilniku o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova nazivnog napona od 1 kV do 400 kV“. Osim provjere naprezanja, izvršena je i dodatna analiza konstrukcije prema normi Eurokod 3 za čelične konstrukcije. Provjere su vršene s obzirom na otpornost na savijanje, izvijanje, tlačnu, vlačnu, te otpornost na interakciju momenata savijanja i sila. Promatrane su i pripadne deformacije oblika stupa te predložene potencijalne uštede u vidu redukcije dimenzija profila.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. ČELIČNO REŠETKASTI STUPA DALEKOVODA 20 KV	3
2.1. Čelično rešetkasti stup	3
2.2. Pomoćni i električni elementi	5
3. IDEJNO RJEŠENJE KONSTRUKCIJE	8
4. OPTEREĆENJA ČELIČNO REŠETKASTOG STUPA DALEKOVODA	12
4.1. Vodiči i užad	12
4.2. Dodatno opterećenje	14
4.3. Vjetar	16
4.4. Stup s glavom tipa delta	18
4.5. Stup s glavom tipa jela	19
4.6. Izolatori i pomoćni pribor	19
4.7. Sumarni prikaz opterećenja	20
5. METODA KONAČNIH ELEMENATA	23
6. ANALIZA NAPREZANJA	26
6.1. Proračun naprezanja prema von Misesu	26
6.2. Von Misesova naprezanja u stupu s „delta“ glavom	27
6.3. Von Misesova naprezanja u stupu s „jela“ glavom	30
6.4. Proračun prema eurokodu	33
6.4.1. Tlačna čvrstoća	34
6.4.2. Savojna čvrstoća	34
6.4.3. Posmična čvrstoća	35
6.4.4. Otpornost na izvijanje	36
6.4.5. Interakcija momenta savijanja i aksijalnih i reznih sila	36
6.4.6. Određivanje klase poprečnog presjeka	37

6.5. Proračun stupa s „delta“ glavom prema eurokodu	38
6.5.1. Analiza prema eurokodu za slučaj opterećenja 68.1.a)	38
6.5.2. Analiza prema eurokodu za slučaj opterećenja 68.1.b) - 69.1	46
6.6. Proračun stupa s „jela“ glavom prema eurokodu	49
7. ANALIZA DEFORMACIJA	52
7.1. Stup s „delta“ glavom.....	53
7.2. Stup s „jela“ glavom.....	57
7.3. Stabilnost konstrukcije	61
8. OPTIMIZACIJA I PROVJERA DIMENZIJA	62
9. ZAKLJUČAK	65
10. LITERATURA.....	66

1. UVOD

Zahvaljujući pristupačnosti i varijabilnosti električne energije, naročito u segmentu upotrebe i primjene, u proteklih nekoliko desetljeća došlo je do snažnog gospodarskog rasta globalnih razmjera. Neovisno o njenom podrijetlu i načinu proizvodnje, električna energija ima središnju ulogu u proizvodnji gotovo svih dobara, a nezamjenjiva je i u domaćinstvima. Skladan rad sustava za proizvodnju, kao i elektroopskrbnog sustava od neizmjerne je važnosti za društvo u cjelini [1].

Počeci elektrifikacije na području Republike Hrvatske, datiraju u razdoblje između dva svjetska rata, dok je nagli razvoj uslijedio nakon 1945. godine. Osnovna podjela distribucijskog sustava vrši se prema nazivnim naponima, pa razlikujemo prijenosnu mrežu s naponima od 110 kV do 400 kV, srednjenaponsku mrežu od 10 kV, 20 kV i 35 kV, niskonaponsku mrežu 0,4/0,23 kV te elektroenergetska postrojenja [2, 3].

Zadaća distribucijskog sustava je prijenos električne energije od proizvođača do potrošača. Sama topološka izvedba može varirati, te razlikujemo radijalnu, prstenastu i složenu mrežu. Radijalna topologija tipična je za udaljene potrošače ili ruralne/prigradske sredine. Jeftinija je u pogledu izvedbe, a karakterizirana je većim nazivnim naponima zbog prijenosa energije na veće udaljenosti. Osnovna problematika ovakve izvedbe veže se uz potencijalni kvar sustava. Složena, te u manjoj mjeri prstenasta topologija, osigurava opskrbu električnom energijom i u slučaju kvara na dijelu mreže, no sami troškovi ovakvih izvedbi su znatno veći.

Elektroopskrbni sustav može se podijeliti prema načinu izvedbe na podzemni i nadzemni. Podzemni sustav tipičan je za izrazito urbane sredine, te naseljena područja novijeg podrijetla, a također je nezamjenjiv u područjima izrazito varijabilnih ili oštih vremenskih uvjeta, gdje tradicionalna, nadzemna izvedba ne pruža zadovoljavajuće rezultate. Ovakva izvedba je u pravilu skuplja, no u određenim uvjetima pruža dugoročno veću ekonomsku isplativost. Nadzemni sustav je generalno znatno jeftiniji i lakši za izvedbu, te stoga najčešći [1, 4].

Okosnicu nadzemnog elektroopskrbnog sustava čine dalekovodi. Zadaća dalekovoda je prijenos električne energije putem vodova na sigurnoj visini, pri čemu osim postavljenih električnih zahtjeva, moraju biti zadovoljeni i strukturni zahtjevi pri izrazito varijabilnim vanjskim utjecajima i vremenskim uvjetima. Gledajući kroz povijest, postoje različite konstrukcije dalekovoda: drvene, armiranobetonske, čelične te složene čelično rešetkaste izvedbe [1]. Prihvatljiva konstrukcija i izvedba su neophodne jer ekonomski pokazatelji pripisuju oko 40% ukupnih troškova elektroopskrbnog sustava samim dalekovodima [5]. Zahvaljujući dobrim

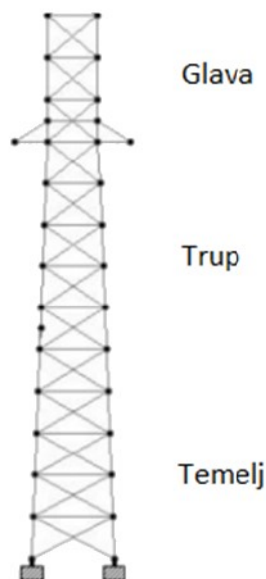
mehaničkim svojstvima, za izrazito zahtjevne uvjete i vodove viših napona, čelično rešetkasti stupovi najčešće su jedini isplativi izbor. No, sama izvedba je često problematična i varijabilna jer uvelike ovisi o vanjskim utjecajima, pa nije optimalna. Posljedično postoje kontinuirana nastojanja za konstruiranje laganih i otpornih tornjeva koji zadovoljavaju sve postavljene zahtjeve uz čim veći stupanj ekonomičnosti [1]. Shodno tome, u kontekstu ovog rada nastojati će se proračunati optimalna izvedba čelično rešetkastog stupa za dalekovode srednjenaponske mreže (20 kV), a u kontekstu statičkih djelovanja prema „Pravilniku o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova nazivnog napona od 1 kV do 400 kV“ („Službeni list“ broj 65/88; „Narodne novine“ broj 53/91 i 24/97) [6].

2. ČELIČNO REŠETKASTI STUPA DALEKOVODA 20 KV

U upotrebi su dvije vrste stupova: nosni i zatezni stupovi. Potonji su znatno varijabilniji u smislu složenosti i veličine naprezanja. Osnovna razlika uvjetovana je načinom vezivanja električnih vodiča; nosni stupovi nose ovješene vodiče nadzemnog voda, dok je prvenstvena namjena zateznih stupova pritezanje vodiča određenom silom, no mogu se upotrebljavati i kao nosni stupovi. Zahvaljujući raznolikoj primjeni, odlučeno je kako su zatezni stupovi najinteresantniji za statičku analizu. Referirajući se na predloške već postojećih rješenja čelično rešetkastih stupova tvrtke „Dalekovod projekt d.o.o.“ a u skladu s pravilnikom pristupilo se projektiranju stupa dalekovoda [6 - 8]. Valja napomenuti kako se ovaj rad bavi statičkom analizom isključivo stupa dalekovoda, pri čemu se uzima u obzir interakcija svih standardnih elementa prisutnih u okviru samog dalekovoda. Nužno je stoga analizirati i definirati svaku komponentu koja se primjenjuje pri izradi dalekovoda.

2.1. Čelično rešetkasti stup

Stupovi su osnovni nosivi elementi dalekovoda. Oni prenose opterećenja i fiksirani su u temeljima, te pružaju stabilnost, čvrstoću i sigurnost cijelog sustava. Prosječni vijek trajanja čelično rešetkastog stupa iznosi 50 godina. Sastavljeni su iz standardnih čeličnih profila, relativno malih duljina radi lakše montaže i transporta, a međusobno se povezuju odgovarajućim vijcima. Vanjska zaštita od korozije ovisno o izvedbi i proizvođaču ostvaruje se različitim premazima ili pocinčavanjem profila. Oblik i veličina uvelike ovise o vanjskim uvjetima i opterećenjima, pa postoji velika dimenzijska raznolikost između različitih izvedbi. Osnovna izvedba sastavljena je iz pojasnika, ispuna i konzola. Pritom, stup ugrubo možemo podijeliti na 3 odvojene cjeline: glavu s vrhom, trup i temelje (Slika 2.1.) [1, 2, 7].



Slika 2.1. Shema čelično rešetkastog stupa [9]

Glava s vrhom predstavlja segment stupa koji nosi vodiče i zaštitnu užad. Veza je ostvarena posebnim priborom i izolatorima, a posredstvom konzola koje osiguravaju adekvatan razmak između vodova, prema postavljenim zahtjevima pravilnika, pri čemu se opterećenja prenose na središnji dio stupa [1, 2].

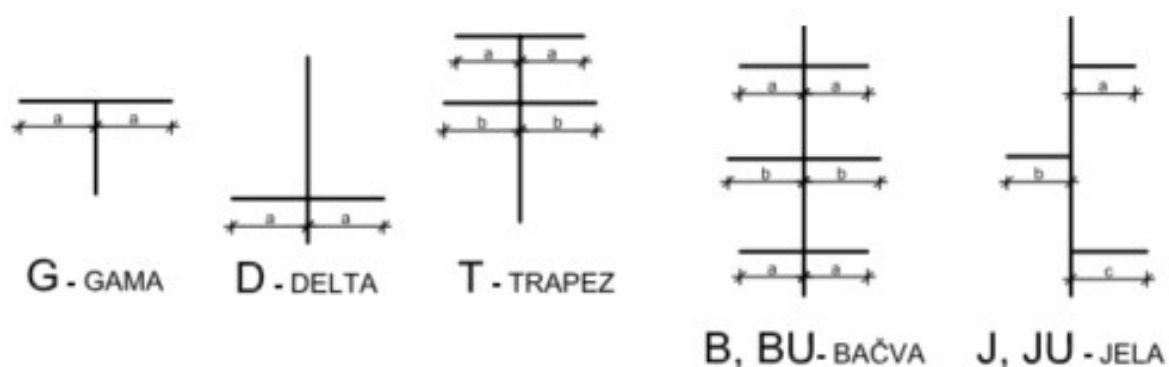
Trup stupa je središnji, nosivi dio stupa, zadužen za prenošenje opterećenja do temelja te osiguranje adekvatne visine konstrukcije. Konstrukcijski je najjednostavniji, najčešće u obliku kvadra ili piramide, koji su ojačani ispunama [1, 2].

Temelj stupa osigurava statičku stabilnost cjelokupne konstrukcije. Najčešće se ostvaruje u vidu betonskog bloka u kojem je učvršćen trup dalekovoda. Posredstvom temelja, opterećenja se prenose u tlo [1, 2].

Pojasnici su čelični profili, najčešće standardni L profili, koji tvore vanjsku nosivu konstrukciju stupa. Međusobno su povezani vijcima, a ojačani dijagonalno ili poprečno postavljenim ispunama, koje se također stežu vijcima. Kod većih opterećenja i viših stupova, pojasnici su najčešće postavljeni pod kutom koji je nešto veći kod zateznih stupova nego nosnih, prvenstveno jer zatezni stupovi prenose veća opterećenja. Analizirana konstrukcija je u jednom dijelu sastavljena iz pojasnika koji tvore piramidu; promatrajući tlocrt iz smjera temelja, baza stupa je kvadrat, dok su pojasnici postavljeni pod blagim nagibom od približno 2.5° prema vertikali. U gornjem dijelom, pojasnici formiraju oblik pravilnog kvadra, sa bazom kvadratom [7, 8].

Ispune su najjednostavniji elementi stupa, najčešće standardni L profili koji se povezuju vijcima, a koriste za postizanje adekvatne stabilnosti cjelokupne konstrukcije [7, 8].

Konzole su uvelike varijabilne te nužno ne moraju biti standardizirane. Kombinacijom više konzola formira se glava stupa [1]. Osnovne simetrične izvedbe obuhvaćaju „gama“, „delta“, „trapez“ i „bačva“ glave, dok u nesimetrične izvedbe spadaju glave tipa „jela“. Postoje dodatne izvedbe sa zaštitnim užetom, a specifične su za glave tipa „bačva“ i „jela“ (Slika 2.2.). Moguće su specijalne konstrukcije samih konzola te glava, no svima je zajednički način vezanja na osnovni dio stupa te prenošenje opterećenja na isti. Najčešće su izvedene iz U profila i čeličnih ploča za ovješnje [8].

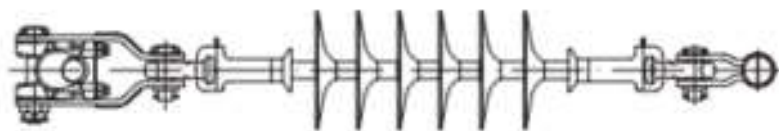


Slika 2.2. Najčešći oblici glava dalekovoda [8]

2.2. Pomoćni i električni elementi

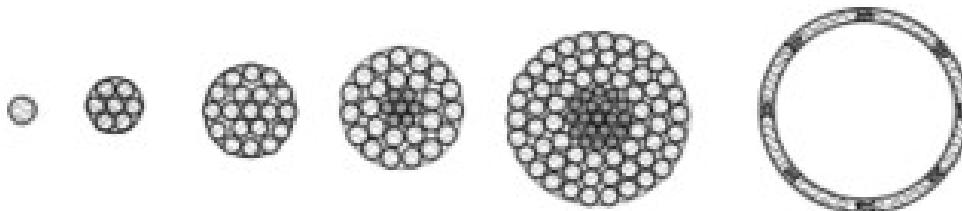
Uzemljenje sprječava pojavu razlike potencijala na pojedinim dijelovima konstrukcije povezujući cjelokupnu konstrukciju sa tlom. Temelji su glavni element u prijenosu sila sa stupa na tlo. Dimenzije temelja su unaprijed predložene i proračunate koristeći Sulzberger metodu, a razlikuju se prema vrsti i visini stupa, te vrsti tla [2, 7].

Izolatori se javljaju u različitim izvedbama, no svima je zajednička jedinstvena funkcija osiguravanje i fiksiranje položaja vodiča naspram stupa uz istovremenu izolaciju vodiča od stupa. Najraširenije su porculanske izvedbe, no u novije vrijeme sve se više upotrebljavaju kompoziti zbog manje mase i bolje otpornosti na vanjske uvjete. Razlikujemo kapaste (Slika 2.3.), masivne, štapne i potporne izolatore, pri čemu za potonje vrijedi da su dimenzionirani tako da podnose opterećenja i do 2,5 puta veća od težine vodiča s dodatnim opterećenjem, dok za ostale faktor otpornosti na mehaničko opterećenje iznosi 3 [2, 6].



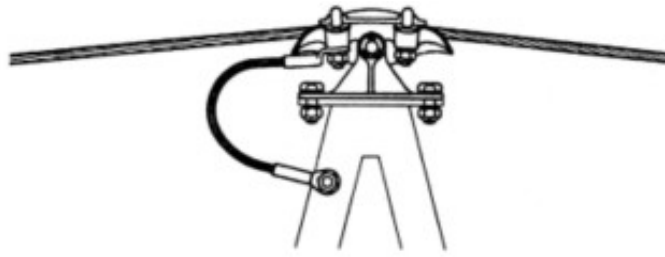
Slika 2.3. Kapasti izolator [10]

Vodiči su glavni elementi u provođenju električne energije. Nekad korištene bakrene zamijenili su vodiči iz aluminijskih legura, te su ih u potpunosti istisnuli iz upotrebe, prvenstveno zbog manje mase, ali i znatno niže cijene. Posljedično, mehaničko opterećenje na konzole/glavu stupa je znatno manje. Kod vodiča manjeg presjeka, koriste se jednostavne žice, dok se kod većih presjeka izrađuje tzv. užad (Slika 2.4.). Izvedba užadi može biti homogena – iz jednog materijala, ili kombinirana – iz više materijala. Kako aluminij ima znatno lošija mehanička svojstva od bakra, javlja se u kombinaciji s drugim metalima, najčešće čelikom, pa govorimo o AL/Č vodičima. U takvoj kombinaciji, osnovnu ulogu provođenja vrši aluminij, dok čelik osigurava potrebna mehanička svojstva. U kontekstu analize, mehaničko naprezanje kojem je vodič izložen nužno mora biti manje od maksimalnog radnog naprezanja. Vrijednosti istih, definirane su pravilnikom, te kao takve usvojene za odabrani vodič [1, 7].



Slika 2.4. Presjek kroz različite vodiče [1]

Osnovna zadaća zaštitnog užeta je zaštita vodiča, ali i cjelokupnog stupa od udara groma, a može se koristiti i za osiguravanje rada pri kratkom spoju. Najčešće je iste ili slične građe kao i vodič. Montira se na vrhu stupa (Slika 2.5.). Mehanički zahtjevi na zaštitno uže, isti su kao i kod vodiča. Premda može biti korišteno, nužno nije obavezan element.

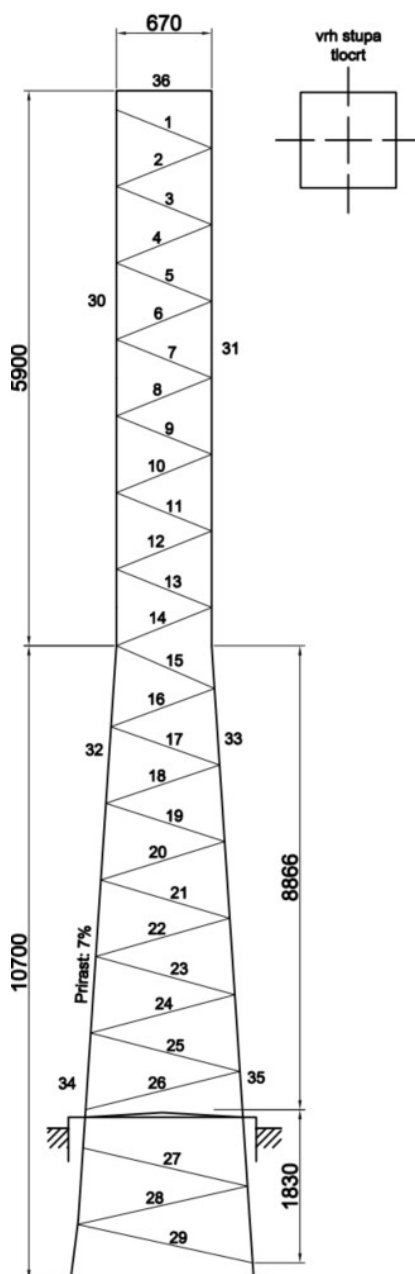


Slika 2.5. Zaštitno uže i montaža [1]

Pod pomoćni pribor spada skupina elemenata koja ima zaštitnu, potporno-ovjesnu i spojnu ulogu. Radi se u pravilu o elementima manje mase, koji se koriste za osiguravanje veza između vodiča, vodiča i stupa, te izolaciju istih [2]. Zbog zanemarivo male mase naspram cjelokupne strukture, njihov utjecaj ćemo u većem dijelu zanemariti, osim na mjestima gdje je zbog veće mase istih moguć značajniji utjecaj na proračun.

3. IDEJNO RJEŠENJE KONSTRUKCIJE

Čelični rešetkasti stup projektiran je u skladu s predloškom za zatezni stup ZAH2 tvrtke „Dalekovod projekt d.o.o.“, a prema zadanim standardima (Slika 3.1.) [6, 8].



Slika 3.1. Idejno rješenje stupa

Osnovna konstrukcija samog stupa sastoji se iz L profila odabranih prema normi EN 10024. Stup je konstruiran tako da se može napraviti jasna razdioba u tri etaže maksimalne duljine elemenata 6 m. Prva etaža ima oblika pravilnog kvadra, dok druga i treća čine krnju

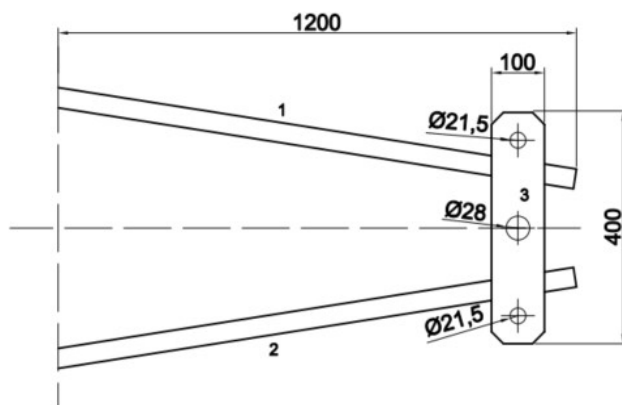
pravilnu četverostranu piramidu. Kvadar je visine 5,9 m te širine 0,67 m. Krnja piramida visine 10,7 m nadovezuje se na bazu kvadra, te u temeljima završava kvadratnom bazom duljine 1,58 m. Visinski prirast piramide iznosi 7%. Gornji segment je ojačan dijagonalno postavljenim ispunama duljine 0,785 m. Donji segment ojačavaju ispune duljine do 1,6 m. Takva izvedba omogućava jednostavan transport i spajanje profila na montažnom mjestu. Generalno, spojevi su ostvareni standardnim metričkim vijcima M12 i M16. Na prijelazima etaža izvedeni su kruti spojevi upotrebom metalnih ploča i vijaka.

Vanjski profili, pojasnici, odgovaraju elementima 30 - 36. Profili 1 - 29 su ispune, koje se razlikuju prema duljini i tipu, a ovisno o etaži. Pregled profila i njihovih dimenzija dan je u tablici 3.1.:

Tablica 3.1. Pregled elemenata stupa

Element	Profil (mm)	Duljina (mm)	Broj elemenata
1 - 14	60x60x6	785	64
15 - 20	60x60x6	1100	24
21 - 26	60x60x6	1500	24
27 - 29	60x60x8	1600	12
30, 31	80x80x8	5900	8
32, 33	80x80x8	5900	8
34, 35	80x80x8	4800	8
36	80x80x8	670	4

Izvedba glava razlikuje se za simetrični tip „delta“ i nesimetrični tip „jela“. Unatoč tome, sama izbočenja su jednako dimenzionirana. Nazivna duljina konzole iznosi 1,2 m. Koriste se U profili prema normi EN 10279, a poprečno su obostrano povezani pločama za ovješanje izabranim prema normi EN 10025. Duljina profila konzole iznosi 1,225 m. Na udaljenosti od 1,18 m montira se ploča za ovješanje, duljine 0,4 m. Na pločama su napravljeni provrti za vezanje standardnih izolatora ili produžnika (Slika 3.2.).



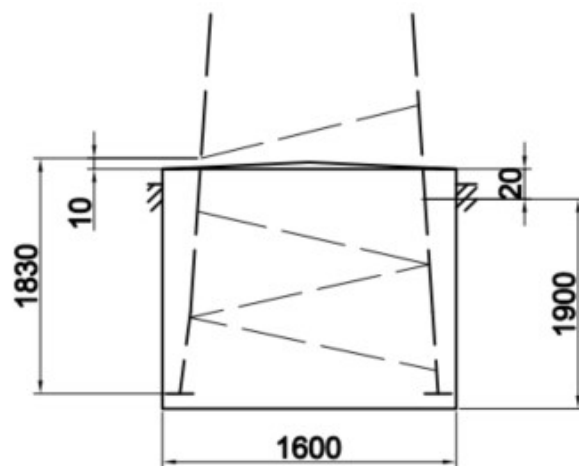
Slika 3.2. Konstrukcija konzole

Montaža konzola na stupu započinje na 0,85 m od vrha stupa. Za glavu tipa „jela“, razmak između svake konzole iznosi 0,85 m. Veza s nosivim stupom ostvarena je horizontalno postavljenim U profilima nazivne duljine 0,67 m. Pregled profila dan je u tablici 3.2..

Tablica 3.2. Pregled elemenata konzole

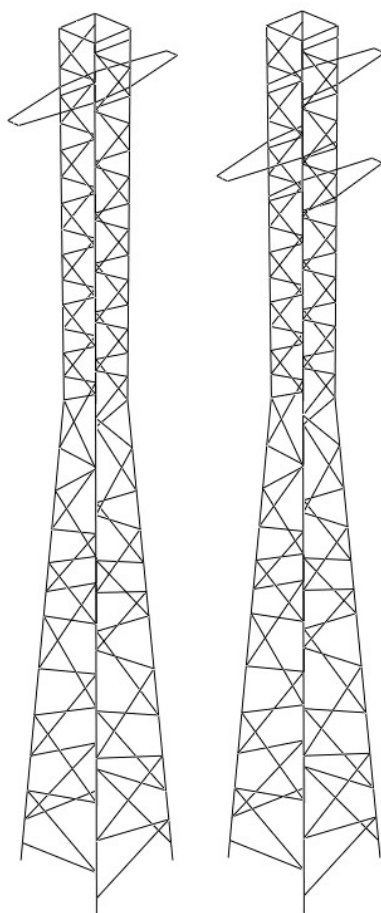
Element	Profil (mm)	Duljina (mm)	Broj elemenata
1 - 2	UPE80	1223	2
vezni el.	UPE80	670	2
3	ploča 100x20	400	2

Dimenzije temelja usvojene su prema unaprijed preporučenim vrijednostima (Slika 3.3.). Vrijednosti su proračunate u skladu s pravilnicima o nadzemnim vodama i vrstama tla. Najčešća izvedba temelja je u obliku masivnog betonskog bloka koji u potpunosti povezuje osnovne pojasnike stupa te pripadne ispune. Temeljna visina stupa iznosi 1,83 m. Temelji su oblika kvadra, dimenzija 1,6x1,9 m. Ovisno o uvjetima, moguće su izvedbe s povišenim ili plitkim temeljima, te prema potrebi s konstrukcijskim nastavcima radi lakše montaže. Temeljenje je moguće i sidrenim vijcima za istu izvedbu, tj. ukupnu duljinu stupa koja obuhvaća duljinu temeljnog dijela i iznosi 16,66 m [8].



Slika 3.3. Dimenzije temelja konstrukcije

U kontekstu statičke analize, temeljni dio stupa predstavlja uklještenje, te će se izostaviti iz analize. Opterećenja i deformacije će se promatrati na elementima od vrha temelja do vrha stupa, tj. na stupu visine 14,76 m (Slika 3.4.).



Slika 3.4. Analizirane izvedbe stupa

4. OPTEREĆENJA ČELIČNO REŠETKASTOG STUPA DALEKOVODA

Kako bi se adekvatno mogla izvršiti provjera naprezanja i deformacija za predloženu konstrukciju zateznog stupa dalekovoda, nužna je potpuna analiza svih opterećenja kojima je ista izložena. Proračun naprezanja vrši se u slučajevima najrigoroznijih vanjskih uvjeta, a izračunate vrijednosti moraju biti u okviru dopuštenih računskih vrijednosti prema „Pravilniku o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova nazivnog napona od 1 kV do 400 kV“ [6]. Najveće sile uvjetovane su samom masom stupa te masom vodova. Značajan utjecaj ima vjetar kao i vremenski uvjeti, od kojih su snježne neprilike i nanosi izrazito važni. Utjecaj pomoćnog pribora dalekovoda te pomoćnih mehaničkih spojnika poput vijaka, su u pravilu relativno mali naspram mase ukupne konstrukcije, no također će biti prikazani [6, 11, 12].

Analiza se provodi na dva zatezna stupa tipa ZAH2 s nosivim ovješnjem vodiča. Stupove karakterizira različita izvedba glava, te će se specifična opterećenja razmatrati za svaki posebno. Opterećenje svakog od vodiča na konzole, kao i utjecaj klimatskih uvjeta na vodiče je jednak za obje konstrukcije te će se u nastavku zajednički obraditi.

4.1. Vodiči i užad

Ovješeni vodiči su tipa Al/Č, preporučenog omjera presjeka 70/12 mm². Za navedeni vodič radno naprezanje iznosi 95 N/mm², a promjer 11,7 mm. Masa ovakvog vodiča po jedinici duljine prema DIN 48201 iznosi 285 kg/km. Mjesto vezanja i pružanje vodiča su izrazito bitni, kako bi se spriječilo približavanje stupu ili drugom vodu pod utjecajem primjerice vjetra ili puknuća vodiča, te tako došlo do narušavanja sigurnosnog razmaka s obzirom na definirani napon. Vodiči su ovješeni na izolatore i adekvatno razmaknuti zahvaljujući izvedbi konzola [1].

Pravilnikom predviđena udaljenost između dva zatezna stupa nužno mora biti manja od 8 km tj. 30 raspona, te poželjno veća od 3 km zbog ekonomičnosti [6, 7]. Premda se analiza vrši za zatezne stupove tipa ZAH2, isti se mogu primjenjivati i kao nosni stupovi, te će se promatrati u kontekstu navedene primjene. Preporučeni dopušteni raspon između stupova iznosi maksimalno 200 m te je kao takav usvojen [8]. Provjes užeta za navedeni raspon u normalnim uvjetima ne smije biti prevelik, u protivnom je nužno dodatno zatezanje. Izraz (4.1) opisuje veličina provjesa [1].

$$f = \frac{4 \cdot m_l \cdot g \cdot l^2}{8 \cdot \sigma \cdot d^2 \pi} \quad (4.1)$$

$$f = \frac{4 \cdot 0,285 \cdot 9,81 \cdot (200)^2}{8 \cdot 95 \cdot (11,7)^2 \pi} = 1,37 \text{ m}$$

gdje vrijedi:

l - raspon (m)

m_l - jedinična masa vodiča (kg/m)

g - ubrzanje sile teže (m/s²)

σ - naprezanje vodiča (N/mm²)

d - promjer vodiča (mm)

Opterećenje konzole masom užeta pri slučaju nosivog ovješnja je varijabilno, a ovisi o položaju težišta lončanice koju pružanje voda zatvara. Vertikalna komponenta naprezanja užetom ovisi o samoj masi voda. Horizontalna komponenta je konstantna pri danoj temperaturi i rasponu [11]. Promatrati će se pojednostavljeni slučaj kada je težište u sredini raspona, pa posljedično vertikalna komponenta iznosi 50% mase užeta, dok je horizontalna komponenta definirana dopuštenim radnim naprežanjem vodiča [8]. Za navedeni slučaj, opterećenje užetom opisano je izrazima (4.3) i (4.4).

$$G_u = l \cdot m_l \cdot g \quad (4.2)$$

$$G_u = 200 \cdot 285 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 = 559 \text{ N}$$

$$F_v = \frac{1}{2} \cdot G \quad (4.3)$$

$$F_v = \frac{1}{2} \cdot 559 = 280 \text{ N}$$

$$F_h = \sigma \cdot A = \sigma \cdot \frac{d^2 \pi}{4} \quad (4.4)$$

$$F_h = 95 \cdot \frac{(11,7)^2 \pi}{4} = 10214 \text{ N}$$

pri čemu vrijedi:

m_u - masa vodiča (kg)

G – težina voda (N)

σ - naprezanje vodiča (N/mm²)

A - poprečni presjek vodiča (mm²)

d - promjer vodiča (mm)

F_v - vertikalna komponenta sile vodiča (N)

F_u - horizontalna komponenta sile vodiča (N)

Komponente sile zatezanja iznose 280 N u vertikalnom, te 10214 N u horizontalnom smjeru. Sila zatezanja užeta za slučaj izvanrednog opterećenja iznosi do 50% zatezne sile užeta s jedne strane stupa [6], tj. 5107 N.

Ukupna prenesena sila promatrati će se u kombinaciji s dodatnim opterećenjem u vidu utjecaja snježnih nanosa te vjetra, pri čemu dolazi do savijanja teoretski horizontalnog voda te povećanja mase [6]. Utjecaj vibracija vodiča pod djelovanjem vjetra spada u domenu dinamičke analize.

4.2. Dodatno opterećenje

Vodiči se različito ponašaju pri graničnim temperaturama od -20°C i +40°C zbog skupljanja materijala odnosno dilatacije. Posljedično, možemo govoriti o različitom prijenosu sile na sam stup [6, 11, 13]. Kod visokih temperatura, pretpostavka je da se mase ne mijenjaju, dok sam vod poprima oblik lončanice. U zimskim uvjetima, osnovno pružanje vodiča možemo aproksimirati pravcem, no, sam vod može biti izložen dodatnom opterećenju leda te osnovni oblik također prelazi u lončanicu. Kako rad analizira statičku stabilnost stupa, usvaja se da je preporučena konfiguracija vodiča zadovoljavajuće modelirana u pogledu mehaničke otpornosti istog za dane vremenske uvjete. Posljedično, nužno je samo odrediti dodatno opterećenje koje se javlja na konzolama, a uvjetovano je ledom. Djelovanje dodatnog opterećenje uzima se u obzir pri temperaturi okoline od -5°C, djeluje u vertikalnom smjeru na sam vod, te se pridodaje njegovoj ukupnoj težini, a opisano je izrazom (4.5) [6].

$$P_d = k \cdot 10 \cdot 0,18\sqrt{d} \quad (4.5)$$

$$P_d = 2,5 \cdot 10 \cdot 0,18\sqrt{11,7} = 15,4 \text{ N/m}$$

$$G_d = P_d \cdot l \quad (4.6)$$

$$G_d = 15,4 \cdot 200 = 3080 \text{ N}$$

$$F_{vd} = \frac{1}{2} G_d \quad (4.7)$$

$$F_{vd} = \frac{1}{2} 3080 = 1540 \text{ N}$$

pri čemu vrijedi:

P_d - dodatno opterećenje (N/m)

k - koeficijent zone leda; usvojen $k = 2,5$

G_d - dodatna težina na vodič (N)

F_{vd} - vertikalna sila pri dodatnom opterećenju (N)

Računski je utvrđeno kako normalno dodatno opterećenje, uvjetovano snježnim padalinama, a koje djeluje na vod u vertikalnom smjeru, iznosi 1540 N. Osim normalnog, prema pravilniku, moguće je i djelovanje izuzetnog dodatnog opterećenja, koje predstavlja najveće opterećenje na danom prostoru u razdoblju od 20 godina, a može se i aproksimirati kao najmanje dvostruko normalno opterećenje. Posljedično, izvanredno dodatno opterećenje iznosi 3080 N. Premda je u pravilniku definirano, izvanredno dodatno opterećenje nije navedeno u uvjetima proračuna naprezanja prema člancima 68. i 69., te će se shodno tome izvesti samo pokazni proračun za obje izvedbe glave stupa, a prema članku 69.1. pravilnika.

4.3. Vjetar

Proračun opterećenja vjetrom za sve konstrukcije do 200 m visine može se promatrati u pojednostavljenom obliku, gdje se djelovanje vjetra može zamijeniti statičkim opterećenjem [13]. Pri analizi djelovanja vjetra, smatra se da vjetar struji pravocrtno i uvjetuje tlačno opterećenje na površinu svih konstrukcijskih elemenata. Pri izvedbi dalekovoda, pravilnik uvjetuje upotrebu posebne oprema (npr. prigušivača), kako bi se u slučajevima izrazito velikog opterećenja vjetrom smanjile vibracije i zamor materijala [6].

Osnovno opterećenje vjetra na stup dalekovoda visine do 15 m iznosi 1100 N/m^2 . Pri analizi djelovanja vjetra na stup, nužno je uzeti u obzir interakciju vjetra i rešetkaste konstrukcije iz profiliranog čelika. Kao faktor korekcije uzima se 2,6 te djelovanje vjetra na takav stup iznosi 2860 N/m^2 [6, 8].

Djelovanje vjetra na vodiče i užad promatra se u točki vezanja istih na sam stup, a iznosi 1100 N/m^2 . Prema lit. [7], stup je izložen najvećem opterećenju kada je smjer djelovanja vjetra okomit na pružanje voda. Sila na vodič u tom slučaju iznosi:

$$F_w = P_v \cdot d \cdot l \quad (4.8)$$

$$F_w = 1100 \cdot 0,0117 \cdot 100 = 1287 \text{ N}$$

Sila vjetra na vodič pri djelovanju u smjeru pružanja vodiča iznosi:

$$F_w = P_v \cdot \frac{d^2 \pi}{4} \quad (4.9)$$

$$F_w = 1100 \cdot \frac{(0,0117)^2 \pi}{4} = 0,12 \text{ N}$$

pri čemu vrijedi:

F_w - sila vjetra na vodič (N)

P_v - opterećenje vjetrom (N/m^2)

S obzirom na relativno malu vrijednost sile vjetra na vodič, prilikom djelovanja u smjeru pružanja vodiča, može se usvojiti kako ista iznosi 0 N.

Pravilnik ne spominje mogućnost istovremenog djelovanja dodatnog opterećenja i opterećenja vjetrom. U realnim situacijama moguć je navedeni slučaj interakcije. Posljedično, poželjno je provesti analizu i za takve, kritične slučajeve [11, 14, 15]. Zbog utjecaja dodatnog opterećenja, poprečni presjek voda na koji djeluje vjetar je znatno veći. Opterećenje vjetrom na zaleđene vodiče opisano je izrazom (4.10).

$$P_{vd} = P_v \cdot (d + 2b) \cdot 10^{-3} \quad (4.10)$$

$$P_{vd} = 1100 \cdot (11,7 + 2 \cdot 22) \cdot 10^{-3} = 61,27 \text{ N/m}$$

$$F_{wd} = 0,5 \cdot P_{vd} \cdot l \quad (4.11)$$

$$F_{wd} = 0,5 \cdot 61,27 \cdot 200 = 6127 \text{ N}$$

gdje vrijedi:

F_{wd} - sila vjetra na zaleđeni vodič (N)

P_{vd} - opterećenje vjetrom po jedinici duljine zaleđenog vodiča (N/m)

P_v - opterećenje vjetrom (N/m²)

b - debljina leda (mm)

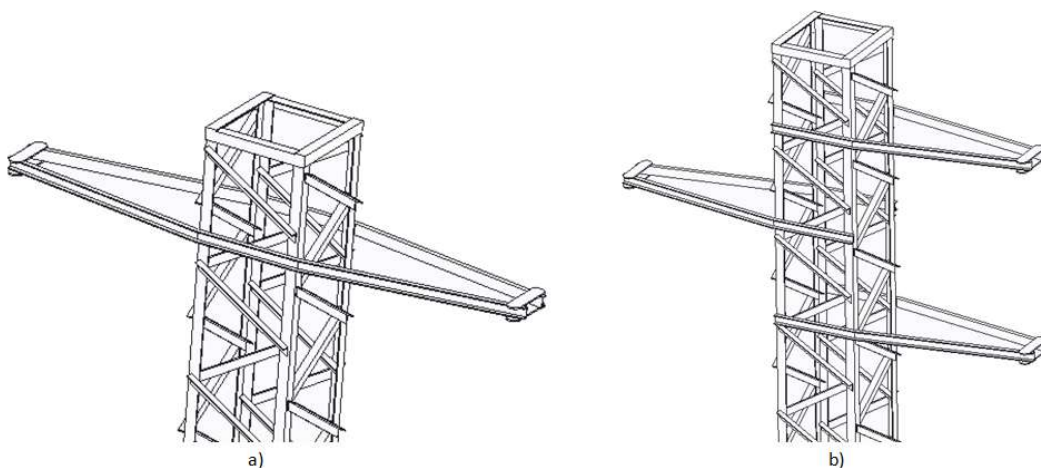
d - promjer vodiča (mm)

l - raspon (m)

Na temelju vrijednosti proračunatog rezultata može se pretpostaviti kako će navedeno opterećenje u interakciji s vjetrom, prilikom jednostranog prekida voda uvjetovati savijanje i oštećenje stupa, neovisno o izvedbi. Kako sama interakcija nije definirana pravilnikom, u analizi se na nju neće staviti naglasak, no nužno je istaknuti potencijalno kritični slučaj vanjskog djelovanja.

4.4. Stup s glavom tipa „delta“

Ukupna masa stupa može se raščlaniti prema sastavnim elementima. Središnji dio stupa je zajednički, a osnovna razlika je u konzolama (Slika 4.1.).



Slika 4.1. a) Stup s glavom tipa „delta“, b) Stup s glavom tipa „jela“

Početni profili odabrani su prema europskim normama, te služe kao osnova za daljnja razmatranja. Ovisno o proračunatim naprezanjima, moguće su korekcije odabranih profila prema potrebi. Masa se promatra u kontekstu nadzemnog dijela stupa (povrh temelja). Pregled ukupne mase stupa dan je tablici 4.1.:

Tablica 4.1. Pregled mase stupa „delta“

Element	Norma	Profil	Masa (kg)
Pojasnici	EN 10024	80x80x8	594,94
Ispune	EN 10024	60x60x6	576,62
Konzola	EN 10279: 2000	UPE80	44,24
Konzola - spojnici	EN 10025	ploča 100x20	0,03
Ukupna masa stupa s glavom tipa delta			1215,83

Preporučeno je da se za ostvarivanje spojeva između navedenih elemenata upotrebljavaju standardni vijci M12 i M16 prema normi DIN 933. Ukupna srednja masa vijaka i matica koji se upotrebljavaju iznosi približno 15,48 kg. Ukupno povećanje mase iznosi približno 1,3%.

4.5. Stup s glavom tipa „jela“

Raščlamba elemenata stupa u svrhu određivanja njegove mase dana je u obliku tabličnog pregleda (Tablica 4.2), slično kao i kod stupa s delta glavom:

Tablica 4.2. Pregled mase stupa „jela“

Element	Norma	Profil	Masa (kg)
Pojasnici	EN 10024	80x80x8	594,94
Ispune	EN 10024	60x60x6	576,62
Konzola	EN 10279: 2000	UPE80	80,63
Konzola - spojnici	EN 10025	100x20	0,04
Ukupna masa stupa s glavom tipa jela			1252,24

Za ostvarivanje spojeva između navedenih elemenata upotrebljavaju vijci M12 i M16, prema normi DIN 933. Ukupna srednja masa vijaka i matica koji se upotrebljavaju iznosi približno 18,01 kg. Ukupno povećanje mase iznosi približno 1,4%.

4.6. Izolatori i pomoćni pribor

Katalog tvrtke „Dalekovod projekt d.o.o.“ preporuča uporabu jednostrukih kompozitnih izolatora za nosnu, ali i zateznu funkciju dalekovoda 20 kV. Masa istih je varijabilna, no u graničnim slučajevima iznosi 2 kg. U upotrebi se mogu naći i raznolike čelične izvedbe mase do 4 kg, te porculanske do 10 kg [7, 10, 16]. Moguća je uporaba složenijih izvedbi, no nije preporučena, te će se za proračunsku vrijednost uzeti u obzir masa predloženog kompozitnog izolatora. Pomoćni pribor je izrazito varijabilan, a obuhvaća različite stremene, očke, rogove, vilice za izolatore, te spojnice, stezaljke i sl... [1]. Masa ovih elemenata ne može se unaprijed apsolutno definirati, no može se procijeniti na 1% ukupne mase stupa za svaki vodič. Procjena masa pomoćnih elemenata i izolatora dana je u tablici 4.3.:

Tablica 4.3. Masa izolatora i pomoćnog pribora

Element	Tip stupa	Masa po vodiču (kg)
Izolator i pomoćni pribor	delta	12,16
Izolator i pomoćni pribor	jela	12,52

4.7. Sumarni prikaz opterećenja

U nastavku je dan sumarni prikaz opterećenja za pojedinu varijantu stupa (Tablica 4.4. – 4.14.), s ciljem bolje preglednosti i lakšeg pristupa analizi. Stupovi će se promatrati s obzirom na normalno i izvanredno opterećenje. Provjera normalnog opterećenja vrši se u skladu s člankom 68. pravilnika [6]. Izvanredno opterećenje osim prema članku 69., promatrati će se i u kontekstu izuzetnog dodatno opterećenja.

Tablica 4.4. Slučaj normalnog opterećenja 68.1.a) stupa s „delta“ glavom

Opterećenje	Vrijednost
Težina stupa s glavom tipa „delta“	11927 N
Težina spojnih elemenata	152 N
Težina izolatora i opreme po vodiču	119 N
Vertikalna komponenta sile vodiča	280 N
Horizontalna komponenta sile vodiča	10214 N
Dodatno opterećenje	1540 N

Tablica 4.5. Slučaj normalnog opterećenja 68.1.b) stupa s „delta“ glavom

Opterećenje	Vrijednost
Težina stupa s glavom tipa „delta“	11927 N
Težina spojnih elemenata	152 N
Težina izolatora i opreme po vodiču	119 N
Vertikalna komponenta sile vodiča	280 N
Horizontalna komponenta sile vodiča u iznosu 2/3	6809 N
Opterećenje stupa vjetrom	2860 N/m ²
Opterećenje vodiča vjetrom	1287 N

Tablica 4.6. Slučaj normalnog opterećenja 68.1.c) stupa s „delta“ glavom

Opterećenje	Vrijednost
Težina stupa s glavom tipa „delta“	11927 N
Težina spojnih elemenata	152 N
Težina izolatora i opreme po vodiču	119 N
Vertikalna komponenta sile vodiča	280 N
Horizontalna komponenta sile vodiča u iznosu 2/3	6809 N
Opterećenje stupa vjetrom	2860 N/m ²
Opterećenje vodiča vjetrom	0 N

Tablica 4.7. Slučaj izvanrednog opterećenja 69.1.a) stupa s „delta“ glavom

Opterećenje	Vrijednost
Težina stupa s glavom tipa „delta“	11927 N
Težina spojnih elemenata	152 N
Težina izolatora i opreme po vodiču	119 N
Vertikalna komponenta sile vodiča	280 N
Horizontalna komponenta sile vodiča u iznosu 1/2	5107 N
Dodatno opterećenje	1540 N

Tablica 4.8. Slučaj normalnog opterećenja 68.1.a) stupa s „jela“ glavom

Opterećenje	Vrijednost
Težina stupa s glavom tipa „jela“	12284 N
Težina spojnih elemenata	177 N
Težina izolatora i opreme po vodiču	123 N
Vertikalna komponenta sile vodiča	280 N
Horizontalna komponenta sile vodiča	10214 N
Dodatno opterećenje	1540 N

Tablica 4.9. Slučaj normalnog opterećenja 68.1.b) stupa s „jela“ glavom

Opterećenje	Vrijednost
Težina stupa s glavom tipa „jela“	12284 N
Težina spojnih elemenata	177 N
Težina izolatora i opreme po vodiču	123 N
Vertikalna komponenta sile vodiča	280 N
Horizontalna komponenta sile vodiča u iznosu 2/3	6809 N
Opterećenje stupa vjetrom	2860 N/m ²
Opterećenje vodiča vjetrom	1287 N

Tablica 4.10. Slučaj normalnog opterećenja 68.1.c) stupa s „jela“ glavom

Opterećenje	Vrijednost
Težina stupa s glavom tipa „jela“	12284 N
Težina spojnih elemenata	177 N
Težina izolatora i opreme po vodiču	123 N
Vertikalna komponenta sile vodiča	280 N
Horizontalna komponenta sile vodiča u iznosu 2/3	6809 N
Opterećenje stupa vjetrom	2860 N/m ²
Opterećenje vodiča vjetrom	0 N

Tablica 4.11. Slučaj izvanrednog opterećenja 69.1.a) stupa s „jela“ glavom

Opterećenje	Vrijednost
Težina stupa s glavom tipa „jela“	12284 N
Težina spojnih elemenata	177 N
Težina izolatora i opreme po vodiču	123 N
Vertikalna komponenta sile vodiča	280 N
Horizontalna komponenta sile vodiča u iznosu 1/2	5107 N
Dodatno opterećenje	1540 N

Tablica 4.12. Slučaj izuzetnog dodatnog opterećenja prema 69.1.a) za stup s „delta“ glavom

Opterećenje	Vrijednost
Težina stupa s glavom tipa „delta“	11927 N
Težina spojnih elemenata	152 N
Težina izolatora i opreme po vodiču	119 N
Vertikalna komponenta sile vodiča	280 N
Horizontalna komponenta sile vodiča u iznosu 1/2	5107 N
Izuzetno dodatno opterećenje	3080 N

Tablica 4.13. Slučaj izuzetnog dodatnog opterećenja prema 69.1.a) za stup s „jela“ glavom

Opterećenje	Vrijednost
Težina stupa s glavom tipa „jela“	12284 N
Težina spojnih elemenata	177 N
Težina izolatora i opreme po vodiču	123 N
Vertikalna komponenta sile vodiča	280 N
Horizontalna komponenta sile vodiča u iznosu 1/2	5107 N
Izuzetno dodatno opterećenje	3080 N

5. METODA KONAČNIH ELEMENATA

Sam koncept metode konačnih elemenata datira u 1941. godinu, gdje se upotrebljavala prvenstveno za proračune u vojnoj avijaciji. U tom periodu, postavljen je značajan teorijski temelj, no puni smisao i oblik, metoda je postigla 60-tih godina dvadesetog stoljeća. Može se reći da je njen razvoj zapravo tekao paralelno s razvojem računala, pošto je riječ o izrazito kompleksnim i opsežnim proračunima koji se uvelike oslanjaju na računalnu podršku. Primjena metode je raznolika, a omogućava numeričko rješavanje gotovo svih inženjerskih problema i problema matematičke fizike [17, 18].

Analiza konstrukcije metodom konačnih elemenata podrazumijeva pojednostavljenje iste, tj. podjelu na veliki broj malih konačnih elemenata, koji se međusobno dodiruju u točkama, linijama ili površinama, a zajedno formiraju cjelokupno promatranu strukturu. Za takvu strukturu, za koju znamo oslonce i opterećenja, možemo definirati osnovne uvjete ravnoteže te napraviti diskretizaciju s obzirom na odabranu vrstu diskretizacijskog elementa, koji može biti jednodimenzijski, dvodimenzijski ili trodimenzijski [18].

Prilikom diskretizacije rešetkaste strukture poput stupa dalekovoda, koriste se linijski konačni elementi. Posljedično, promatrana domena koja ima beskonačno mnogo stupnjeva slobode, rastavlja se na veliki broj konačno malih elemenata sa konačnim brojem stupnjeva slobode. Broj i veličina elemenata su subjektivno definirani, a predstavljaju optimum između preciznosti rezultata i troškova analize te konačne konstrukcije.

Proučavanjem pomaka čvorova između elemenata, mogu se odrediti značajke cjelokupne promatrane domene. Izbor same funkcije pomaka specifičan je za svaki element. Najčešće se upotrebljavaju polinomne funkcije zbog jednostavnosti proračuna. Adekvatnom aproksimacijom, ostvaruje se veza između pomaka u polju konačnog elementa s pomakom u čvoru konačnog elementa. Primjenom ravnotežnih uvjeta, ostvaruje se veza čvornih sila i čvornih pomaka. Kako se koriste konačni elementi koji imaju konačan broj stupnjeva slobode, za svaki element definira se pripadna algebarska jednadžba. Općeniti izraz za deformaciju pri jednodimenzionalnom problemu glasi (5.1):

$$\varepsilon_x = \frac{du}{dx} \quad (5.1)$$

Analogno navedenom mogu se izvesti izrazi za deformacije u smjeru osi y i z. Veza deformacije i naprezanja ostvaruje se Hookovim zakonom (5.2).

$$\sigma_x = E \cdot \varepsilon_x \quad (5.2)$$

pri čemu vrijedi:

ε_x - deformacija u smjeru osi x

σ_x - naprezanje u smjeru osi x

E - modul elastičnosti

Navedeni sustav jednačbi povezuje naprezanje i deformaciju, te deformaciju i pomak na temelju rubnih i početnih uvjeta. Određivanjem jednačbi i nepoznanica za jedan element, mogu se definirati i odrediti isti i za neki drugi element. Primjenom direktne metode konačnih elemenata, koja se koristi za analizu pomaka čvorova, osnovna jednačba e -tog konačnog elementa poprima matrični oblik (5.3). Pretpostavka primjene je kontinuitet strukture.

$$[k^e]\{u^e\} = \{f^e\} \quad (5.3)$$

pri čemu vrijedi:

$[k^e]$ - vektor čvornih pomaka e -tog konačnog elementa

$\{u^e\}$ - vektor čvornih sila e -tog konačnog elementa

$\{f^e\}$ - matrica krutosti e -tog konačnog elementa

Sjedinjavanjem pojedinačnih jednačbi svih konačnih elemenata već diskretizirane konstrukcije, a u ovisnosti o definiranim graničnim uvjetima, može se jednostavno izvesti jednačba konstrukcije, te globalna matrica krutosti konstrukcije (5.5).

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \cdots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix} \quad (5.4)$$

$$[K]\{U\} = \{F\} \quad (5.5)$$

gdje vrijedi:

$[K]$ - vektor čvornih pomaka konstrukcije

$\{U\}$ - vektor čvornih sila konstrukcije

$\{F\}$ - matrica krutosti konstrukcije

Na temelju određene globalne matrice krutosti koja sadrži pomake, primjenom iterativnih metoda, mogu se izračunati tražene nepoznanice iz već definiranog sustava jednadžbi koji povezuje deformaciju i pomak te naprezanje i deformaciju [18, 19].

Radi same složenosti analizirane konstrukcije, koristiti će se već dostupno softversko rješenje ABAQUS. Nakon definiranja koordinata i dimenzija svih elemenata konstrukcije, određuju se dimenzije korištenih profila, te isti pripisuju odgovarajućim linijskim elementima. Specifične značajke profila automatski su proračunate. Korišteni materijal je standardni europski konstrukcijski čelik S355. Na razini cjelokupne konstrukcije formira se mreža određene gustoće. Kreirana mreža ima funkciju diskretizacije rešetkaste konstrukcije. Po definiranju opterećenja, oslonaca i vrste spojeva vrši se analiza naprezanja, a proračunati rezultati se uspoređuju s dopuštenim naprezanjima. Dodatna provjera izvršena je prema europskom standardu Eurokod 3.

6. ANALIZA NAPREZANJA

6.1. Proračun naprezanja prema von Misesu

Proračun naprezanja proveo se u skladu s von Misesovom teorijom najveće distorzijske energije. Za rastezljive materijale, ovakva analiza pruža rezultate najsličnije eksperimentalnim. Prema teoriji [20], za neko složeno stanje naprezanja, kritično stanje je postignuto kada je gustoća distorzijske energije kritična za jednoosono stanje naprezanja. Ukupno naprezanje za složeno stanje naprezanja opisano je izrazom (6.1). Navedeni izraz se ovisno o vrsti naprezanja (prostorno, ravninsko, ravno savijanje) može dalje reducirati.

$$\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq \sigma_{dop} \quad (6.1)$$

gdje vrijedi:

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - glavna naprezanja (Pa)

σ_{dop} - dopušteno naprezanje (Pa)

Dopušteno naprezanje definirano je materijalom koji se koristi. Korišteni materijal je konstrukcijski čelik S355, vlačne čvrstoće 355 MPa. Faktor sigurnosti osnovnog opterećenja iznosi 1,5. Za izvanredno opterećenje faktor sigurnosti iznosi 1,1 [8]. Shodno tome, dopušteno naprezanje u promatranim čeličnim elementima iznosi:

$$\sigma_{dop} = \frac{\sigma_M}{f_M} \quad (6.2)$$

$$\sigma_{dop,n} = \frac{355}{1,5} = 236,70 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{dop,i} = \frac{355}{1,1} = 322,72 \text{ MPa}$$

gdje vrijedi:

$\sigma_{dop,n}, \sigma_{dop,i}$ - dopušteno normalno/izvanredno naprezanje (Pa)

f_M - faktor sigurnosti

Von Misesova naprezanja uzeta su kao glavni kriterij ocjene čvrstoće konstrukcije za promatrane slučajeve opterećenja. Temeljitim primjenom metode konačnih elemenata, utvrđeno je da postoje određena odstupanja ovisno o gustoći korištene mreže prilikom diskretizacije. No, s obzirom da su odstupanja relativno mala, analiza će se obuhvatiti provjeru naprezanja na razini svakog pojedinačnog elementa, a rezultati će se validirati usporedbom s proračunatim dopuštenim opterećenjima. Dodatna provjera, finom diskretizacijom, ukazala je na odstupanja od 5-10% na specifičnim segmentima pojedinih elemenata, no s obzirom na razinu odstupanja i vrijednosti dopuštenog naprezanja, zaključeno je da ovakvi rezultati nemaju značajnijeg utjecaja na donesene zaključke.

6.2. Von Misesova naprezanja u stupu s „delta“ glavom

Proračunate vrijednosti ekvivalentnog von Misesova naprezanja, radi preglednosti, dane su u tablicama te kategorizirane prema profilima, a za svaki stavak pravilnika (Tablica 6.1. - 6.4.) [6]. Kako bi se osigurala dosljednost i umanjila potencijalna greška, prikazana su dva najveća naprezanja koja se javljaju za svaki tip profila. U nastavku je priložen grafički prikaz naprezanja u elementima za pojedini slučaj (Slika 6.1.), pri čemu su deformacije iscrtane u relativnom mjerilu, a visina naprezanja istaknuta tamnijom nijansom crvene boje. Računske vrijednosti von Misesova naprezanja za normalna opterećenja prema članku 68. pravilnika [6] iznose:

Tablica 6.1. Proračunata normalna opterećenja prema 68.1.a)

Tip profila	Element br.	von Misesovo naprezanje (MPa)
L80x80x8	4	55,31
	46	53,92
L60x60x6	24	9,28
	59	9,02
UPE80	35	45,88
	51	44,82
ploče 100x20	33	6,34
	34	6,29

Tablica 6.2. Proračunata normalna opterećenja prema 68.1.b)

Tip profila	Element br.	von Misesovo naprezanje (MPa)
L80x80x8	242	60,32
	197	50,87
L60x60x6	122	13,53
	114	13,37
UPE80	35	13,19
	32	12,35
ploče 100x20	52	1,13
	53	0,89

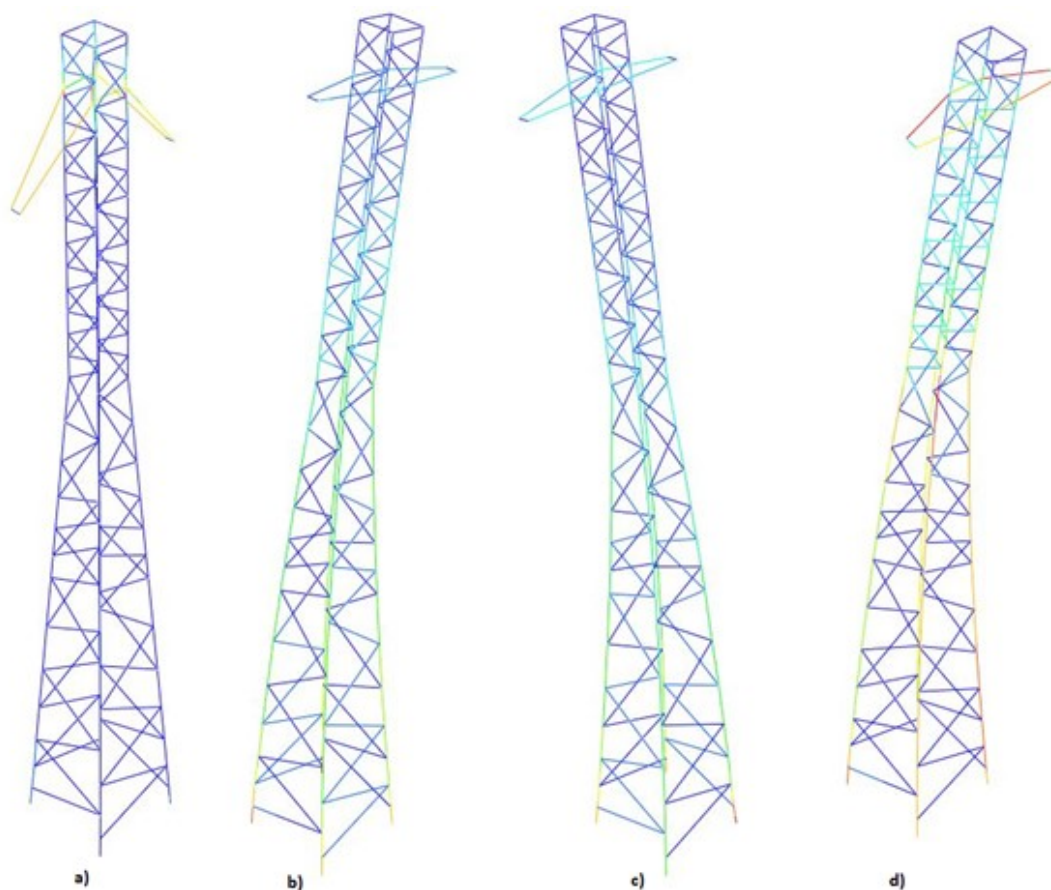
Tablica 6.3. Proračunata normalna opterećenja prema 68.1.c)

Tip profila	Element br.	von Misesovo naprezanje (MPa)
L80x80x8	241	38,19
	242	30,51
L60x60x6	134	8,25
	120	7,76
UPE80	35	12,18
	6	10,48
ploče 100x20	33	1,70
	52	1,39

Vrijednosti von Misesova naprezanja za izvanredna opterećenja prema članku 69. iznose:

Tablica 6.4. Proračunata izvanredna opterećenja prema 69.1.a)

Tip profila	Element br.	von Misesovo naprezanje (MPa)
L80x80x8	140	47,92
	143	41,73
L60x60x6	59	19,35
	81	18,11
UPE80	51	46,88
	35	43,77
ploče 100x20	53	18,97
	34	16,74



Slika 6.1. Naprezanja u stupa „delta“: a) sukladno s 68.1.a); b) sukladno s 68.1.b); c) sukladno s 68.1.c); d) sukladno s 69.1.a)

U slučaju izuzetnog dodatnog opterećenja, von Misesova naprezanja računaju se također prema članku 69. pravilnika [6], slično kao i u prethodnom slučaju. Osnovna razlika je u razini dodatnog opterećenja na stup. Proračunske vrijednosti navedene su u tablici 6.5.:

Tablica 6.5. Izuzetna izvanredna opterećenja prema 69.1.a)

Tip profila	Element br.	von Misesovo naprezanje (MPa)
L80x80x8	4	52,20
	38	50,03
L60x60x6	59	21,94
	81	18,28
UPE80	51	63,99
	32	59,18
ploče 100x20	53	20,17
	34	18,14

Usporedbom svih izračunatih vrijednosti von Misesova naprezanja s dopuštenim vrijednostima (6.2), nameće se zaključak da navedena konstrukcija u potpunosti zadovoljava zahtjeve pravilnika u pogledu čvrstoće. Unatoč zadovoljavajućim razinama naprezanja, prikaz deformacija ukazuje na potrebu dodatnog osiguranja spojnih veza, naročito u području konzola, što je očito prema Slici 6.1..

6.3. Von Misesova naprezanja u stupu s „jela“ glavom

Analiza za stup s jela glavom provodi se po istom principu kao i za „delta“ stup, a kategorizirani rezultati prikazani su tablično (Tablica 6.6. - 6.9.). Grafički pregled naprezanja i deformacije u relativnom mjerilu također je priložen u nastavku (Slika 6.2.).

Računske vrijednosti von Misesova naprezanja za normalna opterećenja prema članku 68. pravilnika [6] iznose:

Tablica 6.6. Proračunata normalna opterećenja prema 68.1.a)

Tip profila	Element br.	von Misesovo naprezanje (MPa)
L80x80x8	86	47,79
	32	46,24
L60x60x6	60	12,32
	88	11,54
UPE80	65	45,83
	82	45,73
ploče 100x20	7	6,86
	6	6,57

Tablica 6.7. Proračunata normalna opterećenja prema 68.1.b)

Tip profila	Element br.	von Misesovo naprezanje (MPa)
L80x80x8	266	69,69
	235	60,69
L60x60x6	88	17,79
	162	17,21
UPE80	43	19,58
	85	15,05
ploče 100x20	84	2,83
	83	2,54

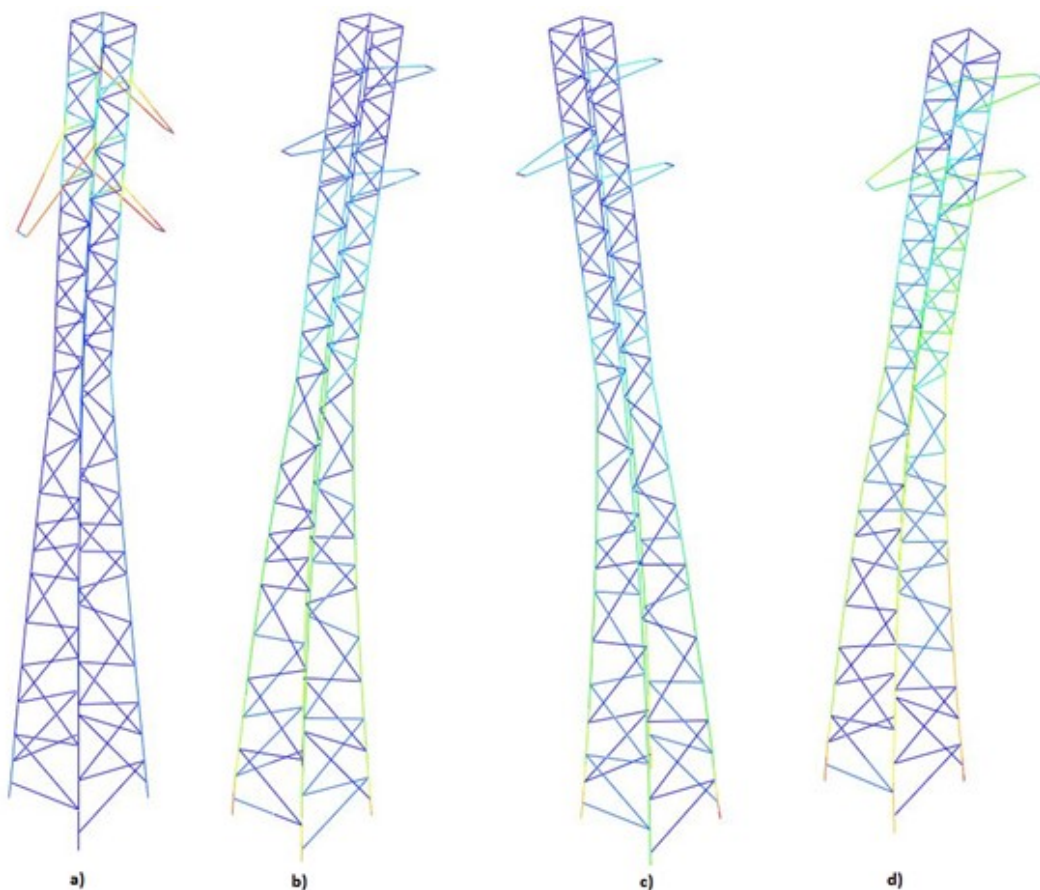
Tablica 6.8. Proračunata normalna opterećenja prema 68.1.c)

Tip profila	Element br.	von Misesovo naprezanje (MPa)
L80x80x8	255	40,05
	266	33,33
L60x60x6	174	9,96
	139	8,87
UPE80	85	12,24
	8	11,43
ploče 100x20	6	1,79
	7	1,53

Vrijednosti von Misesova naprezanja za izvanredna opterećenja prema članku 69. iznose:

Tablica 6.9. Proračunata izvanredna opterećenja prema 69.1.a)

Tip profila	Element br.	von Misesovo naprezanje (MPa)
L80x80x8	32	70,56
	255	67,65
L60x60x6	174	47,79
	139	47,49
UPE80	43	55,59
	65	47,24
ploče 100x20	7	21,31
	67	18,54



Slika 6.2. Naprezanja u stupa „jela“: a) sukladno s 68.1.a); b) sukladno s 68.1.b); c) sukladno s 68.1.c); d) sukladno s 69.1.a)

Utjecaj izuzetnog dodatnog opterećenja analiziran je prema članku 69. pravilnika [6]. Izračunate vrijednosti von Misesova naprezanja navedene su u tablici 6.10.:

Tablica 6.10. Izuzetna izvanredna opterećenja prema 69.1.a)

Tip profila	Element br.	von Misesovo naprezanje (MPa)
L80x80x8	32	87,93
	255	68,78
L60x60x6	174	47,76
	139	47,55
UPE80	43	68,12
	65	64,69
ploče 100x20	7	22,67
	67	19,75

Proračunata razina Misesova naprezanja za stup s jela glavom sugerira kako idejna konstrukcija u potpunosti zadovoljava sva zakonom propisana pravila čak i za različite izvedbe glava. Valja imati na umu da je analiza provedena za slučaj osnovnog opterećenje jednim vodičem po konzoli. Dodatna užad i oprema može bitno utjecati na stabilnost i čvrstoću cjelokupne konstrukcije, no s obzirom na odstupanje proračunatog naprezanja i dopuštenog naprezanja, stup je adekvatno dimenzioniran za standardna ovješnja, te omogućava dodatne mogućnosti upotrebe.

6.4. Proračun prema eurokodu

Europski standard „Eurokod 3“, normativne oznake EN 1993-1-1:2005, diktira karakteristike čeličnih konstrukcija. Premda norma definira sve zahtjeve na čelične konstrukcije, u kontekstu rada bitne su samo odredbe koje se odnose na konstrukcijsku stabilnost i sigurnost [21]. Proračuni se vrše s obzirom na:

- tlačnu čvrstoću
- savojnu čvrstoću
- posmičnu čvrstoću
- otpornost na izvijanje
- interakciju momenata savijanja, aksijalnih i reznih sila

Rezultati proračuna prema eurokodu upotpunjeni s vrijednostima Misesova naprezanja iz prethodnog poglavlja daju potpunu sliku o uporabljivosti konstrukcije i potencijalnim optimizacijama iste. Eurokod se oslanja na teorije elastičnosti i plastičnosti te s obzirom na iste definira granična stanja konstrukcije. Manifestacija graničnog stanja može biti u vidu:

- prekomjerne deformacije i progiba
- oscilacija
- lokalnih oštećenja [22]

6.4.1. Tlačna čvrstoća

Otpornost poprečnog presjeka na djelovanje tlačne sile uvjetovano je oblikom i dimenzijama presjeka. Bitan element u ovom razmatranju je otpornost na izbočivanje u kontekstu nosivosti. S obzirom na vrstu presjeka postoje dvije mogućnosti:

Poprečni presjeci nisu vitki, u potpunosti se suprotstavljaju tlaku - poprečni presjeci klase 1,2 i 3

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.3)$$

Poprečni presjek je vitak, samo dio presjeka se suprotstavlja tlaku - poprečni presjeci klase 4

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.4)$$

pri čemu vrijedi:

$N_{c,Rd}$ - proračunska nosivost presjeka na tlak (N)

A - površina poprečnog presjeka (m²)

A_{eff} - površina efektivnog presjeka (m²)

f_y - granica popuštanja (Pa)

γ_{M0} - parcijalni koeficijent sigurnosti

Kako bi se osigurala otpornost presjeka na tlak, vrijednost proračunske nosivosti nužno mora biti veća od proračunate aksijalne sile u profilu.

6.4.2. Savojna čvrstoća

Kako bi se spriječilo savijanje profila, vrši se proračun otpornosti za tri potencijalna slučaja, pri čemu moment nosivosti presjeka mora biti veći od proračunskog:

Za poprečne presjeke klase 1 i 2 – plastična čvrstoća

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.5)$$

Za poprečne presjeke klase 3 – elastična čvrstoća

$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{el,min} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.6)$$

Za poprečne presjeke klase 4 – elastična čvrstoća

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff,min} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.7)$$

gdje vrijedi:

$M_{c,Rd}$ - proračunski moment nosivosti poprečnog presjeka (Nm)

W_{pl} - plastični moment otpora poprečnog presjeka (m³)

$W_{el,min}$ - minimalan elastični moment otpora poprečnog presjeka (m³)

$W_{eff,min}$ - minimalan elastični moment otpora efektivnog presjeka (m³)

6.4.3. Posmična čvrstoća

Proračun posmične čvrstoće se generalno vrši samo za male ili izrazito opterećene nosače, pa zbog posmičnog djelovanja postoji mogućnost kolapsa. Za posmičnu čvrstoću mora vrijediti da je proračunata sila manja od dopuštene posmične sile.

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \quad (6.8)$$

gdje vrijedi:

$V_{pl,Rd}$ - računski posmični čvrstoća (N)

A_v – efektivni poprečni presjek (m²)

6.4.4. Otpornost na izvijanje

Eksperimentalni podatci ukazali su na mogućnost loma elementa čak i u situacijama kad su svi kriteriji čvrstoće zadovoljeni. Taj rezultat je posljedica pojave sekundarnih deformacijskih oblika koji su uvjetovani primarnim, što je čest slučaj kod vitkih profila. Ovisno o stupnju vitkosti profila, sila koja će uvjetovati izvijanje vitkog elementa iznosi:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot \beta_A \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.9)$$

gdje vrijedi:

$N_{b,Rd}$ - računski otpornost na izvijanje (N)

χ - redukcijski faktor

β_A - redukcijski faktor površine

6.4.5. Interakcija momenta savijanja, aksijalnih i reznih sila

Interakcija momenata savijanja i sila uzima u obzir sve vanjske utjecaje na dani poprečni presjek. Ukupno djelovanje mora biti manje ili jednako 1, a opisano je izrazom:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{Vy,Rd}} \leq 1 \quad (6.10)$$

Pri tome mora biti zadovoljeno:

$$N_{Sd} \leq 0,25N_{Rd}$$

$$V_{Sd} \leq 0,5V_{Rd}$$

$$M_{y,Sd} \leq 0,5M_{Vy,Rd}$$

6.4.6. Određivanje klase poprečnog presjeka

Za sve profile iz konstrukcijskog čelika S355 deformacija se može izračunati kao:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= (235/f_y)^{0,5} \\ \varepsilon &= (235/355)^{0,5} = 0,81\end{aligned}\tag{6.11}$$

Za profil L80x80x8, klasa 3 je definirana izrazom:

$$\begin{aligned}\frac{h}{t} &\leq 15 \cdot \varepsilon, \text{ za klasu 3} \\ \frac{80}{8} &= 10 \leq 12,15\end{aligned}\tag{6.12}$$

Izraz je zadovoljen, presjek pripada klasi 3

Za profil L60x60x6, klasa 3 je definirana izrazom:

$$\begin{aligned}\frac{h}{t} &\leq 15 \cdot \varepsilon \\ \frac{60}{6} &= 10 \leq 12,15\end{aligned}$$

Izraz je zadovoljen, presjek pripada klasi 3

Za profil UPE80, klasa 1 je definirana izrazom:

$$\begin{aligned}\frac{c}{t} &\leq 9 \cdot \varepsilon \\ \frac{46}{7} &= 6,57 \leq 7,29\end{aligned}$$

Izraz je zadovoljen, presjek pripada klasi 1

Ploče dimenzija 100x20 spadaju u klasu 1. **Usvojena klasa 1**

6.5. Proračun stupa s „delta“ glavom prema eurokodu

6.5.1. Analiza prema eurokodu za slučaj opterećenja 68.1.a)

Profil L80x80x8

Provjera na savijanje:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{el,min} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{c,y,Rd} = \frac{12,58 \cdot 10^3 \cdot 355}{1,1} = 4060 \text{ Nm}$$

$$M_{Sd} = 0,59 \text{ kNm} < M_{c,y,Rd} = 4,06 \text{ kNm}$$

Uvjet zadovoljen.

Provjera na tlak:

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$N_{c,Rd} = \frac{1230 \cdot 355}{1,1} = 396,95 \text{ kN}$$

$$N_{Sd} = 5,21 \text{ kN} < N_{c,Rd} = 396,95 \text{ kN}$$

Uvjet zadovoljen.

Provjera na posmik:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{734 \cdot 355}{\sqrt{3} \cdot 1,1} = 136,76 \text{ kN}$$

$$V_{Sd} = 0,66 \text{ kN} < V_{pl,y,Rd} = 136,76 \text{ kN}$$

Uvjet zadovoljen.

Provjera na izvijanje:

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9}{355 \cdot 10^6}} = 76,41$$

$$\lambda_y = \lambda_z = \frac{l_{iy}}{l_y}$$

$$\lambda_y = \frac{280}{24,3} = 11,52$$

$$\overline{\lambda}_y = \frac{\lambda_y}{\lambda_1}$$

$$\overline{\lambda}_y = \frac{11,52}{76,41} = 0,15$$

$$\chi = 1$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot \beta_A \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{1 \cdot 1 \cdot 1230 \cdot 355}{1,1} = 396,95 \text{ kN}$$

$$N_{Sd} = 5,21 \text{ kN} < N_{b,Rd} = 396,95 \text{ kN}$$

Uvjet zadovoljen.

Interakcija momenta savijanja i uzdužnih sila:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{Vy,Rd}} \leq 1$$

$$\frac{5,21}{396,95} + \frac{0,66}{136,76} + \frac{0,59}{4,06} = 0,16 \leq 1$$

Uvjet zadovoljen.

Profil L60x60x6

Provjera na savijanje:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{el,min} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{c,y,Rd} = \frac{5,29 \cdot 10^3 \cdot 355}{1,1} = 1707,22 \text{ Nm}$$

$$M_{Sd} = 0,06 \text{ kNm} < M_{c,y,Rd} = 1,71 \text{ kNm}$$

Uvjet zadovoljen.

Provjera na tlak:

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$N_{c,Rd} = \frac{691 \cdot 355}{1,1} = 223 \text{ kN}$$

$$N_{Sd} = 1,73 \text{ kN} < N_{c,Rd} = 223 \text{ kN}$$

Uvjet zadovoljen.

Provjera na posmik:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{415 \cdot 355}{\sqrt{3} \cdot 1,1} = 77,33 \text{ kN}$$

$$V_{Sd} = 3,18 \text{ kN} < V_{pl,y,Rd} = 77,33 \text{ kN}$$

Uvjet zadovoljen.

Provjera na izvijanje:

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9}{355 \cdot 10^6}} = 76,41$$

$$\lambda_y = \lambda_z = \frac{l_{iy}}{l_y}$$

$$\lambda_y = \frac{258}{18,2} = 14,18$$

$$\overline{\lambda}_y = \frac{\lambda_y}{\lambda_1}$$

$$\overline{\lambda}_y = \frac{14,18}{76,41} = 0,19$$

$$\chi = 1$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot \beta_A \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{1 \cdot 1 \cdot 691 \cdot 355}{1,1} = 223 \text{ kN}$$

$$N_{Sd} = 1,73 \text{ kN} < N_{c,Rd} = 223 \text{ kN}$$

Uvjet zadovoljen.

Interakcija momenta savijanja i uzdužnih sila:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{Vy,Rd}} \leq 1$$

$$\frac{1,73}{223} + \frac{3,18}{77,33} + \frac{0,06}{1,71} = 0,08 \leq 1$$

Uvjet zadovoljen.

Profil UPE80

Provjera na savijanje:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{el,pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{c,z,Rd} = \frac{14,28 \cdot 10^3 \cdot 355}{1,1} = 4,61 \text{ kNm}$$

$$M_{Sd} = 1,23 \text{ kNm} < M_{c,z,Rd} = 4,61 \text{ kNm}$$

Uvjet zadovoljen.

Provjera na tlak:

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$N_{c,Rd} = \frac{1010 \cdot 355}{1,1} = 325,95 \text{ kN}$$

$$N_{Sd} = 2,03 \text{ kN} < N_{c,Rd} = 325,95 \text{ kN}$$

Uvjet zadovoljen.

Provjera na posmik:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{758 \cdot 355}{\sqrt{3} \cdot 1,1} = 141,24 \text{ kN}$$

$$V_{Sd} = 1,16 \text{ kN} < V_{pl,z,Rd} = 141,24 \text{ kN}$$

Uvjet zadovoljen.

Provjera na izvijanje:

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9}{355 \cdot 10^6}} = 76,41$$

$$\lambda_y = \frac{l_{iy}}{l_y} \rightarrow \lambda_y = \frac{1225}{32,6} = 37,58$$

$$\lambda_z = \frac{l_{iz}}{l_z} \rightarrow \lambda_z = \frac{1225}{15,9} = 77,04$$

$$\overline{\lambda}_z = \frac{\lambda_z}{\lambda_1}$$

$$\overline{\lambda}_z = \frac{77,04}{76,41} = 1,01$$

$$\chi = 0,56$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot \beta_A \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{0,56 \cdot 1 \cdot 1010 \cdot 355}{1,1} = 182,53 \text{ kN}$$

$$N_{Sd} = 2,03 \text{ kN} < N_{c,Rd} = 182,53 \text{ kN}$$

Uvjet zadovoljen.

Interakcija momenta savijanja i uzdužnih sila:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{Vy,Rd}} \leq 1$$

$$\frac{2,03}{325,95} + \frac{1,16}{141,24} + \frac{1,23}{4,61} = 0,28 \leq 1$$

Uvjet zadovoljen.

Ploča 100x20

Provjera na savijanje:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{el,pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{c,y,Rd} = \frac{6,6 \cdot 10^3 \cdot 355}{1,1} = 2,13 \text{ kNm}$$

$$M_{Sd} = 0,08 \text{ kNm} < M_{c,y,Rd} = 2,13 \text{ kNm}$$

Uvjet zadovoljen.

Provjera na tlak:

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$N_{c,Rd} = \frac{2000 \cdot 355}{1,1} = 645,45 \text{ kN}$$

$$N_{Sd} = 1,44 \text{ kN} < N_{c,Rd} = 645,45 \text{ kN}$$

Uvjet zadovoljen.

Provjera na posmik:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{2000 \cdot 355}{\sqrt{3} \cdot 1,1} = 372,65 \text{ kN}$$

$$V_{Sd} = 1,35 \text{ kN} < V_{pl,y,Rd} = 372,65 \text{ kN}$$

Uvjet zadovoljen.

Provjera na izvijanje:

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9}{355 \cdot 10^6}} = 76,41$$

$$\lambda_y = \frac{l_{iy}}{l_y} \rightarrow \lambda_y = \frac{200}{10} = 20$$

$$\lambda_z = \frac{l_{iz}}{l_z} \rightarrow \lambda_z = \frac{200}{50} = 4$$

$$\overline{\lambda}_y = \frac{\lambda_y}{\lambda_1}$$

$$\overline{\lambda}_y = \frac{20}{76,41} = 0,26$$

$$\chi = 0,97$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot \beta_A \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{0,97 \cdot 1 \cdot 2000 \cdot 355}{1,1} = 626,09 \text{ kN}$$

$$N_{Sd} = 1,44 \text{ kN} < N_{c,Rd} = 626,09 \text{ kN}$$

Uvjet zadovoljen.

Interakcija momenta savijanja i uzdužnih sila:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{Vy,Rd}} \leq 1$$

$$\frac{1,44}{645,45} + \frac{1,35}{372,65} + \frac{0,08}{2,13} = 0,04 \leq 1$$

Uvjet zadovoljen.

6.5.2. Analiza prema eurokodu za slučaj opterećenja 68.1.b) – 69.1.

Radi jednostavnosti i preglednosti proračun prema normi EC3 za preostale stavke članka 68. i 69., će se prikazati tablično, s proračunskim i dopuštenim silama i momentima (Tablica 6.11. – 6.14.).

Tablica 6.11. Provjera prema EC3 za 68.1.b)

<i>profil</i> <i>L80x80x8</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	307,12	2,01	41,52	2,01	0,38
Dopuštene	4059,90	396,95	136,76	396,95	1
<i>profil</i> <i>L60x60x6</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	64,64	0,45	5,52	0,45	0,11
Dopuštene	1707,22	223,00	77,33	223,00	1
<i>profil UPE80</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	346,03	0,48	1,35	0,48	0,09
Dopuštene	4610,00	325,95	141,24	182,53	1
<i>ploče 100x20</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	43,15	1,23	0,59	1,23	0,02
Dopuštene	2130,00	645,45	372,65	626,09	1

Svi uvjeti su zadovoljeni.

Tablica 6.12. Provjera prema EC3 za 68.1.c)

<i>profil</i> <i>L80x80x8</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	218,21	1,16	24,55	1,16	0,24
Dopuštene	4059,90	396,95	136,76	396,95	1
<i>profil</i> <i>L60x60x6</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	27,87	0,43	3,05	0,43	0,058
Dopuštene	1707,22	223	77,33	223	1
<i>profil UPE80</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	294,05	0,48	0,45	0,48	0,068
Dopuštene	4610	325,95	141,24	182,53	1
<i>ploče 100x20</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	41,75	0,46	0,416	0,46	0,021
Dopuštene	2130	645,45	372,65	626,09	1

Tablica 6.13. Provjera prema EC3 za 69.1.

<i>profil</i> <i>L80x80x8</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	331,08	3,93	37,09	3,93	0,36
Dopuštene	4059,90	396,95	136,76	396,95	1
<i>profil</i> <i>L60x60x6</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	91,58	0,83	6,32	0,83	0,14
Dopuštene	1707,22	223	77,33	223	1
<i>profil UPE80</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	707,47	1,54	8,56	1,54	0,22
Dopuštene	4610	325,95	141,24	182,53	1
<i>ploče 100x20</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	344,63	4,70	6,60	4,70	0,19
Dopuštene	2130	645,45	372,65	626,09	1

Svi uvjeti su zadovoljeni.

Tablica 6.14. Provjera prema EC3 za izuzetno dodatno opterećenje

<i>profil</i> <i>L80x80x8</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	557,25	5,92	36,24	5,92	0,42
Dopuštene	4059,90	396,95	136,76	396,95	1
<i>profil</i> <i>L60x60x6</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	108,20	1,49	6,48	1,49	0,15
Dopuštene	1707,22	223	77,33	223	1
<i>profil UPE80</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	1159,53	2,32	8,59	2,32	0,32
Dopuštene	4610	325,95	141,24	182,53	1
<i>ploče 100x20</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	395,87	4,13	7,13	4,13	0,21
Dopuštene	2130	645,45	372,65	626,09	1

Svi uvjeti su zadovoljeni.

6.6. Proračun stupa s „jela“ glavom prema eurokodu

Tablica 6.15. Provjera prema EC3 za 68.1.a)

<i>profil</i> <i>L80x80x8</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	512,40	4,30	3,18	4,30	0,52
Dopuštene	4059,90	396,95	136,76	396,95	1
<i>profil</i> <i>L60x60x6</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	44,47	1,54	4,12	1,54	0,23
Dopuštene	1707,22	223	77,33	223	1
<i>profil UPE80</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	1272,46	4,37	1,169	4,37	0,35
Dopuštene	4610	325,95	141,24	182,53	1
<i>Ploče 100x20</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	96,22	1,37	1,51	1,37	0,07
Dopuštene	2130	645,45	372,65	626,09	1

Tablica 6.16. Provjera prema EC3 za 68.1.b)

<i>profil</i> <i>L80x80x8</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	337,32	1,20	49,92	1,20	0,45
Dopuštene	4059,90	396,95	136,76	396,95	1
<i>profil</i> <i>L60x60x6</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	84,13	0,37	7,10	0,37	0,14
Dopuštene	1707,22	223	77,33	223	1
<i>profil UPE80</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	361,13	1,01	1,66	1,01	0,09
Dopuštene	4610	325,95	141,24	182,53	1
<i>Ploče 100x20</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	47,74	1,20	0,68	1,20	0,03
Dopuštene	2130	645,45	372,65	626,09	1

Svi uvjeti su zadovoljeni.

Tablica 6.17. Provjera prema EC3 za 68.1.c)

<i>profil</i> <i>L80x80x8</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	228,11	1,03	25,88	1,03	0,25
Dopuštene	4059,90	396,95	136,76	396,95	1
<i>profil</i> <i>L60x60x6</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	30,55	0,36	3,23	0,36	0,06
Dopuštene	1707,22	223	77,33	223	1
<i>profil UPE80</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	33,09	0,97	0,49	0,97	0,01
Dopuštene	4610	325,95	141,24	182,53	1
<i>Ploče 100x20</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	14,67	0,42	0,40	0,42	0,01
Dopuštene	2130	645,45	372,65	626,09	1

Tablica 6.18. Provjera prema EC3 za 69.1.

<i>profil</i> <i>L80x80x8</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	727,29	3,04	52,12	3,04	0,57
Dopuštene	4059,90	396,95	136,76	396,95	1
<i>profil</i> <i>L60x60x6</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	169,70	2,53	15,15	2,53	0,31
Dopuštene	1707,22	223	77,33	223	1
<i>profil UPE80</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	717,68	4,50	8,55	4,50	0,23
Dopuštene	4610	325,95	141,24	182,53	1
<i>Ploče 100x20</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	325,50	5,53	6,26	5,53	0,18
Dopuštene	2130	645,45	372,65	626,09	1

Svi uvjeti su zadovoljeni.

Tablica 6.19. Provjera prema EC3 za izuzetno dodatno opterećenje

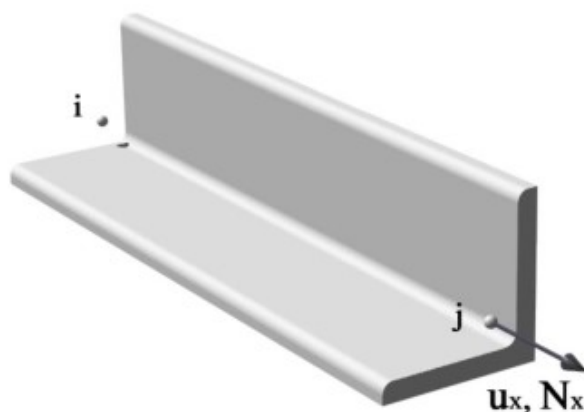
<i>profil</i> <i>L80x80x8</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	922,09	4,06	52,20	4,06	0,62
Dopuštene	4059,90	396,95	136,76	396,95	1
<i>profil</i> <i>L60x60x6</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	161,36	2,86	15,14	2,86	0,30
Dopuštene	1707,22	223	77,33	223	1
<i>profil UPE80</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	351,35	6,16	8,58	6,16	0,16
Dopuštene	4610	325,95	141,24	182,53	1
<i>Ploče 100x20</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	304,98	6	6,85	6	0,17
Dopuštene	2130	645,45	372,65	626,09	1

Svi uvjeti su zadovoljeni.

Navedene tablice (Tablica 6.15. – 6.19.) predaju rezultate u svim slučajevima opterećenja, za izvedbu stupa s „jela“ glavom. Na temelju proračunatih rezultata prema eurokod normi te pripadnih misesovih naprezanja, možemo zaključiti da osnovna konstrukcija stupa dalekovoda u potpunosti zadovoljava sve zahtjeve čvrstoće konstrukcije. Potencijalne uštede u smislu redukcije dimenzija profila razmatrati će se u jednom od narednih poglavlja.

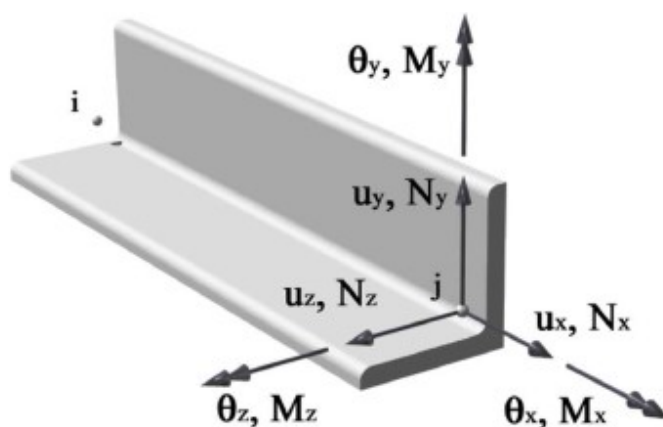
7. DEFORMACIJA OBLIKA STUPA

Rešetkastu konstrukciju tvori skup međusobno zglobno spojenih elemenata, povezanih tako da čine jedinstvenu strukturu, pri čemu su elementi izloženi samo djelovanju aksijalnih sila. Takav pristup idealizira konstrukciju, te podrazumijeva da vanjske sile djeluju u čvorovima, a momenti savijanja u čvorovima su izrazito mali ili zanemarivi (Slika 7.1.) [23, 24].



Slika 7.1. Opterećenje L profila pri zglobnom spoju [25]

Realni slučajevi odstupaju od matematičkog modela, bilo da je riječ zbog necentriranih spojeva ili kruto ostvarene veze primjerice zavarivanje. Posljedično, elementi konstrukcije izloženi su naprezanju u smjeru svih glavnih osi (Slika 7.2.).



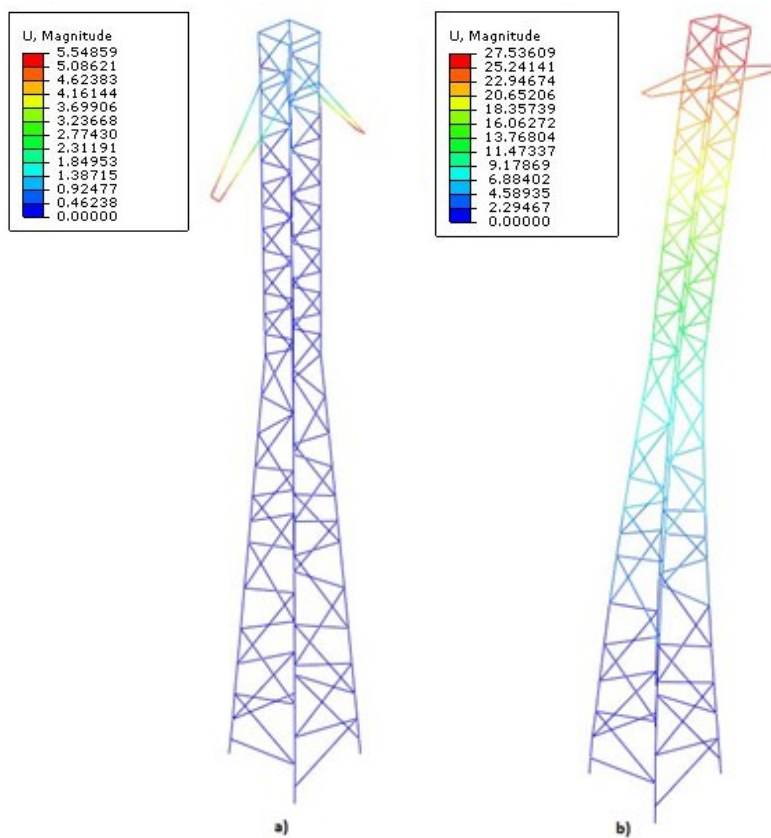
Slika 7.2. Opterećenje L profila pri krutom spoju [25]

Rešetkasta konstrukcija se općenito može promatrati kao kruti spoj grednih elemenata. Naime, eksperimentalno je utvrđeno kako su odstupanja u naprezanjima konstrukcije izvedene iz kruto spojenih greda i idealiziranih zglobno spojenih profila, izrazito mala i praktički zanemariva [26]. Najveće naprezanje se uvijek javlja u smjeru uzdužne osi, dok preostala naprezanja, ukoliko postoje, imaju mali efekt na deformaciju oblika profila. Veće vrijednosti naprezanja i deformacije se mogu očekivati kod izvedbe s krutim spojevima, pa je cjelokupna analiza na strani veće sigurnosti.

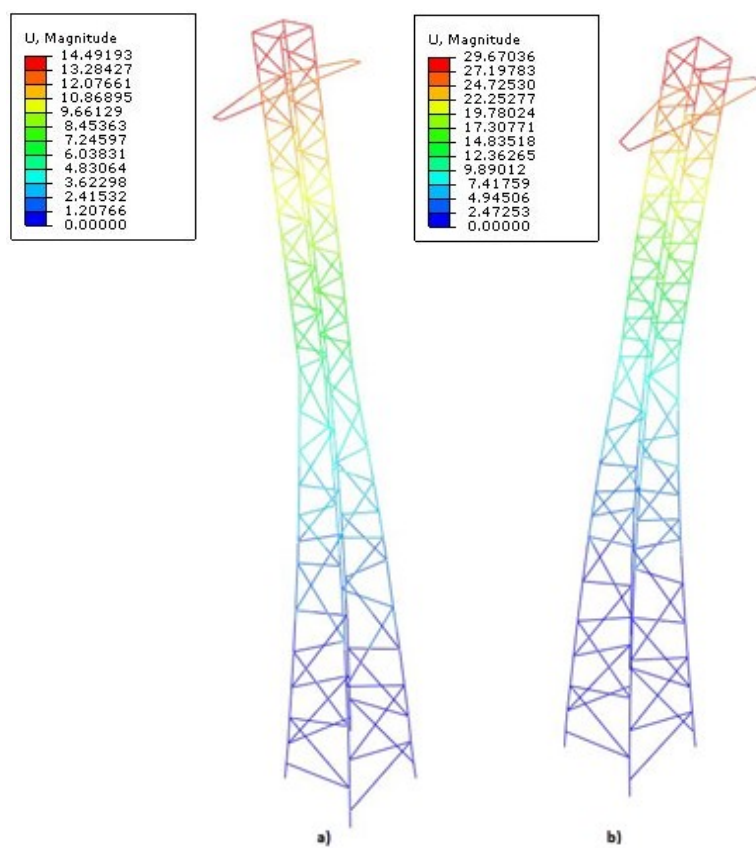
Deformacije na razini profila manifestirati će se u vidu skraćanja ili produljenja osnovnih profila, pri čemu zbog veličine jednostranog opterećenja konstrukcije može doći do savijanja pojedinih profila u odgovarajućem smjeru. Zbog velikog broja upotrijebljenih elemenata, neće se promatrati pojedinačne deformacije profila. Analiza deformacija promatrati će prostorne pomake cjelokupne rešetkaste konstrukcije, točnije translaciju i rotaciju elemenata ovisno o slučaju opterećenja.

7.1. Stup s „delta“ glavom

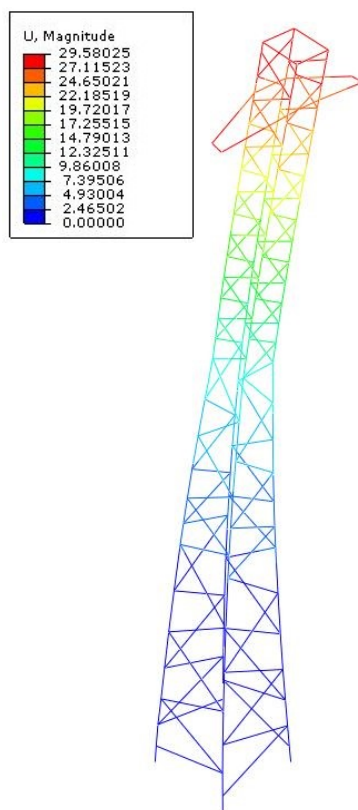
Translacijski pomaci na razini stupa, točnije svakog od sastavnih elemenata, mogu se analizirati prema priloženim slikama 7.3. - 7.5.. Slike prikazuju i kategoriziraju veličinu pomaka za svaki od elemenata. Rezultati su prikazani za svaki slučaj opterećenja, izraženi u milimetrima, a obojani prema elementima s najvećim pomacima. Ukupna defleksija konstrukcije rezultat je sumarnih pomaka svih elemenata stupa.



Slika 7.3. Translacija elemenata stupa „delta“: a) u skladu s 68.1.a); b) u skladu s 68.1.b)



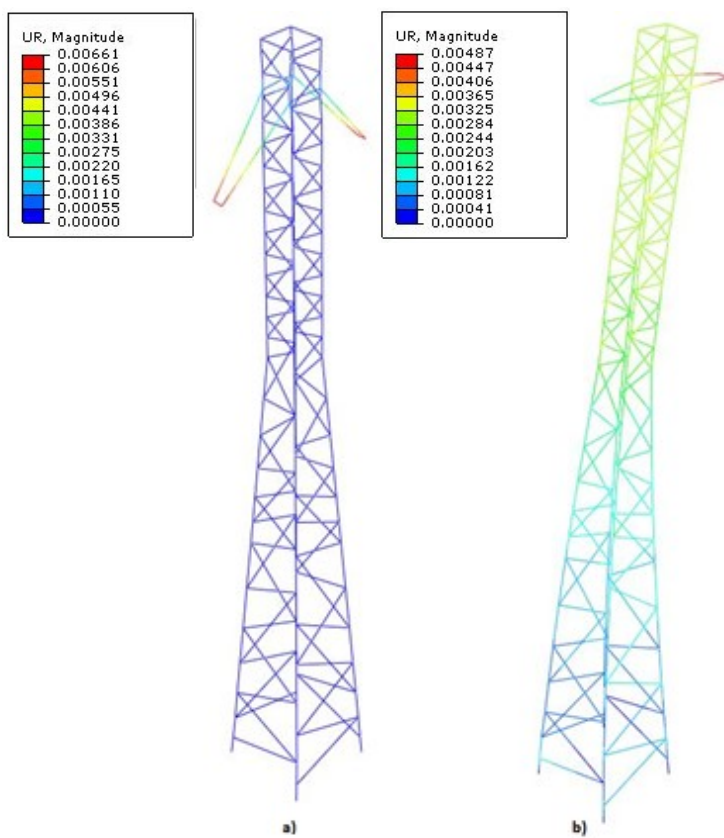
Slika 7.4. Translacija elemenata stupa „delta“: a) u skladu s 68.1.c); b) u skladu s 69.1.a)



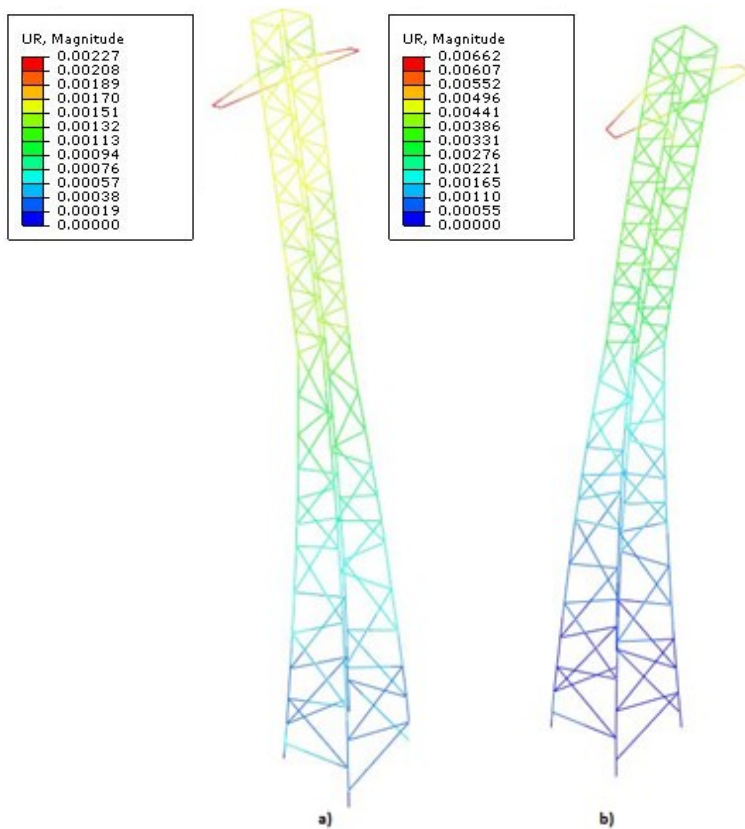
Slika 7.5. Translacija elemenata stupa „delta“ pri izuzetnom dodatnom opterećenju

Pojedinačni pomaci elemenata su relativno mali, no s obzirom na broj elemenata i veličinu konstrukcije, značajno doprinose ukupnoj deformaciji oblika konstrukcije. Najveći otklon pojedinog elementa iznosi približno 30 mm. Unatoč tome, generirani faktor stabilnosti ne daje naznake da je konstrukcija nestabilna.

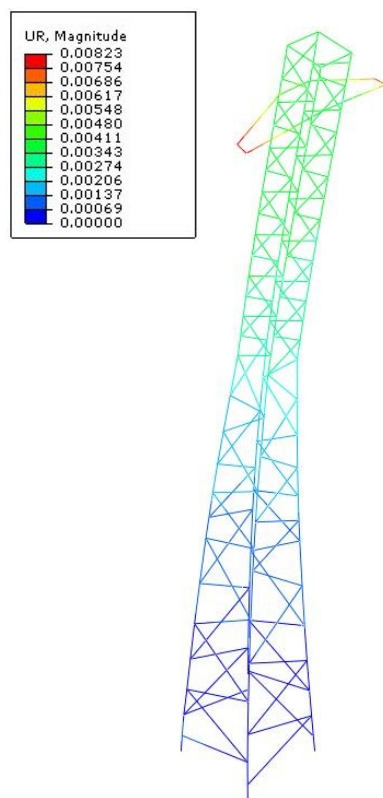
Kutni pomaci elemenata izraženi su u radijanima. Priložene slike 7.6. - 7.8., prikazuju kategorizirane kutne pomake, obojane prema veličini pomaka, a sortirane prema vrsti opterećenja. Slično kao i kod pomaka, pojedinačni kutni otkloni su mali, no uvjetuju značajnije savijanje konstrukcije. Najveći kutni pomak iznosi približno $0,5^\circ$.



Slika 7.6. Rotacija elemenata stupa „delta“: a) u skladu s 68.1.a); b) u skladu s 68.1.b)



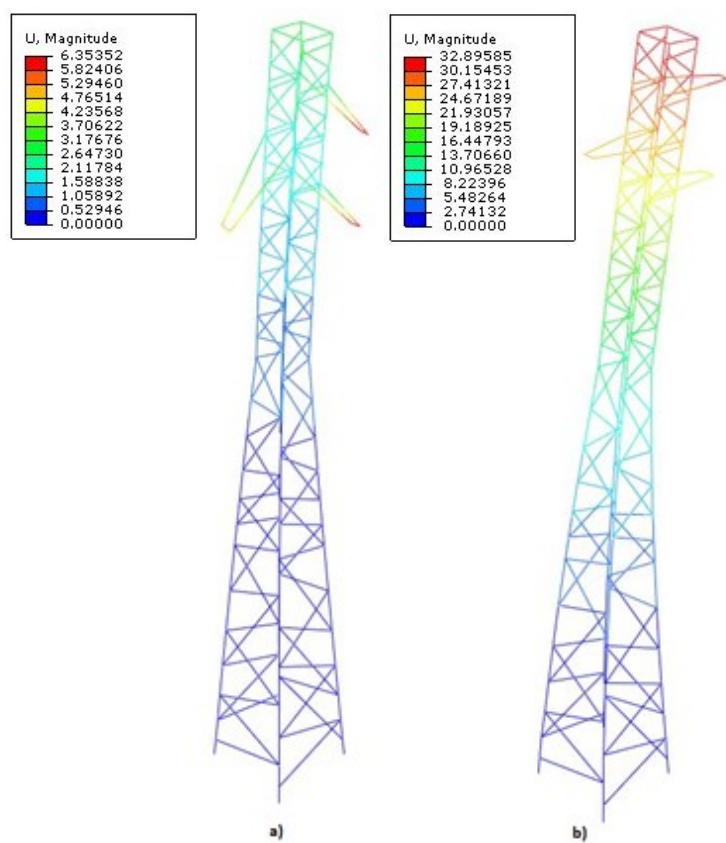
Slika 7.7. Rotacija elemenata stupa „delta“: a) u skladu s 68.1.c); b) u skladu s 69.1.a)



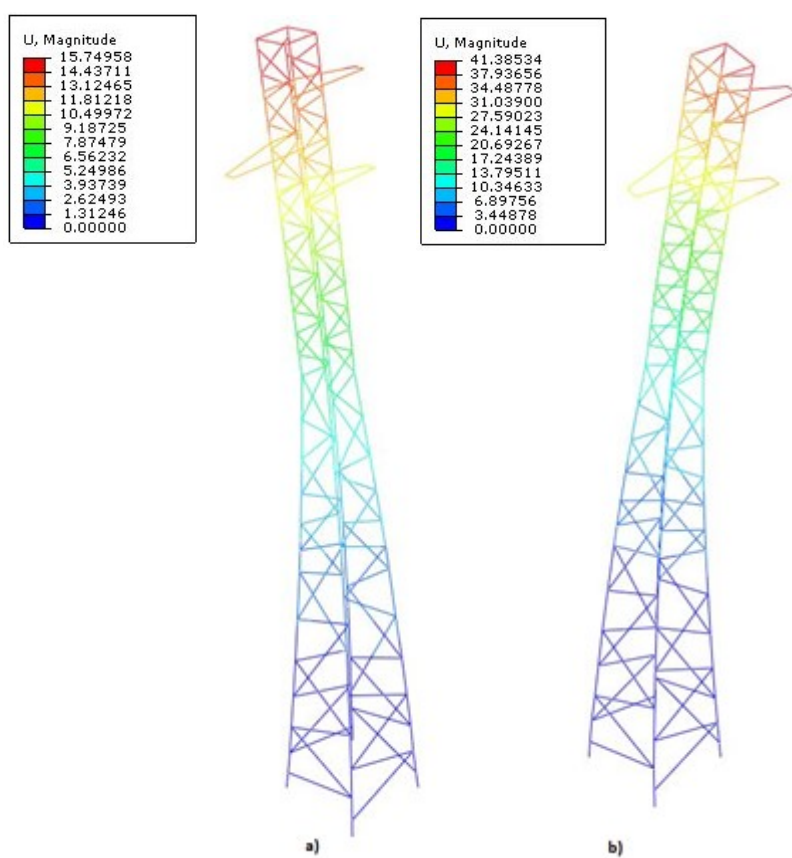
Slika 7.8. Rotacija elemenata stupa „delta“ pri izuzetnom dodatnom opterećenju

7.2. Stup s „jela“ glavom

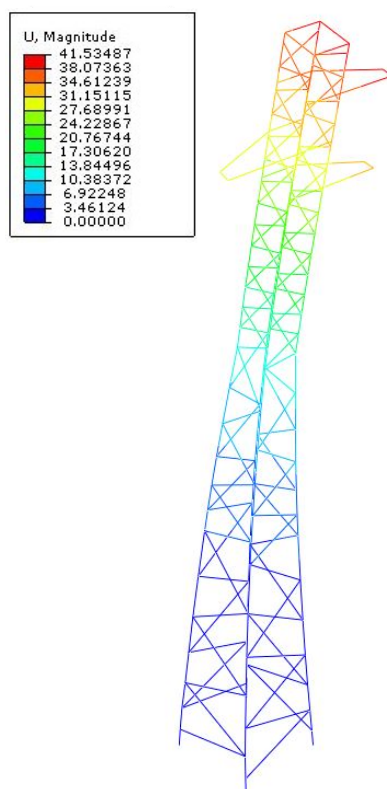
Translacijski pomaci za stup s „jela“ glavom obrađeni su i prikazani kao i za stup s „delta“ glavom. Rezultati translacija i rotacija elemenata su prikazani na slikama 7.9. – 7.14., izraženi u milimetrima odnosno radijanima. Slično navedenom, pomaci su relativno mali, no imaju veliki doprinos deformaciji oblika konstrukcije. Najveći otklon pojedinog elementa iznosi približno 42 mm. Najveći kutni pomak iznosi približno $0,55^\circ$. Stabilnost konstrukcije za dana opterećenja je zadovoljavajuća.



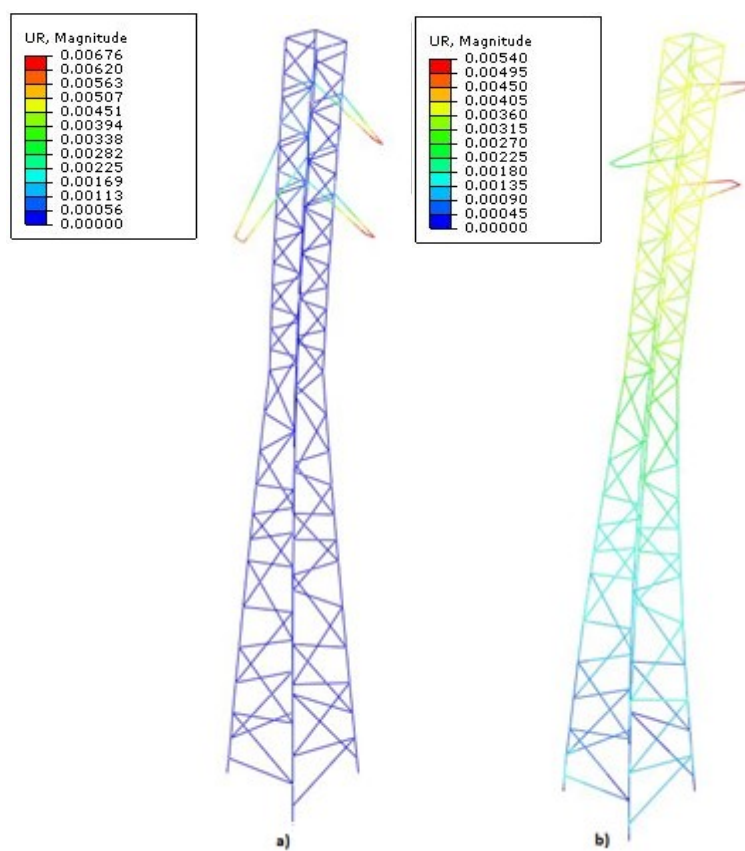
Slika 7.9. Translacija elemenata stupa „jela“: a) u skladu s 68.1.a); b) u skladu s 68.1.b)



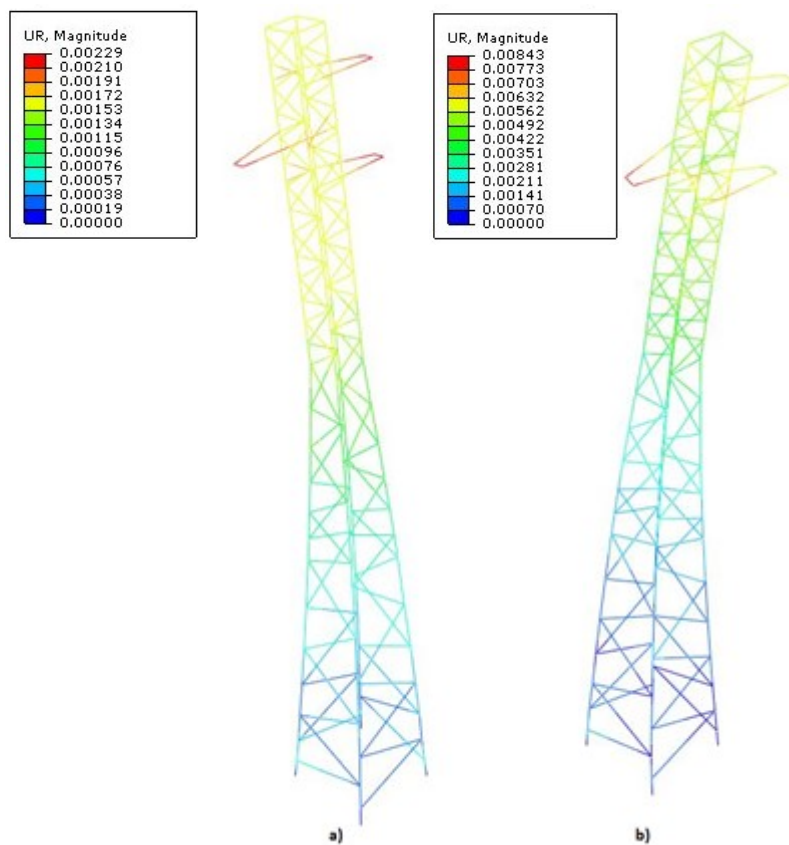
Slika 7.10. Translacija elemenata stupa jela: a) u skladu s 68.1.c); b) u skladu s 69.1.a)



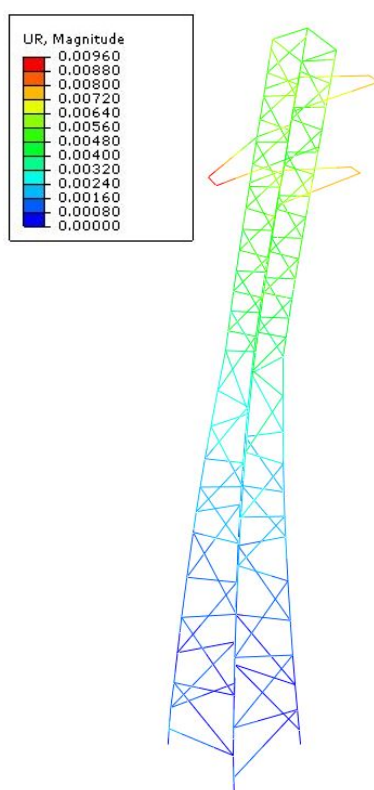
Slika 7.11. Translacija elemenata stupa „jela“ pri izuzetnom dodatnom opterećenju



Slika 7.12. Rotacija elemenata stupa „jela“: a) u skladu s 68.1.a); b) u skladu s 68.1.b)



Slika 7.13. Rotacija elemenata stupa „jela“: a) u skladu s 68.1.c); b) u skladu s 69.1.a)



Slika 7.14. Rotacija elemenata stupa „jela“ pri izuzetnom dodatnom opterećenju

7.3. Stabilnost konstrukcije

Na temelju pretpostavljene izvedbe konstrukcije te odabranih profila proračunao se pripadni faktor stabilnosti konstrukcije. Pravilnik jasno propisuje da je jedini mjerodavni element vrijednost naprezanja u danom profilu [6]. Kako sama vrijednost faktora nije definirana, a radni uvjeti i opterećenja u kritičnim situacijama određeni su pravilnikom, neće se stavljati veliki naglasak na uvjetovanje stabilnosti određenim koeficijentom. Ipak, za situacije izvanrednih opterećenja, u nastavku će biti prikazane vrijednosti faktora stabilnosti, a s obzirom na izvedbu stupa (Tablica 7.1.). Općenito govoreći, faktor stabilnosti je bitan element za utvrđivanje stabilnosti, a uvelike ovisi o izvijanju i savijanju profila, te ukupnoj deformaciji konstrukcije. Prema normi EC3, ukoliko nije definiran drugačije, za preporučeni faktor uzima se $\alpha_{cr} = 10$ [21].

Tablica 7.1. Faktori stabilnosti za kritične slučajeve

Tip stupa	Faktor stabilnosti za izvanredno opterećenje	Faktor stabilnosti za izuzetno izvanredno opterećenje
„delta“	12	12
„jela“	14	14

8. OPTIMIZACIJA I PROVJERA DIMENZIJA

Osnovna analiza čelično rešetkastog stupa provedena je primjenom metode konačnih elemenata. Korištena je relativno gruba diskretizacijska mreža. Primjenom finije mreže, rezultati su pokazali veliki stupanj sličnosti za svaki element. Oba slučaja ukazala su na velika odstupanja pojava naprezanja od dopuštenih. Posljedično, troškovi same izrade su nepotrebno visoki, te bi konstrukcija s dimenzijski manjim profilima adekvatno zadovoljavala sve slučajeve opterećenja prema pravilniku.

Optimizacija konstrukcije izvršena je primjenom fine mreže, s 10 puta više elemenata u odnosu na osnovnu. Proračunata ekvivalentna von Misesova naprezanja za navedeni slučaj i stupove, usporediti će se s dopuštenim za normalna i izvanredna opterećenja. Profili UPE80 i ploče 100x20 korišteni pri izradi konzola nisu mijenjani. Dimenzije pojasnika i ispuna su smanjene. Za pojasnike su umjesto L80x80x8 profila, odabrani L70x70x6 profili. Ispune su također reducirane, te su korišteni profili L50x50x5. Proračunata naprezanja za novu konstrukciju prikazana su tablično (Tablica 8.1., Tablica 8.2.).

Tablica 8.1. Naprezanja optimizirane konstrukcije za stup s „delta“ glavom

Slučaj opterećenja:	Najveće von Misesovo naprezanje (MPa)	Dopušteno naprezanje (MPa)
68.1. a)	104,48	236,70
68.1. b)	176,67	236,70
68.1. c)	142,08	236,70
69.1. a)	126,38	322,72

Tablica 8.2. Naprezanja optimizirane konstrukcije za stup s „jela“ glavom

Slučaj opterećenja:	Najveće von Misesovo naprezanje (MPa)	Dopušteno naprezanje (MPa)
68.1. a)	94,73	236,70
68.1. b)	197,17	236,70
68.1. c)	148,59	236,70
69.1. a)	172,67	322,72

Usporedbom naprezanja s dopuštenim, utvrđeno je da postoji mogućnost dodatne optimizacije konstrukcije. No, kao što je napomenuto, stup je promatran za osnovno opterećenje

jednim užetom po konzoli. Razlika u naprezanjima omogućava dodatna opterećenja u vidu vezanja dodatnih vodova i opreme, te pruža sigurnost u vidu čvrstoće za različite uvjete. S ekonomskog stajališta, ukupna masa stupa pri optimiziranoj izvedbi smanjena je za približna 30%, što se direktno odražava i na troškove samog stupa. Faktori stabilnosti za slučajeve izuzetnog izvanrednog opterećenja su prikazani u tablici 8.3.

Tablica 8.3. Faktori stabilnosti za kritične slučajeve

Tip stupa	Faktor stabilnosti za izvanredno opterećenje	Faktor stabilnosti za izuzetno izvanredno opterećenje
„delta“	7	7
„jela“	7	7

Provjera prema eurokodu izvršena je za slučajeve izuzetnog dodatnog opterećenja. Utvrđeno je da se najveće sile (momenti) i interakcije javljaju za navedene slučajeve opterećenja. Rezultati otpornosti prema eurokodu prikazani su tablično (Tablica 8.4., Tablica 8.5.). Slično kao i za provjeru prema naprezanjima, utvrđeno je adekvatno odstupanje opterećenja za korištene profile. No, kako bi se osigurala upotrebljivost stupova za dodatna ovješnja, odabrani profili su prihvaćeni i s obzirom na EC3 normu.

Tablica 8.4. Provjera stupa „delta“ za izuzetno dodatno opterećenje prema 69.1.

<i>profil</i> <i>L80x80x8</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	412,94	4,76	37,24	4,76	0,39
Dopuštene	4059,90	396,95	136,76	396,95	1
<i>profil</i> <i>L60x60x6</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	80,79	1,08	6,55	1,08	0,14
Dopuštene	1707,22	223	77,33	223	1
<i>profil UPE80</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	1167,16	2,31	8,58	2,31	0,32
Dopuštene	4610	325,95	141,24	182,53	1
<i>ploče 100x20</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	388,79	4,20	7,20	4,20	0,21
Dopuštene	2130	645,45	372,65	626,09	1

Tablica 8.5. Provjera stupa „jela“ za izuzetno dodatno opterećenje prema 69.1.

<i>profil</i> <i>L80x80x8</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	733,76	3,30	52,83	3,30	0,57
Dopuštene	4059,90	396,95	136,76	396,95	1
<i>profil</i> <i>L60x60x6</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	117,15	2,10	15,29	2,10	0,28
Dopuštene	1707,22	223	77,33	223	1
<i>profil UPE80</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	1207,24	7,21	8,62	7,21	0,34
Dopuštene	4610	325,95	141,24	182,53	1
<i>ploče 100x20</i>	provjera na savijanje (Nm)	provjera na tlak (kN)	provjera na posmik (kN)	provjera na izvijanje (kN)	provjera interakcija
Proračunske	303,54	6,03	6,88	6,03	0,17
Dopuštene	2130	645,45	372,65	626,09	1

Odluka za zadržavanje UPE profila je logična, pošto je UPE80 najmanji dostupni profil. Moguća je eventualna upotreba nešto manjeg UPN profila, no nije preporučljiva zbog narušavanja nosivosti konzola.

Profili koji se koriste za temelje, a prekriveni su betonom, također mogu biti reducirani. Njihove preporučene dimenzije nisu provjeravane jer u osnovi ne doprinose poboljšanju statičke analize stupa. Dimenzije ovise o željenoj čvrstoći temeljnog dijela i vrsti tla. Pojasnici koji izlaze iz temelja spadaju u kategoriju profila koji se mogu zamijeniti manjim, no s obzirom na konstrukciju, ukoliko se pristupi takvoj izvedbi, pogodno je postaviti dodatna ojačanja, pošto se u većini slučajeva tu javljaju najveća naprezanja.

Provjerom naprezanja za slučaj izvanrednog opterećenja koje uključuje interakciju dodatnog opterećenja i vjetra, utvrđeno je da znatno povećanje standardnih profila ne donosi poboljšanju čvrstoće konstrukcije. Kako bi se osigurala stabilnost u danom slučaju, potrebne su znatne modifikacije u vidu dodatnih potpora i ojačanja materijala.

9. ZAKLJUČAK

Ovim radom nastojala se definirati konstrukcija čelično rešetkastog stupa ZAH2, a u skladu s već postojećim osnovnim dizajnom. Analiza je provedena na jednoj simetričnoj i nesimetričnoj izvedbi glave. Koristeći idejna rješenja za same materijale i profile, cilj rada bila je izvedba takvog stupa koji će podnijeti sva opterećenja, a da pritom ne dolazi do kritičnog opterećenja i značajne deformacije. Primjenom metode konačnih elemenata, stup je u osnovnoj analizi diskretiziran na razini svakog pojedinačnog grednog elementa. Provedene su i dodatne analize primjenom fine mreže kako bi se osigurala adekvatna razina sigurnosti. Kao glavno mjerilo čvrstoće, korištena je teorija najveće distorzijske energije, a vrijednosti izračunatog naprezanja su potom uspoređivane s dozvoljenim naprezanjima.

Provedena analiza pokazala je kako idejno rješenje čelično rešetkastog stupa za dalekovod u potpunosti zadovoljava sve uvjete propisane pravilnikom. Pritom pravilnik u obzir uzima najčešće moguće slučajeve opterećenja, no ne stavlja naglasak na potencijalno izrazito opasne vanjske utjecaje i interakcije, koji premda rijetki, gotovo uvijek će dovesti do kolapsa konstrukcije. Navedena tvrdnja provjerena je i potvrđena izlaganjem konstrukcije iznimnim opterećenjima u vidu interakcije vjetra i dodatnog tereta. Protiv istih se može osigurati predimenzioniranjem osnovne konstrukcije, no ekonomski zahtjevi i isplativost upotrebe takvog stupa dolaze u pitanje, s obzirom na malu vjerojatnost pojave navedenih situacija.

Upotrebom standardnih L i UPE profila, osigurala se adekvatna strukturna stabilnost za izvedbe stupa sa simetričnom delta i nesimetričnom jela glavom, opterećene samim vodovima, a pod utjecajem vremenskih neprilika. Ukoliko se vodimo striktno zakonskim propisima, osnovnu konstrukciju je bilo moguće dodatno optimizirati, čime su napravljene dodatne uštede u pogledu materijala i troškova. Konačna izvedba pruža zadovoljavajuće rezultate u pogledu potencijalnih dodatnih opterećenja, za minimum utrošena materijala. Daljnje optimizacije su također moguće, no ne pružaju adekvatni stupanj varijabilnosti u ovisnosti o promjeni dodatnog opterećenja.

10. LITERATURA

- [1] Hot, K.: „Elektroenergetske mreže“, Tehničko veleučilište u Zagrebu, Zagreb, 2005.
- [2] Mirošević, G.; Vidaković, F.: „Projektiranje, gradnja i održavanje dalekovoda“, KIGEN d.o.o., Zagreb, 2008.
- [3] Skupina autora: „Elektroenergetski sustav“, s interneta, <https://element.hr/artikli/file/2477>, 13. kolovoza 2016.
- [4] Krajcar, S.; Marušić, A.: „Električna postrojenja“, s interneta, https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/ElPos_predavanje_0.pdf, 13. kolovoza 2016.
- [5] Sudam Punse, G.: „Analysis and Design of Transmission Tower“, International Journal of Modern Engineering Research, Vol. 4, No. 1, pp. 116-138, Agra, 2014.
- [6] „Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova nazivnog napona od 1 kV do 400 kV“, Službeni list SFRJ, br. 65, pp. 1617-1643, Beograd, 1988.
- [7] Šišević, N.: „Projektovanje i eksploatacija nadzemnih elektroenergetskih vodova u uslovima jednovremenog djelovanja vjetra i zaleđenja provodnika“, s interneta, http://www.etf.ucg.ac.me/Radovi/MSc/MSc_NinaSisevic.pdf, 21. kolovoza 2016.
- [8] „Čelično rešetkasti stupovi za dalekovode 10, 20 i 35 kV“, s interneta, <http://www.dalekovod-proizvodnja.com/EasyEdit/UserFiles/pdf/celicno-resetkasti-stupovi-za-dalekovode-10-20-i-35kv.pdf>, 21. kolovoza 2016.
- [9] Srikanth, L.; Satayam, D.: „Dynamic Analysis of Transmission Line Towers“, International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering, Vol. 8, No. 5, pp. 434-437, Chicago, 2014.
- [10] „Oprema za gole i izolirane nadzemne elektroenergetske mreže 10, 20 i 35 kV“, s interneta, <http://www.dalekovod-proizvodnja.com/EasyEdit/UserFiles/pdf/oprema-za-gole-i-izolirane-nadzemne-elektromagnetske-mreze-hr.pdf>, 21. kolovoza 2016.
- [11] Šegović, I.: „Projektiranje pouzdanih nadzemnih elektroenergetskih vodova i prilagodba s međunarodnim normama“, s interneta, <https://bib.irb.hr/datoteka/229178.referatSEGVIC.doc>, 21. kolovoza 2016.
- [12] Mitrić, R. i dr.: „Mehanički proračun nadzemnih distributivnih vodova s primjerom primjene“, Infoteh-Jahorina, Vol. 11, pp. 150-155, Jahorina, 2012.

- [13] Rajčić, V. i dr.: „Djelovanje snijega i vjetra na nosive konstrukcije“, Građevinski fakultet u Zagrebu, Zagreb, 2009.
- [14] Husić, A.: „Mehanički proračun nadzemnih vodova“, s interneta, <http://dokumen.tips/documents/mehanicki-proracun-nadzemnih-vodova.html>, 13. kolovoza 2016.
- [15] Šišević, N. i dr.: „Proračun sila na stubove nadzemnih elektroenergetskih vodova“, s interneta, http://www.cigre.me/pdf/B2_3/R%20B2-02.pptx, 13. kolovoza 2016.
- [16] „Izolatorski lanci do 35 kV“, s interneta, www.metal-product.hr/download/KATALOG%206.1.pdf, 13. kolovoza 2016.
- [17] Chandrupatla, T.; Belegundu, A.: „Introduction to Finite Elements in Engineering“, Pearson, New Jersey, 2012.
- [18] Sorić, J.: „Metoda konačnih elemenata“, Golden marketing, Zagreb, 2004.
- [19] Krishnamoorthy, C.: „Finite elements analysis“, Tata McGraw-Hill, New Delhi, 2007.
- [20] Brnić, J.; Turkalj, G.: „Nauka o čvrstoći I“, Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2004.
- [21] „Eurocode 3“, s interneta, <https://law.resource.org/pub/eu/eurocode/en.1993.1.1.2005.pdf>, 29. kolovoza 2016.
- [22] „Eurocodes: Design of steel Buildings with worked examples“, s interneta, http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/2014_07_WS_Steel/presentations/05_Eurocodes_Steel_Workshop_SIMOES.pdf, 29. kolovoza 2016.
- [23] Brnić, J.: „Statika“, Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2004.
- [24] Omanović, E.: „Klasične i savremene metode proračuna rešetkastih konstrukcija“, s interneta, <https://www.scribd.com/doc/178251301/Omanovi%C4%87-Elvis-Klasi%C4%8Dne-i-savremene-metode-prora%C4%8Duna-re%C5%A1etkastih-konstrukcija>, 13. kolovoza 2016.
- [25] Silva, J.G.S. i dr.: „Structural assessment of current steel design models for transmission and telecommunication towers“, Journal of Constructional Steel Research, No. 61, pp. 1108-1134, Oxford, 2005.
- [26] Conde, B. i dr.: „Geometrical Issues on the structural Analysis of Transmission Electricity Towers Thanks to Laser Scanning Technology and Finite Element Method“, s interneta, <http://www.mdpi.com/2072-4292/7/9/11551>, 20. kolovoza 2016.