

Numerička analiza čeličnog rešetkastog stupa dalekovoda

Zeba, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:928391>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-15**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Josip Zeba

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Ivica Skozrit, dipl. ing.

Student:

Josip Zeba

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Prije svega zahvaljujem se svom mentoru doc. dr. sc. Ivici Skozritu na uloženom trudu i vremenu te sveukupnoj pruženoj pomoći prilikom izrade ovoga rada. Također se zahvaljujem i svim ostalim profesorima, asistentima i kolegama s Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Također se zahvaljujem i tvrtki Dalekovod d.d. za stavljanje na raspolaganje sva potrebna znanja i informacije o čelično rešetkastim stupovima.

Zahvaljujem se najsrdačnije svojoj najbližoj obitelji koja me sve ove godine podržavala i vjerovala u mene. Posebnu zahvalu izražavam djevojci Ivani.

Josip Zeba



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Josip Zeba**

Mat. br.: 0035190912

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Numerička analiza čeličnog rešetkastog stupa dalekovoda**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Numerical Analysis of a Steel Lattice Transmission Line Tower**

Opis zadatka:

Za prijenos električne energije od proizvođača do potrošača potrebni su dalekovodi, koji se još uvijek u većini slučajeva grade kao nadzemni tj. na čeličnim rešetkastim stupovima. Dobro je poznato da su stupovi osim konstantnog opterećenja vodovima kojima se prenosi električna energija dodatno opterećeni udarima vjetrova i snijega te ostalim atmosferskim utjecajima tijekom eksploatacije.

Za tipski čelični rešetkasti stup ZAH2 koji se proizvodi u tvrtki Dalekovod d.d. i koristi se za naponske mreže do 35 kV potrebno je:

- na temelju dobivenih podataka od tvrtke Dalekovod d.d. o geometriji i dimenzijama napraviti model stupa dalekovoda,
- primjenom metode konačnih elemenata tj. programskog paketa Abaqus® provesti linearnu numeričku analizu u kojoj će se analizirati nosivost stupa uslijed opterećenja definiranog „Pravilnikom o tehničkim normama za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova nazivnog napona od 1 do 400 kV“,
- dobivene rezultate linearne analize usporediti s eksperimentalno dobivenim rezultatima na prototipu konstrukcije stupa,
- provesti nelinearnu numeričku analizu te uključiti što je moguće više izvora nelinearnosti, te raznih kombinacija opterećenja.

Za diskretizaciju stupa koristiti dostupne konačne elemente iz korištenog programskog paketa. Za sve primijenjene konačne elemente izvršiti verifikaciju na jednostavnijim problemima te rezultate usporediti s pripadnim analitičkim rješenjima. Osim toga, za proračunski model potrebno je odrediti optimalnu mrežu konačnih elemenata te prikazati konvergenciju rješenja.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datum obrane:


28. rujna 2017.

30. studenog 2017.

6., 7. i 8. prosinca 2017.

Zadatak zadao:

Predsjednica Povjerenstva:


Doc. dr. sc. Ivice Skozrit


Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
POPIS SKRAĆENICA	IX
SAŽETAK.....	X
SUMMARY	XI
1. UVOD.....	1
2. DALEKOVOD I ELEMENATI ELEKTROENERGETSKOG VODA	3
2.1. Dalekovod	3
2.2. Čelično rešetkasti stup.....	3
2.2.1. Nosivi stupovi	7
2.2.2. Zatezni stupovi	8
2.3. Ostali elementi dalekovoda	9
2.3.1. Vodiči.....	9
2.3.2. Izolatori	11
2.3.3. Zaštitna užad i uzemljenje stupa	13
2.3.4. Ovjесna i spojna oprema	14
2.4. Klimatski uvjeti koji utječu na nadzemne vodove	15
2.4.1. Temperatura	15
2.4.2. Vjetar.....	16
2.4.3. Dodatni teret.....	18
2.4.4. Osnovne klimatske karakteristike na području Hrvatske.....	20
3. PRORAČUN OPTEREĆENJA STUPA DALEKOVODA	22
3.1. Redovna opterećenja	23
3.2. Izvanredna opterećenja.....	24
3.3. Podatci za proračun.....	25

3.4.	Opterećenje stupa	27
3.4.1.	Opterećenje prema članku 68.1.a	27
3.4.2.	Opterećenje prema članku 68.1.b	28
3.4.3.	Opterećenje prema članku 68.1.c	28
3.4.4.	Opterećenje prema članku 69.2	29
3.5.	Eksperimentalni rezultati	31
4.	O METODI KONAČNIH ELEMENATA I VERIFIKACIJA ELEMENATA	37
4.1.	Opis primijenjenih konačnih elemenata	38
4.1.1.	Prostorni gredni konačni element	38
4.2.	Verifikacija primijenjenih konačnih elemenata	39
4.2.1.	Primjer I: Slobodno oslonjena greda opterećena koncentriranom silom	39
4.2.2.	Primjer II: Uklještena greda opterećena na savijanje i uvijanje	42
4.2.3.	Primjer III: Okvirni nosač	45
5.	LINEARNA NUMERIČKA ANALIZA	50
5.1.	Osnovne relacije linearne analize	50
5.2.	Pretpostavke i ograničenja	50
5.3.	Kreiranje proračunskog modela	52
5.4.	Rezultati linearne numeričke analize	55
5.5.	Usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata	61
6.	NELINEARNA NUMERIČKA ANALIZA	63
6.1.	Osnovne relacije nelinearne analize	64
6.2.	Pretpostavke i ograničenja	65
6.3.	Linearna analiza stabilnosti	66
6.4.	Riks–Wempner–Wesselsova metoda	70
6.5.	Rezultati nelinearne analize	74
7.	ZAKLJUČAK	78
	LITERATURA	80
	PRILOZI	82

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Shema čeličnog rešetkastog stupa [5]	6
Slika 2.2. Oblici glave stupa: a) gama, b) delta, c) trapez, d) bačva, e) jela [5].....	7
Slika 2.3. Nosivi stup [7].....	8
Slika 2.4. Zatezni stup [8]	9
Slika 2.5. Presjek <i>alučel</i> užeta vodiča	11
Slika 2.6. Izolator: a) potporni, b) viseći, c) izolatorski lanac [10].....	12
Slika 2.7. Zaštitna zona zaštitne užadi [4].....	14
Slika 2.8. Dodatni teret na vodičima dalekovoda u eksploataciji [12].....	19
Slika 3.1. Redovni slučajevi opterećenja zateznog stupa	24
Slika 3.2. Izvanredni slučajevi opterećenja zateznog stupova	25
Slika 4.1. Osnovni prostorni gredni element [16]	38
Slika 4.2. Slobodno oslonjena greda opterećena koncentriranom silom.....	39
Slika 4.3. Primjer I, <i>Abaqus</i> – proračunski model	40
Slika 4.4. Primjer I, <i>Abaqus</i> – opterećenje i rubni uvjeti	41
Slika 4.5. Primjer I, <i>Abaqus</i> – mreža s 2 B33 konačna elementa.....	41
Slika 4.6. Primjer I, <i>Abaqus</i> – progib w / mm.....	41
Slika 4.7. Primjer I, <i>Abaqus</i> – mreža s 4 i 8 B33 konačna elementa.....	41
Slika 4.8. Uklještena greda opterećena na savijanje i uvijanje	42
Slika 4.9. Primjer II, <i>Abaqus</i> – proračunski model	43
Slika 4.10. Primjer II, <i>Abaqus</i> – opterećenje i rubni uvjeti	43
Slika 4.11. Primjer II, <i>Abaqus</i> – mreža s jednim B33 konačnim elementom	44
Slika 4.12. Primjer II, <i>Abaqus</i> – progib v / mm.....	44
Slika 4.13. Primjer II, <i>Abaqus</i> – mreža s 2 i 4 B33 konačna elementa	44
Slika 4.14. Okvirni nosač	45
Slika 4.15. Primjer III, <i>Abaqus</i> – proračunski model	46
Slika 4.16. Primjer III, <i>Abaqus</i> – opterećenje i rubni uvjeti.....	47
Slika 4.17. Primjer III, <i>Abaqus</i> – mreža s 4 B33 konačna elementa	47
Slika 4.18. Primjer III, <i>Abaqus</i> – progib w_D / mm	48
Slika 4.19. Primjer III, <i>Abaqus</i> – mreža s 8 i 16 B33 konačna elementa.....	48
Slika 5.1. Vijčani spoj L profila s: a) jednim vijkom, b) više vijaka	51

Slika 5.2. Proračunski model čeličnog rešetkastog stupa.....	53
Slika 5.3. Proračunski model s rubnim uvjetima i vezama spoja.....	54
Slika 5.4. Mreža konačnih elemenata: a) 258 KE, b) 396 KE, c) 706 KE	55
Slika 5.5. Raspodjela naprezanja (MPa) i pomaka (mm) za slučaj 68.1.a.....	56
Slika 5.6. Raspodjela naprezanja (MPa) i pomaka (mm) za slučaj 68.1.b.....	56
Slika 5.7. Raspodjela naprezanja (MPa) i pomaka (mm) za slučaj 68.1.c	57
Slika 5.8. Raspodjela naprezanja (MPa) i pomaka (mm) za slučaj 69.2 Z1	58
Slika 5.9. Raspodjela naprezanja (MPa) i pomaka (mm) za slučaj 69.2 P1.....	59
Slika 5.10. Raspodjela naprezanja (MPa) i pomaka (mm) za slučaj 69.2 P2.....	59
Slika 5.11. Raspodjela naprezanja (MPa) i pomaka (mm) za slučaj 69.2 P3.....	60
Slika 5.12. Dijagram ovisnosti maksimalnog naprezanja σ / MPa o broju KE.....	60
Slika 6.1. Kolaps stupa uslijed ekstremnog opterećenja vjetrom [24]	63
Slika 6.2. Shematski prikaz procedure nelinearne analize stupa.....	66
Slika 6.3. Mreža konačnih elemenata: a) 258 KE, b) 396 KE, c)706 KE, d) 1342 KE	68
Slika 6.4. Izgled formi izvijanja	69
Slika 6.5. Dijagram ovisnosti faktora kritičnog opterećenja λ o broju KE	69
Slika 6.6. Algoritam modificirane Riksove metode [29]	71
Slika 6.7. Dijagram naprezanje – deformacija materijala S355J2	72
Slika 6.8. Dijagram faktor opterećenja λ – pomak vrha stupa	74
Slika 6.9. Raspodjela naprezanja (MPa) i pomaka (mm) u trenutku kolapsa ($\lambda = 2,61805$)....	75
Slika 6.10. Raspodjela naprezanja (MPa) i pomaka (mm) nakon kolapsa ($\lambda = 2,3072$).....	76
Slika 6.11. Dijagram faktor opterećenja λ – pomak vrha donje konzole	76
Slika 6.12. Dijagram ovisnosti maksimalnog naprezanja σ / MPa o broju KE.....	77

POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Beaufortova ljestvica.....	17
Tablica 2.2. Tlak vjetra.....	18
Tablica 3.1. Uvjeti opterećenja i korištenja stupa	26
Tablica 3.2. Opterećenje zateznog stupa sa jednakim zatezanjem užadi	30
Tablica 3.3. Dopuštena reducirana, horizontalna i vertikalna opterećenja stupa ZAH2 [5]	31
Tablica 3.4. Dopuštena vertikalna opterećenja na konzolu stupa ZAH2 [5]	32
Tablica 3.5. Izračunata ukupna opterećenja stupa.....	35
Tablica 4.1. Primjer I, zadani parametri	40
Tablica 4.2. Primjer I, usporedba analitičkih i numeričkih rješenja progiba	42
Tablica 4.3. Primjer II, zadani parametri.....	42
Tablica 4.4. Primjer II, usporedba analitičkih i numeričkih rješenja progiba i kutova zakreta	44
Tablica 4.5. Primjer III, zadani parametri	45
Tablica 4.6. Primjer III, usporedba analitičkih i numeričkih rješenja progiba.....	49
Tablica 5.1. Mehaničke karakteristike materijala	52
Tablica 6.1. Iznosi prve dvije vlastite vrijednosti	68
Tablica 6.2. Vrijednosti stvarnog naprezanja i plastične deformacije materijala S355J2.....	73

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_v	m^2	površina poprečnog presjeka vodiča
A_z	m^2	površina poprečnog presjeka zaštitnog užeta
a	m	dužina i širina, duljina konzole
a_{gr}	m	gravitacijski raspon
a_{sr}	m	poluzbroj susjednih raspona
c_v	–	faktor djelovanja vjetra
d	m	promjer
d_t	N	dodatni teret
d_v	m	promjer vodiča
d_z	m	promjer zaštitnog užeta
E	N/m^2	Youngov modul elastičnosti
E_{rel}	%	relativna greška
F	N	sila
F_x, F_y, F_z	N	sile u smjerovima osi x , y i z
G	N/m^2	modul smicanja
G_{iz}	N	težina pribora (izolatora)
g	m/s^2	akceleracija slobodnog pada
G_v	N/m	jedinična težina vodiča
G_{vd}	N/m	jedinična težina vodiča s dodatnim teretom
G_z	N/m	jedinična težina zaštitnog užeta
G_{zd}	N/m	jedinična težina zaštitnog užeta s dodatnim teretom
H	m	nazivna visina stupa
H_x, H_y	N	horizontalne sile u smjerovima osi x i y
H_{xdop}, H_{ydop}	N	dopuštene horizontalne sile u smjerovima osi x i y
I_x, I_y, I_z	m^4	aksijalni momenti tromosti oko osi x , y i z
J_T	m^4	konstanta uvijanja

\mathbf{K}	N/m	globalna matrica krutosti
\mathbf{K}_T	N/m	globalna tangencijalna matrica krutosti
l	m	duljina
M_x, M_y, M_z	Nm	momenti u smjerovima osi x , y i z
M_t	Nm	moment uvijanja
m_v	kg/m	jedinična masa vodiča
m_z	kg/m	jedinična masa zaštitnog užeta
n_{KE}	–	broj konačnih elemenata proračunskog modela
p	N/m ²	pritisak vjetra
p_x, p_y	N/m ²	pritisak vjetra u smjerovima osi x i y
Q_i	N	poopćena sila
q_i	m	poopćeni pomak
R	N	rezultanta reduciranih sila
R_{dop}	N	dopuštena rezultanta reduciranih sila
R_e	N/m ²	granica tečenja materijala
R_m	N/m ²	vlačna čvrstoća materijala
R_x, R_y	N	rezultante reduciranih sila u smjerovima osi x i y
\mathbf{R}	N	vektor globalnih sila
\mathbf{R}_e	N	vektor vanjskog opterećenja
\mathbf{R}_i	N	vektor unutarnjeg opterećenja
S	–	faktor sigurnosti
t	m	debljina
U	J	unutarnja energija
u	m	pomak u smjeru osi x
V_v	N	vertikalna sila u smjeru osi z
V_x, V_y, V_z	N	sile na konzolu stupa u smjerovima osi x , y i z
V_{zdop}	N	dopuštena sila opterećenja u smjeru osi z
\mathbf{V}	m	globalni vektor pomaka
v	m	pomak u smjeru osi y

v	m/s	brzina vjetra
Z_x, Z_y, Z_z	N	sile na vrh stupa u smjerovima osi x, y i z
w	m	pomak u smjeru osi z
X	–	prednja stana stupa
x	–	lokalna Kartezijeva koordinata
Y	–	bočna strana stupa
y	–	lokalna Kartezijeva koordinata
z	–	lokalna Kartezijeva koordinata
α	°	kut skretanja trase
α	rad	kut zakreta
α_{\max}	rad	maksimalni kut zakreta
$\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$	rad	kut zakreta oko osi x, y i z
Δv_j^*	m	dopušteni pomak u Riksovoj metodi
ε	–	deformacija
λ	–	faktor opterećenja
φ	°	napadni kut vjetra
ν	–	Poissonov faktor
ρ	kg/m ³	gustoća
ρ_v	kg/m ³	gustoća materijala vodiča
ρ_z	kg/m ³	gustoća materijala zaštitnog užeta
σ_{dop}	N/m ²	dopušteno naprezanje
σ_{ekv}	N/m ²	ekvivalentno naprezanje prema von Misesu
σ_v	N/m ²	maksimalno radno naprezanje vodiča
σ_z	N/m ²	maksimalno radno naprezanje zaštitnog užeta

POPIS SKRAĆENICA

1D, 2D, 3D	jednodimenzionalno, dvodimenzionalno, trodimenzionalno
CAE	inženjerstvo pomoću računala (eng. <i>Computer Aided Engineering</i>)
DHMZ	Državni hidrometeorološki zavod
IDT	izvanredni dodatni teret
IGH	Institut građevinarstva Hrvatske
JU22	oznaka tipskog zateznog stupa tvrtke Dalekovod d.d.
KE	konačni element
LPF	faktor proporcionalnosti opterećenja (eng. <i>Load Proportionality Factor</i>)
MKE	metoda konačnih elemenata
PM	proračunski model
P1	slučaj opterećenja prilikom puknuća gornjeg vodiča
P2	slučaj opterećenja prilikom puknuća srednjeg vodiča
P3	slučaj opterećenja prilikom puknuća donjeg vodiča
RDT	redovni dodatni teret
ZAH2	tipski zatezni stup tvrtke Dalekovod d.d.
Z1	slučaj opterećenja prilikom puknuća zaštitnog užeta
WMO	Svjetska meteorološka organizacija (eng. <i>World Meteorological Organization</i>)

SAŽETAK

Tema ovog diplomskog rada je numerička linearna i nelinearna analiza čeličnog rešetkastog stupa dalekovoda primjenom metode konačnih elemenata. Cilj rada je kreiranje ispravnog numeričkog modela koji može prikazati dovoljno točno ponašanje čeličnog rešetkastog stupa pri nametnutom opterećenju izazvanom težinom stupa i vodiča, naletima vjetra te dodatnog opterećenja snijegom i ledom. U prvom dijelu opisan je dalekovod i njegovi osnovni elementi: stupovi, vodiči, zaštitno uže, uzemljenje te ovjesna i spojna oprema. Također opisani su klimatski faktori koji utječu na opterećenje dalekovoda. Zatim je proveden izračun opterećenja definiranih *Pravilnikom o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova napona 1 kV do 400 kV*. U prvom koraku pristupilo se numeričkoj linearnoj analizi čeličnog rešetkastog zateznog stupa dalekovoda ZAH2 s linearno elastičnim materijalom pri zadanim opterećenjima definiranih pravilnikom. Dobiveni rezultati uspoređeni su s eksperimentalno dobivenim rezultatima nosivosti stupa koji su poslužili kao verifikacija numeričkog modela. Nakon linearne analize, provedena je nelinearna analiza Riks–Wempner–Wesselsovom metodom s geometrijskom i materijalnom nelinearnošću. Rezultati rada naposljetku prikazuju ponašanje čeličnog rešetkastog stupa uslijed velikog opterećenja, tj. iznos maksimalnog opterećenja prilikom kojeg nastupa kolaps stupa. Numeričke analize provedene su u programskom paketu *Abaqus/CAE 6.14*.

Ključne riječi: *čelično rešetkasti stup, dalekovod, metoda konačnih elemenata, numerička analiza, linearna analiza, nelinearna analiza, Abaqus*

SUMMARY

The subject of this thesis is a numerical analysis of a steel lattice transmission line tower using finite elements method. The aim of this work is to create a correct numerical model that can display sufficiently accurate behavior of a steel lattice tower at the imposed loading of the tower and conductors weight, the wind loads and the additional snow and ice load. The first part describes the transmission line and its basic elements: towers, conductors, earth wire, earthing and fixing and coupling equipment. Climatic factors affecting the load on the transmission line are also described. Then the load calculation was conducted defined by the *Regulation on Technical Standards for Construction of Overhead Power Lines of Nominal Voltage Between 1 and 400 kV*. In the first step, the numerical linear analysis of the steel lattice tension tower ZAH2 with linear elastic material was performed at the given loads defined by the regulation. The results obtained were compared with the experimental results of tower capacity which is used as a numerical model verification. After linear analysis, the nonlinear analysis was performed using the Riks–Wempner–Wessels method with geometric and material nonlinearities. This thesis finally show the behavior of the steel lattice tower due to heavy loads, i.e. the amount of the maximum load on which the tower collapse occurs. Numerical analyzes were carried out using *Abaqus/CAE 6.14* software package.

Key words: *steel lattice tower, transmission line, finite element method, numerical analysis, linear analysis, nonlinear analysis, Abaqus*

1. UVOD

Čelično rešetkaste konstrukcije koriste se za mnoga velika postrojenja, a ponajviše za prijenos električne energije stupovima dalekovoda te kao telekomunikacijski stupovi. Mnogi čelično rešetkasti stupovi dalekovoda napravljeni su prije gotovo stotinu godina i još uvijek su u upotrebi. Iako se kriteriji za konstrukciju stupa dalekovoda razvijao tijekom prošlog stoljeća, današnja strukturna analiza se još uvijek uglavnom temelji na linearno elastičnom modelu.

Nadzemni elektroenergetski vodovi projektiraju se kao sustavi koji se sastoje od komponenti kao što su stupovi, temelji, vodiči, izolatorski lanci, zaštitna užad i uzemljenje, pri čemu kvar ili oštećenje bilo koje komponente ima za posljedicu gubitak sposobnosti prijenosa električne energije. Cilj je, prilikom projektiranja i dimenzioniranja dalekovoda, osigurati da nadzemni elektroenergetski vodovi budu stabilni na definiranim klimatskim opterećenjima (povišene i snižene temperature, vjetar, led, snijeg te kombinacije navedenih opterećenja) i opterećenjima koja nastaju kao posljedica navedenih događaja za vrijeme eksploatacije, odnosno radnog vijeka dalekovoda, tj. da je osigurana neprekinutost rada pod zadanim uvjetima. U okviru nadzemnog elektroenergetskog voda stup je osnovna konstrukcija koja nosi vodiče, izolatore i zaštitnu užad te koji je, zajedno sa svim tim elementima, konstantno izložen najrazličitijim klimatskim utjecajima. Danas su, kako u Hrvatskoj tako i u svijetu, stupovi nadzemnih elektroenergetskih vodova uglavnom prostorne čelično rešetkaste konstrukcije sastavljene od standardnih profila sa odgovarajućim spojevima, najčešće vijcima.

Veliku važnost, u svrhu proračuna analitički teško rješivih konstrukcija, imaju moderne numeričke inženjerske metode kao što je metoda konačnih elemenata. Prednosti numeričkih metoda dolaze do izražaja sve više razvojem modernih brzih računala i računalnih algoritama pomoću kojih se postupak pronalaženja rješenja znatno pojednostavljuje. Proračuni za koje su prije trebali dani i mjeseci, u današnje doba računalni procesor riješi za vrlo kratko vrijeme što povećava produktivnost i efikasnost pri rješavanju inženjerskih problema.

Stoga je ovaj diplomski rad posvećen kreiranju ispravnog numeričkog modela čeličnog rešetkastog stupa dalekovoda koji može prikazati dovoljno točno ponašanje konstrukcije stupa pri nametnutom opterećenju izazvanom težinom stupa i vodiča, naletima vjetra te dodatnog opterećenja snijegom i ledom. Stoga je s tom namjerom provedena linearna i nelinearna numerička analiza čeličnog rešetkastog stupa dalekovoda prateći pritom postojeće propise i

pravila u Republici Hrvatskoj, uz analizu klimatskih faktora i njihovog utjecaja na ponašanje stupova prilikom opterećenja.

Najveći proizvođač čelično rešetkastih stupova u Hrvatskoj je tvrtka Dalekovod d.d. koja je specijalizirana za izradu elektroenergetskih objekata, posebice dalekovoda, transformatorskih stanica, telekomunikacijskih objekata te proizvodnje ovjesne i spojne opreme. Upravo je iz tog razloga, za numeričku analizu u ovom diplomskom radu, odabran jedan čelično rešetkasti zatezni stup, točnije tipski stup ZAH2 namijenjen za naponske mreže do 35 kV, koji se proizvodi u tvrtki Dalekovod d.d.

Dvije su glavne zadaće u ovome radu. Prvo je, provedba linearne numeričke analize. Provedbom linearne analize želja je razviti numerički model koji se može koristiti pri dimenzioniranju, odnosno provjeri nosivosti čeličnog rešetkastog stupa. Do sada se isključivo primjenjuje ispitivanje nosivosti na temelju eksperimentalne analize. Stoga će se nakon linearne analize rezultati usporediti sa navedenim eksperimentalnim rezultatima dobivenim na prototipu konstrukcije stupa koja je ispitivana probnim opterećenjem, a sukladno tome kreirane su tablice nosivosti stupa. Nakon linearne analize bit će provedena nelinearna analiza. Cilj nelinearne analize je ispitivanje ponašanja stupa pri velikim opterećenjima koji mogu nastupiti u ekstremnim situacijama. Takva analiza dat će odgovore na pitanja maksimalne nosivosti stupa prije nego što nastupi trajna plastična deformacija, tj. pojave se prva oštećenja. Stalnim povećavanjem opterećenja moguće je izračunati maksimalnu nosivost stupa prije nego što nastupi potpuni kolaps odnosno urušavanje stupa.

Za provedbu numeričke analize koristit će se programski paket *Abaqus/CAE 6.14* [1] (u daljnjem tekstu: *Abaqus*), no pokazat će se i osnovne relacije primijenjene metode konačnih elemenata kao i algoritmi korišteni prilikom pronalaženja rješenja primjenom programskog paketa *Abaqus*. Za sve primijenjene konačne elemente izvršit će se verifikacija na jednostavnijim problemima, a odredit će se i optimalna mreža konačnih elemenata potrebna za dobivanje relativno dovoljno točnih rješenja.

2. DALEKOVOD I ELEMENATI ELEKTROENERGETSKOG VODA

2.1. Dalekovod

Dalekovod je elektroenergetski nadzemni vod izmjenične ili istosmjerne struje visokog napona koji služi za prijenos električne energije, bilo velikih snaga, bilo na velike udaljenosti, ili oboje. Električna energija prenosi se neizoliranim vodičima koji su, zbog opasnosti od visokog napona za okolinu, postavljaju visoko iznad zemlje. Kao materijali za vodiče najviše se upotrebljavaju aluminij ili aluminijeve slitine. Vodiči se izrađuju u obliku užeta pletenjem od pojedinih žica, a najčešća je izvedba kombinirano uže pleteno od žica iz dvaju različitih materijala, od kojih jedan (aluminij) služi za vođenje struje, a drugi (čelik) preuzima mehanička naprezanja (tzv. *alučel* vodič). Za napone više od 300 kV sastavljaju se vodiči pojedinih faza od dva, tri ili više užeta na međusobnom razmaku od 30 do 60 cm (snopovi vodiča), kako bi se izbjeglo štetno izbijanje na vodičima. Uporišta vodičima su dalekovodni stupovi predviđeni za nošenje i zatezanje, a izrađuju se najčešće kao rešetkaste konstrukcije od kutnoga profilnoga pocinčanog čelika. Između stupa i vodiča postavljaju se ovjesni izolatori sastavljeni od niza izolatorskih članaka od elektroporculana, kaljenog stakla ili sintetskih materijala mehanički pojačanih staklenim vlaknima [2]. Dalekovod, odnosno nadzemni vod može biti niskonaponski nadzemni vod najčešće nazivnog napona koji ne prelazi 1 kV te visokonaponski nadzemni vod nazivnog napona iznad 1 kV [3].

Kao što je već spomenuto, nadzemni elektroenergetski vod je skup svih dijelova koji služe za nadzemno vođenje vodiča koji prenose i razvođe električnu energiju, a to su: stupovi, konzole, temelji, vodiči, izolatori, zaštitna užad, ovjesna i spojna oprema i uzemljenje [3]. Iako je tema, odnosno zadatak ovog diplomskog rada numerička analiza isključivo čeličnog rešetkastog stupa dalekovoda, potrebno je uzeti u obzir sve ostali navedene elemente elektroenergetskog nadzemnog voda kako bi se postigli što točniji rezultati. U nastavku će se opisati i analizirati svaka komponenta koja se koristi u projektiranju, gradnji i eksploataciji dalekovoda.

2.2. Čelično rešetkasti stup

Stupovi su temeljni elementi dalekovoda. Razvojem industrije čelika te poboljšanjem kvalitete čelika, primjena čelično rešetkastih konstrukcija za stupove dalekovoda zasad nema

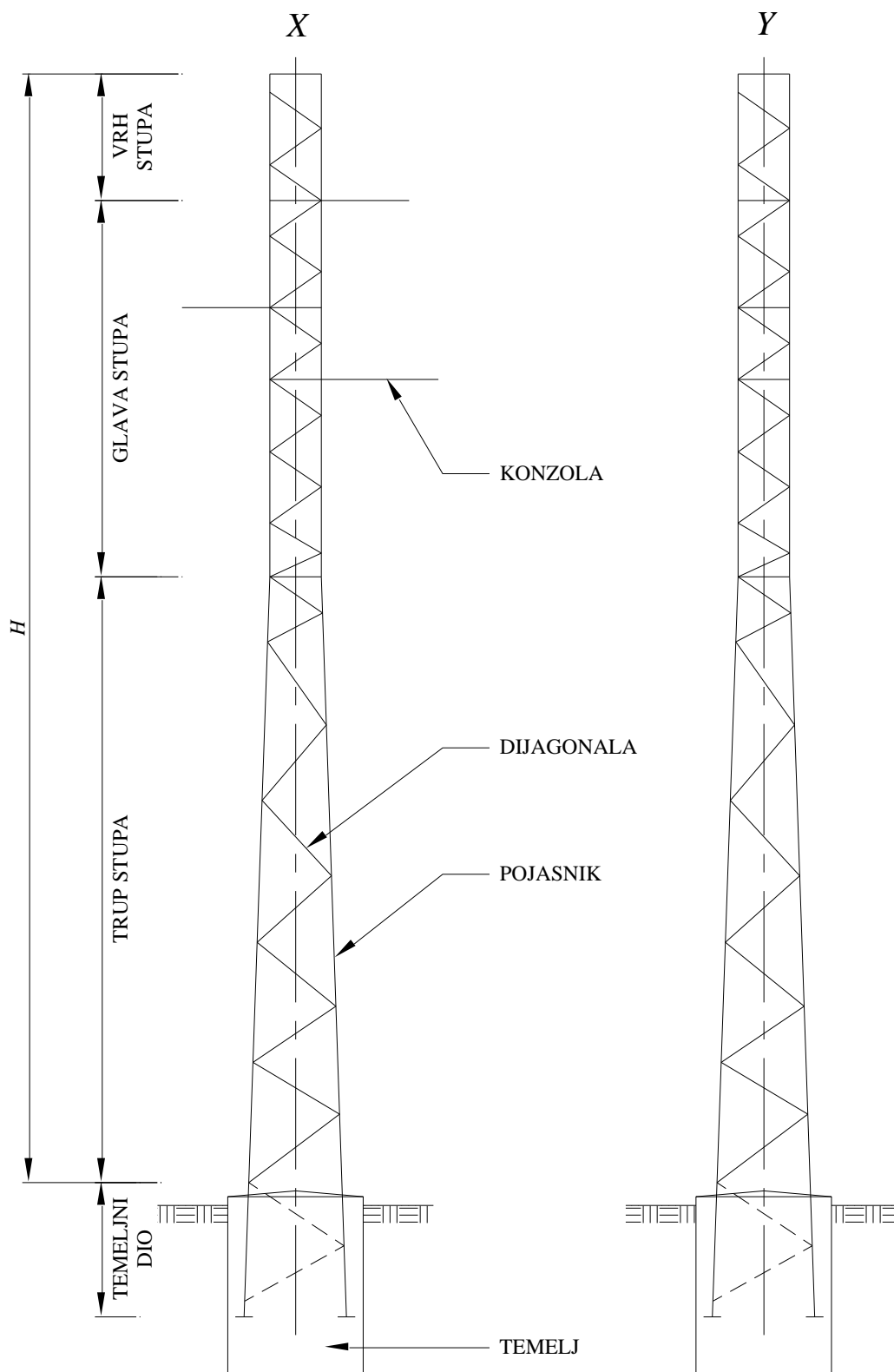
alternative ako su u pitanju isključivo ekonomski aspekti izbora materijala. Oni prenose opterećenja i fiksirani su u temeljima, te pružaju stabilnost, čvrstoću i sigurnost cijelog sustava. Također, izvedba konstrukcije je vrlo jednostavna [4]. Stupovi su čelično rešetkaste četverostrane (krnje) piramide. Sastavljeni su iz standardnih vruće valjanih profila spojenih vijcima, s jednostrukom ispunom dijagonala po cijeloj visini stupa. Antikorozivna zaštita svih dijelova stupova izvodi se vrućim cinčanjem, kvalitete koja odgovara zahtjevima priznatih svjetskih standarda [5]. Nakon izrade pojedinih elemenata konstrukcije u radionici, konstrukcija stupova montira se spajanjem elemenata vijcima na samom stupnom mjestu za veće stupove ili u samoj radionici ako se radi o manjim stupovima. S obzirom na relativno malu težinu i duljinu elemenata konstrukcije, nema većih problema s transportom tih elemenata i do vrlo teških i nepristupačnih lokacija stupnih mjesta. Variranjem širine stupa te veličine profila elemenata konstrukcije moguće je konstruirati stup za svako opterećenje koje se pojavljuje na dalekovodu. Optimalnim i pravilnim izborom geometrije stupa i profila elemenata konstrukcije može se postići visoka iskoristivost glavnih elemenata konstrukcije pri maksimalnom opterećenju [4]. Ukoliko dođe do pojave mehaničkih oštećenja na pojedinim elementima čelično rešetkastog stupa, oštećeni elementi se mogu brzo i jednostavno zamijeniti novima. Može se zaključiti da je održavanje čelično rešetkaste konstrukcije, odnosno dalekovodnih stupova stoga vrlo jednostavno. U najgorim slučajevima kolapsa stupa ili velikih havarija, cijeli se stupovi ili samo dijelovi mogu relativno brzo zamijeniti novim. Također, moguće je, demontirati stup i ponovno ga montirati na nekoj drugoj lokaciji što je velika prednost čelično rešetkastih stupova nad ostalim izvedbama stupova.

Osnovna izvedba čelično rešetkastog stupa sastavljena je iz pojasnika, dijagonalnih ispuna i konzola. Radi tehnologije izrade, stup se po vertikali može podijeliti na 4 dijela: temeljni dio, trup, glava i vrh stupa (shematski prikaz – Slika 2.1). Za razliku od stupova projektiranih za specijalne slučajeve i posebno definirane rasporede vodiča, stupovi za dalekovode 10, 20 i 35 kV proizvedeni u tvrtki Dalekovod d.d. predstavljaju tipizirana rješenja konstrukcije, od kojih se svaki tip može koristiti za više različitih vrsta, presjeka i rasporeda vodiča u različitim geografskim uvjetima. Sve navedeno čini ovaj tip stupa zanimljivim za ovu vrstu analize te je upravo iz tih razloga odabran tipizirani 20 (35) kV zatezni stup ZAH2 nazivne visine $H = 13$ m (Slika 2.1) za razmatranje u ovoj numeričkoj analizi.

Temelji su namijenjeni za prijenos vanjskog opterećenja, koja su rezultat opterećenja stupa, u tlo s dovoljnom pouzdanosti s time da se nedozvoljeni pokreti temeljnog dijela odnosno čitavog stupa ne smiju pojaviti [6]. Uz navedeno vanjsko opterećenje stupa, konstrukcija temelja je stoga određena vrstom i karakteristikama temeljnog tla, mogućnostima i načinom izvedbe te samim temeljnim dijelom konstrukcije stupa koji ovisno o materijalu iz kojega je izrađen može biti betonski ili betonski s armaturom, zatim čelični, drveni ili neka od kombinacija navedenih načina. Danas u Hrvatskoj, gotovo u svim slučajevima gdje se koriste čelično rešetkasti stupovi koriste se betonski temelji s armaturom te se izrađuju na samoj lokaciji montaže stupa. Važno je napomenuti da je prilikom konstruiranja temelja najvažnije obratiti pažnju na vrstu tla gdje veliki utjecaj mogu imati podzemne i nadzemne vode te muljevita i nestabilna tla. Iako je konstrukcija, odnosno stup zadovoljavajuće konstruiran s obzirom na nosivost, nepoznavanje uvjeta tla ili loša konstrukcija temelja mogu vrlo lako dovesti do oštećenja stupa ili u najgorem slučaju izazvati havariju.

Na promatranj izvedbi stupa ZAH2 (Slika 2.1) temeljni dio pojasnika je dio pojasnika koji se fiksira na način da se betonira zajedno s temeljom. Dužina temeljnog dijela pojasnika je udaljenost između posljednjeg vijka za vezu dijagonala za pojasnik i donjeg ruba pojasnika u temelju [4]. Ova dužina je važna jer se uzima u obzir prilikom proračuna temelja. Izvedba temelja odnosno temeljnog dijela stupa u ovom slučaju izvedena je pomoću blok–temelja gdje su sve četiri noge stupa, odnosno pojasnika učvršćena u jednom bloku betona prizmatičnog oblika, za razliku od izvedbi gdje je moguće svaku nogu stupa betonirati zasebno.

Trup stupa je dio stupa od gornjeg ruba temelja do donje konzole, ako se radi o stupu s jednakim prirastom [4]. Ukoliko je stup konstruiran sa paralelnim stranicama gornje etaže (Slika 2.1), trup i glava stupa odvojeni su različitim prirastom stupa što je ujedno i slučaj za analizirani stup u ovom radu. Takvim konstruiranjem je omogućena primjena istih konzola za različiti raspored vodiča, a time i veći broj različitih simetričnih i ne simetričnih oblika glave te priključenje iste dodatne opreme na različitim visinama jednog stupa kao i na više različitih tipova stupova [5]. Glavni dio stupa, a ujedno i nosivi, je trup namijenjen za prijenos opterećenja do temelja te zajedno s glavom stupa osigurava potrebnu visinu dalekovoda. Kod čelično rešetkaste izvedbe, izveden je u obliku kvadra ili četverostrane (krnje) piramide ojačan dijagonalnim ispunama. Nadalje, vrh je dio stupa od zadnje gornje konzole do najviše točke stupa [4].

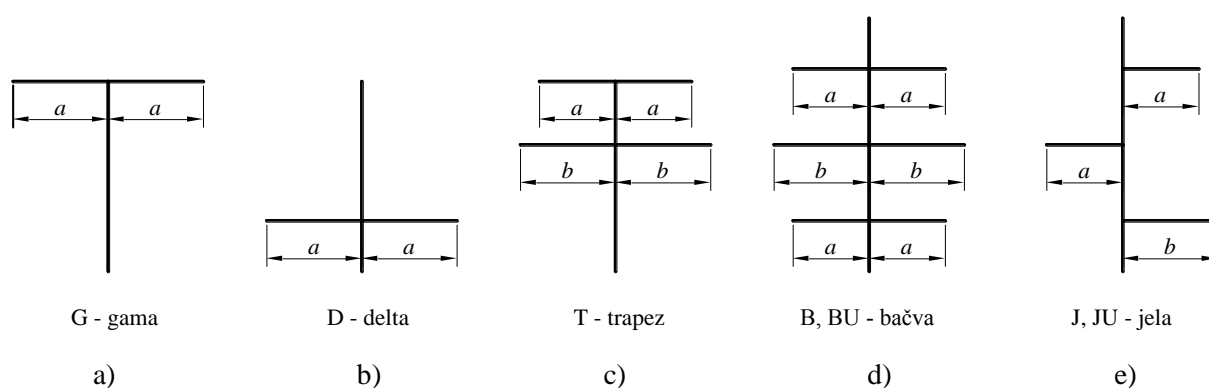


Slika 2.1. Shema čeličnog rešetkastog stupa [5]

Glava s vrhom predstavlja dio stupa koji nosi vodiče, zaštitnu užad te ostalu ovjesnu i spojnu opremu. Konzole koje osiguravaju razmak između vodova električne energije prenose

opterećenja uvjetovana težinom vodiča i opreme, vjetrom, ledom i ostalim klimatskim pojavama na temeljni dio stupa.

Na stupovima je moguć različit raspored vodiča tj. oblik glave stupa. Tipični primjeri su simetrične glave koje se formiraju sa dvostranim konzolama: a) *gama*, b) *delta*, c) *trapez* i d) *bačva*, te nesimetrične glave sa jednostranim konzolama, tj. e) *jela* (Slika 2.2). Konzole stupova dalekovoda 10, 20 i 35 kV proizvedenih u tvrtki Dalekovod d.d. montiraju se na glavu stupa, s mogućim priključkom na svakih 0,85 m po duljini glave, ovisno o potrebi. Osim konzola za tipizirane oblike glave stupa, na stupove se može priključiti ovjesna oprema i konstrukcija (npr. konzola) prilagođena za zavješanje izoliranih vodiča, kabela i aparata [5].



Slika 2.2. Oblici glave stupa: a) gama, b) delta, c) trapez, d) bačva, e) jela [5]

Osnovnim vrstama stupova smatraju se nosivi i zatezni stup, dakle stupovi koji nose užad i stupovi koji preuzimaju sile zatezanja užadi. Dodatno, stupovi se mogu podijeliti i na specijalne stupove kao što su krajnji, rasteretni, preponski, križišni te prepleteni stupovi [6]. Stupovi vrlo često imaju više funkcija istovremeno. S obzirom na položaj u trasi stupovi se mogu nalaziti u pravolinijskoj trasi, tj. nalaze se u ravnom dijelu vertikalne projekcije trase voda – linijski stupovi, ili na kutu trase, odnosno nalaze se u točkama loma vertikalne projekcije trase voda – kutni stupovi [4].

2.2.1. Nosivi stupovi

Nosivi stupovi (Slika 2.3) se, u pravilu, postavljaju samo u pravolinijskoj trasi. Naprezanje vodiča, odnosno zaštitne užadi kod nosivih stupova u oba raspona je jednako, a vodiči i zaštitna užad nisu s njima čvrsto spojeni i na stup se ne prenosi direktno njihova sila zatezanja s jedne strane stupa, nego se prenosi samo rezultanta sile zatezanja s obje strane, ako ta rezultanta postoji [3]. Prirast, tj. kut nagiba pojasnika u odnosu na vertikalnu os, kod nosivih

je stupova zbog manjeg opterećenja manji nego kod zateznih stupova. Razlog tom je što je glavno opterećenje stupa opterećenje u smjeru strane X (okomito na os trase dalekovoda) pa je prirast u tom smjeru veći nego prirast u smjeru manjeg opterećenja po strani Y . U pravilu se konstrukcije nosivih stupova, gdje su opterećenja manja nego kod zateznih stupova, izvode s jednakim prirastom pomoću kojeg se može postići optimalna iskorištenost pojasnika i povoljan estetski dojam. Kod nosivih stupova uglavnom vrijedi omjer da je širina stupa po strani X veća od širine stupa po strani Y [4].

Kod čelično rešetkastih nosivih stupova za srednjenaponske mreže od 10, 20 i 35 kV, predviđenih za lakše i srednje opterećenje, dvije stranice se izvode s horizontalnim limovima zavarenim na pojasnike umjesto vijčano spojenih dijagonala [5].

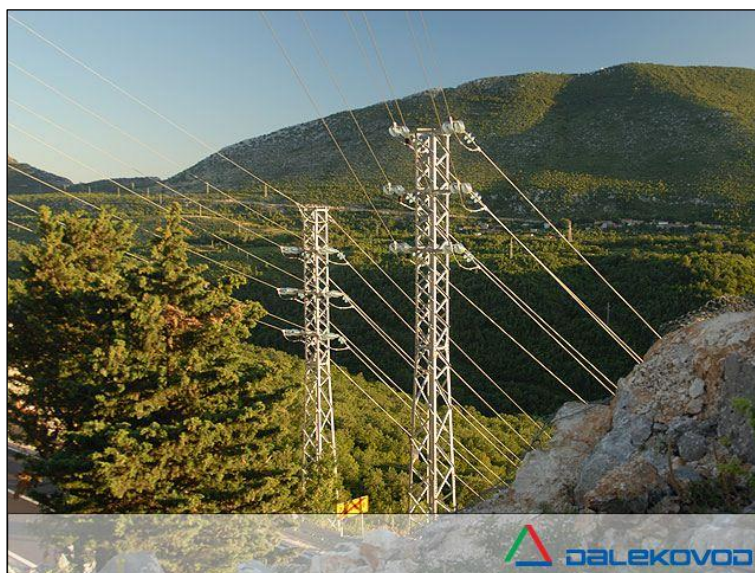


Slika 2.3. Nosivi stup [7]

2.2.2. Zatezni stupovi

Kod zateznih stupova (Slika 2.4) naprezanje vodiča, odnosno zaštitne užadi ne mora biti jednako u oba raspona, vodiči i zaštitna užad su s njim čvrsto spojeni i na stup se direktno prenosi sila zatezanja svakog vodiča i zaštitnog užeta sa svake strane stupa. Stupovi mogu istovremeno biti i nosivi i zatezni (npr. stup na kojem se vodiči odvajaju je u odnosu na prijelazne vodiče nosivi, a u odnosu na ogranak zatezni) [3]. Kod zateznih stupova i stupova s većim opterećenjem potrebno je proširiti stup kako bi se dobila optimalna dimenzija profila

pojasnika za najveće opterećenje i za najveću visinu stupa. Kako ne bi došlo do prevelike širine glave stupa, što je statički nepovoljno i rezultiralo bi većim profilima dijagonala, ide se na primjenu više prirasta za stupove koji imaju veća opterećenja, jer se na taj način postiže maksimalni efekt u smislu iskorištenja profila pojasnika i dijagonala, a estetski dojam takvih stupova je povoljan što je često slučaj kod zateznih stupova. Također, kod zateznih stupova uglavnom vrijedi omjer da je širina stupa po strani X jednaka širini stupa po strani Y [4]. Uz sve navedeno, opterećenja na zateznom stupu su gotovo u svim slučajevima veća i nepovoljnija nego kod čisto nosivih stupova, stoga su i zahtjevi za dimenzioniranje zateznih stupova puno stroži. Promatrani i analizirani stup ZAH2 koristi se kao zatezni stup te će sukladno tome biti i analiziran. Ali kao što je već i spomenuto, stupovi mogu imati i neke specijalne namjene. Zatezni stupovi, osim svoje izvorne svrhe u većini slučajeva s postavljaju u trasu dalekovoda s namjenom da služe kao rasteretni ili kutnorasteretni stupovi, stoga će se i u ovom promatranom slučaju stup analizirati kao kutnorasteretni.



Slika 2.4. Zatezni stup [8]

2.3. Ostali elementi dalekovoda

2.3.1. Vodiči

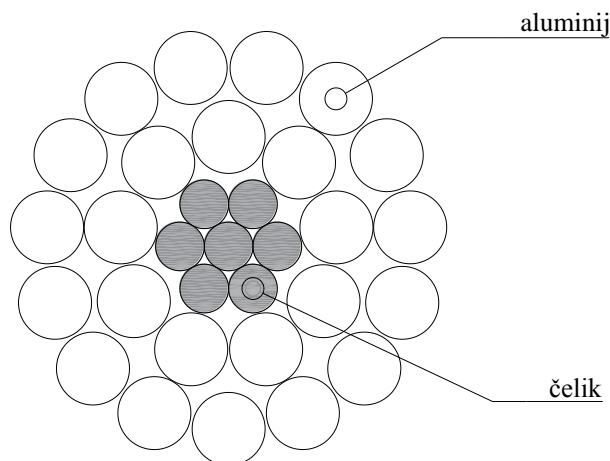
Vodiči kao osnovni funkcionalni element električnog voda imaju zadatak voditi električnu struju i jedini su aktivni dio voda. Uslijed vlastite težine vodiči su mehanički opterećeni na vlak, a zbog činjenice da se protjecanjem struje kroz vodič stvaraju Juleovi gubici to ih čini termički napregnutima [9]. Vodiče je prema izradi moguće podijeliti na vodiče u obliku žica

ili užadi, gdje se gotovo u svim slučajevima za napone veće od nazivnih napona korištenih u kućanstvu koriste vodiči u obliku užadi. Kao materijali za izradu vodiča nadzemnih vodova koriste se razni materijali, no kako bi se postigla što bolja svojstva vodiča kao što su visoka mehanička čvrstoća, električna vodljivost te prihvatljiva mogućnost obrade te dobra otpornost od korozije zbog trajne izloženosti nepovoljnim atmosferskim utjecajima, vodiči se najčešće izrađuju kombiniranjem dva ili više materijala. Poprečni presjek vodiča (Slika 2.5) i materijali od kojih je vodič električne energije izrađen definiraju jakost struje koja smije protjecati vodičem tijekom eksploatacije. Uže koje se danas koristi za distribuciju električne energije najčešće je izvedeno kao paralelno pleteno uže. Opasnost od zamora materijala i oštećenja vodiča na mjestima spoja vodiča i stupa zbog vibracija sprječava se postavljanjem odgovarajućih prigušivača vibracija tzv. Stockbridge prigušivača vibracija.

Ovisno o materijalu, vodiči mogu biti homogeni, ako su izrađeni od jednog materijala ili kombinirani vodiči od dva ili više materijala. Materijali od kojih se izrađuju vodiči su:

- *bakar* (Cu) – ima najbolja električna svojstva;
- *aluminij* (Al) – danas prevladava kao materijal za izradu vodiča za nadzemne vodove. U električnim svojstvima zaostaje za bakrom, ali ima manju specifičnu težinu i jeftiniji je, zbog čega je praktički istisnuo bakar u gradnji nadzemnih vodova. Osjetljiv je na mehanička oštećenja i relativno lako korodira;
- *čelik* – ima vrlo loša električna, ali dobra mehanička svojstva. Čelični vodiči se često primjenjuju kao zaštitna užad i kod kombiniranih vodiča. Od korozije se štiti pocinčavanjem [9];
- *alučel* (aluminij – čelik) – naziv je za materijal od kojega se izrađuje najčešća vrsta kombiniranih vodiča za dalekovode. Jezgra takvog vodiča spletena je od čeličnih žica koje preuzimaju mehanička naprezanja, a glavni je električni vodič vanjski plašt koji se sastoji od aluminijskih žica (Slika 2.5) [2].

Kao što je već spomenuto, užad su standardna forma za vodiče električnih vodova, dok se žice isključivo koriste za niskonaponske mreže odnosno za krajnju distribuciju energije do samih potrošača. Gibljiva su i to im je najveća prednost pred žicama istog presjeka. Normalnom izvedbom užeta smatra se ono uže kojem su sve žice istog presjeka, a za vodiče električne energije se upravo koriste navedena užad. Zbog blagog spiralnog namatanja dužina žice je 2 do 3 % veća od dužine užeta.



Slika 2.5. Presjek alučel užeta vodiča

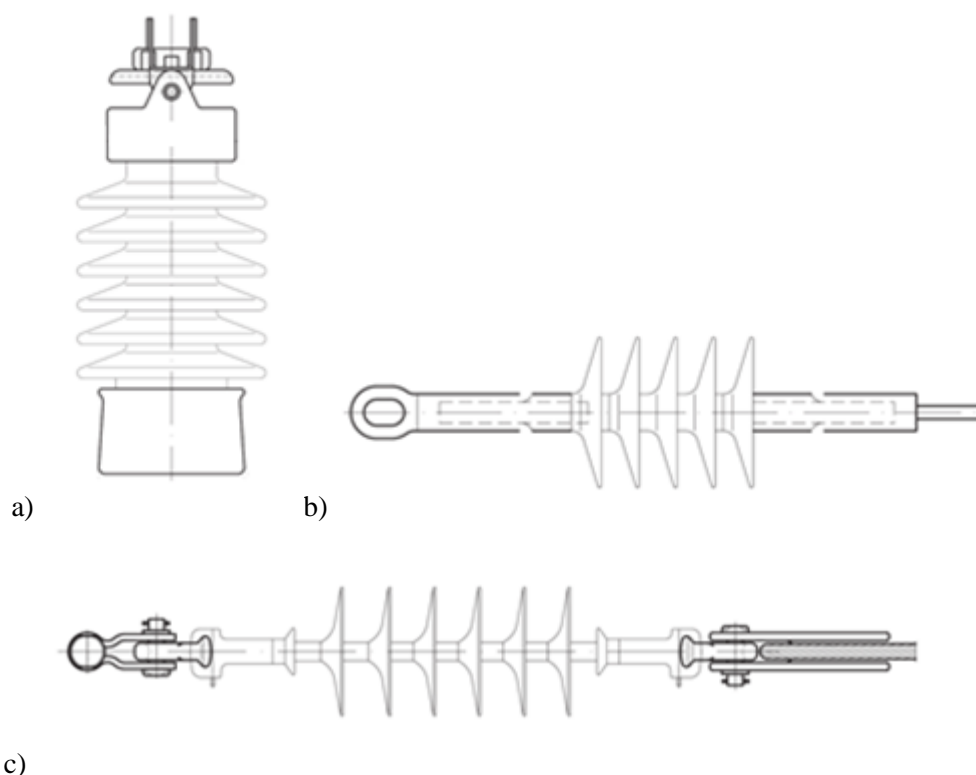
Kod presjeka za *alučel* uže (Slika 2.5) misli se samo na presjek aluminijevog plašta, ali se navodi i presjek čelične jezgre. Tako su npr. za *alučel* uže normirani sljedeći presjeci: 16/2,5; 25/4; 35/6; 50/8; 70/12; 95/15; 150/25; 185/32; 210/40; 240/40 u mm² [9]. Presjek užadi mora biti dovoljno veliki da ukupna temperatura užadi uslijed zagrijavanja strujom ne bude viša od +80 °C [3].

2.3.2. Izolatori

Izolacija nadzemnih vodova u prvo vrijeme je bila uglavnom na bazi keramika tj. porculana. Prvi izolatori bili su potporni izolatori (Slika 2.6 a)) montirani na posebne metalne nosače na koje se direktno ugrađivao vodič. U današnje vrijeme, radi sve većeg utjecaja električnog polja zbog porasta naponskih razina uglavnom se koriste viseći izolatori (Slika 2.6 b)) ili konstrukcije izolatorskih lanaca (Slika 2.6 c)) [4]. Razlika između ove dvije izvedbe izolatora je ta da se potporni izolatori spajaju čvrsto sa stupom te se najčešće koriste na nižim naponskim razinama, tj. na jednostavnim drvenim i betonskim stupovima dok se viseći izolatori spajaju sa stupom tako da se mogu slobodno pomicati, odnosno zakretati oko točke učvršćenja. S obzirom na oblik, izolatore je moguće podijeliti na kapaste izolatore te masivne i štapne izolatore.

Izolatori imaju dvojaku ulogu. Kao prvo električki izoliraju vodiče od stupa, a kao drugo mehanički drže vodiče u određenom položaju, te prenose mehaničke sile s vodiča na stup. Opterećeni su električno i mehanički, a kod pojave električnog luka i termički. Materijali za izradu izolatora su: porculan, steatit, kaljeno staklo i kompozitni materijali [9]. Danas su sve prisutniji izolatori proizvedeni od kompozitnih materijala što se prije svega odnosi na tzv.

polimerne izolatore. Taj tip izolatora sastoji se od nemetalne jezgre proizvedene od kompozitnih materijala (staklena vuna, kevlar i slično) prekrivene polimernim kućištem (uglavnom silikonom) [4]. Kompozitni izolatori imaju nekoliko prednosti nad porculanskim i staklenim izvedbama izolatora. Prije svega to je odlična izolacijska sposobnost, mala masa, visoka mehanička čvrstoća te sposobnost udovoljavanja gotovo svim specijalnim zahtjevima pomoću relativno jednostavnog sustava izrade. Sve navedene karakteristike kompozitnih izolatora omogućavaju pouzdaniju i jednostavniju izvedbu izolacijskih konstrukcija koje utječu na cijeli sustav prijenosa električne energije te s razlogom sve više zamjenjuju dosad korištene staklene i porculanske izolatore.



Slika 2.6. Izolator: a) potporni, b) viseći, c) izolatorski lanac [10]

Raspored izolatorskih lanaca, tj. položaj izolatora na vodu mora biti konstruiran na način da ne utječe i ne smanjuje izolacijska svojstva izolatora. Svaki izolator, odnosno izolatorski lanac potrebno je stoga dimenzionirati mehanički i električni te ako je potrebno može se izvršiti dodatno mehaničko i električno pojačanje izolacije.

Mehaničko dimenzioniranje izolatora obuhvaća dimenzioniranje izolatora i ovjesne opreme u sklopu s izolatorskim lancem. Izolatori i izolatorski lanci u sklopu s nosivim stupovima moraju biti takvih dimenzija da imaju prekidno opterećenje najmanje 3 puta veće od težine

vodiča s dodatnim opterećenjem, ako se radi o visećim izolatorima ili 2,5 ako se radi o potpornim izolatorima, s time da ako je opterećenje vodiča uslijed djelovanja vjetra veće, uzima u obzir to veće opterećenje. Kod zateznih stupova izolatori i izolatorski lanci moraju biti takvih dimenzija da imaju najmanje 3 puta veće prekidno opterećenje od sile zatezanja vodiča, odnosno 2,5 ako se radi o potpornim izolatorima [3].

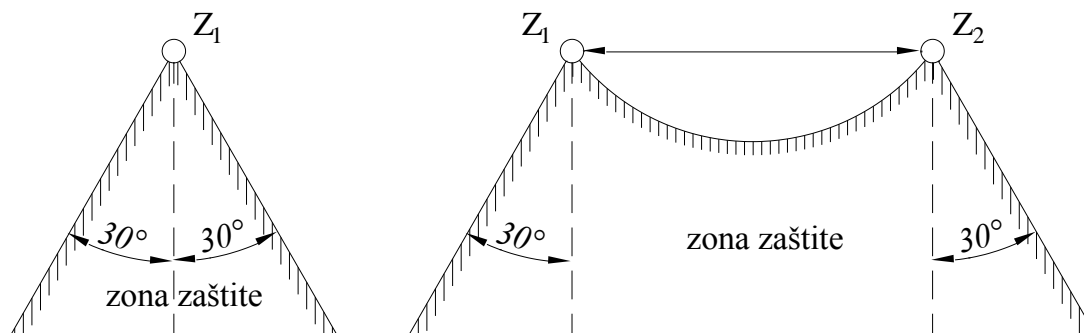
Električno dimenzioniranje izolatora podrazumijeva određivanje tipa i broja izolatorskih članaka u izolatorskom lancu te određivanje oblika zaštitnih armatura i razmaka između gornje i donje zaštitne armature [4]. Električno dimenzioniranje obuhvaća proračun vrijednosti podnosivih atmosferskih udarnih napona, proračun vrijednosti kratkotrajnih podnosivih napona industrijske frekvencije te zahtjevi za povećanjem podnosivih napona za više nadmorske visine i zagađenosti atmosfere [3].

2.3.3. Zaštitna užad i uzemljenje stupa

Uzemljenje nadzemnog voda u širem smislu obuhvaća cijeli sustav kojem pripada zaštitno uže (ako ga ima), uzemljivač, te međusobni galvanski spojevi metalnih dijelova koji nisu pod naponom [9]. Uzemljenje je zapravo električno spajanje pojedinih dijelova dalekovoda sa zemljom. Prvenstvena uloga je osiguravanje pojedinih dijelova koji nisu pod naponom od pojave napona na tim mjestima, a samim time se štiti okolina od opasnosti električnog udara stoga je uzemljenje jedan od najvažnijih faktora zaštite tijekom eksploatacije dalekovoda.

Zaštitno uže ima višestruku funkciju. U prvom redu služi za zaštitu od atmosferskih prenapona koji nastaju uslijed udara groma. Za nadzemni vod je najnepogodniji direktni udar groma u vodič, što dovodi do vrlo visokih prenapona, koje nijedna izolacija voda ne može izdržati. Zbog toga se zaštitno uže postavlja kao gromobran iznad vodiča te se povezuje sa zemljom, da bi preuzelo na sebe direktni udar groma. I udar groma na stup je neugodan, jer zbog otpora uzemljenja stup poprima visok električni potencijal te može doći do povratnog preskoka sa stupa na vodič. Zaštitno uže i ovdje pomaže, tako što ukupnu struju groma dijeli na veći broj stupova. A kad grom udari u okolinu nadzemnog voda, zaštitno uže smanjuje inducirane prenapone u vodičima. Također ima korisnu ulogu i kad nastane kratki spoj između vodiča i zemlje, jer preuzima na sebe dio struje koji bi inače tekao kroz zemlju. Time se smanjuju naponi dodira, a također i inducirani naponi u električnim i telekomunikacijskim vodovima [11].

U gotovo svim slučajevima zaštitna užad se postavlja na vrh stupova po cijeloj dužini trase nadzemnih vodova. Propisima je definirano da zaštitno uže mora biti u takvom položaju u odnosu na fazne vodiče da kut zaštite ne bude veći od 30° što se iz dosadašnjeg iskustva pokazalo kao zadovoljavajuće zaštita od direktnog udara groma u fazne vodiče [4].



Slika 2.7. Zaštitna zona zaštitne užadi [4]

U praksi materijali od kojih se izrađuje zaštitna užad, za razliku od materijala vodiča, je isti ili nešto lošije provodni materijal tipa čelik u slučaju kada je potrebno preuzeti veće napone struje kratkog spoja. Standardna zaštitna užad izvedena je najčešće kao *alučel* užad te takvu užad nije potrebo dimenzionirati u odnosu na napon. Zbog svoje zaštitne funkcije, zaštitna užad nije izolirana u odnosu na stup te se postavlja direktno, tj. spaja se samo pomoću opreme za zavješanje te dodatno uz to mora biti vezana za uzemljivač.

Uzemljivač odnosno uzemljenje u užem smislu ima zadatak da uspostavi galvansku vezu sa zemljom uz minimalni prijelazni otpor. Uzemljivači svojim oblikom i dimenzijama definiraju električno polje u svojoj okolini i o njima ovisi otpor uzemljenja i potencijalne razlike na površini tla u okolini stupa. Izrađuju se od nehrđajućeg ili pocinčanog čelika ili bakra. Po obliku se dijele na pločaste, šipkaste ili trakaste. Za otpor uzemljenja važan je i specifični otpor tla, koji se dosta razlikuje za različite vrste tla [11].

2.3.4. Ovjesna i spojna oprema

Ovjesnu i spojnu opremu potrebno je dimenzionirati prema naponskoj razini za koju je dalekovod namijenjen, mehaničkim i električnim zahtjevima odnosno silama koje se javljaju u vodičima i zaštitnoj užadi te dodatnim atmosferskim uvjetima kako bi spojna oprema bila postojana na atmosferskim prilikama te prema naprezanjima koje spojna i ovjesna oprema mora izdržati da ne dođe do oštećenja.

Ovjesna i spojna oprema se projektira na način da se izbjegnu svi oštri bridovi i izbočine, kako bi nivo radiosmetnji i gubici zbog korone¹ na izolatorskim lancima bili niski te kako bi zadovoljili sve zahtjeve standarda. Zaštita protiv korozije na ovjesnoj i spojnoj opremi izvodi se postupkom vrućeg cinčanja, a kvaliteta mora zadovoljavati sve zahtjeve standarda. U ovjesnu i spojnu opremu spadaju: stremeni, karike, stezaljke, očke, razni produžnici i zatezači te ostala oprema potrebna za izvedbu izolatorskih lanaca. Također u ovjesnu i spojnu opremu ubrajaju se rastojnici i prigušivači vibracija (kao najčešći tip javlja se Stockbridgeov prigušivač vibracija) [10].

2.4. Klimatski uvjeti koji utječu na nadzemne vodove

U svrhu razumijevanja načina opterećenja stupa dalekovoda te postavljanja što točnijeg numeričkog modela potrebno je analizirati sve pojave koje mogu utjecati na dodatno nepovoljno opterećenje stupa. Iako postoji puno parametara koji dodatno opterećuju čitavi nadzemni vod kao što su: duljina trase dalekovoda, konfiguracija terena, geomehanički i hidrološki uvjeti tla, zone potresa te postojeći objekti i naseljenost područja na mjestu prolaska nadzemnog voda, posebna analiza u ovom diplomskom radu obratit će se isključivo na klimatske uvjete odnosno na meteorološke prilike koji se javljaju tijekom eksploatacije dalekovoda. Stoga će se u nastavku opisati 3 najvažnija atmosferska utjecaja, a to su:

- temperatura,
- vjetar,
- dodatni teret – opterećenje uslijed snijega, leda i inja.

2.4.1. Temperatura

Kako se temperatura znatno razlikuje s obzirom na određene geografske prostore tako je potrebno definirati propisane temperature koje su uzimaju u obzir prilikom proračuna i dimenzioniranja kako vodiča tako i samog stupa. Jasno je da vanjska temperatura zraka utječe na naprezanje užadi, a time i na opterećenje stupova nadzemnih vodova. Uslijed povećanja temperature, vodiči se produljuju, te se pritom povećava provjes užadi, a smanjuje naprezanje.

¹ Korona je svjetleći izboj koji se pojavljuje obično na mjestima gdje su vodiči visokog napona savinuti pod oštrim kutom. Korona se opaža na prostoru oko ovjesišta dalekovodnih žica. Pojava djeluje korozivno, a uzrokuje i gubitke električne energije, pa se pri konstrukciji dalekovoda nastoje izbjeći oštre promjene smjera vodiča [2].

Obrnuto vrijedi za sniženje temperature kako je određeno svojstvom linearnog rastezanja tvari.

Kako utjecaj temperature uvelike ovisi o području eksploatacije dalekovoda, *Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova napona 1 kV do 400 kV* [3] (u daljnjem tekstu: *Pravilnik*) na području Hrvatske definirane su slijedeće temperature koje se uzimaju u obzir prilikom dimenzioniranja:

- minimalna: $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- maksimalna: $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- temperatura pri kojoj se očekuje dodatni teret na vodiču: $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Minimalna i maksimalna temperatura od oko $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ te $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ se očekuje u većini krajeva Republike Hrvatske no u pojedinim lokacijama moguća je dosta niža, odnosno viša temperatura od propisane. Propisivanjem navedenih temperatura za minimalnu i maksimalnu temperaturu ostvaruje se dovoljna mehanička sigurnost užiadi i kod iznimno niskih odnosno visokih temperatura [4]. Razlog tome je relativno blaga klima te povijesni pregled ekstremnih temperatura na području Hrvatske koji ukazuje da nema tako učestalih pojava ekstremnih temperatura.

Treba napomenuti da *Pravilnik* [3] posebnim člankom dopušta da se vodiči zbog protjecanja struje u njima smiju zagrijati do $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ te da se u tom slučaju računa s temperaturom okoline od $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Stoga je važno da se dobro definiraju utjecaji vanjske temperature jer zanemarivanje ovog parametra može uzrokovati probleme pri eksploataciji dalekovoda, kao što su nedozvoljeno povećanje provjesa užiadi ili smanjenje prijenosne moći vodiča.

2.4.2. Vjetar

Vjetar je definiran kao pretežno vodoravno strujanje zraka, određeno smjerom, tj. stranom svijeta odakle vjetar puše te brzinom, odnosno njegovom jakošću [2]. Brzina vjetra se obično izražava u kilometrima na sat, ili u boforima² (*Bf*). Beaufortova ljestvica koju je objavila Svjetska meteorološka organizacija (eng. *World Meteorological Organization*), WMO, međunarodno je prihvaćena iskustvena ljestvica za procjenjivanje jakosti vjetra prema

² Bofor (*Bf*) je specijalna mjerna jedinica za brzinu vjetra definirana Beaufortovom ljestvicom i podijeljena je 13 stupnjeva (0–12) i definirana je empirijski po formuli: $v = 0,836 Bf^{3/2}$. Ljestvica se upotrebljava u meteorologiji.

učincima, podijeljena u 13 stupnjeva (od 0 do 12 bofora). Danas služi za ocjenu jakosti vjetra na mjestima gdje nema instrumenata za mjerenje brzine vjetra [2]. Brzina i učinak vjetra prema Beaufortovoj ljestvici (Tablica 2.1) vrijede za visinu od 10 m iznad ravnog nepokrivenog tla.

Tablica 2.1. Beaufortova ljestvica

Stupanj bofora	Opis vjetra	Učinci vjetra	v / km/h
0	tišina	dim se diže okomito uvis	0–1
1	lahor	smjer vjetra zapaža se po dimu	1–5
2	povjetarac	vjetar se osjeća na licu	6–11
3	slab vjetar	lišće i grančice stalno se njišu	12–19
4	umjeren vjetar	vjetar podiže prašinu i manje grane	20–28
5	umjeren jak vjetar	tanja stabla počinju se njihati	29–38
6	jak vjetar	pokreću se velike grane	39–49
7	žestok vjetar	njišu se stabla, hodanje otežano	50–61
8	olujni vjetar	vjetar lomi grane na drveću	62–74
9	jak olujni vjetar	nastaju laka oštećenja na zgradama	75–88
10	orkanski vjetar	velike štete na zgradama i drveću	89–102
11	jak orkanski vjetar	velika razaranja	103–117
12	orkan	katastrofalna razaranja	>118

Jasno je da su stupovi, vodiči i svi ostali elementi dalekovoda izloženi djelovanju vjetra tako što vjetar utječe na gibanje užadi što dovodi do dodatnog naprezanja stupova i ostalih elemenata pogotovo na mjestima spoja užadi i stupa. Stoga je *Pravilnikom* [3] opterećenje od vjetra definirano kao produkt površine objekta, pritiska vjetra, koeficijenta djelovanja vjetra i sinusa napadnog kuta. Opterećenje, tj. sila vjetra računa se prema izrazu

$$F_v = c_v \cdot p \cdot A \cdot \sin \alpha, \quad (2.1)$$

gdje su c_v faktor djelovanja vjetra, p pritisak odnosno tlak vjetra, A površina objekta na koju vjetar djeluje, a α napadni kut sile vjetra na površinu djelovanja. Pri tom se isključivo uzima vodoravni pravac vjetra, a opterećenje od vjetra uspravno na napadnutu površinu. Također

prilikom izračuna opterećenja, za cilindrične objekte uzima se projekcija napadne površine dok se kod rešetkastih stupova uzimaju samo površine okrenute prema vjetru.

Pritisak vjetra moguće je izračunati uz poznavanje brzine vjetra korištenjem izraza

$$p = \frac{v^2}{16}, \quad (2.2)$$

gdje je v maksimalna brzina vjetra koja se na istom potezu trase pojavljuje prosječno svakih pet godina.

Brzina vjetra određuje se na osnovu mjerenja te primjenom statističke obrade mjernih podataka. U nedostatku dovoljnog broja mjernih podataka, brzina vjetra se procjenjuje korištenjem raspoloživih podataka. Stoga su *Pravilnikom* [3] određeni tlakovi vjetra na objekte (Tablica 2.2) u ovisnosti o visini nadzemnog voda.

Tablica 2.2. Tlak vjetra

Visinska zona	$p / \text{N/m}^2$				
Zona do 15 m iznad zemlje	500	600	750	900	1100
Zona od 15 do 40 m iznad zemlje	600	750	900	1100	1300
Zona od 40 do 80 m iznad zemlje	750	900	1100	1300	1500

Za pritisak vjetra na vodiče, odnosno zaštitnu užad mjerodavna je visina njihove točke učvršćenja u stezaljci na stupu. Vrijednosti tlaka vjetra (Tablica 2.2) mogu se povećati ovisno o uvjetima i stanju terena [3]. Pri dimenzioniranju elemenata nadzemnih vodova, opterećenje vjetrom na promatrani element dobiva se primjenom odgovarajućeg faktora djelovanja vjetra (učinak vjetra). Faktor djelovanja za stupove ovisno o presjeku kreću se od 0,7 do 2,8 gdje za četverokutne rešetkaste stupove od profiliranog čelika (kao što je promatrani stup u ovome radu) iznosi 2,6 dok za užad iznosi 1. U proračunu se uvijek uzima najnepovoljniji smjer djelovanja vjetra, tj. okomiti smjer djelovanja vjetra na užad [4].

2.4.3. Dodatni teret

Tijekom zimskih mjeseci prilikom eksploatacije dalekovoda dolazi do pojave ekstremnih uvjeta. Na vodičima, zaštitnoj užadi i ostalim elementima dalekovoda učestalo se stvara inje, led te nakupine mokrog snijega (Slika 2.8). Navedene prilike uzrokuju dodatno opterećenje

koje nepovoljno utječe na dalekovod jer dovode do znatnih povećanja naprezanja stupa i užadi.



Slika 2.8. Dodatni teret na vodičima dalekovoda u eksploataciji [12]

Jedinična težina vodiča, odnosno zaštitnog užeta, u standardnim uvjetima bez dodatnog tereta računa se prema izrazu

$$\begin{aligned} G_v &= m_v \cdot g, \\ G_z &= m_z \cdot g, \end{aligned} \tag{2.3}$$

gdje su m_v i m_z masa vodiča odnosno zaštitnog užeta jedinične dužine, a g ubrzanje sile teže.

Važno je prilikom proračuna stupa, vodiča i zaštitne užadi uzeti u obzir navedeno dodatno opterećenje. *Pravilnik* [3] razlikuje redovni dodatni teret (RDT) i izvanredni dodatni teret (IDT) užadi. Proračun s redovnim dodatnim teretom se koristi prilikom određivanja maksimalnog naprezanja užadi, dok se proračun s izvanrednim teretom koristi za kontrole izvanrednih naprezanja užadi. Za redovno dodatno opterećenje uzima se najveće dodatno opterećenje koje se na nekom mjestu pojavljuje prosječno svakih pet godina, ali u svakom slučaju ne manje od vrijednosti definirane izrazom

$$g_d = c_d \cdot 0,18 \cdot \sqrt{d}, \tag{2.4}$$

gdje su c_d faktor zone leda sa vrijednostima 1, 1,6, 2,5 i 4 ovisno o klimatskom području duž projektirane trase, a d promjer vodiča ili zaštitnog užeta.

Smatra se da dodatno opterećenje djeluje vertikalno prema dolje te se stoga dodaje težini vodiča, odnosno zaštitnog užeta.

Za izvanredno dodatno opterećenje uzima se najveće dodatno opterećenje koje se na određenom mjestu pojavljuje prosječno svakih 20 godina, ali ne manje od dvostrukog redovnog dodatnog opterećenja definiranog izrazom (2.4). Utjecaj dodatnog tereta na opterećenja užadi, odnosno stupova dalekovoda povećava se proporcionalno s povećanjem gravitacijskog raspona a , odnosno razmaka između dva stupa.

Pri projektiranju vodova većina elemenata se dimenzionira prema maksimalnom radnom naprezanju užeta. To naprezanje je vrijednost definirana kao horizontalna komponenta naprezanja u užetu koja se postiže na temperaturi od $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ pri redovnom dodatnom opterećenju ili na temperaturi $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ bez dodatnog opterećenja. U praksi se za maksimalno radno naprezanje odabire iznos od maksimalno 80 do 90 % redovnog dopuštenog naprezanja užeta. Pri tome, vrijednost redovnog dozvoljenog naprezanja može iznositi najviše 40 % od prekidne čvrstoće užeta [4]. Karakteristike užadi kao što su težine užadi i prekidna čvrstoća ovisno o materijalu i konstrukciji užeta mogu se pronaći u katalozima proizvođača, odgovarajućim priručnicima i u *Pravilniku* [3].

2.4.4. Osnovne klimatske karakteristike na području Hrvatske

Prilikom proračuna dalekovoda odnosno konstruiranja, potrebno je poznavati klimatske prilike duž trase prolaska dalekovoda. To zahtijeva analize i mjerenje klimatskih parametara promatranog područje. Prikupljeni podaci o klimatskim parametrima su važni te se koriste za usporedbu s podacima navedenim u proračunu definiranom *Pravilnikom* [3], a ukoliko postoji značajno odstupanje od definiranih podataka potrebno je provesti i dodatne proračune u svrhu povećanja sigurnosti dalekovoda. Kako će ova numerička analiza biti provedena s obzirom na područje Hrvatske, u nastavku će se razmotriti klima te klimatski parametri područja Republike Hrvatske na temelju podataka Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ).

Klimu Hrvatske određuje njezin položaj u sjevernim umjerenim širinama i pripadni vremenski procesi velikih i srednjih razmjera. Najvažniji modifikatori klime na području Hrvatske jesu Jadransko i šire Sredozemno more, orografija³ Dinarida sa svojim oblikom, nadmorskom visinom i položajem prema prevladavajućem strujanju, otvorenost sjeveroistočnih krajeva prema Panonskoj ravnici, te raznolikost biljnog pokrova. Stoga u

³ Orografija je grana geografije koja se bavi opisom i klasifikacijom oblika reljefa na Zemlji [2].

Hrvatskoj prevladavaju tri glavna klimatska područja: kontinentalna, planinska i primorska klima [13].

Srednja godišnja temperatura zraka na području Hrvatske kreće se od 3 °C na najvišim planinskim predjelima do 17 °C uz samu obalu i na otocima srednje i južne Dalmacije zbog njihovog geografskog položaja i neposrednog utjecaja mora. Apsolutni minimumi temperature zraka u Hrvatskoj zabilježeni su u kontinentalnim dijelovima između -21,7 °C te -28,9 °C, a izmjereni apsolutni maksimumi temperature zraka kretali su se u Hrvatskoj između 27,6 °C i 39,2 °C u kontinentalnom dijelu [13].

U Hrvatskoj se javljaju različiti vjetrovi od kojih su, posebice na Jadranu, najvažniji bura i jugo. Bura je najjači vjetar na Jadranu. To je suhi i hladan vjetar sjeveroistočnog smjera, a dolazi s hladnijeg kopna. Puše na mahove, a na moru često stvara prašinu koja smanjuje vidljivost. Najjači i najopasniji udari bure javljaju se u Podvelebitskom kanalu i priobalju podno Biokova. Bura je češća zimi nego ljeti, a uglavnom donosi lijepo i vedro vrijeme. Bura zna potrajati i po više dana, počinje obično dosta naglo, a jenjava nešto polakše. Brzina struje zraka kod udaraca jače bure vrlo je velika te često prelazi 72 km/h, što po Beaufortovoj ljestvici za jačinu vjetra odgovara stupnju 9, a katkad premašuje i brzinu od 180 km/h. Najveća brzina bure izmjerena u Hrvatskoj iznosila je 248,4 km/h [14].

Snijeg je uobičajena pojava u većem dijelu Hrvatske iako ima dosta nizinskih panonskih predjela gdje katkada može tijekom cijele zime izostati. Tijekom hladnog dijela godine snježni pokrivač se u prosjeku javlja u ravničarskoj unutrašnjosti u razdoblju od studenog do travnja s najduljim trajanjem u siječnju. Maksimalne visine snježnog pokrivača kreću se oko 60 cm u nizinskom području sjeverne Hrvatske, rastu s nadmorskom visinom i na vršnom području dosežu oko 140 cm te više od 200 cm na vrhovima Gorskog kotara i Velebita [13].

3. PRORAČUN OPTEREĆENJA STUPA DALEKOVODA

Kako bi se mogla izvršiti linearna, a potom i nelinearna numerička analiza naprezanja i deformacija zateznog stupa dalekovoda ZAH2 opisanog u poglavlju 2.2, potrebno je izračunati sva opterećenja koja djeluju na konstrukciju stupa. Definiranje opterećenja stupova jedna je od najvažnijih faza u konstruiranju nadzemnih vodova zbog vrlo velikog broja utjecajnih faktora. Ispravno postavljeni uvjeti opterećenja i adekvatan izračun opterećenja stupova, osiguravaju stabilnost konstrukcije nadzemnog voda i osnova su daljih optimizacija konstrukcije stupova te njihovog rasporeda i broja duž projektne trase. Odgovarajućim izborom oblika i geometrije stupa može se postići maksimalna iskoristivost konstrukcije za zadate uvjete što je i krajnji cilj promatrano s ekonomskog i sigurnosnog aspekta.

Opterećenja koja se moraju uzeti u obzir prilikom definiranja opterećenja stupova definirana su *Pravilnikom* [3]. Vertikalno opterećenje stupa uvjetovano je masom stupa, vodova te ostalih elemenata ovjesne i spojne opreme. Utjecaj pomoćnog pribora dalekovoda te pomoćnih mehaničkih elemenata poput vijaka, matica i stezaljki su relativno mali naspram ukupne mase konstrukcije, te se mogu u potpunosti zanemariti prilikom određivanja vertikalnog opterećenja. Veliki utjecaj imaju klimatske prilike opisane u poglavlju 2.4, tj. vjetar i dodatni teret uslijed sakupljanja mokrog snijega i leda oko vodiča i zaštitne užadi. Ta opterećenja zajedno sa silama zatezanja vodiča stvaraju horizontalna opterećenja na vrhovima konzola te vrhu stupa.

Pravilnikom [3] su definirane dvije osnovne grupe opterećenja stupova dalekovoda:

- redovna opterećenja i
- izvanredna opterećenja.

Redovna opterećenja su sva opterećenja kojima su stupovi izloženi u redovitom pogonu bez grešaka ili oštećenja na cijelom sustavu dalekovoda. Izvanredna opterećenja nastupaju kad se pojavi oštećenje ili prekid jednog ili više vodiča te zaštitnog užeta, izolatorskog lanca ili ovjesne i spojne opreme sa jedne strane stupa te tada nastaju dodatna horizontalna opterećenja.

Stupovi moraju biti takvih dimenzija da naprezanje u materijalu ne prekorači granicu dozvoljenog naprezanja ni u jednom slučaju opterećenja. Prilikom konstruiranja pojedinog

dijela stupa bira se ono opterećenje koje uzrokuje najveće naprezanje u njemu, s tim da se ne uzima da redovna i izvanredna opterećenja djeluju istovremeno [3].

3.1. Redovna opterećenja

Redovna opterećenja, prema *Pravilniku* [3], definirana su člankom 68. stavka 1. s tri slučaja, označeni oznakama a, b i c. Navedena opterećenja odnose se za sve vrste stupova, nosive i zatezne. Svaki slučaj opterećenja potrebno je promatrati zasebno te stup koji se stavlja u upotrebu mora biti dimenzioniran, odnosno konstruiran na način da uz odgovarajuću sigurnost može izdržati sve slučajeve opterećenja. U nastavku je dan pregled slučaja opterećenja gdje su za svaki slučaju opterećenja definirani uvjeti koji se uzimaju u obzir za izračun opterećenja jer se najčešće na takve načine pojavljuju prilikom eksploatacije stupa.

a) Opterećenje pri čijem se definiranju uzima:

- težina stupa, izolatora, pribora, vodiča i zaštitne užadi,
- težina dodatnog opterećenja na vodičima i zaštitnoj užadi,
- rezultanta pune sile zatezanja svih vodiča i zaštitne užadi s obje strane stupa.

U slučaju opterećenja *68.1.a* sile djeluju u vertikalnom smjeru z . U ovom slučaju radi se o maksimalnim vertikalnim silama jer je obuhvaćen i dodatni teret. Sile zatezanja vodiča i zaštitnih užadi imaju maksimalnu odabranu vrijednost, koja nastupa pri $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ sa dodatnim teretom, odnosno pri $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ bez dodatnog tereta. Kod zateznih (kutno – rasteretnih) stupova sa jednakim zatezanjem užadi s obje strane stupa, pojavljuju se i horizontalne sile u smjeru x .

b) Opterećenje pri čijem se definiranju uzima:

- težina stupa, izolatora, pribora, vodiča i zaštitne užadi,
- pritisak vjetra na stup i na sve vodiče i zaštitnu užad okomito na vod, odnosno u pravcu simetrale kuta trase,
- rezultanta od $2/3$ sile zatezanja svih vodiča i zaštitne užadi s obje strane stupa.

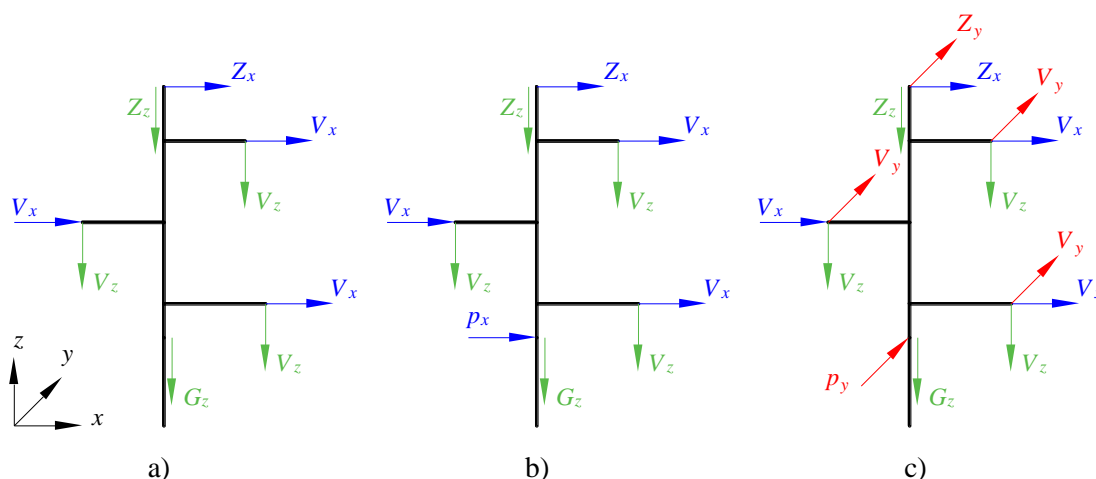
U slučaju opterećenja *68.1.b* sile djeluju u smjerovima osi x i z . Vertikalne sile su u odnosu na slučaj *68.1.a* manje jer se u izračun ne uzima težina dodatnog tereta iako je u obzir potrebno uzeti izazvano djelovanje vjetra na čitavi stup. Kod zateznih (kutno – rasteretnih) stupova sa jednakim zatezanjem užadi s obje strane stupa, u smjeru x uz sile na užad koje su izazvane djelovanjem vjetra, djeluje i rezultanta od $2/3$ sile zatezanja s obje strane stupa.

c) Opterećenje pri čijem se definiranju uzima:

- težina stupa, izolatora, pribora, vodiča i zaštitne užadi,
- pritisak vjetra na stup i na sve vodiče i zaštitnu užad u pravcu voda, odnosno okomito na simetralu kuta trase,
- rezultanta od 2/3 sile zatezanja svih vodiča i zaštitne užadi s obje strane stupa.

Slučaj opterećenja 68.1.c razlikuje se od slučaja opterećenja 68.1.b samo u tome što sile uzrokovane pritiskom vjetra na užad i stup djeluju u smjeru y , a ne smjeru x .

Slika 3.1 prikazuje shematski prikaz opterećenja za zatezne (kutno – rasteretne) stupove s rasporedom konzola u obliku *jela* (Slika 2.2 e)) s jednakim zatezanjem užadi za navedene i opisane slučajeve redovnih opterećenja.



Slika 3.1. Redovni slučajevi opterećenja zateznog stupa

3.2. Izvanredna opterećenja

Izvanredna opterećenja, prema *Pravilniku* [3], definirana su člankom 69. stavka 1 i 2 s time da se stavka 1 odnosi na nosive stupove, a stavka 2 na zatezne i kutno nosive stupove s kutom skretanje trase većim od 20° . Kako je analizirani stup ZAH2 zatezni stup bit će opisan samo stavak 2 ovog članka.

Opterećenje pri čijem se definiranju za prekinuto uže uzima:

- težina užeta sa priborom i dodatnim teretom,
- puna sila zatezanja jednog vodiča odnosno jednog zaštitnog užeta sa jedne strane stupa.

je najniža izvedena s duljinom kraka od $b = 1,45$ m. Konzole se spajaju na glavu u razmacima od 1,7 m, 1,7 m i 0,85 m. Na zadanu konfiguraciju stupa, tj. na vrh konzola stupa montiraju se 3 električna voda dok se na vrh stupa postavlja zaštitno uže. Gravitacijski raspon, odnosno razmak između dva susjedna stupa iznosi 400 m, odnosno poluzbroj susjednih raspona u iznosu od 200 m. Namjena analiziranog stupa u trasi je kutno – rasteretni, a kut skretanja trase na promatranom stupu iznosi 150° .

Za tri električna voda koriste se *alučel* užad $95/15$ mm², vanjskog promjera 13,6 mm, ukupnog poprečnog presjeka $109,7$ mm², jedinične masa $0,384$ kg/m te maksimalnog radnog naprezanja 95 N/mm². Zaštitno uže je čelično uže poprečnog presjeka 35 mm², vanjskog promjera 7,5 mm, jedinične masa $0,272$ kg/m te maksimalnog radnog naprezanja 240 N/mm². Na stupu je također korištena ovjesna i spojna oprema za izoliranje i spajanje vodiča i zaštitne užadi na stup. Ukupna težina izolatorskih lanaca zajedno sa sveukupnom spojnom opremom iznosi 1000 N.

Klimatski uvjeti su određeni naletom vjetra i dodatnim teretom. Tako je za pritisak vjetra na vodiče i zaštitnu užad u proračunu korišten tlak od 900 N/m² dok je za stupove određen iznos od $2,6 \cdot 900$ N/m². Za dodatni teret odabrani su podaci definirani *Pravilnikom* [3] prema klimatskim parametrima promatranog područja odnosno odabran je faktor zone leda koji iznosi 1,6. Tablica 3.1 prikazuje podatke vezane za uvjete i način korištenja, odnosno uloge stupa u trasi te osnovne karakteristike analiziranoga stupa.

Tablica 3.1. Uvjeti opterećenja i korištenja stupa

Zatezni stup ZAH2	
Odabrani oblik glave	JU22
Namjena stupa u trasi	kutno – rasteretni
Kut skretanja trase, α	30°
Gravitacijski raspon, a_{gr}	400 m
Vodiči	$3 \times$ <i>alučel</i> uže $95/15$ mm ²
Zaštitno uže	čelično uže 35 mm ²
Težina izolatora i pribora, G_{iz}	1000 N
Pritisak vjetra, p	900 N/m ²
Faktor zone leda, c_d	1,6

3.4. Opterećenje stupa

Sada kada su opisane sve vrste opterećenja koje mogu utjecati na stup te zadani uvjeti opterećenja, moguće je izračunati opterećenja prema situacijama definiranim i opisanim u poglavljima 3.1 i 3.2. Potrebno je izračunati opterećenja stupa s teretom bez vjetra, zatim kada je stup opterećen vjetrom, a napadni kut vjetra je 0° te kada je stup opterećen vjetrom pod kutom od 90° . Zbog namjene stupa kao zatezni stup potrebno je provjeriti opterećenje stupa prilikom prekida jednog od vodiča ili zaštitne užadi.

Prije izračunavanja opterećenja moguće je odrediti neke od vrijednosti koje će se koristiti prilikom izračunavanja opterećenja za pojedine slučajeve. Koristeći jednadžbe (2.3) i (2.4) moguće je odrediti jedinične težine vodiča i zaštitnog užeta sa i bez dodatnog tereta. Uvrštavanjem vrijednosti u izraz (2.3) dobivaju se iznosi jediničnih težina vodiča i zaštitnog užeta koji iznose

$$\begin{aligned} G_v &= m_v \cdot g = 3,767 \text{ N/m}, \\ G_z &= m_z \cdot g = 2,668 \text{ N/m}. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Jedinične težine vodiča i zaštitnog užeta s dodatnim teretom moguće je izračunati dodavanjem vrijednosti dodatnog tereta definiranog jednadžbom (2.4) te slijedi

$$\begin{aligned} G_{vd} &= G_v + 1,6 \cdot 1,8 \cdot \sqrt{d_v} = 14,388 \text{ N/m}, \\ G_{zd} &= G_z + 1,6 \cdot 1,8 \cdot \sqrt{d_z} = 10,555 \text{ N/m}. \end{aligned} \quad (3.2)$$

3.4.1. Opterećenje prema članku 68.1.a

Horizontalna sila na konzole stupa uslijed zatezanja vodiča jednaka je

$$V_x = 2 \cdot \sigma_v \cdot A_v \cdot \sin \frac{\alpha}{2} = 5395 \text{ N}, \quad (3.3)$$

dok je vertikalna sila na konzole uslijed težine vodiča i opreme s dodatnim teretom jednaka

$$V_z = G_{vd} \cdot a_{gr} + G_{iz} = 6755 \text{ N}. \quad (3.4)$$

Kako u ovom slučaju opterećenja nema zatezanja užadi u smjeru pružanja trase voda, stoga se i ne javlja komponenta opterećenja u smjeru osi y . Isto vrijedi i za vrh stupa gdje se nalazi

zaštitno uže. Uslijed zatezanja zaštitnog užeta javlja se horizontalna sila u smjeru osi x koja je jednaka

$$Z_x = 2 \cdot \sigma_z \cdot A_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} = 4348 \text{ N}, \quad (3.5)$$

dok je vertikalna sila na vrhu stupa uslijed težine zaštitnog užeta s dodatnim teretom jednaka

$$Z_z = G_{zd} \cdot a_{gr} = 4222 \text{ N}. \quad (3.6)$$

3.4.2. Opterećenje prema članku 68.1.b

Kao i u prošlom slučaju, ni u ovom slučaju opterećenja ne javlja se horizontalna sila u smjeru osi y već se javlja samo horizontalna sila na konzole stupa uslijed zatezanja vodiča te pritiska vjetra na vodiče u smjeru osi x te je jednaka

$$V_x = \frac{2}{3} \cdot 2 \cdot \sigma_v \cdot A_v \cdot \sin \frac{\alpha}{2} + c_v \cdot p \cdot d_v \cdot a_{sr} = 6044 \text{ N}, \quad (3.7)$$

dok je vertikalna sila na konzole uslijed težine vodiča i opreme jednaka

$$V_z = G_v \cdot a_{gr} + G_{iz} = 2507 \text{ N}. \quad (3.8)$$

Isto vrijedi i za vrh stupa gdje se javlja horizontalna sila u smjeru osi x . Uslijed zatezanja zaštitnog užeta te pritiska vjetra na uže pod napadnim kutom od 0° horizontalna sila jednaka je

$$Z_x = \frac{2}{3} \cdot 2 \cdot \sigma_z \cdot A_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} + c_v \cdot p \cdot d_z \cdot a_{sr} = 4249 \text{ N}, \quad (3.9)$$

dok je vertikalna sila na vrhu stupa uslijed težine zaštitnog užeta jednaka

$$Z_z = G_z \cdot a_{gr} = 1067 \text{ N}. \quad (3.10)$$

3.4.3. Opterećenje prema članku 68.1.c

Slučaj opterećenja 68.1.c sličan je prethodnom slučaju samo što je napadni kut vjetra sada 90° . Horizontalna sila u smjeru osi x na konzole stupa uslijed zatezanja vodiča jednaka je $2/3$ sile zatezanja užeta, tj.

$$V_x = \frac{2}{3} \cdot 2 \cdot \sigma_v \cdot A_v \cdot \sin \frac{\alpha}{2} = 3596 \text{ N}. \quad (3.11)$$

Horizontalna sila u smjeru osi y na konzole stupa uslijed pritiska vjetra na vodiče jednaka je

$$V_y = \sin \frac{\alpha}{2} \cdot c_v \cdot p \cdot d_v \cdot a_{sr} = 634 \text{ N}, \quad (3.12)$$

dok je vertikalna sila na konzole uslijed težine vodiča i opreme jednaka

$$V_z = G_v \cdot a_{gr} + G_{iz} = 2507 \text{ N}. \quad (3.13)$$

Horizontalna sila na vrhu stupa uslijed zatezanja zaštitnog užeta jednaka je

$$Z_x = \frac{2}{3} \cdot 2 \cdot \sigma_z \cdot A_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} = 2899 \text{ N}, \quad (3.14)$$

a druga komponenta horizontalne sile na vrhu stupa uslijed pritiska vjetra na zaštitno uže jednaka je

$$Z_y = \sin \frac{\alpha}{2} \cdot c_v \cdot p \cdot d_z \cdot a_{sr} = 349 \text{ N}, \quad (3.15)$$

dok je vertikalna sila na vrhu stupa uslijed težine zaštitnog užeta jednaka

$$Z_z = G_z \cdot a_{gr} = 1067 \text{ N}. \quad (3.16)$$

3.4.4. Opterećenje prema članku 69.2

Opterećenje prema članku 69.2 podrazumijeva prekid jednog od vodiča ili zaštitnog užeta. stoga su moguće 4 situacije odnosno vrsta opterećenja, a to su prekid jednog od tri postavljena vodiča te prekid zaštitnog užeta. Neprekinuta užad opterećena su kako je definirano člankom 68.1.a dok su opterećenja koja se javljaju na mjestu spoja prekinutog užeta vodiča ili zaštitnog užeta i stupa izračunata u nastavku.

Horizontalna sila na konzolu stupa u smjeru x uslijed prekida vodiča jednaka je

$$V_x = \sigma_v \cdot A_v \cdot \sin \frac{\alpha}{2} = 2697 \text{ N}, \quad (3.17)$$

dok je druga komponenta horizontalne sile na konzolu stupa u smjeru osi y uslijed prekida vodiča jednaka

$$V_y = \sigma_v \cdot A_v \cdot \cos \frac{\alpha}{2} = 10066 \text{ N}. \quad (3.18)$$

Vertikalna sila na konzolu stupa uslijed prekida vodiča te težine vodiča i opreme s dodatnim teretom jednaka je

$$V_z = G_{vd} \cdot a_{gr} + G_{iz} = 6755 \text{ N}. \quad (3.19)$$

Horizontalna sila na vrhu stupa u smjeru x uslijed prekida zaštitnog užeta jednaka je

$$Z_x = \sigma_z \cdot A_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} = 2174 \text{ N}, \quad (3.20)$$

dok je druga komponenta horizontalne sile na vrhu stupa u smjeru osi y uslijed prekida zaštitnog užeta jednaka

$$Z_y = \sigma_z \cdot A_z \cdot \cos \frac{\alpha}{2} = 8114 \text{ N}. \quad (3.21)$$

Vertikalna sila na konzolu stupa uslijed prekida zaštitnog užeta te težine zaštitnog užeta s dodatnim teretom jednaka je

$$Z_z = G_{zd} \cdot a_{gr} = 4222 \text{ N}. \quad (3.22)$$

Tablica 3.2 prikazuje vrijednosti horizontalnih i vertikalnih sila na vrhovima konzola te vrhu stupa za pojedine slučajeve i načine opterećenja. Sile sa oznakom V djeluju na vrhovima triju konzola dok su sile označene sa oznakom Z rezultat opterećenja zaštitnim užetom te se nalaze na vrhu stupa. Pritisak vjetra na stup odnosno rešetkaste elemente odnosi se samo na elemente koji su u izravnom dodiru s vjetrom. Za slučaj opterećenja 69.2 oznaka P označava prekinuti vodič ili zaštitno uže, dok oznaka N označava neprekinuti vodič ili zaštitno uže. Tako su moguće 4 kombinacije opterećenja u slučaju 69.2.

Tablica 3.2. Opterećenje zateznog stupa sa jednakim zatezanjem užadi

		Vodiči			Zaštitno uže			Stup	
		V_x / N	V_y / N	V_z / N	Z_x / N	Z_y / N	Z_z / N	$p_x / \text{N/m}^2$	$p_y / \text{N/m}^2$
68.1	a	5395	–	6755	4348	–	4222	–	–
	b	6044	–	2507	4249	–	1067	2340	–
	c	3596	634	2507	2899	349	1067	–	2340
69.2	P	2697	10066	6755	2174	8114	4222	–	–
	N	5395	–	6755	4348	–	4222	–	–

Rezultati, odnosno vrijednosti sila dobiveni proračunom bit će dalje korišteni za provedbu numeričke analize te za proračun dimenzioniranja stupa prema eksperimentalno dobivenim rezultatima koji će biti opisani u nastavku.

3.5. Eksperimentalni rezultati

Kako bi provedena numerička analiza čeličnog rešetkastog stupa dalekovoda mogla biti verificirana, potrebno je dobivene rezultate numeričke analize usporediti referentnim rezultatima odnosno rezultatima dobivenim eksperimentalno.

Za svaki tipski stup dalekovoda za naponske mreže do 35 kV izrađen je prototip konstrukcije koji je ispitan probnim opterećenjem. Na temelju pregleda projektne dokumentacije, proračuna i radioničkih nacrtā, pregleda konstrukcije prototipa, rezultata ispitivanja te sudjelovanja kod ispitivanja, Institut građevinarstva Hrvatske (IGH) je kao ovlaštena organizacija za te djelatnosti, izdao ateste o probnom ispitivanju. Sukladno tome nosivost svakog stupa određena je osnovnom primjenom tj. uvjetima opterećenja za koje je stup dimenzioniran, a definirana je nazivnim opterećenjem i dopuštenim momentom torzije sa odgovarajućom sumom horizontalnih sila [5]. Nazivno opterećenje odgovara najvećoj sili na vrhu stupa, koju pojasnici stupa mogu preuzeti za određeni slučaj opterećenja prema *Pravilniku* [3]. Tablica 3.3 prikazuje rezultate eksperimentalne analize. U njoj su dane vrijednosti dopuštenih maksimalnih rezultatnih sila opterećenja reduciranih na vrh stupa te maksimalna dopuštena horizontalna i vertikalna opterećenja za analizirani zatezni stup ZAH2.

Tablica 3.3. Dopuštena reducirana, horizontalna i vertikalna opterećenja stupa ZAH2 [5]

	R / kN	$\Sigma V_z / \text{kN}$	$\Sigma H_x / \text{kN}$	$\Sigma H_y / \text{kN}$	$\Sigma H_x / \text{kN}$	$\Sigma H_y / \text{kN}$	$p / \text{N/m}^2$
	$M_t = 0 \text{ Nm}$				$M_t = 7500 \text{ Nm}$		
a	17,6	34	28	28	16	16	–
68.1	17	10	26	28	14	16	1100
	17,8		27	28	15	16	600
c	16,2	10	28	25	16	13	1100
	17,3		28	26	16	14	600
	$M_t = 12500 \text{ Nm}$				$M_t = 15000 \text{ Nm}$		
69.2	24,2	34	19	19	14	14	–

Prema opterećenju stupa izračunatom u poglavlju 3.4 moguće je izračunati ukupnu rezultantnu silu opterećenja reduciranu na vrh stupa te ukupna horizontalna i vertikalna opterećenja na mjestu djelovanja na konstrukciju stupa. Rezultanta sila reducirana na vrh stupa za pojedini slučaj redovnog, odnosno izvanrednog opterećenja mora biti manja ili jednaka maksimalnom dopuštenom opterećenju eksperimentalno definiranom (Tablica 3.3), a isto mora vrijediti za ukupna horizontalna i vertikalna opterećenja na mjestu djelovanja na konstrukciju koja su ovisna o aktivnom momentu torzije na stupu, tj. moraju biti zadovoljeni uvjeti

$$\begin{aligned}
 R &\leq R_{\text{dop}}, \\
 \sum V_z &\leq \sum V_{\text{zdop}}, \\
 \sum H_x &\leq \sum H_{\text{xdop}}, \\
 \sum H_y &\leq \sum H_{\text{ydop}}.
 \end{aligned}
 \tag{3.23}$$

Također treba biti ispunjen i uvjet dopuštenog vertikalnog opterećenja na konzolu u ovisnosti o duljini konzole i ukupnog horizontalnog opterećenja u pravcu pružanja trase dalekovoda (Tablica 3.4).

Tablica 3.4. Dopuštena vertikalna opterećenja na konzolu stupa ZAH2 [5]

a / m	V_z / kN			
	$H_y = 0 \text{ kN}$	$H_y = 5,3 \text{ kN}$	$H_y = 7,7 \text{ kN}$	$H_y = 10,42 \text{ kN}$
0,95	11,8	11,2	11	10,7
1,2	8,9	8,3	8	7,7
1,45	6,8	6,1	6	5,7
1,6	5,2	5,2	5,2	4,7

Za svaku pojedinu konzolu mora vrijediti uvjet

$$V_z \leq V_{\text{zdop}}. \tag{3.24}$$

Za analizirani zatezni stup ZAH2, visine 13 m, presjek za reduciranje opterećenja iznosi 8,8 m. Na temelju izračunatih opterećenja moguće je za svaki slučaj izračunati rezultantnu silu te ukupna horizontalna i vertikalna opterećenja. U nastavku će biti prikazan izračun

ukupnih opterećenja samo za slučaj opterećenja 68.1.a, dok će za ostale slučajeve biti dan samo tablični prikaz (Tablica 3.5).

Prvo je potrebno izračunati rezultantu sila reduciranu na vrh stupa u smjeru osi x i y . Iznosi komponenta rezultantne sile u smjeru osi x jednaka je

$$R_x = \frac{4348 \cdot 8,8 + 5395 \cdot (7,1 + 5,4 + 4,55) + 6755 \cdot 1,45}{8,8} = 15914 \text{ N}, \quad (3.25)$$

dok je komponenta rezultantne sile u smjeru osi y jednaka

$$R_y = 0 \text{ N}, \quad (3.26)$$

jer u promatranom slučaju opterećenja ne postoje aktivne sile na konzolama i vrhu stupa u smjeru osi y . Ukupna rezultantna sila reducirana na vrh stupa za slučaj opterećenja 68.1.a iznosi

$$R = R_x + R_y = 15914 \text{ N}. \quad (3.27)$$

Zatim je potrebno odrediti sume vertikalnih i horizontalnih sila koje djeluju na stupu. Zbrajanjem horizontalnih i vertikalnih sila dobivaju se iznosi suma sila koje su jednake

$$\begin{aligned} \sum V_z &= 4222 + 3 \cdot 6755 = 24487 \text{ N}, \\ \sum H_x &= 4348 + 3 \cdot 5395 = 20533 \text{ N}, \\ \sum H_y &= 0 \text{ N}. \end{aligned} \quad (3.28)$$

Kako se u slučaju opterećenja 68.1.a ne javljaju sile u smjeru osi y , samim time stup nije opterećen momentom torzije, tj. jednak je

$$M_t = 0 \text{ Nm}. \quad (3.29)$$

Na svim konzolama pojedinačna vertikalna opterećenja jednaka su 6755 N, a duljine gornje i srednje konzole iznose 1,2 m dok je duljina donje konzole 1,45 m.

Sada je moguće usporediti dobivene vrijednosti koje opterećuju stup sa maksimalnim dopuštenim opterećenjima. Iznosi rezultantne sile reducirane na vrh stupa te sume vertikalnih i horizontalnih opterećenja na mjestu djelovanja na konstrukciji stupa manja su od dopuštenih

vrijednosti opterećenja dobivenih eksperimentalnom analizom na prototipu konstrukcije, odnosno zadovoljen je uvjet (3.23) te vrijedi

$$\begin{aligned}
 R &= 15914 \text{ N} \leq R_{\text{dop}} = 17600 \text{ N}, \\
 \sum V_z &= 24487 \text{ N} \leq \sum V_{z\text{dop}} = 34000 \text{ N}, \\
 \sum H_x &= 20533 \text{ N} \leq \sum H_{x\text{dop}} = 28000 \text{ N}, \\
 \sum H_y &= 0 \text{ N} \leq \sum H_{y\text{dop}} = 28000 \text{ N}.
 \end{aligned}
 \tag{3.30}$$

Također je zadovoljen i uvjet (3.24), odnosno vertikalno opterećenje na konzolu stupa manje je od dopuštenog vertikalnog opterećenja za sve tri konzole s obzirom na horizontalno opterećenja u smjeru osi y te duljinu konzole, tj. za gornju i srednju konzolu duljine 1,2 m, odnosno za donju konzolu duljine 1,45 m vrijedi

$$\begin{aligned}
 V_z &= 6755 \text{ N} \leq V_{z\text{dop}} = 8900 \text{ N}, \\
 V_z &= 6755 \text{ N} \leq V_{z\text{dop}} = 6800 \text{ N}.
 \end{aligned}
 \tag{3.31}$$

Prema eksperimentalnim rezultatima za dimenzioniranje tipskih nosivih i zateznih stupova dalekovoda, stup ZAH2 zadovoljava uvjete nosivosti stupa s obzirom na opterećenja definirana člankom 68.1.a.

Tablica 3.5 prikazuje izračunata ukupna vertikalna i horizontalna opterećenja te rezultantne sile reducirane na vrh stupa. Iz tablice je vidljivo da su vrijednosti označene crvenom bojom veće od maksimalnih dopuštenih vrijednosti opterećenja (Tablica 3.3) za analizirani zatezni stup ZAH2. Prilikom puknuća vodiča na najnižoj odnosno donjoj konzoli javlja se moment torzije u iznosu od približno 15 kNm. Za navedenu vrijednost momenta prema definiranim dopuštenim opterećenjima (Tablica 3.3), iznos sume horizontalnih sila u smjeru osi x ne smije biti veći od 14 kN, tj. nije zadovoljen uvjet (3.23), odnosno suma horizontalnih sila u smjeru osi x veća je od dopuštene sume horizontalnih sila, tj.

$$\sum H_x = 17835 \text{ N} \geq \sum H_{x\text{dop}} = 14000 \text{ N}.
 \tag{3.32}$$

Sve ostale vrijednosti opterećenja kao što su rezultantna sila reducirana na vrh stupa, suma horizontalnih sila u smjeru osi y te suma sila u vertikalnom smjeru za pojedine slučajeve opterećenja manje su od dopuštenih vrijednosti, tj. uvjeti nosivosti su zadovoljeni.

Tablica 3.5. Izračunata ukupna opterećenja stupa

		R_x / N	R_y / N	R / N	$\Sigma V_z / N$	$\Sigma H_x / N$	$\Sigma H_y / N$	M_t / Nm
68.1	a	15914	–	15914	24487	20533	–	–
	b	16372	–	16372	8588	22381	–	–
	c	10279	1577	11856	8588	13687	2251	919,3
69.2	P1	13737	8121	21858	24487	17835	10066	12079
	P2	14258	6177	20435	24487	17835	10066	12079
	P3	14519	5205	19724	24487	17835	10066	14596
	Z	13740	8114	21854	24487	18359	10066	–

Također je potrebno promotriti i vrijednosti vertikalnog opterećenja na pojedine konzole. Tablica 3.4 definira dopušteno vertikalno opterećenje na konzolu stupa s time da je ono uvjetovano horizontalnim opterećenjem konzole u smjeru osi y . Za sve navedene slučajeve opterećenja prema izračunatim opterećenjima zateznog stupa (Tablica 3.2), na gornjoj i srednjoj konzoli duljine 1,2 m, uvjet da je vertikalno opterećenje konzole manje ili jednako od dopuštenog je zadovoljeno.

Jedini slučaj kada uvjet (3.24) nije zadovoljen je u izvanrednom slučaju opterećenja 69.2, tj. puknuće vodiča na donjoj konzoli (P3). U tom slučaju iznos vertikalnog opterećenja na konzoli duljine 1,45 m iznosi 6755 N. Kako je horizontalno opterećenje na istoj konzoli u smjeru osi y jednako 10066 N, a dopušteno vertikalno opterećenje 5700 N (Tablica 3.4), lako je zaključiti da navedeni uvjet nije zadovoljen jer je

$$V_z = 6755 \text{ N} \leq V_{z\text{dop}} = 5700 \text{ N}. \quad (3.33)$$

Iz eksperimentalnih podataka nosivosti stupa i njihove usporedbe s izračunatim opterećenjima definiranih pravilnikom moguće je zaključiti da analizirani zatezni stup ZAH2 visine 13 m, ne zadovoljava zadane uvjete opterećenja i namjene te se ne može koristiti u definiranu svrhu. Razlog tome je što se prilikom izvanrednog opterećenja 69.2 odnosno prekida vodiča najniže konzole javljaju puno veća opterećenja nego što analizirani stup može izdržati, a da pritom ne dođe do trajne plastične deformacije stupa i oštećenja. Prema tome bilo bi potrebno odabrati tipski zatezni stup „višeg reda“ odnosno stup veće nosivosti iz kataloga stupova koji se proizvode u tvrtki Dalekovod d.d. [5], a u ovom slučaju to je stup s oznakom ZAJ2.

Dobiveni rezultati poslužit će kao referenca za provjeru rezultata dobivenih u numeričkoj analizi primjenom metode konačnih elemenata (MKE) u programskom paketu *Abaqus*. Rješenja koja se dobivaju pomoću MKE su približna, stoga su postavljena kritička pitanja njihove dovoljne točnosti, stabilnosti i konvergencije, a upravo će navedeni eksperimentalni rezultati pomoći pri kritičkom vrednovanju dobivenih rezultata.

4. O METODI KONAČNIH ELEMENATA I VERIFIKACIJA ELEMENATA

Metoda konačnih elemenata (MKE) je numerička metoda koja se temelji na fizičkoj diskretizaciji kontinuuma. Razmatrani kontinuum s beskonačno stupnjeva slobode gibanja zamjenjuje se s diskretnim modelom međusobno povezanih elemenata s ograničenim brojem stupnjeva slobode. Drugim riječima, područje kontinuuma dijeli se na konačan broj potpodručja koja se nazivaju konačni elementi (KE), odnosno razmatrani kontinuum postaje mreža konačnih elemenata. Konačni elementi međusobno su povezani u točkama na konturi koje se nazivaju čvorovi. Stanje u svakom elementu, kao što je npr. polje pomaka, deformacije, naprezanja, temperature te ostalih veličina, opisuje se pomoću interpolacijskih funkcija. Te funkcije moraju zadovoljavati odgovarajuće uvjete da bi se diskretizirani model što više približio ponašanju kontinuiranog sustava. Uz pravilnu formulaciju konačnih elemenata, približavanje točnom rješenju raste s povećanjem broja elemenata. Prilikom izvođenja algebarskih jednadžbi polazi se od diferencijalnih jednadžbi koje opisuju stanje u elementu ili se rabi varijacijska formulacija. Nakon izvođenja jednadžbi za konačni element, gdje su nepoznanice neovisne varijable u čvorovima, odgovarajućim postupcima izvode se globalne jednadžbe za diskretizirani model. Pomoću izračunatih čvornih veličina moguće je, primjenom poznatih teorijskih relacija, odrediti sve veličine potrebne za analizu opisanoga kontinuiranog sustava [15].

Kao što je u definiciji MKE navedeno, MKE je numerička metoda te su samim time i sva dobivena rješenja približna, odnosno unosi se trajna greška u rješenje problema tj. proračunskog modela (PM). Kako bi se približili realnim vrijednostima odnosno postigla što točnija rješenja potrebno je pravilno postaviti proračunski model te odabrati odgovarajući tip konačnih elemenata. Stoga je potrebno poznavati fizikalno ponašanje konstrukcije koja se analizira te teorijske osnove konačnih elemenata kako bi se greška proračunskog modela mogla „kontrolirati“ i što je više smanjiti.

Razvoj računala omogućio je primjenu MKE u svakodnevnu inženjersku praksu te izbjegavanje ručnog računanja veoma velikih sustava jednadžbi, odnosno MKE ne bi se ni mogla primjenjivati bez današnjih računala koja omogućavaju rješavanje velikih sustava jednadžbi čije je rješavanje neophodno prilikom primjene MKE. Osim skraćivanja vremena

potrebnog za izradu proračuna, primjenom MKE moguće je u vrlo kratkom roku napraviti i veliki broj numeričkih eksperimenata, što omogućuje dodatnu uštedu vremena, ali i izradu bolje optimiranih konstrukcija [15].

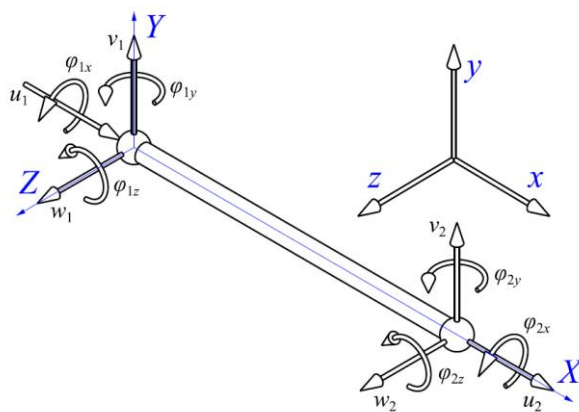
Danas postoji velik broj računalnih programa temeljenih na MKE koji omogućuju analizu kompleksnih problema prvenstveno onih koje je komplicirano ili nemoguće riješiti poznatim analitičkim metodama stoga je u tu svrhu i u ovom radu korišten takav jedan programski paket, točnije *Abaqus/CAE* verzija 6.14–1 kompanije *Dassault Systèmes* [1].

4.1. Opis primijenjenih konačnih elemenata

Prilikom diskretizacije rešetkaste strukture poput stupa dalekovoda, koriste se linijski konačni elementi. Analizirana konstrukcija stupa koja ima beskonačno mnogo stupnjeva slobode, diskretizira se na veliki broj malih konačnih elemenata sa konačnim brojem stupnjeva slobode. Broj i veličina elemenata su definirani na način da predstavljaju optimum između točnosti rezultata i utroška vremena potrebnog za analizu konstrukcije.

4.1.1. Prostorni gredni konačni element

Za numeričku analizu čeličnog rešetkastog stupa promatranog u ovom radu korišteni su prostorni kubični Euler – Bernoulijevi konačni elementi koji u programskom paketu *Abaqus* imaju oznaku B33. Osnovni prostorni gredni konačni element ima dva čvora, svaki na jednom kraju, a svaki čvor ima 6 stupnja slobode gibanja: 3 translacije i 3 rotacije u smjerovima globalnih osi Kartezijevog koordinatnog sustava. Slika 4.1 prikazuje navedeni element s pripadajućim stupnjevima slobode.



Slika 4.1. Osnovni prostorni gredni element [16]

Kod prostornog kubičnog Euler – Bernoulijevog konačnog elementa prilikom izvoda elementa koristi se Euler – Bernoulijeva teorija čije je glavna pretpostavka da se zanemaruju deformacije zbog posmičnih naprezanja dok se kod Timošenkovih konačnih grednih elemenata to uzima u obzir (*Abaqus* oznaka: posmično fleksibilan (eng. *shear flexible*)). Zbog toga, poprečni presjeci ostaju u istoj ravnini, ako nema uvijanja koje uzrokuje deplanaciju i okomiti su na neutralnu liniju. Da bi ova pretpostavka bila ispunjena, omjer dimenzija poprečnog presjeka grede i duljine grede mora biti manji od 1/5 te je tada greška manja od 2 % [17].

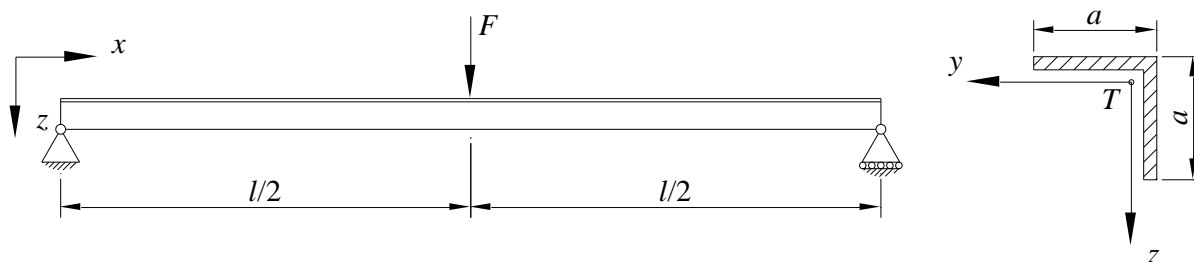
Navedeni gredni elementi prikladni su za diskretizaciju tijela čija je jedna dimenzija bitno veća od ostale dvije što je karakteristika vitke i duge grede. U kontekstu ovog rada navedeni elementi korišteni su za diskretizaciju L profila od kojih je stup sastavljen.

4.2. Verifikacija primijenjenih konačnih elemenata

Kako bismo bili sigurni u rezultate dobivene numeričkom analizom metodom konačnih elemenata bit će provedena verifikacija korištenih grednih elemenata na jednostavnijim problemima za koje je moguće odrediti analitičko rješenje. Cilj je identificirati one elemente koji najbolje mogu opisati zadani problem. Stoga će u ovom poglavlju biti numerički riješeno tri primjera kako bi se sa sigurnošću moglo pristupiti znatno kompleksnijoj linearnoj i nelinearnoj analizi. Također pokazat će se konvergencija rješenja korištenjem različitog broja korištenih konačnih elemenata.

4.2.1. Primjer I: Slobodno oslonjena greda opterećena koncentriranom silom

Greda duljine l konstantnog poprečnog presjeka u obliku standardnog L profila opterećena je koncentriranom silom F na sredini grede i slobodno oslonjena na rubovima (Slika 4.2). Potrebno je odrediti progib w na sredini grede.



Slika 4.2. Slobodno oslonjena greda opterećena koncentriranom silom

Tablica 4.1 prikazuje zadane geometrijsko materijalne karakteristike grede.

Tablica 4.1. Primjer I, zadani parametri

a / mm	t / mm	l / mm	F / N	E / MPa	ν
75	8	2000	3000	210000	0,3

Prvo je potrebno odrediti progib sredine grede analitički. Progib slobodno oslonjene grede opterećene koncentriranom silom je najveći na sredini grede [18] i može se analitički izračunati pomoću izraza (4.1) te nakon uvrštavanja vrijednosti u izraz slijedi

$$w = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I_y} = 3,956 \text{ mm}, \quad (4.1)$$

gdje je I_y aksijalni moment tromosti u smjeru osi y . Navedeni moment tromosti moguće je izračunati pomoću analitičkog izraza dobivenog korištenjem Steinerovog pravila

$$I_y = I'_y + A \cdot d^2 \quad (4.2)$$

i momenta tromosti kvadrata

$$I'_y = \frac{a^4}{12} \quad (4.3)$$

te uz poznavanje položaja težišta. Iz navedenih izraza slijedi da je

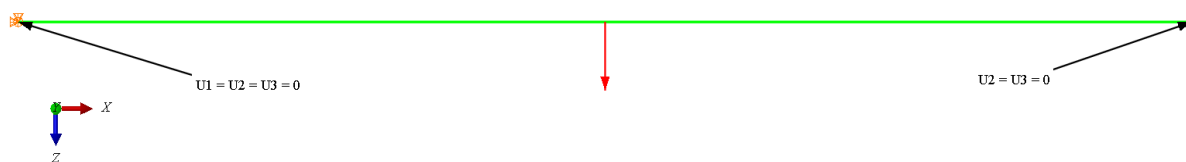
$$I_y = \frac{t \cdot (5 \cdot a^2 - 5 \cdot a \cdot t + t^2) \cdot (a^2 - a \cdot t + t^2)}{12 \cdot (2 \cdot a - t)} = 601816,016 \text{ mm}^4. \quad (4.4)$$

Zatim je u programskom paketu *Abaqus* konstruiran proračunski model grede (Slika 4.3).



Slika 4.3. Primjer I, *Abaqus* – proračunski model

Greda je opterećena zadanom silom F na sredini te su postavljeni rubni uvjeti nepomičnog oslonca na lijevom kraju grede te pomični oslonac u smjeru osi x na desnom kraju koji omogućuje pomak samo u smjeru osi x (Slika 4.4).



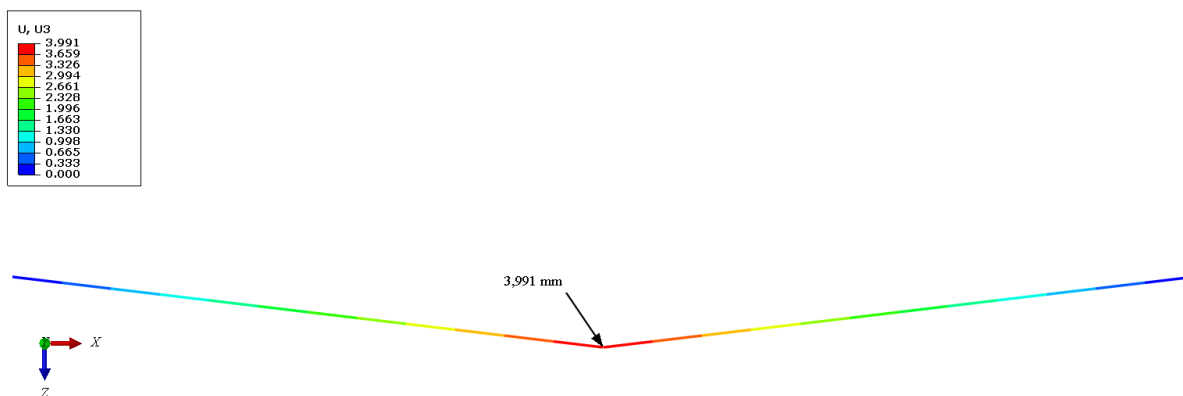
Slika 4.4. Primjer I, *Abaqus* – opterećenje i rubni uvjeti

Nakon zadavanja poprečnog presjeka grede, model je diskretiziran s dva Euler – Bernoulijeva konačna elementa (*Abaqus* oznaka B33) jednake duljine (Slika 4.5).



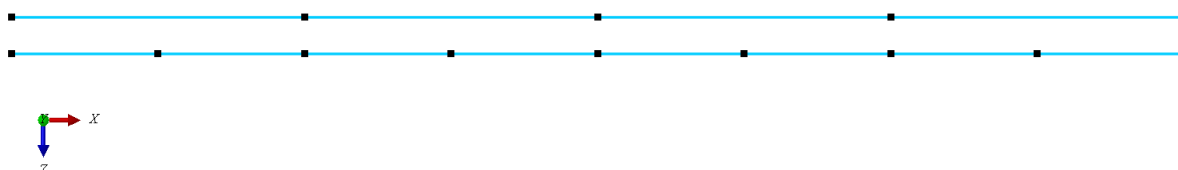
Slika 4.5. Primjer I, *Abaqus* – mreža s 2 B33 konačna elementa

Nakon toga provedena je analiza te su prikazani dobiveni rezultati progiba grede (Slika 4.6).



Slika 4.6. Primjer I, *Abaqus* – progib w / mm

Rezultati za gušće mreže sa 4 odnosno 8 B33 konačna elementa jednake duljine (Slika 4.7) daju iste rezultate pa se može zaključiti da je rješenje odmah konvergiralo. Tablica 4.2 prikazuje usporedbu analitički dobivenih vrijednosti i numeričkih rezultata dobivenih u programskom paketu *Abaqus*.



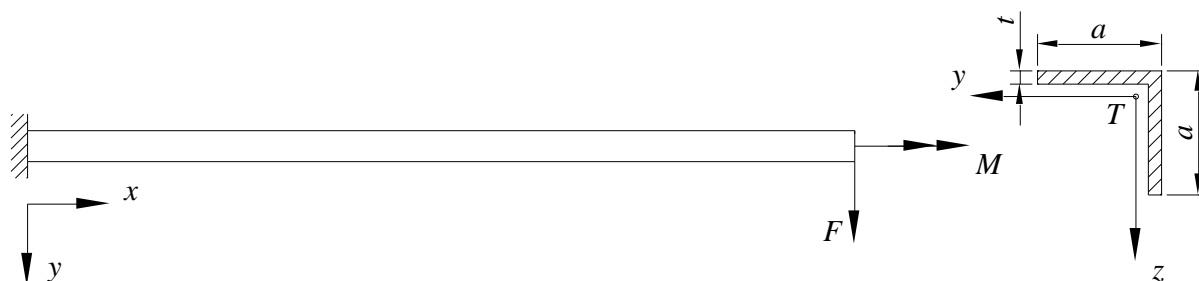
Slika 4.7. Primjer I, *Abaqus* – mreža s 4 i 8 B33 konačna elementa

Tablica 4.2. Primjer I, usporedba analitičkih i numeričkih rješenja progiba

	Σn_{KE}	w / mm	$E_{rel} / \%$
Analitičko rješenje	–	3,956	–
	2	3,991	0,885
Abaqus, B33	4	3,991	0,885
	8	3,991	0,885

4.2.2. Primjer II: Uklještenu greda opterećena na savijanje i uvijanje

Greda duljine l konstantnog poprečnog presjeka u obliku standardnog L profila uklještenu je na jednom kraju te je opterećena koncentriranom silom F u smjeru osi y te momentom uvijanja M na slobodnom kraju (Slika 4.8). Potrebno je odrediti progib v , kut zakreta oko osi z te kut uvijanja slobodnog kraja grede.



Slika 4.8. Uklještenu greda opterećena na savijanje i uvijanje

Tablica 4.3 prikazuje zadane geometrijsko materijalne karakteristike grede.

Tablica 4.3. Primjer II, zadani parametri

a / mm	t / mm	l / mm	F / N	M / Nm	E / MPa	ν
75	8	1000	1000	10	200000	0,3

Progib slobodnog kraja uklještene grede u smjeru osi y i kut zakreta oko osi z uslijed savijanja [18] mogu se izračunati analitički pomoću izraza (4.5) za progib u smjeru osi y odnosno pomoću izraza (4.6) za kut zakreta oko osi z . Uvrštavanjem zadanih vrijednosti slijedi da je progib u smjeru osi y jednak

$$\nu = \frac{F \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I_z} = 2,769 \text{ mm}, \quad (4.5)$$

a kut zakreta oko osi z

$$\alpha_z = \frac{F \cdot l^2}{2 \cdot E \cdot I_z} = 0,004 \text{ rad} . \quad (4.6)$$

Kut zakreta grede uslijed momenta uvijanja na slobodnom kraju grede [18] računa se prema izrazu (4.7) te nakon uvrštavanja zadanih vrijednosti slijedi

$$\varphi = \frac{M \cdot l}{G \cdot J_T} = 0,005 \text{ rad} , \quad (4.7)$$

gdje je G modul smicanja materijala i jednak je

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = 76923 \text{ MPa} , \quad (4.8)$$

a J_T konstantna uvijanja poprečnog presjeka u obliku standardnog L profila koji se analitički može izračunati prema izrazu (4.9) [19] te je jednak

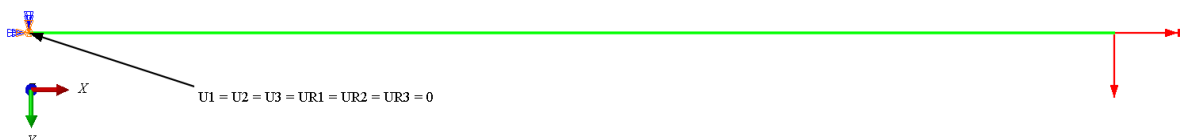
$$J_T = \frac{(2 \cdot a - t) \cdot t^3}{3} = 24234,67 \text{ mm}^4 . \quad (4.9)$$

Zatim je u programskom paketu *Abaqus* konstruiran proračunski model grede (Slika 4.9).



Slika 4.9. Primjer II, *Abaqus* – proračunski model

Greda je opterećena koncentriranom silom F i momentom uvijanja M na slobodnom kraju te je postavljen rubni uvjet uklještenja na lijevom kraju grede (Slika 4.10).



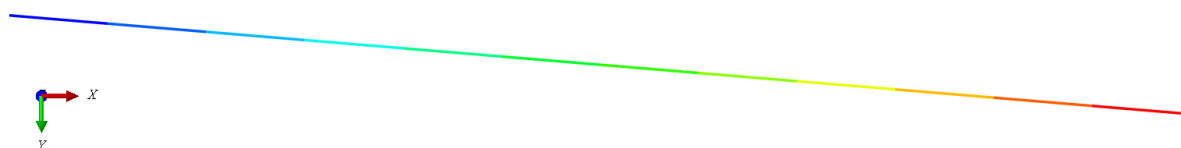
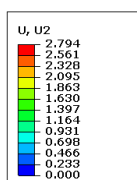
Slika 4.10. Primjer II, *Abaqus* – opterećenje i rubni uvjeti

Nakon zadavanja poprečnog presjeka grede, model je diskretiziran samo s jednim B33 konačnim elementom (Slika 4.11).



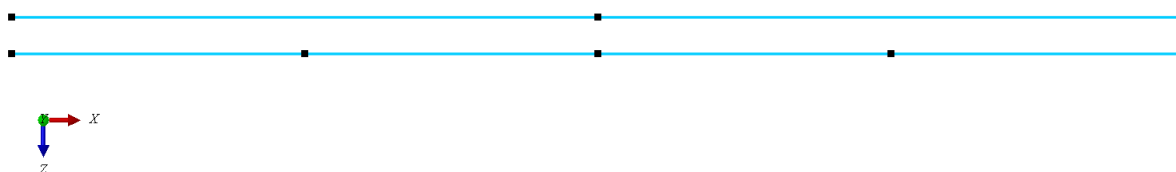
Slika 4.11. Primjer II, Abaqus – mreža s jednim B33 konačnim elementom

Nakon toga provedena je numerička analiza te su prikazani dobiveni rezultati progiba grede (Slika 4.12) dok su rezultati za kut uvijanja i kut zakreta prikazani tablično (Tablica 4.4).



Slika 4.12. Primjer II, Abaqus – progib v / mm

Rezultati za gušće mreže sa 2 odnosno 4 B33 konačna elementa jednake duljine (Slika 4.13) daju iste rezultate pa se može zaključiti da je rješenje odmah konvergiralo. Tablica 4.4 prikazuje usporedbu analitički vrijednosti i numeričkih rezultata.



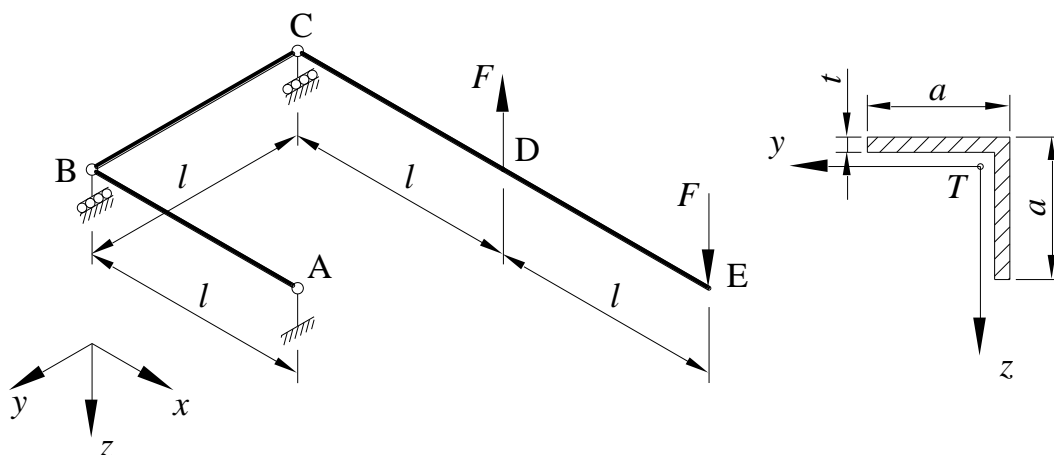
Slika 4.13. Primjer II, Abaqus – mreža s 2 i 4 B33 konačna elementa

Tablica 4.4. Primjer II, usporedba analitičkih i numeričkih rješenja progiba i kutova zakreta

	Σn_{KE}	v / mm	α_z / rad	φ / rad	$E_{rel}(v)$ / %
Analitičko rješenje	–	2,769	0,004	0,005	–
Abaqus, B33	1	2,794	0,004	0,005	0,903
	2	2,794	0,004	0,005	0,903
	4	2,794	0,004	0,005	0,903

4.2.3. Primjer III: Okvirni nosač

Okvirni nosač u sastavljen od standardnog L profila konstantnog poprečnog presjeka opterećen je koncentriranim silama F u točkama D i E (Slika 4.14). Potrebno je odrediti vertikalni pomak točke D odnosno progib u smjeru osi z .



Slika 4.14. Okvirni nosač

Tablica 4.5 prikazuje zadane geometrijsko materijalne karakteristike okvirnog nosača.

Tablica 4.5. Primjer III, zadani parametri

a / mm	t / mm	l / mm	F / N	E / MPa	ν
75	8	1000	100	200000	0,3

Kako bismo analitički riješili ovaj problem prvo je potrebno odrediti reakcije u osloncima uslijed djelovanja aktivnih sila zadovoljavanjem uvjeta ravnoteže koji glase

$$\sum F_x = \sum F_y = \sum F_z = \sum M_x = \sum M_y = 0. \quad (4.10)$$

Rješavanjem sustava jednačbi (4.10) mogu se izračunati vrijednosti sila reakcija te one iznose

$$\begin{aligned} F_{Ax} = F_{Ay} &= 0, \\ F_C &= 0, \\ F_B &= 100 \text{ N}, \\ F_{Az} &= -100 \text{ N}. \end{aligned} \quad (4.11)$$

Za određivanje progiba u točki D koristit ćemo drugi Castiglianov teorem [20] koji glasi da je parcijalna derivacija energije deformiranja U po poopćenoj sili Q_i jednaka poopćenom pomaku q_i , odnosno za zadani slučaj vrijedi

$$w_D = \frac{\partial U}{\partial F}. \quad (4.12)$$

Kako bismo izračunali vrijednost progiba na svakom pojedinom dijelu nosača potrebno je odrediti moment, a uz to je također potrebno odrediti i derivaciju svakog momenta po sili koja djeluje u točki u kojoj želimo izračunati pomak, odnosno sili F . Nakon uvrštavanja tako dobivenih izraza u jednadžbu (4.12) dobivamo izraz

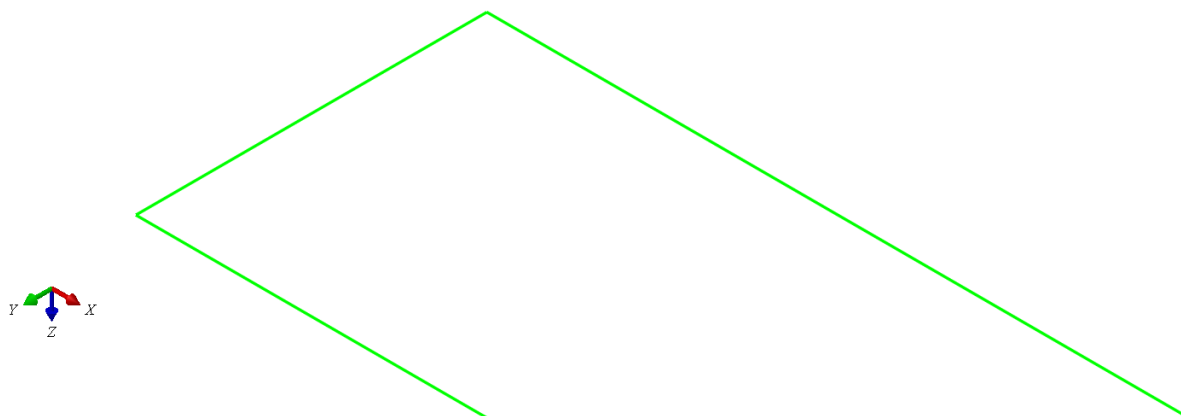
$$w_D = \frac{\partial U}{\partial F} = \frac{1}{E \cdot I_y} \left\{ \int_0^a F \cdot l \cdot x_2 \cdot dx_2 + \int_0^a F \cdot x_4^2 \cdot dx_4 \right\} + \frac{1}{G \cdot J_T} \int_0^a F \cdot l^2 \cdot dx_3. \quad (4.13)$$

Nakon integriranja izraza (4.13) dobivamo konačan izraz za progib u točki D koji je jednak

$$w_D = \frac{\partial U}{\partial F} = \frac{5}{6} \frac{F \cdot l^3}{E \cdot I_y} + \frac{F \cdot l^3}{G \cdot J_T} = 54,335 \text{ mm}, \quad (4.14)$$

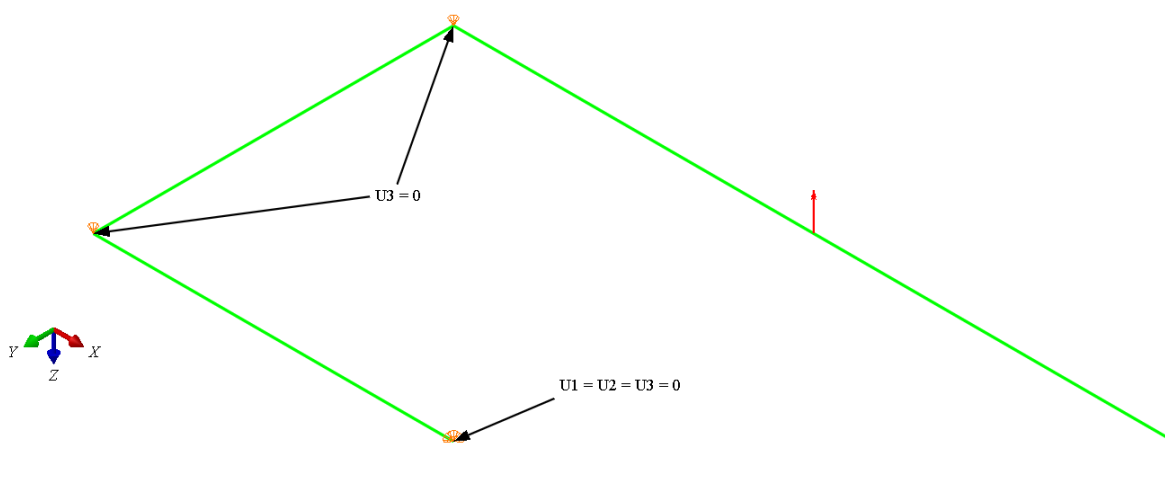
gdje su I_y aksijalni moment tromosti zadanog poprečnog presjeka, G modul smicanja materijala, a J_T konstanta uvijanja izračunati prema jednadžbama (4.4), (4.8) i (4.9). Ovo analitičko rješenje dobiveno je uz pretpostavku zbrajanja elastičnih deformacija nastalih djelovanjem pojedinačnih opterećenja. Navedeni zakon superpozicije može se primijeniti i vrijedi samo za linearno elastično tijelo odnosno konstrukciju na kojoj se javljaju male deformacije.

Zatim je u programskom paketu *Abaqus* konstruiran proračunski model nosača (Slika 4.15).



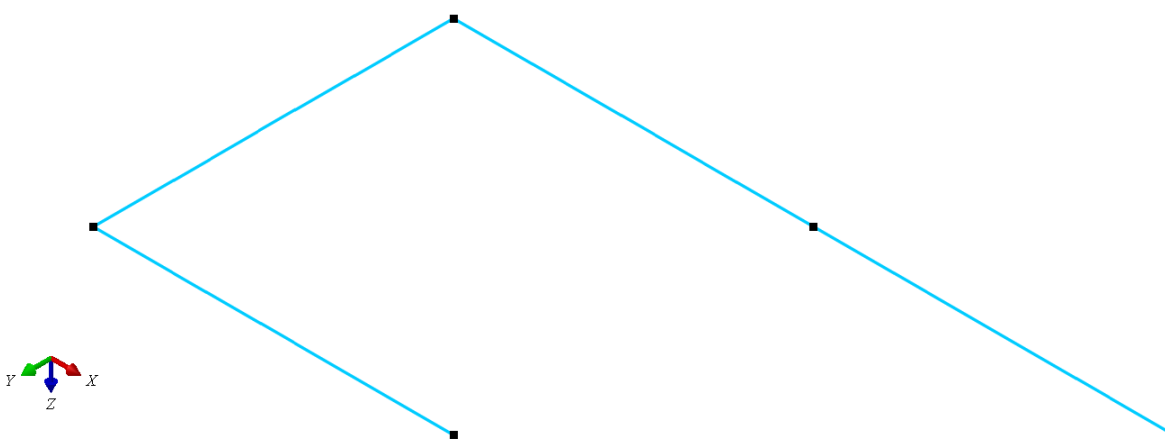
Slika 4.15. Primjer III, *Abaqus* – proračunski model

Zadani okvirni nosač opterećen je koncentriranim silama F u točkama D i E te su postavljeni rubni uvjeti nepomičnog oslonca u točki A te pomični oslonci u točkama B i C (Slika 4.16).



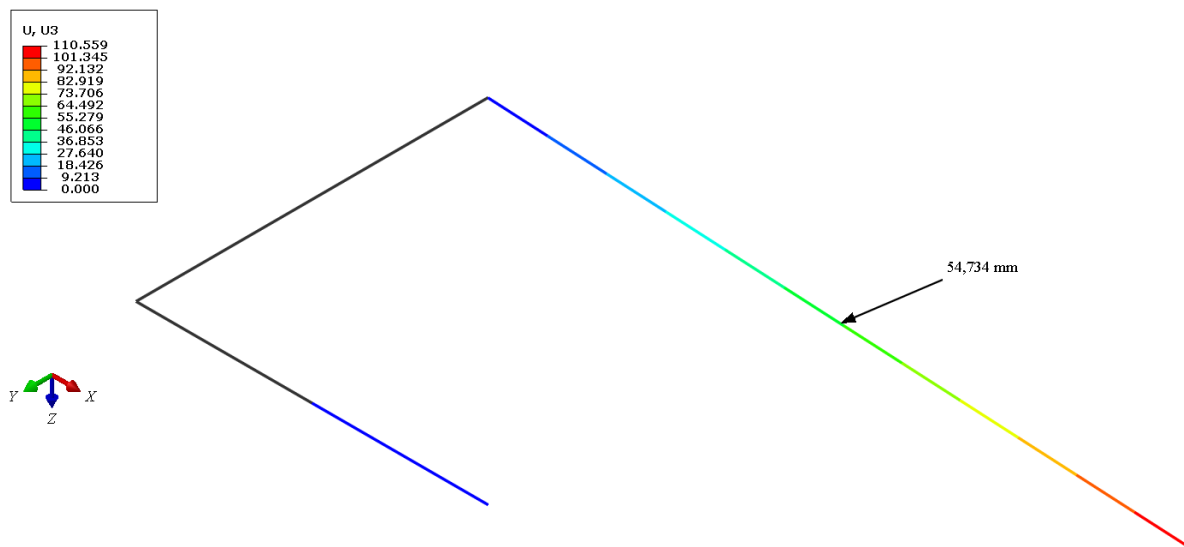
Slika 4.16. Primjer III, Abaqus – opterećenje i rubni uvjeti

Nakon zadavanja poprečnog presjeka okvirnog nosača, model je diskretiziran s četiri B33 konačna elementa jednake duljine l (Slika 4.17).



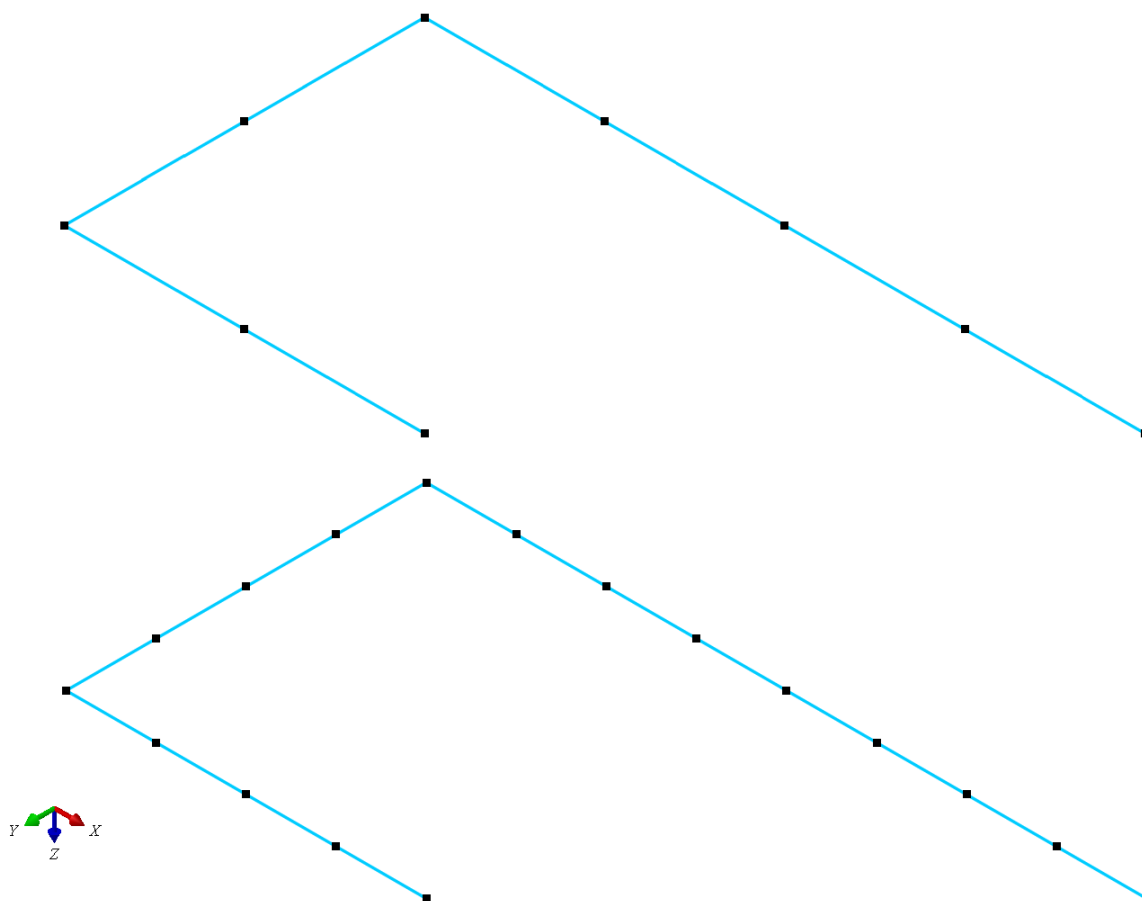
Slika 4.17. Primjer III, Abaqus – mreža s 4 B33 konačna elementa

Zatim je provedena numerička analiza te su prikazani dobiveni rezultati progib u točki D gdje je svaki dio nosača duljine l zamijenjen jednim konačnim B33 elementom, odnosno ukupno 4 elementa (Slika 4.18). Tablica 4.6 prikazuje usporedbu dobivenih vrijednosti analitičkim izračunavanjem i rješavanjem problema numeričkom analizom u programskom paketu *Abaqus* na mrežama različite gustoće.



Slika 4.18. Primjer III, *Abaqus* – progib w_D / mm

Rezultati za gušće mreže sa 8 odnosno 16 B33 konačna elementa jednake duljine (Slika 4.19) daju iste rezultate pa zaključujemo da je rješenje odmah konvergiralo.



Slika 4.19. Primjer III, *Abaqus* – mreža s 8 i 16 B33 konačna elementa

Tablica 4.6. Primjer III, usporedba analitičkih i numeričkih rješenja progiba

	Σn_{KE}	w_D / mm	$E_{rel} / \%$
Analitičko rješenje	–	54,335	–
	4	54,734	0,734
<i>Abaqus</i> , B33	8	54,734	0,734
	16	54,734	0,734

Iz provedene analize odnosno verifikacije prostornog kubičnog Euler – Bernoulijevog konačnog elementa (*Abaqus*, B33) može se zaključiti da je element prikladan za numeričku analizu čeličnog rešetkastog stupa razmatranog u ovome radu jer se rezultati dobivene numeričke analize jako dobro poklapaju s rezultatima dobivenim analitičkim rješavanjem. Greška koja se javlja između analitičkih i numeričkih rješenja je manja od 1 % što je zadovoljavajuće. Također je važno spomenuti da su svi rezultati konvergirali već i za najrjeđu moguću mrežu. Iz navedenog se može zaključiti da je element prikladan za analizu problema savijanja i uvijanja te vlačnog i tlačnog opterećenja dugih i vitkih greda, točnije standardnih L profila od kojih je razmatrani stup sastavljen.

5. LINEARNA NUMERIČKA ANALIZA

5.1. Osnovne relacije linearne analize

Čelično rešetkasti stup dalekovoda opisan u poglavlju 2 bit će linearno numerički analiziran primjenom metode konačnih elemenata u programskom paketu *Abaqus* prema slučajevima opterećenja izračunatih u poglavlju 3.4. Osnovna relacija metode konačnih elemenata kada se provodi linearna analiza glasi

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{V} = \mathbf{R}, \quad (5.1)$$

gdje je \mathbf{K} matrica krutosti, \mathbf{V} vektor pomaka u čvorovima, a \mathbf{R} je vektor čvornih sila [15].

5.2. Pretpostavke i ograničenja

Čelično rešetkasti stup bit će promatran u linearnoj analizi, tj. ispitivat će se izvedivost i nosivost stupa prema zadanim podacima odnosno uvjetima u eksploataciji.

1. U općem slučaju, linearna analiza provodi se uz sljedeće pretpostavke [16]:

- pomaci su maleni, ravnoteža se promatra na nedeformiranom obliku, a opterećenje ne mijenja smjer,
- ponašanje materijala je linearno elastično, tj. vrijedi linearni Hookeov zakon koji u općem obliku glasi

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (5.2)$$

- nehomogenosti i anizotropija u materijalu nisu funkcija opterećenja,
- postoji linearna veza između deformacije i pomaka, tj. ε/v je konstantno.

Kako bi se proračunski model čelično rešetkastog stupa sastavljenog od dugih i vitkih greda, odnosno L profila, međusobno spojenih vijcima, što jednostavnije izradio potrebno je uvesti određene pretpostavke i ograničenja. Za definirani čelično rešetkasti stup može se zaključiti da je sastavljen od dugih vitkih greda jer je [17]

- debljina grede t malena u usporedbi s duljinom grede l ,
- kutovi zakreta grede α_{\max} su mali, tj. u granicama $\alpha_{\max} \leq 0,05 \sim 0,1$ rad ($2^\circ \sim 5^\circ$),
- omjer maksimalnog pomaka i duljine grede je malen, tj. $v/l \leq 0,01$ do $0,02$.

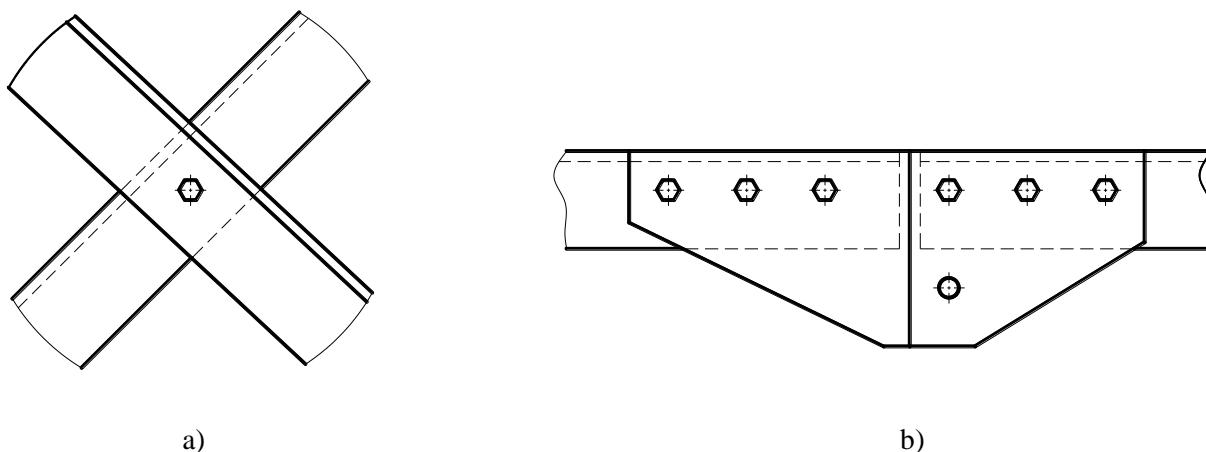
Prethodno navedene pretpostavke omogućuju korištenje verificiranog (poglavlje 4.2) prostornog kubičnog Euler – Bernoulijevog konačnog elementa (*Abaqus*, B33) u linearnoj, a zatim i u nelinearnoj analizi.

2. Idealno kruti temelji (tlo)

Prva uvedena pretpostavka u proračunski model je da je tlo potpuno kruto tijelo, odnosno temeljenje se promatra kao idealno kruta podloga koja ne utječe na deformiranje i naprezanje stupa što u stvarnosti nije potpuno točno kako je opisano u poglavlju 2.2, ali zbog vrlo malog utjecaja temelje je moguće potpuno zanemariti. To omogućuje vrlo jednostavno modeliranje rubnih uvjeta koji će kasnije biti opisani.

3. Krutost vijčanog spoja

Najveći problem koji se javlja kod numeričke analize rešetkastih konstrukcija je modeliranje spojeva među pojedinim elementima. Današnje rešetkaste konstrukcije korištene za stupove dalekovoda sastavljene su uglavnom od L profila spojenih jednim (Slika 5.1 a)) ili više vijaka (Slika 5.1 b)).



Slika 5.1. Vijčani spoj L profila s: a) jednim vijkom, b) više vijaka

Do danas je već napravljeno mnogo analiza [21] i [22] u kojima je promatran utjecaj vrste spoja na rezultate naprezanja i progiba vrha stupa. Pokazano je da krutost spoja ima tek nešto značajniji utjecaj prilikom velikih deformacija te se tada spoj sa jednim vijkom (Slika 5.1 a)) ponaša približno kao zglobna veza (eng. *pinned joint*) dok se spoj ostvaren s dva ili više vijaka (Slika 5.1 b)) može promatrati kao kruta veza (eng. *rigid joint*). Kako bi se izbjegla prevelika složenost proračunskog modela ovaj utjecaj u analizi neće biti uzet uzimajući u

obzir rezultate kako je pokazano u [21] i [22] te će stoga model biti izveden sa svim potpuno krutim vezama na odgovarajućim mjestima spoja L profila.

4. Ekscentričnost vijčanog spoja

Svaki spoj između pojedinih elemenata L profila izveden je ekscentrično, odnosno L profili se spajaju i dodiruju samo na jednom kraku dok je drugi krak slobodan. U ovoj numeričkoj analizi izostaviti će se ovaj problem odnosno profili će biti promatrani kao da su spojeni u samim vrhovima L profila. Ova pretpostavka pokazala se da ima jako mali utjecaj na rezultat [23] te stoga radi kompleksnosti same analize neće biti uzeta u obzir.

5.3. Kreiranje proračunskog modela

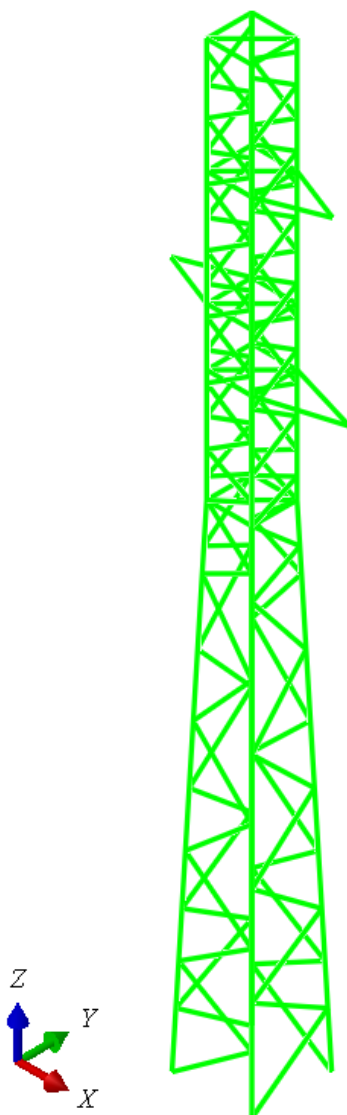
Prvi korak linearne analize je definiranje odnosno modeliranje geometrije u programskom paketu *Abaqus* prema dobivenoj tehničkoj dokumentaciji stupa. Modeliranje se sastoji od spajanja linijskih elemenata u 3D prostoru. Svaki pojedini dio stupa odnosno temeljni dio, trup, glava i vrh stupa te konzole modelirani su posebno te su naknadno spojeni u sklop (eng. *assembly*). Slika 5.2 prikazuje pojednostavljeni proračunski modela čeličnog rešetkastog stupa.

Nakon kreiranja proračunskog modela potrebno je zadati mehaničke karakteristike materijala te definirati poprečni presjek L profila. Svi elementi stupa izrađeni su od čelika S335J2. Tablica 5.1 prikazuje mehaničke karakteristike materijala [18].

Tablica 5.1. Mehaničke karakteristike materijala

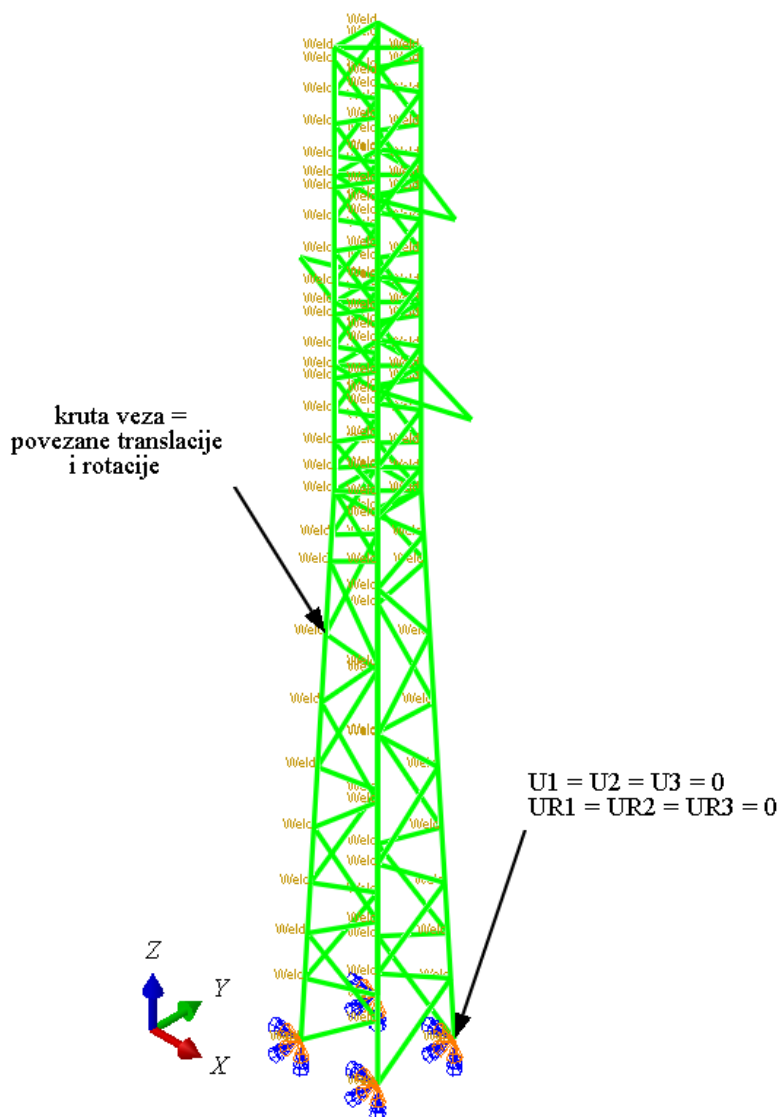
	R_e / MPa	R_m / MPa	E / MPa	ν	ρ / kg/m ³
S335J2	355	470	210000	0,3	7850

U linearnoj analizi, materijal će biti zadana kao linearno elastičan, tj. nije potrebo zadavati plastično ponašanje materijala jer se u ovom tipu analize naprezanje stupa promatra do granice tečenja materijala, a sva naprezanja iznad navedene vrijednosti znače da stup ulazi u plastično područje, dolazi do trajnih plastičnih deformacija, odnosno oštećenja te samim time stup ne zadovoljava uvjete nosivosti prilikom eksploatacije. Pomoću gustoće materijala programski paket *Abaqus* automatski izračunava težine pojedinih elemenata proračunskog modela, a zatim je ukupno opterećenje vlastitom težinom stupa moguće postaviti u težište stupa.



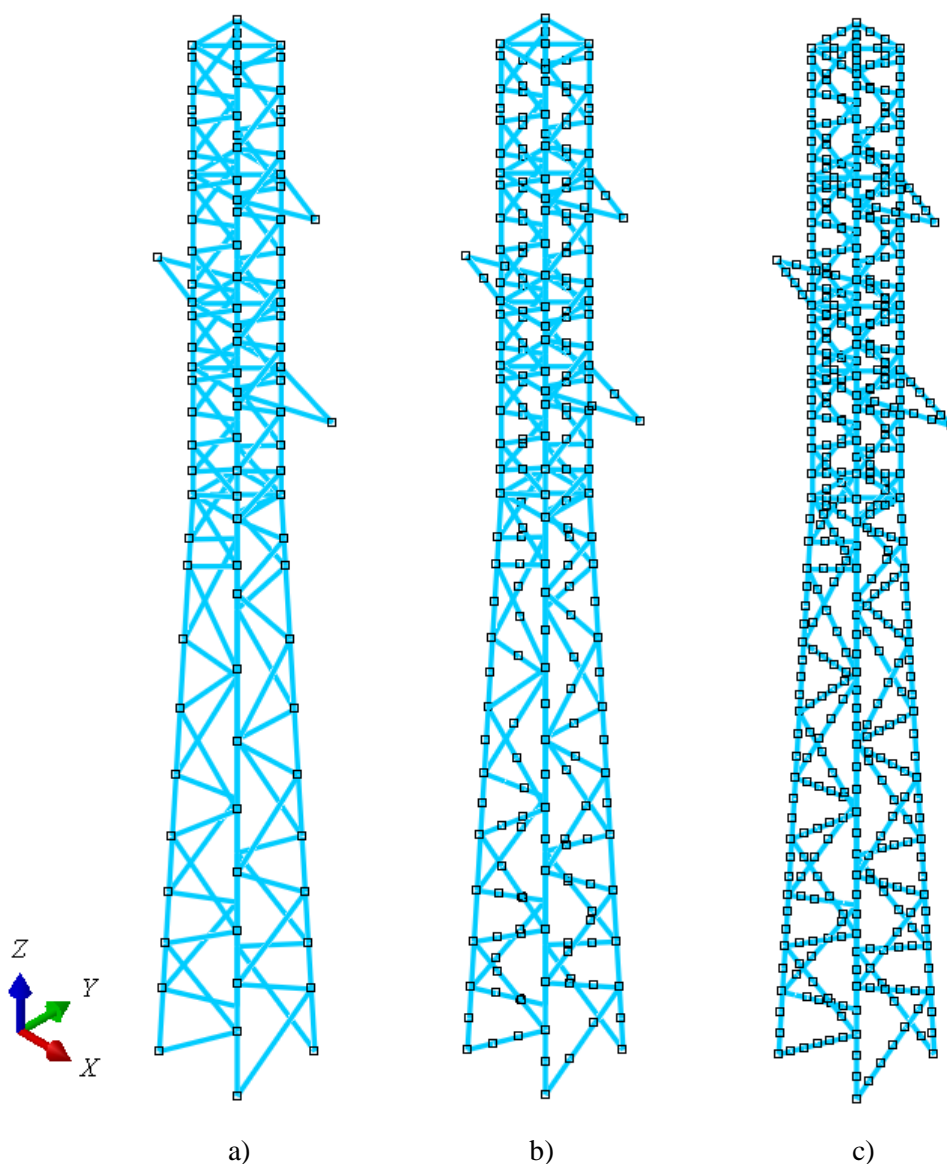
Slika 5.2. Proračunski model čeličnog rešetkastog stupa

Kao što je već spomenuto u poglavlju 5.2 kreiran je proračunski model sa svim potpuno krutim spojevima među standardnim L profilima. Svi vijčani spojevi s jednim ili više vijka spojeni preko ploče promatrani su kao idealno kruta veza te je sukladno tom pretpostavkom kreirana veza među spojenim čvorovima (*Abaqus, assembled/complex connection type*) gdje je kao tip veze postavljena kruta veza (*Abaqus, weld*) koja potpuno veže sve translacije i rotacije spojenih čvorova, odnosno svi stupnjevi slobode jednog čvora povezani su sa stupnjevima slobode drugog vezanog čvora te je time kreirana kruta veza. Rubni uvjeti postavljeni su na spoju temeljnog dijela i tla, odnosno na krajnjim čvorovima pojasnika definiran je rubni uvjet ukleštenja, tj. onemogućene su sve translacije i rotacije tih čvorova (Slika 5.3).



Slika 5.3. Proračunski model s rubnim uvjetima i vezama spoja

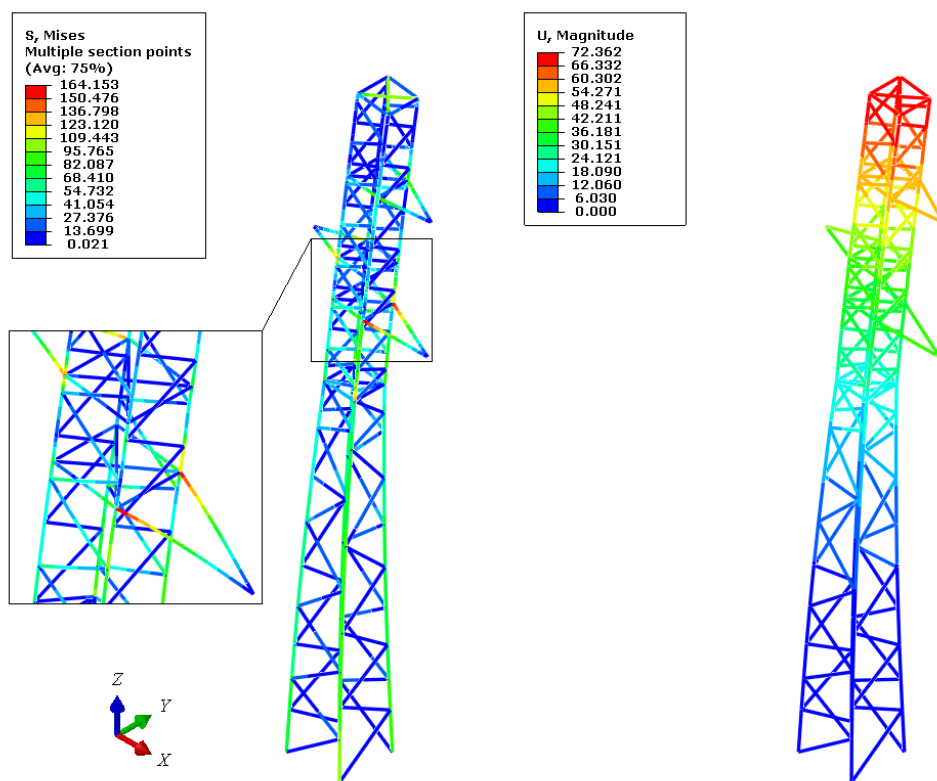
Također potrebno je kreirati mrežu konačnih elemenata. Korišteni su prostorni prethodno verificirani kubični Euler – Bernoulijevi konačni elementi (*Abaqus*, B33). U prvoj analizi korištena je najrjeđa moguća mreža s prosječnom globalnom veličinom elementa 1000 mm. Takav proračunski model sastoji se od ukupno 258 prostorna B33 konačna elementa. Kako bi se pokazala ovisnost rezultata naprezanja i pomaka vrha stupa pri zadanim slučajevima opterećenja, kreirane su još dvije gušće mreže s ukupno 396 odnosno 706 konačnih elemenata (Slika 5.4). Iako u ovom slučaju nije moguće govoriti o konvergenciji rješenja jer nije poznato točno rješenje, analizom ovisnosti dobivenih rezultata naprezanja o broju korištenih konačnih elemenata može poslužiti kao potvrda stabilnosti i relativne točnosti proračunskog modela.



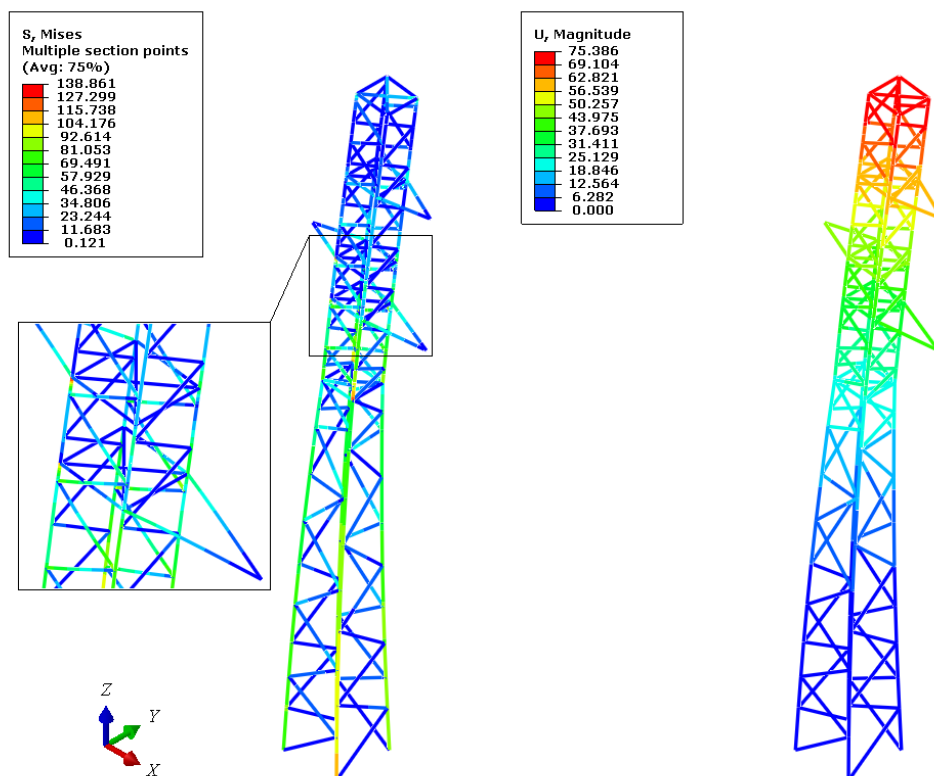
Slika 5.4. Mreža konačnih elemenata: a) 258 KE, b) 396 KE, c) 706 KE

5.4. Rezultati linearne numeričke analize

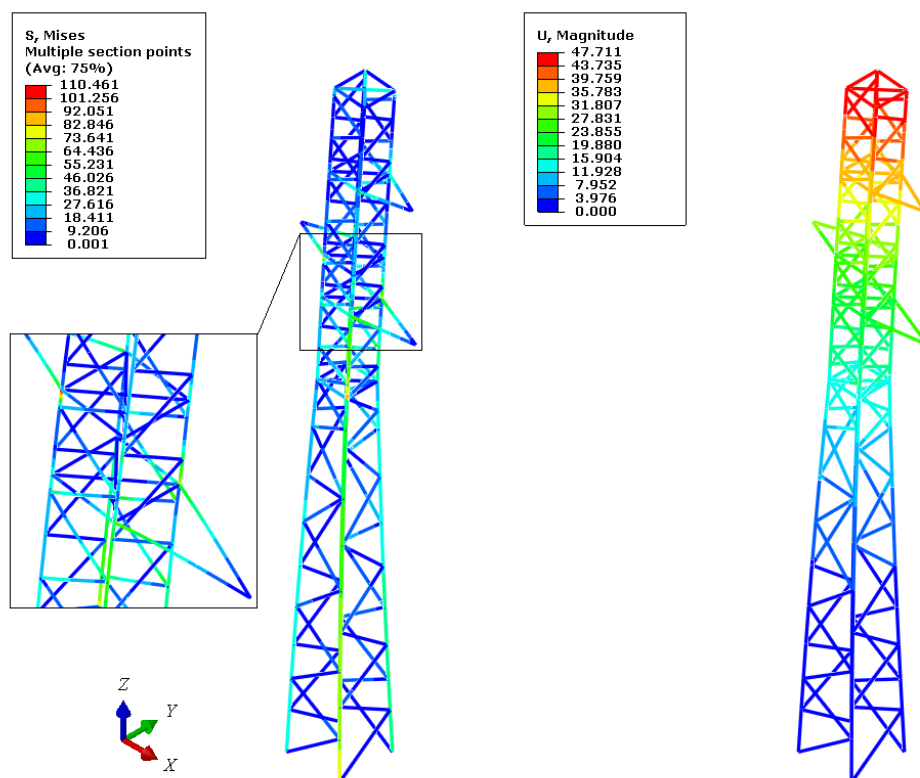
Slika 5.5, Slika 5.6 i Slika 5.7 prikazuju raspodjelu ekvivalentnog naprezanja prema von Misesu i pomak stupa za svaki slučaj redovnog opterećenja kako je to opisano u poglavlju 3.1. Iz dobivenih rezultata analize može se zaključiti da se maksimalno ekvivalentno naprezanje uslijed redovnih slučajeva opterećenja javlja u slučaju 68.I.a. U tom slučaju maksimalno ekvivalentno naprezanje koje se javlja iznosi 164,15 MPa, a javlja se na spoju najniže konzole i glave stupa. Maksimalni pomak stupa javlja se u slučaju opterećenja prema članku 68.I.b. Iznos maksimalnog pomaka je 75,39 mm, a nalazi na vrhu stupa. Rezultati analize prikazani su za mrežu od 706 B33 konačna elementa.



Slika 5.5. Raspodjela naprezanja (MPa) i pomaka (mm) za slučaj 68.1.a



Slika 5.6. Raspodjela naprezanja (MPa) i pomaka (mm) za slučaj 68.1.b



Slika 5.7. Raspodjela naprezanja (MPa) i pomaka (mm) za slučaj 68.I.c

Nakon dobivenih rezultata potrebno je provjeriti zadovoljava li stup uvjet čvrstoće (5.4) za zadane slučajeve redovnih opterećenja u okviru namjene stupa. *Pravilnikom* [3] je definirano da faktor sigurnosti osnovnog opterećenja u redovnim slučajevima opterećenja iznosi 1,5, a kako je korišteni materijal stupa čelik, točnije S335J2, kojem minimalna granica tečenja iznosi 355 MPa moguće je izračunati dopušteno naprezanje materijala koje iznosi

$$\sigma_{\text{dop}} = \frac{R_e}{S} = 236,67 \text{ MPa}, \quad (5.3)$$

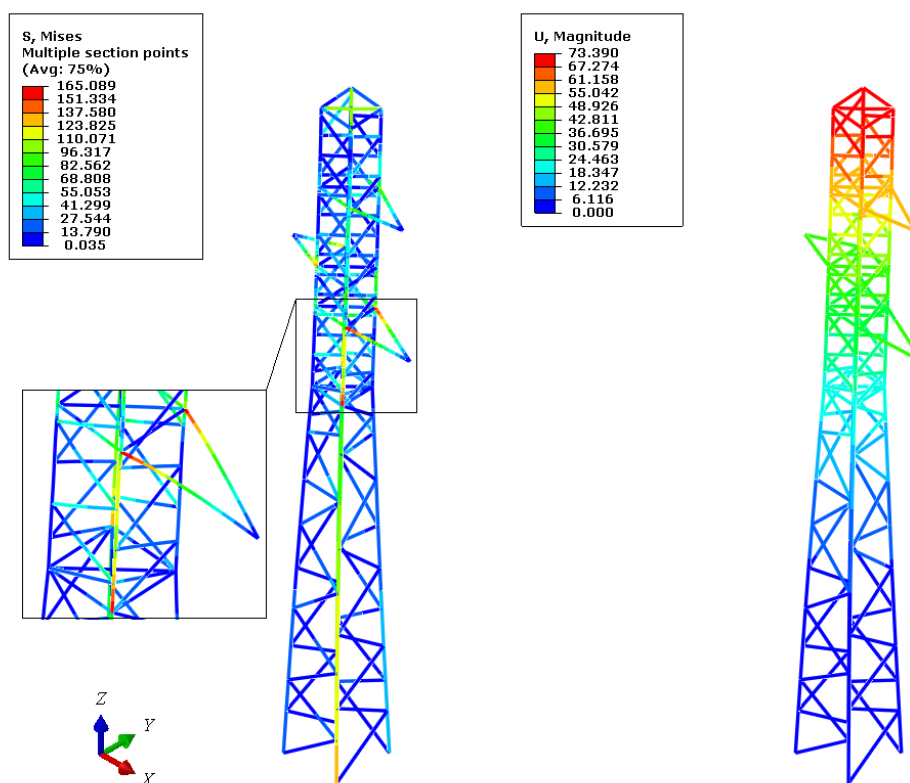
gdje je R_e granica tečenja materijala, a S faktor sigurnosti osnovnog opterećenja u redovnim slučajevima opterećenja.

Dopušteno naprezanje materijala mora biti manje ili jednako od izračunatog maksimalnog ekvivalentnog naprezanja, odnosno mora vrijediti

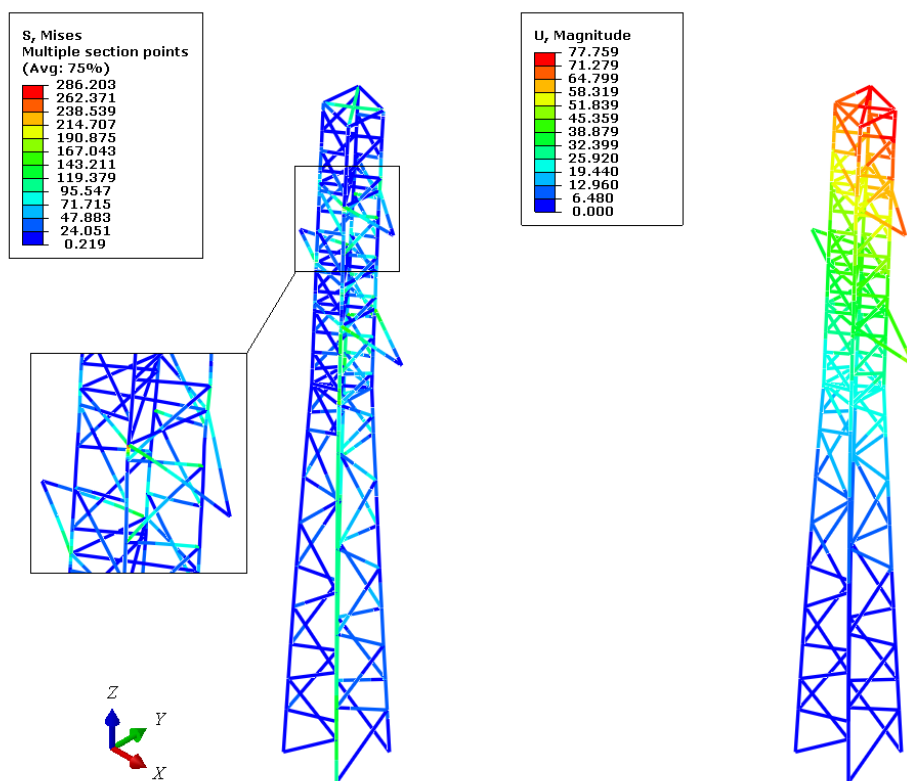
$$\sigma_{\text{ekv}} \leq \sigma_{\text{dop}}, \quad (5.4)$$

gdje σ_{ekv} predstavlja maksimalno ekvivalentno naprezanje koje odgovara izračunatom naprezanju prema von Misesu za navedene slučajeve opterećenja.

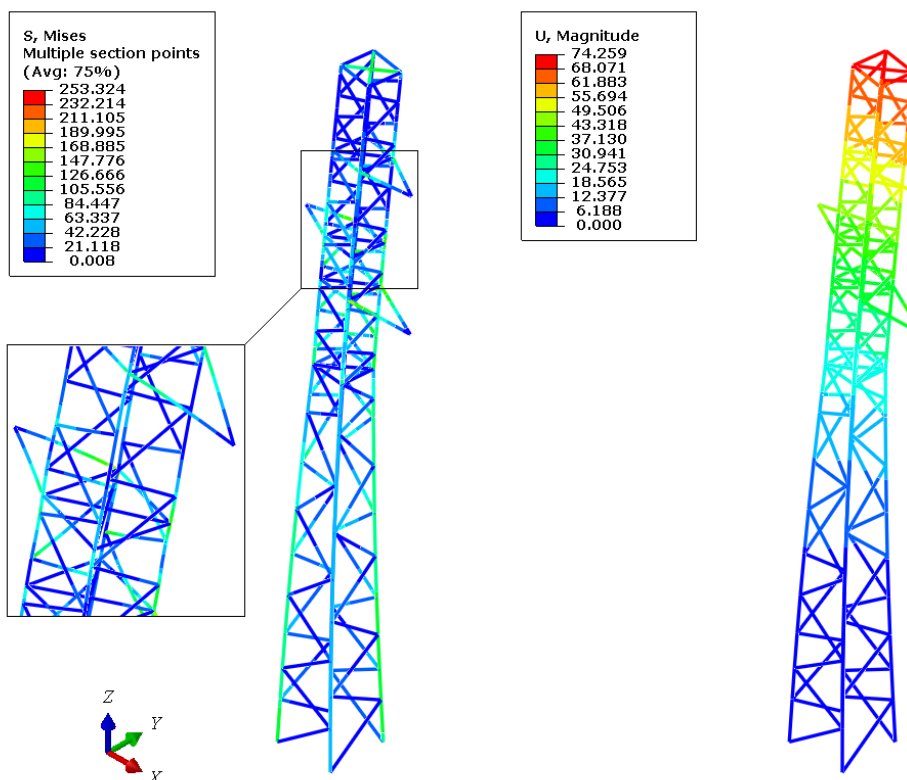
U sva tri slučaja analiziranog redovnog opterećenja ovaj uvjet je zadovoljen. Nadalje, potrebno je analizirati i slučajeve izvanrednog opterećenja. Slika 5.8, Slika 5.9, Slika 5.10 i Slika 5.11 prikazuju raspodjelu ekvivalentnog naprezanja prema von Misesu i pomak stupa za svaki slučaj izvanrednog opterećenja kako je to opisano u poglavlju 3.2. Iz dobivenih rezultata analize može se zaključiti da se maksimalno ekvivalentno naprezanje uslijed izvanrednih slučajeva opterećenja definiranih člankom 69.2 javlja u slučaju puknuća vodiča na donjoj konzoli (P3) te u tom slučaju maksimalno ekvivalentno naprezanje iznosi 335,63 MPa. Navedeno maksimalno ekvivalentno naprezanje javlja se na spoju donje konzole i glave stupa. Maksimalni pomak stupa javlja se u slučaju puknuća vodiča spojenog na najvišu odnosno gornju konzolu. Iznos maksimalnog pomaka je 77,76 mm, a nalazi na vrhu stupa. Za sve prikazane deformirane oblike stupa, radi boljeg pregleda deformacije stupa korišten je faktor uvećanja $k = 20$. Također su prikazani dodatni uvećani dijelovi naprezanja stupa na mjestima gdje se javlja ekvivalentno maksimalno naprezanje prema von Misesu za pojedine slučajeve izvanrednog opterećenja.



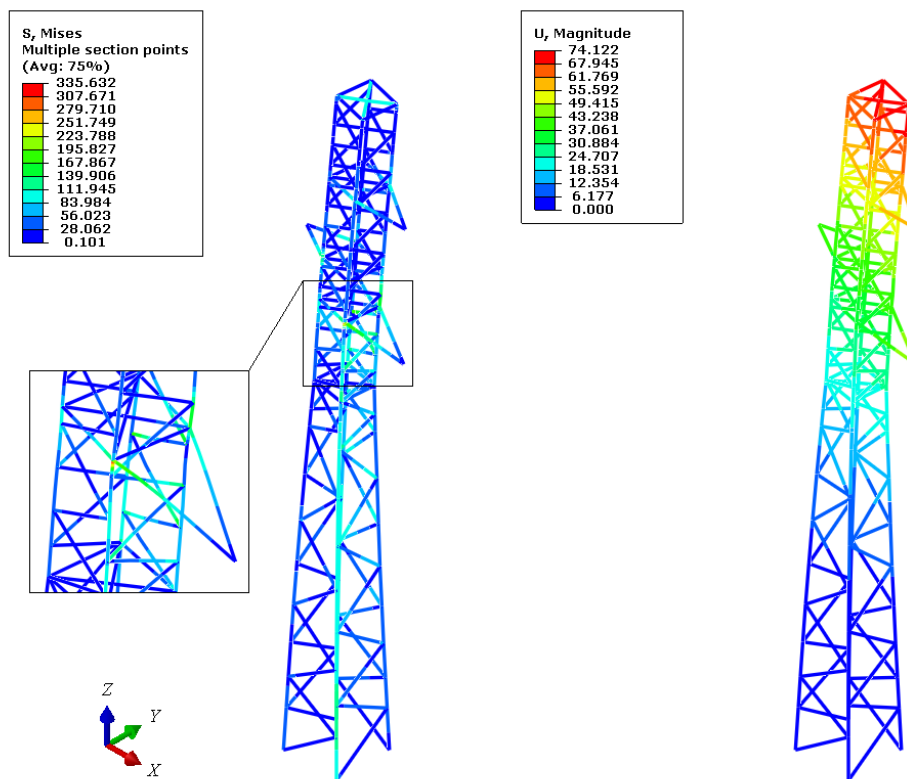
Slika 5.8. Raspodjela naprezanja (MPa) i pomaka (mm) za slučaj 69.2 Z1



Slika 5.9. Raspodjela naprezanja (MPa) i pomaka (mm) za slučaj 69.2 P1

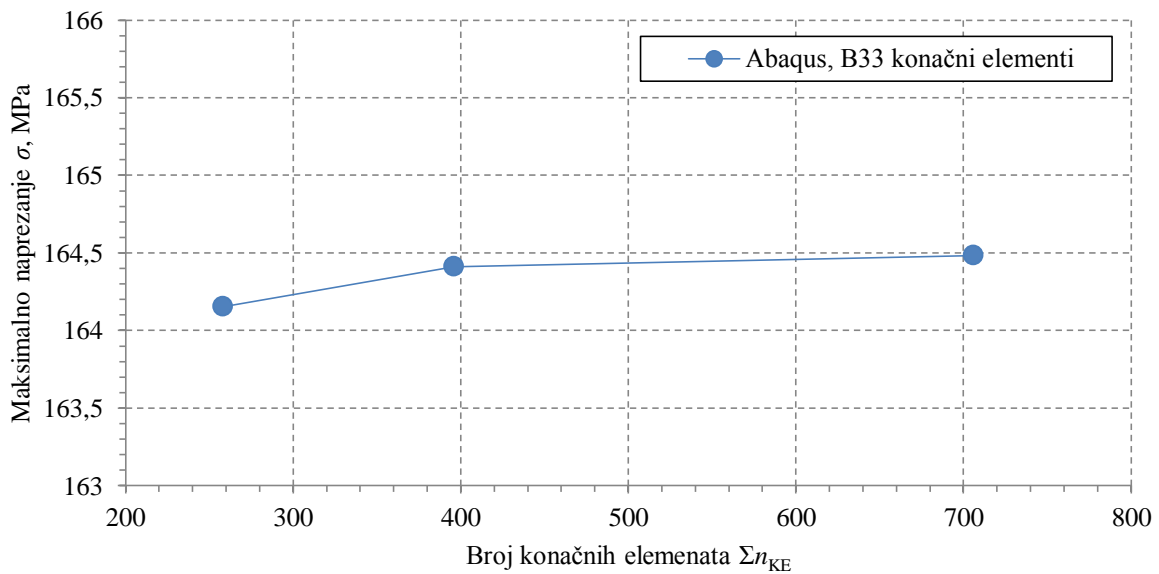


Slika 5.10. Raspodjela naprezanja (MPa) i pomaka (mm) za slučaj 69.2 P2



Slika 5.11. Raspodjela naprezanja (MPa) i pomaka (mm) za slučaj 69.2 P3

Slika 5.12 prikazuje dijagram ovisnosti naprezanja prema von Misesu o različitom broju konačnih elemenata modela. Jasno se vidi da rezultat i za najrjeđu moguću mrežu od 258 B33 elemenata daje zadovoljavajuće rezultate te se može zaključiti da rezultat brzo konvergira.



Slika 5.12. Dijagram ovisnosti maksimalnog naprezanja σ / MPa o broju KE

Nakon dobivenih rezultata potrebno je provjeriti zadovoljava li stup uvjet čvrstoće (5.4) za zadane slučajeve izvanrednih opterećenja u okviru namjene stupa. *Pravilnikom* [3] je definirano da faktor sigurnosti izvanrednog opterećenja iznosi 1,1 pa se prema jednadžbi (5.5) može izračunati dopušteno naprezanje materijala za slučaj izvanrednog opterećenja koje iznosi

$$\sigma_{\text{dop}} = \frac{R_e}{S} = 322,73 \text{ MPa.} \quad (5.5)$$

Isto kao i za slučajeve redovnog opterećenja, dopušteno naprezanje materijala mora biti manje ili jednako od izračunatog maksimalnog ekvivalentnog naprezanja (5.4). Usporedbom se može zaključiti da u izvanrednom slučaju puknuća najnižeg vodiča na donjoj konzoli (P3) ovaj uvjet nije ispunjen. Prilikom puknuća vodiča na donjoj konzoli javlja se maksimalno ekvivalentno naprezanje na spoju konzole i glave stupa koje je veće od dopuštenog naprezanja materijala, tj.

$$\sigma_{\text{ekv}} = 335,63 \text{ MPa} > \sigma_{\text{dop}} = 322,73 \text{ MPa.} \quad (5.6)$$

Radi kontrole proračunskog modela odnosno dobivenih rezultata linearne numeričke analize, potrebno je usporediti numerički dobivene rezultate s eksperimentalno dobivenim rezultatima na prototipu konstrukcije koji je ispitan probnim opterećenjima te su sastavljene tablice nosivosti pojedinih stupova koje služe za dimenzioniranje sustava dalekovoda [5] kako je to opisano u poglavlju 3.5.

5.5. Usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata

Nakon što je provedena linearna numerička analiza te izračunata nosivost stupa dobivena eksperimentalnom analizom moguće je radi verificiranja provedene numeričke analize provesti usporedbu rezultata. Svrha je procjena točnosti rješenja dobivenih numeričkom metodom. U ovom slučaju točnost podrazumijeva odstupanje numeričkog od eksperimentalnog rješenja. Kao relativno točno rješenje smatra se eksperimentalno ispitivanje nosivosti stupa od strane IGH, tj. kreirane tablice nosivosti stupa. Stoga je potrebno kritički uzeti dobivene eksperimentalne rezultate jer se navedeni rezultati ne mogu sa sigurnošću smatrati dovoljno točnim, ali je cilj da posluže kao referentni podatci za okvirnu provjeru proračunskog modela čeličnog rešetkastog stupa dalekovoda.

Kako je opisano u poglavlju 3.5, zadani stup zadovoljio je sve kriterije nosivosti osim za slučaj 69.2 prilikom puknuća najnižeg vodiča (P3). U tom slučaju javljaju se prevelika horizontalna opterećenja u smjeru osi x te uz definirani faktor sigurnosti nosivost stupa ne zadovoljava kriterij nosivosti, odnosno moguć je nastanak trajnih plastičnih deformacija stupa. Također zadano vertikalno opterećenje na konzolu stupa duljine 1,45 m ne zadovoljava kriterij nosivosti te su također moguće pojave plastičnih deformacija. Problem nosivosti donje konzole mogao bi se riješiti dodavanjem zatega ili podupre, no bez obzira na to stup za navedenu namjenu i zadana opterećenja se ne smije koristiti.

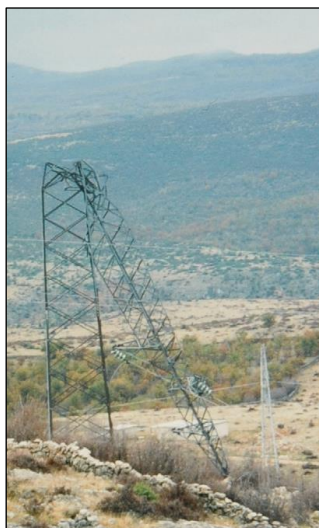
Ako promotrimo ekvivalentna naprezanja dobivena linearnom numeričkom analizom, zaključuje se da je ekvivalentno naprezanje veće od dopuštenog naprezanja materijala s definiranim faktorom sigurnosti jedino u slučaju opterećenja 69.2, odnosno puknuće vodiča na donjoj konzoli (P3). Ovo je zasigurno pokazatelj dovoljne točnosti numeričkog modela stupa te bi se kao takav mogao koristiti za dimenzioniranje sustava dalekovoda te ispitivanje nosivosti pojedinih kritično opterećenih stupova na trasi dalekovoda.

Može se zaključiti da je poklapanjem rezultata numeričke i eksperimentalne analize verificiran primijenjeni numerički model te će se s time zaključkom pristupiti nelinearnoj analizi.

6. NELINEARNA NUMERIČKA ANALIZA

U dosadašnjem dijelu rada, razmatrani su slučajevi opterećenja definirani *Pravilnikom* [3] primjenom linearne numeričke analize. Pravilnikom su definirane samo neke učestale pojave odnosno kombinacije opterećenja koje se mogu pojaviti, no jasno je da nisu razmotrene sve moguće kombinacije. Uvjeti kombiniranog djelovanja vjetra na zaleđenu užad s dodatnim teretom samo je jedan od primjera koji se može pojaviti. Dosadašnja iskustva u eksploataciji, posebno promatrajući oštećenja i havarije stupova dalekovoda, ukazuju na činjenicu da postoji određena povezanost pojave vjetra i zaleđivanja odnosno dodatnog tereta na stupu i užadi na određenim geografskim lokacijama. Opterećenja pri istovremenoj pojavi dodatnog tereta i djelovanju vjetra mogu biti znatno veća od izračunatih vrijednosti u linearnoj analizi te mogu dovesti do težih oštećenja stupova.

Jedan takav primjer je oluja odnosno ledena oluja koja je gotovo u svim slučajevima uzrok svim većim kvarovima na području Republike Hrvatske kao što su potpuno srušeni stupovi koji se moraju u potpunosti zamijeniti (Slika 6.1) ili stupovi sa značajnim oštećenjima konzola [24]. Najviše takvih oštećenja, odnosno zone koje su izložene olujnim djelovanjima su prienosne mreže uz tzv. južnu magistralu koja se proteže od Gorskoga kotara do Dalmatinske zagore [25]. Navedeni uvjeti opterećenja i ponašanje konstrukcije stupa javljaju se u izrazito ekstremnim, ali opet mogućim atmosferskim prilikama. Opisivanje ovakvih problema linearnom analizom ne bi bilo moguće jer dolazi do pojave velikih pomaka, a samim time i plastičnih deformacija, stoga će u nastavku biti provedena nelinearna analiza.



Slika 6.1. Kolaps stupa uslijed ekstremnog opterećenja vjetrom [24]

Cilj nelinearne analize stupa bit će određivanje maksimalne nosivosti stupa prije nego što nastanu trajna oštećenja stupa, odnosno dok ne nastupi potpuni kolaps stupa.

6.1. Osnovne relacije nelinearne analize

Kako je već pokazano u prošlom poglavlju, većinu inženjerskih problema moguće je riješiti, odnosno dobiti zadovoljavajuće rezultate linearnom numeričkom aproksimacijom problema, tj. primjenom osnovne relacija metode konačnih elemenata (5.1). Postoje situacije kada linearna analiza ne opisuje dovoljno točno razmatrani problem te je tada potrebno definirati nelinearnu relaciju metode konačnih elemenata [26] koja glasi

$$\mathbf{K}(\mathbf{V}, \mathbf{R}) \cdot \mathbf{V} = \mathbf{R} \quad (6.1)$$

iz koje se može vidjeti da je matrica krutosti \mathbf{K} funkcija trenutnog stanja pomaka \mathbf{V} i opterećenja \mathbf{R} . Zbog nelinearnog odziva, problem nije moguće riješiti u jednom koraku, već se proces rješavanja temelji na inkrementalno – iterativnim metodama koje su moguće tek uz linearizaciju izraza (6.1) [27]. Pritom se iz osnovnog ravnotežnog stanja traži blisko stanje koje je definirano prirastom inkrementalnog opterećenja $\Delta \mathbf{R}$ i/ili pomaka $\Delta \mathbf{V}$. [16]

U općem slučaju, nelinearna analiza očito je uvijek točnija od linearne, ako analizom obuhvaćamo sve fenomene, no često vremenski nije isplativa ni racionalna jer je računalno zahtjevna. Problemi nelinearnosti proizlaze iz nekoliko izvora [28]:

- *materijalna nelinearnost* kod materijala koji ne slijede Hookeov zakon (5.2), tj. odnos naprezanja i deformacija je nelinearan, što također vrijedi i za odnose sila i pomaka, a to su materijali koji imaju svojstva nelinearne elastičnosti, plastičnosti, puzanja te viskoelastičnosti. Poteškoće prilikom numeričkih analiza osobito izaziva plastičnost materijala zbog rasipanja energije;
- *geometrijska nelinearnost* – javlja se kada opterećenje uzrokuje velike pomake, rotacije odnosno velike deformacije ili kombinaciju bilo kojeg od ovih čimbenika do te mjere da odnos sila i pomaka postane nelinearan kao što je gubitak stabilnosti konstrukcije (*snap – through problem*);
- *kontaktni problemi* (nelinearni rubni uvjeti) – javljaju se prilikom kontakta, jer je u većini slučajeva geometrija zone kontakta nepoznata, a uz prisustvo trenja, kontaktni problem postaje posebno kompliciran zbog disipacije energije.

Najčešći slučajevi su da razmatrani problem ne sadrži samo jedan od navedenih izvora nelinearnosti nego kombinaciju dva ili više. Pomaci kod nelinearnog ponašanja konstrukcije tad više nisu direktno proporcionalni opterećenju kao kod linearne analize, odnosno više nije moguće primijeniti zakon superpozicije te izraz (5.1) ne vrijedi. Linearizacijom izraza (6.1) dobiva se jednadžba krutosti

$$\mathbf{K}_T(\bar{\mathbf{V}}) \cdot \Delta \mathbf{V} = \mathbf{R}_e - \mathbf{R}_i(\bar{\mathbf{V}}), \quad (6.2)$$

gdje je \mathbf{K}_T tangencijalna matrica krutosti, $\bar{\mathbf{V}}$ vektor pomaka za osnovno i poznato ravnotežno stanje, $\Delta \mathbf{V}$ vektor inkrementalnih pomaka, \mathbf{R}_e vektor vanjskog opterećenja, a \mathbf{R}_i vektor unutarnjih sila [26]. Ravnoteža je postignuta kada je desna strana izraza (6.2) jednaka nuli, tj. kada su unutarnje sile \mathbf{R}_i jednake vanjskom opterećenju \mathbf{R}_e ili kada je vektor inkrementalnih pomaka $\Delta \mathbf{V}$ jednak nuli. Također, vrijedi općenita relacija inkrementalnog stanja

$$\mathbf{V} = \bar{\mathbf{V}} + \Delta \mathbf{V}, \quad (6.3)$$

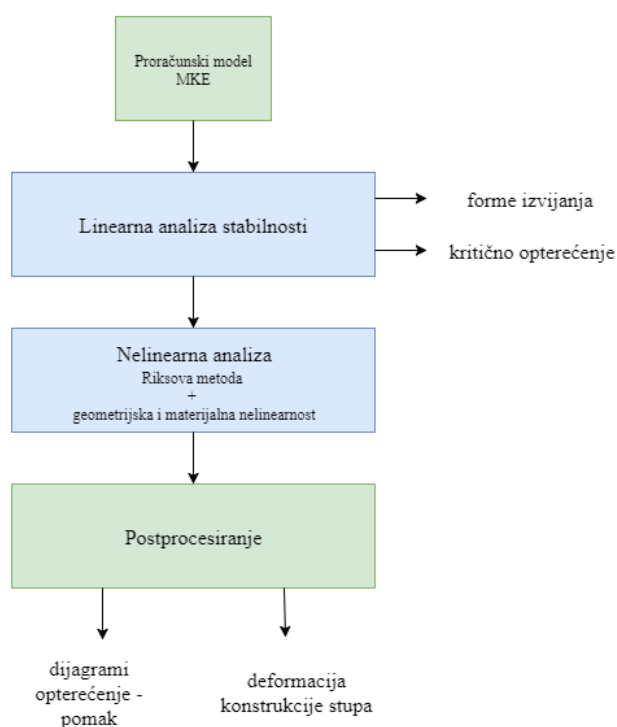
gdje ukupni vektor pomaka \mathbf{V} u svakom sljedećem koraku iteracije postaje osnovni vektor pomaka $\bar{\mathbf{V}}$.

6.2. Pretpostavke i ograničenja

Pretpostavke i ograničenja uvedena u linearnoj analizi kao što su idealno kruti temelji, krutost vijčanih spojeva te ekscentričnost spoja dvaju L profila uzeti su u obzir isto kao i kod linearne analize. Važno je napomenuti da pravila koja su vrijedila u linearnoj analizi ne vrijede striktno i u nelinearnoj analizi, stoga je prilikom nelinearne analize potrebno obratiti pažnju na pravila [26] koja glase:

- princip superpozicije ne može se primijeniti, stoga se rezultati nekoliko slučajeva nelinearnog opterećenja ne mogu kombinirati,
- samo jedan slučaj opterećenja može biti analiziran odjednom,
- slijed primjene opterećenja (eng. *load history*) može biti važan, a posebno plastične deformacije ovise o načinu opterećenja, što je razlog za podjelu opterećenja na male korake odnosno inkremente,
- početno stanje naprezanja kao što su zaostala naprezanja, geometrijske nepravilnosti i slično mogu imati veliki utjecaj.

Nelinearna numerička analiza podijeljena je u dva dijela: linearna analiza stabilnosti i nelinearna analiza Riks–Wempner–Wesselsovom metodom (u daljnjem testu: Riksova metoda). U prvom koraku bit će izvršena numerička linearna analiza stabilnosti stupa s linearno elastičnim materijalom. Svrha ove analize je grubo izračunavanje kritičnog opterećenja i dobivanja formi izvijanja. Nakon linearne analize stabilnosti stupa, provest će se nelinearna analiza Riksovom metodom. Kako bi se postigli što točniji rezultati nelinearne analize u obzir su uzete geometrijska nelinearnost te plastifikacija materijala odnosno materijalna nelinearnost. Geometrijska nelinearnost su u ovom slučaju veliki pomaci koji nastaju prilikom velikog opterećenja stupa odnosno kolapsa. Slika 6.2 prikazuje shematski prikaz procedure nelinearne analize stupa.



Slika 6.2. Shematski prikaz procedure nelinearne analize stupa

Nelinearna numerička analiza zateznog stupa ZAH2 bit će provedena na istom modelu s obzirom na geometriju stupa korištenom u linearnoj analizi (opisano u poglavlju 5.3).

6.3. Linearna analiza stabilnosti

Linearnom analizom stabilnosti određuje se maksimalno opterećenje koje konstrukcija može podnijeti prije nego što nastupi elastična nestabilnost odnosno kolaps konstrukcije.

Pri tome je potrebno provesti analizu vlastitih vrijednosti koja se može predstaviti jednadžbom

$$(\mathbf{K}_E + \lambda_i \mathbf{K}_G) \mathbf{V}_i = \mathbf{0}, \quad (6.4)$$

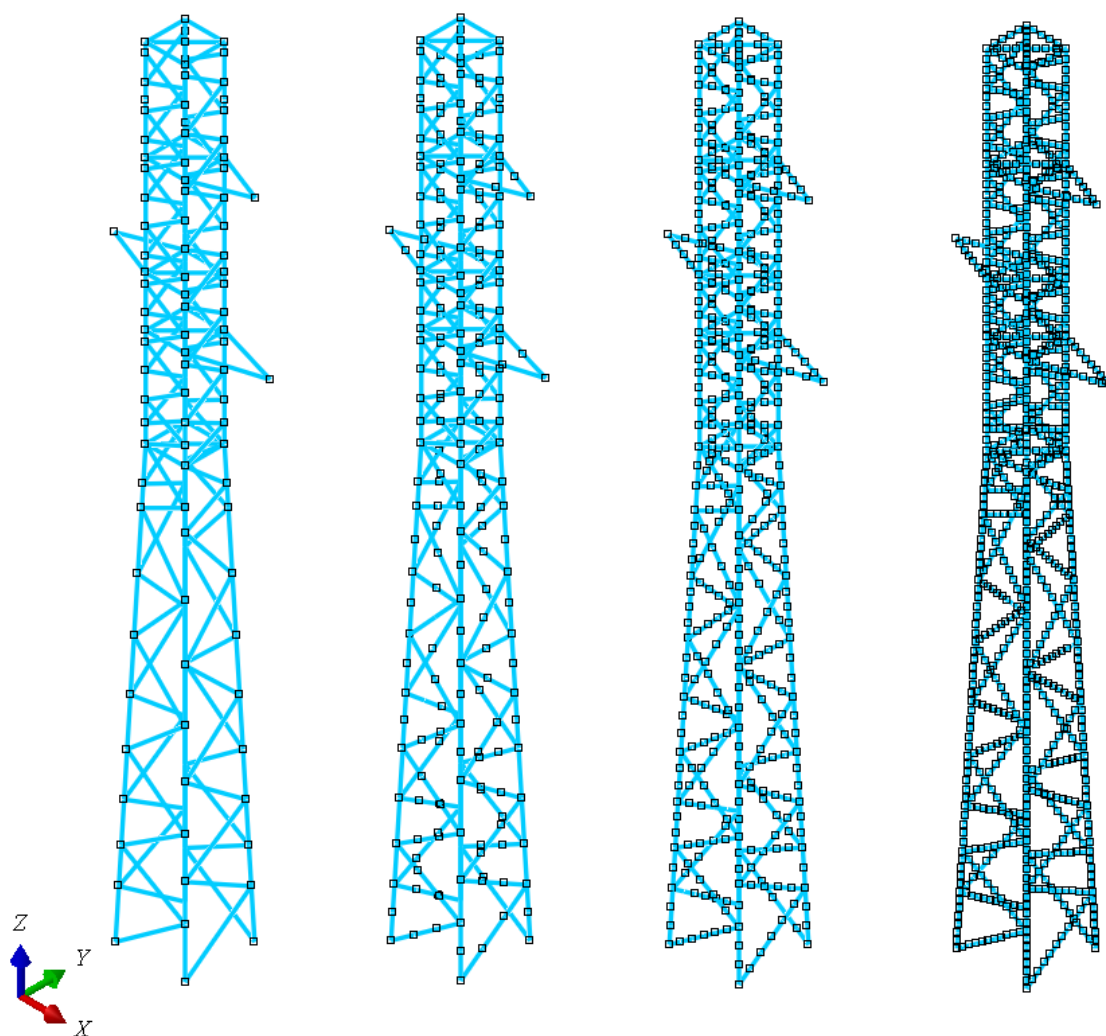
gdje je \mathbf{K}_E linearna matrica krutosti, \mathbf{K}_G je geometrijska ili matrica krutosti početnih naprezanja, λ_i je i -ta vlastita vrijednost ili faktor opterećenja za koji je \mathbf{K}_G izračunata, a \mathbf{V}_i je vektor pomaka. \mathbf{K}_G je za određeni konačni element funkcija stanja naprezanja u elementu. Analiza stabilnosti metodom konačnih elemenata sastoji se iz dva koraka. Prvi korak je statička analiza kojom se određuju naprezanja za zadano referentno opterećenje. Drugi korak je analiza vlastitih vrijednosti, gdje se na osnovi naprezanja iz statičke analize najprije određuje matrica \mathbf{K}_G , a nakon toga se određuju vlastite vrijednosti λ_i i vlastiti vektor \mathbf{V}_i . Vlastita vrijednost λ_i tada predstavlja faktor s kojim treba pomnožiti referentno opterećenje da bi dobili kritično opterećenje koje konstrukcija može podnijeti a da ne izgubi svoju stabilnost.

Kreirani proračunski model stupa za linearnu analizu stabilnosti isti je kao i proračunski model korišten u linearnoj analizi naprezanja i deformacija (Slika 5.2).

Isto vrijedi i za zadane rubne uvjete uklještenja i veze spoja L profila (Slika 5.3).

Kako je u linearnoj analizi izračunato, najnepovoljnije opterećenje za stup definirano *Pravilnikom* [3] je slučaj opterećenja 69.2 odnosno puknuće vodiča na najnižoj konzoli stupa (P3). Moguće situacije su da na navedeno opterećenje djeluje još i opterećenje uzrokovano jakim naletima vjetra te dodatno opterećenje uslijed zaleđivanja i nanosima dodatnog snijega na vodiče i stup. Takvo stanje bi znatno povećalo opterećenje stupa, a može uzrokovati i oštećenja odnosno kolaps stupa. Stoga će upravo navedeno opterećenje 69.2 P3 bit postavljeno na proračunski model stupa te će poslužiti kao referentno opterećenje.

Nadalje, potrebno je kreirati mrežu konačnih elemenata. Korišteni su isti prostorni kubični Euler – Bernoulijevi konačni elementi (*Abaqus*, B33) kao i u linearnoj analizi. Slika 6.3 prikazuje različite gustoće mreža korištene prilikom linearne analize stabilnosti. Kao i u linearnoj analizi naprezanja, ni u ovom slučaju nije moguće govoriti o konvergenciji rješenja jer nije poznato točno rješenje, ali analizom ovisnosti kritičnog opterećenja (prva vlastita vrijednost) o broju korištenih konačnih elemenata može poslužiti kao potvrda stabilnosti i relativne točnosti proračunskog modela.



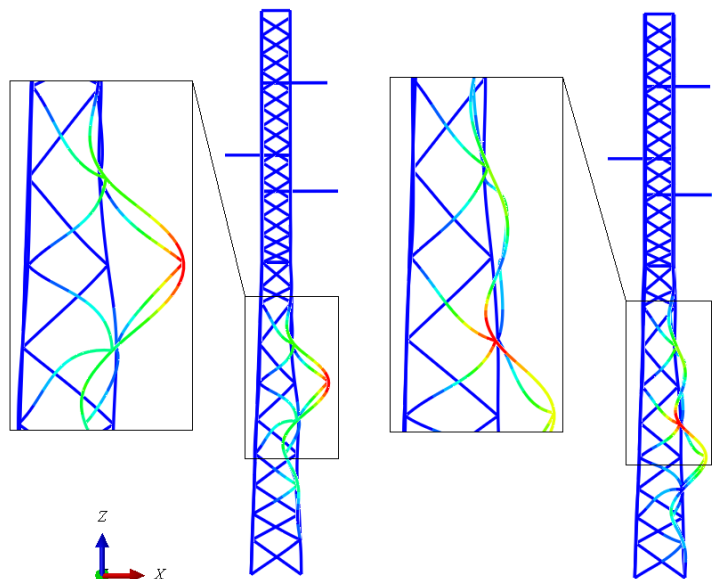
Slika 6.3. Mreža konačnih elemenata: a) 258 KE, b) 396 KE, c) 706 KE, d) 1342 KE

Rezultati provedene analize daju grubu procjenu iznosa faktora opterećenja λ koji izaziva gubitak stabilnosti (prva vlastita vrijednost) (Tablica 6.1).

Tablica 6.1. Iznosi prve dvije vlastite vrijednosti

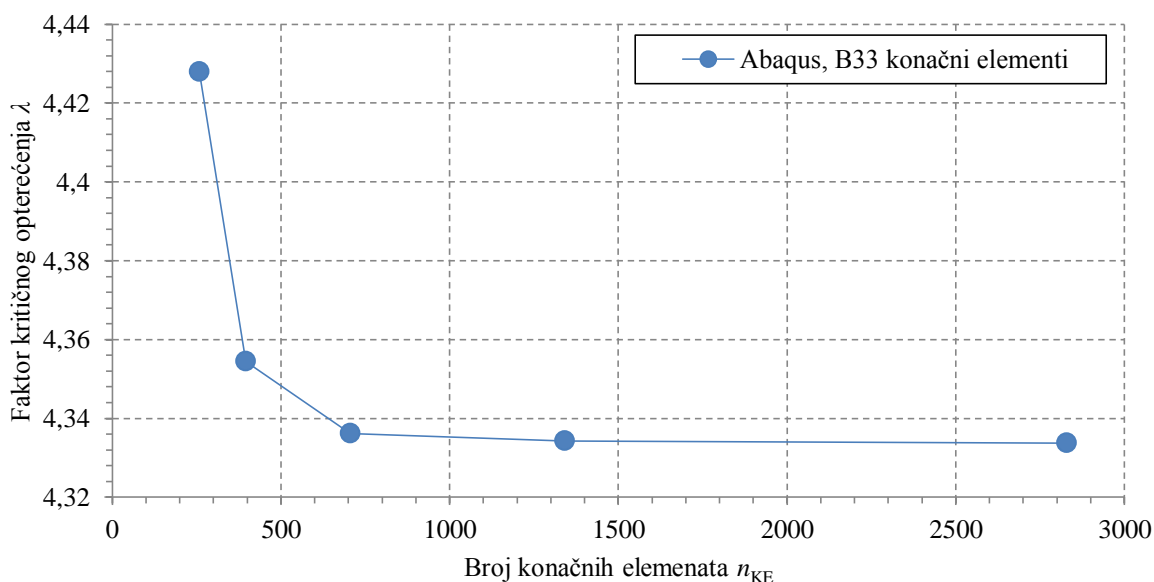
	Σn_{KE}	λ_1	λ_2
	258	4,4279	4,6917
	396	4,3544	4,5932
<i>Abaqus, B33</i>	706	4,3361	4,5555
	1342	4,3342	4,5532
	2830	4,3337	4,5528

Iznos prve vlastite vrijednosti koja odgovara iznosu faktora kritičnog opterećenja iznosi 4,3337 na proračunskom modelu koji se sastoji od 2830 konačnih elemenata. Slika 6.3 prikazuje izgled prve dvije forme izvijanja.



Slika 6.4. Izgled forme izvijanja

Slika 6.5 prikazuje ovisnost faktora kritičnog opterećenja λ odnosno iznos vlastite vrijednosti o broju konačnih elemenata proračunskog modela za definirano referentno opterećenje dobiveno numeričkom analizom stabilnosti. Vidljiva je brza konvergencija rezultata već za proračunski model s približno 700 konačnih elemenata.



Slika 6.5. Dijagram ovisnosti faktora kritičnog opterećenja λ o broju KE

Sada kada je dobivena gruba procjena iznosa kritičnog opterećenja pri kojem dolazi do gubitka stabilnosti, odnosno ponašanja stupa prilikom dodatnog povećanja opterećenja moguće je pristupiti nelinearnoj analizi u koju će biti uključene geometrijska i materijalna nelinearnost.

6.4. Riks–Wempner–Wesselsova metoda

Riksova metoda se općenito koristi za predviđanje nestabilnog, geometrijskog nelinearnog kolapsa strukture. Geometrijski nelinearni statički problemi ponekad uključuju izvijanje ili kolaps, pri čemu krivulja opterećenje – pomak daje negativnu krutost te se konstrukcija mora osloboditi energije deformacije da ostane u ravnoteži. Riksova metoda, za razliku od ostalih metoda, iterira istovremeno inkrementalni pomak i parametar opterećenja, što ju čini kompleksnijom za izvedbu.

Izraz (6.2) može se preformulirati u

$$\mathbf{K}_T(\mathbf{V}_0) \cdot \Delta \mathbf{V}_0 = (\lambda + \Delta \lambda) \cdot \mathbf{R}_e - \mathbf{R}_i(\mathbf{V}_0), \quad (6.5)$$

gdje su na početku poznate sve vrijednosti osim početnog vektora pomaka $\Delta \mathbf{V}_0$.

Iterativnim se postupkom dolazi do idućeg susjednog ravnotežnog stanja

$$\mathbf{K}_T(\mathbf{V}_1) \cdot \Delta \mathbf{V}_1 = (\lambda + \Delta \lambda) \cdot \mathbf{R}_e - \mathbf{R}_i(\mathbf{V}_1). \quad (6.6)$$

Iterativni postupak prekida se kada dopušteni pomak Δv_j^* postigne zadovoljavajuću točnost, što je parametar koji mora biti zadan tako da bude što manji, sukladno izrazu

$$(\lambda + \Delta \lambda)_{j-1} \cdot \mathbf{R}_0 = \mathbf{R}_i(\mathbf{V}_j) \Rightarrow \Delta v_j^* \cong 0. \quad (6.7)$$

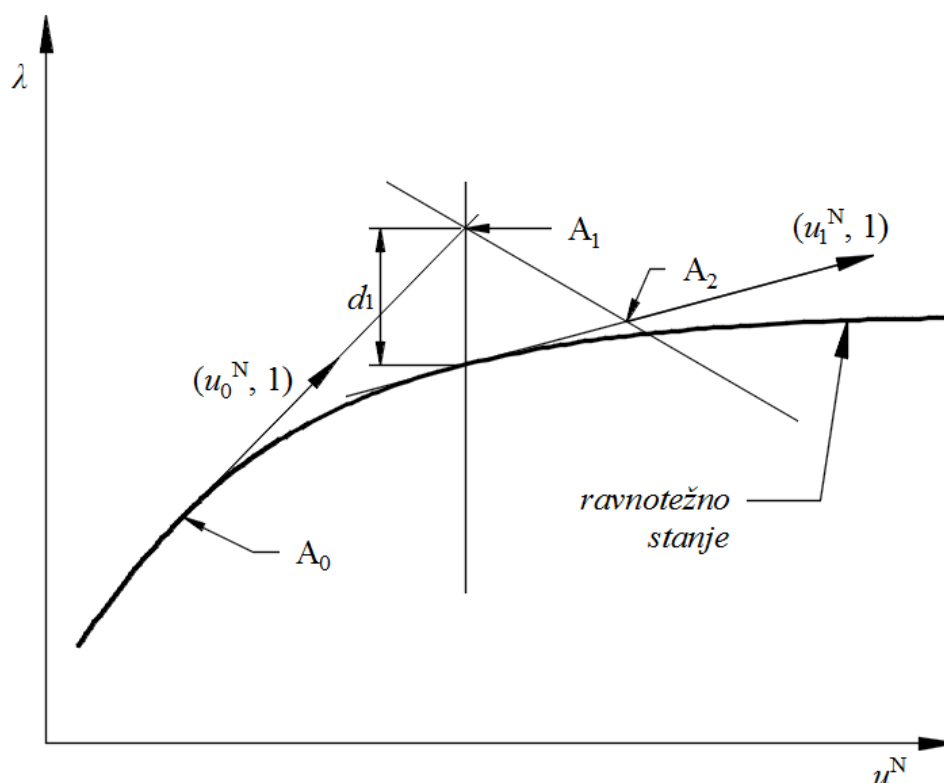
Tada se prelazi na novi inkrement te ponovo analogno započinje iterativni postupak. Bitno je napomenuti da Riksova metoda numerički nikada ne konvergira točno do zadane sile opterećenja.

Izraz (6.5) predstavlja početnu, ravnotežnu jednadžbu inkrementalnog pomaka s poznatim parametrima te je $\Delta \lambda$ jednoznačno određen izrazom

$$\Delta \lambda = \frac{\Delta l}{l_a}, \quad (6.8)$$

gdje je l_a ukupni faktor skale duljine luka (postavljen od strane korisnika, a najčešće je jednak 1). Ova se vrijednost koristi tijekom prve iteracije Riksove metode. Za kasnije iteracije i povećanje vrijednosti faktora računa se automatski. Minimalna i maksimalna inkrementalna duljina luka, Δl_{\min} i Δl_{\max} , se mogu koristiti za kontrolu automatskog povećanja duljine luka. Značajno je primijetiti, što je usko vezano za razmatrani problem, da je Riksovom metodom također moguće korektno opisati *snap – through* problem [27], što nije moguće uobičajenom Newton–Raphsonovom metodom.

Riksova metoda u programskom paketu *Abaqus* (oznaka *Static, Riks*) nije klasična formulacija Riksove metode već radi lakše implementacije u programski paket, radi se o modificiranoj Riksovoj metodi. Slika 6.6 prikazuje algoritam modificirane Riksove metode korištene u programskom paketu *Abaqus*. Kao što je vidljivo iz slike, rješenje je kontinuirani skup ravnotežnih točaka opisanih vektorima (u^N, λ) .



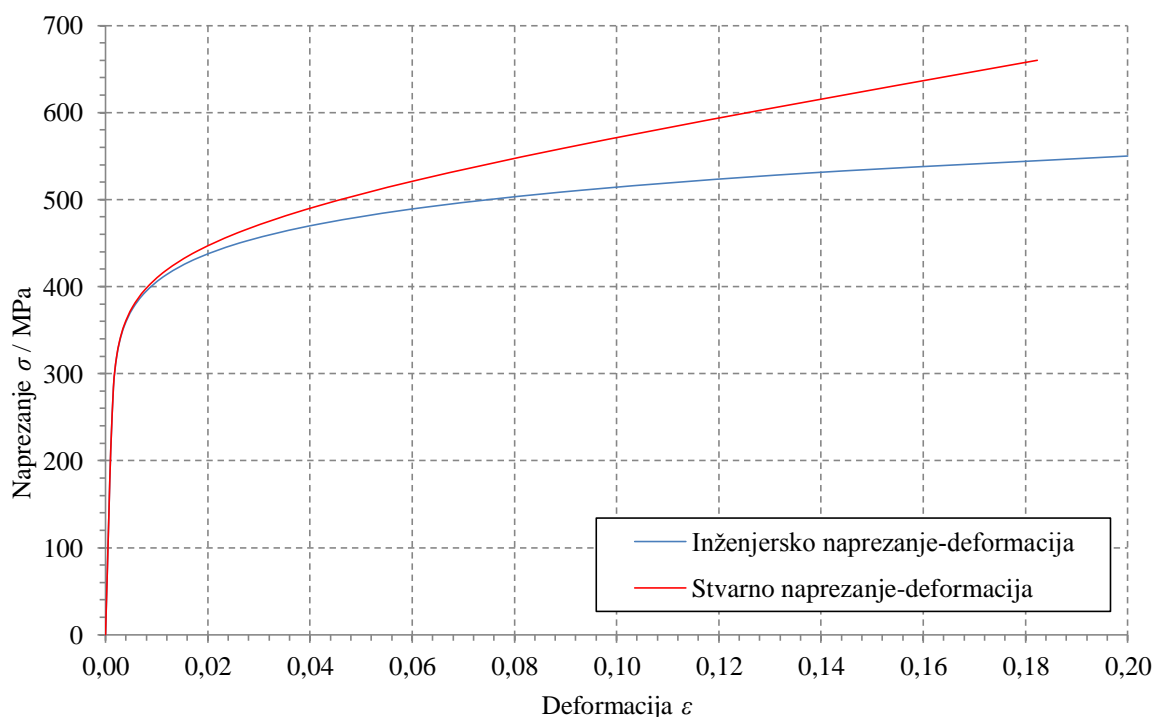
Slika 6.6. Algoritam modificirane Riksove metode [29]

Ako pretpostavimo da je rješenje razvijeno do točke $A_0 (u_0^N, \lambda)$ tada se može izračunati tangencijalna matrica krutosti K_T te se pristupa rješavanju jednadžbe

$$K_T \cdot V_0 = R. \quad (6.9)$$

Iznos inkrementa od točke A_0 do točke A_1 odabire se prema definiranoj dužini puta Δl koja je na početku definirana od strane korisnika, a programski paket *Abaqus* navedenu duljinu prilagođava tijekom analize algoritmom automatske inkrementacije opterećenja temeljene na brzini konvergencije [29].

Kao i u linearnoj analizi, potrebno je zadati karakteristike materijala, tj. modul elastičnosti, Poissonov faktor te gustoću materijala S335J2. Navedene vrijednosti dane su u Tablica 5.1. Navedena karakteristike opisuju materijal samo u linearnom području odnosno do granice tečenja materijala. Za razliku od linearne analize, u proračunski model potrebno je uvesti i materijalnu nelinearnost. Stoga je potrebno modelirati realno očvršćenje materijala u plastičnom području. Stvarno ponašanje materijala opisano je krivuljom stvarno naprezanje – stvarna deformacija. Materijal se do granice tečenja ponaša linearno elastično, a nakon granice tečenja izrazito nelinearno (Slika 6.7).



Slika 6.7. Dijagram naprezanje – deformacija materijala S335J2

Osnovna razlika inženjerske i stvarne krivulje naprezanje – deformacija je u računanju naprezanja i deformacija kod statičkog vlačnog pokusa. Kod inženjerske krivulje naprezanje dobijemo ako primijenjenu silu dijelimo s početnom minimalnom površinom poprečnog presjeka epruvete dok stvarno naprezanje dobijemo ako primijenjenu silu dijelimo s

trenutnom minimalnom površinom poprečnog presjeka epruvete. Isti način računanja vrijedi i za inženjersku i stvarnu deformaciju osim što se produljenje dijeli s početnom duljinom epruvete, odnosno s trenutnom duljinom epruvete za stvarnu deformaciju. Poznavanjem vrijednosti inženjerske deformacije i naprezanja moguće je odrediti stvarnu deformaciju prema izrazu [30]

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon_e), \quad (6.10)$$

gdje su ε_t stvarna deformacija, a ε_e inženjerska deformacija. Stvarno naprezanje moguće je zatim odrediti pomoću izraza [30]

$$\sigma_t = \sigma_e \cdot (1 + \varepsilon_e), \quad (6.11)$$

gdje su σ_t stvarno naprezanje, a σ_e inženjersko naprezanje.

U programskom paketu *Abaqus* potrebno je zadati vrijednosti plastične deformacije, stoga je potrebno iz stvarne deformacije izračunati plastičnu prema izrazu

$$\varepsilon_p = \varepsilon_t - \frac{\sigma_t}{E}. \quad (6.12)$$

Tablica 6.2 prikazuje izračunate vrijednosti stvarnog naprezanja i plastične deformacije materijala S355J2 korištene u proračunskom modelu stupa.

Tablica 6.2. Vrijednosti stvarnog naprezanja i plastične deformacije materijala S355J2

σ_t / MPa	ε_p
320,2	0
376,5	0,00348
440,8	0,01586
465	0,02506
558,9	0,08689
603,5	0,12613
660	0,17918

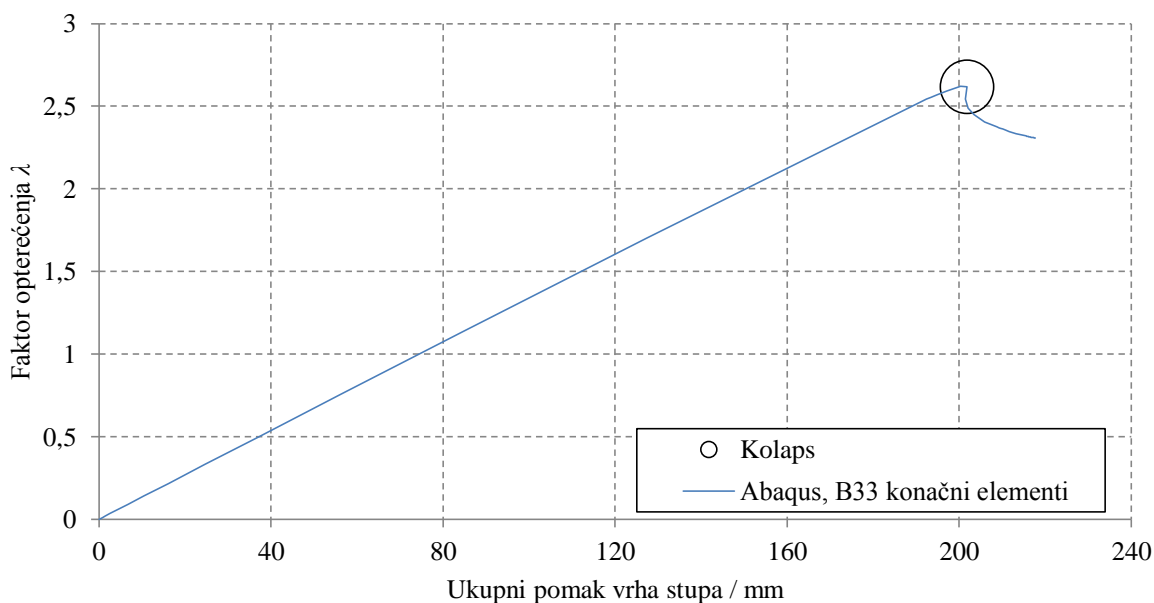
Nakon što je zadana materijalna nelinearnost, sada je potrebno u model uključiti i geometrijsku nelinearnost. Geometrijska nelinearnost nastaje kad god veličina pomaka utječe

na odziv konstrukcije. To vrijedi i za ovaj slučaj kada se radi o velikim pomacima i rotacijama. Budući da je krutost sada ovisna o pomaku, početna matrica krutosti ne može se više pomnožiti s primijenjenim opterećenjem kako bi se izračunali pomaci konstrukcije. Stoga kada je u model uključena geometrijska nelinearnost, matricu krutosti je tijekom analize potrebno za svaki inkrement ponovo izračunati, što rezultira zahtjevnošću za razliku od linearne analize. U programskom paketu *Abaqus* geometrijsku nelinearnost je potrebno uključiti postavljanjem opcije *NLGEOM = Yes*. Sada kada je model definiran moguće je provesti nelinearnu analizu.

6.5. Rezultati nelinearne analize

Opterećenje na konstrukciju zateznog stupa ZAH2 u rezultatima analize prikazano je kao faktor opterećenja λ . U programskom paketu *Abaqus* ovaj faktor se naziva *Load proportionality factor* (LPF), a zapravo predstavlja faktor koji množi zadano opterećenje. Faktor u iznosu od $\lambda = 1$ odgovara nazivnom opterećenju za slučaj 69.2 definiranom *Pravilnikom* [3] prilikom puknuća najnižeg vodiča (P3).

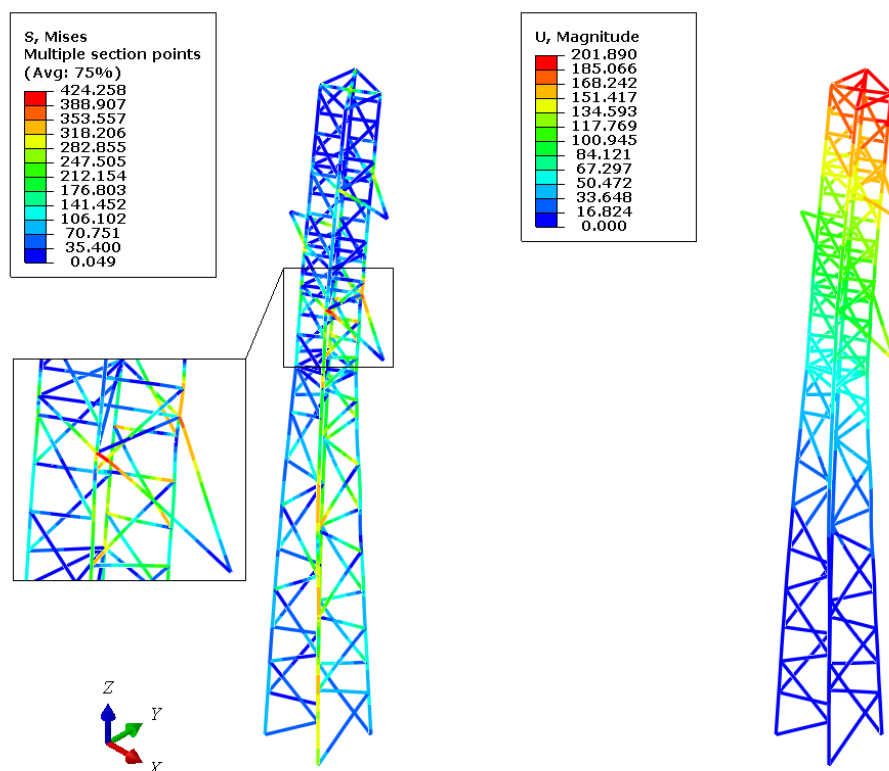
Slika 6.8 prikazuje dijagram ovisnosti pomaka vrha stupa o faktoru opterećenja iz kojeg se može očitati iznos opterećenja kada dolazi do kolapsa stupa. Taj iznos predstavlja ukupnu maksimalnu nosivost stupa. Kolaps stupa nastupa pri faktoru opterećenja 2,61805, tj. iznos pri opterećenju definiranog člankom 69.2 za puknuće donjeg vodiča (P3) pomnoženo s 2,61805.



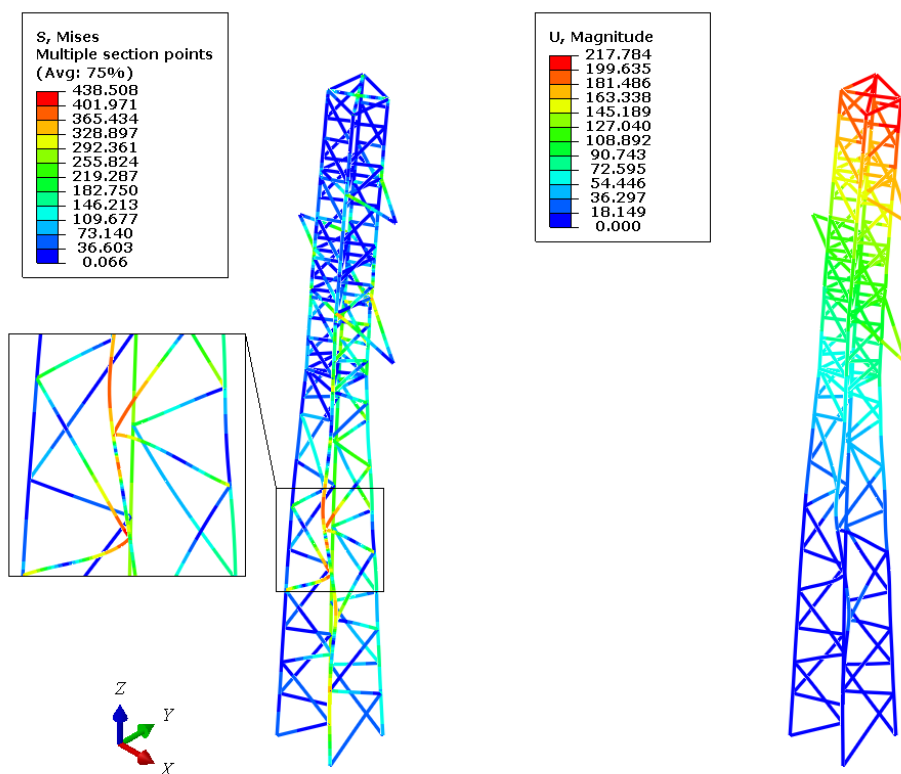
Slika 6.8. Dijagram faktor opterećenja λ – pomak vrha stupa

Slika 6.9 prikazuje raspodjelu naprezanja prema von Misesu i pomake stupa u trenutku kada nastupa kolaps stupa ($\lambda = 2,61805$) dok Slika 6.10 prikazuje raspodjelu naprezanja prema von Misesu i pomake stupa nakon početka kolapsa pri iznosu faktora opterećenja $\lambda = 2,3072$. Faktor uvećanja prikaza radi bolje preglednosti pomaka odnosno deformacija stupa iznosi $k = 6$.

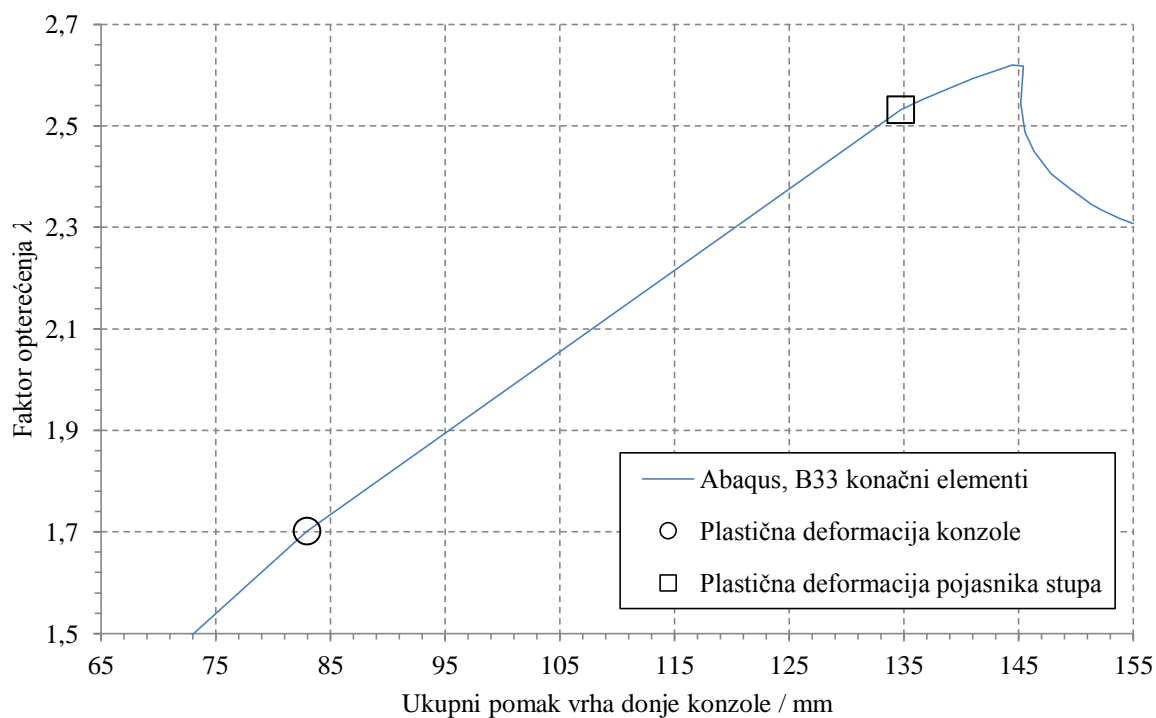
Slika 6.11 prikazuje dijagram ovisnosti ukupnog pomaka vrha donje konzole o faktoru opterećenja. Promatranjem se mogu uočiti dvije karakteristične točke. Pri iznosu faktora opterećenja $\lambda = 1,7018$ razlike u nagibu krivulje označuju da nastupa plastična deformacija donje konzole na spoju s glavom stupa. Vidljivo je da prvo nastaju trajna oštećenja konzole stupa, a tek onda pojasnika odnosno noge stupa što ima smisla jer konzola prenosi opterećenja s vodiča na stup, no uslijed znatnog povećanja iznosa opterećenja u vertikalnom i horizontalnom smjeru, konzola popušta te nastaju trajne plastične deformacije. Pri iznosu faktor opterećenja od $\lambda = 2,5314$ pojavljuju se prve plastične deformacije na pojasniku odnosno nozi stupa što sugerira druga promjena nagiba krivulje. Nakon te točke plastične deformacije se sve više povećavaju što sugerira izrazito nelinearna karakteristika krivulje sve do nastupanja kolapsa stupa.



Slika 6.9. Raspodjela naprezanja (MPa) i pomaka (mm) u trenutku kolapsa ($\lambda = 2,61805$)

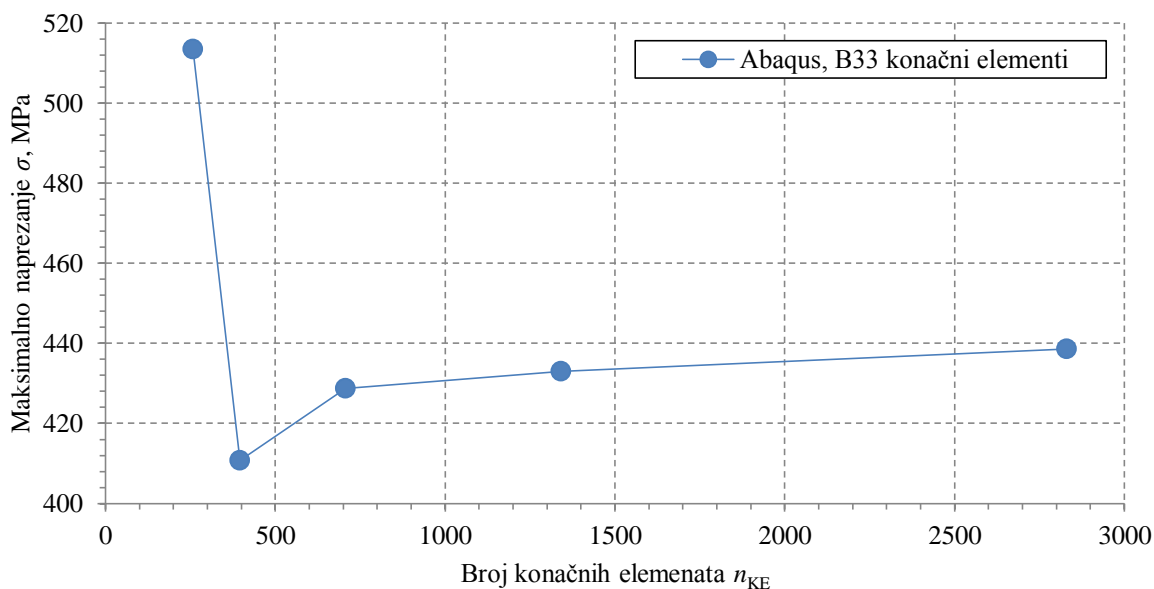


Slika 6.10. Raspodjela naprezanja (MPa) i pomaka (mm) nakon kolapsa ($\lambda = 2,3072$)



Slika 6.11. Dijagram faktor opterećenja λ – pomak vrha donje konzole

Slika 6.12 prikazuje ovisnost maksimalnog ekvivalentnog napreznja prema von Misesu o različitom broju korištenih prostornih kubičnih elemenata (*Abaqus*, B33). Vidljiva je stabilnost rezultata napreznja već za proračunski model s približno 1300 konačnih elemenata.



Slika 6.12. Dijagram ovisnosti maksimalnog napreznja σ / MPa o broju KE

Dokazom konvergencije rezultata daje se odgovor i na pitanje o stabilnosti cijelog proračunskog modela, budući da je za konvergirano rješenje numerički postupak redovito i stabilan. U ovom razmatranom problemu ne može se govoriti o konvergenciji u punom smislu riječi jer nije poznata točna vrijednost prema kojoj bi riješene konvergiralo, ali ipak je postignuta određena sigurnost konvergencijom numeričkog rezultata. Uz nelinearnu formulaciju konačnog elementa, konvergencija se odnosi na inkrementalno – iterativni postupak koji mora biti definiran tako da metoda rješavanja uopće može konvergirati uz zadani dozvoljeni kriterij greške, a u suprotnom divergira. Stoga da bi se rezultati nelinearne analize mogli smatrati relativno točnima uvjet je da konvergencija numeričkog rezultata mora biti postignuta, dok bez ispunjenja konvergencije, komentar o točnosti postaje besmislen. Vidljivo je da se nelinearni model vizualno deformira vrlo slično prvoj formi izvijanja koja je izračunata i dobivena linearnom analizom stabilnosti što je dobar dodatni pokazatelj relativne točnosti proračunskog modela.

7. ZAKLJUČAK

U radu je provedena linearna i nelinearna numerička analiza čeličnog rešetkastog stupa dalekovoda pomoću metode konačnih elemenata.

U najvećem broju slučajeva inženjerske prakse, linearni proračun sasvim je dostatan te dovoljno točan za potrebe dimenzioniranja te ispitivanja ponašanja konstrukcije pri različitim opterećenjima. Provedena numerička analiza pokazala je kako proračunski model čeličnog rešetkastog stupa dalekovoda dovoljno točno opisuje nosivost stupa za sve uvjete opterećenja propisane *Pravilnikom* [3] u slučaju kada je promatrani model u linearno elastičnom području. Pokazalo se da je proračunski model dovoljno točan jer su odstupanja rješenja dobivenog numeričkom analizom od rješenja dobivenog eksperimentalno mala, odnosno u radu je pokazano dobro poklapanje ovih rezultata. Pokazalo se također da je proračunski model stabilan jer u svim razmatranjima, i linearnim i nelinearnim, rješenje konvergiralo određenoj vrijednosti, tj. povećavanjem ukupnog broja konačnih elemenata proračunskog modela nije došlo do divergencije numeričkog rezultata.

Pravilnik [3] u obzir uzima samo najčešće moguće slučajeve opterećenja, no ne stavlja naglasak na potencijalno izrazito opasne vanjske utjecaje i interakcije, koji premda rijetki, mogu dovesti do oštećenja ili kolapsa konstrukcije stupa. Kako bi se provjerila navedena tvrdnja provedena je nelinearna analiza stupa. Radi grube procjene kritičnog opterećenja pri kojem dolazi do gubitka stabilnosti stupa provedena je linearna analiza stabilnosti. Dobivene forme izvijanja i iznos opterećenja poslužili su samo kao referentni podatci za daljnju provedbu nelinearne analize. Izračunati iznos kritičnog opterećenja znatno se razlikuje od realnog rješenja jer prilikom linearne analize stabilnosti stup se promatra isključivo u linearno elastičnom području, odnosno nisu uzeti u obzir geometrijski i materijalni nelinearni utjecaji. Ako usporedimo dobivenu vrijednost ($\lambda = 4,337$) može se zaključiti da je ona 1,66 puta veća od iznosa kritičnog opterećenja koji je dobiven nelinearnom analizom ($\lambda = 2,61805$) koji u obzir uzima geometrijske i materijalne izvore nelinearnosti.

Kao što je navedeno, u nelinearnoj analizi korištena je Riks–Wempner–Wesselsova metoda u kojoj su u proračunski model uključena materijalna i geometrijska nelinearnost. Model je opterećen najnepovoljnijim slučajem opterećenja dobivenim u linearnoj analizi, a iznimna opterećenja u vidu interakcije vjetrova i dodatnog tereta te njihove moguće kombinacije

postignute su korištenjem faktora opterećenja (LPF) koji proporcionalno povećava osnovno opterećenje. Može se zaključiti da je nelinearna analiza dovoljno dobro opisala ponašanje stupa pri navedenom opterećenju. Također kao i u linearnoj analizi, povećanjem ukupnog broja konačnih elemenata s kojima je proračunski model diskretiziran, rezultati brzo konvergiraju prema istoj vrijednosti što omogućuje da se uz usporedbu s eksperimentalnim rezultatima zaključi da je dobiveno rješenje realno. Kako kompleksnost proračunskog modela raste, tako i numerička konvergencija inkrementalno – iterativnog postupka postaje osjetljivija na promjene i definicije unutar proračunskog modela te se može dogoditi da promjenom samo jednog parametra numerička simulacija divergira.

Za poboljšanje točnosti proračunskog modela čeličnog rešetkastog stupa, svakako je potrebno uzeti u obzir pretpostavke i ograničenja koja su isključena u ovoj analizi, kao što su krutost vijčanog spoja ili ekscentričnost spajanja L profila što također može utjecati na krajnji rezultat. Poželjno je i utvrđivanje značaja tla u svrhu modeliranja temelja odnosno rubnih uvjeta koji svakako imaju utjecaj na ponašanje stupa u zadanim uvjetima.

Na kraju se može zaključiti da uz usporedbu rezultata analize sa eksperimentalnim rezultatima ovako kreiran numerički model može poslužiti za brzu i okvirnu provjeru maksimalne nosivosti čeličnog rešetkastog stupa te za dimenzioniranje i projektiranje stupova prema zadanim uvjetima opterećenja i korištenja.

LITERATURA

- [1] *Abaqus 6.14 Documentation*, Dassault Systèmes 2014.
- [2] Ravlić, S. et al.; *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*, web stranica: <http://www.enciklopedija.hr/>, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Zagreb 2017.
- [3] *Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova napona 1 kV do 400 kV*, «Službeni list» broj 65/88, «Narodne novine» broj 53/91 – Zakon o standardizaciji 24/97, 1997.
- [4] Mirošević, G., Vidaković, F.; *Projektiranje, gradnja i održavanje dalekovoda*, KIGEN d.o.o., Zagreb, 2008.
- [5] *Čelično rešetkasti stupovi za dalekovode 10, 20 i 35 kV*, Uputa za primjenu stupova, Dalekovod Projekt d.o.o., 2010.
- [6] Kiessling, F. et al.; *Overhead Power Lines*, Springer, Berlin, 2002.
- [7] *Dalekovod Projekt*, web stranica: <http://www.dalekovod-projekt.com/tipovi-i-nosivost.aspx>, 2017.
- [8] *Dalekovod Proizvodnja*, web stranica: <http://www.dalekovod-proizvodnja.com/dalekovodni-stupovi.aspx>, 2017.
- [9] Goić, R. et al.; *Distribucija električne energije*, FESB, Split, 2008.
- [10] *Ovjesna i spojna oprema*, Katalog, Dalekovod Proizvodnja d.o.o., 2007.
- [11] *Tehnička enciklopedija, sv. III.*, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Zagreb, 1969.
- [12] *Laser Solutions*, web stranica: http://lsc.com.ru/en_ptl.html, 2017.
- [13] Zaninović, K.; *Klimatski atlas Hrvatske*, DHMZ, Zagreb, 2008.
- [14] Bajić, A.; *Prostorna raspodjela očekivanih maksimalnih brzina vjetra na složenom terenu Hrvatske kao podloga za ocjenu opterećenja vjetrom*, PMF, 2011.
- [15] Sorić, J.; *Metoda konačnih elemenata*, Golden marketing – Tehnička knjiga, Zagreb, 2004.
- [16] Čakmak, D.; *Numerička analiza krutosti gumenog zgloba rastojnika–prigušivača*, *Diplomski rad*, FSB, 2015.

- [17] Alfirević, I.; *Nauka o čvrstoći I*, Golden marketing – Tehnička knjiga, Zagreb, 1995.
- [18] Kraut, B.; *Strojarski priručnik*, Sajema d.o.o., Zagreb, 2009.
- [19] Kraus, M., Kindmann, R.; *St. Venants Torsion Constant of Hot Rolled Steel Profiles and Position of the Shear Centre*, Nordic Steel Construction Conference, Malmö, 2009.
- [20] Alfirević, I.; *Nauka o čvrstoći II*, Golden marketing – Tehnička knjiga, Zagreb, 1999.
- [21] Ungkurapinan, N. et al.; *Joint slip in steel electric transmission towers*, Engineering Structures 25, str. 779–788, 2003.
- [22] Itam, Z. et al.; *Finite Element Analysis of the Maximum Stress at the Joints of the Transmission Tower*, International Conference on Advances in Renewable Energy and Technologies, Putrajaya (Malaysia), 2016.
- [23] Lee, P.-S., McClure, G.; *Elastoplastic large deformation analysis of a lattice steel tower structure and comparison with full-scale tests*, Journal of Constructional Steel Research 63, str. 709–717, 2007.
- [24] Komorski, A. et al.; *Procjena pouzdanosti dalekovodnih stupova u Republici Hrvatskoj*, Tehnički vjesnik 20, br. 3., str. 381-390, 2013.
- [25] Cvetković, Z.; *Problematika djelovanja u kriznim situacijama prijenosne mreže*, Energija, br. 2., str. 236-251, 2006.
- [26] Sorić, J., Skozrit, I.; *Nelinearna numerička analiza konstrukcija, Predavanja*, FSB, Zagreb, 2014.
- [27] Borst, R. de. et al.; *Nonlinear Finite Element Analysis of Solids and Structures, 2nd Edition*, A John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, UK, 2012.
- [28] Zahavi, E., Barlam, D.; *Nonlinear Problems in Machine Design*, CRC Press LLC, Boca Raton, 2001.
- [29] *Abaqus 6.14 Theory Guide*, Dassault Systèmes 2014.
- [30] Skozrit, I.; *Numeričko modeliranje pukotina u metalnim i polimernim materijalima*, Doktorski rad, FSB, Zagreb, 2011.

PRILOZI

I. CD-R disk