

# NOSILNE PALIČNE KONSTRUKCIJE IN SEGMENTACIJA

Pavel Tomšič

## Izvleček:

Nosilne palične jeklene konstrukcije zaradi enostavnosti in vsestranskosti omogočajo gradnjo na težko dostopnih področjih, saj so lahke za prevoz, enostavne za montažo in ne zavzamejo veliko prostora. Ustaljena inženirska praksa uporablja modularno zasnovo konstrukcije, pri kateri je nosilna konstrukcija razdeljena na višinske segmente. V predstavljeni študiji analiziramo ustreznost modularne zasnove konstrukcij na podlagi iterativnega algoritma višinske segmentacije, ki upošteva uklonski kriterij vertikalnih elementov, preverbo po standardu Eurocode 3 ter zajame več različnih obremenitvenih primerov.

## Ključne besede:

jeklena konstrukcija, paličje, Eurocode, segmentacija

## 1 Uvod

Palične jeklene nosilne strukture se uporabljajo kot nosilni stolpi v mnogih inženirskih objektih, kot na primer pri daljnovodnih, telekomunikacijskih stolpih in transportnih žičniških sistemih. Prenos obremenitev preko konstrukcije do podlage je odvisen od velikosti in postavitve elementov. V preteklosti je bilo razvitih kar nekaj optimizacijskih metod, ki se ukvarjajo s topološko optimizacijo [1-4].

V praksi so nosilne palične konstrukcije razdeljene v segmente, ki jih lahko opredelimo kot višinske reze. Segmenti vsebujejo vertikalno, horizontalno in diagonalno postavitve elementov, poleg tega tudi polnilne palice, katerih namen je zmanjšati uklonske dolžine in s tem potrebno velikost prerezov elementov. Segmentacija omogoča delno montažo v podjetju kot tudi olajšan transport, saj se stolp razstavi na dolžine, primerne za transport. Na mestu postavitve pa se segmenti zgolj sestavijo. V praksi se uporabljajo tipične višinske razporeditve, določene glede na pretekle projekte, obremenitve in višine stolpov. Mnogokrat se konstrukcije stolpov na trasi poenostavijo – napravi se nekaj tipskih konstrukcij, ki se jim nato po potrebi zmanjša ali poveča višina z dodajanjem segmentov.

Jeklene palične konstrukcije za nosilne stolpe se preračunajo po EN normah Eurocode 3 [5] z upoštevanjem detajlov okolja in dobre prakse v posamezni državi [6]. Če je konstrukcija namenjena za elektroenergetske in telekomunikacijske vode, je potrebno upoštevati dodatne predpise, ki zagotovijo njihovo funkcionalnost [7]. Za elemente paličja

se uporabljajo standardni valjani profili. Ti so različnih oblik, v večini primerov so odprti profili, kar zmanjšuje občutljivost konstrukcije na korozijo elementov.

V članku se sprašujemo o smiselnosti segmentacije tudi glede na dimenzioniranje elementov. V ta namen je bil razvit iterativni algoritem za določitev višinskih rezov, ki vključuje tako preračun uklonskih dolžin, preverbo glede na standard Eurocode 3 [3] kot tudi različne obremenitvene kombinacije.

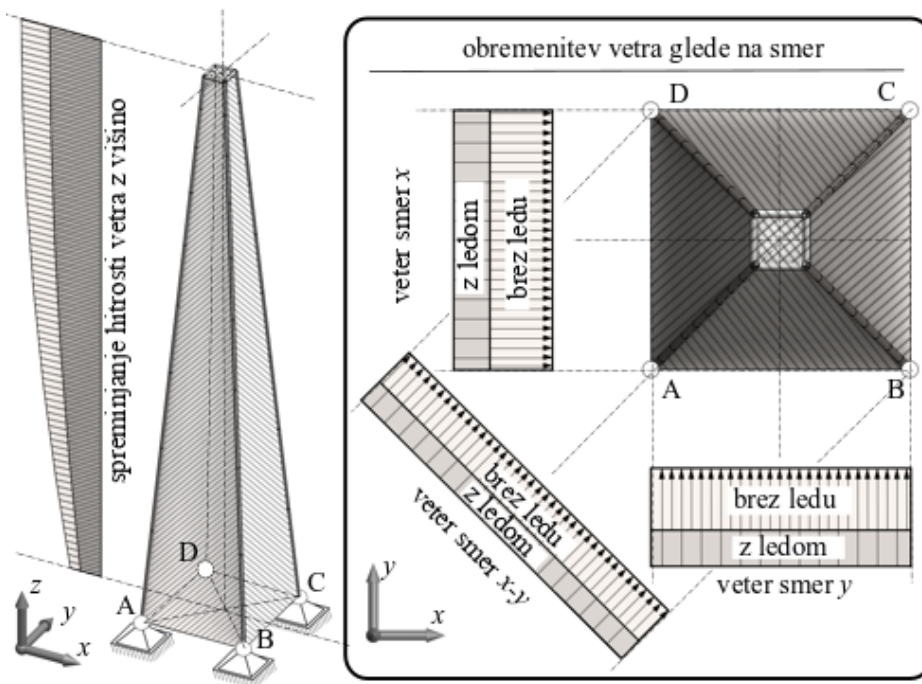
## 2 Predstavitev problema

Na dimenzioniranje elementov nosilne jeklene konstrukcije vplivajo različne obremenitve, ki jih lahko glede na učinkovanje razdelimo v nespremenljive in spremenljive:

- ▶ *nespremenljive obremenitve*: teža konstrukcije in zunanje koristne obremenitve, ki določajo namen in uporabnost, ter
- ▶ *spremenljive obremenitve*: izhajajo iz obremenitev okolja, kot sta vpliv vetra in ledene obloge, in se spreminjajo glede na postavitve ter dimenzije konstrukcije.

Posamezna obtežba ne vpliva samostojno na konstrukcijo, ampak se pojavljajo obtežne kombinacije. Obremenitve okolja v primeru kombinacij ločimo glede na smer delovanja, da zajamemo vpliv ne glede na orientacijo konstrukcije. Pri obremenitvenih kombinacijah ločimo dve kategoriji: mejno stanje uporabnosti (MSU), pri katerem preverjamo ustreznost delovanja konstrukcije v normalnih delovnih pogojih, in mejno stanje nosilnosti (MSN), pri katerem preverjamo nosilnost konstrukcije proti porušitvi pri ekstremnih pogojih. Osredotočamo se na nosilno palično konstrukcijo, zanima nas stanje MSN.

Dr. Pavel Tomšič, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo



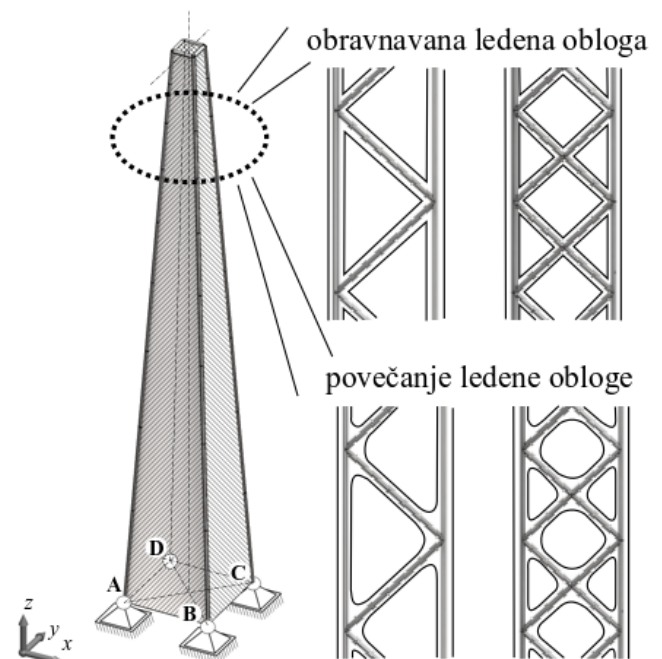
Slika 1 : Spremenljiva obremenitev nosilne konstrukcije zaradi vetra

Spremenljive obremenitve okolja postavitve niso odvisne zgolj od lege konstrukcije, temveč tudi od same geometrije. Najbolj izrazit je vpliv hitrosti vetra v kombinaciji z ledeno oblogo, ki je predstavljen na *sliki 1*. Velikost posamezne obremenitve zaradi vetra, ločene glede na smer, v kombinaciji z ledeno oblogo vpliva na dimenzioniranje elementov in se spreminja glede na višino konstrukcije. Višja je konstrukcija, bolj je izpostavljena vetru.

V praksi se velik del konstruiranja posveča vetrni obremenitvi, ki je podrobno obravnavana v standardih [8, 9]. Obremenitev ledene obloge, ki nastane okoli elementov, pa se upošteva zgolj kot povečan prerez. Ledena obloga predstavlja dodatno aerodinamično oviro, na katero vpliva veter. Pri paličnih stolpih, ki lahko vsebujejo tudi gsto razporeditev elementov, obstaja dodatna nevarnost povečanja ledene obloge okoli prirobnic pri stičiščih elementov, kot je prikazano na *sliki 2*. V kombinaciji sočasnega pojava žleda in vetra lahko led ne predstavlja zgolj obloge okoli elementov, temveč tvori dodatno zaprto čelno površino. Gostota mreže elementov se povečuje z višino. Vpliv je najbolj izrazit pri vrhnjih delih konstrukcije, kjer se pojavi tudi največja ročica sile od podlage.

Poleg razporeda elementov v notranji mreži konstrukcije – topologije stolpa – je potrebno določiti tudi razporeditev topoloških vzorcev po višini konstrukcije. Višinski raster določi gostoto vzorcev in vpliva na lastno težo kot tudi na predstavljene spremenljive obremenitve. Zastavimo si vprašanje, ki je povezano z inženirskim pristopom h konstruiranju paličnih stolpov. Je segmentacija višine nosilne konstrukcije najbolj ustrezen pristop glede na spremenljive okoljske obremenitve?

Za odgovor so bile izdelane primerjave višinskih razporeditev konstrukcije glede na uklonske dolžine v robnih nosilnih vertikalnih elementih. Pregledujemo stolpe različnih končnih višin, ki so vsi enako obremenjeni, iz česar izhaja osnovna ideja tipizacije stolpov. Tak pristop poda kvalitativen vpogled v zastavljeno vprašanje uporabljane prakse. Upošteva mo dobavljivost elementov, saj je dobava standardnih valjanih profilov omejena z dolžinami. Poleg tega moramo z ustreznimi dimenzijami zagotoviti čim bolj enostaven transport do mesta postavitve



Slika 2 : Povečanje ledene obloge pri gosti mreži konstrukcije

stebra. Zaželeno je, da se stolp v glavnem sestavi v podjetju, na mestu postavitve pa se zgolj povežejo prepeljani višinski segmenti.

### 3 Predstavitev algoritma segmentacije

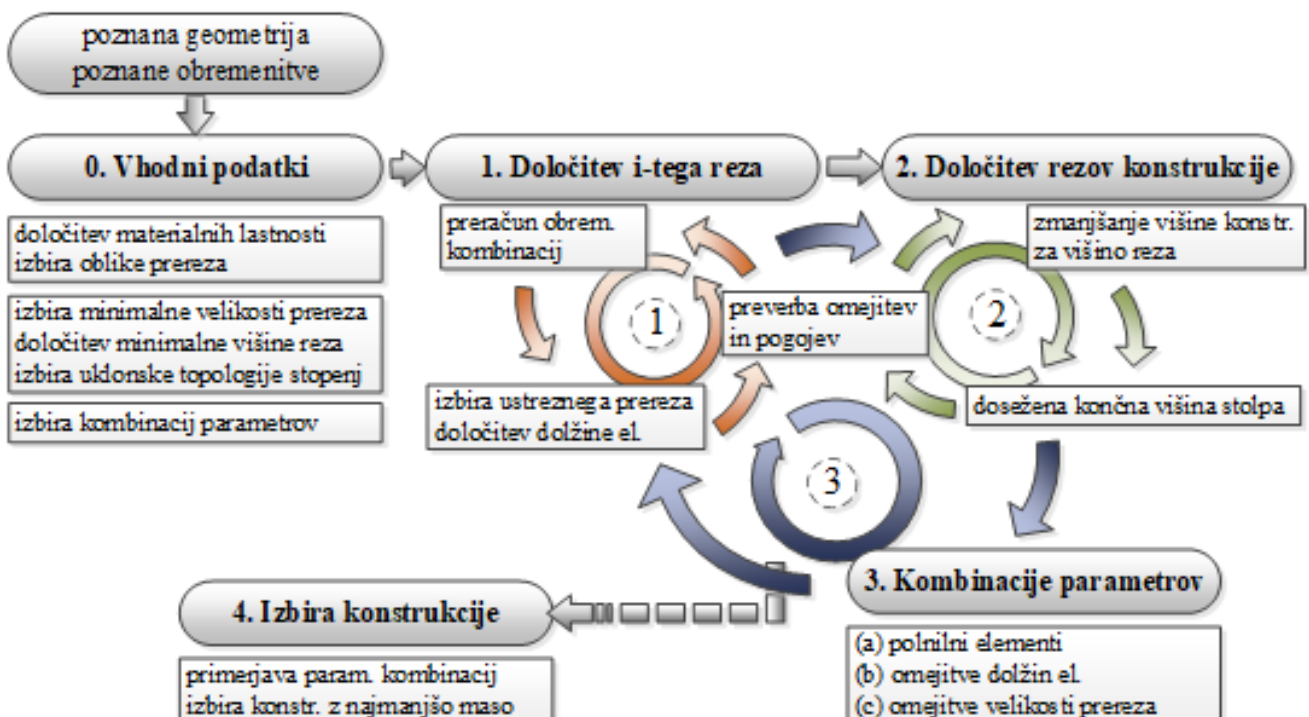
Število višinskih vertikalnih razrezov konstrukcije določimo glede na obremenitve. Upoštevamo realne velikosti prerezov standardnih profilov, ki se splošno uporabljajo za gradnjo paličnih stolpov, to so L-kotniki po standardu DIN 1028: 1994-03 in votle okrogle cevi po standardu DIN 2448. Osredotočimo se zgolj na ti dve obliki profilov, saj se U-profil po standardu DIN 1026, I-profil po standardu 1025, HEB po standardu DIN 1025-2 in IPE po standardu DIN 1025-5 ne uporabljajo pogosto za tak tip konstrukcij.

Pri vsaki konstrukciji je potrebno zadostiti porušitvenim pogojem celotne konstrukcije in posameznega elementa. Pri tem ne smemo preseči mejnih vrednosti napetosti in deformacij konstrukcije, ki so določene s projektnimi zahtevami, standardi in stabilnostnimi pogoji. Preverjanje stabilnosti sistema služi kot dokaz, da posamezni deli oziroma celotna konstrukcija niso v takem napetostnem stanju, pri katerem je pod vplivom majhne motnje mogoče naglo povečevanje deformacij.

Posamezni višinski rez konstrukcije določimo glede na lokalni uklonski kriterij elementa po Eulerju, ustreznost preverimo po standardu Eurocode 3 [5]. Pred izbiro velikosti prereza določimo najve-

čje uklonske sile v vseh štirih nogah konstrukcije pri različnih obremenitvenih kombinacijah. V vseh primerih predpostavimo koristno obremenitev, vpliv okolice se spreminja glede na smer vetra (imamo dve čelni smeri ter diagonalno smer) ter glede na upoštevanje ledene obloge. Skupaj imamo osem obremenitvenih kombinacij. Predstavljeni algoritem na sliki 3 poteka v korakih in upošteva različne obremenitvene kombinacije. V prvem koraku določimo višino reza od nivoja temelja. Po določitvi i-tega reza znižamo in na novo določimo največje uklonske sile v vseh štirih nogah pri različnih obremenitvenih kombinacijah ter preračunamo naslednji višinski odsek. Postopek ponavljamo, dokler ne dosežemo maksimalne višine stolpa.

Pri koraku 0 določimo vhodne podatke, to je izbira materiala, oblika prerezov elementov ter omejitve konstrukcije. Predhodno moramo poznati gabarite, zunanje obremenitve, vplive okolja ter geologijo terena. V koraku 1 predpostavimo posamezen višinski rez konstrukcije glede na lokalni uklonski kriterij elementa. Predpostavimo simetrijo vertikalnih elementov - v vseh nogah stolpa imamo uporabljene elemente enakega prereza in dolžin. Določimo največje uklonske sile pri različnih obremenitvenih kombinacijah. Sledi izbira elementov po knjižnici - iščemo najmanjšo velikost elementa, ki zadosti uklonskemu pogoju. Upoštevamo koeficient varnosti za jeklene konstrukcije  $v = 7,0$ . Uklonsko dolžino elementa preračunamo ob upoštevanju omejitve vitkosti. Ustreznost izbire preverimo z uporabo postopka Eurocode 3. Po določitvi i-tega reza konstrukcije v koraku 2 zmanjšamo konstrukcijo za viši-



Slika 3 : Potek algoritma določitve višinskih rezov



no, določeno z uklonsko dolžino elementa. Znižani konstrukciji na novo določimo največje uklonske sile v nogah pri obremenitvenih kombinacijah ter izberemo nov ustrezen višinski element. Postopek ponavljamo, dokler ne dosežemo maksimalne višine stolpa. Določitev višinskih rezov normaliziramo z natančnostjo reza na 0,1 m.

Za kvalitetno določeno izbiro višinskih rezov konstrukcije ni dovolj preverba zgolj pod osnovnimi vhodnimi parametri. S korakoma 1 in 2 določimo višinske reze konstrukcije za izbrane parametre. V koraku 3 zamenjamo kombinacijo parametrov vhodnih podatkov in ponovno določimo višinske reze. Imamo 27 različnih kombinacij glede na spreminjajoče se vrednosti topologije konstrukcije:

- (a) Polnilni elementi: polnilni elementi znotraj posameznega višinskega reza zmanjšujejo uklonske dolžine; določimo število polnilnih elementov glede na višinsko koto konstrukcije; upoštevamo tri različne kombinacije.
- (b) Omejitev dolžine elementov: določimo minimalno dolžino vertikalnih vogalnih elementov glede na višinsko koto konstrukcije; upoštevamo tri različne kombinacije.
- (c) Omejitev velikosti prereza: določimo minimalno velikost uporabljenega prereza glede na višinsko koto konstrukcije iz nabora standardnih elementov; upoštevamo tri različne kombinacije.

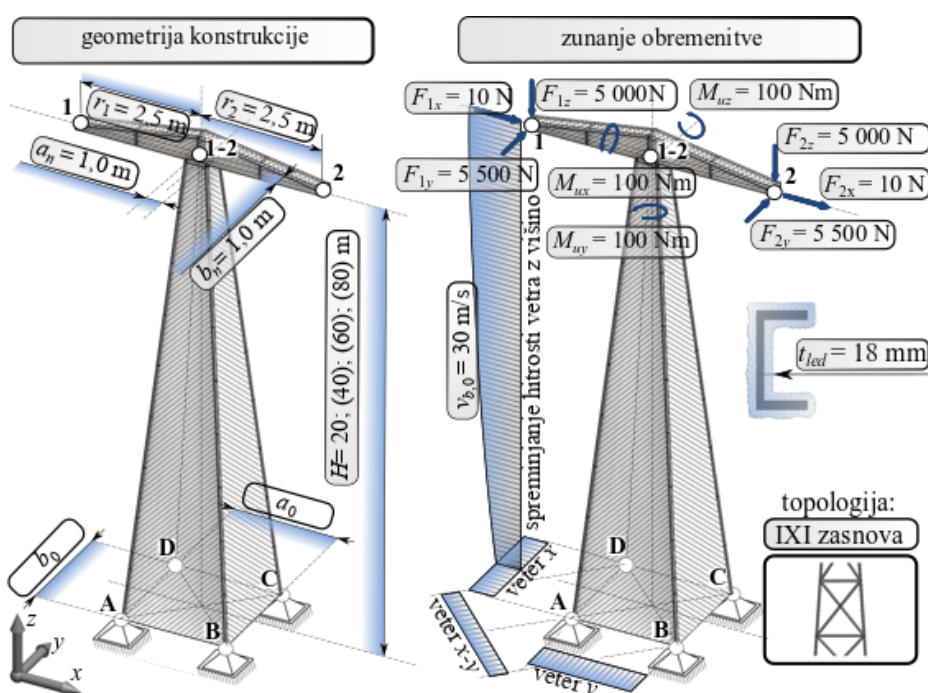
Glede na kombinacije parametrov poda algoritem več rešitev višinskega reza konstrukcije. Pri določitvi izbrane konstrukcije masa robnih elementov ne predstavlja dovolj kvalitativne ocene konstrukcije. Upoštevamo tudi elemente notranje razporeditve,

katerih dolžine dobimo na podlagi preračunanih višinskih rezov. V primeru uporabe polnilnih elementov, ki spremenijo uklonske dolžine, upoštevamo povečanje notranjih elementov mreže. Tukaj ne gre za podrobno določitev notranje topologije konstrukcije, temveč zgolj za oceno vpliva višinskih rezov za lažjo izbiro ustrezne rešitve. Izmed predstavljenih rešitev izberemo najbolj ustrezno, to je kombinacija rezov, ki predstavlja konstrukcijo z najmanjšo maso elementov i-te kombinacije.

#### 4 Predstavitev primera

Preverjamo idejo modularne zasnove paličnega stolpa. Za primerjavi zajamemo pogosto uporabljene oblike polnilnih elementov znotraj posameznega segmenta (višinskega reza). Konstrukcije so v vseh primerih enako obremenjene, vendar različnih končnih višin, od koder izhaja osnova za tipizacijo stolpov. Obravnavamo višine stolpov 20, 40, 60 in 80 m. Obremenitve in vhodne dimenzije konstrukcije so za stolpe vseh višin enake in so prikazane na *sliki 4*. Stolpi so v coni s hitrostjo vetra 30 m/s in z debelino ledene obloge 18 mm. Vrh palične konstrukcije je kvadratnega tlorisa,  $a_n = b_n = 1,0$  m. Na vrhu konstrukcije je prečni nosilec širine 5,0 m, ki je obremenjen na skrajnih koncih, kot je predstavljeno na sliki.

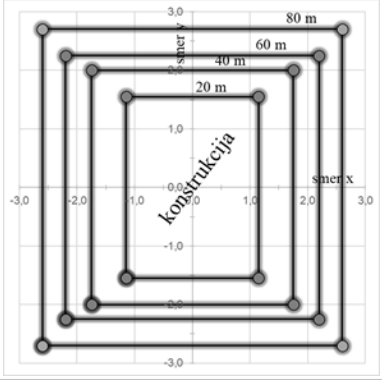
Glede na poznane obremenitve konstrukcije predhodno določimo velikost tlorisa. Ker imamo nesimetrično obremenjenost, je na mestu podlage pravokotni tloris. Dimenzije določimo za vsako obravnavano višino posebej in so predstavljene v *tabeli 1*.



Slika 4 : Shematski prikaz obravnavane konstrukcije in obremenitve

Tabela 1 : Širina konstrukcije na podlagi pri stolpih različnih višin

H [m]	a <sub>0</sub> [m]	b <sub>0</sub> [m]
80	5,2	5,4
60	4,4	4,5
40	3,5	4,0
20	2,3	3,1



Stolp je pravokotnega tlorisa glede na predpostavljeno natezno obremenitev na vrhnjem nosilcu. Dimenzije temelja in tloris konstrukcije pri različnih višinah so prikazani v tabeli 1. Pri manjših višinah konstrukcije je stolp izrazito pravokotnega tlorisa, pri višjih stolpih pa je vse bolj kvadratne oblike. Razlika v obliki tlorisa je posledica magnitude izrazitih vplivov na konstrukcijo. Pri majhnih višinah imajo namreč zunanje obremenitve prevladujoč vpliv, medtem ko postajajo z naraščanjem višine obremenitve okolja vse bolj izrazite.

## 5 Rezultati

Po opredelitvi dimenzij konstrukcije na mestu podlage lahko določimo višinske reze oziroma segmente po iterativnem algoritmu, predstavljenem na sliki 3. Konstrukcija je narejena iz enakokrakih kotnikov standarda DIN 1028: 1994-03. Uporabljeni material je jeklo z  $E = 210\ 000\ \text{N/mm}^2$  in dopustno napetostjo  $f_y = 355\ \text{N/mm}^2$ . Za primerjavo različnih višin stolpov določimo topološke kombinacije.

Kombinacije polnilnih elementov glede na uklonsko dolžino:

- (1) znotraj vseh rezov nimamo polnilnih elementov;
- (2) imamo polnilne elemente, ki dovoljujejo 2 x uklonske dolžine z izjemo zadnjih 20 višinskih metrov;
- (3) zadnjih 20 m nimamo polnilnih elementov, preostali stolp razdelimo po višini na dva intervala: znotraj spodnje polovice imamo polnilne elemente, ki dovoljujejo 3 x, v zgornji polovici pa polnilni elementi dovoljujejo 2 x uklonske dolžine.

Kombinacije za določitev minimalne dolžine robnih elementov:

- (1) minimalna dolžina elementov je 1 x širine konstrukcije na vrhu;
- (2) minimalna dolžina elementov zadnjih 20 m je

1,0 x, preostale konstrukcije pa 1,5 x širine konstrukcije na vrhu;

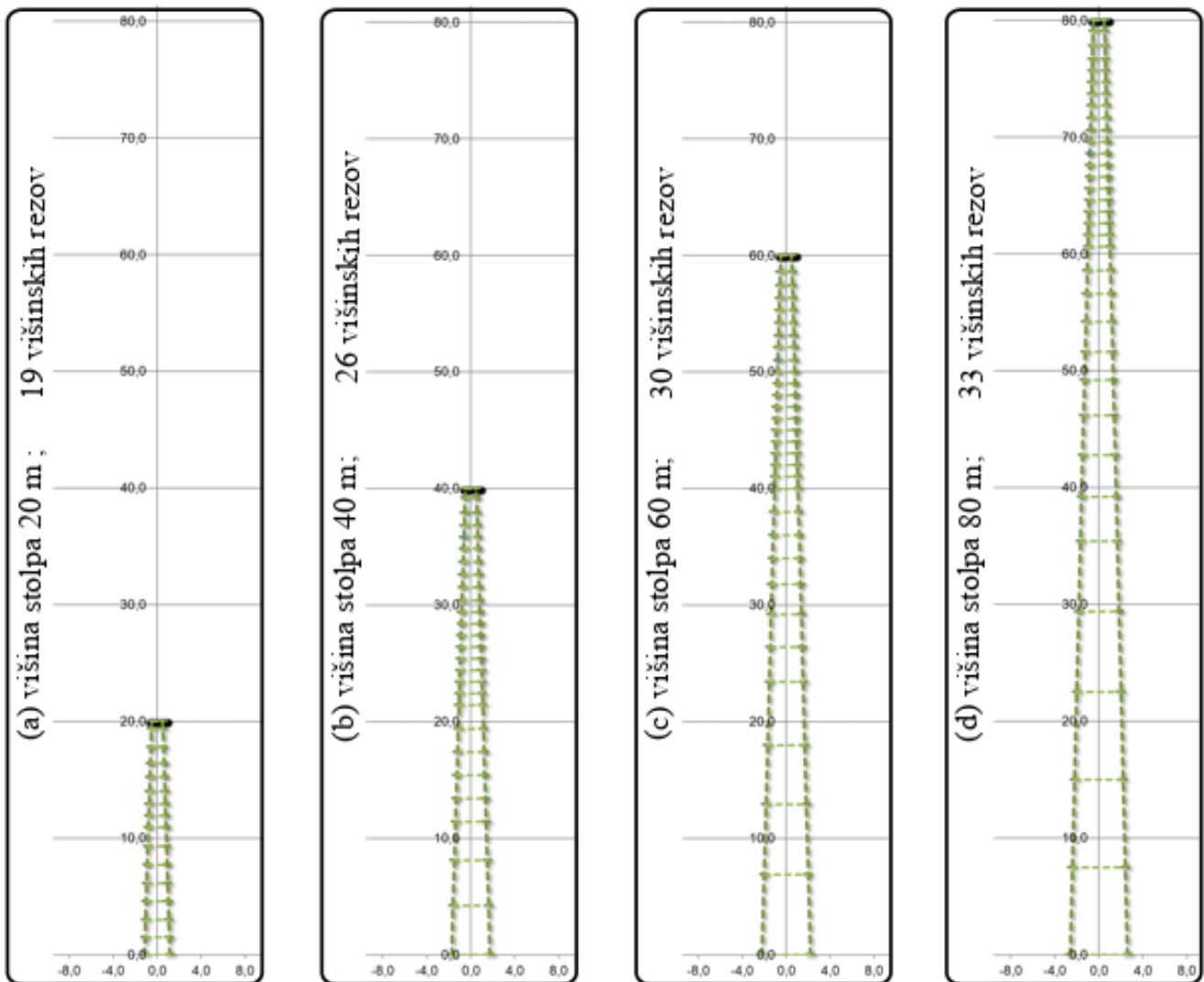
- (3) minimalna dolžina elementov zadnjih 10 m je 1,0 x, do 20 m od vrha je 1,5 x, za preostalo konstrukcijo pa 2 x širine konstrukcije na vrhu.

Za omejitev velikosti prerezov imamo kombinacije:

- (1) do višine konstrukcije 40 m od vrha je minimalni profil dimenzij 140 x 140 x 13 mm, do višine 20 m od vrha je minimalni profil 80 x 80 x 8 mm, do vrha konstrukcije pa profil 40 x 40 x 4 mm;
- (2) do višine konstrukcije 60 m od vrha je minimalni profil 200 x 200 x 18 mm, do višine 40 m od vrha je minimalni profil 130 x 130 x 12 mm, do višine 20 m od vrha je minimalni profil 70 x 70 x 7 mm, do vrha konstrukcije pa profil dimenzij 40 x 40 x 4 mm;
- (3) v vsej konstrukciji imamo minimalni uporabljeni profil dimenzij 45 x 45 x 4 mm.

Pri vsaki višini konstrukcije imamo 27 kombinacij predstavljenih parametrov, skupaj imamo 4 x 27 = 108 kombinacij. Pri vsaki kombinaciji upoštevamo 8 obremenitvenih stanj. Končno izbiro kombinacije rezov za vsako višino stolpa določimo glede na korak 4 algoritma, predstavljenega na sliki 3. Za stolpe obravnavanih višin so končni višinski razrezi predstavljeni na sliki 5:

- (a) Pri višini stolpa 20 m dobimo glede na kombinacije parametrov mnogo enakih rešitev. V konstrukciji imamo 19 višinskih rezov, najmanjši uporabljeni elementi so velikosti 40 x 40 x 4 mm, največji pa 65 x 65 x 7 mm.
- (b) Pri višini stolpa 40 m imamo v konstrukciji 26 višinskih rezov, najmanjši uporabljeni elementi so velikosti 40 x 40 x 4 mm, največji pa 110 x 110 x 12 mm.
- (c) Pri višini stolpa 60 m imamo v konstrukciji 30 višinskih rezov, najmanjši uporabljeni elementi so velikosti 40 x 40 x 4 mm, največji pa 180 x 180 x 18 mm.
- (d) Pri višini stolpa 80 m imamo v konstrukciji 33 višinskih rezov, najmanjši uporabljeni elementi



Slika 5 : Višinski rezi enako obremenjene konstrukcije različnih končnih višin

so velikosti 40 x 40 x 4 mm, največji pa 200 x 200 x 28 mm.

Glede na predstavljene rezultate bi prehitro sklepali, da je splošno uporabljana inženirska praksa modularnosti paličnega stolpa ustrezna. Torej: stolp ima modularno zasnovo segmentov, kadar potrebujemo višjo konstrukcijo, enostavno dodamo spodnji del. Število rezov glede na spreminjanje končne višine konstrukcije in njihove velikosti (višine) nakužeje princip modularnosti.

Pregled velikosti uporabljenih prereзов pa temu nasprotuje. Z naraščanjem višine konstrukcije narašča tudi magnituda obremenitev elementov. Glavna razlika se pojavi v izbiri velikosti robnih elementov na nivoju podlage. Profili, ki so nepomično vpeti v temelj, podajo robne pogoje, ki bistveno vplivajo na notranje obremenitve ter izbiro velikosti prereza. Če upoštevamo uporabljano prakso modularne zasnove, so zgrajeni stolpi manjših višin (glede na največjo višino tipa stolpa) vse bolj predimenzionirani.

## 4 Zaključek

Če se ozremo na zastavljeno vprašanje ustreznosti modularnega pristopa, vidimo, da imamo kar dva odgovora. Pri pregledu vertikalnih rezov konstrukcije – segmentacije – je bilo ugotovljeno, da je ustajena inženirska praksa ustrezna. Za gradnjo stolpov večjih višin dodamo nove višinske segmente na dnu, kot je bilo prikazano na primerih stolpov med 20 in 80 m. Če pa se držimo principa modularnosti tudi z uporabljenimi elementi – z velikostjo profilov, so v tem primeru stolpi manjših višin izrazito predimenzionirani.

Za obširnejšo analizo ustreznosti pristopa modularnosti in pojava predimenzioniranosti konstrukcije bi bilo v nadaljevanju smiselno nadgraditi predstavljeno študijo z ekonomskimi kazalci, ki bi ustrezno zajeli upravičenost predimenzioniranja glede na poslovni sistem v podjetjih.

**Viri**

[1] K. D. Tsavdaridis, A. Nicolaou, A. D. Mistry, E. Efthymiou, Topology optimisation of lattice telecommunication tower and performance-based design considering wind and ice loads, Structures, Volume 27, 2020, Pages 2379–2399, ISSN 2352-0124, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.08.010>.

[2] N. A. Tsavdaridis, KD and Efthymiou. Topology Optimisation Study for the Design of Lattice Towers. In: 9th Hellenic National Conference of Steel Structures: proceedings. The 9th Greek National Steel Structures Conference, 05–07 Oct 2017, Larisa, Greece. Steel Structures Research Society.

[3] P. Sivakumar, A. Rajaraman, G. M. S. Knight and D. S. Ramachandramurthy, Object-Oriented Optimization Approach Using Genetic Algorithms for Lattice Towers, Journal of Computing in Civil Engineering, Vol.18 (2), p. 162–171, 2004, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(2004\)18:2\(162\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2004)18:2(162)).

[4] J. Duhovnik, P. Tomšič: A comparative criteria method for telecommunications towers with different topological designs, MECHANIKA. 2012 Volume 18(2), p. 127–134, <https://doi.org/10.5755/j01.mech.18.2.1566>.

[5] SIST EN 1993 3-1:2001; Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij, 3-1. del: Stolpi, jambori in dimniki – Stolpi in jambori

[6] SIST EN 1993-3-1:2001; Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij, 3-1. del: Stolpi, jambori in dimniki – Stolpi in jambori – Nacionalni dodatek.

[7] SIST EN 50341-1:2013; Nadzemni električni vodi za izmenične napetosti nad 1 kV, 1. del: Splošne zahteve – Skupna določila.

[8] SIST EN 1991-1-4: 2005; Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije, 1-4. del: Splošni vplivi – Vplivi vetra.

[9] SIST EN 1991-1-4: 2005/oA101: Vplivi na konstrukcije, 1-4. del: Splošni vplivi – Obtežbe vetra – Nacionalni dodatek.

**Load-bearing lattice structures and segmentation**

**Abstract:**

Due to their simplicity and versatility, load-bearing lattice structures allow construction in hard-to-reach areas, as they are easy to transport, easy to install and do not take up much space. Established engineering practice uses a modular structure design where the load-bearing structure is divided into height segments. In the presented study, we question the appropriateness of such an approach

**Keywords:**

steel towers, lattice towers, Eurocode, segmentation

**JAKŠA**  
MAGNETNI VENTILI

od 1965



[www.jaksa.si](http://www.jaksa.si)

• vrhunska kakovost izdelkov in storitev

- 
- 
- 
- 
- 
- 



Jakša d.o.o., Šlandrova 8, 1231 Ljubljana  
T (0)1 53 73 066, F (0)1 53 73 067, E info@jaksa.si