

Primljen / Received: 30.12.2025.

Ispravljen / Corrected: 16.3.2026.

Prihvaćen / Accepted: 31.3.2026.

Dostupno online / Available online: 10.7.2026.

Automatizacija konstrukcijskog projektiranja jarbola učvršćenih užadi

Autori:



¹Doc.dr.sc. **Miloš Jočković**, dipl.ing.građ.
mjockovic@grf.bg.ac.rs



¹Mr.sc. **Marija Milojević**, dipl.ing.građ.
mmilojevic@grf.bg.ac.rs



²Mr.sc. **Dušan Martinović**, dipl.ing.građ.
dusan.martinovic@narita.rs



¹Doc.dr.sc. **Nenad Fric**, dipl.ing.građ.
nfric@grf.bg.ac.rs



¹Izv.prof.dr.sc. **Miroslav Marjanović**, dipl.ing.građ.
mmarjanovic@grf.bg.ac.rs

Autor za korespondenciju

¹ Sveučilište u Beogradu, Srbija
Građevinski fakultet

² Narita d.o.o. Srbija

Znanstveni rad - Prethodno priopćenje

Miloš Jočković, Marija Milojević, Dušan Martinović, Nenad Fric, Miroslav Marjanović

Automatizacija konstrukcijskog projektiranja jarbola učvršćenih užadi

U radu prikazan je razvoj programskog okvira MATLAB za automatizaciju modeliranja, analize i projektiranja anemometrijskih jarbola učvršćenih užadi primjenom sustava SAP2000 Open Application Programming Interface (OAPI). Okvir koristi aktualne odredbe eurokoda i uključuje relevantne slučajeve opterećenja. Učinkovitost OAPI-ja prikazana je analizom dvaju reprezentativnih jarbola učvršćenih užadi visine 122 m i 164 m. Varirani su različiti projektni parametri kako bi se identificirala najpovoljnija rješenja s obzirom na potrošnju čelika i vrijeme izvedbe. Odabrane su najbolje početne konfiguracije jarbola te istaknute mogućnosti daljnjeg unaprjeđenja OAPI-ja.

Ključne riječi:

konstrukcije s užadi, automatizirano konstrukcijsko projektiranje, parcijalno opterećenje vjetrom, konstrukcijska analiza temeljena na OAPI-ju, nelinearna metoda konačnih elemenata

Research Paper

Miloš Jočković, Marija Milojević, Dušan Martinović, Nenad Fric, Miroslav Marjanović

Towards automating the structural design of guyed masts

This paper presents the development of a MATLAB framework to automate the modelling, analysis, and design of anemometric guyed masts using the SAP2000 Open Application Programming Interface (OAPI). The framework adopts the current generation of Eurocode provisions and includes relevant loading cases. The efficiency of the OAPI is demonstrated through the analysis of two representative guyed masts with heights of 122 m and 164 m. Several design parameters are varied to identify the most favourable layouts in terms of steel consumption and execution time. The best initial mast layouts were selected, and potential improvements to the OAPI are highlighted.

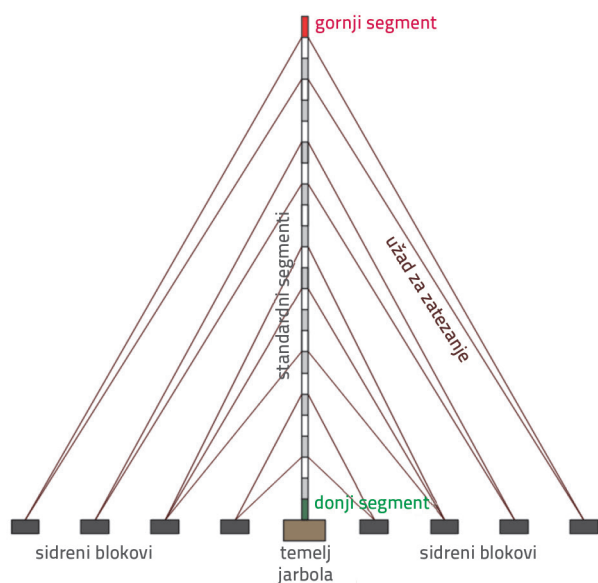
Key words:

cable-supported structures, automated structural design, patch wind loading, OAPI-based structural analysis, nonlinear FEM

1. Uvod

Zbog sve veće potrebe za proizvodnjom čiste energije u suvremenoj industriji, u Srbiji i na području zapadnog Balkana (ZB) od dvijetisućitih godina intenzivno se projektiraju i grade velike vjetroelektrane. Kapacitet zapadnog Balkana za solarnu energiju i energiju vjetra iznosi 23 GW, što je usporedivo s kapacitetom Njemačke [1, 2]. Projekti vjetroelektrana zahtijevaju preliminarnu procjenu potencijala energije vjetra na budućim lokacijama, uzimajući u obzir planiranu visinu vjetroturbina (koja može doseći i do 160 m). Kako bi se zadovoljili ti zahtjevi, često se koriste čelični anemometrijski jarboli učvršćeni užadi za postavljanje lagane opreme za mjerenje brzine i smjera vjetra na različitim visinama. Jarboli učvršćeni užadi vrlo su vitke i visoke prostorne rešetkaste konstrukcije koje se sastoje od:

- vertikalnoga središnjeg stupa izrađenog od standardnih rešetkastih segmenata
- nagnute, prethodno napete užadi od visokokvalitetnog čelika koja bočno podupire jarbol na različitim visinama
- temelja središnjeg stupa i sidrenih blokova za užad koja je radialno raspoređena oko jarbola (slika 1.).



Slika 1. Glavni dijelovi rasporeda rešetkastog jarbola učvršćenog užadi

Standardni rešetkasti segmenti jarbola, obično duljine 3 m i širine 0,4 do 1,0 m, uglavnom se sastoje od kružnih (cijevnih) nogu te zavarenih horizontalnih i dijagonalnih elemenata. Na njih najčešće su postavljeni lagani čelični nosači s bočnim anemometrima i vjetrokazima na različitim visinama. Prvi (donji) segment spojen je za središnji temelj, najčešće pomoću zglobne veze, što rezultira (pretežno) aksijalno opterećenim temeljem jarbola. Takve se veze mogu izvesti kao zglobne ili, češće, konusne baze [3]. Zglobni jarbol učvršćen užadi može zahtijevati i protuvrtnu ruku radi dodatne torzijske stabilnosti na željenoj visini. Posljednji (gornji) segment nosi samo gornji nosač i

gromobran. Posljedično, anemometrijski jarboli učvršćeni užadi ne zahtijevaju velike ili teške rešetkaste presjeke te su inherentno lakši od drugih tipova jarbola (npr. za telekomunikacijske svrhe). Zato standardni segmenti omogućuju jednostavnije rukovanje i podizanje, što rezultira bržom i pouzdanijom montažom na terenu [4-6].

Visoki jarboli učvršćeni užadi pokazuju inherentno nelinearno ponašanje zbog svoje vitke geometrije, sustava užadi koja prenosi samo vlačna opterećenja te nelinearnog odziva (velikih pomaka) pod djelovanjem okolišnih opterećenja. Ključni izvor te nelinearnosti leži u užadi i njezinoj krutosti ovisnoj o opterećenju, što je predmet istraživanja već desetljećima. Jayaraman i Knudson predložili su učinkovit elastični zakrivljeni prostorni element užeta (za male deformacije) za analizu kablaskih konstrukcija pod djelovanjem koncentriranih i raspodijeljenih opterećenja [7]. Trodimenzionalne formulacije elemenata užeta temeljene na točnim analitičkim izrazima elastične katenare, primjenjive i na toplinska opterećenja, predložene su u [8-10]. Interakciju između elemenata užeta i štapnih elemenata predložili su Coarita i Flores primjenom miješanog algoritma [11], dok su Shi i Salim razvili izvorni okvir metode konačnih elemenata (FE) [12], proveli nelinearnu analizu jarbola učvršćenih užadi i validirali model usporedbom rezultata s nekoliko komercijalnih softverskih paketa temeljenih na metodi konačnih elemenata. Konstrukcijska analiza jarbola učvršćenih užadi složena je zadaća koja zahtijeva posebno inženjersko znanje i iskustvo zbog:

- nelinearnog ponašanja i užadi i jarbola
- relativno složenog proračuna opterećenja vjetrom i ledom
- dinamičke prirode opterećenja vjetrom.

Potpuna nelinearna dinamička stohastička analiza rešetkastih jarbola učvršćenih užadi, iako najtočnija, zahtijeva mnogo vremena i obično specijalizirani računalni program. Zato je uloženo znatno istraživačko nastojanje u pojednostavljenje pravila analize i projektiranja kako bi se omogućila primjena ekvivalentne statičke analize i postigla učinkovita konstrukcijska rješenja. Madugula i sur. [13, 14] proveli su analitička, eksperimentalna i FE istraživanja primjenjujući modele rešetke i gredno-stupne modele. Prvi uključuje detaljno modeliranje rešetkaste konstrukcije, dok se drugi temelji na aproksimaciji rešetke pomoću grednih elemenata s ekvivalentnom aksijalnom, savojnom, posmičnom i torzijskom krutosti. Pokazali su da je model greda-stup pouzdan i isplativ za jarbole s ledom i bez leda te su istaknuli mali utjecaj torzijskih otpora na ukupni dinamički odziv jarbola. Matuszkiewicz [15] analizirao je jarbol učvršćen užadi uzimajući u obzir nesavršenosti jarbola, dok je Erdem [16] proveo analizu jarbola učvršćenih užadi visine 80 m u SAP2000 [17], razradio glavne korake analize i dao preporuke za odabir promjera užadi.

Iako ekvivalentna statička analiza donosi određena pojednostavljenja u odnosu na potpunu dinamičku stohastičku analizu, modeliranje i analiza jarbola učvršćenih užadi i dalje su iznimno zahtjevni zbog brojnih konstrukcijskih komponenti

(posebno zatezne užadi), širokog spektra opterećenja i snažne međuovisnosti između usvojene geometrije tornja i primijenjenih opterećenja. Zato je ključni korak definirati početni raspored tornja i njegova sustava zatezanja koji će biti što učinkovitiji, čime se svodi na minimum potreba za opsežnim izmjenama u kasnijim fazama modeliranja i analize [18]. Ti izazovi potaknuli su istraživače na primjenu automatiziranih algoritama koji omogućuju sustavno istraživanje projektnih alternativa, prelazeći granice konvencionalnog pristupa temeljenog na iskustvu i metodi pokušaja i pogrešaka. Od pionirskog rada Bella i Browna [19] brojna su istraživanja bila usmjerena na optimizaciju jarbolnih konstrukcija primjenom različitih tehnika [20–23]. Ti su naponi uglavnom bili usmjereni na optimizaciju geometrije tornja, konfiguracije zatezne užadi i/ili prednapreznja u zateznoj užadi u cilju smanjenja ukupne mase konstrukcije. Međutim, kod visokih jarbola učvršćenih užadi, gdje je masa konstrukcije po dužnomu metru relativno mala, minimizacija vlastite težine nije neophodno glavni projektni kriterij. Praktična iskustva u projektiranju pokazala su da drugi čimbenici mogu biti još zahtjevniji, poput učinkovitosti montaže na terenu (broj točaka pričvršćenja užadi po visini, broj i dimenzije sidrenih blokova, broj i masa montažnih dijelova itd.). Nadalje, spomenuta istraživanja uglavnom su bila ograničena na niske tornjeve s tek nekoliko razina užadi, a često su zanemarivala nelinearnost užadi. Također, opterećenje ledom najčešće nije bilo uključeno, što dodatno ograničava primjenjivost njihovih rezultata na stvarne visoke tornjeve.

Ovo istraživanje jest originalni okvir koji automatizira modeliranje, analizu metodom konačnih elemenata (FE) i provjere iskorštenosti čelika potrebne u preliminarne konstrukcijskom projektiranju visokih anemometrijskih jarbola učvršćenih užadi. Okvir je razvijen pomoću računalnih programa MATLAB [24] i SAP2000 *Open Application Programming Interface* (OAPI). Slično tome, Cucuzza i sur. [25] koristili su SAP2000 u kombinaciji s MATLAB-om putem OAPI-ja za optimizaciju veličine i oblika jarbola učvršćenih užadi visine 30 m. Konstrukcija se sastojala od jednoga središnjega kružnog čeličnog šupljeg profila predstavljenog grednim elementima, a 21 podupirući element modeliran je kabelskim elementima SAP2000. Međutim, oni su opterećenja vjetrom i ledom modelirali prema talijanskim nacionalnim preporukama [26], a ne prema relevantnim eurokodovima. Programski okvir predstavljen u ovome istraživanju primjenjuje odredbe temeljene na eurokodovima (trenutačna generacija) za projektiranje jarbola učvršćenih užadi i uključuje relevantne slučajeve opterećenja uzimajući u obzir i djelovanje vjetra i leda. Nadalje, provedeno je istraživanje na dvama visokim anemometrijskim jarbolima učvršćenima užadi s različitim propisanim skupovima projektnih parametara (klasa čelika, brzina vjetra i raspored užadi) kako bi se istražila najpovoljnija rješenja projektiranja jarbola. Ciljevi su procijenjeni ne samo prema potrošnji čelika, već i prema minimiziranju vremena izvedbe i pojednostavljenju rasporeda. Analiza je pokazala da je razvijeni OAPI lako postigao zadane ciljeve prema zahtjevima izvođača, automatski procjenjujući stotine konstrukcijskih rasporeda prema zadanim ograničenjima.

Na kraju istaknute su mogućnosti daljnjeg unapređenja OAPI-ja. Programski okvir ima dugoročnu primjenjivost jer se može jednostavno prilagoditi nadolazećoj drugoj generaciji eurokodova.

2. Konstrukcijska analiza i projektiranje jarbola učvršćenog užadi

U Srbiji se čelične konstrukcije projektiraju prema nizu normi SRPS EN (eurokod), uz dopunu nacionalnim dodacima i relevantnim ISO normama, čime se Srbija usklađuje s europskim normama za proračun konstrukcija. Pri analizi jarbola učvršćenih užadi potrebno je zadovoljiti tri kriterija kako bi se omogućila primjena ekvivalentne statičke analize (maksimalna duljina konzole, maksimalni omjer krutosti jarbola i užadi te maksimalni omjer mase užadi i brzine vjetra), u skladu s normom SRPS EN 1993-3-1:2012 [27]. Postupak se temelji na međusobno kombiniranim statičkim segmentno raspodijeljenim opterećenjima vjetrom.

2.1. Djelovanja na konstrukciju jarbola učvršćenog užadi

Svojstva i projektne vrijednosti djelovanja, kao i kombinacije opterećenja, potrebno je izračunati u skladu s [28–30], uzimajući u obzir odgovarajuću klasu pouzdanosti jarbola učvršćenih užadi. Treba razmotriti sljedeća opterećenja: vlastitu težinu, dodatno stalno opterećenje, prednapreznje užadi, opterećenje ledom i opterećenje vjetrom. Seizmičko djelovanje nije relevantno jer je maksimalna seizmička sila višestruko manja od sile koja proizlazi iz srednjeg opterećenja vjetrom. Učinci snijega i temperature zanemarivi su u odnosu na učinke leda, pa se mogu izostaviti, osobito u fazi konceptualnog projektiranja. Slučaj loma užeta izvan je opsega ovog rada.

Dodatno stalno opterećenje potječe od opreme jarbola. Prednapreznje užadi treba biti u rasponu od 10 do 20 % minimalne sile loma užeta prema [31, 32]. Učinak leda treba izračunati prema [33] za razmatranu klasu ledene obloge (eng. *Ice Class for Glaze - ICG*). Osim dodatnoga stalnog opterećenja, led mijenja dinamičko ponašanje jarbola i povećava njegov koeficijent otpora vjetra. Djelovanja vjetra na jarbol treba odrediti prema [27, 29], uzimajući u obzir osnovnu brzinu vjetra v_{b0} i odgovarajući tip terena te orografski faktor c_o . Ukupni učinak vjetra na konstrukciju jarbola i užad treba izračunati kao zbroj ekvivalentnih statičkih djelovanja *srednjeg vjetra* i fluktuirajuće komponente zbog udara vjetra (*segmentno raspodijeljen vjetar*) za sve razmatrane smjerove vjetra [27].

I srednje opterećenje vjetrom na jarbol F_{mW} i srednje opterećenje vjetrom na užad F_{GW} funkcije su vršnog tlaka brzine $q_p(z)$, intenziteta turbulencije $I_v(z)$, koeficijenta sile vjetra $c_{wv}(z)$ i $c_{fg}(z)$ u razmatranome smjeru vjetra te pripadajućih projiciranih površina jarbola ili užadi. Referentna visina z određena je kao visina vrha razmatranog segmenta jarbola. Radi jednostavnosti može se pretpostaviti ravnomjerna raspodjela opterećenja duž užeta, pri čemu se tlak vjetra određuje za $z = 2H_i/3$ (H_i je visina *i-tog* užeta pričvršćenog na jarbol).

Uzastopna segmentno raspodijeljena opterećenja vjetrom treba primijeniti na segmente jarbola i užad [27]. Broj segmenata ovisi o broju razina užadi. Segmentno opterećenje na užetu može se rasporediti po cijeloj duljini. Tada se sile zbog segmentnih opterećenja $S_{p,Li}$ izračunavaju kao razlika između sila zbog kombiniranog djelovanja srednjeg i segmentnog vjetra te sila izazvanih samo srednjim vjetrom. Ukupni učinak segmentnog opterećenja vjetrom S_p dobiven je kombiniranjem pojedinačnih učinaka svih segmentnih opterećenja vjetrom $S_{p,Li}$:

$$S_p = \sqrt{\sum_{i=1}^N S_{p,Li}^2} \quad (1)$$

gdje je N ukupan broj slučajeva s primijenjenim segmentnim opterećenjem.

Ukupni učinak opterećenja vjetrom S_T jednak je omotaču sljedećih opterećenja:

$$S_T = S_M \pm S_p \quad (2)$$

gdje je S_M učinak srednjeg opterećenja vjetrom.

Proračun učinaka vjetra za konstrukciju s ledom sličan je onome za konstrukciju bez leda, uz promjene u konstrukcijskoj debljini i odgovarajućim koeficijentima otpora. Učinci leda i vjetra kombinirani su na dva načina:

- (dominantan vjetar (visoka vjerojatnost pojave) s pripadajućim ledom (niska vjerojatnost)
- dominantan led (visoka vjerojatnost pojave) s pripadajućim vjetrom (niska vjerojatnost).

Koeficijent k uveden u [33] smanjuje tlak vjetra na ledenoj konstrukciji za razmatranu klasu leda.

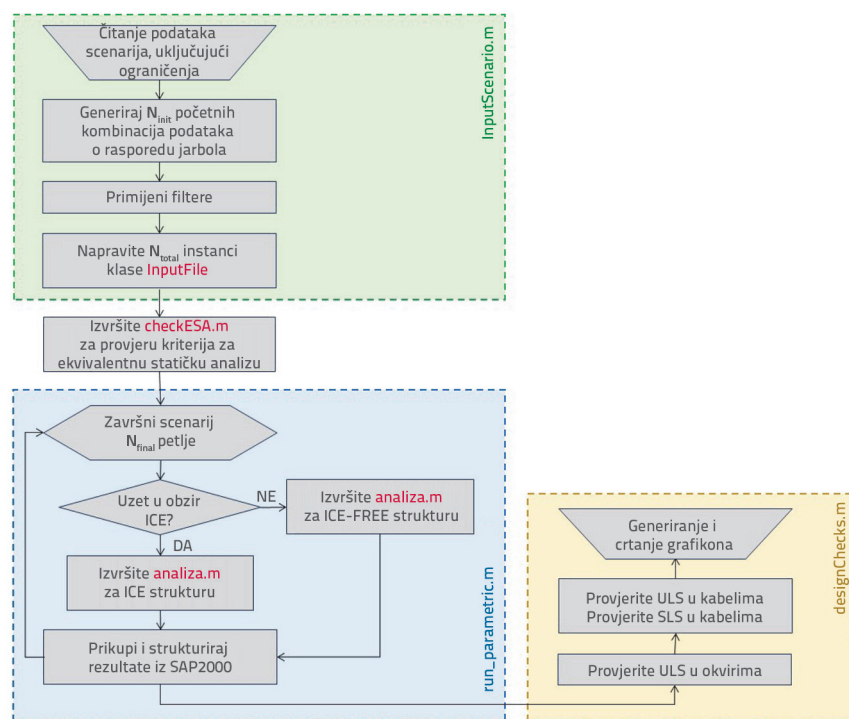
2.2. Razmatrane provjere proračuna

U fazi idejnog projektiranja, kada se donosi inženjerska odluka o rasporedu jarbola, najprije treba provesti provjere graničnog stanja nosivosti (eng. *ultimate limit state* - ULS) i stabilnosti [30] nogu jarbola na temelju sila dobivenih konstrukcijskom analizom. Zatim se provodi ULS provjera [32] zatezne užadi. Minimalna sila loma užeta F_{uk} za zateznu užad treba se odrediti na temelju odabira završetaka čelične užadi (npr. ušica [34] i stezaljki u obliku slova "U" [35]). U ovome istraživanju provjerena je stabilnost na izvijanje nogu jarbola prema [30] i poglavlju 6.3., nakon čega slijedi ULS provjera užadi prema [32] (poglavlje 6.2.). Nakon što je usvojen konstrukcijski raspored te su provjerene glavne komponente, projektiraju se sekundarni elementi jarbola (horizontalni i dijagonalni), zajedno sa spojevima prema [36] i temeljenjem prema [37], što je izvan dosega ovog istraživanja.

3. Razvoj SAP2000 OAPI-ja pomoću MATLAB-a

U ovome istraživanju u SAP2000 razmatran je ekvivalentni gredno-stupni model jarbola poduprtog zateznom užadi na različitim visinama. Središnji jarbol modeliran je pomoću prostornih okvirnih elemenata (sa šest stupnjeva slobode po čvoru), dok je užad modelirana prostornim kabelskim elementima (s ponašanjem katenare i samo na vlačna opterećenja, aksijalnom krutosti, bez savojne i posmične krutosti). Vlastite težine nogu jarbola i užadi dodijeljene su automatski, dok su dodatne vlastite težine koje proizlaze iz horizontalnih i dijagonalnih elemenata jarbola dodijeljene kao odgovarajuće raspodijeljena opterećenja. Početne sile prednaprezanja dodijeljene su užadi (napetost užeta na sidrenome bloku). Kako definiranje napetosti užeta u obrascu *Cable Geometry* ne generira silu prednaprezanja, postavljen je slučaj opterećenja ciljanom silom kako bi se postiglo željeno prednaprezanje u užadi. Opterećenje ledom izračunano je i dodijeljeno kao jednoliko raspodijeljeno gravitacijsko opterećenje, dok su srednja i segmentna opterećenja vjetrom dodijeljena kao raspodijeljeni obrasci opterećenja u razmatranim smjerovima za slučajeve s ledom i bez leda. Na kraju su sve kombinacije opterećenja prema [27] generirane kao neovisni nelinearno-statički slučajevi opterećenja (bez načela superpozicije), uzimajući u obzir konstrukcijsku krutost iz prethodnih slučajeva opterećenja i P-učinke. Konačno, usvojene su zadane postavke nelinearnog rješavača (200 koraka po fazi, 40 Newton-Raphsonovih iteracija po koraku, tolerancija = 0,0001, 10 iteracija ciljanih sila i tolerancija ciljanih sila = 0,01). To naglašava složenost određivanja optimalnog rasporeda jarbola s upetom užadi, koja dodatno raste s povećanjem ukupne visine jarbola. Zato je u jarbole više od 100 m potrebno uložiti znatan inženjerski napor već u fazi konceptualnog projektiranja kako bi se iz stotina mogućih kombinacija rasporeda odabrala optimalna varijanta. U inženjerskoj praksi ručno modeliranje najčešće vodi do dugotrajnog procesa pokušaja i pogrešaka s ponavljanjem provjerama usvojenog rasporeda. Budući da su opterećenja vjetrom izrazito ovisna o rasporedu jarbola, osobito o broju i rasporedu upete užadi, procjena alternativnih rješenja zahtijeva i kontinuirano ažuriranje analize opterećenja. Izostanak principa superpozicije dodatno otežava konceptualno projektiranje. Konačno, ručno modeliranje može dovesti do nenamjernih pogrešaka pri unosu podataka. Zbog izrazito nelinearnoga konstrukcijskog ponašanja sustava jarbola učvršćenih užadi, takve pogreške nisu uvijek lako uočljive u rezultatima analize.

Razumno rješenje jest automatizacija konstrukcijskog projektiranja pomoću *Open Application Programming Interfacea* (OAPI) razvijenog u MATLAB-u. OAPI je integriran sa SAP2000 i učinkovito provodi automatizaciju (vidi sliku 2.). Tako su generirani modeli bili istovjetni onima izrađenima ručno u grafičkom sučelju SAP2000, uključujući tipove elemenata, povezivost, rubne uvjete, definicije opterećenja i postavke analize. Konstrukcijska analiza provedena je primjenom istog rješavača SAP2000, što znači da



Slika 2. Shema tijeka automatiziranog procesa pronalaženja optimalnoga početnog rasporeda jarbola

Tablica 1. Pregled svojstava vjetroturbina u projektima vjetroelektrana u Srbiji

Vjetroelektrana	Visina osi rotora [m]	Broj turbina	Faza
Plandište [38]	151	17	spremno za izgradnju
Pupin [39]	118	16	u pogonu
Kovačica [40]	120	38	u pogonu
Kostolac [41]	114	20	probni rad
Čibuk 1 [42]	110	57	u pogonu
Čibuk 2 [43]	138	22	u izgradnji
Vetrozelena [44]	120	48	spremno za izgradnju
Crni vrh [45]	130	28	u izgradnji
Krivača [46]	105	22	u pogonu
Alibunar [47]	100	21	u pogonu
Malibunar [48]	100	4	u pogonu
Košava I [49]	110	20	u pogonu

je automatizacija zamijenila samo ručno generiranje modela, bez izmjene osnovnog postupka analize. Predloženi okvir uklanjanja pogreške pri unosu podataka generiranjem konstrukcijskih modela i analiza na dosljedan i sustavan način, čime se osigurava veća konzistentnost modeliranja.

Tijekom rada skripta "InputScenario.m" učitava ulazne podatke o geometriji jarbola, brzini vjetra, klasi leda i zadanim ograničenjima. Skripta generira N_{init} kombinacija podataka o rasporedu jarbola i filtrira ih primjenom ograničenja (detalji su navedeni u 4. poglavlju). Nakon filtriranja prihvaća se N_{total}

kombinacija, provjerava ispunjenost kriterija ekvivalentne statičke analize pomoću check ESA.m te generira N_{final} mogućih instanci klase InputFile za daljnju analizu (ta klasa pohranjuje sve podatke razmatranih scenarija).

"run_parametric.m" odgovoran je za pokretanje analize svih N_{final} kombinacija rasporeda, uzimajući u obzir i slučajeve s ledom i bez leda, te za prikupljanje i strukturiranje rezultata, dok je analysis jezgra OAPI-ja. Prvo su pozvane sve funkcije odgovorne za komunikaciju sa SAP2000, čime je omogućeno automatizirano kreiranje materijala, okvira i sajli, dodjeljivanje presjeka okvirima i sajlama, primjena opterećenja unutar definiranih obrazaca opterećenja (vlastita težina, led, ciljana sila, srednje i zakrpe vjetra) te generiranje nelinearnih slučajeva opterećenja i kombinacija opterećenja. U tu svrhu OAPI generira instance klase FrameElement, SingleCable i DoubleCable te poziva potrebne metode klase WindLoad.

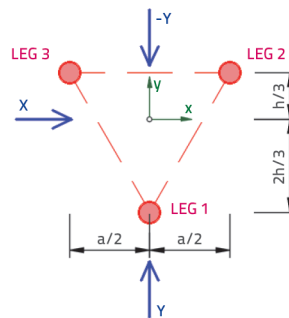
Nakon što je model generiran, "analysis.m" izvodi analizu SAP2000 za slučajeve s ledom i bez leda te na kraju poziva pomoćne funkcije za prijenos potrebnih rezultata (sile u okvirima i kabelima) iz SAP2000 u varijable MATLAB. Rezultati su procijenjeni unutar "designChecks.m" potrebnim provjerama proračuna (ULS u sidenim blokovima i kabelima tornja), a omjeri iskorištenosti U_R definirani s obzirom na odabrani razred čelika izvedeni su i korišteni za procjenu učinkovitosti razmatranog rasporeda tornja.

4. Razmatrana ispitivanja slučaja

Prvo je provedena analiza visina vjetroturbina za vjetroelektrane u Srbiji. U tablici 1. prikazane su visine turbina instaliranih na vjetroelektranama u Srbiji, koje su bile u različitim fazama razvoja. Najstarije vjetroelektrane u Srbiji pretežno su koristile turbine visine do 120 m, dok se za nekoliko nadolazećih projekata vjetroelektrana očekuje ugradnja turbina visine do 160 m. Zato su u ovome poglavlju prikazana dva ispitivanja slučaja s tornjevima visine 122 m i 164 m (CS1 i CS2, redom). Primarni cilj tih radova bio je usporediti učinkovitost različitih rasporeda tornjeva (preko stopa uporabe ULS, ukupne duljine užadi i potrebnog broja sidrenih blokova) variranjem sljedećih

ulaznih parametara: broja razina užadi, visine pričvršćenja užadi H , udaljenosti sidrenog bloka R_i i kvalitete čelika tornja (S235 – S355). Konstrukcijski parametri kao što su visina tornja, poprečni presjek tornja, raspored segmenata tornja i promjer užadi te parametri opterećenja, uključujući temeljnu brzinu vjetra, klasu leda i postotak pomoćne opreme, bili su prethodno definirani i održavani konstantnima tijekom cijelog ispitivanja (tablica 2.). Projektirana vrijednost opterećenja vjetrom izračunana je za tri karakteristična smjera vjetra, a kako je to prikazano na slici 3. Odabran je trokutasti raspored tornja jer ima niži faktor nailaska vjetra K_0 i niže koeficijente sile vjetra $c_{f,0}$ u odnosu na kvadratni raspored [27]. Razmatrana je klasa pouzdanosti 1. (toranj i jarboli izgrađeni na nenaseljenim lokacijama u otvorenome prostoru; toranj i jarboli čiji kvar vjerojatno ne bi uzrokovao ozljedu ljudi), prema [27]. Odabrani su kružni elementi nogu jer su njihovi koeficijenti otpora (tlaka) više nego dvostruko veći od onih kod ravnih elemenata. Treba napomenuti da puni kružni elementi nogu (odabrani u CS1) stvaraju niža opterećenja vjetrom na

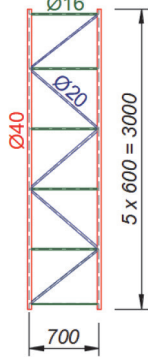
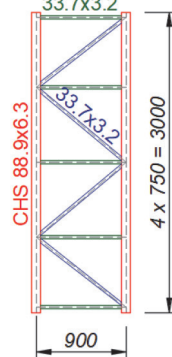
osovinu tornja i time niže tlačne sile u nogama, ali imaju i nižu otpornost na izvijanje $N_{b,Rd}$ [30] u usporedbi s kružnim šupljim profilima (CHS) odabranima u CS2.

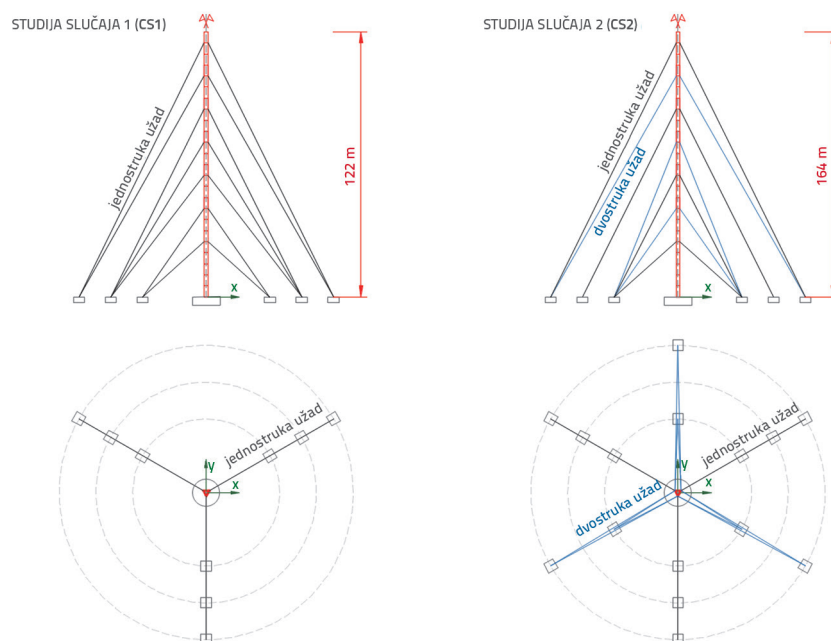


Slika 3. Razmatrani smjerovi vjetra za trokutasti raspored tornja

Za CS1 odabrana je lokacija s $v_{b,0} = 25$ m/s i klasom leda ICG-2, dok su za CS2 odabrani $v_{b,0} = 29$ m/s (maksimalno za Srbiju) i

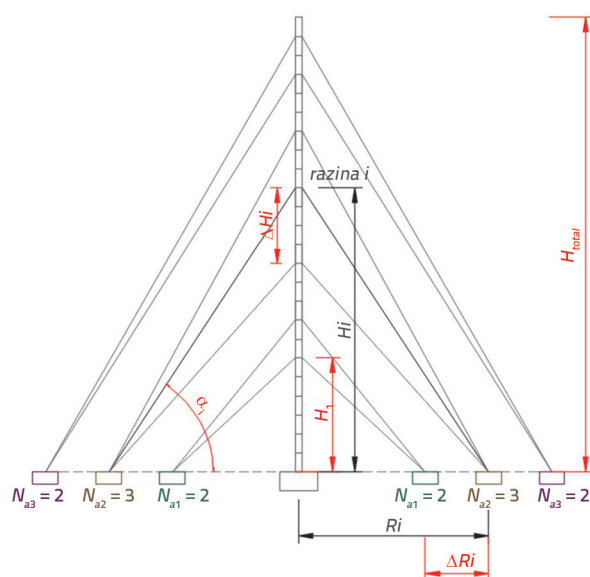
Tablica 2. Pregled ulaznih podataka za toranj i primijenjenih ograničenja u CS1 i CS2

Podaci	Svojstvo	Istraživanje 1.	Istraživanje 2.
Ulazni podaci za jarbol	Razred pouzdanosti	1	1
	Poprečni presjek jarbola i raspored segmenata		
	Promjer užeta	12 mm	14 mm
	Osnovna brzina vjetra $v_{b,0}$	25 m/s	29 m/s
	Ledna klasa	ICG – 2	ICG – 2
	Visina jarbola H_{total}	122 m	164 m
	Udio pomoćne opreme A_A/A_S	20 %	10 %
Dodijeljena ograničenja	Prva visina pričvršćenja užeta H_i	12 m	12 m
	Minimalni razmak između razina užadi $\Delta H_{i,min}$	9 m	12 m
	Maksimalni razmak između razina užadi $\Delta H_{i,max}$	15 m	15 m
	Maksimalna razlika u razmacima razina užadi $\max(\Delta H_i - \Delta H_j)$	3 m	3 m
	Minimalni broj pričvršćenja užeta po sidrenome bloku $N_{a,min}$	2	2 – jednostruko uže 1 – dvostruko uže
	Maksimalna razlika u broju užadi po sidrenome bloku $\max(N_{ai} - N_{aj})$	1	1
	Minimalni kut nagiba sajle α_{min}	30°	30°
	Maksimalni kut nagiba sajle α_{max}	70°	70°
	Minimalna udaljenost između bloka za sidrenje i stupa $R_{i,min}$	10 m	20 m
	Maksimalna udaljenost između bloka za sidrenje i stupa $R_{i,max}$	50 m	80 m
	Maksimalni razmak između susjednih blokova za sidrenje ΔR_i	20 m	20 m



Slika 4. Razmotreni rasporedi užadi

ICG-2. Iako su diskretni pomoćni elementi na konstrukciji bili gotovo zanemarivi, njihova površina A_A uzeta je kao 20 % (CS1) odnosno 10 % (CS2) konstrukcijske površine A_S u nedostatku točnijih podataka. Radi jednostavnosti, masa opreme zanemarena je.



Slika 5. Prikaz ulaznih podataka za jarbol, zadanih ograničenja i varijabilnih parametara

U oba ispitana slučaja korištena je čelična spiralna užad tipa 1 × 19 s nazivnom vlačnom čvrstoćom od 1570 N/mm², jediničnom masom $w = 830 \times 10^{-7}$ N/mm³, faktorom popunjenosti $f = 0,76$, modulom elastičnosti $EQ = 150$ GPa (140 GPa za opterećenja

s ledom) i faktorom prekidne sile $K = 0,525$, prema [32]. Što se tiče rasporeda sajli, u ovome istraživanju razmotrene su dvije opcije: tri sajle po razini (CS1) i naizmjenično tri ili šest sajli po razini (CS2) (slika 4.). Druga opcija zahtijeva dodatne blokove za sidrenje i više sajli, ali učinkovitije sprječava torziju stupa i omogućuje ravnomjerniju raspodjelu sila. Geometrija svake sajle definirana je dvjema koordinatama: razinom pričvršćenja na stupu i točkom na bloku za sidrenje. Te su koordinate podložne određenim geometrijskim i praktičnim zahtjevima te ih zato nije moguće proizvoljno birati. Promjenom rasporeda sajli sustavno se mijenjaju razmaci između razina sajli, kut nagiba sajle i vodoravna udaljenost između blokova za sidrenje i stupa, ali unutar racionalnih granica definiranih u tablici 2. Najveća visina prve točke pričvršćenja sajle bila je $H_1 = 12$ m, dok je za maksimalnu razliku

između najkraće i najduže sajle odabrana dužina od 3 m.

Što se tiče rasporeda sidrenih blokova, za jednostruku užad odabrana su minimalna dva pričvršćenja po bloku ($N_{a,min, single} = 2$), dok za dvostruku užad (CS2) nije bilo ograničenja ($N_{a,min, double} = 1$). Kako bi se osigurala relativno ravnomjerna raspodjela reakcijskih sila u sidrenim blokovima, maksimalan broj pričvršćenja užadi po bloku ograničen je na jedno više od minimalnog broja u promatranome rasporedu. Naprimjer, raspored može imati sidrene blokove s dva ili tri ili četiri odnosno četiri ili pet užadi, ali raspored s 2 do 4 užadi po bloku nije prihvatljiv. Maksimalna udaljenost između dvaju sidrenih blokova ograničena je na 20 m, dok se blokovi mogu postavljati na udaljenostima djeljivim s 10 m od središnjeg temelja radi pojednostavljenja rasporeda.

5. Rezultati i rasprava

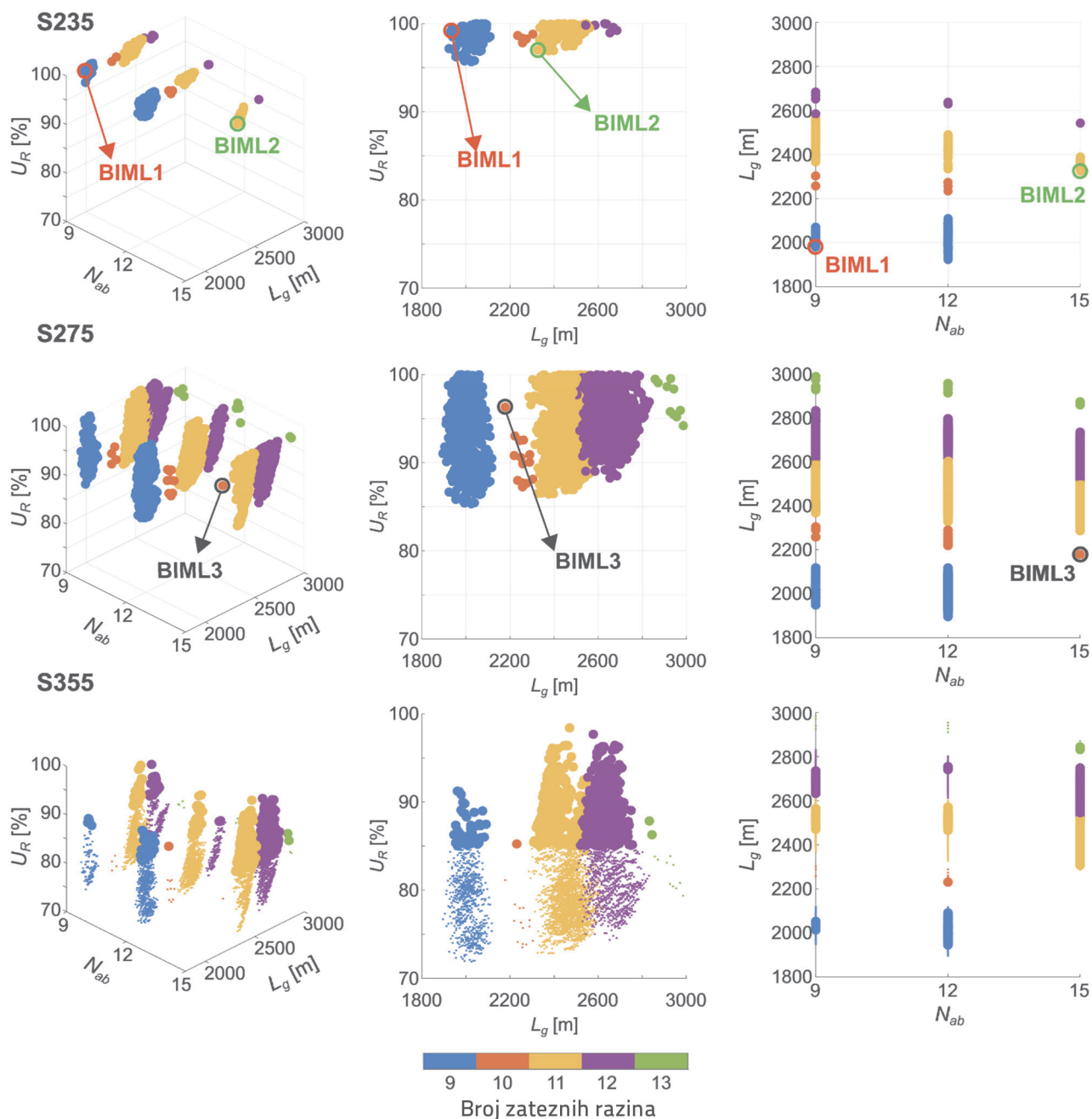
Ulazni podaci za jarbol prikazani u tablici 2. rezultirali su s $N_{init} = 167.460$ sirovih kombinacija podataka o rasporedu jarbola (CS1) odnosno $N_{init} = 750.918$ kombinacija za CS2. Naknadno je, na temelju zadanih ograničenja (vidi 4. poglavlje i tablicu 2. za detalje), automatizirani postupak filtriranja implementiran unutar OAPI-ja generirao ukupno $N_{final} = 5208$ (CS1) i $N_{final} = 2729$ (CS2) mogućih rasporeda jarbola. Pripadajući konstrukcijski modeli generirani su i izračunani pomoću OAPI-ja (slika 2.). Provedene su potrebne provjere proračuna prema ULS-u koje su primijenjene za procjenu učinkovitosti razmatranog rasporeda jarbola. Budući da kvaliteta čelika nije utjecala na rezultate analize, provjere proračuna provedene su za tri različite kvalitete čelika nakon što su rezultati analize prikupljeni. Izvedive konfiguracije koje su prošle ULS provjeru i za jarbol i za

užad prikupljene su za sve kvalitete čelika, a rezultati procjene prikazani su grafički.

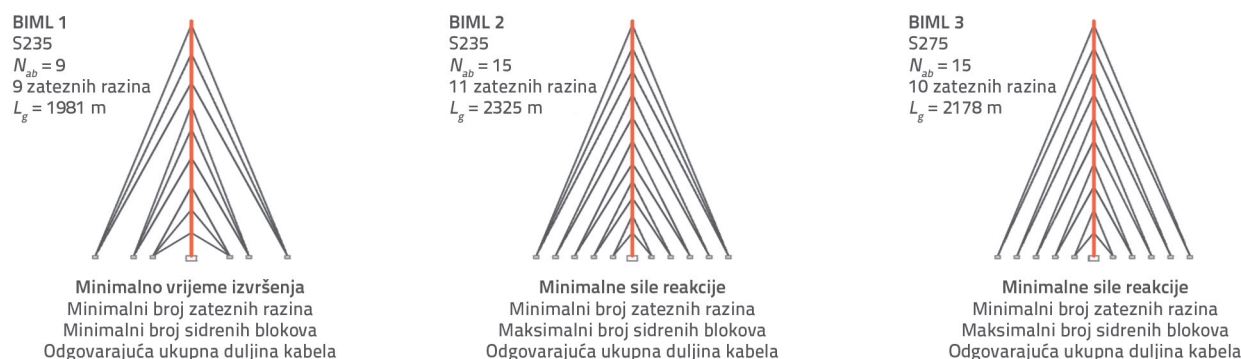
Na slici 6. prikazani su dobiveni omjeri iskorištenosti ULS-a za noge jarbola U_R za CS1, uzimajući u obzir potreban broj sidrenih blokova N_{ab} , ukupnu duljinu užadi L_g , broj razina užadi i različite kvalitete čelika. Kao što se i očekivalo, povećanjem kvalitete čelika povećao se broj izvedivih rasporeda jarbola: 373 (7 %) za S235 i 4116 (79 %) za S275 i S355; svi rasporedi (100 %) prošli su ULS provjeru proračuna. Čelik S235 osigurava relativno malu konstrukcijsku rezervu ($U_R > 95,67$ %), dok je za S275 $U_R > 85,33$

%, a za S355 $U_R > 71,88$ % (napomena: $U_R > 85$ % prikazano je podebljanim točkama radi preglednosti). Konstrukcijska rezerva znači da se početno odabrani raspored može dodatno optimirati smanjenjem i poprečnih presjeka konstrukcije jarbola i broja ljudi.

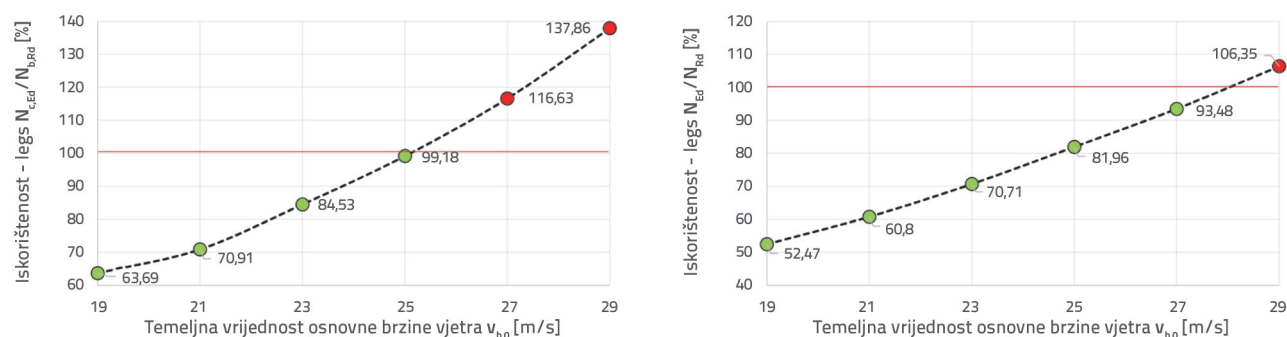
Za zadana ograničenja izvediv konstrukcijski raspored može se postići korištenjem 9, 12 ili 15 sidrenih blokova i 9 do 13 razina užadi, što rezultira ukupnom nominalnom duljinom sajli od 1924 m do 2684 m. Raspored temeljen na S235, koji minimizira vrijeme izvedbe, a koji se odlikuje smanjenjem broja



Slika 6. Omjeri iskorištenosti prema ULS-u (U_R) za CS1, uzimajući u obzir različite razrede čelika, potreban broj sidrenih blokova (N_{ab}), ukupnu duljinu sajli (L_g) i broj razina užadi



Slika 7. Najbolji početni rasporedi jarbola odabrani u CS1



Slika 8. Omjeri iskorištenosti prema ULS-u za noge jarbola (lijevo) i sajle (desno) u konfiguraciji BIML1

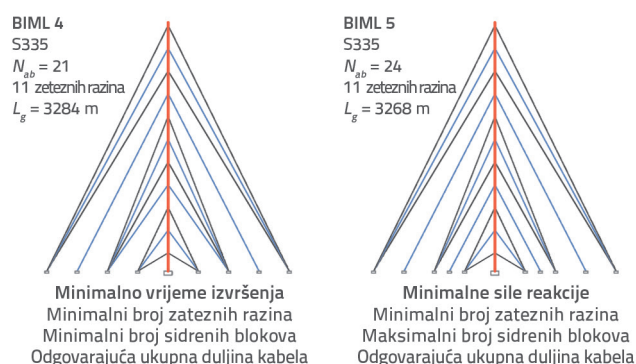
sidrenih blokova i razina užadi, može se ostvariti s velikim rasponom ukupnih duljina sajli. Raspored s minimalnim brojem sidrenih blokova (9), minimalnim brojem razina pričvršćenja (9) i odgovarajućom minimalnom ukupnom duljinom sajli (1981 m) označen je kao BIML1 (*Best Initial Mast Layout 1* (optimalni početni raspored jarbola)), što je prikazano na slici 7. Omjer iskorištenosti za BIML1 iznosio je 99,18 % (slika 6., redak 1., srednja ploča).

Manji broj sidrenih blokova doveo je do većih reakcijskih sila na svakoj temeljnoj točki, što zahtijeva dobre uvjete tla. Ako lokaciju karakteriziraju relativno loša svojstva tla, prikladniji je projekt s većim brojem sidrenih blokova (najviše 15). U takvim slučajevima najprikladniji raspored temeljen na S235 sastoji se od 11 razina užadi (čime se ponovno minimizira vrijeme izvedbe) i ukupne duljine užadi od 2325 m, a taj je raspored označen kao BIML2 (vidi slike 6. i 7. za procjenu i prikaz rasporeda).

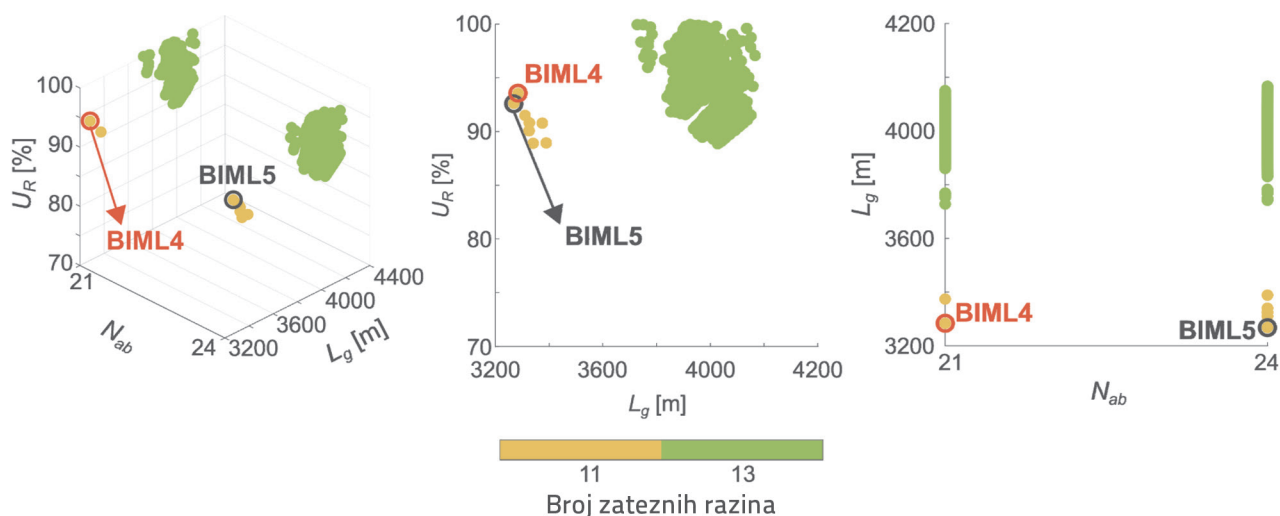
Broj razina užadi može se dodatno smanjiti na 10 (što bi blago ubrzalo izvedbu) upotrebom čelika S275, pri čemu dolazi i do blagog smanjenja ukupne duljine užadi na $L_g = 2178$ m u odnosu na BIML2 (vidi BIML3 na slikama 6. i 7.).

Konstrukcijska rezerva prikazana je procjenom utjecaja temeljne vrijednosti osnovne brzine vjetrova $v_{b,0}$ na omjere iskorištenosti nogu jarbola i užadi u konfiguraciji BIML1. Budući da je pokazano da S235 osigurava relativno nisku konstrukcijsku rezervu, odabrani raspored nije primjenjiv na lokacijama s većim brzinama vjetrova, što je prikazano na slici 8, a $v_{b,0} = 25$ m/s predstavlja gornju granicu za odabrani raspored jarbola unutar CS1.

Na kraju, CS1 ponovljen je s povećanom osnovnom brzinom vjetrova $v_{b,0} = 29$ m/s. Analiza je pokazala da nijedan raspored ne može zadovoljiti ULS provjeru iskorištenosti za odabranu geometriju jarbola, promjer užeta od 12 mm i zadana ograničenja. Daljnja analiza pokazala je da je $v_{b,0} = 28$ m/s gornja granica za odabrani raspored jarbola u CS1 (tablica 2.).

Slika 9. Omjeri iskorištenosti ULS-a (U_R) za CS2, uzimajući u obzir potreban broj sidrenih blokova (N_{ab}), ukupnu duljinu sajli (L_g) i broj razina užadi, za S355

Na slici 9. prikazani su rezultati evaluacije za CS2. Budući da su postavljene veće vrijednosti $v_{b,0}$ i H_{total} , samo je S355 omogućio uspješnu ULS provjeru proračuna, s 1036 izvedivih rasporeda (38,0 %). Kako je preliminarno istraživanje pokazalo da su sajle



Slika 10. Najbolji početni rasporedi jarbola odabrani u CS2 (crno – pojedinačna užad, plavo – dvostruka užad)

promjera 12 mm neadekvatne za razmatrane vrijednosti $v_{b,0}$ i H_{total} u CS2 korištene su jednostruke i dvostruke sajle promjera 14 mm (vidi tablicu 2.). Na slici 9. također je pokazano da je konstrukcijska rezerva relativno mala ($U_R > 88,86\%$), pa je moguće samo ograničeno smanjenje poprečnih presjeka konstrukcije jarbola.

Za zadana ograničenja izvediv konstrukcijski raspored može se postići upotrebom 21 ili 24 sidrena bloka te 11 ili 13 razina užadi, što rezultira ukupnom nominalnom duljinom sajli od 3268 m do 4166 m. Minimalan broj sidrenih blokova (21), minimalan broj razina užadi (11) i odgovarajuća minimalna ukupna duljina sajli od 3284 m postižu se rasporedom jarbola 4 (BIML4), kao što je to prikazano na slikama 9. i 10. Niže reakcijske sile u sidrenim blokovima mogu se postići upotrebom 24 sidrena bloka u kombinaciji s 11 razina jarbola, što rezultira ukupnom duljinom od 3268 m (vidi BIML5 na slikama 9. i 10.).

6. Zaključak

Modeliranje visokih jarbola učvršćenih užadi po svojoj je prirodi izazovno. Primjena ekvivalentne statičke analize i pojednostavljenog modela jarbola greda-stup, umjesto potpune nelinearne dinamičke analize i detaljnoga rešetkastog modela, znatno pojednostavljuje modeliranja tih konstrukcija. Ipak, velik broj užadi, širok raspon slučajeva opterećenja i njihova međusobna ovisnost i dalje zahtijevaju znatno vrijeme i trud u ranim fazama projektiranja.

Prikazan je izvorni MATLAB programski okvir koji automatizira taj proces. Okvir omogućuje automatizirano modeliranje i analizu metodom konačnih elemenata u računalnom programu SAP2000 putem OAPI-ja te provjere iskorištenosti čelične konstrukcije potrebne za konstrukcijski proračun visokih anemometrijskih jarbola učvršćenih užadi. Konstrukcija jarbola modelirana je pomoću ekvivalentnog modela greda-stup i svih relevantnih scenarija opterećenja, uključujući slučajeve s ledom i bez leda. OAPI učitava ulazne podatke o geometriji jarbola, brzini vjetrova, klasi leda i zadanim ograničenjima, generira moguće kombinacije podataka

o rasporedu jarbola, filtrira ih primjenom ograničenja te provjerava ispunjenost kriterija ekvivalentne statičke analize. Potom OAPI analizira sve izvedive kombinacije rasporeda, prikuplja i strukturira rezultate te ih evaluira kroz potrebne provjere proračuna.

Učinkovitost razvijenog OAPI okvira prikazana je na dva primjera iz prakse koja uključuju jarbole učvršćene užadi visine 122 m i 164 m (CS1 i CS2). U tim slučajevima ispitane su varijacije u rasporedu sajli te su identificirane najprikladnije konfiguracije za zadane projektne uvjete. Vrijeme izvedbe konstrukcije jarbola učvršćenog užadi usko je povezano s brojem razina pričvršćenja i sidrenih blokova. Zato se najučinkovitija izvedba postiže kada su oba parametra minimizirana. Ovo istraživanje ističe prednosti automatizacije projektiranja analitički složenih konstrukcija poput jarbola učvršćenih užadi. Predloženi okvir omogućuje istraživanje i evaluaciju brojnih mogućih konfiguracija, čime inženjerima omogućuje identifikaciju najprikladnijih rješenja za daljnje faze projektiranja. Dosad je razvijen okvir obuhvaćao varijacije u rasporedu užadi. Budući rad trebao bi proširiti ovaj pristup uključivanjem dodatnih ulaznih parametara poput promjera užadi i geometrije jarbola (npr. razmak nogu i dimenzije poprečnog presjeka). Uključivanje kompletnog seta provjera proračuna potrebnih za svaku konfiguraciju omogućuje potpuno automatiziran proces projektiranja.

Razvijeni okvir temelji se na aktualnoj generaciji eurokodovih normi, ali se može jednostavno prilagoditi nadolazećoj drugoj generaciji eurokoda. Druga generacija uključivat će EN 1991-1-9: atmosfersko zaleđivanje konstrukcija, koji je baziran na trenutno primijenjenome ISO standardu [33]. Osim toga SRPS EN 1993-3-1 [27] i SRPS EN 1993-3-2 [50] bit će objedinjeni, ali pristup analizi jarbola učvršćenih užadi ostat će nepromijenjen te će biti osigurana dugoročna uporabljivost alata.

Zahvala

Ovo istraživanje financijski je podržalo Ministarstvo znanosti, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije u sklopu Projekta 200092.

LITERATURA

- [1] Balkan Green Energy News, <https://balkangreenenergynews.com/western-balkans-have-as-many-prospective-solar-wind-projects-as-germany>, 28.12.2025.
- [2] Nielsen, M.G., Støttrup-Andersen, U.: Design of guyed masts, 2nd Latin American Symposium on Tension Structures, Caracas, 2005.
- [3] Marjanović, M., Milojević, M., Jočković, M.: Important aspects in design of anemometric steel masts in the Republic of Serbia, Proceedings of the 16th Congress hosted by Association of Structural Engineers of Serbia, Arandelovac, Serbia, (2022), pp. 492–503.
- [4] Jiang, W.Q., Wang, Z.Q., McClure, G., Wang, G.L., Geng, J.D.: Accurate modeling of joint effects in lattice transmission towers, Engineering Structures, 33 (2011) 5, pp. 1817–1827.
- [5] Zhuge, Y., Mills, J.E., Ma, X.: Modelling of steel lattice tower angle legs reinforced for increased load capacity, Engineering Structures, 43 (2012), pp. 160–168.
- [6] Erdem, R.T.: Analysis of guyed steel lattice mast subjected to environmental loads, GRAĐEVINAR, 67 (2015) 7, pp. 681–689, <https://doi.org/10.14256/JCE.1181.2014>
- [7] Jayaraman, H.B., Knudson, W.C.: A curved element for the analysis of cable structures, Computers & Structures, 14 (1981) 3–4, pp. 325–333.
- [8] Thai, H.T., Kim, S.E.: nonlinear static and dynamic analysis of cable structures, Finite Elements in Analysis and Design, 47 (2011), pp. 237–246.
- [9] Ahmad Abad, M.S., Shooshtari, A., Esmaili, V., Riabi, A.N.: Nonlinear analysis of cable structures under general loadings, Finite Elements in Analysis and Design, 73 (2013), pp. 11–19.
- [10] Choi, D.H., Gwon, S.G., Nassif, H.: Three-dimensional parabolic cable element for cable-supported structures, IAB SE Symposium Report, 102 (2014) 39, pp. 411–414.
- [11] Coarita, E., Flores, L.: Nonlinear Analysis of Structures Cable – Truss, IACSIT International Journal of Engineering and Technology, 7 (2015) 3, pp. 160–169.
- [12] Shi, H., Salim, H.: Geometric nonlinear static and dynamic analysis of guyed towers using fully nonlinear element formulations, Engineering Structures, 99 (2015), pp. 492–501.
- [13] Madugula, M., Wahba, Y., Monforton, G.: Dynamic response of guyed masts, Engineering Structures, 20 (1998) 12, pp. 1097–1101.
- [14] Wahba, Y., Madugula, M., Monforton, G.: Effect of icing on the free vibration of guyed antenna towers, Atmospheric Research, 46 (1998), pp. 27–35.
- [15] Matuszkiewicz, M.: Calculation of guyed masts in accordance with EN 1993-3-1 standard taking into account mast shaft geometrical imperfections, Engineering Structures, 33 (2011), 2044–2048.
- [16] SAP2000, Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures Basic Analysis Reference Manual, Computers and Structures Inc. Berkeley, 1995.
- [17] Belavičius, R., Jatulis, D., Šešok, D.: Some insights on the optimal schemes of tall guyed mast. Journal of Civil Engineering and Management, 19 (2013) 5, pp. 749–758.
- [18] Bell, L.C., Brown, D.M.: Guyed Tower Optimization, Computers & Structures, 6 (1976), 447–450.
- [19] Belavičius, R., Jatulis, D., Šešok, D.: Optimization of tall guyed masts using genetic algorithm, Engineering structures, 56 (2013), 239–245.
- [20] Belavičius, R., Jatulis, D., Rusakevičius, D.: Optimal Schemes of Tall Pinned Masts, KSCE Journal of Civil Engineering, 28 (2024) 2, pp. 904–915.
- [21] Cheng, J., Shi, T.: Structural optimization of transmission line tower based on improved fruit fly optimization algorithm, Computers and Electrical Engineering, 103 (2022), Paper No. 108320.
- [22] Couceiro, I., París, J., Martínez, S., Colominas, I., Navarrina, F., Casteleiro, M.: Structural optimization of lattice steel transmission towers, Engineering Structures, 117 (2016), pp. 274–286.
- [23] MathWorks: MATLAB Documentation, The MathWorks Inc., Natick, MA, 2025.
- [24] Cucuzza, R., Rosso, M.M., Aloisio, A., Melchiorre, J., Giudice, M.L., Marano, G.C.: Size and Shape Optimization of a Guyed Mast Structure under Wind, Ice and Seismic Loading, Applied Sciences, 12 (2022), Paper No. 4875.
- [25] CNR – Consiglio Nazionale delle Ricerche: Istruzioni per la valutazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni, CNR-DT 207/2008, Rim, 2008.
- [26] Institute for Standardization of Serbia: SRPS EN 1993-3-1: Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 3-1: Towers, masts and chimneys – Towers and masts, Belgrade, 2012.
- [27] Institute for Standardization of Serbia: SRPS EN 1990: Eurocode – Basis of structural design, Belgrade, 2012.
- [28] Institute for Standardization of Serbia: SRPS EN 1991-1-4: Eurocode 1 – Actions on structures – Part 1-4: Wind actions, Belgrade, 2012.
- [29] Institute for Standardization of Serbia: SRPS EN 1993-1-1: Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-1: General rules, Belgrade, 2012.
- [30] Institute for Standardization of Serbia: SRPS EN 12385-4: Steel wire ropes – Safety – Part 4: Stranded ropes for general lifting applications, Belgrade, 2009.
- [31] Institute for Standardization of Serbia: SRPS EN 1993-1-11: Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-11: Tension components, Belgrade, 2012.
- [32] ISO: ISO 12494: Atmospheric icing of structures, International Organization for Standardization, Geneva, 2017.
- [33] Institute for Standardization of Serbia: SRPS EN 13411-1: Terminations for steel wire ropes – Safety – Part 1: Thimbles for steel wire rope slings, Belgrade, 2009.
- [34] Institute for Standardization of Serbia: SRPS EN 13411-5: Terminations for steel wire ropes – Safety – Part 5: U-bolt wire rope grips, Belgrade, 2012.
- [35] Institute for Standardization of Serbia: SRPS EN 1993-1-8: Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints, Belgrade, 2012.
- [36] Institute for Standardization of Serbia: SRPS EN 1997-1: Eurocode 7 – Geotechnical design – Part 1: General rules, Belgrade, 2010.
- [37] Wind Park Plandiste, <https://wpp.rs>, 29.12.2025.
- [38] Wind Park Pupin, <https://vppupin.rs>, 29.12.2025.
- [39] Wind Park Kovačica, <https://www.vpkovacica.rs/vetropark-kovacica>, 29.12.2025.

- [40] Wind Park Kostolac, <https://www.prangl.com/projects/kostolac-wind-farm>, 29.12.2025.
- [41] A Tesla Wind Company, <https://www.teslawind.rs/en>, 29.12.2025.
- [42] Wind Park Čibuk 2, <https://cibuk2.rs>, 29.12.2025.
- [43] Wind Park Vetrozelena, <https://vetrozelena.com>, 29.12.2025.
- [44] EL&MI Group, Wind Park Crni vrh, <https://elmigroup.rs/en/energetika/crni-vrh-wind-farm>, 29.12.2025.
- [45] MK Group, Wind Park Krivača, <https://mkgroup.rs/en/projects/krivaca-wind-park>, 29.12.2025.
- [46] Elicio, VP Alibunar, <https://elicio.rs/en/wf-alibunar>, 29.12.2025.
- [47] Elicio, VP Malibunar, <https://elicio.rs/projekat-malibunar>, 29.12.2025.
- [48] Fintel Energija AD, <https://www.fintelenergija.rs/en>, 29.12.2025.
- [49] Institute for Standardization of Serbia: SRPS EN 1993-3-2: Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 3-2: Towers, masts and chimneys – Chimneys, Belgrade, 2012.