

Stakleno aluminijske fasade – izbor prikladnog konstrukcijskog sustava fasade na primjeru prostorne drvene konstrukcije

Curtain wall façade – choice of appropriate structural façade's system obtained on example of spatial timber structure

Jagoda Cupac^{*}, Nebojša Buljan^{*}, Adriana Bjelanović⁺

^{}RI-ISA d.o.o. (Permasteelisa group)*

E-mail: jcupac@permasteelisagroup.com; nbuljan@permasteelisagroup.com

⁺Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci

E-mail: adriana.bjelanovic@gradri.hr

Sažetak. Na primjeru prostorne drvene konstrukcije izložbene dvorane, u radu je prikazana analiza prikladnosti izbora sustava stakleno aluminijske fasade. Rad je zasnovan na projektu izrađenom u okviru diplomskog rada i u njemu će se prezentirati osnovni dijelovi analiza mehaničke otpornosti i stabilnosti provedenih za glavnu nosivu konstrukciju i dva sustava stakleno aluminijskih fasada. Motivacija za izradu diplomskog rada i prezentacije najvažnijih mu dijelova u ovom radu jest na konkretnom primjeru i podržano proračunom, dati pregled važnih činitelja otpornosti i stabilnosti prostornih sustava i različitih sustava stakleno aluminijskih fasada te iznijeti zaključke bitne za razumijevanje međudjelovanja glavne nosive konstrukcije i njene vanjske ovojnice. Glavna nosiva konstrukcija je prostorni sustav trozglobnih lameliranih lukova oslonjen na raščlanjene čelične stupove i stabiliziran sustavom čeličnih dijelova i elemenata, a proračunske analize glavne nosive konstrukcije provedene za sve njene elemente, dijelove i priključke, podržane su statičkim analizama štapnih modela i usklađene s europskim normama. Analize mehaničke otpornosti i stabilnosti provedene su i za sustave stakleno aluminijskih fasada: “stick“ sustav uzdužnih stijena od aluminijskih profila i mehanički pričvršćenog stakla, te složen i estetski izazovniji ovješeni sustav s prednapetim zategama izabran za zidove zabata. Predmet analize i zaključaka o izboru pogodnog sustava jest odgovor glavne nosive konstrukcije, odnosno posljedice unosa sila iz vanjske ovojnice na njenu krutost i stabilnost.

Ključne riječi: analize FE modela, europske norme, lijepljeno lamelirano drvo, mehanička otpornost i stabilnost, prostorna glavna nosiva konstrukcija, sustavi stakleno aluminijskih fasada, priključci

Abstract. This paper presents an analysis of a suitable façade system for a spatial timber structure. It is based on a master's thesis project and will show structural analysis of resistance and stability of the main bearing structure and two curtain wall façade systems. The purpose of the thesis and this paper is to give an overview of the main factors which affect mechanical resistance and stability of spatial structures and different façade systems, based on structural calculations for specific project, and to give conclusions important for understanding the interaction of main bearing structure and its outer envelope. The main bearing structure is a spatial system consisting of glulam arches supported by steel columns and stabilized with a system of spatially arranged steel elements. Analysis was conducted for all elements, parts and joints representative for the main spatial structure. The verifications were done according to appropriate European standards and supported with FEM analysis. Both structural systems of curtain wall façades were analyzed: a stick system with standard aluminium profiles and mechanically fixed glass was chosen for the longitudinal envelope; whilst the second façade is a more challenging suspended system with pre-tensioned cables and point fixed glass. Conclusions about the suitability of each façade system are based on the response of the main bearing structure and the influence that forces transferred from the envelope have on the structure's stiffness and stability.

Key words: analysis of FE models, Eurocodes, Glued laminated timber, mechanical resistance and stability, spatial main bearing structure, structural systems of curtain wall façades, detailing.

1 Uvod

Projektiranje konstrukcije je zahtjevan postupak kojem treba pristupiti s najvećom ozbiljnošću želi li se suradnjom arhitekata i konstruktora različitih specijalnosti postići cjelovito rješenje čija je estetika prepoznatljiva, a svojstva nosivosti i uporabljivosti udovoljavaju zahtjevima sigurnosti i namjene. Cilj je ovog rada prikazati to na primjeru projekta izložbene dvorane s prostornom drvenom konstrukcijom i stakleno-aluminijskim fasadama. Iako suvremene forme i tehnološka rješenja nalažu da konstrukcija stakleno-aluminijske fasade mora biti sastavni dio cjelovitog projektnog rješenja konstrukcije, nisu rijetki primjeri zanemarivanja značaja koji na sigurnost i uporabljivost glavne nosive konstrukcije imaju ne samo izvedba, nego i sam izbor konstrukcijskog sustava fasade koji zamjenjuje vanjske zidove. Staklo je važan element vanjskih opni; činitelj je vizualnog (tekstura i boja) i fizikalnog identiteta (razmjena topline, svjetlosti i zvuka s okolinom) prenoseći istovremeno glavninu opterećenja (npr.

vjetar) na nosivi aluminijski sustav koji je nositelj svojstava čvrstoće i krutosti fasade i onaj je sustav preko kojeg se opterećenje na vanjsku ovojnici predaje glavnoj konstrukciji. Na primjeru projekta izložbene dvorane razmatrala su se dva različita rješenja konstrukcijskog sustava fasade i analizirali učinci njihova izbora na ponašanje glavne nosive konstrukcije (slika 1). Za izvedbu uzdužnih fasadnih stijena odabran je “stick“ sustav s okvirima od vijcima spojenih ekstrudiranih aluminijskih profila i naknadno pričvršćenom (četverostrano oslonjenom) ispunom od stakla. Za zabatne je stijene analizirana primjena manje standardnog rješenja fasade ovješene na prednapete zatege i s točkasto oslonjenim staklima. Analiza prikladnosti izbora konstrukcijskog rješenja zasnovana je na posljedicama koje će na otpornost i krutost relativno “mekane“ drvene konstrukcije imati unos sila iz projektiranih vanjskih ovojnica pri čemu je za ocjenu međuovisnosti posebno zanimljiv složeni sustav ovješene fasade..



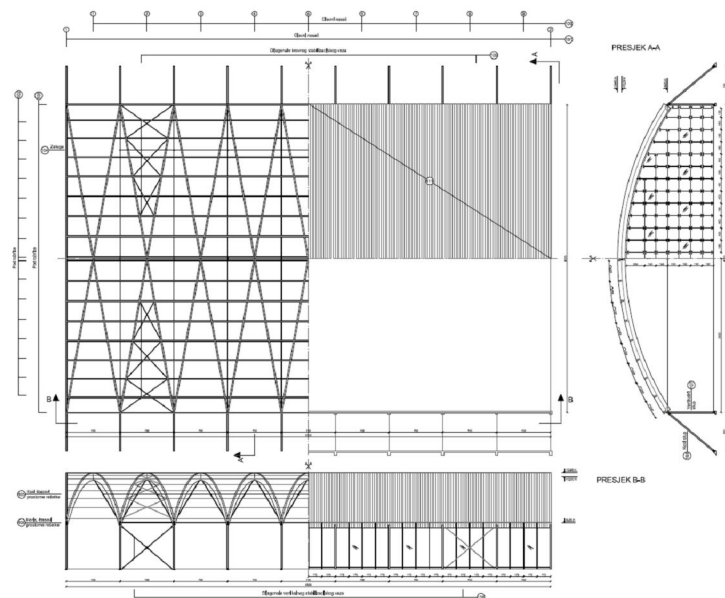
Slika 1: Vizualizacije prostorne drvene konstrukcije s čeličnim stupovima i sustava stakleno-aluminijskih fasada izložbene hale – prikazi unutrašnjeg i vanjskog izgleda

2 Projektno rješenje glavne nosive konstrukcije

2.1 Osnovni tehnički podaci i opis nosivog koncepta glavne konstrukcije

Izložbena dvorana smještena je u prigradskom području grada Zagreba na nadmorskoj visini od 100 m. Osnih je tlocrtnih dimenzija 40 x 63 m, a visina u sljemenu iznosi 12,5 m. Iz dispozicijskog je nacрта (slika 2) vidljiva podjela na 9 polja s 10 glavnih poprečnih osi (oslanjanje na stupove) na rasteru od 7,0 m. Glavnu nosivu konstrukciju čine prostorno raspoređeni trozglobni lamelirani lukovi s čeličnim zategama, lamelirana sekundarna konstrukcija (podrožnice) i raščlanjeni čelični stupovi kao oslonci krovne konstrukcije koja je horizontalno stabilizirana spregovima s čeličnom X-ispunom i uzdužnom čeličnom rešetkom s V-ispunom (slike 1 i 2). Pokrov krovne konstrukcije su Trimoterm SNV 120 čelični paneli. Zbog pretpostavke o negrijanosti objekta, drvena konstrukcija je razvrstana u razred uporabe 2 s prosječnim sadržajem vlage drva koji ne prelazi 20%. Trozglobni lučni sustav glavnih krovnih lameliranih nosača dijagonalno se oslanja na čelične stupove na rasponu 40,61 m (slika 2). Križno postavljeni polulukovi (ukupno devet X-sustava s po četiri poluluka povezana u tjemenu)

imaju čelične zatege koje aktiviraju početni pomaci konstrukcije, postavljene u smjeru glavnih poprečnih osi. Zabatni glavni nosači krovne konstrukcije su dvozglojni lamelirani lukovi raspona 40 m bez zatega. Strelica lukova je 6,0 m. Prostorni čelični rešetkasti sustav dodan je zbog stabilizacije konstrukcije u uzdužnom smjeru, odnosno smanjivanja prekomjernih pomaka na prihvatljive granice. V-ispuna rešetkastog sustava (od šupljih čeličnih okruglih cijevi) je na gornjim krajevima priključena u tjeme (zglobni priključak polulukova), a na donjim se priključuje na zatege povezane horizontalnim elementima. Zahtjeve horizontalne stabilnosti na djelovanja okomita na glavnu ravninu prostorne nosive konstrukcije zadovoljila su dva krovna rešetkasta sprega oslonjena na vertikalne uzdužne spregove s X- ispunom od “mekih“ dijagonala (slika 2).



Slika 2: Dispozicijski nacrt glavne nosive konstrukcije: tlocrt, presjeci i pogledi [1]

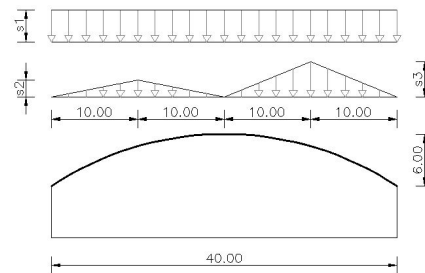
2.2 Analiza djelovanja

Modeli djelovanja i karakteristične vrijednosti opterećenja snijegom i vjetrom usvojeni su prema Eurokod normama EN 1991-1-3 [3] i EN 1991-1-4 [4] i tada dostupnim Nacionalnim dodacima za odgovarajuće dijelove (HRN) prednormi. Proračunske su kombinacije određene prema normi EN 1990:2002 [2] i prilagođene proračunu drvene konstrukcije prema prednormi DIN ENV 1052:2000 [5]. Iako je zamišljena lokacija konstrukcije smještena u RH, ovdje i u dalje navedene su nam norme bile jedini dostupni publicirani Eurokodovi (u vrijeme izrade diplomskog rada odgovarajuće HRN EN norme razlikovale su

se samo po hrvatskom prijevodu naslova i područja primjene). Karakteristična vrijednost stalnog djelovanja na krovnu konstrukciju u proračunu je usvojena s $G_k = 0,45 \text{ kN/m}^2$, gde je osim opterećenja pokrovnih panela Trimotrem SNV $d/D = 120/157 \text{ mm}$ ($0,26 \text{ kN/m}^2$, prema tehničkim podacima proizvođača) uzet u obzir i doprinos metalnog spojnog pribora i instalacija. S obzirom da je proračun modela prostorne glavne nosive konstrukcije sa štapnim konačnim elementima (KE) proveden u računalnom programu *Autodesk Robot Structural Analysis 2011*, doprinos vlastite težine ukupnoj vrijednosti stalnog opterećenja pribrojen je naredbom programa i definiranjem svojstava materijala i presjeka.

2.2.1 Promjenjivo opterećenje snijegom

Karakteristično opterećenje snijegom na tlu za I. zonu i nadmorsku visinu $NMV = 100 \text{ m}$ iznosi $s_k = 1,09 \text{ kN/m}^2$. Usvojene vrijednosti faktora izloženosti C_e i toplinskog faktora C_t su $C_e = 1$ i $C_t = 1$. Za model raspodjele opterećenja u skladu s [3] i geometriju valjkastog krova s $h/b = 6/40 \text{ m}$ (slika 3), faktori oblika su $\mu_1 = 0,8$ i $\mu_2 = 1,7$. Karakteristična opterećenja snijegom kratkog trajanja za simetričnu raspodjelu tada iznose $s_{1,k} = s_1 = 0,872 \text{ kN/m}^2$, dok su za nesimetričnu raspodjelu $s_{2,k} = s_2 = 0,927 \text{ kN/m}^2$ i $s_{3,k} = s_3 = 1,853 \text{ kN/m}^2$ [1].

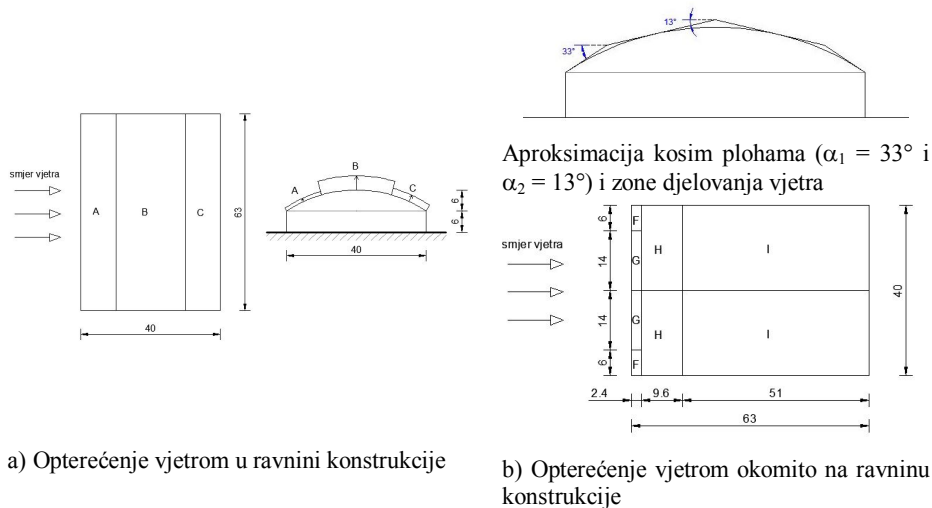


Slika 3: Modeli raspodjele opterećenja snijegom za geometriju valjkastog krova [1]

2.2.2 Promjenjivo opterećenje vjetrom

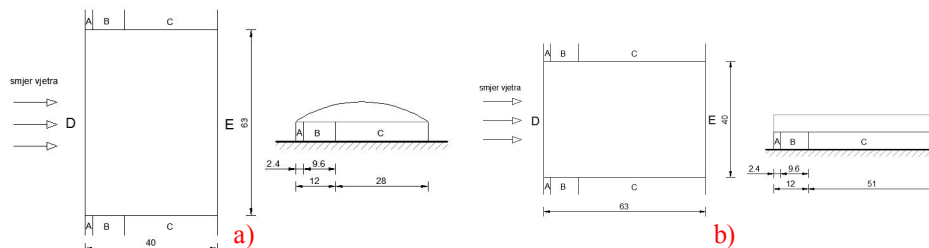
Referentna brzina vjetra $v_{ref} = 24,2 \text{ m/s}$ određena je poznatim izrazima [4] na osnovi poredbene (osnovne) brzine vjetra $v_{ref,0} = 22 \text{ m/s}$ za I. zonu vjetra, vrijednosti faktora smjera vjetra, $C_{DIR} = 1$, faktora utjecaja godišnjeg doba $C_{TEM} = 1$ i faktora nadmorske visine $C_{ALT} = 1,1$. Referentni pritisak vjetra proračunan za gustoću zraka $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ i referentnu brzinu v_{ref} jest $q_{ref} = 0,366 \text{ kN/m}^2$. Faktori izloženosti $c_{e(z)}$ za kategoriju terena III. i zone $z_{e,1} = 6 \text{ m}$ i $z_{e,2} = 12 \text{ m}$ iznose $c_{e(z1)} = 1,389$ i $c_{e(z2)} = 1,829$ [1]. Faktori vanjskog pritiska za poprečni smjer vjetra na krov i duljinu okomitu na smjer vjetra, $b = 63,0 \text{ m}$ za omjere $f/d = 6/40 = 0,15$ i $h/d = 6/40 = 0,15$ (proračunska visina $z_{e,2} = 12 \text{ m}$) su $C_{pe,10(A1)} = -0,185$, $C_{pe,10(B1)} = -0,85$ i $C_{pe,10(C1)} = -0,4$. (oznake zona su prema tablicama 1 i

2 i u skladu sa slikom 4.a). Faktori vanjskog pritiska za uzdužni smjer vjetra na krov i duljinu okomitu na smjer vjetra, $b = 40,0$ m određeni su za zamjenski model raspodjele opterećenja vjetrom i zone prikazane na slici 4.b.



Slika 4: Modeli raspodjele djelovanja vjetra na valjkasti krov – a) poprečni smjer vjetra i b) uzdužni smjer vjetra

Provedena je i analiza opterećenja vjetrom na vertikalne stijene, a modeli i zone raspodjele opterećenja prikazani su na slici 5. Faktori vanjskog pritiska za poprečni smjer vjetra na vertikalne stijene proračunani su za omjer $h/d = 6/40 = 0,15$ i ploštinu zida $A_T = 378$ m² i iznose $C_{pe,10(A)} = -1,2$, $C_{pe,10(B)} = -0,8$, $C_{pe,10(C)} = -0,5$, $C_{pe,10(D)} = -0,7$ i $C_{pe,10(E)} = -0,3$.



Slika 5: Model raspodjele djelovanja vjetra na vertikalne zidove – a) poprečni smjer i b) uzdužni smjer

Faktori vanjskog pritiska za uzdužni smjer vjetra na vertikalne stijene, proračunani za omjere $h/d = 6/63 = 0,1$ i ploštinu stijene $A_L = 240$ m² (slika 5.b), jednaki su faktorima vanjskog pritiska za poprečni smjer vjetra. Faktori unutrašnjeg pritiska vjetra su $C_{pi} = -0,2$ i $C_{pi} = +0,3$ [4]. Rezultantni pritisci

vjetra navedeni su u Tablicama 1 i 2 (oznake zona su prema slici 5). Postupak proračuna pritiska vjetra proveden je u skladu s [4] i detaljno prikazan u [1].

Tablica 1: Rezultantni utjecaj poprečnog vjetra w_e^T i pritiska vjetra iznutra w_i u kPa [1]

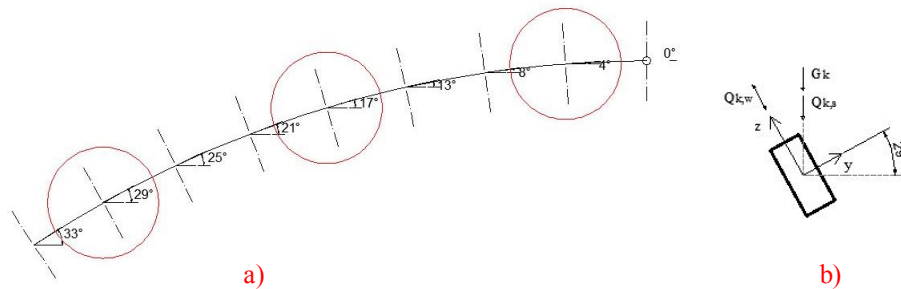
Zona	A	B	C	D	E	A1	B1	C1
$w_e^T - w_i^+$	-0,712	-0,509	-0,356	0,254	-0,255	-0,258	-0,703	-0,402
$w_e^T - w_i^-$	-0,457	-0,254	-0,101	0,509	0	0,077	-0,368	-0,067

Tablica 2: Rezultantni utjecaj uzdužnog vjetra w_e^L i pritiska vjetra iznutra w_i u kPa [1]

Zona	A	B	C	D	E	F	G	H	I
$w_e^L - w_i^+$	-0,712	-0,509	-0,356	0,254	-0,255	-0,871	-1,071	-0,683	-0,469
$w_e^L - w_i^-$	-0,457	-0,254	-0,101	0,509	0	-0,536	-0,736	-0,348	-0,134

2.3 Sekundarna konstrukcija lameliranog krova

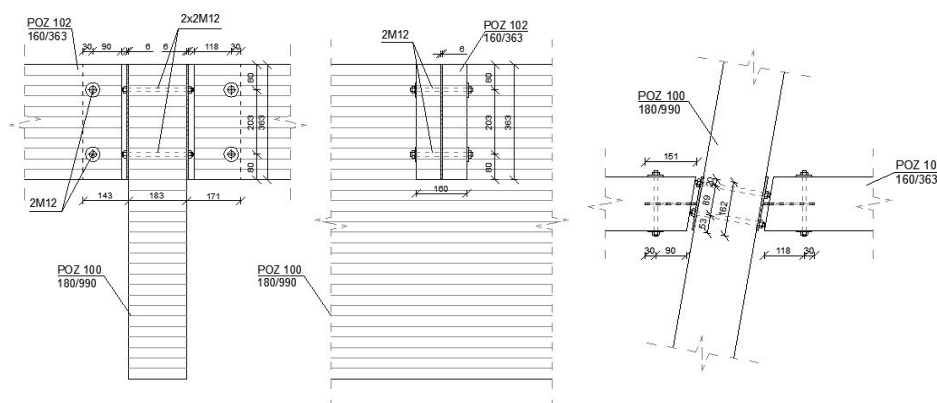
Zbog valjkastog oblika krova dispozicija področnica prati promjenu nagiba glavnih nosača od 0° do 33° (slika 6). Proračun področnica proveden je za tri karakteristična kuta nagiba, 29° , 17° i 4° (slika 6.a)). Mjerodavan za dimenzioniranje na kombinaciju stalnog (G_k) i dva promjenjiva djelovanja ($Q_{k,s}$ i $Q_{k,w}$) je koso savijani presjek najopterećenije področnice (slika 6.b) duljine 6,21 m. Priključak upuštanjem na gornji rub glavnih nosača (slike 2 i 7) uzrok je promjenjive duljine področnica raspoređenih na rasteru $e = 2,65$ m. Provjere graničnih stanja zadovoljava presjek $b/h = 160/363$ mm od homogenog lameliranog drva BS14h razreda čvrstoće I. [5] i debljine lamela $t = 33$ mm [1].



Slika 6: Presjeci i nagibi u proračunu področnica (a) i mjerodavni nagib (b) [1]

Mjerodavna za proračun je provjera konačnih progiba (učinak puzanja uzet je u obzir s faktorom $k_{def} = 0,8$ za razred uporabe 2). Konačni progib $u_{net,fin} = 29,0$ mm manji je od granične vrijednosti $L/200 = 31,1$ mm. “Skriveni” priključak upuštanjem na gornji rub glavnih nosača prikazan je na slici 7. Na čelični lim #162/363/6 mm (ploča širine 163 mm, visine 363 mm i debljine 6 mm) priključen vijcima 4M12 klase 4.6 (četiri dvorezna vijka promjera 12 mm prenose rezultante poprečnih sila bočno priključenih področnica) na glavni

nosač (poz 100), vari se čelična ploča #151/363/6 mm utisnuta u drvo. Utisnuti lim i podrožnicu povezuju vijci 2M12 klase 4.6 koji prihvaćaju rezultantu poprečnih sila jedne podrožnice od vertikalnih i horizontalnih utjecaja, $V_{d,max,17^\circ} = 15,4 \text{ kN}$ [1]. Čelične ploče priključka povezane su obostranim kutnim zavarima debljine $a = 3 \text{ mm}$ (varovi 2x363/3 mm). Detaljne provjere nosivosti priključaka prikazane su u [1] i provedene u skladu s normama [5], [7] i [9].

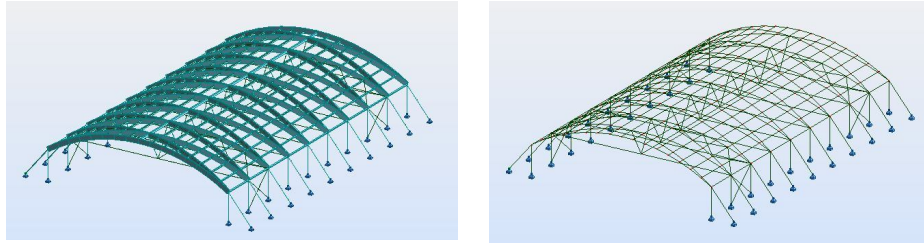


Slika 7: Priključak podrožnica (sekundarna konstrukcija poz 102) na glavni nosač [1]

2.4 Glavna nosiva konstrukcija

2.4.1 Prostorni model i proračun glavne nosive konstrukcije

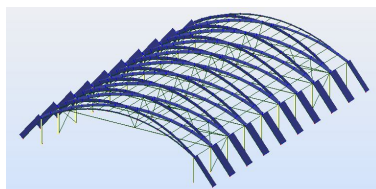
Unutrašnje sile i momenti savijanja za proračun graničnih stanja elemenata glavne nosive konstrukcije rezultat su statičke analize prostornog modela sa štapnim konačnim elementima u kojima su opterećenja modelirana kao linijski utjecaji na sekundarnu konstrukciju [1]. Priređena su ukupno četiri (4) modela isti geometrijskih svojstava (slika 8): dva za granično stanje nosivosti (GSN) i druga dva za granično stanje uporabljivosti (GSU) i to zato jer se u skladu s [5], provjere provode s različitim proračunskim svojstvima krutosti. Po dva modela za svako granično stanje priređena su zbog odvajanja proračunskih kombinacija za analize djelovanja u glavnoj ravnini konstrukcije i okomito na nju. U oba modela za provjere GSN razmatrano je ukupno 13 proračunskih kombinacija. U modelima za provjere GSU odvojene su kombinacije za provjere konačnih deformiranja (njih ukupno 13) i kombinacije za provjere trenutnih deformiranja (dodatnih 8 kombinacija). Detaljne tablične prikaze proračunskih kombinacija za može se pronaći u [1], a usklađeni su [2] i [5]. Modeli za statičku analizu i odgovarajući rezultati bitni za proračun glavnih nosača prikazani su na slikama 8 i 9. Osnovni podaci o pozicijama (slika 1) navedeni su u tablici 3.



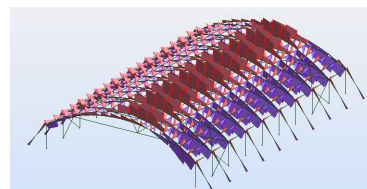
Slika 8: Prostorni proračunski model sa štapnim konačnim elementima i poprečnim presjecima za analize u programu *Robot Structural Analysis 2011* [1]

Tablica 3: Pregled pozicija (elementi glavne nosive konstrukcije), materijala i presjeka.

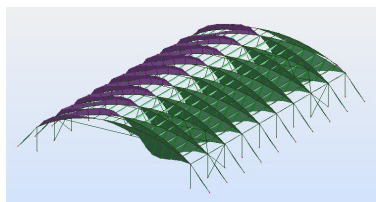
Element (pozicija)	Materijal	Presjek [mm]	Duljina [m]
Trozglobni lukovi (100)	LLD BS 14h	180 / 990	40,61
Dvozglobni rubni lukovi (101)	LLD BS 14h	180 / 990	40,00
Podrožnice (102)	LLD BS 14h	160 / 363	0,40 – 7,00
Rubne podrožnice (103)	LLD BS 14h	200 / 363	7,00
Stupovi (107, 108)	S 275	Ø 177,8 x 20	6,00; 7,81
Štapovi prostorne rešetke (105, 106)	S 275	Ø 70 x 4	6,95; 7,00
Zatege (104)	S 460	Ø 20	40,00
Dijagonale sprega (109)	S 460	Ø 24	5,96 – 9,22



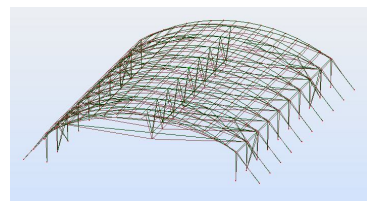
a) $N_{c,max,d} = 308,44 \text{ kN}$



b) $V_{max,d} = 17,85 \text{ kN}$



c) $M_{y,d} = 142,28 \text{ kN}$



d) $u_{net,fin} = 59 \text{ mm}$

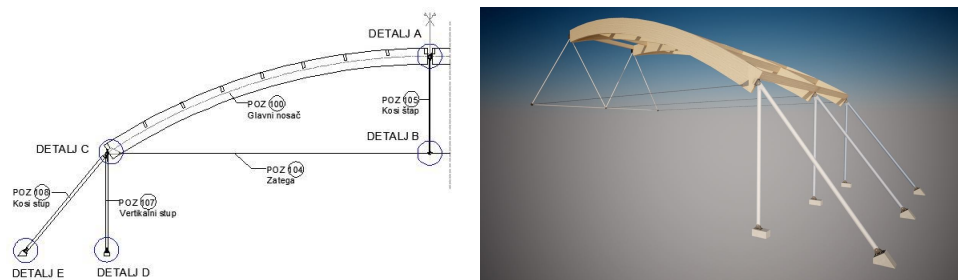
Slika 9: Rezultati statičke analize (za provjere GSN i GSU) na djelovanja u ravnini: a) i b) proračunske unutrašnje sile, c) momenti savijanja i d) konačna deformiranja [1]

Geometrijski oblik trozglobnih lukova čine dva lamelirana poluluka čija je zakrivljenost mala zbog povoljnog omjera polumjera donjeg ruba, $r_{in} = 35,83 \text{ m}$ i debljine lamele $a = 33 \text{ mm}$ ($r_{in} > 200a = 6,6 \text{ m}$), odnosno omjera polumjera u

osi, $R = 36,33$ m i visine $h = 0,99$ m ($R/h = 36,7 > 10$). Oslonci dijagonalnih lameliranih lukova (poz 100) i rubnih lukova (poz 101) na raščlanjene čelične stupove od toplooblikovanih cijevi su zglobni. Najveća je vlačna sila u vertikalnom dijelu stupa (poz 107) $N_{t,ED} = 261,52$ kN [1], a proračunska tlačna osna sila u kosom tlačnom dijelu stupa (poz 108) koji je pod kutom 40° prema vertikali iznosi $N_{c,ED} = 766,7$ kN. Najveći horizontalni pomak vrha stupa, $\delta_H = 11$ mm ne prelazi graničnu vrijednost $H/300 = 20$ mm. Zatege (poz 104) su izvedene prema rješenju proizvođača Halfen-Deha, a profil je odabran iz kataloga *Detan Tension Rod System* jer mu otpornost zadovoljava na vlačnu silu $Z_{max} = 111$ kN $> N_{max} = 92,12$ kN, najveće proračunske sile [1] u zategama. Zatege se tipskim nateznicama nastavljaju u četvrtinama raspona, na krajevima se priključuju na trozglobne lukove (slika 10), a na polovici duljine u čvorove prostorne čelične rešetke. Profili štapova ove rešetke razvrstani su u razred 1 otpornosti presjeka, a otpornosti su presjeka i elementa zadovoljile provjere na najveće proračunske osne sile, tlačnu silu (poz 105) $N_{c,Ed} = 14,53$ kN i vlačnu silu (poz 106), $N_{t,Ed} = 23,89$ kN koje su rezultat analize na proračunsku kombinaciju od stalnog opterećenja, snijega i vjetra uzdužnog smjera [1].

2.4.2 Karakteristični priključci elemenata glavne nosive konstrukcije

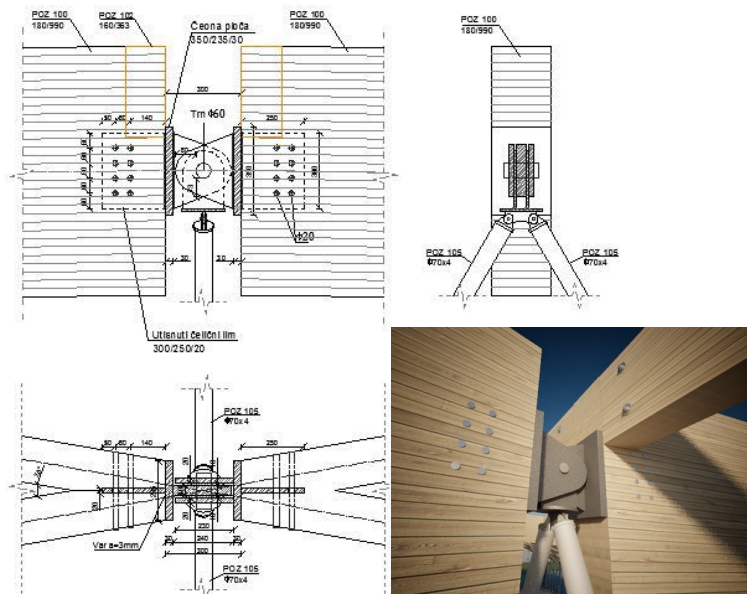
Na slici 10 prikazani su karakteristični priključci elemenata glavne nosive konstrukcije. Svi su detaljno proračunani [1] u skladu s nadležnim normama, a za čelične pločaste dijelove priključaka provjere su provedene i analizom modela s plošnim KE u programu *Strauss7*.



Slika 10: Proračunani karakteristični priključci u glavnoj nosivoj konstrukciji [1]

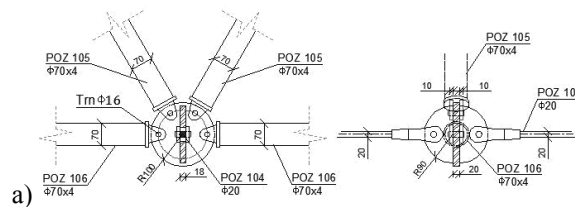
Zglobna veza lukova u tjemenu je tipsko rješenje s čeličnim svornjakom (trnom) prevladavajuće napregnutim unutrašnjim silama iz parova polulukova: parom osnih sila $N_{max,d} = 268,6$ kN (rezultanta sila, $R_H = 537, 2$ kN) i parom poprečnih sila (rezultanta sila, $R_V = 17,1 + 15,5 = 32,6$ kN) i dimenzioniranim na rezultantu sila R_V i R_H , $F_{ED} = 538,2$ kN (slika 11). Zanemareni su za provjere manje značajni doprinosi sila iz priklonih štapova ispune čelične rešetke. Konstrukcija priključka s dvoreznom trnom $\varnothing 60$ mm duljine 80 mm, srednjim

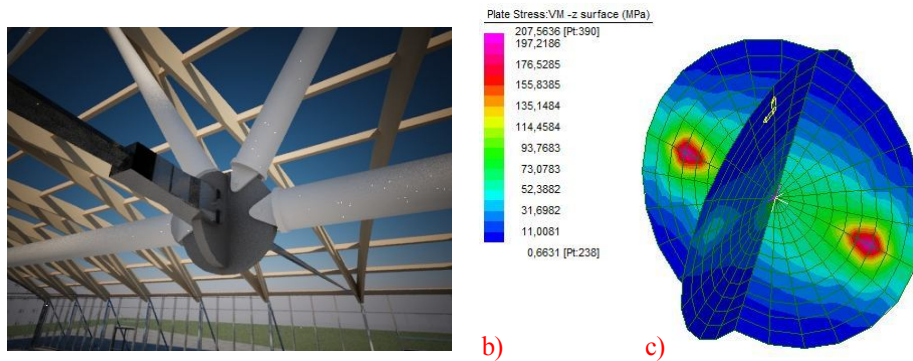
limom #40 mm i bočnim limovima (2#20 mm, navarenim na nasuprotne čeone ploče) od čelika kvalitete S 355 [1], proračunana je prema normama EN 1993-1-1 [6] i EN 1993-1-8 [7]. Osne tlačne sile iz parova polulukova sa svake strane prihvaćene su nalijeganjem na čeone ploče $\varnothing 350/235/30$. Poprečne sile u svakom poluluku [1] i lokalni moment savijanja (težišta trnova su 320 mm udaljena od svornjaka) prihvaćaju dvorezni trnovi $8\varnothing 20$ mm (čelik kvalitete S235) koji spajaju presjek poluluka i vertikalni čelični lim #300/250/20 mm utisnut u presjek i obostrano zavaren kutnim varovima $2 \times 300/3$ na čeonu ploču. Ostali priključci označeni na slici 10 prikazani su na slikama od 12 do 16, a detaljna objašnjena, proračunske modele i rezultate proračuna sadržava [1].



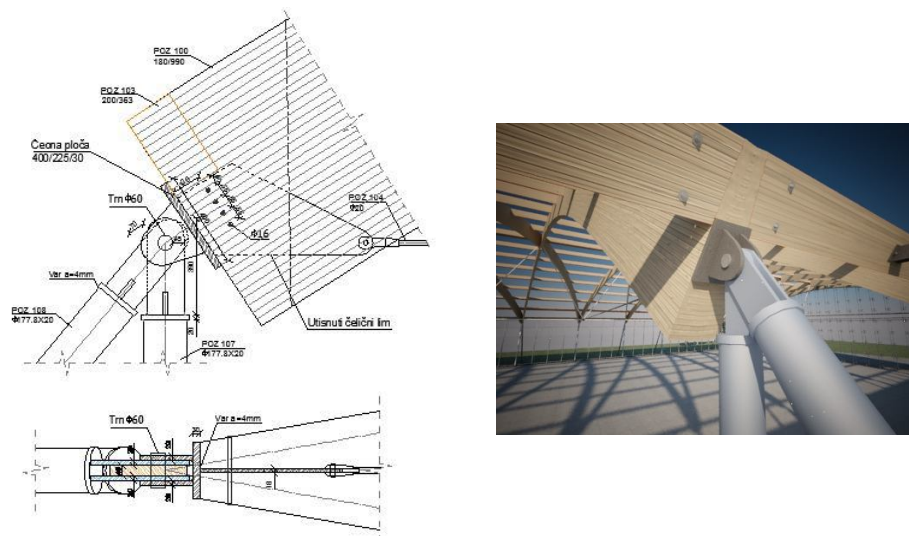
Slika 11: Detalj A – zglobna veza polulukova u tjemenu [1]

Na sljedećoj su slici (slika 12) dani prikazi rješenja (a) i vizualizacije središnjeg priključka zatege (b) na prostornu rešetku (detalj B) zajedno s rezultatima (c) analize modela KE koja je provedena u programu Strauss7 [1].



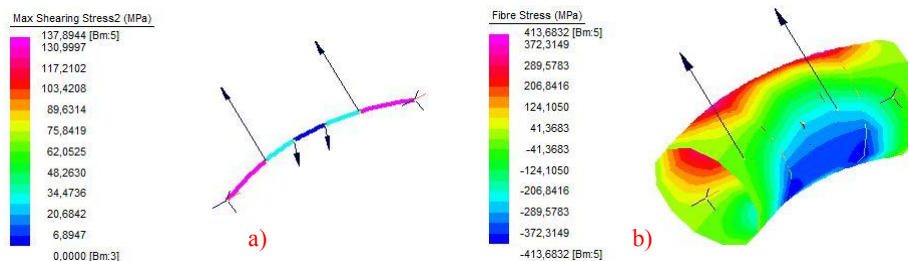


Slika 12: Detalj B – zglobni priključak zatege na prostornu čeličnu rešetku [1]

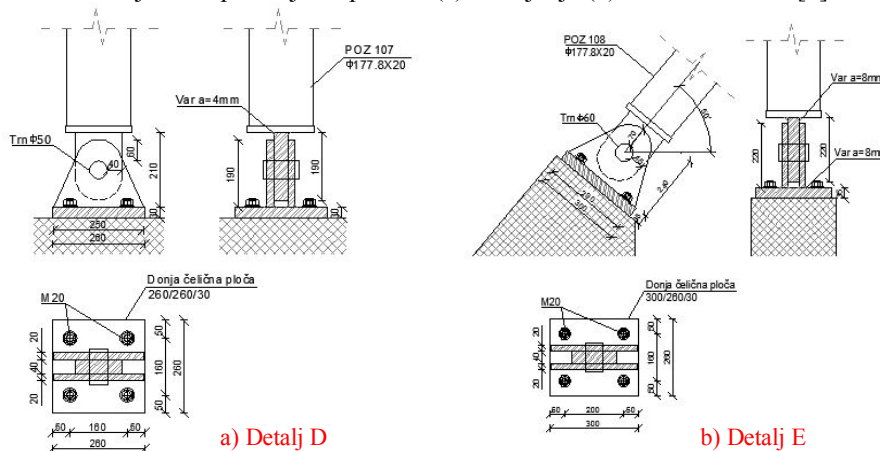


Slika 13: Detalj C – Zglobni oslonac lukova na čelični stup i priključak zatege [1]

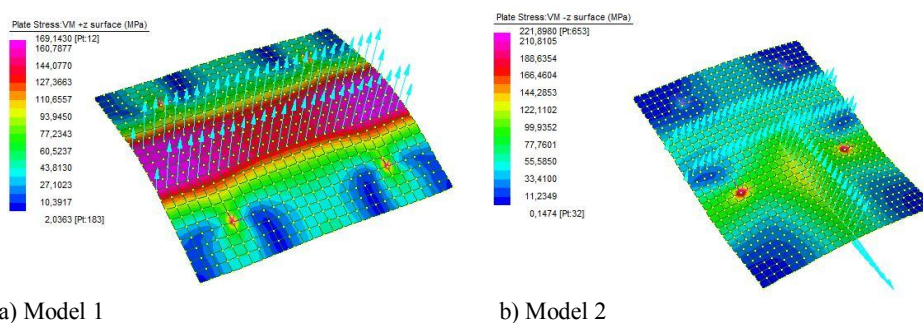
Proračunska rezultanta horizontalne reakcija na osloncu polulukova ($R_H = 649,0 \text{ kN}$) i vertikalne reakcije od polulukova i zatege ($R_V = -5,33 \text{ kN}$) jest $R_{L,d} = 649,04 \text{ kN}$. Proračunske osne sile u raščlanjenom stupu su $N_{d(107)} = -261,44 \text{ kN}$ i $N_{d(108)} = 760,43 \text{ kN}$. Trn je opterećen silama različitih priklonih kutova (stup, lukovi, zatega) pa su i naprezanja bitno različita za svaku plohu. Na slici 14 prikazani su rezultati analize modela detalja u programu Strauss7 [1]. Na slici 15 prikazani su detalji oslanjanja raščlanjenog čeličnog stupa, a na slici 16 rezultati analiza naprezanja [1] na savijanje donje podložne ploče (od čelika kvalitete S 355) na osloncu vertikalnog dijela stupa (poz 107) provedenih u programu *Strauss7* na dva proračunska modela s pločastim KE.



Slika 14: Detalj C – naprezanja na posmik (a) i savijanje (b) u trnu $\varnothing 60$ mm [1]



Slika 15: Detalji oslanjanja vertikalnog (a) i kosog (b) elementa čeličnog stupa [1]

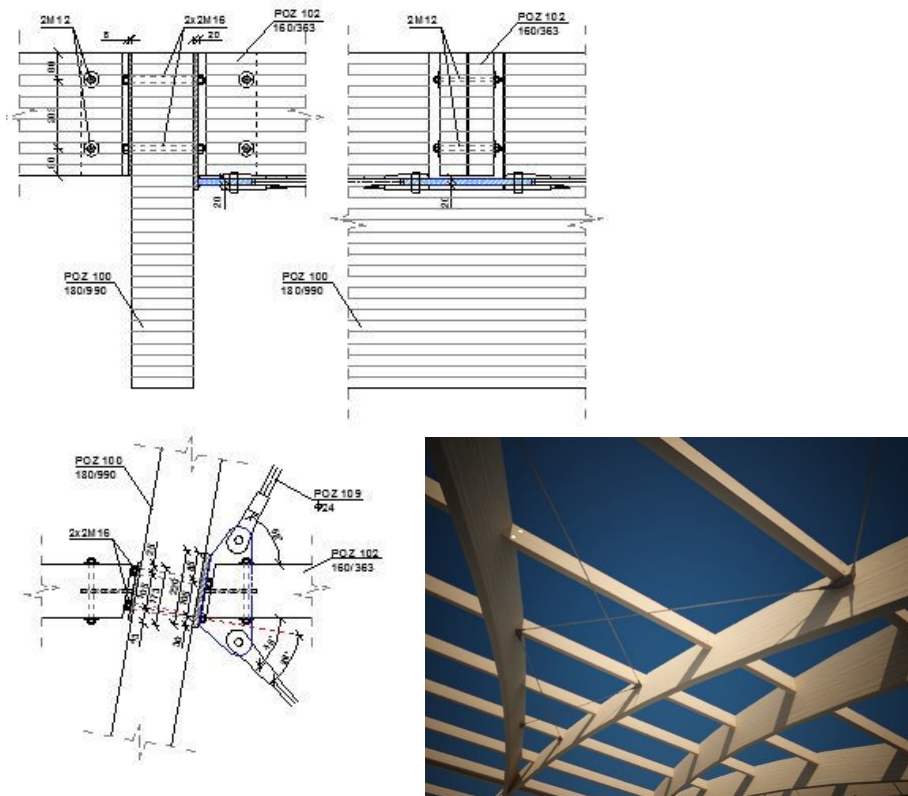


Slika 16: Analiza naprezanja na savijanje modela KE donje podložne ploče stupa [1]

Model 1 predstavlja podložnu ploču stupa bez priključka dijagonala sprega (proračunska sila u stupu je $N_{E,d} = 255,3$ kN), a model 2 odnosi na detalj s priključkom dijagonale sprega (vidjeti i sliku 18) i silama $N_{E,d} = 123,9$ kN u stupu i $N_{E,d} = 119,5$ kN u dijagonali.

2.4.3 Prostorna stabilizacija glavne nosive konstrukcije

Konstrukcija je stabilizirana s dva krovna poprečna sprega oslonjena na vertikalne spregove u drugom i predzadnjem polju (slika 2). Vlačne dijagonale su promjera $d = 24$ mm, kvalitete čelika S460 i izvedene tipskim rješenjima proizvođača Halfen-DeHa (prema katalogu Detan Tension Rod System, profil $\text{Ø}24$ može prihvatiti vlačnu silu $Z_{\max,d} = 160$ kN). Priklučci dijagonala na glavne nosače i stupove izvedeni su tipskim vilicama i pločama od čelika S355. Zbog primjene tipskih rješenja dodatno su provedene samo provjere otpornosti zavara u čeličnim dijelovima priključaka [1]. Karakteristični su priklučci prikazani na slikama 17 i 18.



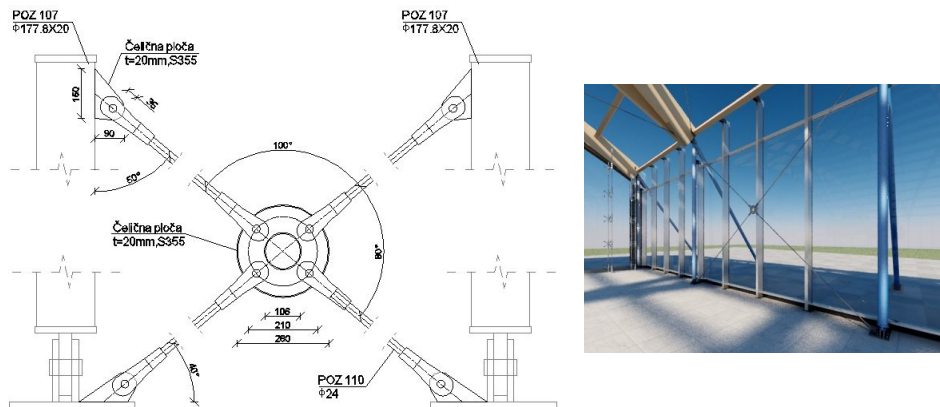
Slika 17: Karakteristični priključak ispune krovnog sprega na glavne nosače [1]

Rezultati statičke analize prostornog modela glavne nosive konstrukcije s proračunskim kombinacijama u kojima je jedno od promjenjivih djelovanja horizontalni utjecaj (doprinos bočnih deformiranja nosača od vertikalnih utjecaja, vjetar uzdužnog smjera i trenje) pokazali su da povećane unutrašnje

sile i koso savijanje ne utječu značajno na presjek i stabilnost glavnih nosača (tablica 4). Jedina promjena presjeka (širina povećana s $b = 160$ mm na $b = 200$ mm) odnosi se na rubne podrožnice ($L = 7,0$ m) u sastavu sprega (slika 2).

Tablica 4: Proračunske unutrašnje sile i momenati savijanja u pojasnim elementima krovnog sprega (glavni nosači) za modele s vertikalnim i horizontalnim djelovanjima

Unutrašnje sile i momenati savijanja	Vertikalni utjecaji	Horizontalni utjecaji
Oсна tlačna sila	308,44 kN	333,20 kN
Poprečna sila	17,85 kN	18,37 kN
Moment savijanja u polju	132,74 kN	140,65 kN



Slika 18: Karakteristični priključci ispune vertikalnog sprega na stupove [1]

3 Projektna rješenja konstrukcija stakleno aluminijskih fasada

3.1 Konstrukcija uzdužne stakleno aluminijske fasade

Fasadu čine vertikalni aluminijski profili koji su na gornjem kraju slobodno oslonjeni na rubne podrožnice glavne drvene konstrukcije i čelične stupove, a na donjem se kraju zglobno oslanjaju na temelj (slika 18). Staklo je dimenzija 1750x5200 mm, na krajevima se oslanja na horizontalne aluminijske profile, a na rubovima na vertikalne. Izolacijsko je, izvedeno od dva sloja laminiranog stakla 5+5mm s međuslojem zraka debljine $s = 16$ mm (5+5AN/16/5+5AN). Prekinuto je ispod prodora kosih stupova koji je izveden kroz trapezni lim od kojeg je i pokrov, ali je proračunska visina stakla usvojena kao ukupna visina fasade ($h = 6000$ mm), a zamjena gornjeg dijela limom je zanemarena [1]. Proračun stakla usklađen je s dijelom 3 nacrtu europske norme prEN 13474 [8], a proračunske debljine stakla 1 i 2 (slojevi $t_1 = t_2 = 10,76$ mm) usvojene s $h_{ef,w} = 7,59$ mm u proračunu progiba i $h_{ef,\sigma} = 8,37$ mm u proračunu naprezanja [1]. Naprezanja i progibi određeni su analizom modela s plošnim KE u programu

Strauss7 (slika 19). U proračunskim je kombinacijama [1, 2] uzeto u obzir opterećenje vjetrom $w = 0,712$ kPa (tablica 3) i linijsko uporabno opterećenje (engl. imposed load) $q_{IL} = 1,5$ kN/m na visini 1,05 m, definirano prema [8]. Za analizu naprezanja mjerodavna je proračunska kombinacija $\gamma_Q \cdot (q_{IL} + \psi_{0,w} \cdot q_w)$ s parcijalnim faktorom za djelovanja $\gamma_Q = 1,1$ i kombinacijskim faktorom za prateći utjecaj vjetra $\psi_{0,w} = 0,6$. Kombinacija $(\psi_{1,IL} \cdot q_{IL} + \psi_{2,w} \cdot q_w)$ s faktorima kombinacije $\psi_{1,IL} = 0,7$ i $\psi_{2,w} = 0,2$ je mjerodavna u proračunu progiba [1]. Pretpostavka proračuna izo-stakla jest ravnomjerna raspodjela opterećenja na oba sloja (faktori raspodjele $\delta_1 = \delta_2 = 0,5$ i $k_5 = 0,0061$). Karakteristične duljine $a_{w(\sigma)}^*$ i faktori $\varphi_{w(\sigma)}$ [1] za opterećivanje stakla u analizi modela određeni su prema izrazima (1) i (2) preuzetim iz [8] gdje se oznake w i σ primjenjuju u analizama progiba i naprezanja s proračunskim debljinama stakla $h_{ef,w}$ i $h_{ef,\sigma}$.

$$a_{w(\sigma)}^* = 28,9 \cdot \left[\frac{s \cdot h_{ef,w(\sigma)}^6}{2h_{ef,w(\sigma)}^3 \cdot k_5} \right]^{-0,25} \quad (1)$$

$$\varphi_{w(\sigma)} = \frac{l}{1 + (a/a_p)^4} \quad (2)$$

Proračunate vrijednosti za analizu progiba su $a_w^* = 295$ mm i $\varphi_w = 0,0409$, odnosno $a_\sigma^* = 856$ mm i $\varphi_\sigma = 0,0541$ za analizu naprezanja [1]. Raspodjelu uporabnog opterećenja i vjetra na svako staklo treba odrediti prema općim izrazima (3) i (4) preuzetim iz [8] u kojima se oznaka q_1 odnosi na vjetar ili uporabno opterećenje stakla 1, a oznaka q_2 na ista takva opterećenja stakla 2.

$$F_{d,w(\sigma),q_1} = (\delta_1 + \varphi_{w(\sigma)} \cdot \delta_2) \cdot q_1 \quad (3)$$

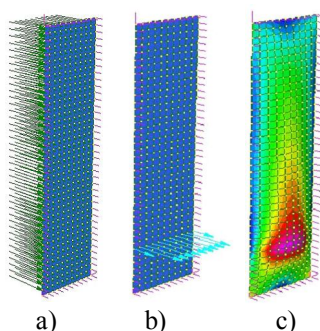
$$F_{d,w(\sigma),q_2} = (1 - \varphi_{w(\sigma)}) \cdot \delta_2 \cdot q_2 \quad (4)$$

Proračunska opterećenja (slika 19) u analizi progiba su $F_{d,w,w1} = 0,371$ kPa za vjetar i $F_{d,w,IL1} = 0,781$ kN/m za uporabno opterećenja na staklo 1, te $F_{d,w,w2} = 0,341$ kPa i $F_{d,w,IL2} = 0,719$ kN/m za takva opterećenja na staklo 2. Odgovarajuće vrijednosti u analizi naprezanja su $F_{d,\sigma,w1} = 0,375$ kPa za vjetar i $F_{d,\sigma,IL1} = 0,791$ kN/m za uporabno opterećenje na staklo 1, odnosno $F_{d,\sigma,w2} = 0,337$ kPa i $F_{d,\sigma,IL2} = 0,709$ kN/m za staklo 2 [1]. Proračunska čvrstoća normalnog stakla na savijanje određena je prema izrazu (5) preuzetom iz [8]:

$$f_{g,d} = k_{mod} \cdot k_{sp} \cdot f_{g,k} / \gamma_{mA} \quad (5)$$

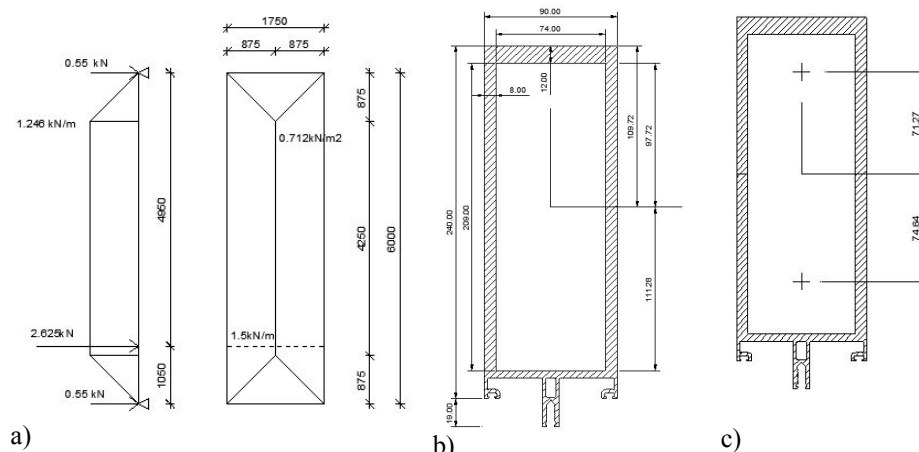
Simboli i pridružene im vrijednosti za normalno staklo (AN) u izrazu (5) su: $f_{g,k} = 45$ MPa je karakteristična čvrstoća na savijanje, $k_{mod} = 0,74$ je faktor izmjene za kratkotrajno opterećenje vjetrom, $k_{sp} = 1$ je faktor površine stakla, a $\gamma_{mA} = 1,8$ je faktor sigurnosti za materijal. Rezultati analize modela (slika 19)

pokazuje da najveće naprezanje zadovoljava provjeru jer je $\sigma_{\max} = 16,21 \text{ MPa} < f_{g,d} = 18,5 \text{ MPa}$. Najveći je progib stakla $w_{\max} = 13,1 \text{ mm}$ manji od dopuštene vrijednosti određene prema [8], $1750/60 = 29,2 \text{ mm}$ [1].



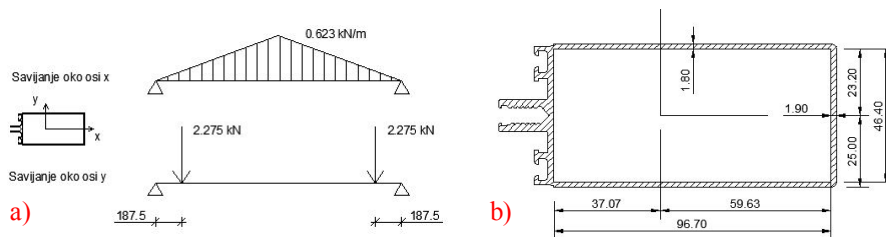
Slika 19: Proračunski model stakla i raspodjele djelovanja od vjetra (a) i uporabnog opterećenja (b) i rezultati analize naprezanja za kombinaciju (c) [1]

Vertikalni i horizontalni aluminijski profili su od aluminijske legure EN-AW 6063 T6. Simboli su u skladu s normom (HRN) EN 1991-1-1 i označavaju kovanu leguru AlMg0,7Si čije je očvršćavanje rezultat toplinske obrade i umjetnog starenja, a razvrstana je u razred izvijanja A (zbog visoke čvrstoće popuštanja i očvršćavanja mehanizmom tople kupke i obradom T6). Granica proporcionalnosti je $f_{0,2} = 160 \text{ MPa}$, vlačna čvrstoća $f_u = 195 \text{ MPa}$, a parcijalni faktori za materijal su $\gamma_{M1} = 1,1$ i $\gamma_{M2} = 1,25$ (za vlačno napregnute elemente). Na slikama 20 i 21 prikazane su proračunski modeli raspodjele opterećenja i odabrani tipski presjeci vertikalnih i horizontalnih aluminijskih profila.



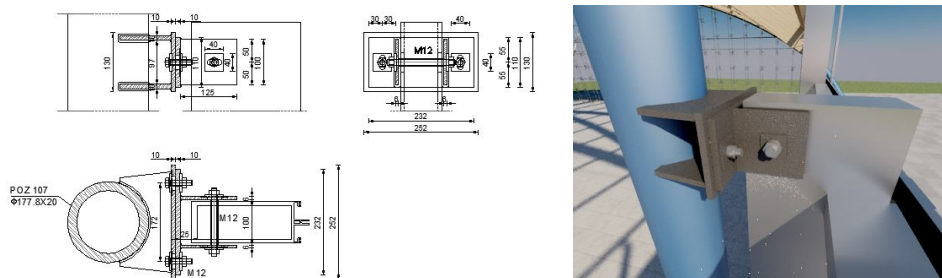
Slika 20: Proračunski model za utjecaj vjetra i uporabno opterećenje (a) na slobodno oslonjen vertikalni aluminijski profil (b) i (c) [1]

Tipski vertikalni Al-profil (slika 20.b) razvrstan je u razred 1 otpornosti presjeka i zadovoljio je provjeru otpornosti na savijanje, $M_{E,d}/M_{Rd} = 0,15 < 1$ prema [9] s proračunskim momentom savijanja $M_{E,d} = 8,17$ kNm za model opterećenja prema slici 20.a) i plastični moment otpora $W_{x,pl} = 376,7$ cm³ proračunat prema slici 20.c). Element je zadovoljio provjeru na bočno izvijanje prema normi BS 8118 (Structural use of Aluminium) s $M_{E,d}/M_{R,x} = 0,97 < 1$ i provjeru uporabljivosti s najvećim progibom $w_{max} = 10$ mm $< w_{dop} = 15$ mm [1]. Horizontalni profil (slika 21) prihvaća vlastitu i težinu stakla ($G_s = 5,15$ kN) savijanjem oko osi x i dio opterećenja vjetrom savijanjem oko jače osi y.



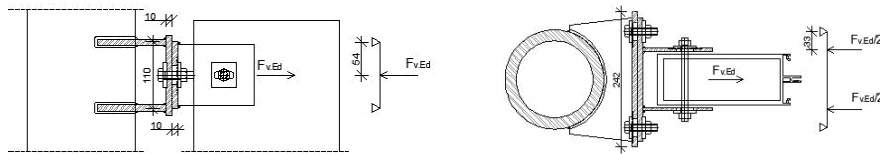
Slika 21: Proračunski model za opterećenje (a) na b) slobodno oslonjen horizontalni aluminijski profil Metra NC 6062 [1]

Za savijanje oko x-osi presjek je razvrstan u razred otpornosti 1 (duktilan je za unutrašnji dio pod gradijentom naprezanja), odnosno u razred otpornosti 4 (vitki presjek za unutrašnji dio bez gradijenta naprezanja, proračunske debljine gornjeg pojasa 1,13 mm). Za savijanje oko y-osi presjek je polukompaktan, razreda otpornosti 3. Proračunski moment savijanja oko x-osi je $M_{E,d,x} = 0,58$ kNm, proračunski moment otpora je $W_{x,ef} = 8,68$ cm³ pa presjek dostiže 46% proračunske otpornosti [1, 9]. Koso savijani presjek s dodatnim proračunskim momentom savijanja $M_{E,d,y} = 0,21$ kNm i otpornošću $M_{Rd,y} = 2,65$ kNm dostiže 54% otpornosti. Zadovoljavaju [1] i provjere elementa na bočno izvijanje (12% nosivosti) i progib (najveći progib $w_{max} = 12$ mm je 80% dopuštenog progiba, $w_{dop} = 15$ mm). Na slikama od 22 do 26 prikazani su karakteristični detalji čiji je proračun detaljno proveden u [1] i usklađen s nadležnim normama [6, 7 i 9].



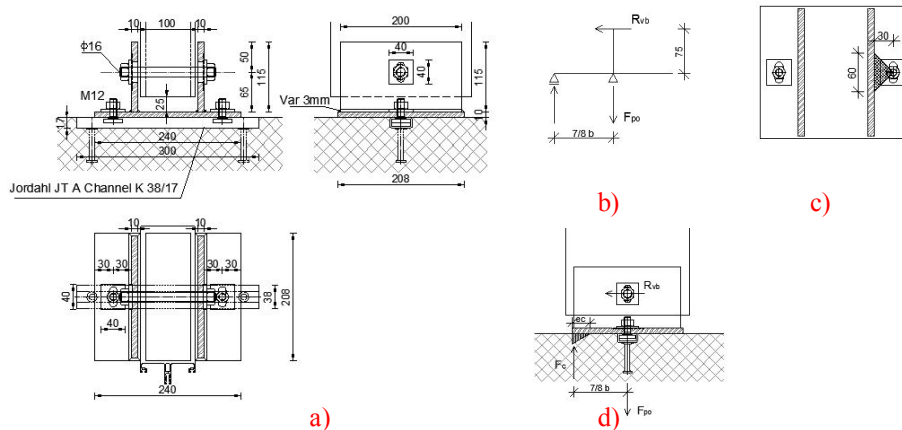
Slika 22: Priključak vertikalnog aluminijskog profila na čelični stup [1]

Priključak prihvaća proračunsku kombinaciju reakcije od vjetra $R_v = 3,75$ kN i uporabnog opterećenja $R_b = 0,7 \cdot 0,46 = 0,32$ kN (s parcijalnim faktorom za djelovanja $\gamma_Q = 1,3$), odnosno proračunsku poprečnu silu $F_{v,Ed} = 5,29$ kN [1], a dvarezni vijak M12 (slike 22 i 23) od nehrđajućeg čelika zadovoljava provjere na odrez (9%), savijanje (90%) i njihovu interakciju (82%). Provjere na pritisak po omotaču rupe čeličnog lima papuče ($t = 6$ mm, čelik kvalitete S 235) i Al-profila ($t = 4$ mm) provedene prema [6,7 i 9] zadovoljavaju [1]. Proračunska shema priključka prikazana je na slici 23 i detaljnije objašnjena u [1].



Slika 23: Shema proračuna čeličnih ploča u priključku vertikalnog profila na stup [1]

Priključak vertikalnog profila na temelj (slika 24) prihvaća vlastitu težinu Al-profila i stakla ($G_k = 5,97$ kN) i kombinaciju reakcije od vjetra i uporabnog opterećenja $R_{vb} = 5,27$ kN. Vertikalni čelični lim papuče od čelika kvalitete S 235 zadovoljava provjeru na savijanje i pritisak po omotaču rupe za vijak M16 (nehrđajući čelik razreda 70 prema normi EN ISO 3506) koji prenosi rezultatnu proračunsku silu odreza $F_{v,Ed} = 9,91$ kN. Priključak donje čelične ploče [1] na beton izveden je T-vijcima M12 (nosivost na čupanje: $F_{Rd} = 6,0$ kN $>$ $F_{p0} = 5,0$ kN, nosivost na odrez: $F_{RV,d} = 8,0$ kN $>$ $F_v = R_{vb}/2 = 2,635$ kN).



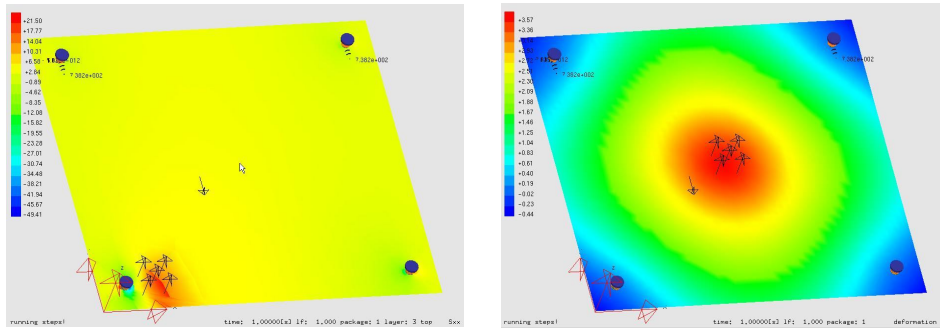
Slika 24: Rješenje priključka vertikalnog AL-profila na temelj (a) s odgovarajućim proračunskim shemama: b) statički sustav čelične papuče, c) shema naprezanja u donjoj ploči i d) shema za provjeru naprezanja u betonu razreda čvrstoće C25/30 [1]

(najduža) zatega u sredini raspona zabata. Staklo je izolacijsko, sastavljeno od dva sloja laminiranog stakla 6+6mm i srednjeg sloja zraka debljine 16mm (6AN+6FT/16/6AN+6FT). Zbog velike koncentracije naprezanja oko *pauka* jedan je sloj normalnog stakla (AN) zamijenjen kaljenim staklom (FT). Fasada zabata mora pratiti geometriju luka pa stakla nisu istih dimenzija: 1600x1500 mm je osnovna dimenzija, širina od 1600 mm je stalna, a visina promjenjiva. Provjere su zato provedene za karakteristična stakla, za najniže staklo i za ono najveće visine, $h = 2346$ mm [1]. Proračun stakla usklađen je s [8], a proračunske debljine slojeva stakala 1 i 2, $t_1 = t_2 = 12,76$ mm, usvojene s $h_{ef,w} = 9,11$ mm u proračunu progiba i $h_{ef,\sigma} = 10,04$ mm u proračunu naprezanja [1]. Naprezanja i progibi određeni su analizom modela s plošnim konačnim elementim (KE) u računalnom programu Strauss 7. Gornje staklo opterećeno je vjetrom $w = 0,712$ kPa (tablica 2). Pretpostavka proračuna [1,8] je ravnomjerna raspodjela opterećenja vjetrom na oba sloja izo-stakla s faktorima $\delta_1 = \delta_2 = 0,5$ i $k_s = 0,0165$. U skladu s izrazima (1) i (2) proračunane karakteristične duljine i faktori [1] za analizu progiba su $a_w^* = 711$ mm i $\varphi_w = 0,0376$, odnosno $a_\sigma^* = 765$ mm i $\varphi_\sigma = 0,0496$ za analizu naprezanja. Raspodjela opterećenja vjetrom na svako staklo određena je prema izrazima (3) i (4) za proračunska opterećenja vjetrom $q_1 = F_{d,\sigma} = 1,1w = 0,78$ kPa (provjera naprezanja) i $q_1 = F_{d,w} = 0,9w = 0,64$ kPa (provjera progiba). Proračunska opterećenja u analizi progiba su: $F_{d,w,w1} = 0,33$ kPa za opterećenje vjetrom na staklo 1, odnosno $F_{d,w,w2} = 0,31$ kPa za staklo 2. Odgovarajuće vrijednosti u analizi naprezanja su: $F_{d,\sigma,w1} = 0,41$ kPa za staklo 1 i $F_{d,\sigma,w2} = 0,37$ za staklo 2. Proračunska čvrstoća stakla na savijanje, $f_{g,d} = 81$ MPa, određena je prema sljedećem izrazu, također preuzetim iz [8]:

$$f_{g,d} = k_{mod} \cdot k_{sp} \cdot f_{g,k} / \gamma_{MA} + k_v \cdot (f_{b,k} - f_{g,k}) / \gamma_{Mv} \quad (6)$$

gdje su prvi dio izraza i simboli u njemu isti kao u izrazu (5), a simboli drugog dijela izraza označavaju čvrstoću na savijanje kaljenog stakla, $f_{b,k} = 160$ MPa, $k_v = 1$ i parcijalni faktor za materijal $\gamma_{Mv} = 1,2$. Najveće je naprezanje u staklu $\sigma_{max} = 16,8$ MPa, a najveći progib $w_{max} = 29,7 < h/60 = 39,1$ mm [1]. Donje je staklo (1600x1500 mm) opterećeno proračunskom kombinacijom vjetra i uporabnog opterećenja, a analize su provedene u programu Mepla (slika 27). Proračunsko uporabno opterećenje u analizi naprezanja je koncentrirana sila na površini 100x100 mm oko "pauka", a u provjeri je progiba linijsko opterećenje na sredini visine stakla tj. 750 mm od poda. Provjere nosivosti zatega i veznih cijevnih elementa provedene su u programu Strauss7 nakon analiza raspodjele opterećenja na zategu (tablica 5) i nosivosti točkastih oslonaca stakala (tablica 6 i slika 27). Analize nosivosti zatega provedene su na dva modela [1]: potpuno

kruta glavna konstrukcija tj. nepopustljivi oslonci zatega pretpostavka su Modela 1, dok su popustljivi oslonci zatega pretpostavka Modela 2.



$$\sigma_{\max} = 49,41 \text{ MPa} < f_{g,d} = 81 \text{ MPa}$$

$$w_{\max} = 3,57 \text{ mm} < h/60 = 25 \text{ mm}$$



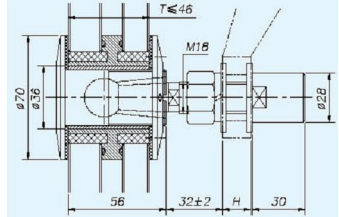
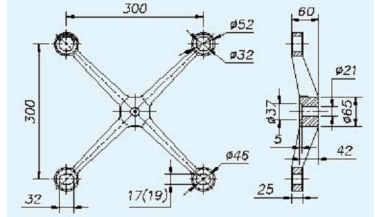
Slika 27: Modeli točkasto oslonjenog stakla i analize u računalnom programu Mepla [1]

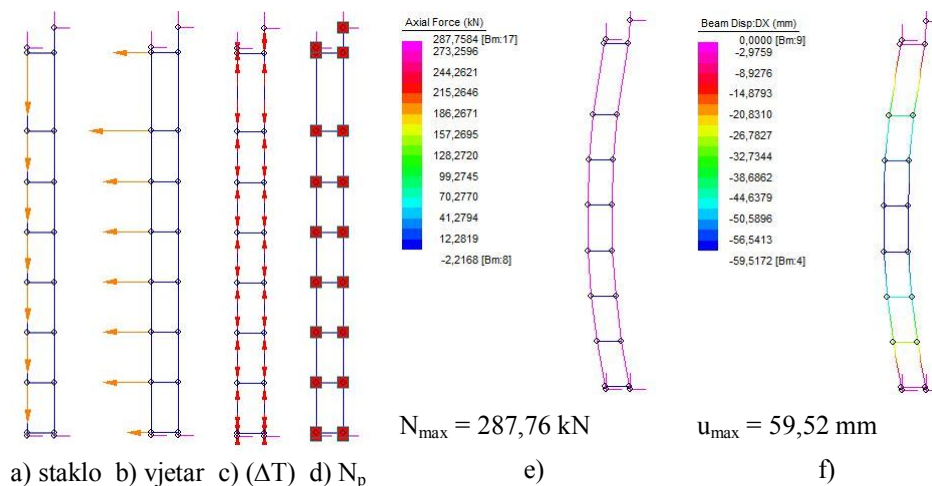
Tablica 5: Analiza raspodjele opterećenja po visini zatege [1]

Opterećenje vjetrom na fasadu	$w = 0,712 \text{ kPa}$	
Opterećenje od vlastite težine donjeg stakla ($a \times h_1 = 1600 \times 1500 \text{ mm}$)	$G_1 = 1,41 \text{ kN}$	
Opterećenje od vlastite težine gornjeg stakla ($a \times h_1 = 1600 \times 2346 \text{ mm}$)	$G_2 = 2,21 \text{ kN}$	
Opterećenje vjetrom na gornje staklo	$w_1 = 1,71 \text{ kPa}$	
Opterećenje vjetrom na donje staklo	$w_2 = 2,67 \text{ kPa}$	
Opterećenje vjetrom na prijelazu iz gornjeg stakla u donje staklo, $w_3 = (w_1 + w_2) / 2$	$w_3 = 2,19 \text{ kPa}$	
Sila prednapinjanja	$N_p = 200 \text{ kPa}$	
Opterećenje zatege temperaturom	$\Delta T = 35 \text{ K}$	

Detaljniji pregled kombinacija opterećenja u analizama graničnih stanja nosivosti (GSN) i uporabljivosti (GSU), te provjere otpornosti mogu se pronaći u [1]. Za provjere nosivosti zatege mjerodavna je proračunska kombinacija sa stalnim opterećenjem, silom prednapinjanja i vjetrom. Za provjere otpornosti presjeka horizontalnih cijevnih elemenata od nehrđajućeg čelika (razvrstan je u razred 1. otpornosti) i stabilnosti na bočno izvijanje zbog proračunske sile $N_{C,Ed} = 2,3 \text{ kN}$ [1] mjerodavnom se pokazala kombinacija sa stalnim opterećenjem, silom prednapinjanja, vjetrom i temperaturom.

Tablica 6: Nosivosti tipskih točkastih oslonaca (engl. routel) i “pauka” (engl. spider) prema proizvodnom katalogu Point-fixed glass wall fittings

 <p style="text-align: center;">TF33</p>	Kin Long Routel TF 33	 <p style="text-align: center;">300C(300C')</p>	Kin Long Spider 300C (300°) Series
			
Nosivosti za osnu proračunsku silu $R_{max} = 2,63 \text{ kN}$ (usis vjetra):			
$N_{r,Rd,a} = 6,5 \text{ kN} > R_{max}$	$N_{r,Rd,a} = 6,0 \text{ kN} > R_{max}$		
Nosivosti na radijalnu proračunsku silu $R_{g,max} = 1,49 \text{ kN}$ (vlastita težina stakla):			
$N_{r,Rd,r} = 2,5 \text{ kN} > R_g$	$N_{r,Rd,r} = 2,5 \text{ kN} > R_g$		



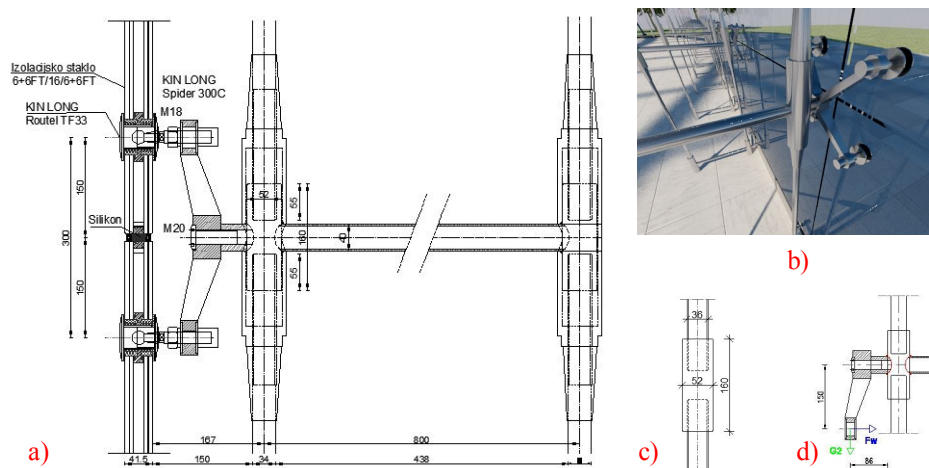
Slika 28: Model 2 s popustljivim osloncima – od a) do d) opterećenje i rezultati analize u programu Strauss7 – e) najveća proračunska sila N_{max} i f) najveći progib u_{max} [1]

Za prevladavajuće drvenu glavnu konstrukciju (svakako ne potpuno krutu), Model 1 u osnovi i nije realan. Model 2 zahtijevao je povećanje krutosti što se nastojalo ostvariti dvostrukim presjecima rubnih dvozglonih lukova (tablica 3, poz 101) odnosno povećanjem početnog presjeka na 2x180/990 mm tako da krutost glavne konstrukcije u y-smjeru i za opterećenje jednom prednapetom zategom iznosi $k_y = 6,25 \text{ kN/mm}$ [1]. Tablica 7 sadrži prikaze rezultata [1] proračuna za različite sile prednapinjanja najduže zatege gdje je $N_{t,max}$ najveća sila u zatezi nakon nanošenja opterećenja, w_{max} je najveći progib fasade, a w_L progib zabatnog luka. Navedeni su i podaci o postotku iskorištenja kabela [1].

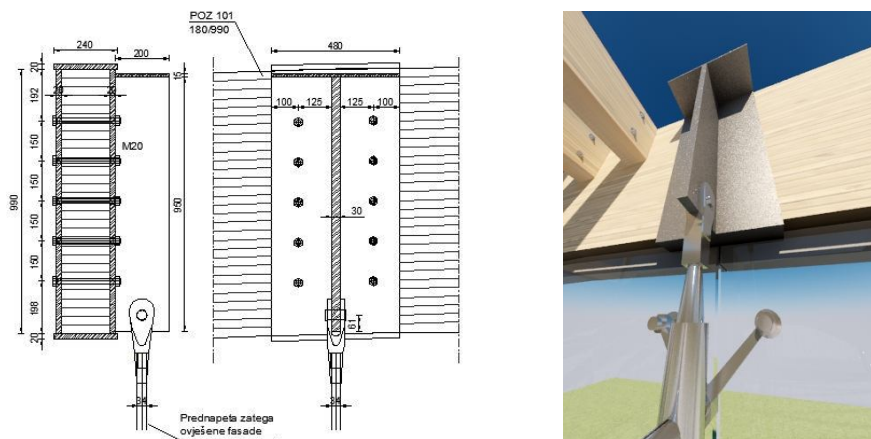
Tablica 7: Rezultati proračuna za različite sile prednapinjanja zatege [1]

Sila prednapinjanja [kN]	$N_{t,max}$ [kN]	w_{max} [mm]	w_L [mm]	Iskorištenje kabela
200 kN	104,55	148,61	11,09	28%
400 kN	172,75	87,19	18,39	45%
500 kN	211,75	69,93	22,89	56%

U detaljnije provedenom proračunu trebalo bi uzeti u obzir i progibe glavne konstrukcije od ostalih djelovanja (npr. vlastita težina, snijeg), a luk opteretiti silama iz svih zatega što bi povećalo i progibe (luka i fasade) i sile pritezanja u zategama. Djelovanja koja fasada na taj način unosi u glavnu konstrukciju su značajna pa bi trebala biti sastavni dio modela glavne konstrukcije. Na slikama 29 i 30 prikazani su karakteristični detalji, a proračun i sve potrebne provjere priključaka mogu se pronaći u [1]. Za detalj prikazan na slici 29 provedene su provjere navoja zatege (vijak M36), spojnice nastavka s cijevnim profilom i vara cijevnog profila na spojnicu [1] debljine $a = 8 \text{ mm}$.



Slika 29: a) Priključak zatege na cijevni horizontalni profil; b) vizualizacija priključka; c) nastavak zatege i d) shema opterećenja vara [1]



Slika 30: Priključak zatege na glavni nosač konstrukcije [1]

Priključak zatege na dvodijelni dvozglobni lamelirani luk [1] izveden je čeličnim prstenom koji obuhvaća cijeli presjek luka. Na prsten je zavarena čelična ploča T-presjeka na koju se standardnom MacAlloy vilicom prihvaća zatega fasade. Sila iz zatege prenosi se nalijeganjem gornje ploče prstena na drveni luk, a vijci M20 samo su konstruktivna veza. Rupa za vijak u čeliku je promjera $d_0 = 22$ mm (2 mm veće od promjera vijka) što omogućava male pomake ploče bez dodatnog opterećivanja vijaka (slika 30). Provjere nosivosti čeličnog prstena (kvalitete čelika S355) i T-ploče provedene su u programu Strauss7 i detaljnije prikazane u diplomskom radu [1].

4 Zaključak

Sustav prostorno raspoređenih trozglobnih lukova pokazao se povoljnim sa stajališta nosivosti i stabilnosti, ali se prepoznaju mogući problemi u izvedbi. Rotacijom lukova u dijagonalnu poziciju u odnosu na stupove, rotiraju se i poprečni presjeci lukova (npr. na istom je rubu jedan brid viši od drugog) što otežava postavljanje podrožnica i pokrova. Pravilna izvedba priključaka u sljemenu i na osloncima zahtijeva vrlo precizno oblikovanje krajeva glavnih nosača. Proračun ovješene fasade na dva modela (kruti i popustljivi) pokazao je da su sile pritezanja zatega takve da ih drveni lukovi ne mogu prihvatiti bez značajnih progiba što potvrđuje da djelovanja koja ovješena fasada preko zatega unosi u glavnu konstrukciju treba biti sastavni dio modela glavne konstrukcije. Moguća su rješenja ovog problema sljedeća: projektirati glavnu konstrukciju veće krutosti (ne nužno drvenu) ili i na zabatu drvene konstrukcije primijeniti “stick” sustav projektiran za uzdužne stijene.

Literatura

- [1] Cupać Jagoda: Projekt izložbene dvorane s prostornom lameliranom lučnom konstrukcijom krova i stakleno aluminijskom fasadom,. *Diplomski rad*, Rijeka, 2010.
- [2] EN 1990:2002. Basis of structural design, CEN Brussels, 2002
- [3] EN 1991-1-3:2003. Actions on structures - General actions - Part 1-3: Snow loads, CEN Brussels, 2003.
- [4] EN 1991-1-4:2005. Actions on structures - General actions - Part 1-4: Wind actions, CEN Brussels, 2005.
- [5] DIN ENV 1052:2000, Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken. Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau, DIN Berlin 2004
- [6] EN 1993-1-1:2005. Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, CEN Brussels, 2005.
- [7] EN 1993-1-8:2005. Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints, CEN Brussels, 2005
- [8] prEN 13474-3:2008. Glass in building, CEN Brussels, 2008
- [9] EN 1999-1-1:2007. Design of aluminium structures – Part 1-1: General structural rules, CEN Brussels, 2007
- [10] EN 1993-1-11:2005. Design of steel structures – Part 1-11: Design of structures with tension components, CEN Brussels, 2005