

USPOREDBA ZOLLINGER SUSTAVA I KLASIČNOG DRVENOG KROVIŠTA

COMPARISON OF THE ZOLLINGER SYSTEM AND CLASSIC TIMBER ROOF STRUCTURE

Dean Čizmar, Ivan Volarić

Tehničko veleučilište u Zagrebu, Graditeljski odjel, Avenija Većeslava Holjevca 15, Zagreb

Sažetak

Odabir optimalnog statičkog sustava kod projektiranja konstrukcije zadaća je svakog odgovornog projektanta. U ovom radu bit će prikazana usporedba prostornog Zollinger sustava i ravninskog klasičnog drvenog krovništva nad istom tlocrtnom površinom. Zollinger sustav građenja kratkim lamela patentirao je Friedrich Zollinger i primjenjuje se od 1918. godine, a valjkasti oblik krovništva omogućuje bolju iskoristivost prostora i optimalniji prijenos opterećenja, što će u konačnici rezultirati uštedama u potrebnim količinama materijala za gradnju. Kod klasičnih drvenih krovništva koja imaju široku primjenu javlja se problem oblikovanja čvornih detalja, te je često potrebno povećavati dimenzije poprečnih presjeka elemenata radi optimalnog prijenosa opterećenja u spojevima.

***Ključne riječi:** Zollinger sustav, drveno krovništvo, prostorne konstrukcije,*

Abstract

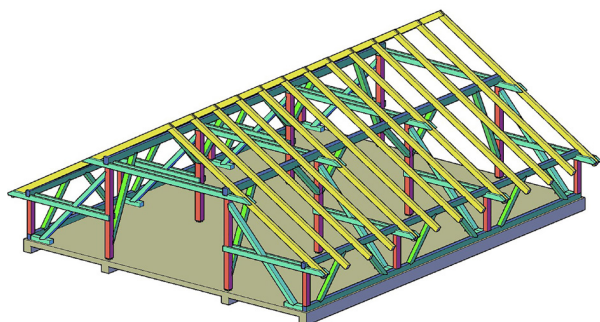
Choosing an optimal static system is the responsibility of designer. In this paper, a comparison of the spatial Zollinger system and a classical timber roof structure is given. Friedrich Zollinger patents the Zollinger system in 1918. and its cylinder shape roof allow better space utilization and optimum load transfer, which will ultimately result in savings in the required amount of construction materials. Traditional timber roofs, widely used, usually have the problem in joint details, and it is often necessary to increase the cross-sectional dimension of the elements for optimum load transfer.

***Ključne riječi:** Zollinger, timber roof structure, spatial structures*

1. Uvod

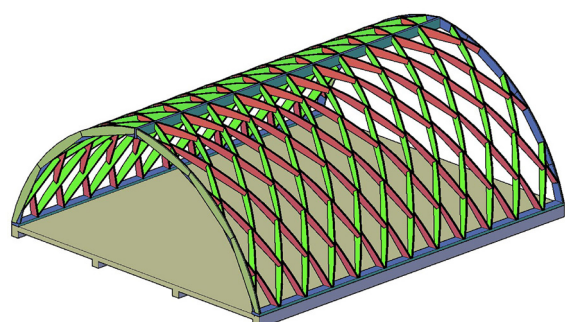
1. Introduction

Klasična drvena krovništva tradicionalni su sustavi gradnje koji u Hrvatskoj imaju široku primjenu. U područjima bogatim šumama kao što su npr. Posavina i Gorski kotar cijeli objekti su u povijesti građeni od drveta. Razlog široke primjene drveta kod krovnih konstrukcija u Hrvatskoj svako treba tražiti u povijesti, s obzirom na tradiciju gradnje s prirodnim materijalima. Ovisno o tlocrtu objekta izvode se različiti tipovi klasičnih krovnih konstrukcija, a najčešće se kod jednostavnih tlocrta primjenjuje dvostrešno krovništvo, kod kojeg nosivu konstrukciju čini tzv. dvostruka stolica. Prilikom gradnje obiteljskih kuća u Hrvatskoj danas dominira armirano betonska međukatna nosiva konstrukcija, te je stoga moguće opterećenja iz krovne ravnine prenijeti direktno u nosivu međukatnu konstrukciju. Prilikom izrade klasičnih drvenih krovništva bilo da se radi o konstrukcijama s tzv. stolicama, ili tzv. visuljama zamjetna je vrlo velika potrošnja drva. Iskoristivost pojedinih elementa unutar nosive konstrukcije vrlo je malena, ali s obzirom na raspored spajala i dimenzije ostalih elementa, nije moguće korigirati dimenzije poprečnih presjeka. Prilikom izgradnje klasičnih drvenih krovništva često je potrebno transportirati elemente vrlo velikih duljina, a kvalitetno oblikovanje detalja je vrlo složeno ukoliko nije korištena CNC obrada.



Slika 1: Model klasičnog drvenog krovišta s dvostrukom stolicom

Figure 1: Model of traditional timber double chair stool structure



Slika 2: Model Zollinger sustava gradnje s kratkim lamelama

Figure 2: Model of Zollinger system with short elements

Analizirajući povijest drvene gradnje dolazimo do vrlo racionalnog sustava koji se počeo primjenjivati u Njemačkoj 1918. godine. Friedrich Zollinger spomenute godine patentira sustav gradnje s kratkim „Zollinger“ lamelama, od kojih se tvori krovna konstrukcija. Ovaj sustav pronalazi široku primjenu kod obnove poslijeratne Njemačke, s obzirom na brzinu i jednostavnost gradnje. Krovnu konstrukciju tvori velik broj jednakih elemenata posebne geometrije, a kod obiteljskih kuća krovište je bačvastog oblika. Zollinger sustav moguće je uz obiteljske kuće primjenjivati i kod izgradnje konstrukcija velikih raspona. Usporedba Zollinger sustava i klasičnog drvenog krovišta s dvostrukom stolicom iznad istog tlocrta biti će prikazana u nastavku.

Tablica 1: Koeficijenti oblika opterećenja snijegom

Table 1: Shape factor coefficients

Kut nagiba krova	$0^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ$	$15^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
Koeficijent oblika μ_1	0,8	0,8	$0,8 \cdot (60 - \alpha) / 30$	0,0
Koeficijent oblika μ_2	0,8	$0,8 + 0,6 \cdot (\alpha - 15) / 30$	$1,1 \cdot (60 - \alpha) / 30$	0,0
Koeficijent oblika μ_3	$0,8 + 0,8\alpha / 30$	$0,8 + 0,8\alpha / 30$	1,6	posebna razmatranja

2. Klasično drveno krovište

2. Traditional timber roof structure

Klasično krovište s dvostrukom stolicom projektirano je nad tlocrtom dimenzija 10 metara x 12.4 metra, pretpostavljena lokacija je Zagreb, a krovna konstrukcija je visine 4.3 metra u sljemenu dok je kut nagiba krovne ravnine $\alpha=30^\circ$. Krovna konstrukcija ima drveni nadozid visine 1.4 metra, kako bi usporedba dva sustava bila relevantna. Projektirana konstrukcija se sastoji od rogova pomoću kojih se prenose opterećenja iz krovne ravnine u podrožnice. Djelovanja od podrožnice se prenose u stupove i ruke, koje uz prostornu stabilnost s obzirom na projektirani dvostruki zasjek, imaju punu statičku funkciju. Iz stupova se djelovanja dalje prenose na međukatnu konstrukciju koja je projektirana kao armirano betonska. Klasično drveno krovište s dvostrukom stolicom potrebno je izvesti s klještimama koja povezuju rogove, podrožnice i stupove, koja stabiliziraju cijelo krovište kod pojave nesimetričnih djelovanja. Uz sve navedene elemente u konstrukciju je potrebno ugraditi kosnike koji stabiliziraju konstrukciju u poprečnoj ravnini.

2.1. Analiza opterećenja za klasično drveno krovište

2.1. Load analysis for traditional timber roof structure

Analiza opterećenja provedena je za stalna i promjenjiva djelovanja. U stalna djelovanja ubraja se vlastita težina, dok se snijeg i vjetera ubrajaju u promjenjiva djelovanja. Slojevi krova za koje je proveden proračun su: crijep tipa Biber, letva, kontra letva, paropropusna folija, daščana oplata, termoizolacija, vlastita težina nosive konstrukcije, a u stalno opterećenje je uvrštena i težina instalacija.

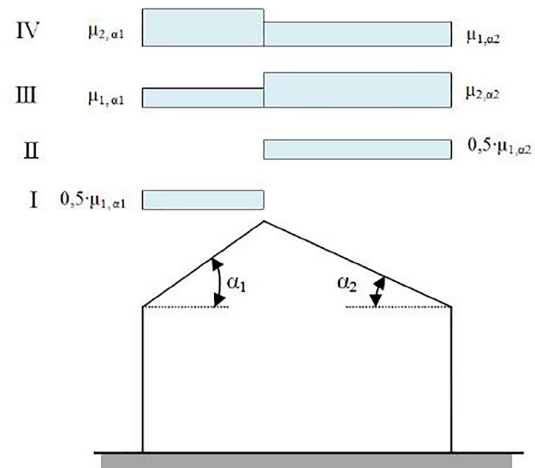
Ukupno karakteristično stalno opterećenje iznosi $G_k=1.24 \text{ kN/m}^2$.

Proračun karakterističnog opterećenje snijega S_k prema Eurokodu 1 HRN EN 1991-1-3 [10] proveden je prema formuli (1).

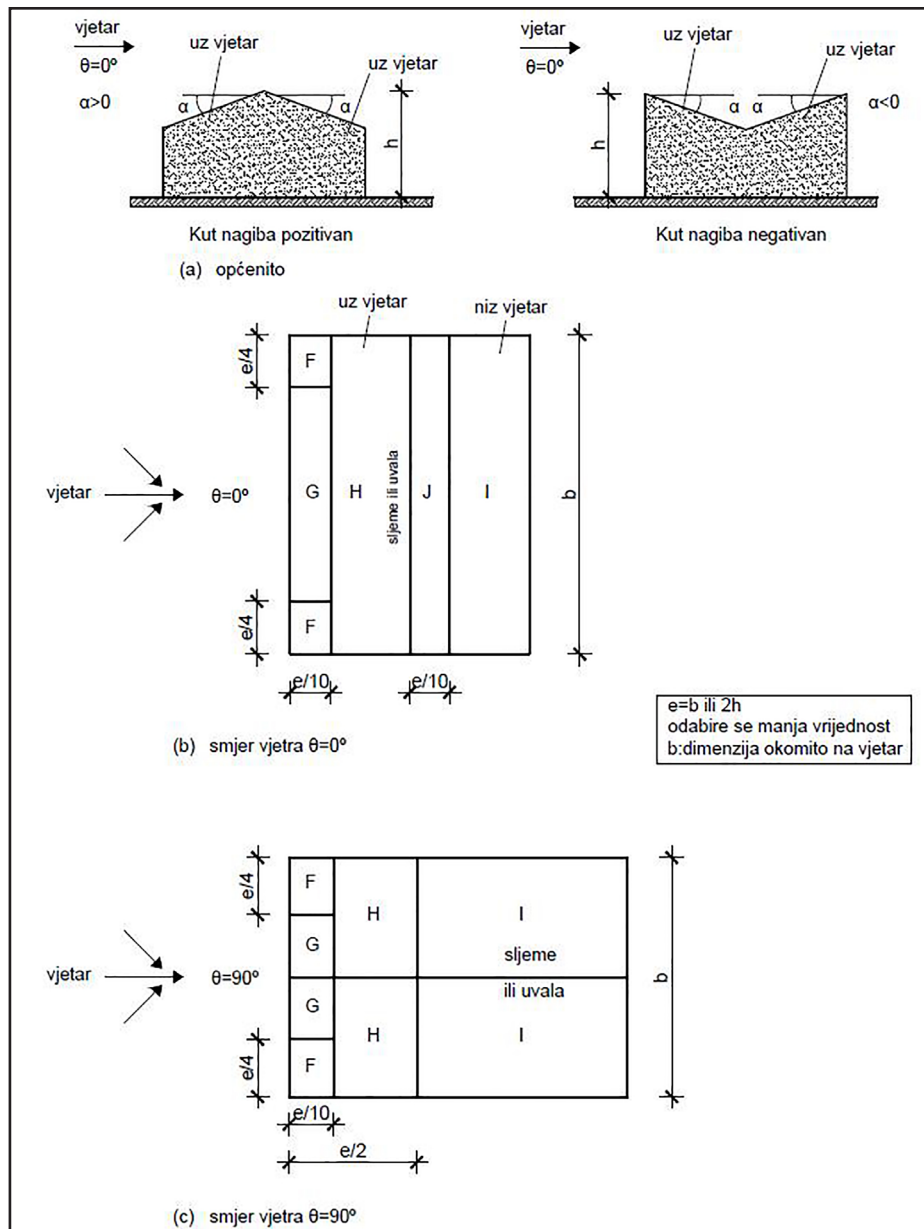
$$S_k = \mu_i \times c_e \times c_t \times s_k \quad (1)$$

gdje je s_k karakteristična vrijednost opterećenja snijega na tlo, μ_i koeficijent oblika, c_e koeficijent izloženosti, c_t koeficijent topline.

Koeficijent oblika μ_i ovisi o tipu krovišta, a u proračunu klasičnog krovišta s dvostrukom stolicom razmatrane su sve četiri varijante prema Slici 3.



Slika 3: Varijante koeficijenta oblika kod dvostrešnih krovišta
Figure 3: Shape factor coefficient for double pitched roofs



Slika 4: Zone kod koeficijenta vanjskog tlaka za dvostrešne krovove
Figure 4: Zones for external pressure coefficients (double pitched roof)

Analizom opterećenja na opisani način karakteristično opterećenje snijega S_k za nagib krovne ravnine $\alpha=30^\circ$ i lokaciju Zagreb iznosi između 0.50 kN/m^2 i 1.38 kN/m^2 , ovisno o koeficijentu oblika μ_r , te su navedene vrijednosti uvrštene u statički model izrađen u programu Tower.

Promjenjivo opterećenje vjetra dijeli se na vanjski i unutarnji pritisak. Izračun pritiska vjetra na vanjsku oblogu konstrukcije w_e vrši se prema Eurokodu 1 HRN EN 1991-1-4 [11] pomoću formule (2).

$$w_e = q_p \times c_e(z) \times c_{pe} \quad (2)$$

gdje je q_p vršni tlak srednje brzine vjetra, $c_e(z)$ koeficijent izloženosti i c_{pe} koeficijent vanjskog tlaka. Vršni tlak srednje brzine vjetra q_p izračunava se pomoću osnovne brzine vjetra koja za područje Zagreba iznosi 20 m/s .

Koeficijent izloženosti $c_e(z)$ varira ovisno o kategoriji zemljišta, te visini objekta koja kod konstrukcije za koju se vrši analiza iznosi 8 metara. Koeficijent vanjskog tlaka c_{pe} prilikom izračuna uzima u obzir zone krova u kojima djeluje opterećenje vjetra te površinu istih, a zone se razlikuju i s obzirom dali je smjer vjetra longitudinalan ili transverzalan u odnosu na objekt. Zone za izračun koeficijenta vanjskog tlaka kod dvostrešnih krovišta prema kojima je vršen proračun prikazane su na Slici 4. Vrijednosti pritiska vjetra na vanjsku oblogu konstrukcije w_e kod klasičnog krovišta s dvostrukom stolicom nagiba $\alpha=30^\circ$ variraju po zonama od -0.99 kN/m^2 do -0.11 kN/m^2 , što bi značilo da u svim zonama vjetra djeluje kao odižuće djelovanje.

Izračun pritiska vjetra na unutarnje površine w_i vrši se prema Eurokodu 1 HRN EN 1991-1-4 [11] pomoću formule (3).

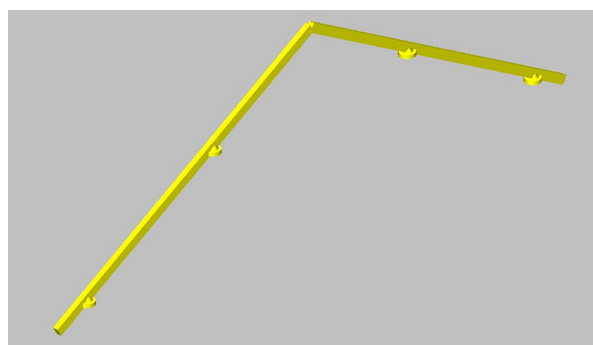
$$w_i = q_p \times c_e(z) \times c_{pi} \quad (3)$$

gdje je q_p vršni tlak srednje brzine vjetra, $c_e(z)$ koeficijent izloženosti i c_{pi} koeficijent unutarnjeg tlaka. Vrijednosti koeficijent unutarnjeg tlaka c_{pi} ovise o dimenzijama i položaju otvora na konstrukciji, no za razmatranu konstrukciju nisu uzeti u obzir, već su u proračun uvrštene najnepovoljnije vrijednosti. Pritisak vjetra na unutarnje površine w_i iznosi kod unutarnjeg tlaka 0.19 kN/m^2 , a kod unutarnjeg podtlaka 0.28 kN/m^2 .

2.2. Proračunski model klasičnog krovišta

2.2. Calculation model of traditional roof structure

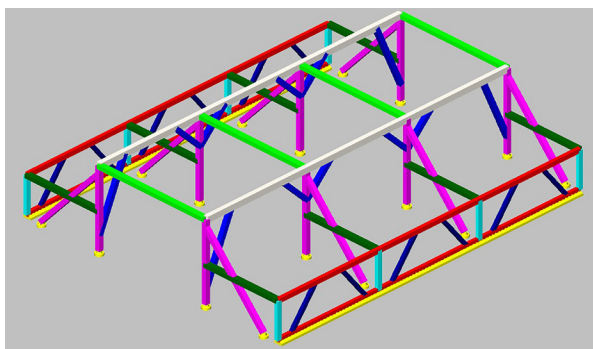
Proračunski model klasičnog krovišta s dvostrukom stolicom izrađen je u programu Tower. Rogovi konstrukcije modelirani su zasebno (Slika 5), a najnepovoljnija kombinacija opterećenja je Stalno + Snijeg + Vjetar + Unutarnji podtlak.



Slika 5: Proračunski model rogova s ležajevima

Figure 5: Calculation model with bearings

Ležajevi su modelirani bez mogućnosti preuzimanja momenata savijanja, te isti preuzimaju sile koje djeluju u smjerovima X, Y i Z. Reakcije dobivene na ležajevima za najnepovoljniju kombinaciju prenesene su na drugi dio modela (Slika 6) u područje podrožnica. Na taj način se unutar podrožnica javlja dvoosno savijanja koje se kod skraćenih proračuna često zanemaruje. Drveni nadozid u ovom slučaju ne predstavlja krutu ravninu, a s obzirom na to rogovi ne mogu stvoriti ukrutu u poprečnom smjeru podrožnice, te se unutar iste javljaju vrlo veliki momenti savijanja i pomaci u poprečnom smjeru.



Slika 6: Proračunski model klasičnog krovišta

Figure 6: Calculation model of traditional timber structure

Veze između elemenata zadane su kao zglobne, bez mogućnosti prijenosa momenta savijanja, s obzirom da detalji i spajala kod klasičnih drvenih krovništa najčešće nemaju mogućnost prijenosa momenta savijanja u čvorovima. Ispod drvenog nadozida ležaj je modeliran kao linijski, s obzirom da konstrukcija naliježe na armirano betonsku ploču.

2.3. Dimenzioniranje klasičnog krovništa

2.3. Design of traditional roof structure

Dokaz nosivosti unutar ovog rada bit će prikazan za tri skupine elemenata: rogove, glavne podrožnice i stupove, a ostali elementi dimenzionirati će se s obzirom na navedene tri skupine, jer je kod njih vrijednost sila i momenata savijanja znatno manja. Vrlo veliki problem koji se javlja kod klasičnih drvenih krovništa su oslabljenja elementa radi zasijecanja, kako bi se izveli spojevi. Prilikom dimenzioniranja važno je uzeti u obzir navedena oslabljenja, posebno kod vlačno opterećenih presjeka, poradi presijecanja vlakancima drveta. Svi elementi nosive konstrukcije projektirani su od drva klase C24, dok se isto nalazi u okolini 1 klase uporabljivosti, a djelovanje je srednjetrojno. Prilikom dimenzioniranja navedene skupine elemenata relevantne su nosivost na savijanje te nosivost na tlak paralelno s vlakancima. Projektirana nosivost na savijanje $f_{m,d}$ izračunava se pomoću izraza (4).

$$f_{m,d} = k_{mod} \times \frac{f_{m,k}}{\gamma_m} \quad (4)$$

gdje je k_{mod} koeficijent modifikacije koji ovisi o okolini u kojoj se nalazi konstrukcija, $f_{m,k}$ karakteristična nosivost na savijanje i γ_m koeficijent sigurnosti za materijal. Kod drveta klase C24, 1. klase uporabljivosti i srednjetrojnog djelovanja projektirana nosivost na savijanje $f_{m,d}$ iznosi 14.77 N/mm².

Projektirana nosivost na tlak paralelno s vlakancima $f_{c,0,d}$ izračunava se pomoću izraza (5).

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \times \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_m} \quad (5)$$

gdje je k_{mod} koeficijent modifikacije koji ovisi o okolini u kojoj se nalazi konstrukcija, $f_{c,0,k}$ karakteristična nosivost na tlak paralelno s vlakancima i γ_m koeficijent sigurnosti za materijal.

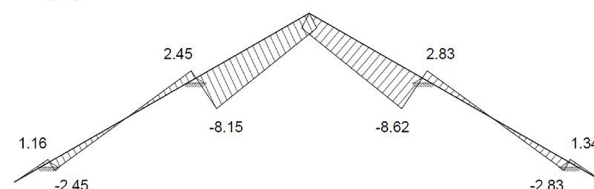
Kod drveta klase C24, 1. klase uporabljivosti i srednjetrojnog djelovanja projektirana nosivost na tlak paralelno s vlakancima $f_{c,0,d}$ iznosi 12.92 N/mm².

2.3.1. Dimenzioniranje roga

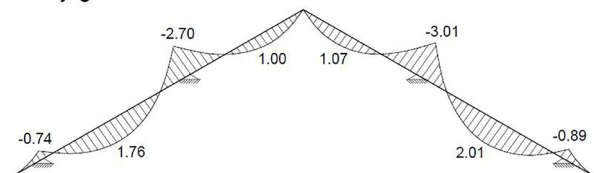
2.3.1. Design of secondary element

Pretpostavljena dimenzija poprečnog presjeka roga je 10 cm x 16 cm, ali vrijednost s kojom se ulazi u dimenzioniranje je 10 cm x 13 cm s obzirom na zasijecanje od 3 centimetra kod nalijeganja na podrožnice. Momentni dijagram M_3 za jedan par najopterećenijih rogova i dijagram uzdužnih sila N za jedan par najopterećenijih rogova prikazan je na Slici 7.

N dijagram



M_3 dijagram



Slika 7: Dijagram uzdužnih sila N i momenta savijanja M_3

Figure 7: Diagrams of axial forces N and bending moments M_3

Analizom dijagrama sa Slike 7. dolazi se do zaključka da se u mjestu nalijeganja rogova na glavne podrožnice pojavljuje maksimalni moment savijanja, te maksimalna uzdužna sila. Maksimalni projektirani moment savijanja M_d iznosi 3.01 kNm, a maksimalna projektirana uzdužna sila N_d je tlačna i iznosi 8.62 kN, navedene vrijednosti su referentne za dimenzioniranje.

Dimenzioniranje roga vršeno je na savijanje s utjecajem bočnog izvijanja, te tlačnu silu s utjecajem izvijanja. Dokaz nosivosti proveden je prema izrazima (6) i (7).

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \times f_{c,0,d}}\right) + \left(\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit,y} \times f_{m,y,d}}\right) \leq 1 \quad (6)$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}}\right) + \left(k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit,y} \times f_{m,y,d}}\right) \leq 1 \quad (7)$$

gdje je $\sigma_{c,0,d}$ projektirana vrijednost tlačnog naprezanja paralelno s vlakancima, $\sigma_{m,y,d}$ projektirana vrijednost naprezanja savijanja oko osi Y, $k_{c,y}$ koeficijent izvijanja oko osi Y, $k_{c,z}$ koeficijent izvijanja oko osi Z, $k_{crit,y}$ koeficijent redukcije projektirane ili proračunske čvrstoće svijanja s obzirom na bočno izvijanje u smjeru Y, $f_{c,0,d}$ projektirana nosivost na tlak paralelno s vlakancima, $f_{m,y,d}$ projektirana nosivost na savijanje oko osi Y i k_m koeficijent oblika poprečnog presjeka.

Projektirana vrijednost tlačnog naprezanja paralelno s vlakancima $\sigma_{c,0,d}$ iznosi 0.66 N/mm², projektirana vrijednost naprezanja savijanja oko osi Y $\sigma_{m,y,d}$ iznosi 10.61 N/mm², koeficijent redukcije projektirane ili proračunske čvrstoće svijanja s obzirom na bočno izvijanje $k_{crit,y}$ iznosi

1.00, koeficijent izvijanja oko osi Y $k_{c,y}$ iznosi 0.63, koeficijent izvijanja oko osi Z $k_{c,z}$ iznosi 0.42 i koeficijent oblika poprečnog presjeka k_m za pravokutne poprečne presjeke iznosi 0.7.

Uvrštavanjem navedenih veličina u izraze (6) i (7) dolazimo do podatka da su pretpostavljene dimenzije poprečnog presjeka roga zadovoljavajuće, te da je iskoristivost elementa 79%.

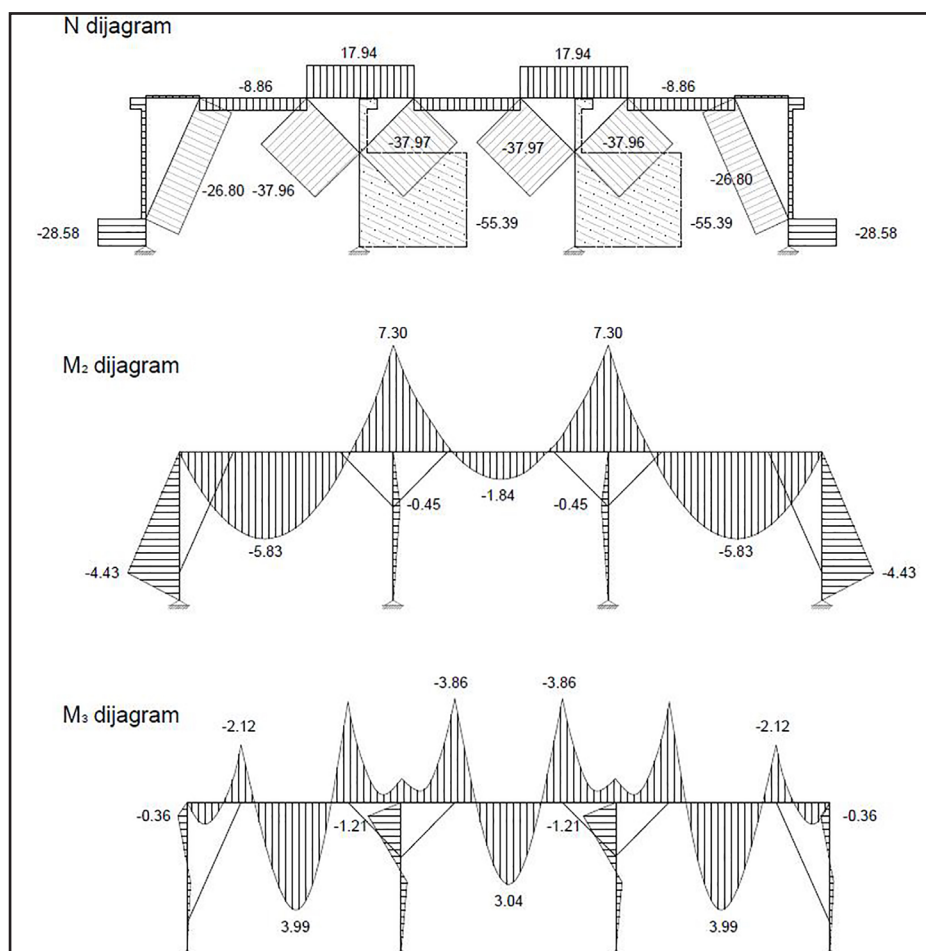
$$\left(\frac{0.66}{0.63 \times 12.92}\right) + \left(\frac{10.61}{1.00 \times 14.77}\right) \leq 1 \quad (6a)$$

$$0.79 \leq 1$$

$$\left(\frac{0.66}{0.42 \times 12.92}\right) + \left(0.7 \times \frac{10.61}{1.00 \times 14.77}\right) \leq 1 \quad (7a)$$

$$0.62 \leq 1$$

Također valja napomenuti da koeficijent redukcije projektirane ili proračunske čvrstoće savijanja s obzirom na bočno izvijanje sa svojom vrijednošću upućuje da nema opasnosti od bočnog izvijanja elementa.



Slika 8: Dijagram momenta savijanja M_2 i M_3 te uzdužnih sila N

Figure 8: Diagrams of bending moments M_2 and M_3 and axial forces N

2.3.2. Dimenzioniranje glavne podrožnice

2.3.2. Design of mail purlin

Pretpostavljena dimenzija poprečnog presjek glavne podrožnice je 16 cm x 20 cm i vrijednost s kojom se ulazi u dimenzioniranje je 16 cm x 20 cm s obzirom da zasijecanje elementa nije na mjestu najvećih naprezanja. Momentni dijagrami M_2 i M_3 , te dijagram uzdužnih sila N prikazani su na Slici 8. za uzdužni smjer konstrukcije.

Analizom dijagrama sa Slike 8. dolazi se do zaključka da u ravnini koja je udaljena 2 metra od stupa na podrožnici djeluju kombinacija maksimalnih momenta savijanja oko osi Y i Z zajedno s tlačnom uzdužnom silom. Projektirani moment savijanja $M_{d,y}$ za koji će se vršiti dimenzioniranje iznosi 4.38 kNm, projektirani moment savijanja $M_{d,z}$ za koji će se vršiti dimenzioniranje iznosi 5.49 kNm, a projektirana uzdužna sila N_d u toj djelu poprečnog presjeka je tlačna i iznosi 8.86 kN. Dimenzioniranje glavne podrožnice izvršeno je na savijanje s utjecajem bočnog izvijanja, te na tlačnu silu s utjecajem izvijanja. Dokaz nosivosti proveden je prema izrazima (8) i (9).

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \times f_{c,0,d}}\right) + \left(\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit,y} \times f_{m,y,d}}\right) + \left(k_m \times \frac{\sigma_{m,z,d}}{k_{crit,z} \times f_{m,z,d}}\right) \leq 1 \quad (8)$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}}\right) + \left(k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit,y} \times f_{m,y,d}}\right) + \left(\frac{\sigma_{m,z,d}}{k_{crit,z} \times f_{m,z,d}}\right) \leq 1 \quad (9)$$

gdje je $\sigma_{c,0,d}$ projektirana vrijednost tlačnog naprezanje paralelno s vlakancima, $\sigma_{m,y,d}$ projektirana vrijednost naprezanja savijanja oko osi Y , $\sigma_{m,z,d}$ projektirana vrijednost naprezanja savijanja oko osi Z , $k_{c,y}$ koeficijent izvijanja oko osi Y , $k_{c,z}$ koeficijent izvijanja oko osi Z , $k_{crit,y}$ koeficijent redukcije projektirane ili proračunske čvrstoće svijanja s obzirom na bočno izvijanje u smjeru Y , $k_{crit,z}$ koeficijent redukcije projektirane ili proračunske čvrstoće svijanja s obzirom na bočno izvijanje u smjeru Z , $f_{c,0,d}$ projektirana nosivost na tlak paralelno s vlakancima, $f_{m,y,d}$ projektirana nosivost na savijanje oko osi Y , $f_{m,z,d}$ projektirana nosivost na savijanje oko osi Z i k_m koeficijent oblika poprečnog presjeka.

Projektirana vrijednost tlačnog naprezanje paralelno s vlakancima $\sigma_{c,0,d}$ iznosi 0.24 N/mm², projektirana vrijednost naprezanja savijanja oko osi Y $\sigma_{m,y,d}$ iznosi 5.53 N/mm², projektirana

vrijednost naprezanja savijanja oko osi Z $\sigma_{m,z,d}$ iznosi 10.03 N/mm², koeficijent redukcije projektirane ili proračunske čvrstoće savijanja s obzirom na bočno izvijanje $k_{crit,y}$ i $k_{crit,z}$ iznosi 1.00, koeficijent izvijanja oko osi Y $k_{c,y}$ iznosi 1.00, koeficijent izvijanja oko osi Z $k_{c,z}$ iznosi 0.24 i koeficijent oblika poprečnog presjeka k_m za pravokutne poprečne presjeka iznosi 0.7. Uvrštavanjem navedenih veličina u izraze (8) i (9) dolazimo do podatka da su pretpostavljene dimenzije poprečnog presjeka glavne podrožnice zadovoljavajuće, te da je iskoristivost elementa 82%.

$$\left(\frac{0.24}{1.00 \times 14.15}\right) + \left(\frac{5.53}{1.00 \times 18.46}\right) + \left(0.7 \times \frac{10.03}{1.00 \times 18.46}\right) \leq 1 \quad (8a)$$

$$0.70 \leq 1$$

$$\left(\frac{0.24}{0.24 \times 14.15}\right) + \left(0.7 \times \frac{5.53}{1.00 \times 18.46}\right) + \left(\frac{10.03}{1.00 \times 18.46}\right) \leq 1 \quad (9a)$$

$$0.82 \leq 1$$

Dokaz nosivosti glavnih podrožnica upućuje da je potrebno posebnu pažnju obratiti na slabiju os poprečnog presjeka, te da je posebno važno u analizu uzeti dvoosno savijanje kako bi proračun konstrukcije bio cjelovit i pouzdan.

2.3.3. Dimenzioniranje stupa

2.3.3. Design of column

Pretpostavljena dimenzija poprečnog presjek stupa je 16 cm x 16 cm, a vrijednost s kojom se ulazi u dimenzioniranje je 11 cm x 16 cm s obzirom da se vrši zasijecanje elementa od 5 centimetara kod spajanja stupova i ruku. Momentni dijagrami M_2 i M_3 , te dijagram uzdužnih sila N prikazani su na Slici 9, a mjesto najnepovoljnije kombinacije djelovanja je upravo u spoju stupa i ruku. Unutar stupova javljaju se momenti savijanja koji su posljedica spajanja kosnika na stupove, a do istih dolazi uslijed nejednolikog djelovanja vjetra.

Projektirani moment savijanja $M_{d,y}$ za koji će se vršiti dimenzioniranje iznosi 0.55 kNm, projektirani moment savijanja $M_{d,z}$ za koji će se vršiti dimenzioniranje iznosi 0.45 kNm, a projektirana uzdužna sila N_d u tom djelu poprečnog presjeka je tlačna i iznosi 54.96 kN.

Dimenzioniranje stupa izvršeno je na savijanje s utjecajem bočnog izvijanja, te na tlačnu silu s utjecajem izvijanja. Dokaz nosivosti proveden je prema izrazima (8) i (9).

Projektirana vrijednost tlačnog naprezanja paralelno s vlakancima $\sigma_{c,0,d}$ iznosi 3.12 N/mm², projektirana vrijednost naprezanja savijanja oko osi Y $\sigma_{m,y,d}$ iznosi 1.17 N/mm², projektirana vrijednost naprezanja savijanja oko osi Z $\sigma_{m,z,d}$ iznosi 1.39 N/mm², koeficijent redukcije projektirane ili proračunske čvrstoće svijanja s obzirom na bočno izvijanje $k_{crit,y}$ i $k_{crit,z}$ iznosi 1.00, koeficijent izvijanja oko osi Y $k_{c,y}$ iznosi 1.00, koeficijent izvijanja oko osi Z $k_{c,z}$ iznosi 0.75 i koeficijent oblika poprečnog presjeka k_m za pravokutne poprečne presjeke iznosi 0.7. Uvrštavanjem navedenih veličina u izraze (8) i (9) dolazimo do podatka da su pretpostavljene dimenzije poprečnog presjeka stupa zadovoljavajuće, te da je iskoristivost elementa 47%.

$$\left(\frac{3.12}{1.00 \times 12.92}\right) + \left(\frac{1.17}{1.00 \times 14.77}\right) + \left(0.7 \times \frac{1.39}{1.00 \times 14.77}\right) \leq 1$$

$$0.39 \leq 1 \quad (8b)$$

$$\left(\frac{3.12}{0.75 \times 12.92}\right) + \left(0.7 \times \frac{1.17}{1.00 \times 14.77}\right) + \left(\frac{1.39}{1.00 \times 14.77}\right) \leq 1$$

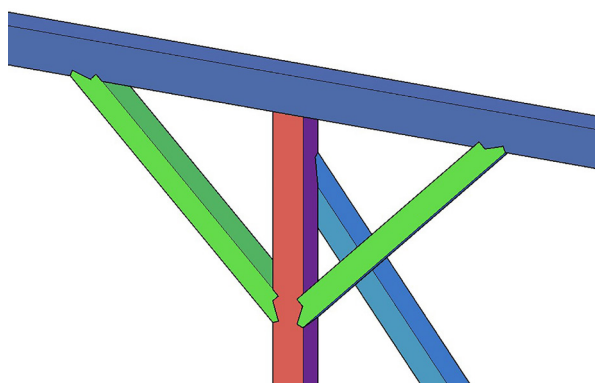
$$0.47 \leq 1 \quad (9b)$$

Dimenzije poprečnog presjeka stupa gledajući samo iskoristivost poprečnog presjeka bilo bi moguće i smanjiti, ali radi izvedbe spojeva te prijenosa sila nije moguće raditi korekcije.

2.4. Oblikovanje detalja kod klasičnog krovišta

2.4. Design of details for traditional roof structure

Detalje kod klasičnih drvenih krovišta treba oblikovati s posebnom pažnjom kako se oko spajala ne bi javljale pukotine ili kako ne bi došlo do sloma i gubitka stabilnosti. Kod klasičnog krovišta s dvostrukom stolicom dva detalja se ističu kao posebno problematična za oblikovanje. Spoj stupa i ruku radi pojave vrlo velike uzdužne sile može uzrokovati gnječenje vlaknaca u stupu, ukoliko zasjek nije izveden odgovarajuće dubine. Kod analizirane konstrukcije potrebno je izvesti dvostruki zasjek dubine 2.5 cm, kako bi prijenos sila bio adekvatan.

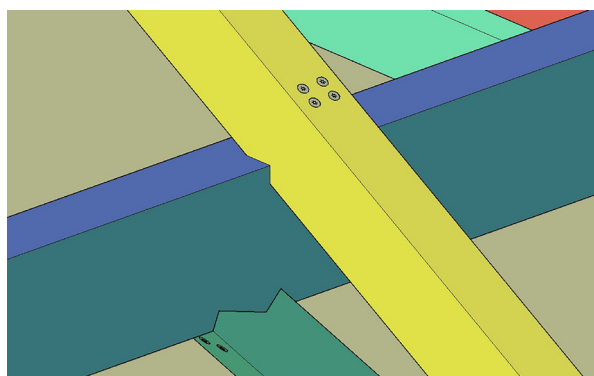


Slika 9: Spoj stupa i ruku dvostrukim zasjekom

Figure 9: Connection detail of column and diagonal elements („hands“)

U praksi se vrlo često može vidjeti da se ruke izvode bez zasjeka, te se samo čavlama spajaju za stupove. Tako izvedeni detalji mogu imati samo stabilizacijsku funkciju, te ruke nije moguće modelirati da preuzimaju opterećenja s podrožnica.

Drugi detalj kojem se prečesto posvećuje premala pažnja je spoj roga s podrožnicom. Rog je potrebno zasjeci kako bi pravilno nalijegao na podrožnicu, te kako bi prijenos sila bio jednolik, a elemente je potrebno spojiti s dovoljnim brojem spajala, uz pravilan međusobni razmak. Razmak spajala kod ovog detalja predstavljao je vrlo velik problem i u analiziranom modelu.



Slika 10: Spoj roga i podrožnice

Figure 10: Connection of secondary element to purlin

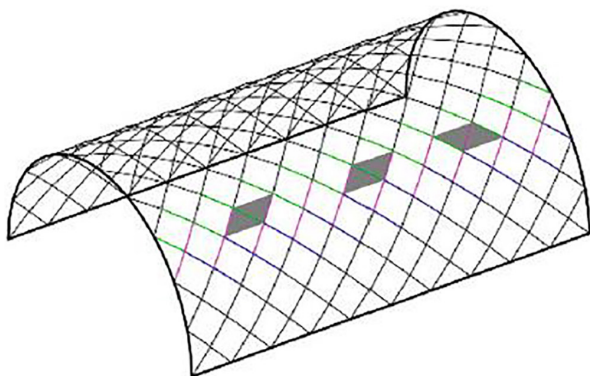
Spajala koja su odabrana u analiziranom modelu su vijci za drvo Sihga GoFix FS 8mm x 240mm, te ih je potrebno u spoj postaviti četiri kako bi nosivost spoja bila zadovoljavajuća. Širina roga iznosi 10 centimetara, te je to jedan od glavnih problema. Međusobni razmak vijaka bi prema uputama proizvođača trebao biti minimalno 96 milimetara, te na taj način nije moguće oblikovati detalj.

Kako se ne bi povećavala širina podrožnice moguće je primijeniti međusobni razmak od 40 milimetara, ali je potrebno vijke postaviti u predbušene rupe. Spoj roga s podrožnicom u praksi se često izvodi bez pravilnog zasijecanja, te samo s jednim čavlom vrlo velikog promjera. Na taj način prilikom zabijanja čavla dolazi do cijepanja elementa, te se dobiva detalj kojem je nosivost upitna.

3. Zollinger sustav

3. Zollinger system

Glavna obilježja Zollinger sustava gradnje su tzv. Zollinger lamele iste duljine koje se međusobno spajaju u čvoru, a njihova stabilnost se osigurava postavljanjem vijka. Ovaj sustav gradnje je prostorna konstrukcija, a položaj lamela u prostoru dobiva se izradom mreže zavojnica koje opisuju valjak. Točke gdje se zavojnice međusobno sijeku su čvorovi Zollinger krovšta. Kako bi se lamele mogle spojiti u čvorovima, te kako bi se mogao postaviti vijak, potrebno je korigirati čvorove, te ih pomaknuti za željeni razmak. Na taj način dobiva se čvor u kojem jedna lamela prolazi kontinuirano kroz čvor, dok druge dvije u istom čvoru završavaju, a kroz sve tri lamele prolazi vijak koji osigurava prostornu stabilnost.



Slika 11: Mreža zavojnica oko valjka koja tvori čvorove Zollinger sustava

Figure 11: Grid of elements around cylinder composing Zollinger system

Zollinger sustav projektiran je nad istim tlocrtom kao i klasično drveno krovšte dimenzija 10 m x 12.4 m, a pretpostavljena lokacija je također Zagreb.

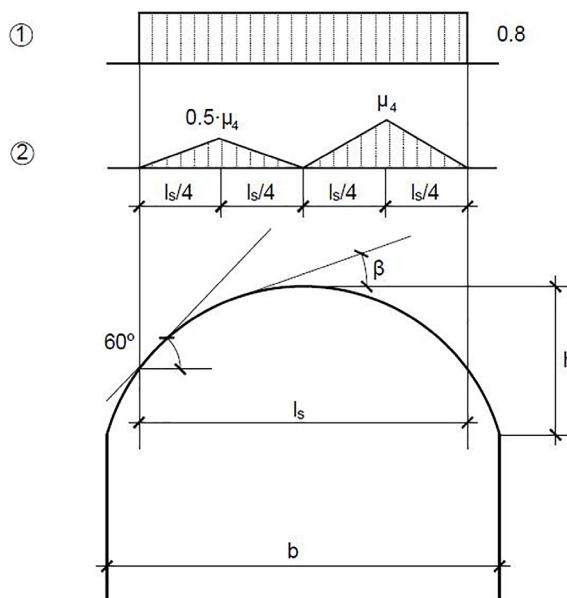
Projektirana konstrukcija sastoji se od Zollinger lamela kojima je gornji pojas zaobljen, kako bi slojevi krova precizno nalijegali na nosivu konstrukciju. Uz Zollinger lamelu konstrukcija se sastoji od bočnih elemenata na koje se spajaju rubne lamela, sljemene daske, te daske koje leže na međukatnoj armirano betonskoj ploči. Visina krovne konstrukcije u sljemenu iznosi 4.3 m.

3.1. Analiza opterećenja za Zollinger sustav

3.1. Load analysis for Zollinger system

Analiza opterećenja provedena je za stalna i promjenjiva djelovanja. Ukupno stalno karakteristično djelovanje s kojim se ulazi u proračun ne razlikuje se od prethodnog modela te iznosi $G_k=1.24 \text{ kN/m}^2$. Slojevi krova također su identični kako bi finalna usporedba rezultata bila relevantna.

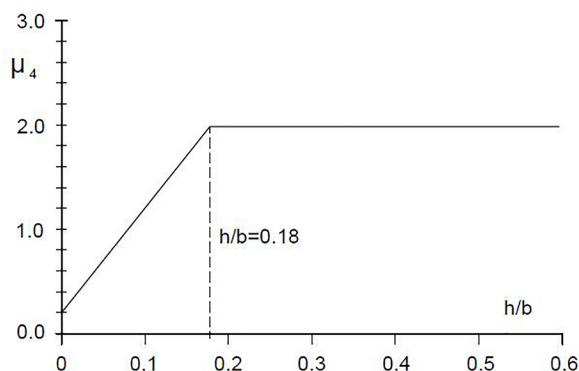
Proračun karakterističnog opterećenje snijega S_k prema Eurokodu 1 HRN EN 1991-1-3 [10] proveden je prema formuli (1). Koeficijent oblika μ_i ovisi o tipu krovšta, a u proračunu cilindričnih krovšta razmatrane su sve dvije varijante prema Slici 12.



Slika 12: Parametri za određivanje koeficijenta oblika za cilindrične krovove

Figure 12: Parameters for shape coefficients for cylindrical roofs

Kod prve varijante koeficijent oblika iznosi 0.8 te je opterećenje snijega jednoliko raspoređeno po krovnoj plohi. U drugoj varijanti koeficijent oblika ovisi o odnosu visine objekta i raspona luka, te se do vrijednosti dolazi očitavanjem iz dijagrama s Slike 13.



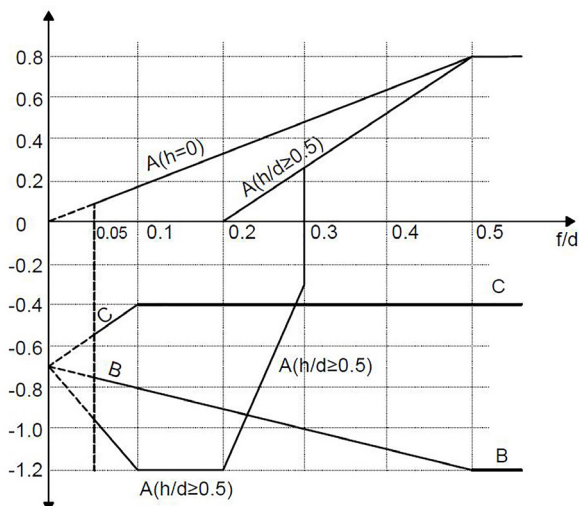
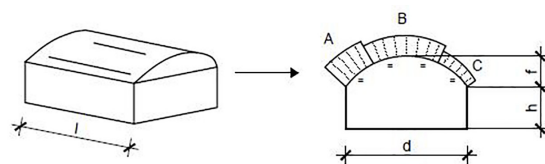
Slika 13: Ovisnost koeficijenta kod cilindričnih krovova o odnosu visine i raspona

Figure 13: Relation of coefficients for cylindrical roof upon height/span ratio

Analizom opterećenja na opisani način karakteristično opterećenje snijega S_k za krovšte visine 4.30 metra iznosi između 1.00 kN/m² i 2.50 kN/m², ovisno o koeficijentu oblika μ_r , te su navedene vrijednosti uvrštene u statički model izrađen u programu Robot.

Promjenjivo opterećenje vjetra kao i kod klasičnog krovšta s dvostrukom stolicom dijeli se na vanjski i unutarnji pritisak. Izračun pritiska vjetra na vanjsku oblogu konstrukcije w_e vrši se prema Eurokodu 1 HRN EN 1991-1-4 [11] pomoću formule (2). Svi parametri s kojima se ulazi u proračun izuzev koeficijenta vanjskog tlaka c_{pe} ostaju isti kao i u prethodnom slučaju. Koeficijent vanjskog tlaka c_{pe} kod valjkastih krovova uzima u obzir tri zone, a vrijednosti ovise o visini luka, rasponu luka, te visini zida. Vrijednosti koeficijenata vanjskog tlaka te dijagrami za izračun prikazani su na Slici 14.

Vrijednosti pritiska vjetra na vanjsku oblogu konstrukcije w_e kod Zollinger analiziranog modela variraju po zonama od 0.28 kN/m² do -0.61 kN/m², a vjetar u prednjem dijelu konstrukcije djeluje tlačno, dok u stražnjem dijelu konstrukcije s obzirom na geometriju krova stvara podtlak i djeluje vlačno.



Slika 14: Dijagram za izračun koeficijenta vanjskog tlaka kod valjkastih krovova

Figure 14: Diagram of external pressure coefficients for cylindrical roofs

Izračun pritiska vjetra na unutarnje površine w_i vrši se prema Eurokodu 1 HRN EN 1991-1-4 [11] pomoću formule (3).

$$w_i = q_p \times c_e(z) \times c_{pi} \quad (3)$$

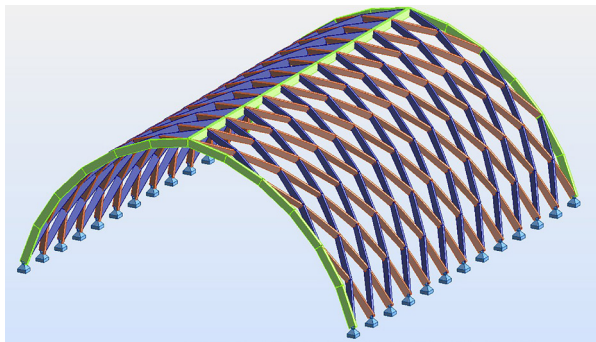
gdje je q_p vršni tlak srednje brzine vjetra, $c_e(z)$ koeficijent izloženosti i c_{pi} koeficijent unutarnjeg tlaka. Vrijednosti koeficijent unutarnjeg tlaka c_{pi} ovise o dimenzijama i položaju otvora na konstrukciji, no za razmatranu konstrukciju nisu uzeti u obzir, već su u proračun uvrštene najnepovoljnije vrijednosti. Pritisak vjetra na unutarnje površine w_i iznosi kod unutarnjeg tlaka 0.19 kN/m², a kod unutarnjeg podtlaka 0.28 kN/m².

3.2. Proračunski model Zollinger sustava

3.2. Design model of Zollinger system

Proračunski model Zollinger sustava izrađen je u programu Robot radi vrlo složenosti geometrije. Najnepovoljnija kombinacija opterećenja je Stalno + Snijeg 2, a ležajevi su modelirani bez mogućnosti preuzimanja momenata savijanja, te isti preuzimaju sile koje djeluju u smjerovima X, Y i Z.

Veze između lamela modelirane su kao zglobne bez mogućnosti prijenosa momenta savijanja. Vijak koji se postavlja u spoju lamela nema mogućnost prijenosa momenta savijanja te isti osigurava stabilnost konstrukcije. Rubni elementi modelirani su također bez mogućnosti prijenosa momenta savijanja u čvorovima, kako se u njima ne bi javili vrlo veliki nerealni momenti savijanja, koji zbog podatnosti spajala nisu realno ostvarivi.



Slika 15: Proračunski model Zöllinger krovišta u programu Robot

Figure 15: Design model of Zöllinger system modelled in program Robot

3.3. Dimenzioniranje Zöllinger sustava

3.3. Design of Zöllinger system

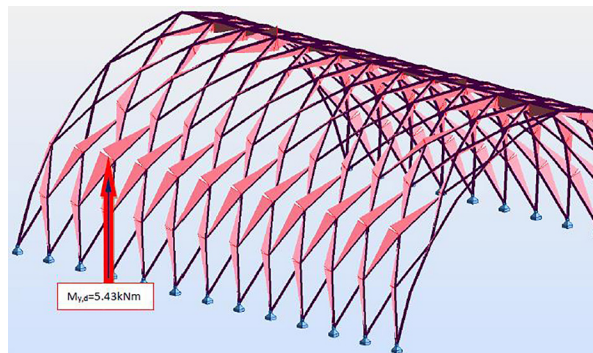
Dokaz nosivosti unutar ovog rada biti će prikazan samo za tzv. Zöllinger lamelu, a ostali elementi dimenzionirati će se s obzirom na geometrijske karakteristike Zöllinger lamele, iz razloga što ostali elementi nemaju nosivu funkciju. Svi drveni elementi kod analiziranog modela projektirani su od drveta klase C24, dok se isto nalazi u okolini 1 klase uporabljivosti. Prilikom dimenzioniranja elementa relevantne su nosivost na savijanje, te nosivost na tlak paralelno s vlakancima, a kao i u prethodnoj analizi projektirana nosivost na savijanje $f_{m,d}$ izračunata je pomoću izraza (4), dok je projektirana nosivost na tlak paralelno s vlakancima $f_{c,0,d}$ izračunata pomoću izraza (5).

3.3.1. Dimenzioniranje lamele

3.3.1. Design of lamella

Pretpostavljena dimenzija poprečnog presjeka lamele varira od 16 cm – 20 cm visine dok je predviđena širina 6 cm. Dimenzioniranje je vršeno se dimenzijom 20 cm x 6 cm s obzirom da u tom području djeluje najnepovoljnija interakcija

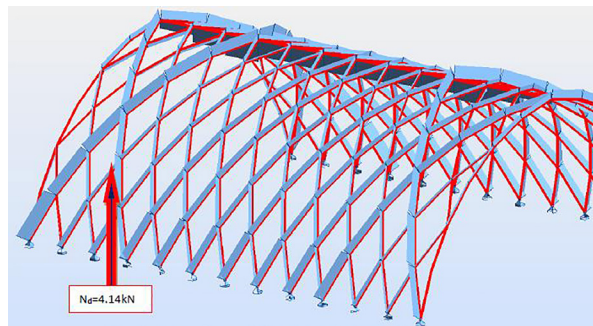
uzdužne sile i momenta savijanja. Momentni dijagram $M_{y,d}$ s najnepovoljnijim utjecajima, te dijagram uzdužnih N_d također s najnepovoljnijim vrijednostima prikazani su na Slici 16 i Slici 17. Analizom dijagrama s navedenih slika dolazi se do zaključka da se najnepovoljnija interakcija javlja u čvorovima gdje se spajaju lamele. Maksimalni projektirani moment savijanja $M_{y,d}$ iznosi 5.43 kNm, a maksimalna projektirana uzdužna sila N_d je tlačna i iznosi 4.14 kN, navedene vrijednosti su referentne za dimenzioniranje. Dimenzioniranje lamele vršeno je na savijanje s utjecajem bočnog izvijanja, te tlačnu silu s utjecajem izvijanja. Dokaz nosivosti proveden je prema izrazima (6) i (7).



Slika 16: Dijagrami momenta savijanja $M_{y,d}$

Figure 16: Bending moment $M_{y,d}$ diagrams

Projektirana vrijednost tlačnog napreznja paralelno s vlakancima $\sigma_{c,0,d}$ iznosi 0.35 N/mm², projektirana vrijednost napreznja savijanja oko osi Y $\sigma_{m,y,d}$ iznosi 13.58 N/mm², koeficijent redukcije projektirane ili proračunske čvrstoće savijanja s obzirom na bočno izvijanje $k_{crit,y}$ iznosi 0.98, koeficijent izvijanja oko osi Y $k_{c,y}$ iznosi 0.89, koeficijent izvijanja oko osi Z $k_{c,z}$ iznosi 0.52 i koeficijent oblika poprečnog presjeka k_m za pravokutne poprečne presjeke iznosi 0.7.



Slika 17: Dijagrami uzdužnih sila N_d

Figure 17: Diagram of axial force N_d

Uvrštavanjem navedenih veličina u izraze (6) i (7) dolazimo do podatka da su pretpostavljene dimenzije poprečnog presjeka lamele zadovoljavajuće, te da je iskoristivost elementa 96%.

$$\left(\frac{0.35}{0.89 \times 12.92}\right) + \left(\frac{13.58}{0.98 \times 14.77}\right) \leq 1$$

$$0.96 \leq 1 \quad (6b)$$

$$\left(\frac{0.35}{0.52 \times 12.92}\right) + \left(0.7 \times \frac{13.58}{0.98 \times 14.77}\right) \leq 1$$

$$0.71 \leq 1 \quad (7b)$$

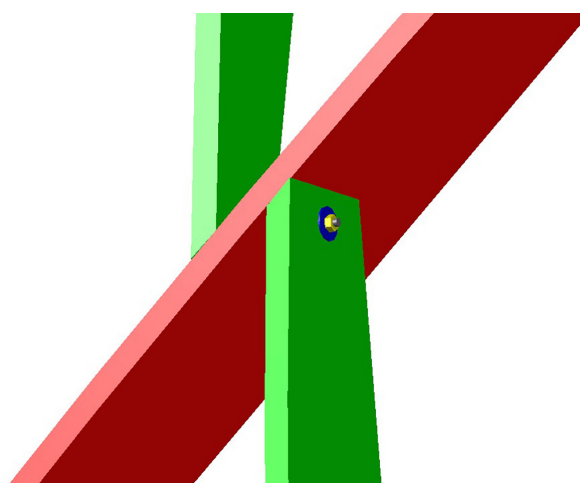
3.4. Oblikovanje detalja kod Zollinger sustava

3.4. Details in Zollinger system

Izrada detalja spoja tri lamele u čvoru Zollinger sustava zahtijeva izuzetnu preciznost. Zollinger krovište je prostorna konstrukcija, a položaj lamela definiran je pomoću zavojnice koja opisuje valjak. S obzirom na tu činjenicu dolazi se do zaključka kako sam spoj zahtijeva skošenje pojedine lamele u više ravnina. Kako bi se postiglo zadovoljavajuće nalijeganje elemenata, te željena krutost konstrukcije, detalj je potrebno oblikovati pomoću 3D programa, te izradu vršiti na suvremenim CNC strojevima.

Lamele se u čvorovima ne zasijecaju već jedna prolazi kroz čvor, dok druge dvije u tome čvoru završavaju, s obzirom na to kroz sam čvor se postavlja tijesno ugrađeni vijak, koji je u projektiranom slučaju tipa M12.

Zollinger lamela izrađuje se od ravnog štapnog elementa koji u gornjem pojasu ima povećanje visine u sredini. Navedeno povećanje visine lamele najčešće se izvodi po kružnici, a na taj način postiže se precizno nalijeganje oplata na nosivu konstrukciju.



Slika 18: Detalj spoja tri lamele

Figure 18: Detail of connection of three lamellas

Tablica 2: Utrošak materijala kod klasičnog krovišta

Table 2: Consumption of materials in traditional structure

Opis stavke	Širina (cm)	Visina (cm)	Dužina (cm)	Komada	Količina (m ³)
Rog	10	16	660	26	2,75
Podrožnica glavna	16	20	1240	2	0,79
Podrožnica nadozid	12	16	1240	4	0,95
Stup glavni	16	16	290	8	0,59
Ruke na srednjim stupovima	16	16	170	8	0,35
Ruke na vanjskim stupovima	16	16	280	4	0,29
Kosnik	16	12	350	8	0,54
Podložak	12	16	100	8	0,15
Stup nadozid	12	16	120	8	0,18
Kliješta velika	10	14	620	8	0,69
Kliješta mala	10	14	360	16	0,81
Ispuna nadozid	12	12	180	12	0,31
Ukupno					8,41

Tablica 3: *Utrošak materijala kod krovišta sa Zollinger sustavom***Table 3:** *Consumption of materials in Zollinger system*

Opis stavke	Širina (cm)	Visina (cm)	Dužina (cm)	Komada	Količina (m ³)
Lamela	6	20	265	145	4,61
Sljemeni element	8	22	1240	1	0,22
Element na zidu	8	22	1240	2	0,44
Vanjski element	8	22	240	12	0,51
				Ukupno	5,77

4. Zaključak

4. Conclusion

Analizom dva nosiva sustava nad istim tlocrtom, te na istoj lokaciji dolazimo do vrlo relevantnih podataka za daljnje razmatranje. Klasična drvena krovišta s dvostrukom stolicom karakterizira nešto jednostavnija geometrija i izvedba konstrukcije, dok Zollinger sistem karakterizira mala duljina elementa, jednostavniji transport, te slobodno potkrovlje od nosive konstrukcije. Uz ove glavne karakteristike ključni podatak za usporedbu dva sustava je utrošak materijala. Potrošnja drveta klase C 24 za analizirano klasično krovište s dvostrukom stolicom iznosi 8.41m³, što je 0.07m³ po m² tlocrta krovišta. Potrošnja drveta klase C 24 za analizirano Zollinger krovište iznosi 5.77m³, što je 0.05 m³ po m² tlocrta krovišta. Razlika koja se javlja između dva sustava je 2.64 m³ ili 31% uštede ukoliko se izvodi Zollinger krovište. Ušteda u tako visokom postotku kod utroška materijala mora nam biti putokaz kako moramo više pažnje posvetiti primjeni prostornih statičkih sustava prilikom projektiranja konstrukcija i kako puno više pažnje i vremena moramo posvetiti edukaciji projektanata kako bi se mogli upustiti u izradu složenih ekonomski isplativijih prostornih konstrukcija.

5. REFERENCE

5. REFERENCES

- [1] Bjelanović A.; Rajčić V.; Drvene konstrukcije prema europskim normama; Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu; Zagreb, 2007.
- [2] Rajčić V.; Čizmar D.; Stepinac M.; Riješeni primjeri iz drvenih konstrukcija; Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu; Zagreb, 2014.
- [3] Magerle M.; Drvene konstrukcije ; Sveučilište u Zagrebu; Zagreb, 1995.
- [4] Sulyok-Selimbegović M.; Drvene konstrukcije u arhitekturi; Golden marketing- Tehnička knjiga; Zagreb, 2007.
- [5] Žagarec B.; Tradicionalne i savremene drvene krovne konstrukcije; Regija d.o.o.; Beograd, 2013.
- [6] Lončarić H.D.; Tehnologija drveta; Građevinski fakultet Univerziteta u Sarajevu; Sarajevo, 2007.
- [7] Erler K.; Kuppeln und Bogendächer aus Holz; Frauenhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2013.
- [8] HRN EN 1990; Eurokod: Osnove projektiranja konstrukcija; Hrvatski zavod za norme; Zagreb, 2011.
- [9] HRN EN 1991-1-1; Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije – Dio 1-1: Opća djelovanja - Obujamske težine, vlastite težine i uporabna opterećenja zgrada; Hrvatski zavod za norme; Zagreb, 2012.
- [10] HRN EN 1991-1-3 Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije – Dio 1-3: Opća djelovanja – Opterećenja snijegom; Hrvatski zavod za norme; Zagreb, 2012.
- [11] HRN EN 1991-1-4 Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije – Dio 1-4: Opća djelovanja – Opterećenja vjetrom; Hrvatski zavod za norme; Zagreb, 2012.
- [12] HRN EN 1995-1-1; Eurokod 5: Projektiranje drvenih konstrukcija – Dio 1-1: Općenito – Opća pravila i pravila za zgrade; Hrvatski zavod za norme; Zagreb, 2013.

AUTORI · AUTHORS

Dean Čizmar - nepromjenjena biografija nalazi se u časopisu Polytechnic & Design Vol. 3, No. 2, 2015.

Korespodencija

dean.cizmar@tvz.hr

**Ivan Volarić**

Rođen je 20.11.1989. godine u Zagrebu. Stručni studij graditeljstva završava na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu 2011. godine uspješno obranivši završni rad na

temu „Proizvodnja drvenih panelnih kuća u Hrvatskoj“. Tijekom 2012. godine pokreće studentski projekt pasivne montažne kuće sa slamnatom ispunom zidova, koji je usmjeren na popularizaciju ekoloških građevinskih materijala, obnovljivih izvora energije, te dizalica topline. Specijalistički diplomski stručni studij završava izradom diplomskog rada na temu „Prostorne drvene konstrukcije“ 2015. godine na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu. Zaposlen je u Zagrebačkom holdingu d.o.o, a u svojstvu vanjskog suradnika predaje na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu. Područje interesa su mu drvene konstrukcije, zelena gradnja i obnovljivi izvori energije, a koautor je priručnika za nastavu iz Drvenih konstrukcija.

Korespodencija

ivan.volaric@tvz.hr