

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

DIPLOMSKI RAD

**ISTRAŽNI RADOVI I ANALIZA NOSIVOSTI
PAVILJONA 28 ZAGREBAČKOG VELESAJMA**

SANJIN GUMBAREVIĆ

Zagreb, srpanj 2018.

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

DIPLOMSKI RAD

**ISTRAŽNI RADOVI I ANALIZA NOSIVOSTI
PAVILJONA 28 ZAGREBAČKOG VELESAJMA**

SANJIN GUMBAREVIĆ

MENTOR: IZV. PROF. DR. SC. DOMAGOJ DAMJANOVIĆ

Zagreb, srpanj 2018.

SAŽETAK

U radu je prikazana analiza mehaničke otpornosti i stabilnosti čelične konstrukcije paviljona 28 Zagrebačkog velesajma i smjernice za njegovu obnovu. Sustav nosivosti čine četiri trozglobna nosača povezana krovštem i međukatnom konstrukcijom. U sklopu projekta su provedeni istražni radovi s ciljem detektiranja odstupanja zatečene konstrukcije od projektiranog stanja, određivanja karakteristika materijala te provjere poprečnih presjeka konstruktivnih elemenata. Također je u sklopu istražnih radova provedeno mjerenje dinamičkih parametara građevine operacionalnom modalnom analizom s ciljem kalibracije numeričkih modela na kojima je proveden proračun mehaničke otpornosti i stabilnosti prema Eurokodu. Numerički modeli metodom konačnih elemenata su izrađeni u programskom paketu SAP2000. Za kraj rada su prikazane smjernice sanacije konstrukcije građevine radi ostvarenja dostatnih rezervi nosivosti zbog ideje prenamjene građevine u muzej.

Ključne riječi:

Operacionalna modalna analiza (OMA), Metoda konačnih elemenata (MKE), Analiza nosivosti, Analiza stabilnosti okvira, Istražni radovi (građevinarstvo), Čelične konstrukcije

SUMMARY

This is final work which represents analysis of bearing capacity and structural stability of steel structure (pavilion 28) that is part of Zagreb fair. Structure is bearing loads with four three-hinged frames connected in the top of the structure and in story level. Within project the investigation works were carried out with aim to find unsimilarities between original design and current condition of structural elements and materials. As part of investigation works dynamic parameters were experimentally analysed with Operational Modal Analysis (OMA) so numerical model can be calibrated to represent current condition with higher accuracy. Numerical models were analysed with software for structural analysis SAP 2000 based on Finite Element Method (FEM). Structural and stability check were performed on numerical models with consideration of regulations through Eurocode. At the end the guidelines for renovation were presented as building is considered for renovation into Museum.

Keywords:

Operational Modal Analysis (OMA), Finite Element Method (FEM), Structural Analysis, Structural Stability, Investigation Works (CE), Steel structure

SADRŽAJ

1. UVOD.....	4
2. PREGLED POSTOJEĆE LITERATURE I PROPISA	7
2.1. Prikupljanje podloga projektiranog stanja	7
2.2. Propisi korišteni za procjenu mehaničke otpornosti i stabilnosti	9
2.3. Ispitivanje tvrdoće prema Leebu.....	9
2.4. Odnos vlačne čvrstoće i granice popuštanja	10
2.5. Ultrazvučna metoda određivanja debljine stjenke	11
2.6. Operacionalna modalna analiza	13
3. OPIS KONSTRUKCIJE I POSTAVKE PROBLEMA.....	18
3.1. Situacija	18
3.2. Tehnički opis konstrukcije.....	20
3.3. Postavka problema	23
4. DEFINIRANJE PROGRAMA ISTRAŽIVANJA	24
4.1. Vizualni pregled građevine	24
4.2. Program istraživanja	27
4.3. Mjerna mjesta	28
5. PROVEDBA I PRIKAZ REZULTATA ISTRAŽNIH RADOVA	30
5.1. Provedba istražnih radova.....	30
5.2. Rezultati istražnih radova	39
6. NUMERIČKI MODEL KONSTRUKCIJE	47
6.1. Geometrija	47
6.2. Materijali.....	49
6.3. Poprečni presjeci.....	49
6.4. Rubni uvjeti.....	56
6.5. Usporedba dinamičkih parametara s izmjerenim vrijednostima.....	57
6.6. Numerički modeli za statički proračun	63
7. STATIČKI PRORAČUN PROJEKTIRANOG STANJA.....	68
7.1. Analiza opterećenja.....	68
7.1.1. Stalno opterećenje.....	68
7.1.2. Uporabno opterećenje.....	70
7.1.3. Opterećenje snijegom	71

7.1.4.	Opterećenje vjetrom	71
7.1.5.	Shematski prikazi prijenosa opterećenja	73
7.1.6.	Potresno opterećenje.....	77
7.2.	Proračun i usporedba nosivosti karakterističnih elemenata	80
7.2.1.	Provjera grede D1014 (mjerodavna kombinacija GSN7).....	83
7.2.2.	Provjera grede D14 (mjerodavna kombinacija (GSN6)	89
7.2.3.	Provjera grede C710 (mjerodavna kombinacija GSN2).....	98
7.2.4.	Provjera stupa S20 (mjerodavna kombinacija GSN6).....	103
7.2.5.	Provjera stabilnosti poluokvira (stup S8, mjerodavna GSN7)	106
7.2.6.	Provjera na potres	114
7.2.7.	Provjera grede okvira na savijanje (mjerodavno GSN3).....	115
7.2.8.	Provjera grede DE8 (mjerodavno GSN 6).....	116
8.	ZAKLJUČAK.....	118
9.	LITERATURA	123

1. UVOD

Ovaj rad je izrađen u sklopu zajedničkog projekta obnove paviljona 28 Zagrebačkog Velesajma. U projektu je sudjelovalo osam studenata Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu sa svojim mentorima te je projektu bio priključen i student arhitekture s Arhitektonskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. U radu je prikazana analiza mehaničke otpornosti i stabilnosti građevine te prikaz istražnih radova i prikupljanje podloga koje su prethodile procjeni.

Paviljon 28 (poznat kao paviljon Đuro Đaković), djelo arhitekta Miroslava Begovića, izgrađen je 1963. godine. U nastavku (slika 1. i slika 2.) su prikazane fotografije paviljona nakon izvođenja.



Slika 1. Paviljon Đuro Đaković izvedeno stanje – pogled s istoka. [1]



Slika 2. Paviljon Đuro Đaković izvedeno stanje – pogled iznutra. [2]

Paviljon je prepušten zubu vremena i duže vrijeme nije korišten te danas izgleda derutno zbog čega je Zagrebački Velesajam i angažirao spomenuti tim da istraži može li se prenamijeniti. Prikaz zatečenog stanja paviljona je na slici 3. i 4.

Zamisao odgovornih osoba na Zagrebačkom Velesajmu je prenamjena paviljona u „živi muzej“ gdje se želi prikazivati tradicionalni obrt tkanja lana te je pred projektni tim postavljen zadatak s konkretnim popisom potrebnih prostorija i načinom prenamjene paviljona iz kojeg je razloga tim s Građevinskog fakulteta angažirao studenta Arhitektonskog fakulteta s ciljem kvalitetnog raspoređivanja prostora i projektiranja u skladu s konzervatorskom praksom pošto je paviljon zaštićeno kulturno dobro s razinom zaštite Ambijentalna zaštita.



Slika 3. Pogled na paviljon iz smjera jugoistok.



Slika 4. Zatečeno stanje – pogled iznutra. [3]

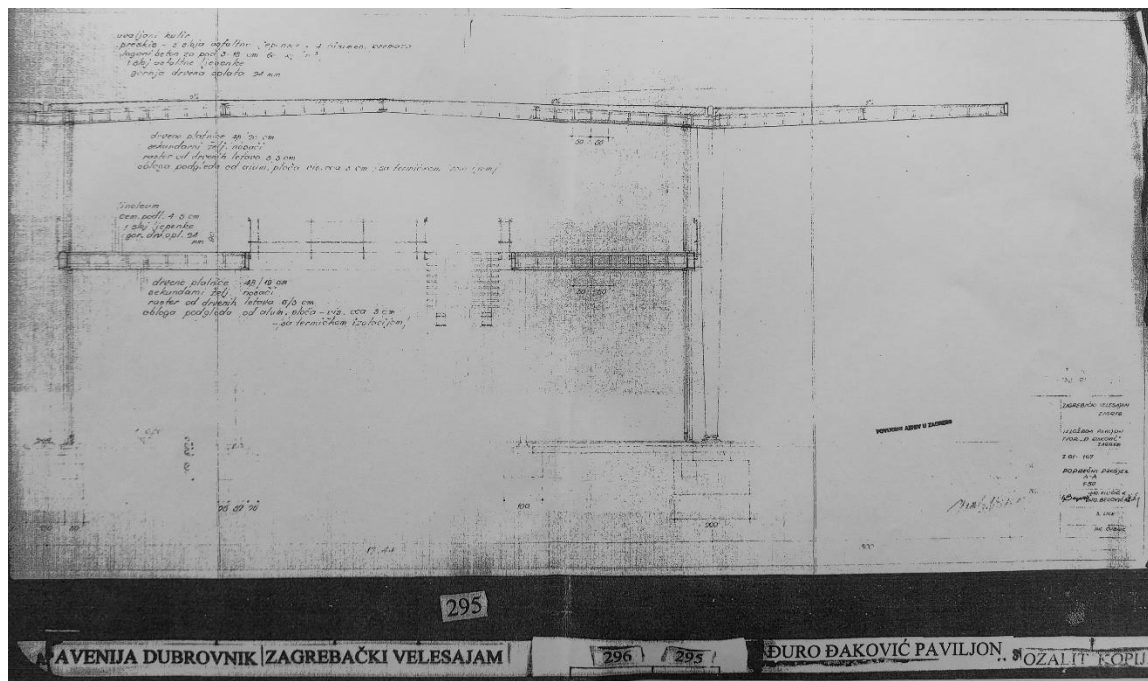
Rad je podijeljen u osam cjelina koje opisuju zadatke prikupljanja podloga za procjenu mehaničke otpornosti i stabilnosti zatečenog stanja i provjeru (dimenzioniranje) projektiranog stanja u skladu s normama u građevinarstvu koja se danas koriste. Za kraj je prikazan zaključak u kojemu je sumirano sve najvažnije iskazano u radu.

2. PREGLED POSTOJEĆE LITERATURE I PROPISA

U ovom poglavlju prikazane su podloge dostupnih nacрта projektiranog stanja preuzetih iz različitih izvora. Također će biti opisani propisi koji su se koristili tijekom izrade projekta. Propisi u vidu normi korištenih za ispitivanje konstrukcija će se detaljnije opisati, dok vezani uz proračun konstrukcije šturo (samo uz navođenje koje su se koristile). Osim kratkog prikaza norme određenog poglavlja opisat će se mjerni uređaj koji je korišten pri ispitivanju i teoretske postavke gdje je potrebno.

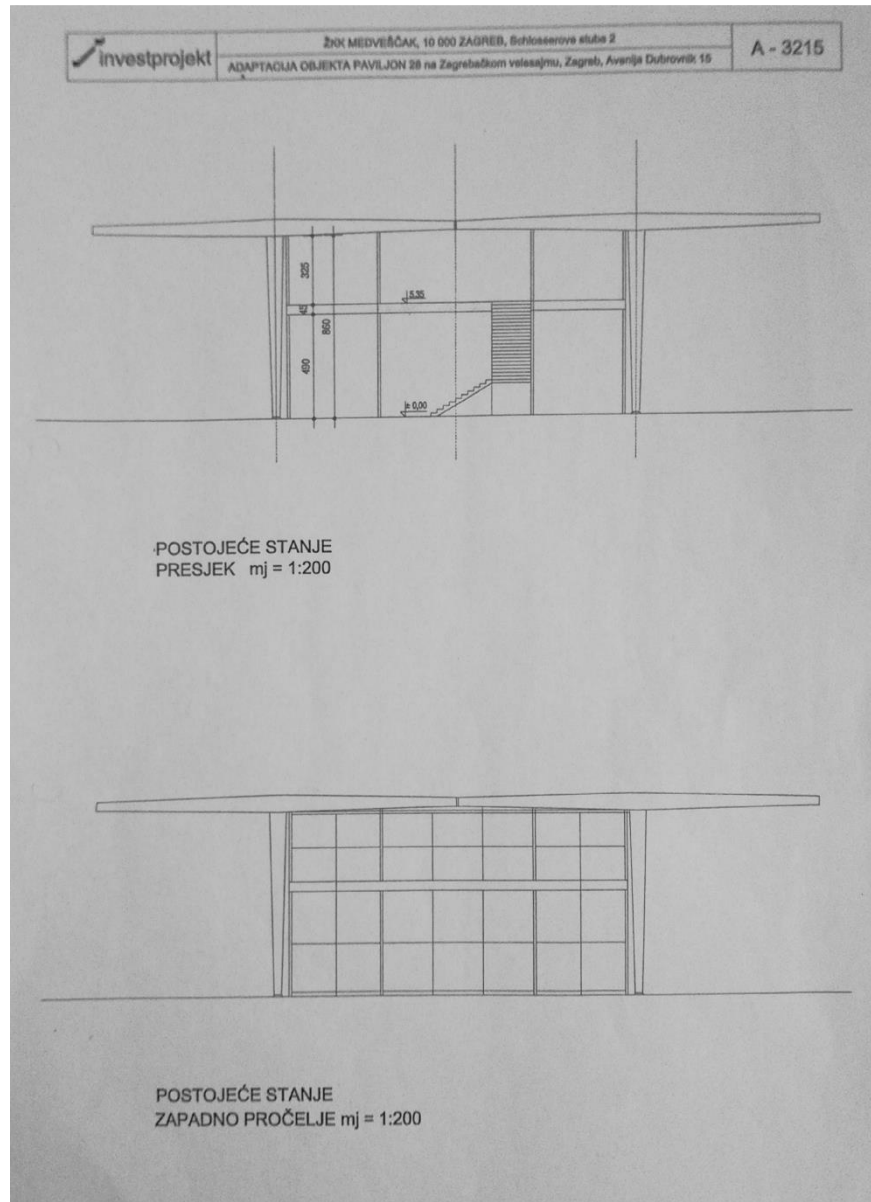
2.1. Prikupljanje podloga projektiranog stanja

U sklopu zajedničkih aktivnosti projekta prenamjene paviljona organiziran je zajednički posjet Državnom arhivu Zagreb s ciljem pronalaska što više podloga kako bi se započeo projekt te kako bi se odredile nepoznanice koje se trebaju utvrditi istražnim radovima. Uvidom u dostupnu arhivsku građu moglo se zaključiti da ćemo morati tražiti dodatne izvore jer su nacrti bili loše kvalitete sa slabo vidljivim kotama i opisima koji su još dodatno izgubili kvalitetu na preslici mikrofilma. Primjer nacрта iz arhiva prikazan je na slici 5.



Slika 5. Primjer nacрта iz Državnog arhiva.

Iako su loše kvalitete, iz nacрта se mogu izvući parcijalne informacije koje će biti od koristi u određivanju zatečenog stanja. Osim spomenutih nacрта, od investitora (Zagrebački Velesajam) smo dobili na uvid projekt prenamjene paviljona u košarkašku dvoranu [4] izrađen 1999. godine. U sklopu glavnog projekta [4] postoji snimak i tehnički opis zatečenog stanja. Primjer nacрта zatečenog stanja iz glavnog projekta [4] prikazan je na slici 6.



Slika 6. Jedan od nacрта postojećeg stanja. [4]

Na osnovu prethodna dva izvora izrađene su podloge za provjeru svih geometrijskih karakteristika i za prikupljanje informacija o svim elementima konstrukcije.

2.2. Propisi korišteni za procjenu mehaničke otpornosti i stabilnosti

Svi detalji vezani uz proračun su prikazani u poglavlju 6. NUMERIČKI MODEL KONSTRUKCIJE, a ovdje će biti prikazane samo norme koje su se koristile. Za određivanje djelovanja na konstrukciju koristio se *Eurokod 1* (HRN EN 1991-1-1:2012 [5], HRN EN 1991-1-1:2012/NA:2012 [6], HRN EN 1991-1-3:2012 [7], HRN EN 1991-1-3:2012/NA:2016 [8], HRN EN 1991-1-4:2012 [9]), za proračun čeličnih konstrukcija *Eurokod 3* (HRN EN 1993-1-1:2014 [10]) te za projektiranje potresne otpornosti *Eurokod 8* (HRN EN 1998-1:2011 [11], HRN EN 1998-1:2011/NA:2011, [12]). Numerički proračun izveden je programskim paketom *SAP2000* u kojega su ugrađeni spomenuti propisi pri provjeri kriterija nosivosti.

Teoretske podloge u vidu literature vezane uz projektiranje u čeliku prikupljene su iz udžbenika u sklopu kolegija s Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu: *Metalne konstrukcije* i *Metalne konstrukcije 2*, a prikazane su u popisu literature ([5], [6], [7], [8]).

2.3. Ispitivanje tvrdoće prema Leebu

Za određivanje karakteristika materijala nosive konstrukcije (čelična konstrukcija) koristit će se norme HRN EN ISO 16859-1:2015 [9], HRN EN ISO 16859-2:2015 [10] i HRN EN ISO 16859-3:2015 [11], a ovdje su prikazane bitne karakteristike metode i opis uređaja koji je korišten za provedbu ispitivanja.

Tijekom ispitivanja, tijelo unutar instrumenta odskače nakon otpuštanja u sudaru s površinom koja se ispituje. Mjerni se instrument mora postaviti okomito na površinu koja se ispituje. Mjeri se brzina tijela unutar instrumenta u trenutku prije (v_A) nego udara u površinu ispitnog tijela i neposredno nakon udara (v_R). Apsorbirana količina energije određuje tvrdoću ispitnog uzorka prema Leebu (HL) te se određuje kao kvocijent brzine nakon udara u odnosu na početnu pomnoženo s 1000, odnosno:

$$HL = \frac{v_R}{v_A} \cdot 1000 . \quad (1)$$

Prema definiciji, tvrdoća po Leebu je bezdimenzijska vrijednost. Izraz (1) prikazuje slučaj kada se ispitivanje vrši u smjeru gravitacije. Za smjer koji nije u smjeru gravitacije odredi se korekcija prema *Annexu A* norme [9]. Obično uređaji ove postavke imaju u sustavu za prikupljanje podataka te se samo podesi način ispitivanja. Također neki uređaji u svojim postavkama sadrže i odnose između različitih ispitivanja tvrdoće (Rockwell, Shore, Vickers, Brinell) te odnos između tvrdoće i vlačne čvrstoće.

Površina koja se ispituje mora biti ispolirana i bez ikakvog zaštitnog sloja, odnosno pripremljena prema [9], poglavlju 6.3. Prije početka mjerenja potrebno je provjeriti ispravnost uređaja na uzorcima koji idu uz njega, a prema Annexu B norme [9].

Uređaj koji se koristio na mjerenju, a koji udovoljava prethodno iskazanim normama je *equotip 3* švicarske tvrtke *Proceq SA*. Uređaj je prenosiv i nerazoran što ga čini praktičnim za terensko ispitivanje. Primjenjiv je i za zaobljene površine s tim da radijus zakrivljenosti mora biti veći od *10 mm*. Uređaj je prikazan na slici 7.



Slika 7. Uređaj za ispitivanje tvrdoće prema Leebu. [12]

Uređaj može spremiti *100000* podataka. Raspon radne temperature mu se kreće od *0 °C* do *50 °C*, a maksimalna vlažnost zraka prilikom ispitivanja smije biti *90 %*.

2.4. Odnos vlačne čvrstoće i granice popuštanja

Kako ispitivanjem tvrdoće korelirano dobijemo vlačnu čvrstoću materijala, potrebno je definirati odnos između vlačne čvrstoće materijala i granice popuštanja. Odnos prethodno opisanih vrijednosti prikazuje norma HRN EN 10025-2:2007 [13], a u radu je prikazana reducirana tablica 7. iz te norme koja prikazuje traženu informaciju.

Tablica 1. Mehaničke karakteristike čeličnih elemenata pri ambijentalnoj temperaturi.

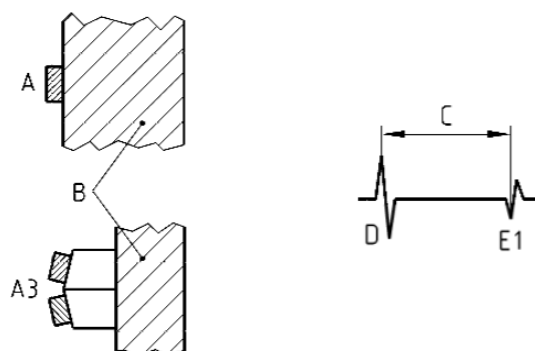
	Granica popuštanja u ovisnosti o debljini stjenke [mm]		Vlačna čvrstoća u ovisnosti o debljini stjenke [mm]			
	≤ 16	> 16 ≤ 40	< 3	≥ 3 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 250
Čelik	≤ 16	> 16 ≤ 40	< 3	≥ 3 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 250
S235	235	225	360-510	360-510	350-500	340-490
S275	275	265	430-580	410-560	400-540	380-540
S355	355	345	510-680	470-630	450-600	450-600
S450	450	430	-	550-720	530-700	-

2.5. Ultrazvučna metoda određivanja debljine stjenke

Debljine stjenki određivati će se nerazornom metodom ultrazvučnim ispitivanjem koje opisuje norma HRN EN 14127:2012 [14], a određuje se mjerenjem vremena prolaska kratkog ultrazvučnog impulsa generiranog odašiljačem kroz stjenku. Put prolaska vala, odnosno debljina stjenke, se proračuna množenjem vremena prolaska kroz materijal i poznate vrijednosti brzine zvuka kroz ispitani materijal (u ovom slučaju čelik).

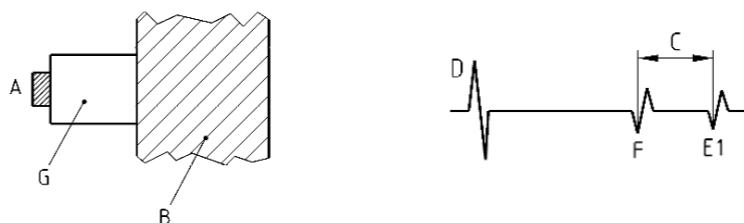
Postoje četiri oblika normiranih ispitivanja s obzirom na postupak, a shematski su prikazani i opisani u nastavku (legenda¹ označenih elemenata je prikazana u fusnoti):

1. Mjeri se vrijeme proteklo od emitiranja signala iz odašiljača do prihvata signala jeke koja nastaje zbog promjene brzine zvuka na prijelazu materijala.



Slika 8. Određivanje debljine stjenke prvim načinom po normi [14].

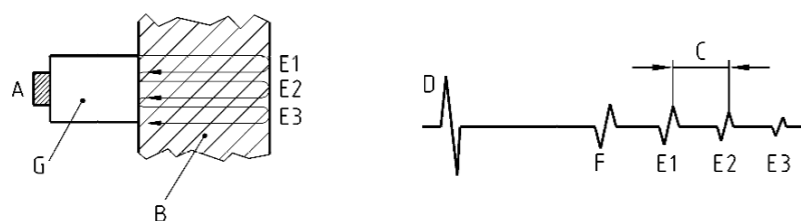
2. Mjeri se vrijeme jeke između dva određena signala. Ako postoji više slojeva, a mi želimo odrediti debljinu točno određenog, tada propuštamo signal koji nas ne zanima, a brzinu prolaska određujemo promatranjem jeke na prijelazu promatranog materijala i prethodnog te promatranog i sljedećeg u nizu.



Slika 9. Određivanje debljine stjenke drugim načinom po normi [14].

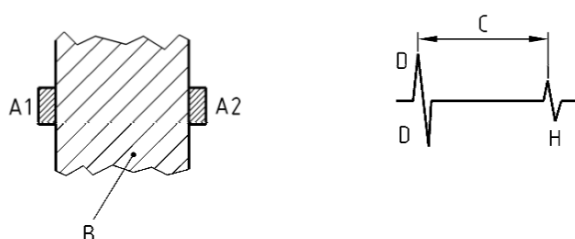
¹ A odašiljač-prijemnik; A1 odašiljač; A2 prijemnik; A3 način rada s dva odašiljača-prijemnika; B ispitni element; C vrijeme prolaska zvuka; D prikaz odašiljenog signala; E1 do E3 signal jeke; F jeka referentne plohe; G put koji zanemarujemo; H primljeni signal.

3. Kao i prethodne metode, ali s razlikom što šaljem više signala.



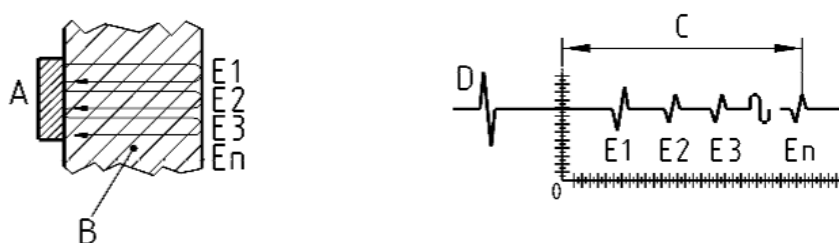
Slika 10. Određivanje debljine stjenke trećim načinom po normi [14].

4. Mjeri se vrijeme potrebno za prolaz impulsa kroz promatrani materijal od odašiljača do prijammnika.



Slika 11. Određivanje debljine stjenke četvrtim načinom po normi [14].

Ispitivanje se vršilo metodom 3 bez međuelementa (na slici 10. označen slovom G) gdje su se registrirala četiri signala jeke (slika 12.).



Slika 12. Ispitivanje debljine stjenke. [14]

Mjerno mjesto mora biti očišćeno od prašine, masti, zavarnog materijala, ulja ili bilo kakvih nečistoća. Ako ispitni uzorak sadrži premaze, mogu se ostaviti u slučaju dobrih adhezivnih svojstava inače ih moramo odstraniti. Za bolje prianjanje odašiljača i prijammnika te bolje odašiljanje/primanje signala, između ispitnog elementa i uređaja je potrebno postaviti specijalizirani gel.

Uređaj koji se koristio na ispitivanju je *DM5E* uređaj za mjerenje debljine ispitnog uzorka njemačke tvrtke *GE Sensing & Inspection Technologies GmbH*, a prikazan je na slici 13.



Slika 13. Uređaj za ispitivanje debljine stjenke ultrazvučnom metodom.

2.6. Operacionalna modalna analiza

Određivanje dinamičkih parametara može se podijeliti na dvije osnovne metode: *Klasična eksperimentalna modalna analiza* (EMA) i *Operacionalna modalna analiza* (OMA). Kod primjene EMA-e potrebno je odrediti *Funkciju frekventnog odgovora* (FFO) na temelju izmjerenih signala dinamičke pobude i odgovora konstrukcije, što podrazumijeva kontrolirano i mjereno nanošenje sile. Kod primjene OMA-e mjere se samo signali odgovora konstrukcije, a pobuda mora biti takva da ima karakteristiku bijelog šuma u spektralnom području koje nam je za ispitivanu konstrukciju zanimljivo [15]. Najčešće je dovoljno nanijeti impulsnu pobudu koju nije potrebno mjeriti što znatno pojednostavljuje postupak ispitivanja.

Ambijentalne pobude koje svakodnevno djeluju na neku građevinsku konstrukciju (djelovanje vjetera, valova, prometnog opterećenja, seizmičkih mikro podrhtavanja i slično) također se koriste kao ulazne pobude čija je karakteristika bliska pobudi bijelim šumom. Kod klasične EMA-e takve su pobude šumovi pri određivanju dinamičkih parametara. Osnovna prednost OMA-e u odnosu na EMA-u je upravo u pobuđivanju konstrukcije koja ne mora biti kontrolirana i mjerena. Dva su osnovna načina analize OMA-e, analiza u frekventnom području i analiza u vremenskom području. Analiza u frekventnom području temelji se na dekompoziciji funkcija odgovora konstrukcije u frekventnom području (FDD - Frequency Domain Decomposition), a analize u vremenskom na metodama

stohastičke identifikacije potprostora (SSI – Stochastic Subspace Identification). Kako je u projektu korištena FDD, dodatno će se iznijeti teoretska podloga.

Osnovna ideja metode dekompozicije frekventnog područja (FDD) je da se izvrši dekompozicija funkcije autospektralne gustoće snage odgovora višestupanjskog sustava na seriju neovisnih jednostupanjskih sustava, po jedan za svaki mod koji se nalazi u spektralnom opsegu u kojem je mjerenje provedeno. [16]

FDD metoda je proširenje klasične metode određivanja modalnih parametara odabirom vrhova funkcija spektralnog odgovora za slučaj kada pojedini modovi nisu blisko raspoređeni u spektru. Postupak se temelji na dekompoziciji na singularne vrijednosti (SVD - *Singular Value Decomposition*) matrice autospektralnih gustoća snage odgovora konstrukcije. Uz pretpostavke da funkcija pobude odgovara bijelom šumu u promatranom spektralnom opsegu, da su prigušenja mala i da su modalni oblici geometrijski ortogonalni, singularne vrijednosti predstavljaju autospektralne gustoće jednostupanjskog sustava, a singularni vektori modalne oblike. Teoretska podloga metode prikazana je u [15], a temelji se na odnosu ulaznih pobuda $f(t)$ i odgovora konstrukcije $x(t)$ koji se preko matrice funkcije frekventnog odgovora mogu prikazati u obliku:

$$\mathbf{G}_{XX}(\omega) = \mathbf{H}^*(\omega)\mathbf{G}_{FF}(\omega)\mathbf{H}^T(\omega) \quad (2)$$

gdje je $\mathbf{G}_{XX}(\omega)$ kvadratna matrica spektralnih gustoća snaga odgovora konstrukcije reda n koji označava broj mjernih mjesta mjerenja odgovora konstrukcije, \mathbf{G}_{FF} je kvadratna matrica spektralnih gustoća snaga pobuda konstrukcije reda m koji označava broj mjesta nanošenja pobude, a $\mathbf{H}(\omega)$ je matrica funkcija frekventnog odgovora formata $(n \times m)$. Eksponenti „*“ i „T“ označavaju konjugirano kompleksnu i transponiranu matricu. Funkcija frekventnog odgovora se može zapisati u obliku:

$$H(\omega) = \sum_{r=1}^k \frac{R_r}{i\omega - p_r} + \frac{R_r^*}{i\omega - p_r^*} \quad (3)$$

gdje je k broj modova, R_r je ostatak, p_r je pol i određeni su izrazima:

$$R_r = a_r \boldsymbol{\varphi}_r \boldsymbol{\varphi}_r^T = \boldsymbol{\varphi}_r \boldsymbol{\gamma}_r^T \quad (4)$$

$$p_r = -\sigma_r \pm i\omega_{dr} \quad (5)$$

Ostatak je određen vektorom modalnog oblika $\boldsymbol{\varphi}_r$ i $\boldsymbol{\gamma}_r$ vektorom modalnih participacija, a pol stupnjem prigušenja σ_r i prigušenom vlastitom frekvencijom ω_{dr} .

Ako sada primijenimo pretpostavku da pobuda ima karakteristiku bijelog šuma, tj. da je matrica spektralne gustoće snage $\mathbf{G}_{FF}(\omega) = \mathbf{C}$ dijagonalna matrica s konstantama na dijagonali, izraz (2) možemo zapisati u obliku:

$$\mathbf{G}_{XX}(\omega) = \sum_{r=1}^k \sum_{s=1}^s \left[\frac{R_r}{i\omega - p_r} + \frac{R_r^*}{i\omega - p_r^*} \right] \mathbf{C} \left[\frac{R_s}{i\omega - p_s} + \frac{R_s^*}{i\omega - p_s^*} \right]^H \quad (6)$$

U gornjem izrazu eksponent „ H “ označava transponiranje i konjugaciju. Doprinos matrici ostataka spektralne gustoće snage odgovora od r -tog moda može sa nakon određenih matematičkih manipulacija izraziti kao:

$$A_r = \frac{R_r \mathbf{C} R_r^H}{2\sigma_r} \quad (7)$$

Kako smo pretpostavili mala prigušenja gornji izraz dominantno određuje matricu ostataka te pri vlastitoj frekvenciji ostatak postaje proporcionalan vektoru modalnog oblika:

$$A_r \propto R_r \mathbf{C} R_r^H = \boldsymbol{\varphi}_r \boldsymbol{\gamma}_r^T \mathbf{C} \boldsymbol{\gamma}_r \boldsymbol{\varphi}_r^T = d_r \boldsymbol{\varphi}_r \boldsymbol{\varphi}_r^T \quad (8)$$

gdje je d_r skalarna konstanta. Pri pojedinoj frekvenciji samo jedan do dva moda daju doprinos, ako njih označimo sa $Sub(\omega)$ spektralna gustoća snage odgovora se može zapisati kao:

$$\mathbf{G}_{XX}(\omega) = \sum_{r \in Sub(\omega)} \left[\frac{d_r \boldsymbol{\varphi}_r \boldsymbol{\varphi}_r^T}{i\omega - p_r} + \frac{d_r^* \boldsymbol{\varphi}_r^* \boldsymbol{\varphi}_r^{*T}}{i\omega - p_r^*} \right] \quad (9)$$

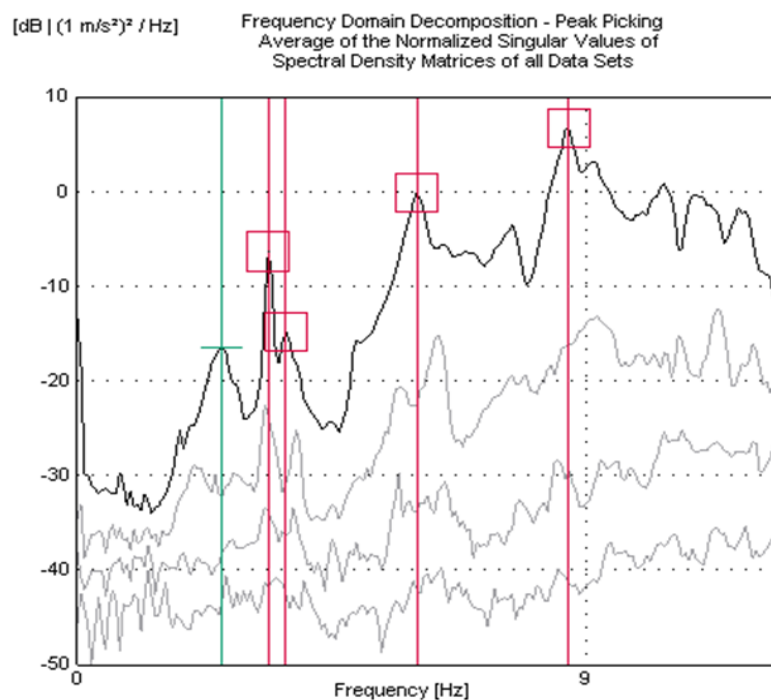
Proces određivanja modalnih parametara sastoji se u prvom koraku od određivanja matrice spektralnih gustoća snaga odgovora konstrukcije. Drugi korak je dekompozicija na singularne vrijednosti (SVD) matrice spektralnih gustoća snaga, koja je poznata pri diskretnim frekvencijama $\omega = \omega_i$, pri čemu kao rezultat imamo:

$$\widehat{\mathbf{G}}_{XX}(\omega_i) = \mathbf{U}_i \mathbf{S}_i \mathbf{U}_i^H \quad (10)$$

Rezultat dekompozicije matrice spektralnih gustoća snaga odgovora pri pojedinoj diskretnoj frekvenciji i su matrice \mathbf{U}_i i \mathbf{S}_i . Matrica $\mathbf{U}_i = [\mathbf{u}_{i1}, \mathbf{u}_{i2}, \dots, \mathbf{u}_{in}]$ je unitarna matrica koja sadrži singularne vektore \mathbf{u}_{ij} , a \mathbf{S}_i je dijagonalna matrica koja sadrži singularne vrijednosti. U blizini vrha funkcije autospektralne gustoće snage koji odgovora r -tom modu, taj mod je najčešće dominantan. U slučaju kada dominira samo r -ti mod izraz (9) ima samo

jedan član, a prvi singularni vektor \mathbf{u}_{i1} predstavlja modalni oblik pri toj frekvenciji $\hat{\varphi}_i = \mathbf{u}_{i1}$ dok je odgovarajuća singularna vrijednost autospektralna gustoća snage jednostupanjskog sustava pri toj frekvenciji.

Osnovna FDD metoda je brza i efikasna u određivanju vlastitih frekvencija i modalnih oblika. Određivanjem vrhova funkcije spektralne gustoće snage nakon provedene dekompozicije na singularne vrijednosti (SVD), direktno određujemo modalni oblik za tu frekvenciju. Kako se pri ovoj metodi za određivanje vlastitih frekvencija i modalnih oblika za svaki mod koristi samo jedna diskretna frekvencija metoda ne omogućava određivanje modalnih prigušenja. Primjer određivanja vrhova prikazan je na slici 14.



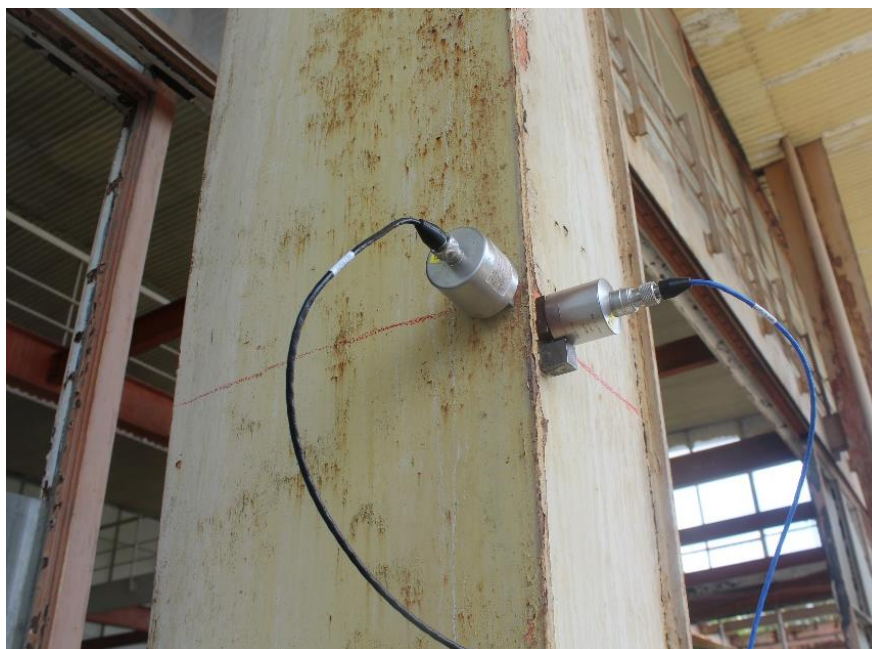
Slika 14. Određivanje vrhova funkcije spektralne gustoće.

U provođenju istražnih radova koristio se uređaj za prikupljanje vibracija i buke *Pulse Analyzer 3560C*, danske tvrtke *Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S*. Pulse platforma prikladna je za analizu i mjerenje buke i vibracija. Platforma omogućava određivanje modalnih oblika i vlastitih frekvencija primjenom OMA - e i EMA - e. Platforma je opremljena dvama modalnim čekićima koji omogućuju pobudu manjih i većih konstrukcija ili elemenata, ali oni nisu korišteni u mjerenju nego se konstrukcija pobuđivala intervencijom članova tima. Za prijelaz u frekventno područje koriste se Fourierove transformacije. Sustav je prikazan na slici 15.



Slika 15. Sustav za prikupljanje i analizu podataka *Pulse Analyzer 3560C*.

Za prikupljanje signala koristili su se piezoelektrični jednoosni akcelerometri *PCB 393B31* američke tvrtke *PCB Piezotronics, Inc.* i *B&K 8340* danske tvrtke *Briuel & Kjaer Sound & Vibration Measurement A/S* s integriranom elektronikom, visokom osjetljivošću i izvrsnim odnosom signal – šum. Namijenjeni su mjerenjima na velikim konstrukcijama pri niskim frekvencijama i niskim seizmičkim aktivnostima te su vrlo pogodni za mjerenja ambijentalnih vibracija pri određivanju dinamičkih parametara. Spomenuti akcelerometri su prikazani na slici u nastavku.



Slika 16. Akcelerometri *PCB 393B31* i *B&K 8340* korišteni u istražnim radovima.

3. OPIS KONSTRUKCIJE I POSTAVKE PROBLEMA

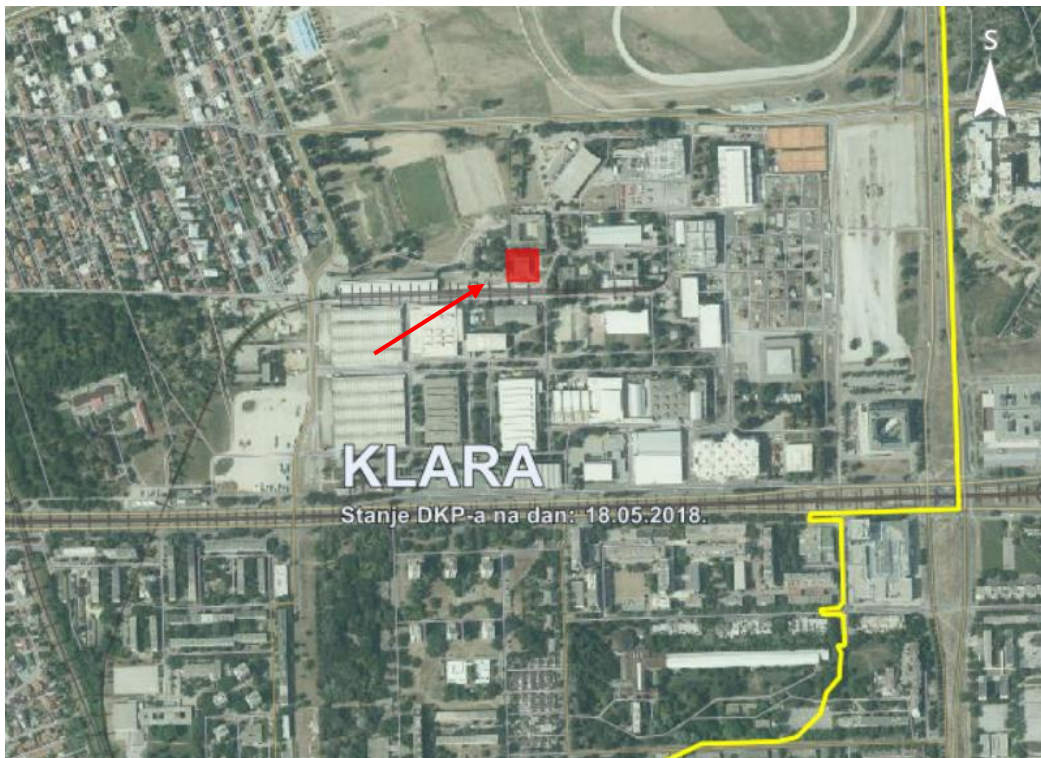
3.1. Situacija

Projektirana građevina nalazi se u Novom Zagrebu u katastarskoj općini Klara pod oznakom k.č.br. 599/49 s jednim dijelom koji upada u k.č.br. 598/2. Dio pod oznakom k.č.br. 599/49 je u vlasništvu Zagrebačkog Velesajma, a dio pod oznakom k.č.br. 598/2 u vlasništvu Grada Zagreba. U sklopu projekta nisu rješavani imovinsko – pravni odnosi te su prepušteni dogovoru između Grada Zagreba i Zagrebačkog Velesajma.

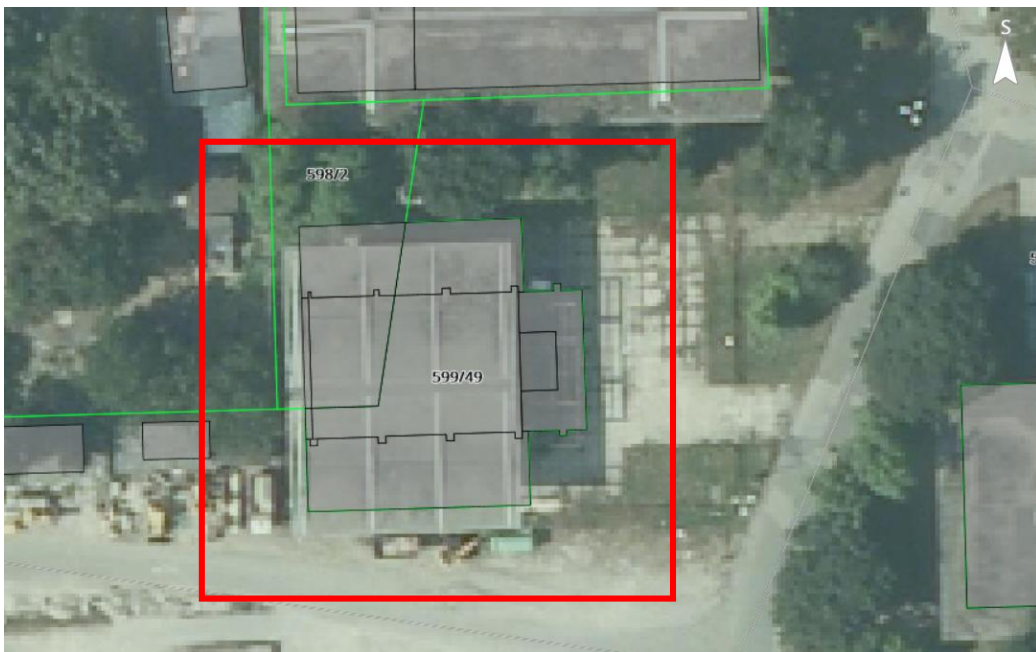
Kako se može vidjeti na slici 17. građevina se nalazi u četvrti Novi Zagreb – Zapad. U nastavku su grafički prikazi situacije građevine.



Slika 17. Situacija (1).



Slika 18. Situacija (2).



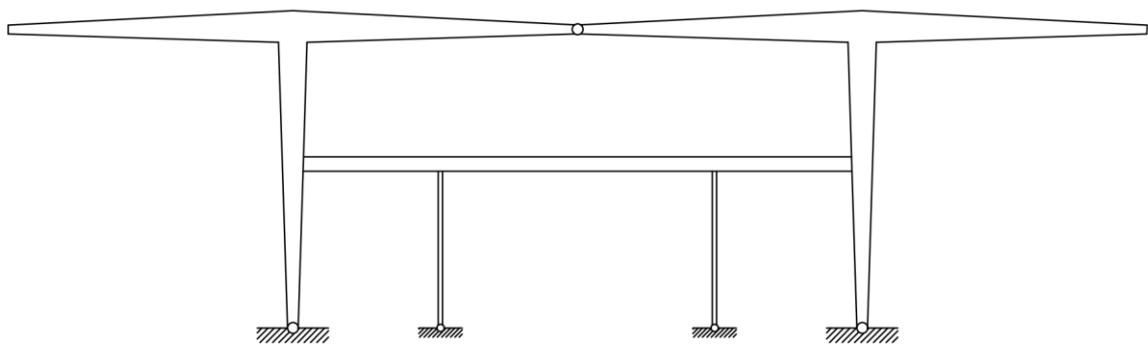
Slika 19. Situacija (3).



Slika 20. 3D pogled na konstrukciju. [17]

3.2. Tehnički opis konstrukcije

Hala je izvedena kao montažna čelična konstrukcija s ostakljenom samostojećom fasadom uz aneks na istočnoj strani hale. Glavni rasponski sklop čini trozglobni nosač čiji stup je promjenjivog sandučastog poprečnog presjeka te grede I presjeci promjenjivog poprečnog presjeka po visini grede čija se visina povećava od kraja prema stupu. Na nosač je na visini od 480 cm spojena međukatna konstrukcija koja je, osim zavarom na stup trozglobnog okvira, pridržana pendl stupovima po sredini tlocrta udaljenih 520 cm osno od stupova trozglobnog okvira. Tipiski nosač je prikazan na slici 21.



Slika 21. Shematski prikaz glavne rasponske konstrukcije.

Međukatna konstrukcija se sastoji od I nosača različitih poprečnih presjeka. Rubni uvjeti glavnog rasponskog sklopa su zglobovi ležajevi bez dopuštenog pomaka u ravni pružanja nosača. Ležajevi se mogu vidjeti na slici 22.



Slika 22. Fotografija zglobnog ležaja nosača.

U sklopu konstrukcije postoje dva stubišta, jedno je unutarnje koje je smješteno u centru tlocrta konstrukcije i jedno koje se nalazi u aneksu. Unutarnje stubište i pendl stupovi, kao i međukatna konstrukcija se mogu vidjeti na slici 4., a aneks i stubište aneksa u nastavku (Slika 23.).



Slika 23. Pogled na aneks sa stubištem.

Zgrada ima izvedene sve komunalne priključke: kanalizacija, električna energija, vodovod, telefon te mogućnost priključivanja na gradsku toplanu, međutim instalacije su zbog trošnosti cijele konstrukcije vjerojatno u lošem stanju te je potrebna dodatna provjera istih u sklopu budućeg strojarškog projekta.

Na konstrukciji postoje vertikalni uzdužni spregovi u prvom polju zapadne strane paviljona (sa sjeverne i s južne strane) te horizontalni poprečni spregovi u rubnim poljima međukatne konstrukcije u poprečnom smjeru.



Slika 24. Vertikalni uzdužni spreg.



Slika 25. Horizontalni poprečni spreg u razini međukatne konstrukcije.

Dodatne informacije vezane za sve elemente građevine biti će iskazane u potpoglavlju 4.1. Vizualni pregled građevine te u poglavlju 5. PROVEDBA I PRIKAZ REZULTATA ISTRAŽNIH RADOVA. Nacrti zatečenog stanja nalaze se u prilogu.

3.3. Postavka problema

Rad je koncipiran tako da sva poglavlja do poglavlja 6. prikazuju što više informacija koje je potrebno integrirati u numerički model konstrukcije s ciljem da što ispravnije predstavlja realnu konstrukciju kako bi se mogli donijeti zaključci koji su na strani sigurnosti. Mora se naglasiti da nije cilj istrenirati model do savršenstva unoseći nerealne procjene s ciljem da se dobije što bliže ponašanje modela dinamičkom odazivu konstrukcije koji se dobije mjerenjem, nego da se uvedu realne procjene s dobrom teoretskom i inženjerskom podlogom, odnosno da se poznaju pretpostavke poopćavanja stvarne konstrukcije prema modelu.

U radu će biti predstavljena dva različita modela. Prvotno će se analizirati numerički model zatečenog stanja s ciljem usporedbe modela s izmjerenim dinamičkim parametrima, nakon čega će se model doraditi prema projektiranom stanju zbog provjere elemenata zadovoljavaju li današnje norme.

Očekuje se da će elementi zadovoljavati sve provjere osim provjere na potres pošto slojevi krova u presjeku sadrže gređice, oplatu i lagani beton, odnosno značajnu masu koja bi mogla prouzročiti ozbiljne inercijalne sile nakon djelovanja potresa. Iz istog se razloga očekuje da krovna konstrukcija djeluje kao dijafragma. Pretpostavlja se prvi oblik titranja s pomakom u poprečnom smjeru zbog male krutosti trozglobnog okvira na bočni pomak, drugi oblik uzdužni pomak konstrukcije te treći oblik kao torzijski oblik.

Pretpostavke prethodnog pasusa će se ispitati u 6. i 7. poglavlju na osnovu kojih će se u 8. poglavlju donijeti određeni zaključci.

4. DEFINIRANJE PROGRAMA ISTRAŽIVANJA

4.1. Vizualni pregled građevine

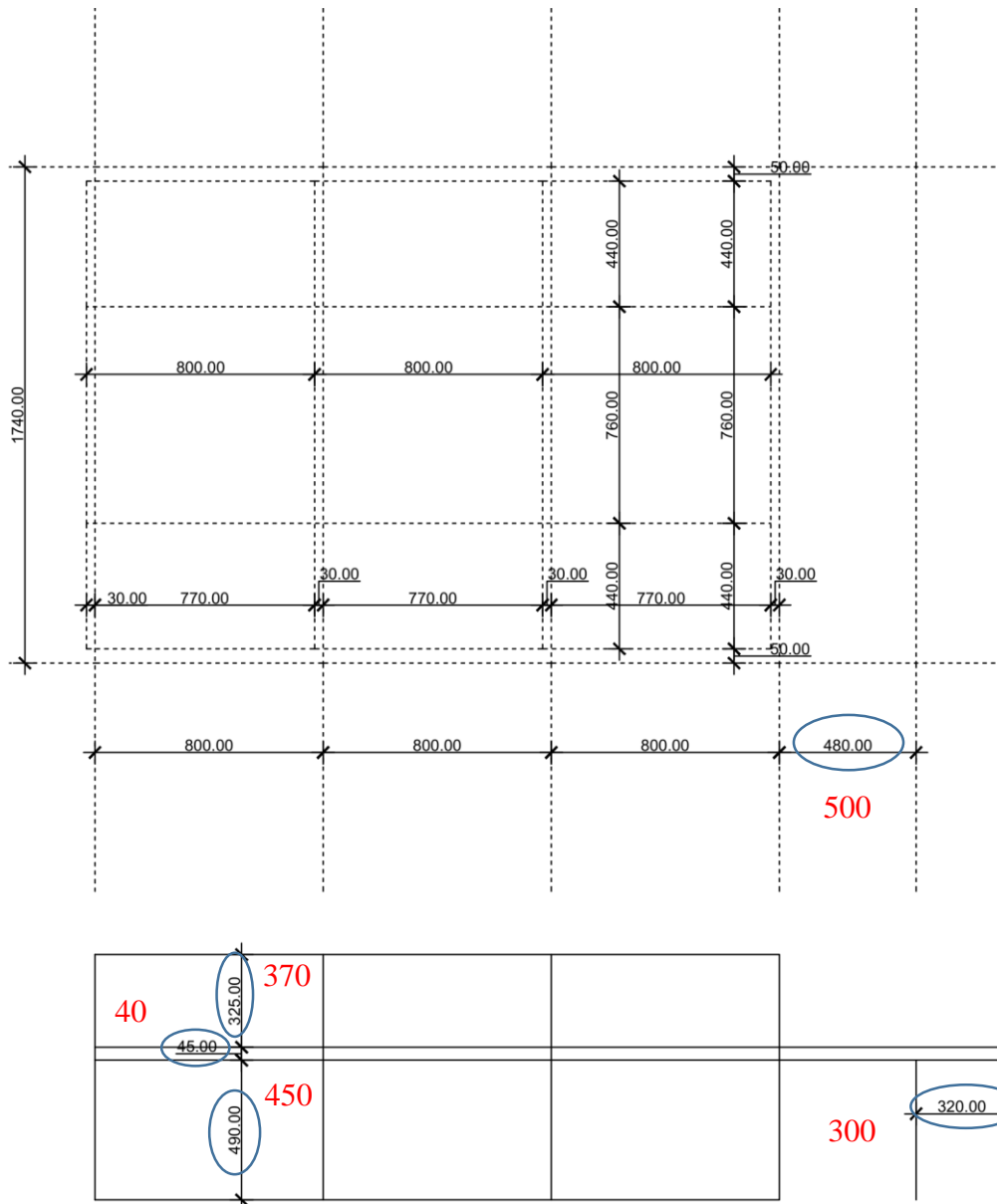
Prije istražnih radova obavljen je vizualni pregled objekta te su prikupljene dodatne informacije o građevini u odnosu na prikazane u tehničkom opisu. Također je cilj pregleda bio analizirati na koje sve probleme je moguće naići tijekom odlaska na ispitivanje konstrukcije kako bi se projektni tim pripremio na njih.

Provjereni su gotovo svi rasponi s ciljem usporedbe odstupanja izvedene konstrukcije od projektiranog stanja i dostupne dokumentacije. Svi rasponi se neznatno razlikuju od onih iz nacрта dostupne dokumentacije osim položaja stupa aneksa koji odstupa 20 *cm* u odnosu na dostupne nacрте (izmjerena veličina je 500 *cm*, a u nacrtima je prikazana vrijednost 480 *cm*).

Dakle, stup je pomaknut prema konzolnom dijelu vjerojatno kako bi se smanjio utjecaj prevelikog momenta savijanja nad stupom (prosta greda s prepustom) pošto su na vanjskom dijelu uočene dvije velike grede nelogično postavljene na to mjesto koje imaju veliku vlastitu težinu te je uočena deformacija jedne od njih (druga se ne može vidjeti od raslinja na dijelu aneksa). Također se može primijetiti izvijanje stupa na koji se oslanja spomenuta greda. Kako je određena vrijednost od 500 *cm* na mjestu gdje treba biti 480 *cm*, procjenjuje se da je tada konzolni dio 300 *cm* u odnosu na 320 *cm* kako stoji u dokumentaciji. Pretpostavka je postavljena iz razloga što u sumi te dvije dimenzije daju vrijednost 800 *cm*, a to je vrijednost rastera u uzdužnom smjeru konstrukcije te je i u nacrtima tako prikazana.

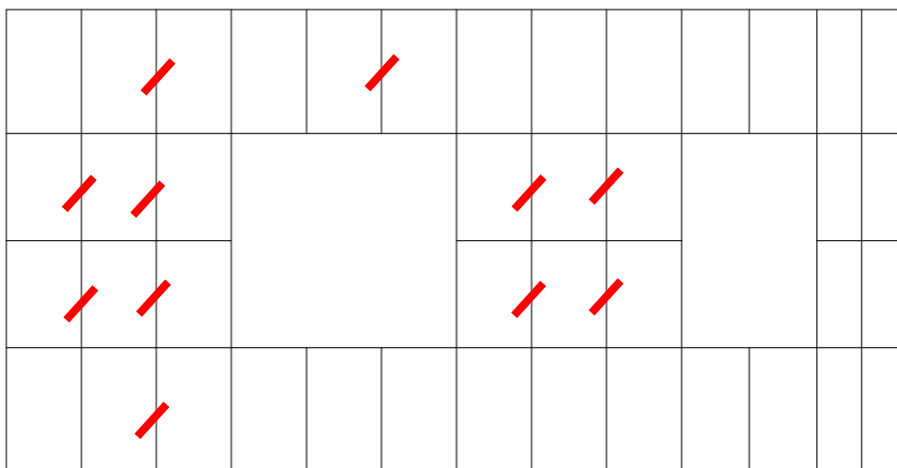
Također je utvrđena razlika u visini gdje je svijetla visina do međukatne konstrukcije 450 *cm* u odnosu na 490 *cm* kako je prikazano u podlogama. Visina međukatne konstrukcije je 40 *cm*, a ukupna visina građevine ostaje ista, stoga je svijetla visina od gornje kote međukatne konstrukcije do donje kote krova u istoj ravnini 370 *cm*.

Preporučuje se dodatna provjera spomenutih vrijednosti mjernim uređajima više klase uz posebnu pažnju na spomenuti stup promjenjivog poprečnog presjeka za koji je utvrđeno veliko odstupanje. Podloga za ispitivanje i odstupanja su prikazana na slici 26.

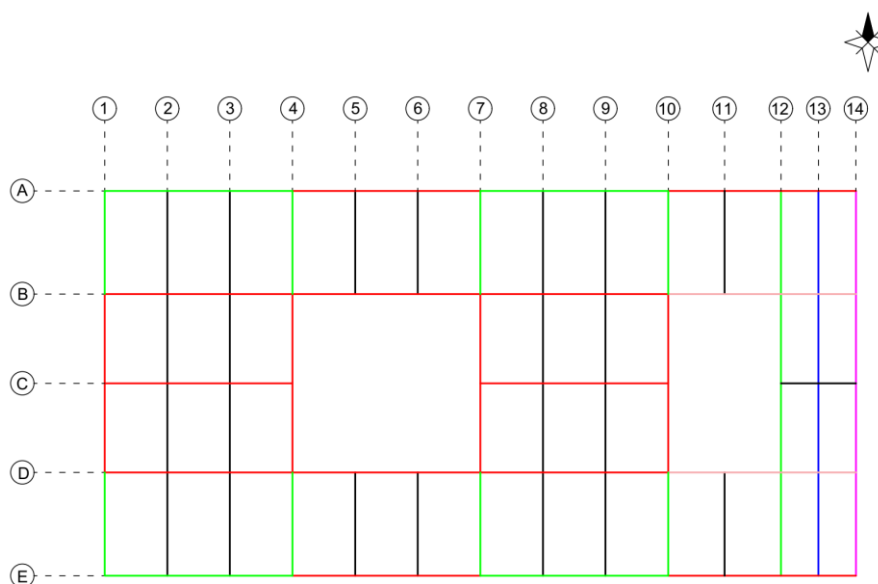


Slika 26. Odstupanje od projektirane geometrije.

Može se primijetiti da neki elementi međukatne konstrukcije nedostaju ta da na većini postoji pečat koji naznačuje o kojemu se poprečnom presjeku radi. Pečat ima oblik ZENICA NPx, gdje je x broj koji označava visinu elementa u centimetrima. Preporuča se tijekom istražnih radova provjeriti dimenzije poprečnih presjeka kako bi se odredilo postoji li korelacija sa standardnim profilima. Shematski prikaz elemenata međukatne konstrukcije s naznačenim elementima koji nedostaju prikazan je na slici 27., dok je na slici 28. prikazan popis elemenata međukatne konstrukcije s obzirom na pečat. Može se primijetiti da su svi spojevi između profila, osim prepusta aneksa, ostvareni spojem na hrbat što ih prema [6] klasificira zglobnim spojevima.



Slika 27. Elementi međukatne konstrukcije koji nedostaju.



Slika 28. Shematski prikaz elemenata međukatne konstrukcije.²

Stupovi u zatvorenom dijelu paviljona imaju dimenzije 140 x 120 mm s duljom stranicom u uzdužnom smjeru pružanja građevine uz nepoznatu debljinu stjenke koju je potrebno odrediti ultrazvučnom metodom.

Stupovi glavnog rasponskog sklopa su sandučastog tipa promjenjivog poprečnog presjeka. Poprečni presjek pri dnu stupa je 320 x 320 mm. Poprečni presjek u poprečnom smjeru raste visinom građevine, dok u uzdužnom smjeru zadržava vrijednost 32 cm. Na

² Legenda po bojama: crveno – ZENICA NP40, zeleno – ZENICA NP34, magenta – ZENICA NP 30, crno – ZENICA NP 24, plavo – ZENICA NP 20, ružičasto – HEM400.

visini 1 m od početka stupa odmjerena je vrijednost 370 mm, što bi značilo da poprečni presjek raste 25 mm na svaku stranu po metru visine. Uzevši u obzir da je visina stupa po dostupnoj dokumentaciji 860 mm, tada je poprečni presjek na vrhu stupa 320 x 750 mm.

Stupovi promjenjivog poprečnog presjeka koji su dio aneksa također imaju sandučasti poprečni presjek s dimenzijama pri dnu 190 x 200 mm te na 1 m visine 190 x 240 mm. Uzmemo li u obzir da se stup proteže do visine međukatne konstrukcije (470 cm) poprečni presjek stupa pri vrhu je 190 x 390 mm. Krovna konstrukcija je teško dostupna te nije analizirana prilikom vizualnog pregleda građevine, stoga ju je potrebno analizirati prilikom istražnih radova.

4.2. Program istraživanja

Za potrebe istražnih radova izrađene su podloge shematskih nacрта konstrukcije sa sistematiziranjem elemenata, a prikazane su u prilogu. Za početak će se projektni tim dodatno upoznati s građevinom i pregledati karakteristične detalje uz postavljanje mjernih mjesta. Potrebno je provjeriti dimenzije svih poprečnih presjeka, posebice onih s pečatom kako bi se pronašla korelacija između njih i standardnih profila klasificiranih prema nekoj od normi (najvjerojatnije DIN). Također je potrebno provjeriti dimenzije za koje je vizualnim pregledom utvrđeno odstupanje od nacрта.

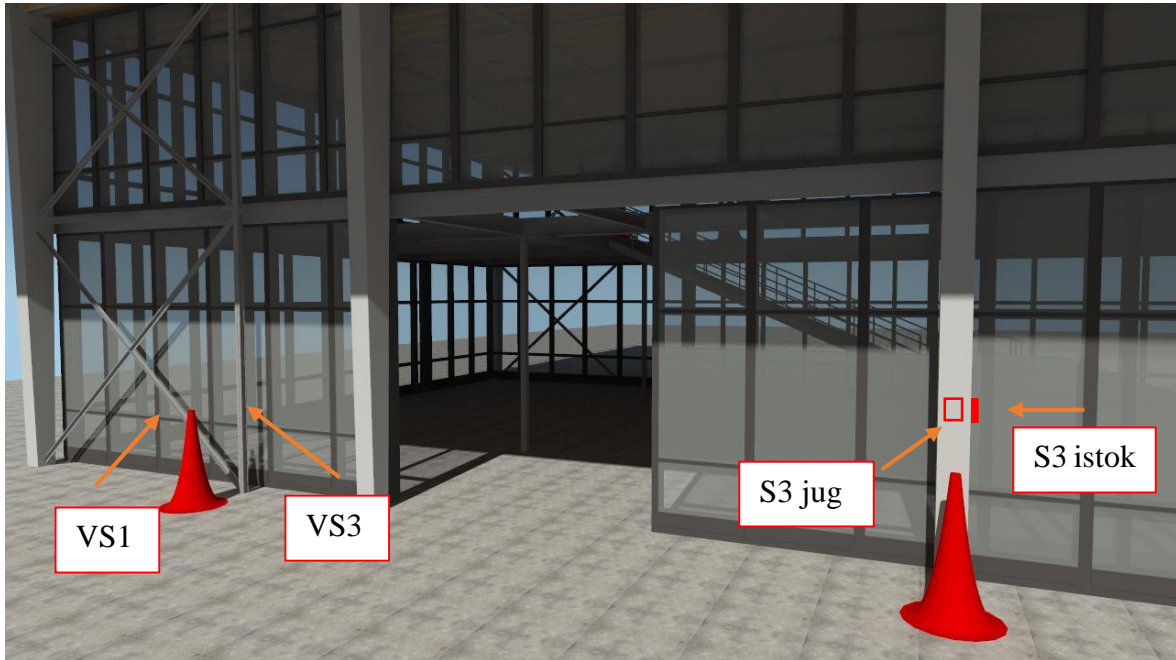
Kako je kvaliteta korištenog čelika nepoznata, potrebno je provesti ispitivanje tvrdoće prema Leebu kojom korelirano dobijemo vlačnu čvrstoću. Kada imamo vlačnu čvrstoću, normom HRN EN 10025-2:2007 [13] opisanom u poglavlju 2.4. (tablica 1.), možemo odrediti i granicu popuštanja konstruktivnog elementa.

Također je potrebno ispitati nepoznate debljine stjenki profila. Stjenke otvorenih poprečnih presjeka ispitat će se pomičnim mjerilom, a zatvorenih ultrazvučnom metodom opisanom u poglavlju 2.5. Osim mjerenja potrebnih za izradu ovog projekta, provest će se i ispitivanja studentice zadužene za sanaciju elemenata konstrukcije.

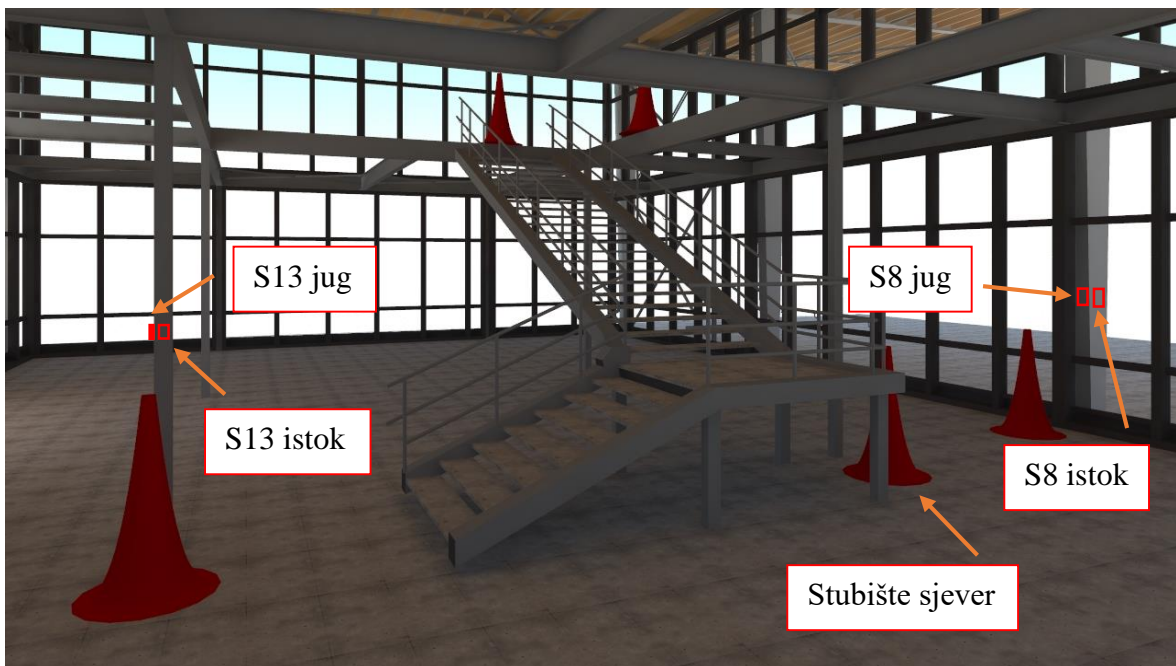
Kako bi se prikupilo što više informacija o krovnoj konstrukciji potrebno je organizirati dizalicu koja bi omogućila pristup devastiranim dijelovima krova kako bi se na tim mjestima izvršio vizualni pregled. Osim pregleda konstrukcije krova potrebno je provesti operacionalnu modalnu analizu. Kako je građevina vrlo visoka s teško dostupnom krovnom konstrukcijom, odlučeno je da će se dinamički parametri mjeriti na stupovima trozglobnog okvira na svakih metar visine do visine međukatne konstrukcije.

4.3. Mjerna mjesta

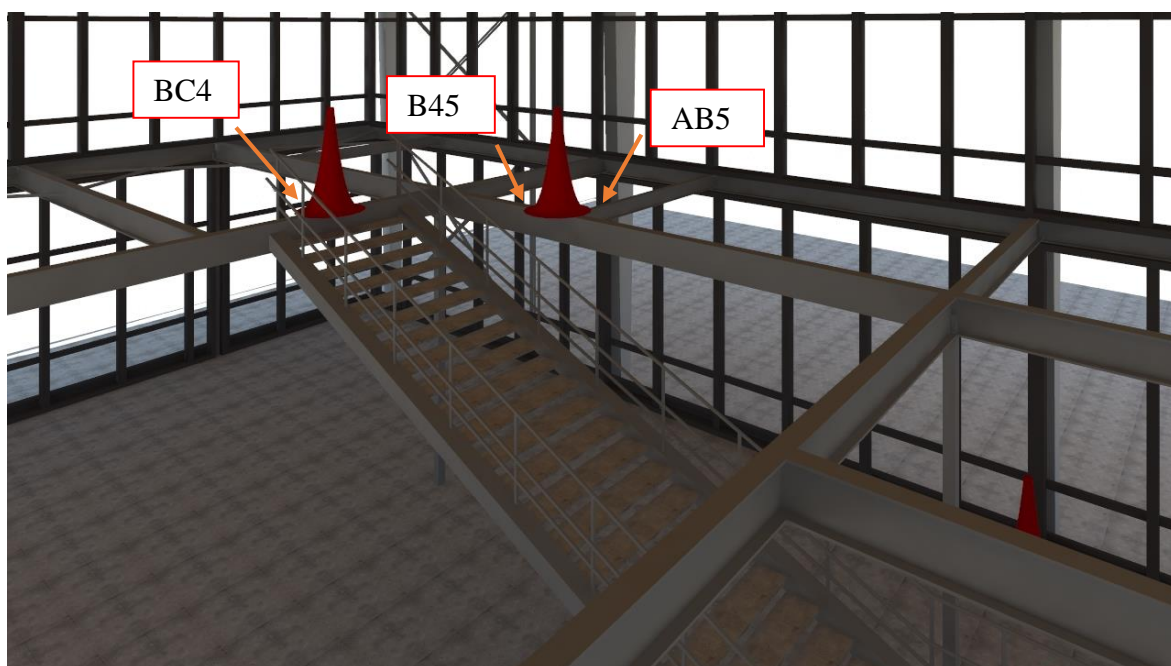
Dolaskom na mjesto ispitivanja potrebno je postaviti mjerna mjesta s ciljem prikupljanja potrebnih informacija. Crvenim čunjevima i strelicama su prikazani položaji mjernih mjesta na grafičkim prikazima u nastavku.



Slika 29. Mjerna mjesta na južnom pročelju.



Slika 30. Raspored mjernih mjesta interijer prizemlje.



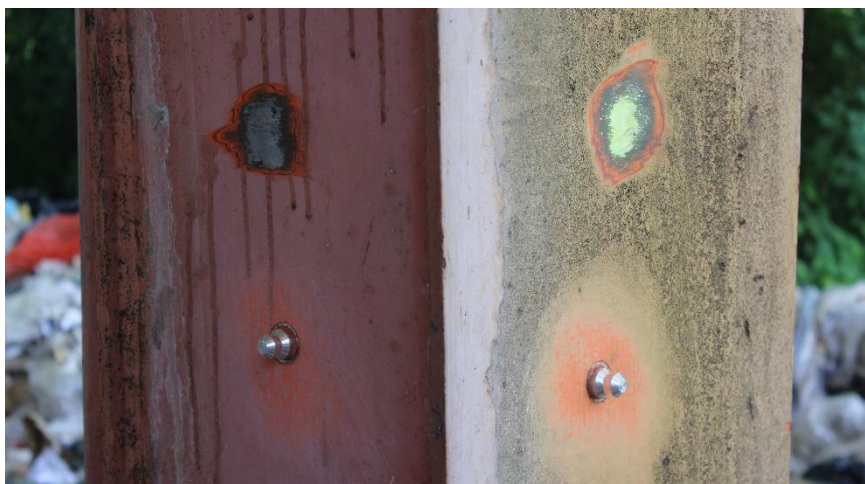
Slika 31. Raspored mjernih mjesta interijer međukatna konstrukcija.

5. PROVEDBA I PRIKAZ REZULTATA ISTRAŽNIH RADOVA

Istraživanja na ispitnom mjestu su se provodila u dva dana te su obuhvaćala ispitivanja kojima se pokušalo otkloniti nedoumice vezane za usklađivanje nacрта s izvedenim stanjem, oštećenja paviljona i utvrđivanje konstruktivnih elemenata koji nedostaju, geometriju poprečnih presjeka i karakteristike materijala rasponske i međukatne konstrukcije te stubišta, glavne oblike titranja građevine te prikupljanje što više informacija vizualnim pregledom i dokumentiranje istih. U ovom poglavlju će biti prikazana provedba istražnih radova uz prikaz karakterističnih informacija temeljitog vizualnog pregleda građevine. Za kraj poglavlja će biti prikazani rezultati potrebni za izradu numeričkog modela s ciljem kvalitetne procjene mehaničke otpornosti i stabilnosti zatečenog stanja konstrukcije.

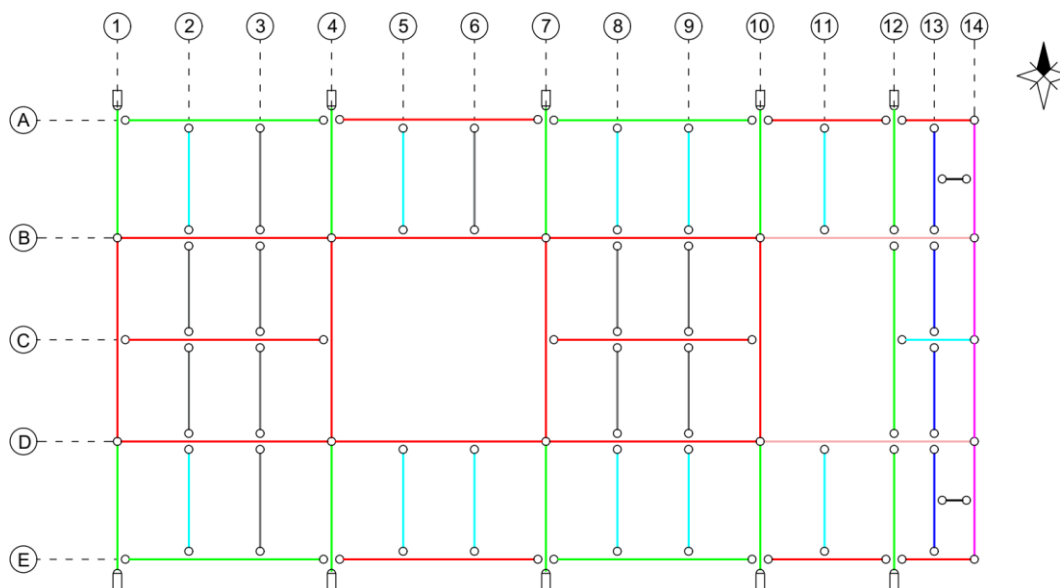
5.1. Provedba istražnih radova

Za početak istražnih radova se vršio detaljni vizualni pregled i dokumentiranje zatečenog stanja svih karakterističnih elemenata provedenih prema pripremljenim podlogama. Osim mjerenja tvrdoće i debljine stjenke ultrazvučnom metodom, na mjernim se mjestima određivala debljina zaštitnog sloja i adhezija što je potrebno projektu sanacije elemenata konstrukcije. U nastavku je fotografija koja prikazuje primjer mjernog mjesta.



Slika 32. Primjer mjernog mjesta S8.

Vizualnim su pregledom utvrđeni svi elementi međukatne konstrukcije, njihova duljina i spojevi. Prikaz elemenata međukatne konstrukcije je u nastavku (slika 33.).



Slika 33. Shematski prikaz elemenata međukatne konstrukcije.³

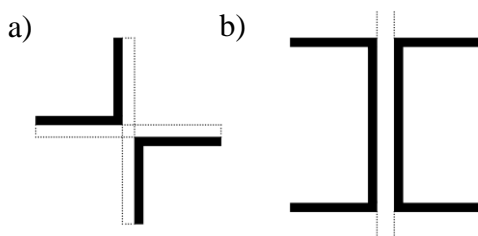
Elementi međukatne konstrukcije nazvani su po osima, a provjerom geometrijskih karakteristika elemenata utvrđeno je da pečat *ZENICA NPx* označuje profil koji je prema *DIN 1025-1: 1995* normi *IPN x*. Dvije „nelogične“ grede aneksa (B1014 i D1014) su klasificirane kao *HE 400 M*. S obzirom na prethodno, elemente međukatne konstrukcije možemo klasificirati prema profilima i po nazivu po osima:

Tablica 2. Profili međukatne konstrukcije.

Profil	Element
IPN400	BD1, BD4, BD7, BD10, A47, A1012, A1214, B14, B47, B710, C14, C710, D14, D47, D710, E47, E1012, E1214.
IPN340	AB1, AB4, AB7, AB10, AB12, BD12, DE1, DE4, DE7, DE10, DE12, A14, A710, E14, E710.
IPN300	AB14, BD14, DE14.
IPN240	AB2, AB3, AB5, AB6, AB8, AB9, AB11, BC2, BC3, BC8, BC9, CD2, CD3, CD8, CD9, DE2, DE3, DE5, DE6, DE8, DE9, DE11.
IPN200	AB13, BC13, CD13, DE13.
IPN160	Usred polja u uzdužnom smjeru – 1314AB, 1314DE.
HE400M	B1014, D1014.

³ Sivom bojom na skici i u tablici su prikazani elementi koji nedostaju.

Vertikalni spreg čine dvostruke dijagonale sastavljene iz dva L profila kako je prikazano na slici 34.a). Spregovi povezuju stupove rasponskog sklopa S1 i S5 sa stupom sastavljenim iz dva U profila čija shema je isto tako prikazana na slici 34.b). L profili vertikalnih spregova su $L 60\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 6\text{ mm}$, a U profili su $UPN 100$.



Slika 34. Shematski prikaz poprečnih presjeka elemenata vertikalnog sprega.

Horizontalni poprečni spregovi u ravnini međukatne konstrukcije su vidljivi na slici 15., a poprečni presjek im je $L 60\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 6\text{ mm}$.

Utvrđeno je da se fasadni dio kata oslanja na međukatnu konstrukciju (slika 35.) te je zbog nemogućnosti mjerenja mehaničkih i geometrijskih karakteristika fasade na međukatnoj konstrukciji izvršena procjena linijske težine koju preuzima međukatna konstrukcija. Površina po obodu koju fasada prekriva iznosi cca 65 m^2 . Debljina stakla je 4 mm . Ugrubo (bez oduzimanja dijelova okvira fasade), ukupna težina stakla na jednoj stranici poprečnog smjera iznosi $65\text{ m}^2 \cdot 0,004\text{ m} \cdot 25\text{ kN/m}^3 = 6,5\text{ kN}$. Okvir fasade je aluminijski ukupne duljine cca 84 m , površine poprečnog presjeka 810 mm^2 . Težina aluminijskog okvira je cca. $84\text{ m} \cdot 0,00081\text{ m}^2 \cdot 27\text{ kN/m}^3 = 1,8\text{ kN}$. Ukupna težina fasade u poprečnom smjeru je $6,5\text{ kN} + 1,8\text{ kN} = 8,3\text{ kN}$ ili iskazano linijski $q_{fasada} = 8,3\text{ kN}/16,4\text{ m} = 0,5\text{ kN/m}$. Analogno se može odrediti i za ostale tri strane.



Slika 35. Pogled na fasadni element oslonjen na međukatnu konstrukciju.



Slika 36. Pogled na unutarnje stubište.

Unutarnje je stubište prikazano na slici 36. Gredice do prvoga podesta imaju sandučasti poprečni presjek $120\text{ mm} \times 110\text{ mm}$. Podest se sastoji od profila $UPN\ 200$ i to u poprečnom smjeru (s obzirom na objekt) po jedan profil, a u uzdužnom smjeru po dva U profila. Od podesta do međukatne konstrukcije prostiru se grede sandučastog poprečnog presjeka $200\text{ mm} \times 240\text{ mm}$. Gazište stubišta se sastoji od metalnog kalupa u koji je uliven beton. Stupovi su pravokutnog poprečnog presjeka $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$.



Slika 37. Pogled na vanjsko stubište.

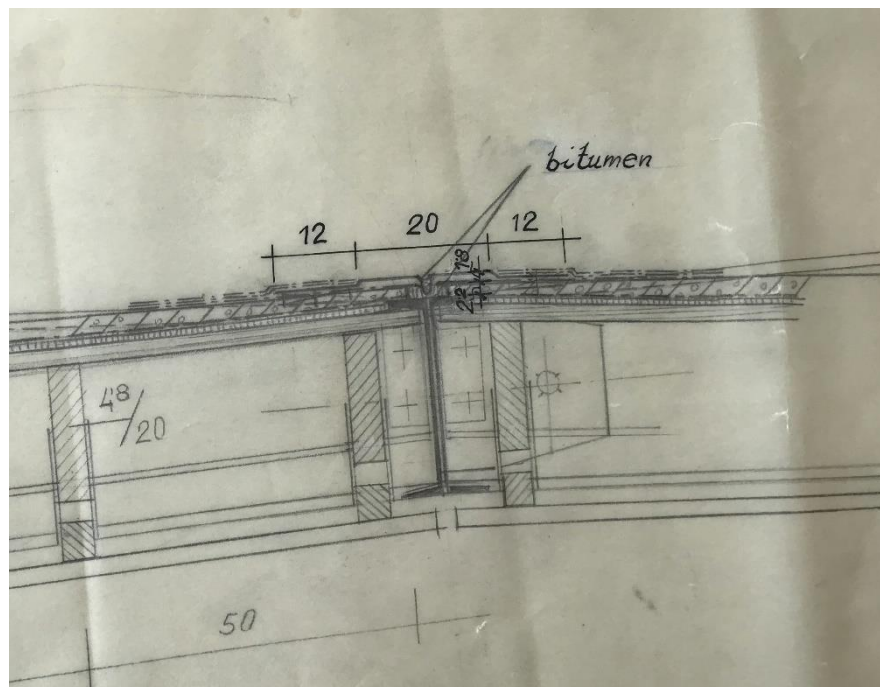
Vanjsko je stubište dvokrako i vrijede svi poprečni presjeci kao i za unutarnje samo što je podest duži. Gazište unutarnjeg i vanjskog stubišta je 190 cm . Prikazano je na slici 37.

Kako se uspjeta osigurati dizalica, izvršio se i detaljan pregled krovne konstrukcije na devastiranim mjestima krovišta (slika 38.).



Slika 38. Pogled na paviljon s označenim mjestima vizualnog pregleda krova.

Vizualnim pregledom krovišta riješile su se gotovo sve nedoumice. Nije se moglo pristupiti unutarnjem dijelu objekta gdje su spojene dvije grede glavnog nosača, ali uvidom u arhivsku građu Hrvatskog muzeja arhitekture na nacrtu projektiranog stanja (slika 39.) se može vidjeti da je spoj projektiran zglobno.



Slika 39. Detalj spoja dvije grede trozglobnog nosača.

Greda glavnog rasponskog sklopa je *I* – nosač promjenjivog poprečnog presjeka. Pri stupu je visina nosača 950 mm, a pri kraju 300 mm. Širina pojasnice je pri stupu 300 mm te nakon 4 m prelazi u širinu 200 mm. Visina pojasnice je konstantna 12,5 mm. Prema rasporedu osi u prilogu ovakav tip nosača pripada elementima u osima *S*, *U*, *W* i *Y*.

Širina stupa ispod grede je 750 mm, kako je bilo i procijenjeno u potpoglavlju 4.1. Vizualni pregled građevine. Nosač je na stup zavaren kako bi spoj bio što krući i mogao prenijeti veliki moment savijanja koji se javlja u nosaču nad stupom. Na udaljenosti 110 cm od stupa nalazi se vijčani spoj koji preuzima i moment savijanja. Sve iskazao u ovom pasusu se može detaljnije vidjeti na slici 40.



Slika 40. Detalj spoja stup – greda.

Kako je mjesto na kojemu se vršilo ispitivanje oštećeno može se vidjeti tipski poprečni presjek slojeva krova. Prikazan je u nastavku (slika 41.).



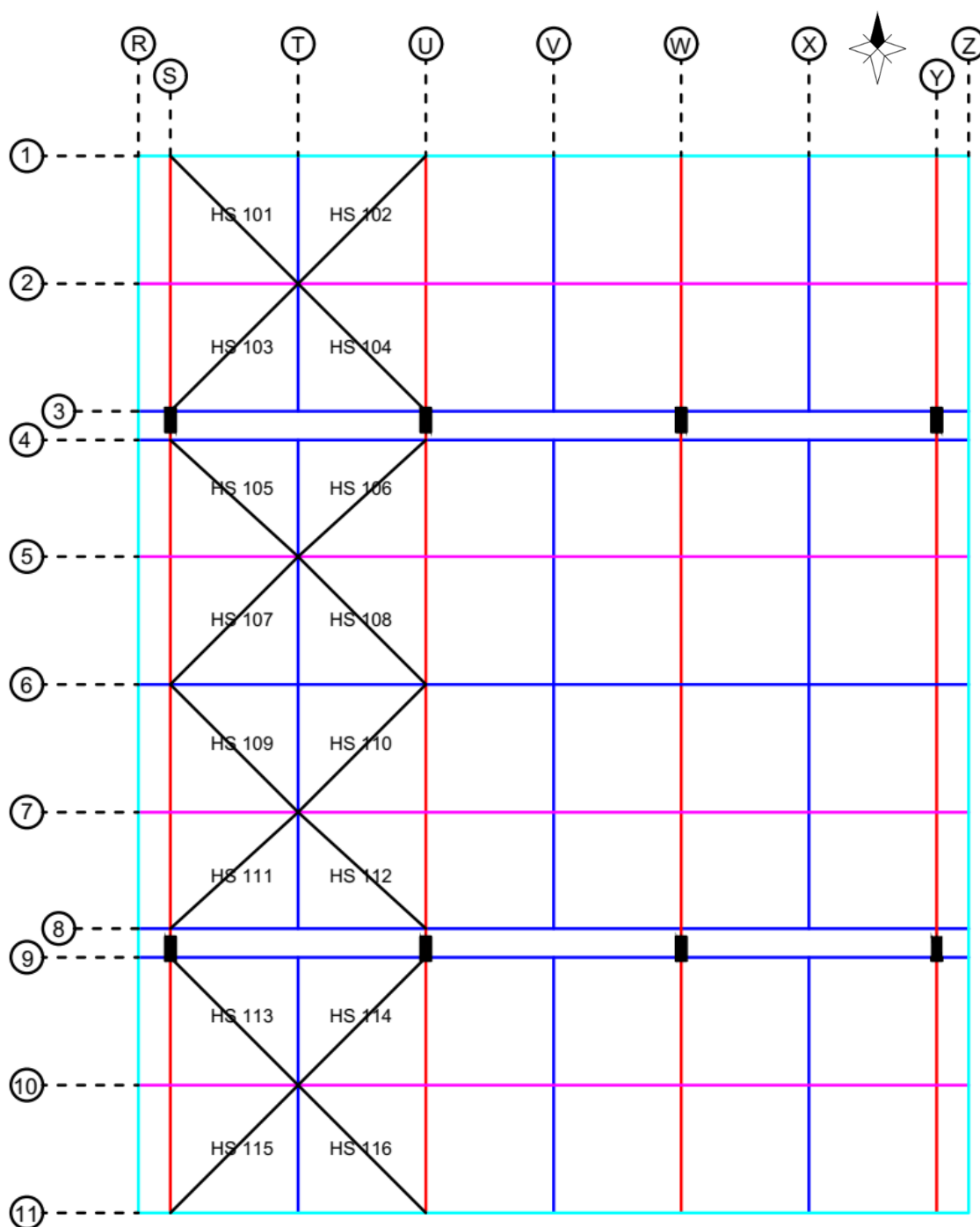
Slika 41. Poprečni presjek krovne konstrukcije.

Pri pregledavanju krovišta na dijelu gdje je otkriveno cijelo polje može se zaključiti da, osim elemenata koji se mogu pronaći u podlogama, postoji i spreg koji se nije vidio u ostalim poljima tijekom pregleda. Spregovi su dva L profila ($L 70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$) kako je prikazano na slici 42.



Slika 42. Detalj spoja sprega u sredini polja i skica poprečnog presjeka sprega.

Rekapitulirano će se prikazati utvrđeni poprečni presjeci svih elemenata krova nazvanih prema osima:



Slika 43. Shema elemenata krovšta.

Tablica 3. Elementi krovišta.

Profil	Elementi
Grede trozglobnog nosača	S13, S34, S46, S68, S89, S911, U13, U34, U46, U68, U89, U911, W13, W34, W46, W68, W89, W911, Y13, Y34, Y46, Y68, Y89, Y911
IPN 300	RS3, SU3, UW3, WY3, YZ3, RS4, SU4, UW4, WY4, YZ4, RS6, SU6, UW6, WY6, YZ6, RS8, SU8, UW8, WY8, YZ8, RS9, SU9, UW9, WY9, YZ9, T13, T46, T68, T911, V13, V46, V68, V911, X13, X46, X68, X911.
IPN 180	RS2, SU2, UW2, WY2, YZ2, RS5, SU5, UW5, WY5, YZ5, RS7, SU7, UW7, WY7, YZ7, RS10, SU10, UW10, WY10, YZ10.
UPN 300	Po obodu građevine
2 x L 70 x 70 x 7	HS101 – HS116.

Osim vizualnog pregleda i određivanja geometrijskih karakteristika krovišta, vršilo se i ispitivanje dinamičkih parametara konstrukcije s ciljem kalibracije numeričkog modela kako bi se mogao iskazati kvalitetniji proračun mehaničke otpornosti i stabilnosti objekta. Na slici 44. prikazani su referentni akcelerometri i sustav za prikupljanje podataka u fazi istražnih radova.



Slika 44. Ispitivanje dinamičkih parametara konstrukcije.

Ispitivanje se vršilo na stupovima glavnog rasponskog sklopa po visini 1 m sve do visine 5 m. Zbog teške dostupnosti krovne konstrukcije dinamički parametri su se odredili samo do spomenute visine i nepoznati su oblici osciliranja krova.



Slika 45. Akcelerometri na visini 5 m.

Svi rezultati pa tako i rezultati ovih mjerenja prikazani su u potpoglavlju u nastavku gdje su i obrađeni. Sve pozicije mjernih mjesta prikazane su u prilogu.

5.2. Rezultati istražnih radova

U nastavku su rezultati mjerenja tvrdoće prema Leebu s procjenom vlačne čvrstoće.

Tablica 4. Ispitivanje tvrdoće prema Leebu.

POZICIJA	\bar{x} [MPa]	σ [MPa]	MAX [MPa]	MIN [MPa]
S3 ISTOK	480	31,5	516	429
S3 JUG	434	17,3	454	410
VS1	359	13,5	383	350
VS3	297	14,7	312	275
S13 JUG	471	86,6	584	362
S13 ISTOK	452	55	500	368
STUBIŠTE SJEVER	368	10,8	380	354
S8 JUG	456	22,4	481	420
S8 ISTOK	426	18,5	457	412
B45 GORNJI POJAS	391	23,5	416	367
AB5 GORNJI POJAS	411	27,2	449	388
BC4 GORNJI POJAS	424	36,6	491	398

Svako je mjerenje odrađeno u 5 ponavljanja, stoga je faktor Studentove t - raspodjele $t = 2,87$ za razinu sigurnosti 95 %.

Tablica 5. Procjena vlačne čvrstoće elemenata.

POZICIJA	$u = \frac{t \cdot \sigma}{\sqrt{n}}$	f_t [MPa]
S3 ISTOK	$(2,87 \cdot 31,5)/\sqrt{5} = 40,43$	$480 \pm 40,43$
S3 JUG	$(2,87 \cdot 17,3)/\sqrt{5} = 22,20$	$434 \pm 22,20$
VS1	$(2,87 \cdot 13,5)/\sqrt{5} = 17,33$	$359 \pm 17,33$
VS3	$(2,87 \cdot 14,7)/\sqrt{5} = 18,87$	$297 \pm 18,87$
S13 JUG	$(2,87 \cdot 86,6)/\sqrt{5} = 111,15$	$471 \pm 111,15$
S13 ISTOK	$(2,87 \cdot 55,0)/\sqrt{5} = 70,59$	$452 \pm 70,59$
STUBIŠTE SJEVER	$(2,87 \cdot 10,8)/\sqrt{5} = 13,86$	$368 \pm 13,86$
S8 JUG	$(2,87 \cdot 22,4)/\sqrt{5} = 28,75$	$456 \pm 28,75$
S8 ISTOK	$(2,87 \cdot 18,5)/\sqrt{5} = 23,74$	$426 \pm 23,74$
B45 GORNJI POJAS	$(2,87 \cdot 23,5)/\sqrt{5} = 30,16$	$391 \pm 30,16$
AB5 GORNJI POJAS	$(2,87 \cdot 27,2)/\sqrt{5} = 34,91$	$411 \pm 34,91$
BC4 GORNJI POJAS	$(1,14 \cdot 36,6)/\sqrt{5} = 46,98$	$424 \pm 46,98$

U nastavku su rezultati mjerenja debljine stjenke ultrazvučnom puls – eho metodom.

Stup S3

Tablica 6. Izmjerene vrijednosti debljine stjenke S3.

POZICIJA	IZMJERENA VRIJEDNOSTI [mm]			
Zapad	12,08	12,09	12,06	12,12
Jug	12,38	12,25	11,83	12,38
Istok	11,93	11,63	11,94	10,68
Sjever	12,41	12,43	12,46	12,41

Tablica 7. Obrada rezultata debljine stjenke S3.

POZICIJA	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x - x_i)^2}{n - 1}}$	d [mm]
Zapad	12,09	0,03	12,09 ± 0,03
Jug	12,21	0,26	12,21 ± 0,26
Istok	11,55	0,59	11,55 ± 0,59
Sjever	12,43	0,02	12,43 ± 0,02

Stup S8

Tablica 8. Izmjerene vrijednosti debljine stjenke S8.

POZICIJA	IZMJERENA VRIJEDNOSTI [mm]			
Jug	12,13	12,16	12,23	12,17
Istok	11,86	11,82	11,92	11,88

Tablica 9. Obrada rezultata debljine stjenke S8.

POZICIJA	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x - x_i)^2}{n - 1}}$	d [mm]
Jug	12,17	0,04	12,17 ± 0,04
Istok	11,87	0,04	11,87 ± 0,04

Stup S13

Tablica 10. Izmjerene vrijednosti debljine stjenke S13.

POZICIJA	IZMJERENA VRIJEDNOSTI [mm]			
Zapad	8,59	7,89	7,89	7,69
Jug	6,46	6,40	6,41	6,49
Istok	9,87	8,78	9,08	3,68
Sjever	6,49	6,48	6,47	6,49

Tablica 11. Obrada rezultata debljine stjenke S13.

POZICIJA	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x - x_i)^2}{n - 1}}$	d [mm]
Zapad	8,02	0,39	8,02 ± 0,39
Jug	6,44	0,04	6,44 ± 0,04
Istok	9,35	0,51	9,35 ± 0,31
Sjever	6,48	0,01	6,48 ± 0,01

Stubište sjever

Tablica 12. Izmjerene vrijednosti debljine stjenke *Stubište sjever.*

POZICIJA	IZMJERENA VRIJEDNOSTI [mm]		
Sjever	8,69	8,38	8,40
	8,33	8,37	8,34
	8,33	8,32	8,39

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 8,39 \text{ mm}, \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum(x - x_i)^2}{n - 1}} = 0,01.$$

Debljina stjenke *Stubište sjever*: $d = (8,39 \pm 0,01) \text{ mm}.$

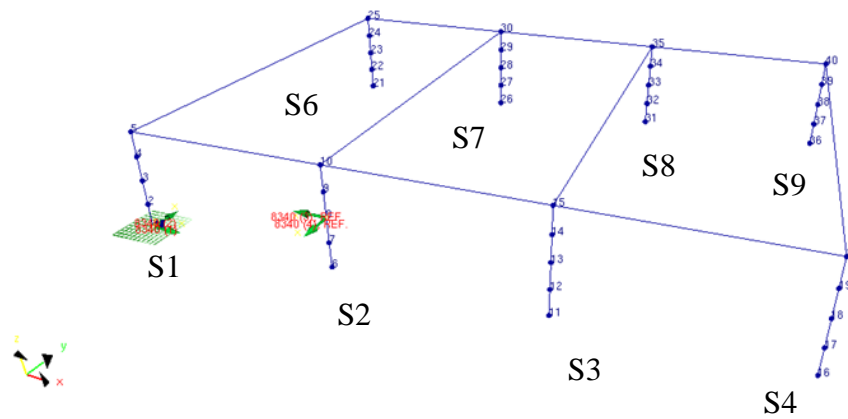
Na osnovu izmjerenih debljini stjenke i procijenjene vlačne čvrstoće, možemo prema tablici 1. odrediti koji čelik je korišten za koji element.

Tablica 13. Kategorizacija čelika u odnosu na vlačnu čvrstoću i debljinu stijenke.

POZICIJA	d [mm]	f_t [MPa]	ČELIK
S3 ISTOK	11,55 ± 0,59	480 ± 40,43	S275
S3 JUG	12,21 ± 0,26	434 ± 22,20	S235
VS1	7,48	359 ± 17,33	S235
VS3	6,93	297 ± 18,87	S235
S13 JUG	6,44 ± 0,04	471 ± 111,15	S235
S13 ISTOK	9,35 ± 0,31	452 ± 70,59	S235
STUBIŠTE SJEVER	8,39 ± 0,01	368 ± 13,86	S235
S8 JUG	12,17 ± 0,04	456 ± 28,75	S275
S8 ISTOK	11,87 ± 0,04	426 ± 23,74	S235
B45 GORNJI POJAS	21,66	391 ± 30,16	S235
AB5 GORNJI POJAS	11,3	411 ± 34,91	S235
BC4 GORNJI POJAS	21,66	424 ± 46,98	S235

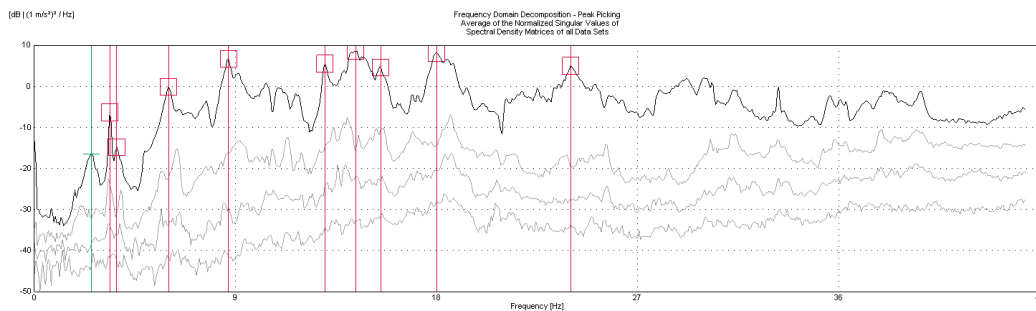
Može se zaključiti da su konstruktivni elementi međukatne konstrukcije čelici tipa S235 kao i stubište, a stupovi glavnog rasponskog sklopa su čelici bolje kvalitete S275. Pendl stupovi su male debljine pa je rasipanje rezultata veliko, stoga će se umjesto vjerojatne kvalitete S275 procijeniti na kvalitetu S235. U krovnoj konstrukciji nije vršeno ispitivanje pa se procjenjuje da su tipski elementi koji su identični profilima međukatne konstrukcije čelici S235, a grede trozglobnih nosača čelici S275.

Za kraj su prikazani rezultati operacione modalne analize. Prikazani su rezultati 9 oblika osciliranja. Na slici 46. je prikazana shema mjernih mjesta s ucrtanim referentnim mjestom na točki 8, odnosno stupu S2 u skladu s priložima 1 i 2. Odgovor stupova terase (S5 i S10) nisu se mjerili.



Slika 46. Prikaz mjernih mjesta operacijske modalne analize s prikazanom nomenklaturom ispitanih stupova u skladu s priložima 1 i 2.

Analizom zapisa singularne dekompozicije funkcije odgovora konstrukcije prikazane na slici 47., dobiveni su oblici osciliranja karakterizirani vlastitom frekvencijom u tablici 14. i grafičkim prikazima u nastavku.

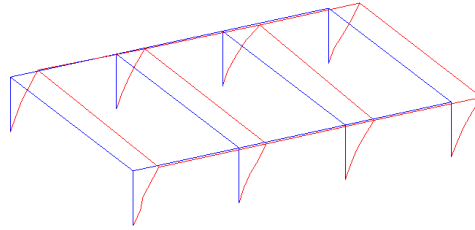


Slika 47. Zapis singularne dekompozicije funkcije odgovora konstrukcije.

Tablica 14. Eksperimentalno određene vlastite frekvencije objekta.

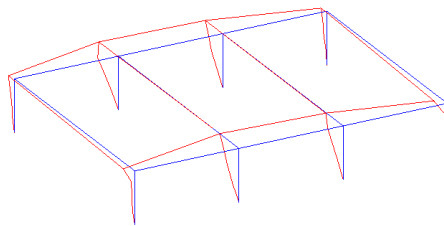
Frekvencija [Hz]
2,56
3,38
6,00
8,69
13,00
14,38
15,50
18,00
24,00

FDD - Frequency Domain Decomposition

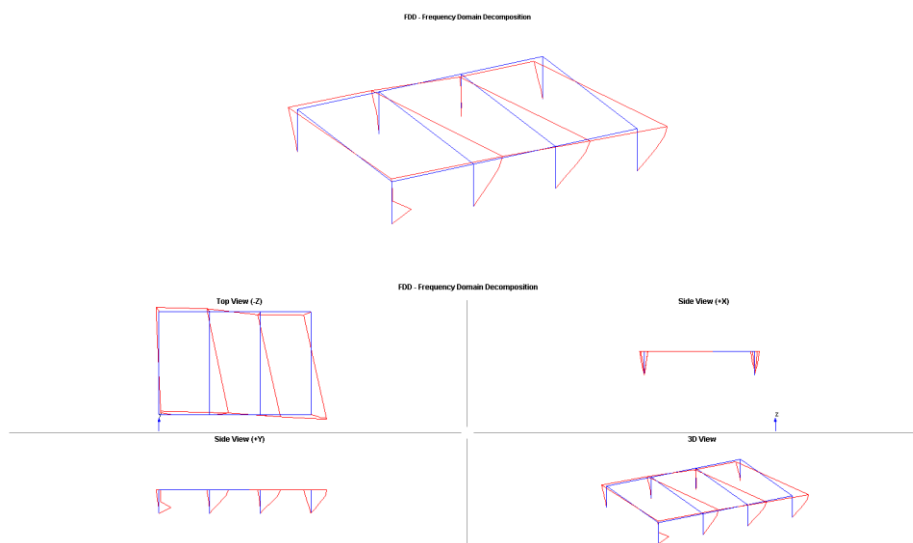


Slika 48. Prvi oblik osciliranja konstrukcije ($f = 2,56 \text{ Hz}$).

FDD - Frequency Domain Decomposition



Slika 49. Drugi oblik osciliranja konstrukcije ($f = 3,38 \text{ Hz}$).



Slika 50. Treći oblik osciliranja konstrukcije ($f = 6,00 \text{ Hz}$).

Kako možemo vidjeti na slici 48. konstrukcija ima najmanju krutost u uzdužnom smjeru. Bilo je očekivano da je prvi oblik u poprečnom smjeru zbog male krutosti troglobnog okvira na bočni pomak. Troglobni nosači su postavljeni u poprečnom smjeru, a povezani su međukatnom konstrukcijom i elementima u krovu. Osim toga postoji spreg koji preuzima djelovanje u tom smjeru što je još jedna nelogičnost s obzirom da u poprečnom smjeru (koji se mjerenjem doima krući) ne postoji vertikalna poprečna stabilizacija koja bi pripomogla u preuzimanju bočnog djelovanja.

Drugi oblik osciliranja je u poprečnom smjeru gdje se horizontalnom djelovanju u tom smjeru opire sustav troglobnih nosača. Ovaj oblik osciliranja možemo vidjeti na slici 49. Analizom oblika titranja može se zaključiti da postoji stabilizacija po rubu građevine jer stupovi u sredini imaju veći odmak od stupova na rubu. Na to može utjecati samo fasada jer nema niti jednog elementa koji bi mogao (prividno) stabilizirati sustav. Pretpostavlja se da je iz tog razloga prvi oblik uzdužni pomak, a ne poprečni. Dakako stabilizacija fasadom se ne smije promatrati u procjeni mehaničke otpornosti i stabilnosti iz razloga što prilikom ambijentalne pobude ukrućuje sustav, a ozbiljnijim djelovanjem na konstrukciju bi doprinos prijenosu opterećenja bio beznačajan.

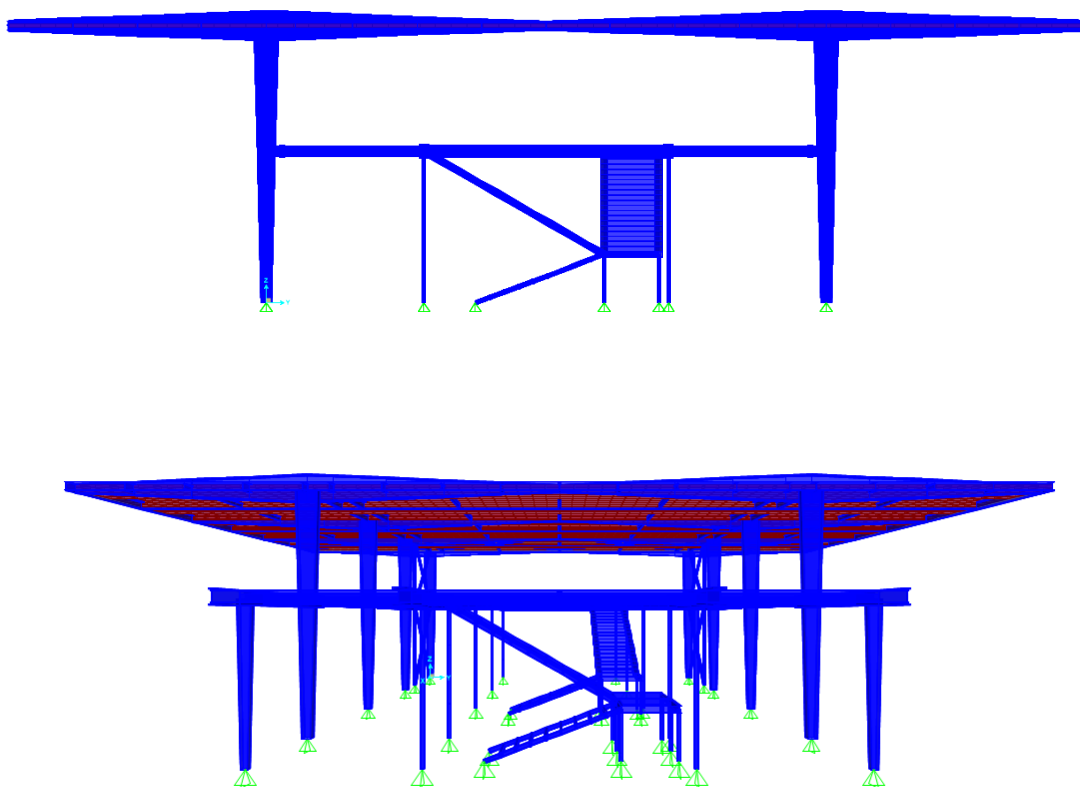
Na slici 50. je prikazan prvi torzijski oblik titranja, a on je treći mod titranja. Ostali oblici titranja se trebaju uzeti s rezervom jer nije promatran utjecaj krovništva na oblike stoga se ne mogu za njih procijeniti nikakvi zaključci.

6. NUMERIČKI MODEL KONSTRUKCIJE

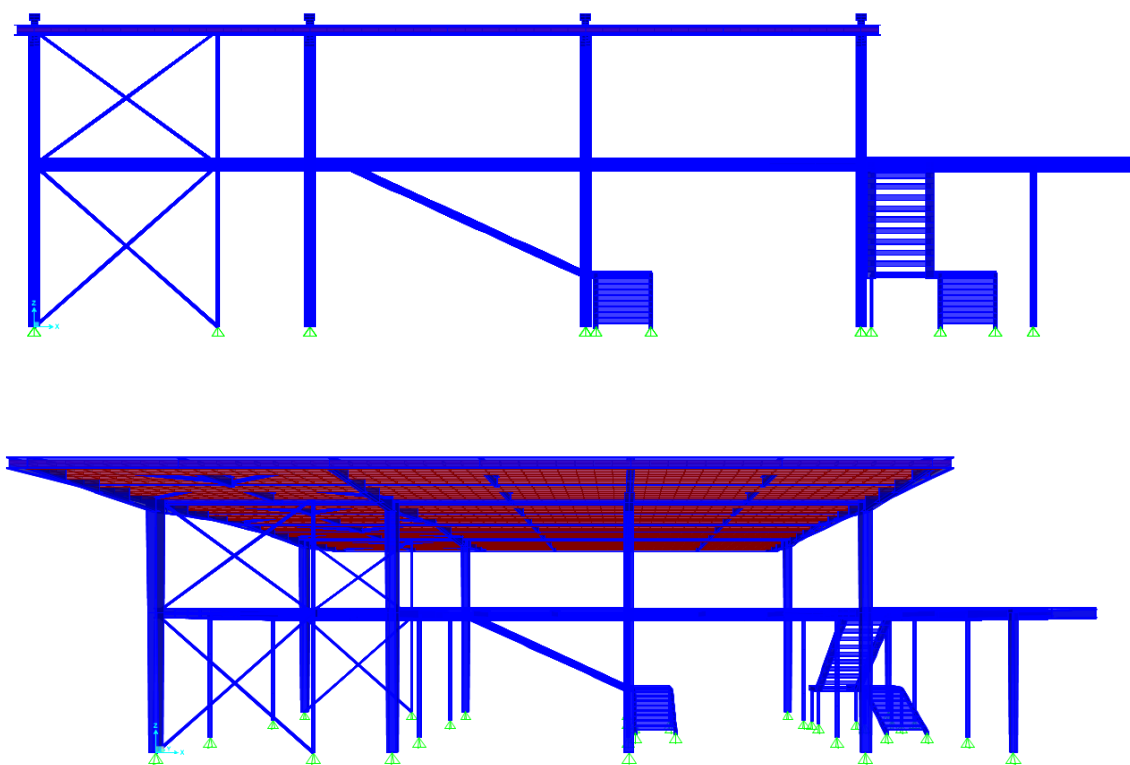
S obzirom na prethodno iskazane informacije u ovom je poglavlju prikazana izrada referentnog numeričkog modela konstrukcije s ciljem što boljeg repliciranja izvornog stanja. U potpoglavlju 6.6. će osim referentnog modela biti prikazani i alternativni modeli na kojima su zanemareni povoljni utjecaji ne nosivih elemenata. Na alternativnim će se modelima u 7. poglavlju prikazati statički proračun i usporedba s obzirom na iskoristivost analiziranih elemenata. Građevina je analizirana kao prostorna konstrukcija. Numerički modeli su izrađeni u programskom paketu za proračun konstrukcija SAP2000.

6.1. Geometrija

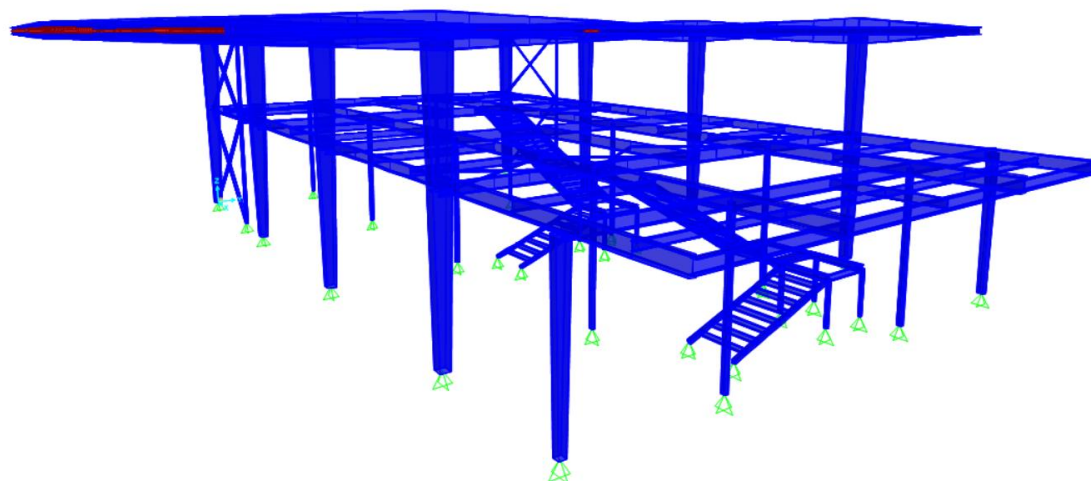
Prema dostupnim podlogama i istražnim radovima utvrđene su dimenzije svih elemenata. Geometrijski prikazi numeričkog modela su u nastavku.



Slika 51. Pogled na numerički model građevine s istoka.



Slika 52. Pogled na numerički model građevine s juga.



Slika 53. Perspektivni prikaz numeričkog modela građevine.

6.2. Materijali

U podlogama je vidljivo da je u slojevima krova korišten lagani beton mase $1,6 t/m^3$, koji se oslanja na daščanu oplatu debljine $24 mm$ i drvene gredice $48/200 mm$ na rasteru $53 cm$. Težini betona su dodane težine od drveta i gredica s obzirom na raster. Što se tiče čelične konstrukcije, korišteni materijal se odredio istražnim radovima opisanima u poglavlju 5.

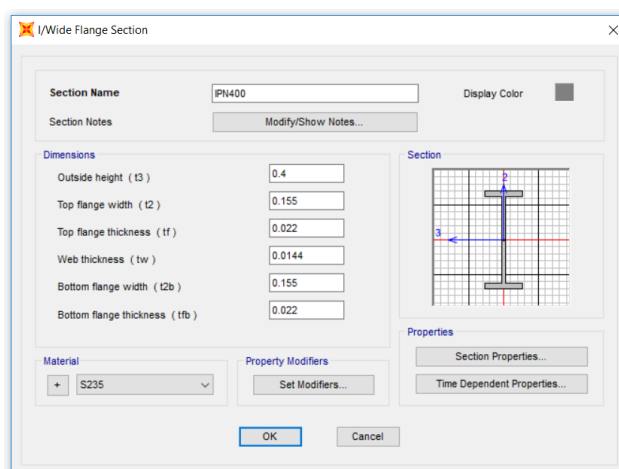
Karakteristike materijala koji su korišteni u numeričkom modelu su prikazane u nastavku.

Tablica 15. Karakteristike materijala.

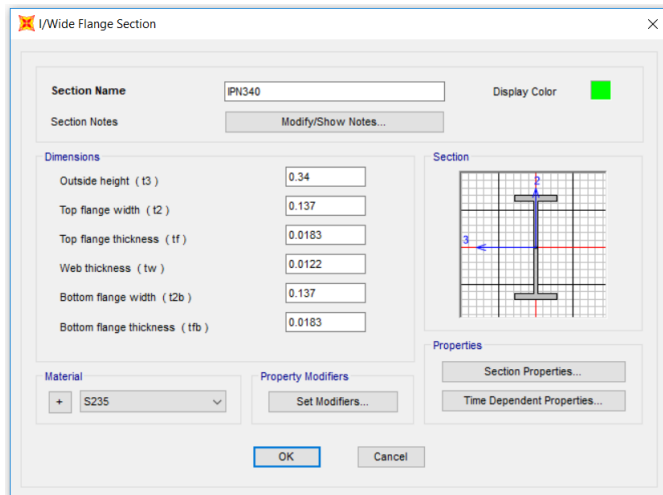
Materijal	Volumna težina	Volumna masa	E1	G12	U12
-	kN/m^3	t/m^3	kN/m^2	kN/m^2	-
Lagani beton + gredice i oplata	22	2.24338	24855578	10356491	0.2
S235	76.97	7.84905	210000000	80769231	0.3
S275	76.97	7.84905	210000000	80769231	0.3

6.3. Poprečni presjeci

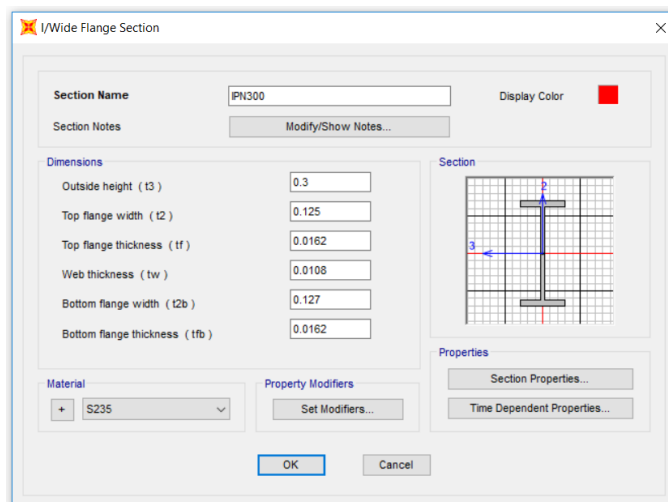
Poprečni presjeci štapnih elemenata su također određeni istražnim radovima koji su prikazani u poglavlju 5. U nastavku su prikazani Poprečni presjeci koji su korišteni u numeričkom modelu. Kako SAP2000 nema knjižnicu s IPN profilima, kreirani su prema tablicama.



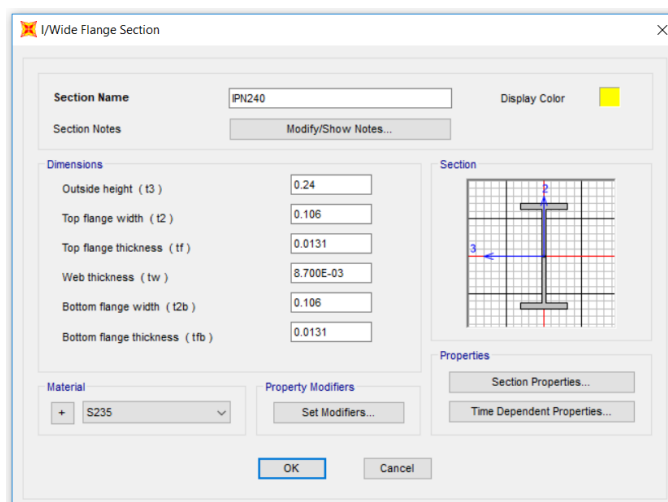
Slika 54. Poprečni presjek IPN400.



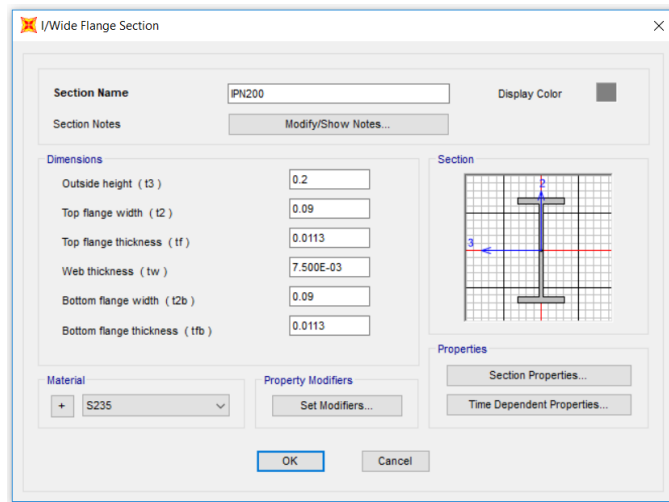
Slika 55. Poprečni presjek IPN340.



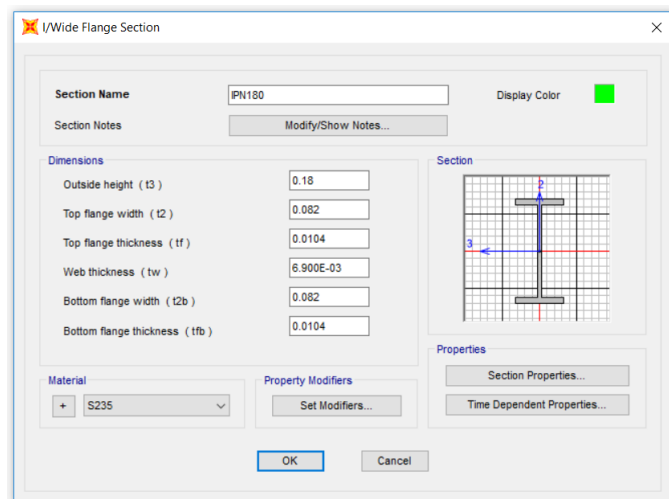
Slika 56. Poprečni presjek IPN300.



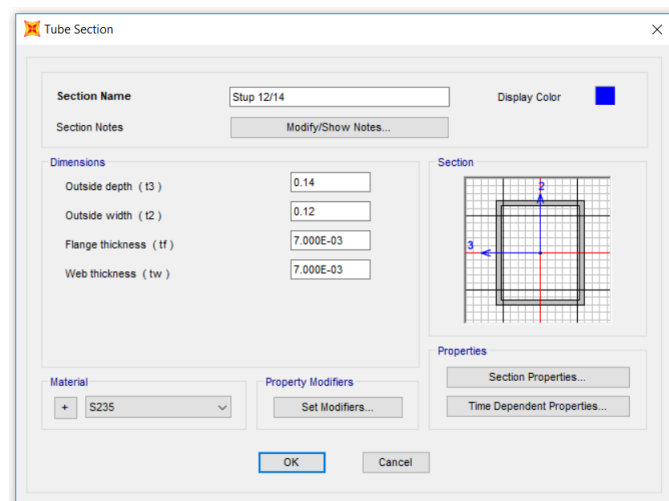
Slika 57. Poprečni presjek IPN240.



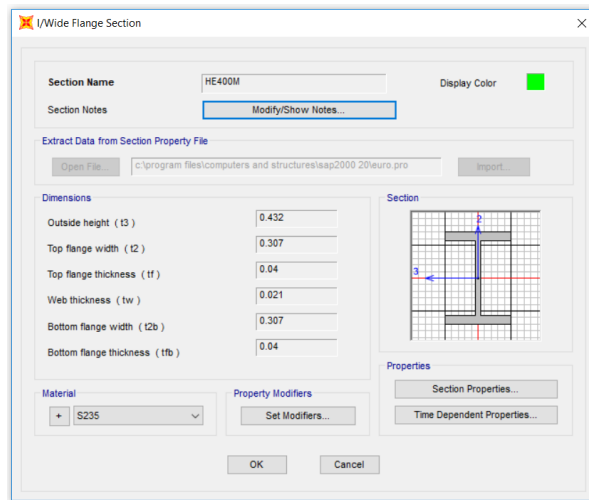
Slika 58. Poprečni presjek IPN200.



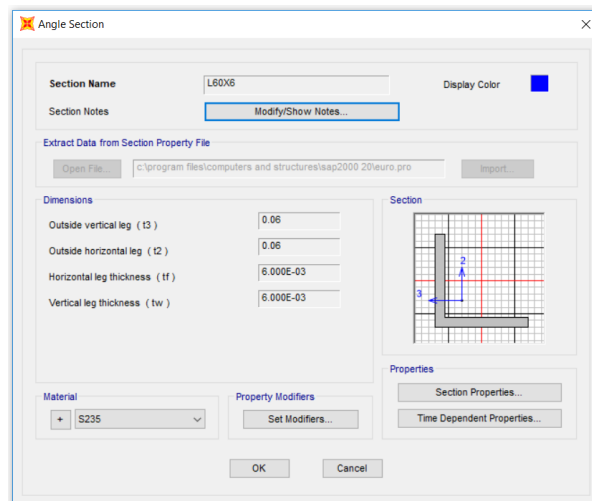
Slika 59. Poprečni presjek IPN180.



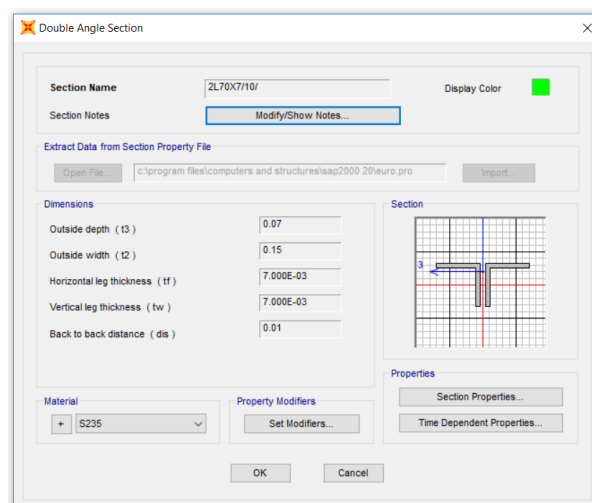
Slika 60. Poprečni presjek pendl stupa.



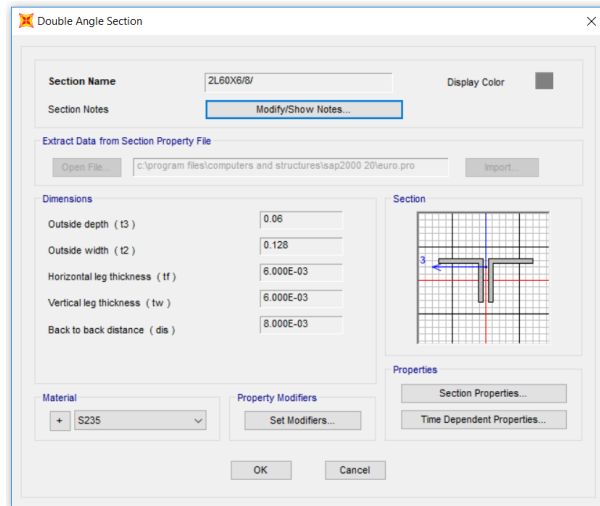
Slika 61. Poprečni presjek HE400M.



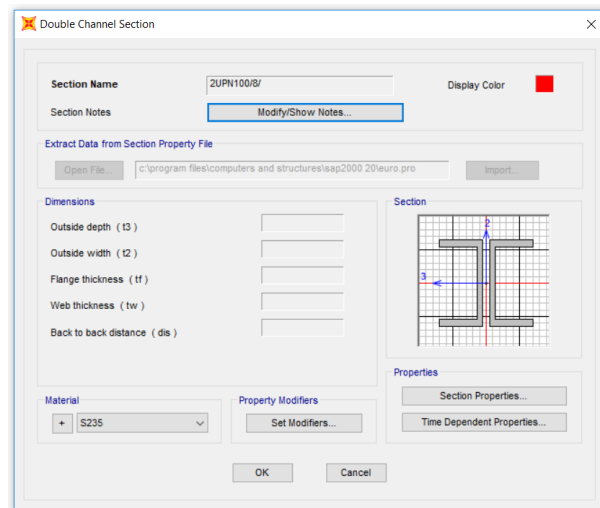
Slika 62. Poprečni presjek HPS-a u međukatnoj konstrukciji (L60x6).



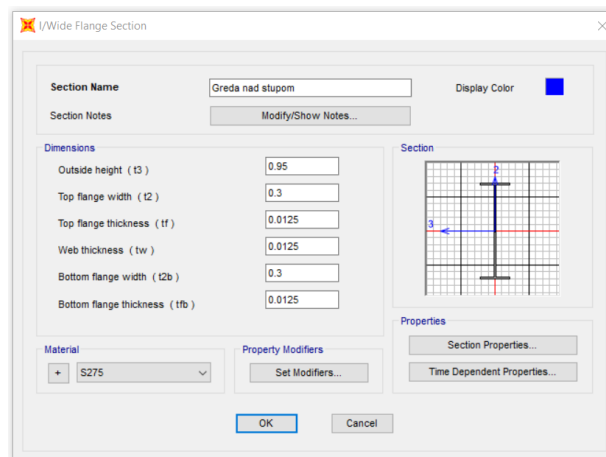
Slika 63. Poprečni presjek HPS-a u krovu (2L70x7/10).



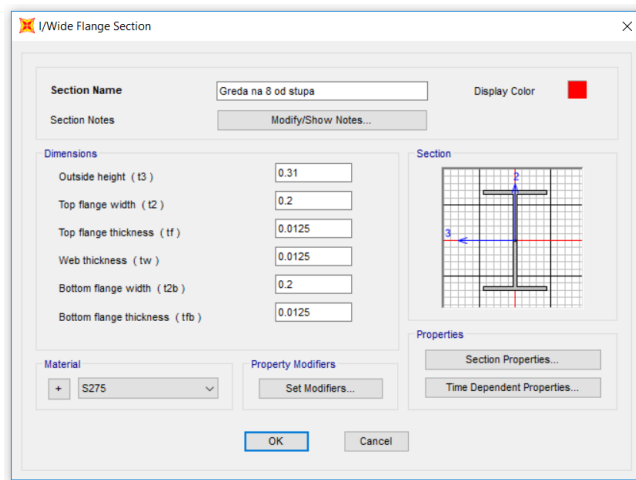
Slika 64. Poprečni presjek VPS-a (2L60x6/8).



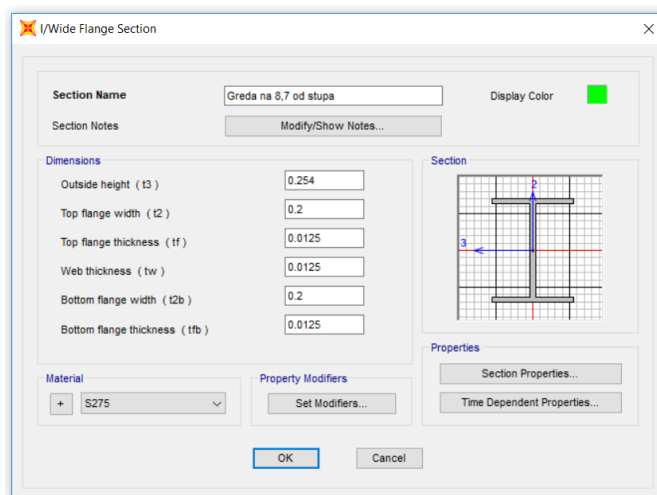
Slika 65. Poprečni presjek stupa VPS-a (2UPN100/8).



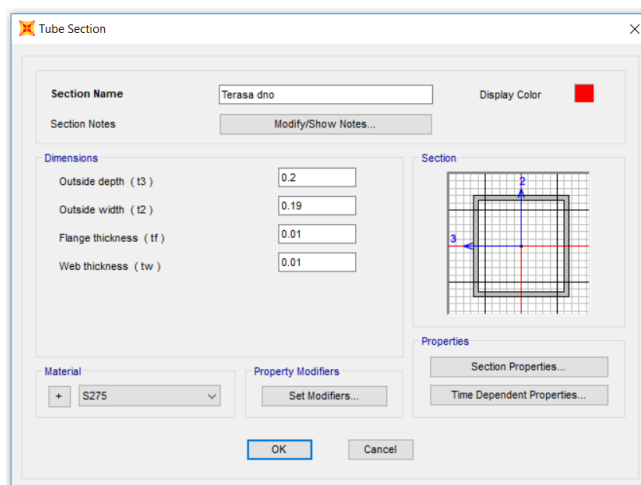
Slika 66. Poprečni presjek grede na stupom trozglobnog nosača.



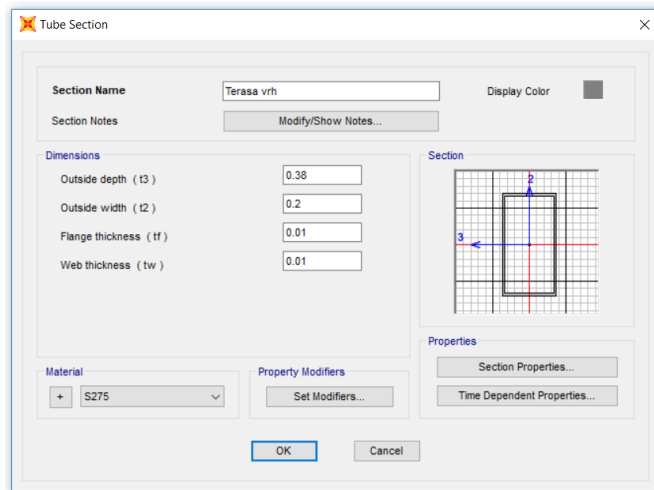
Slika 67. Poprečni presjek grede na konzolnom kraju.



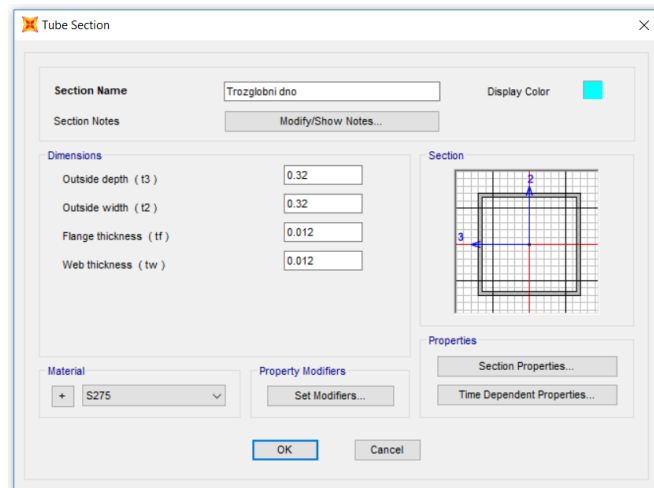
Slika 68. Greda na spoju poluokvira.



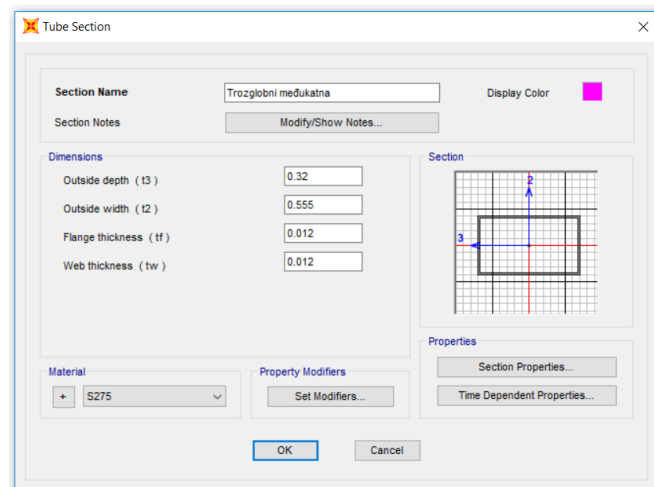
Slika 69. Poprečni presjek stupa terase pri dnu.



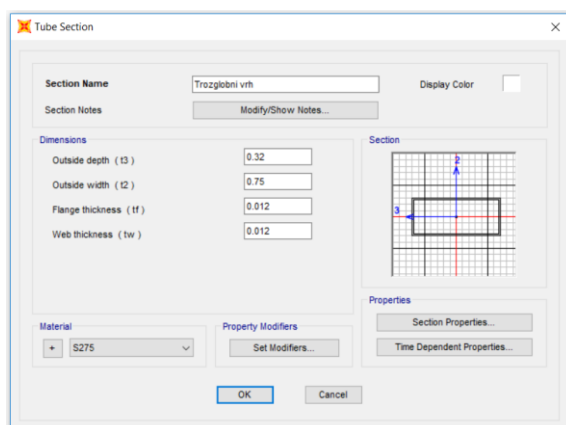
Slika 70. Poprečni presjek stupa terase pri vrhu.



Slika 71. Poprečni presjek stupa trozglobnog nosača pri dnu.

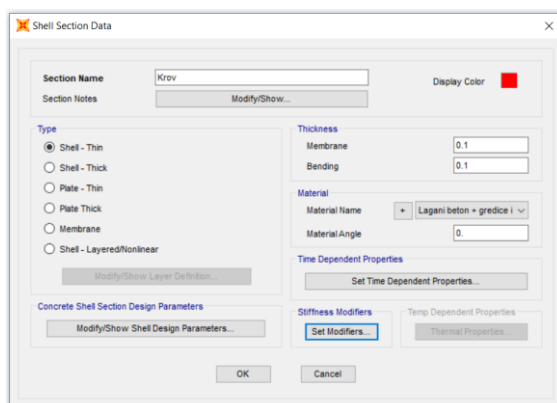


Slika 72. Poprečni presjek stupa trozglobnog nosača u razini međukatne konstrukcije.



Slika 73. Poprečni presjek stupa trozglobnog nosača pri vrhu.

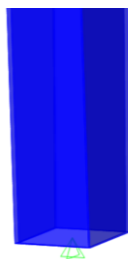
Slojevi krova su modelirani kao plošni element debljine $0,1\text{ m}$ kako bi u kombinaciji s odabranim materijalom nadomjestio težinu slojeva te nadomjestio aksijalnu krutost krovne konstrukcije jer izvanrednom pobudom teži djelovanju kao aksijalno kruti element.



Slika 74. Poprečni presjek krovne plohe.

6.4. Rubni uvjeti

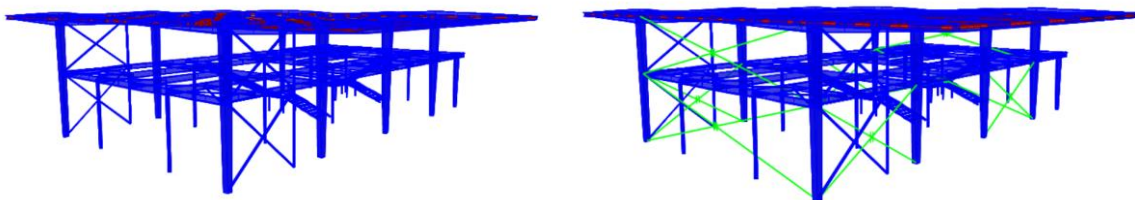
Svi rubni uvjeti su promatrani kao nepomični s oslobođenim kutovima zaokreta.



Slika 75. Primjer korištenih rubnih uvjeta.

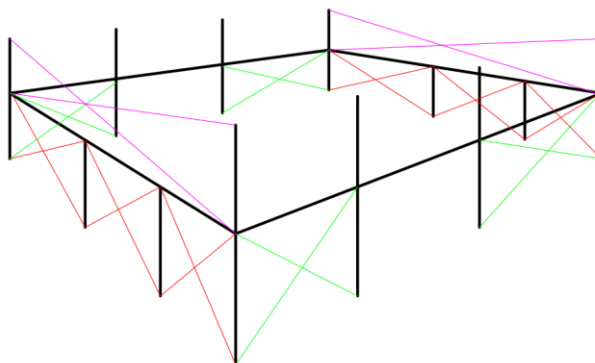
6.5. Usporedba dinamičkih parametara s izmjerenim vrijednostima

Kako su istražnim radovima izmjereni dinamički parametri realne konstrukcije, u ovom potpoglavlju će se analizirati razlike u tvorbi modela, od izmjerenog stanja prema stanju kako se projektira uobičajenom građevinarskom praksom. Ako se građevina modelira u skladu s izmjerenim karakteristikama (geometrija, materijali, poprečni presjeci) dobije se model koji se ne slaže s izmjerenim dinamičkim parametrima. U prethodnim poglavljima je objašnjeno da fasada pri ambijentalnoj pobudi djeluje povoljno na krutost sustava u poprečnom smjeru. Kako je spoj fasade i međukatne konstrukcije nelinearan, u modelu će se utjecaj modelirati kao linearna opruga koja povezuje karakteristične stupove u smislu oblikovnog preuzimanja naprezanja fasade od bočnog pomaka (slika 76.).

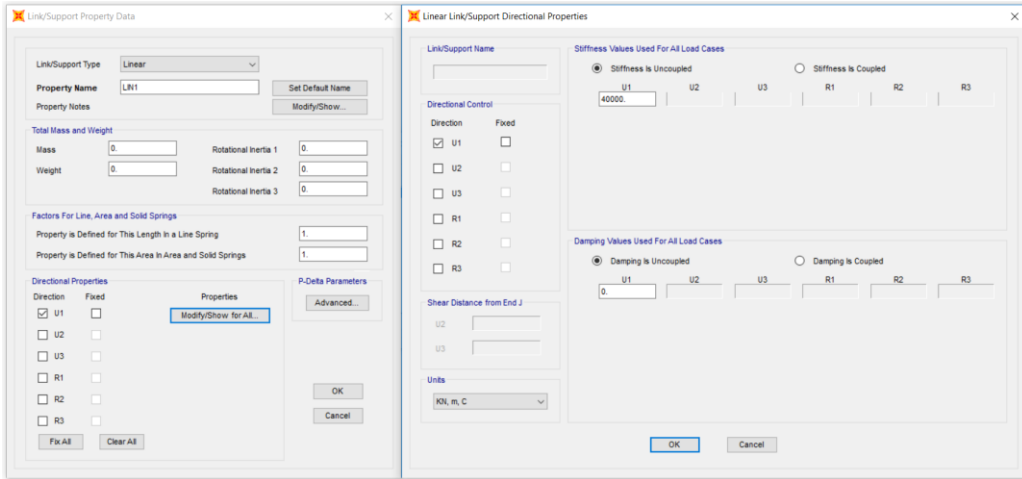


Slika 76. Numerički model zatečenog stanja s i bez modeliranog utjecaja fasade.

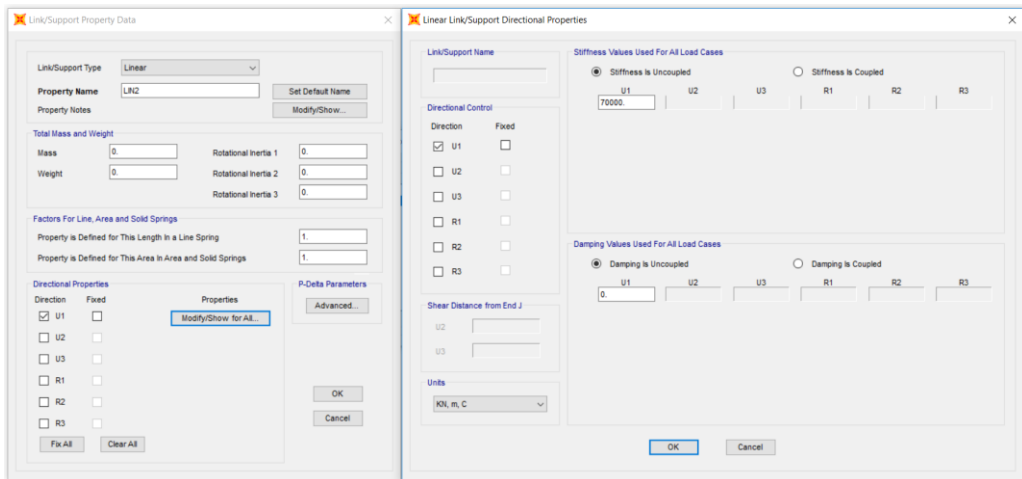
Krutosti opruga su se određivale ukrućivanjem modeliranog zatečenog stanja prema izmjerenim vrijednostima. Potrebno je naglasiti da se pri statičkom proračunu spomenuti povoljni utjecaj zanemaruje što je i logično jer pri malim pobudama fasada može prenijeti određeno (nepoznato) opterećenje, ali kada bi na konstrukciju djelovala pobuda znatnijeg intenziteta fasada bi popustila. U nastavku je shematski prikaz rasporeda opruga u numeričkom modelu (crveno – LIN1, magenta – LIN2, zeleno – LIN3, crno – pozicije obodnih stupova) te karakteristike opruga u programskom paketu SAP2000.



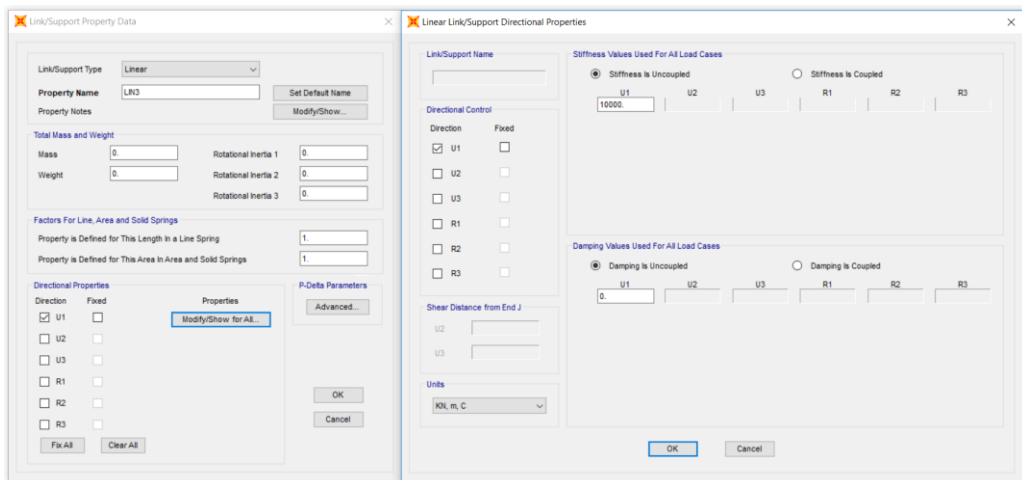
Slika 77. Shematski prikaz linkova.



Slika 78. Karakteristike opruge LIN1.

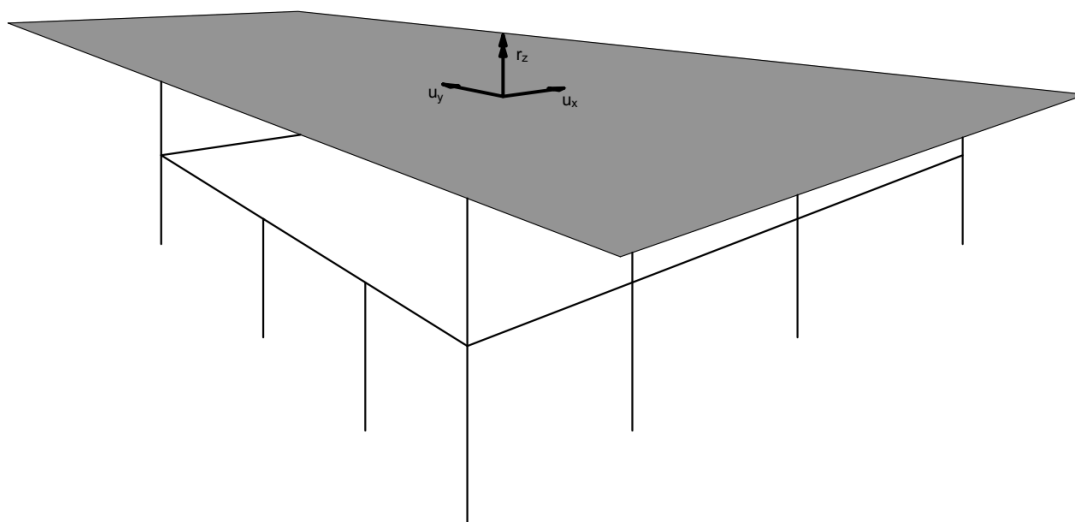


Slika 79. Karakteristike opruge LIN2.



Slika 80. Karakteristike opruge LIN3.

Građevina je simetrična i povezana u krovu, stoga sustav možemo promatrati kao prostornu konstrukciju s tri dinamička stupnja slobode (poprečni pomak, uzdužni pomak, kut zaokreta) kako je i prikazano na slici u nastavku. Iz prethodnog razloga će se dalje u radu promatrati utjecaj analognih oblika titranja građevine i raditi usporedba istih za varijaciju različitih modela.



Slika 81. Dinamički stupnjevi slobode promatrane građevine.

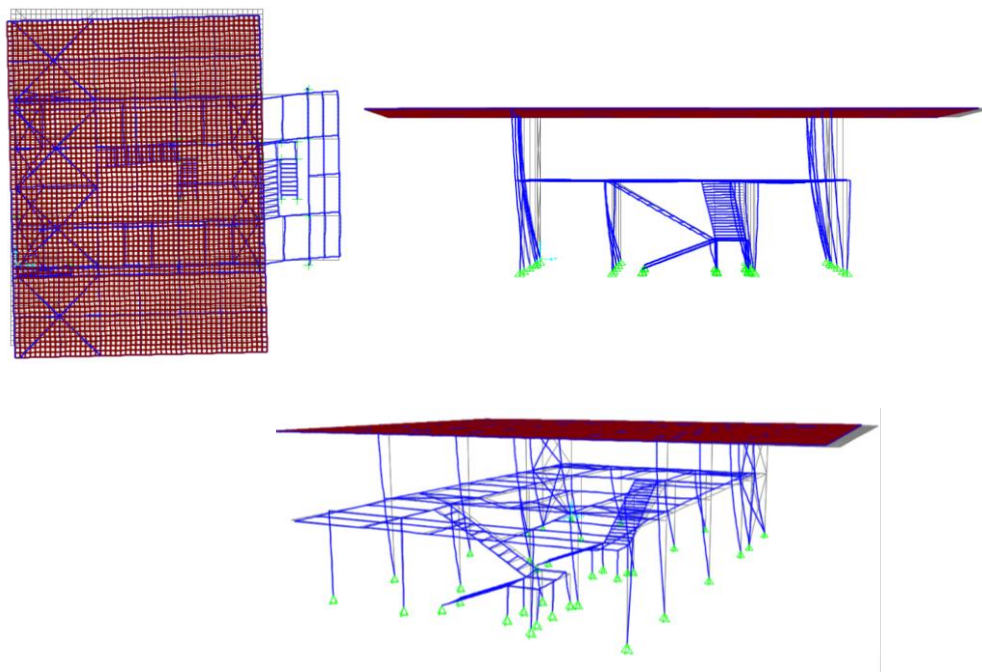
Usporedba dinamičkih parametara zatečenog stanja između izmjerenih vrijednosti, numeričkog modela bez utjecaja fasade i numeričkog modela s procijenjenim utjecajem fasade je prikazan u nastavku.

Tablica 16. Usporedba dinamičkih parametara numeričkog modela i mjerenja.

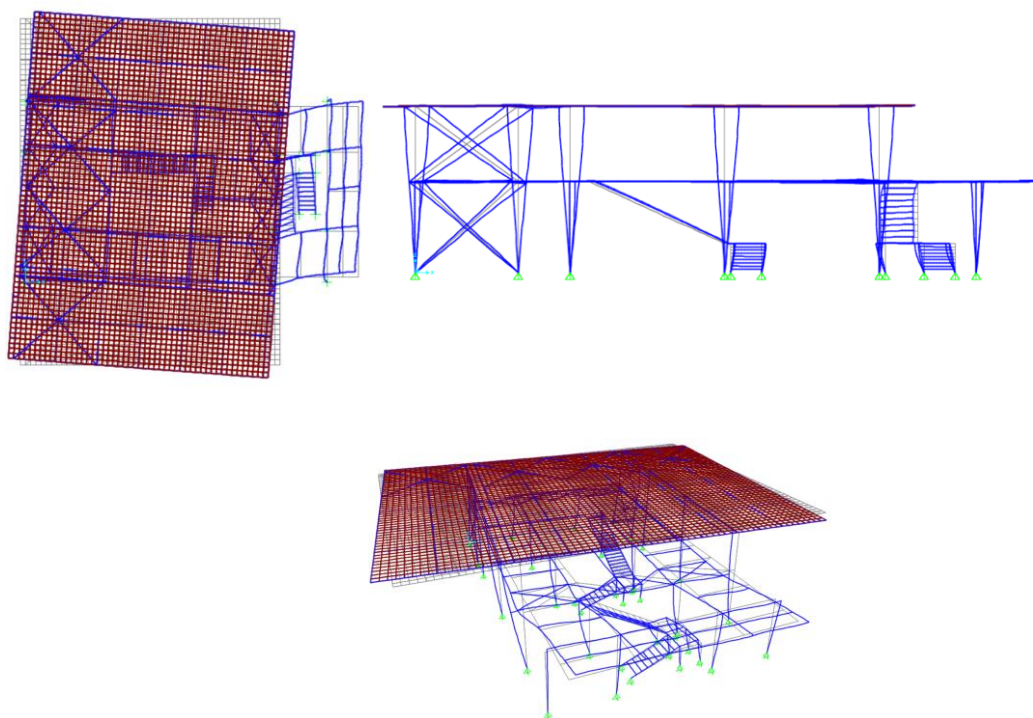
Modalni oblik	Izmjereno [Hz]	Model bez fasade [Hz]	Model s fasadom [Hz]
Uzdužni pomak	2,563	2,203	2,557
Poprečni pomak	3,375	1,258	3,389
Torzija	6,000	2,006	3,865

Iz tablice 16. se može vidjeti veliki utjecaj fasade na konstrukciju. Uzdužni oblik titranja građevine se neznatno mijenja, ali poprečni pomak i torzija znatno odstupaju od izmjerenih vrijednosti i modela koji uzima u obzir utjecaj fasade. Može se primjetiti da torzija dolazi prije pomaka u uzdužnom smjeru što je (osim slabe krutosti na bočni pomak) još jedna nepovoljna činjenica.

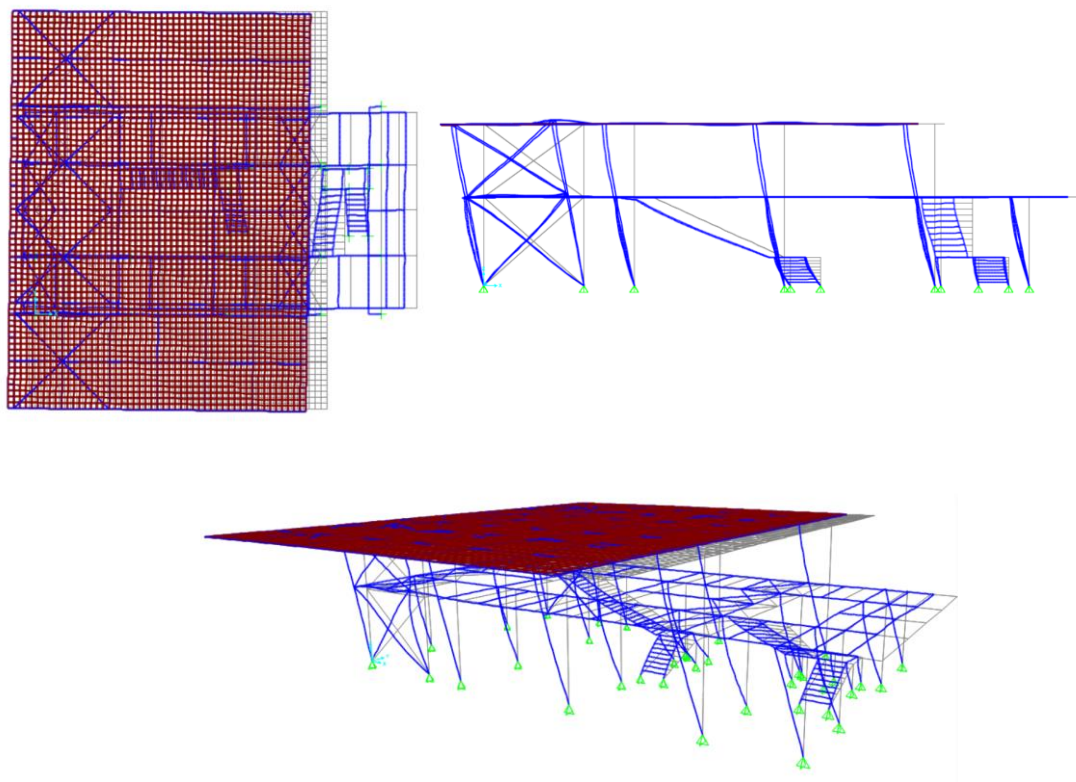
Za statički proračun u poglavlju 7. analizirani modeli će se dobiti nadogradnjom modela bez utjecaja fasade jer je on na strani sigurnosti, kao i realnija procjena pri djelovanju znatnijih pobuda, posebice potresa. U nastavku su grafički prikazi oblika titranja prethodno opisanih numeričkih modela.



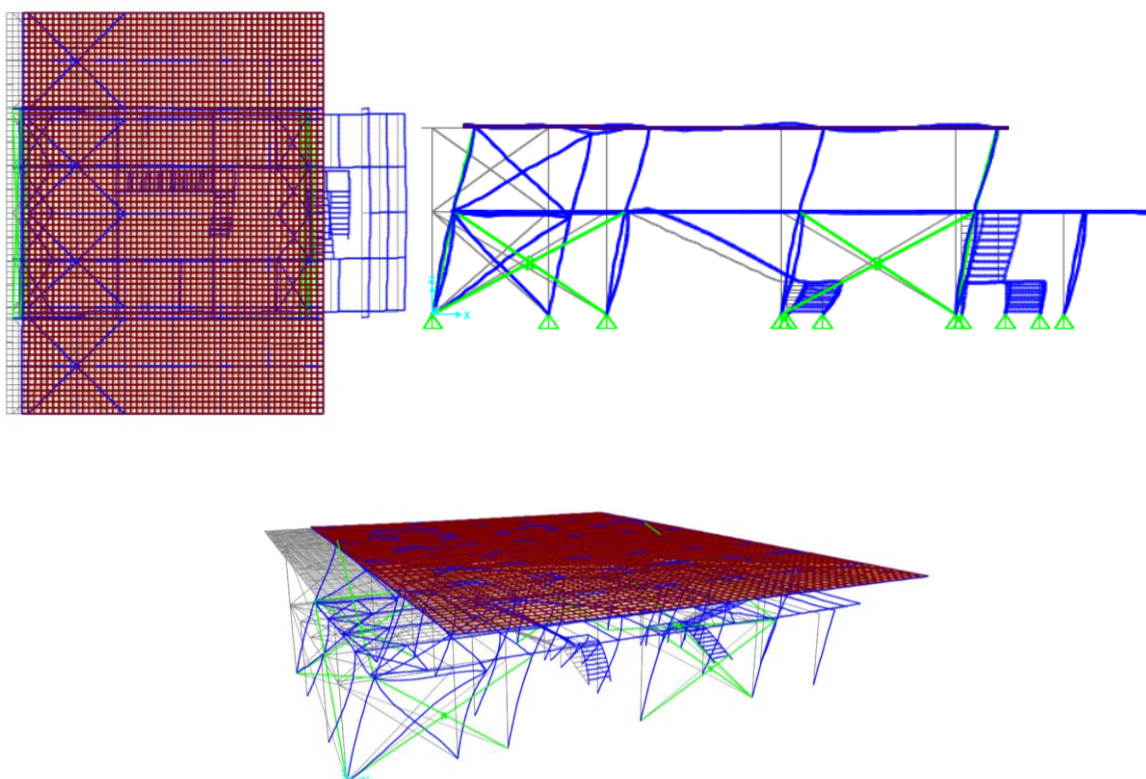
Slika 82. Prvi oblik titranja modela bez utjecaja fasade (1,258 Hz).



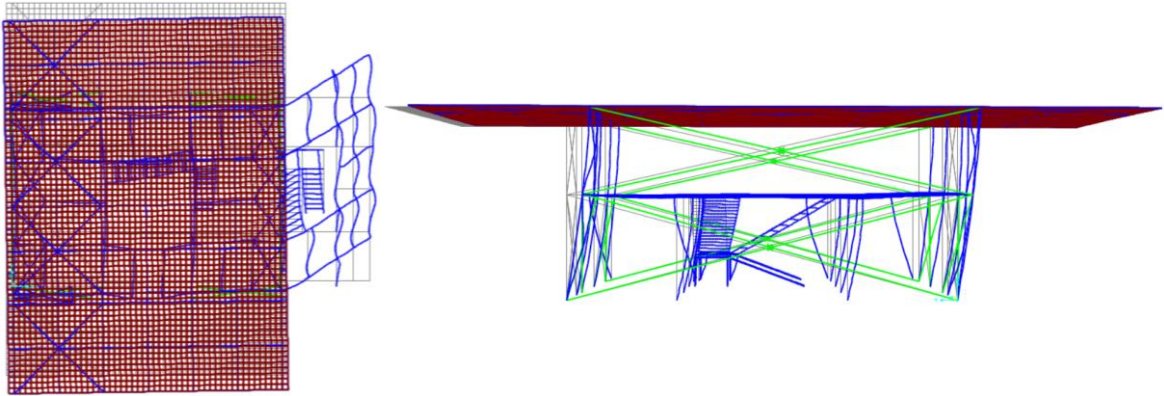
Slika 83. Drugi oblik titranja modela bez utjecaja fasade (2,006 Hz).



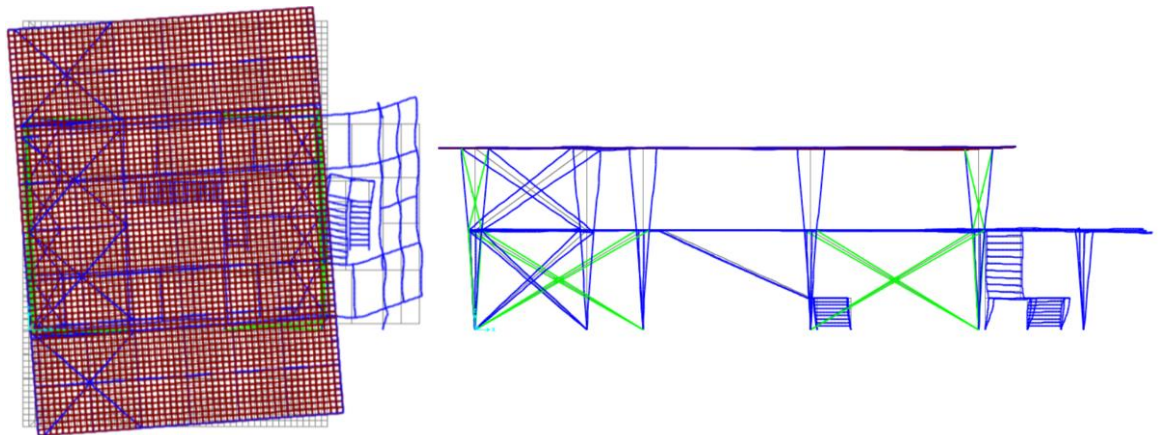
Slika 84. Treći oblik titranja modela bez utjecaja fasade (2,203 Hz).



Slika 85. Prvi oblik titranja modela s utjecajem fasade (2,557 Hz).



Slika 86. Drugi oblik titranja modela s utjecajem fasade (3,389 Hz).



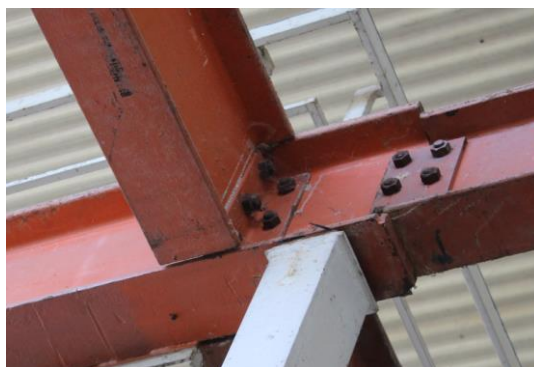
Slika 87. Treći oblik titranja modela s utjecajem fasade (3,865 Hz).

6.6. Numerički modeli za statički proračun

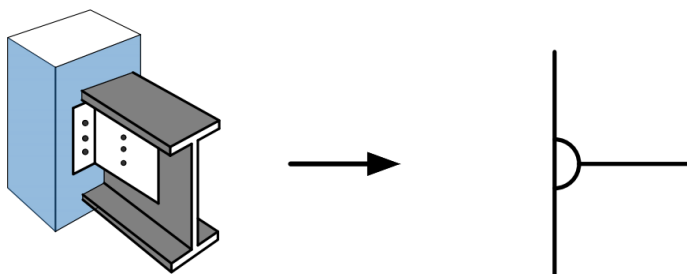
Kako je u prošlom poglavlju opisan utjecaj fasade na dinamičke parametre građevine, odnosno povoljan utjecaj na bočnu krutost konstrukcije, u ovom poglavlju će biti prikazana izrada numeričkih modela na kojima će se provesti statički proračun i usporedba iskoristivosti karakterističnih elemenata (poglavlje 7.).

Promatranj građevini u zatečenom stanju nedostaju neki elementi međukatne konstrukcije stoga će se model bez utjecaja fasade prikazan u potpoglavlju 6.5. doraditi prema projektiranom stanju. S obzirom na spoj elemenata u međukatnoj konstrukciji promatrat će se dvije ekstremne situacije i jedna koja je procijenjena da je najbliže stvarnom ponašanju konstrukcije. Promatrat će se zglobni spoj između svih elemenata međukatne konstrukcije (model a) u skladu s projektantskom praksom za takav tip detalja (slika 88.). Osim prethodnog promatrat će se i kruti spoj između elemenata (model c) jer elementi mogu prenijeti određeni moment, a u slučaju ambijentalne pobude (pri kojoj je vršeno mjerenje) elementi se tako i ponašaju. Za kraj će se napraviti numerički pokus određivanja krutosti opruge za tipični element konstrukcije kojim će biti modelirani svi spojevi istog tipa kao rješenje najbliže stvarnom stanju (model b).

a)

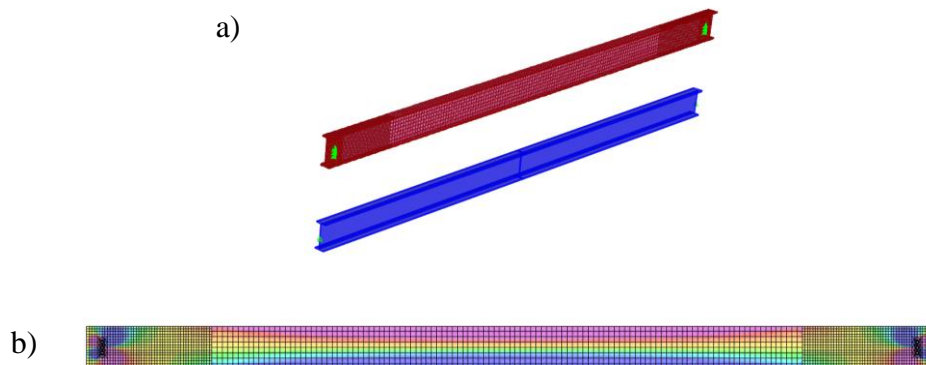


b)



Slika 88. Prikaz karakterističnog detalja često ponavljano na konstrukciji (a) i njegova idealizacija (b) u skladu s projektantskom praksom prema [6].

Za procjenu krutosti detalja izrađen je numerički model koji prikazuje usporedbu elementa poprečnog presjeka IPN400 modeliranog plošno s otvorima za vijke i štapno s iterativno određenom krutosti na pomak kutom zaokreta u čvoru (slika 89.).

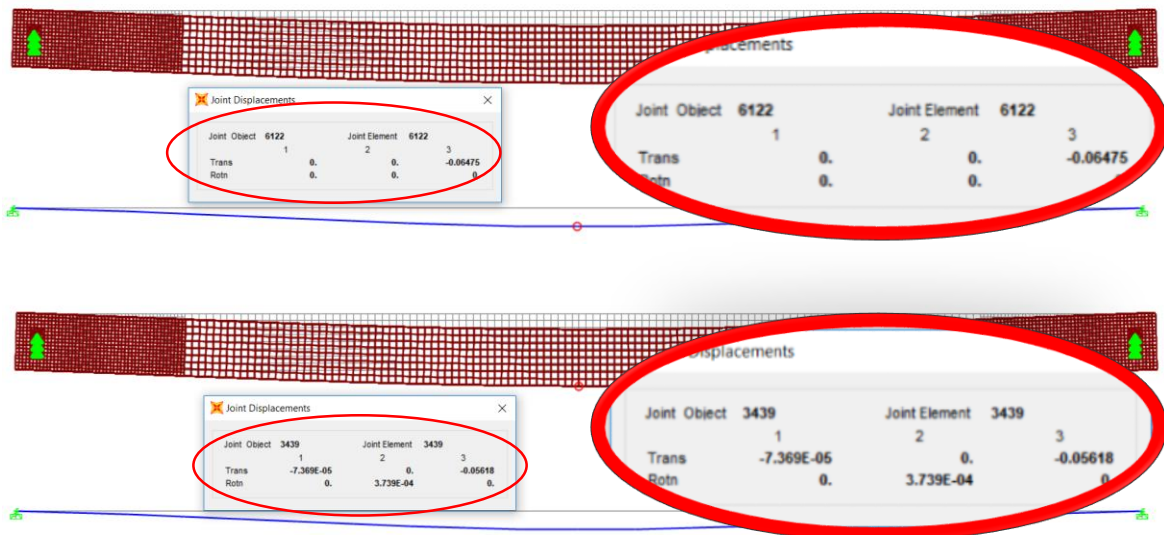


Slika 89. IPN 400. Pod a) je prikaz geometrije modela, a pod b) raspodjela normalnih napreznja za opterećenje vlastitom težinom.

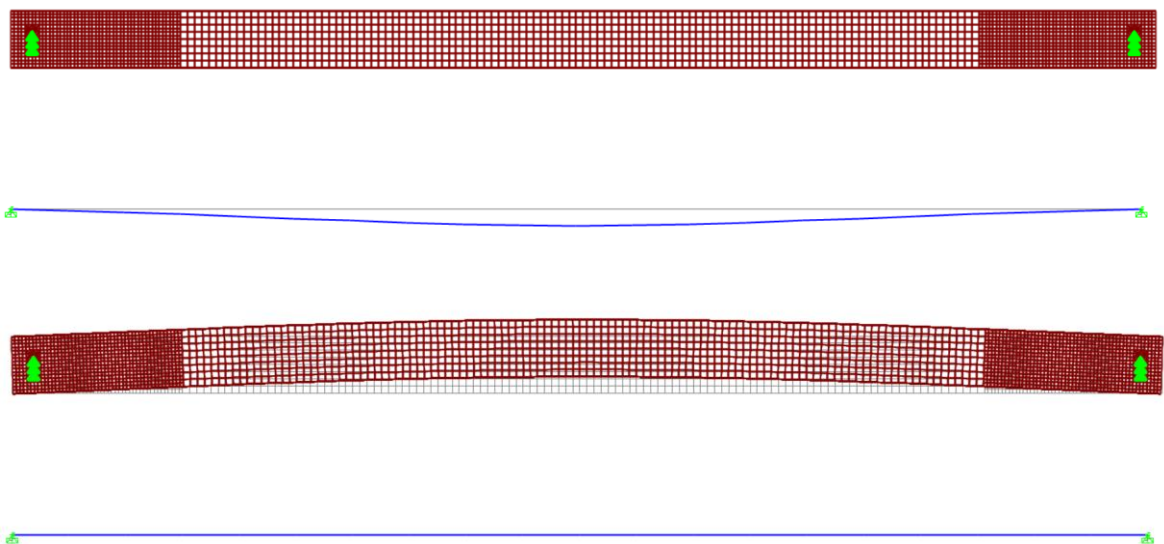
Sa slike 89. b) je vidljiva raspodjela normalnih napreznja gdje možemo vidjeti da momentni dijagram pred cca. 90 % raspona mijenja predznak, odnosno počinje preuzimati opterećenje kao obostrano upeta greda. Taj moment nije velik te se greda ponaša bliže prostoj gredi nego obostrano upetoj. Ovaj utjecaj će se modelirati oprugom određenom iterirano na osnovu usporedbe progiba od vlastite težine i koncentriranog opterećenja te usporedbom dinamičkih parametara. U nastavku su prikazi prethodno spomenutih usporedbi. Karakteristike opruge su prikazane na slici 93.



Slika 90. Usporedba progiba od stalnog opterećenja IPN400 grede spojene kao na građevini i štapnog modela s oprugom.



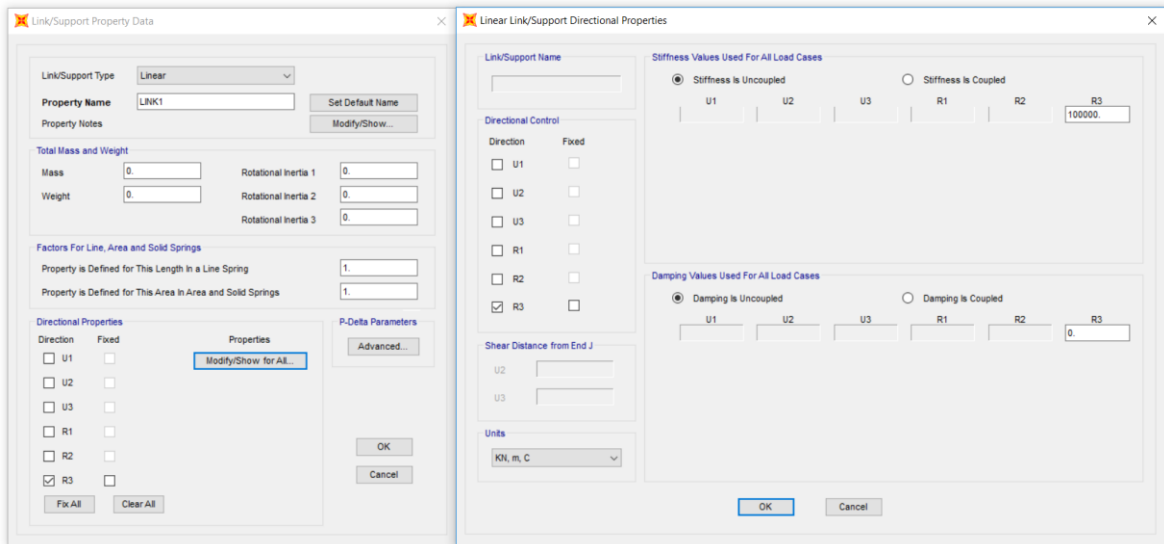
Slika 91. Usporedba progiba od opterećenja 1000 kN u sredini raspona IPN400 grede spojene kao na građevini i štapnog modela s oprugom.



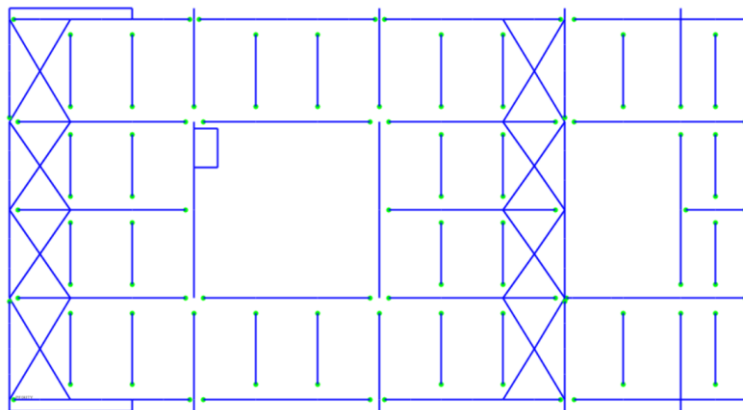
Slika 92. Prvi oblik titranja grede (štapno gore 32,45 Hz, plošno dolje 35,11 Hz).

Može se primijetiti da su vrijednosti progiba zamjenskog modela veće od referentnog plošnog i prvi oblik titranja je dosta blizak. Uzevši prethodno u obzir možemo sve spojeve građevine izvedene na ovaj način modelirati štapno s oprugom koja ukružuje zglob.

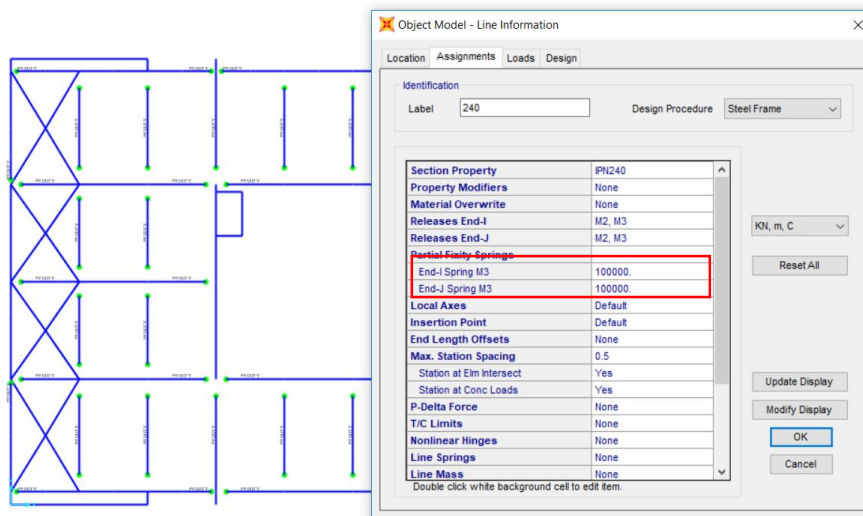
Sada kad je određena krutost opruge u zglobu proste grede (slika 93.), imamo tri modela za usporedbu u sklopu poglavlja 7. Razmišljanje je da se elementi ponašaju na način blizak prethodno opisanom, odnosno ograničeno sa sustavom kada su sve veze zglobne i kada su sve upete (slika 94.).



Slika 93. Opruga vijčanog spoja.



Slika 94. Raspored zglobova u međukatnoj konstrukciji.



Slika 95. Primjer elementa sa zadanom oprugom.

U tablici u nastavku je prikazana usporedba modalnih oblika s naglašenim globalnim aktiviranjem konstrukcije u određenim modovima.

Tablica 17. Usporedba dinamičkih parametara analiziranih numeričkih modela.

Mjereni	Zatečeno fasada	Model a	Model b	Model c
2,563 (ux)	2,557 (ux)	1,193 (uy)	1,206 (uy)	1,259 (uy)
3,375 (uy)	3,389 (uy)	1,871 (rz)	1,878 (rz)	2,008 (rz)
6,000 (rz)	3,634	2,191 (ux)	2,193 (ux)	2,203 (ux)
8,688	3,865 (rz)	2,798	2,817	3,637
13,00	4,418	3,257	3,337	6,073
14,38	6,686	3,334	3,373	6,727
15,50	7,011	3,969	4,101	7,014
18,00	7,197	6,170	6,166	7,372
24,00	7,581	7,363	7,444	7,714

Analiziramo li tablicu 17., možemo donijeti neke nove zaključke (utjecaj fasade je razjašnjen). Potrebno je naglasiti da se mjerenje vršilo po visini stupa trozglobnog nosača pa su sve vrijednosti vlastiti oblici titranja istoga što znači da mjerenje s numeričkim modelima možemo uspoređivati samo preko globalnih pomaka konstrukcije, a isti su i naznačeni različitim bojama (crveno – ux, plavo – uy, zeleno – rz).

U tablici 17. se može vidjeti da, kada isključimo utjecaj fasade, poprečni pomak i torzija dolaze ispred uzdužnog pomaka građevine. Osim što je nepovoljno to što se torzija nalazi u drugom modu, još jedna nepogodnost je bliskost perioda globalnog titranja što znači da pri djelovanju pobude bliskim frekvencijama odaziv građevine će biti kombinacija sva tri oblika bez dominantnog utjecaja jednog od njih. Nakon globalnih oblika titranja konstrukcije u modelima bez utjecaja fasade dolaze oblici titranja međukatne konstrukcije koje ne možemo usporediti s mjerenjima što je još jedan od razloga za kreacijom tri različita modela kako bi se prikazale granice i približno rješenje provjere elemenata međukatne konstrukcije. Usporedbom oblika nakon globalnih pomaka konstrukcije vidimo da su oblici modela s oprugama omeđeni ekstremnim slučajevima.

7. STATIČKI PRORAČUN PROJEKTIRANOG STANJA

U okviru ovog poglavlja će biti prikazana analiza mehaničke otpornosti i stabilnosti paviljona 28 Zagrebačkog Velesajma na numeričkim modelima opisanima u prethodnom poglavlju. Za početak poglavlja će biti analizirana djelovanja na konstrukciju s obzirom na Eurokod 1 ([5], [6], [7], [8], [9]). Nakon analiziranih djelovanja pristupit će se proračunu i usporedbama u provjeri nosivosti odabranih elemenata konstrukcije.

7.1. Analiza opterećenja

Vlastitu težinu elemenata programski paket SAP2000 uzima sam kao opterećenje STALNO. Dodatna stalna opterećenja nenosivih elemenata je potrebno zadati kao opterećenje, a u modelu će biti definirana pod oznakom DODATNO STALNO. Slojevi krova, međukatne konstrukcije i terase prikazani su u prilogu 8.

Slojevi krova su modelirani idealizirano kao plošni kruti element u numeričkom modelu za procjenu dinamičkih učinaka s kombinacijom debljine ploče i mase tako da odgovara projektiranom i zatečenom stanju. U modelima u kojima se analizira odgovor konstrukcije na statička opterećenja, krovšte je analizirano samo kao opterećenje.

7.1.1. Stalno opterećenje

Slojevi krova

Preskis	0,25 kN/m^2
Izolacija	0,20 kN/m^2
Lagani beton 16 x 0,8	1,28 kN/m^2
Ljepenka	0,10 kN/m^2
Drvena oplata 25 mm	0,20 kN/m^2
Drveni nosači 4,8/20, r=50 cm	0,12 kN/m^2
Staklena vuna + podgled	0,05 kN/m^2
Ukupno	2,20 kN/m^2

Slojevi stropa prizemlja

Linoleum	0,04 kN/m^2
Beton 4 cm 0,04 x 25	1,00 kN/m^2
Izolacija	0,10 kN/m^2
Drvena oplata 25 mm	0,20 kN/m^2
Drveni nosači 4,8/20, r=50 cm	0,12 kN/m^2
Staklena vuna + podgled	0,05 kN/m^2
Ukupno	1,51 kN/m^2

Slojevi stropa terase

Terazzo 2 cm	0,48 kN/m^2
Beton 4 cm 0,04 x 25	1,00 kN/m^2
Izolacija	0,10 kN/m^2
Drvena oplata 25 mm	0,20 kN/m^2
Drveni nosači 4,8/20, r=50 cm	0,12 kN/m^2
Podgled	0,05 kN/m^2
Ukupno	1,95 kN/m^2

Opterećenje od fasade

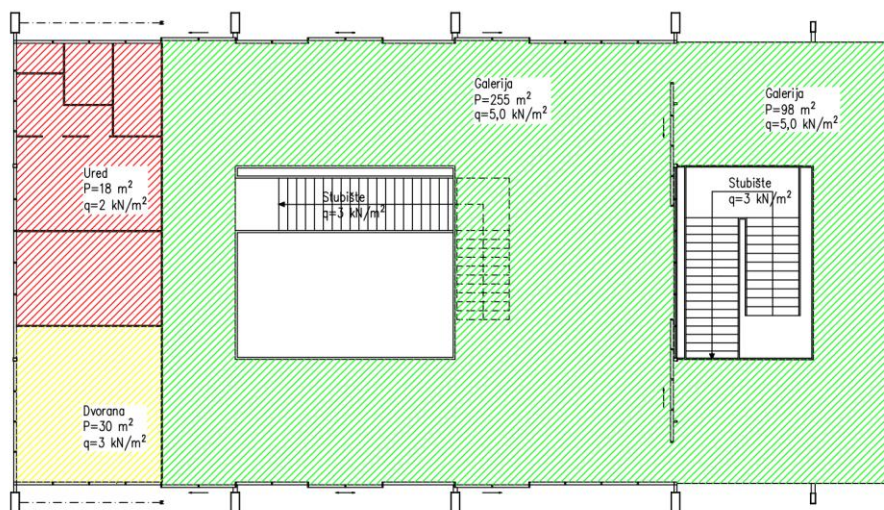
Kontinuirano opterećenje fasade na međukatnu konstrukciju je procijenjeno u poglavlju 5. i iznosi 0,5 kN/m .

Opterećenje od pregradnih zidova

Opterećenje pregradnim zidovima je uzeto u obzir dodatnim opterećenjem prostorija u kojima se nalaze pregradni zidovi u vrijednosti 1 kN/m^2 .

7.1.2. Uporabno opterećenje

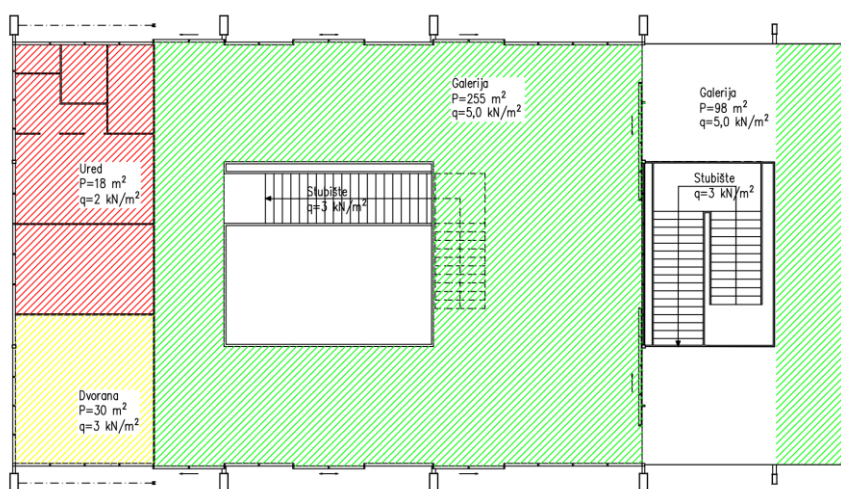
Simetrično uporabno opterećenje



Slika 96. Shematski prikaz uporabnog opterećenja.⁴

Nesimetrično uporabno opterećenje

Pošto međukatna konstrukcija opterećenja prenosi sustavom prostih greda, nesimetrično uporabno opterećenje nije potrebno razmatrati za unutarnji prostor, nego samo za terasu pošto se na njoj nalazi greda s prepustom pa je potrebno eliminirati povoljan utjecaj opterećenja na progib prepusta (slika 97.).



Slika 97. Shematski prikaz nesimetričnog uporabnog opterećenja (opis u fusnoti 4).

⁴ Zeleno – galerijski prostor muzeja, opterećenje 5 kN/m^2 , crveno – uredski prostori, opterećenje 2 kN/m^2 , žuto – konferencijska dvorana, opterećenje 3 kN/m^2 neoznačeno – stubište, opterećenje 3 kN/m^2 .

7.1.3. Opterećenje snijegom

Prema Eurokodu 1 ([7], [8]) djelovanje snijegom se računa prema sljedećem izrazu:

$$s = \mu_1 \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k \quad (11)$$

gdje je μ_1 koeficijent oblika snježnog djelovanja, a za kut nagiba α (u ovom slučaju $\alpha = 2^\circ$) u granicama $0 \leq \alpha \leq 30^\circ$ vrijedi $\mu_1 = 0,8$.

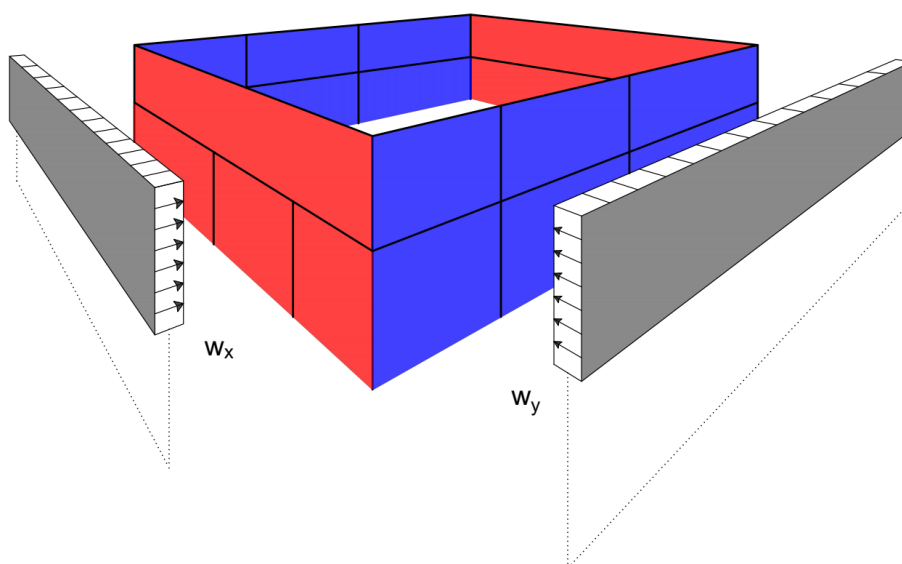
C_e je koeficijent izloženosti, u ovom slučaju on je $C_e = 1,0$, a C_t je toplinski koeficijent koji se također uzima s $C_t = 1,0$. Koeficijent s_k označava karakterističnu vrijednost opterećenja snijegom na tlo, a ovisi o geografskom položaju i nadmorskoj visini. Građevina se nalazi u Zoni I i na visini između 100 i 200 m.n.m pa je karakteristična vrijednost $s_k = 1,31 \text{ kN/m}^2$

Sada se može odrediti opterećenje snijegom na krov i terasu:

$$s_k = 0,8 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,31 = 1,048 \text{ kN/m}^2 \rightarrow s_k = 1,05 \text{ kN/m}^2$$

7.1.4. Opterećenje vjetrom

Vjetar na građevinu djeluje preko fasade (slika 98.). Obzirom da je fasada samostojeća polovica opterećenje za dio fasade do međukatne konstrukcije se prenosi u tlo, a polovica na obodne grede međukatne konstrukcije.



Slika 98. Plohe na koje je promatrano djelovanje vjetra.⁵

⁵ Crveno – djelovanje vjetra w_x , plavo – djelovanje vjetra w_y .

Vjetar će biti modeliran kao pritisak za brzinu vjetra kod udara $q_p(z)$.

Osnovna brzina vjetra

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0}$$

c_{dir} – faktor za smjer djelovanja vjetra (preporuka $c_{dir} = 1,0$)

c_{season} – faktor godišnjeg doba (preporuka $c_{season} = 1,0$)

$v_{b,0}$ – vrijednost osnovne brzine vjetra iz karte vjetrova za određenu geografsku lokaciju ($v_{b,0} = 25 \text{ m/s}$ – 2. područje)

$$v_b = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 25 = 25 \text{ m/s}$$

Srednja brzina vjetra

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b$$

$c_r(z)$ – koeficijent hrapavosti terena

$c_o(z)$ – ortografski faktor (preporuka se $c_o(z) = 1,0$)

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right), \quad \text{za } z_{min} \leq z \leq z_{max}$$

$$c_r(z) = c_r(z_{min}), \quad \text{za } z \leq z_{min}$$

Za kategoriju terena III (normalna vegetacija, šume, predgrađa) odabrano je sljedeće:

$z_0 = 0,3$ – dužina hrapavosti

$z_{min} = 8,0 \text{ m}$ – minimalna visina hrapavosti

$k_r = 0,22$

Budući da je maksimalna visina građevine $8,9 \text{ m}$, vrijedi:

$$8,0 \leq 8,9 \leq 200$$

$$c_r(8,9) = 0,22 \cdot \ln\left(\frac{8,9}{0,3}\right) = 0,746$$

$$v_m = 0,746 \cdot 1,0 \cdot 25 = 18,65 \text{ m/s}$$

Intenzitet turbulencije

$$I_v(8,9) = \frac{k_I}{c_o(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = \frac{1,0}{1,0 \cdot \ln\left(\frac{8,9}{0,3}\right)} = 0,295$$

Pritisak za brzinu vjetra kod udara

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(8,9)] \cdot \rho_{air} \cdot v_m^2(z)$$

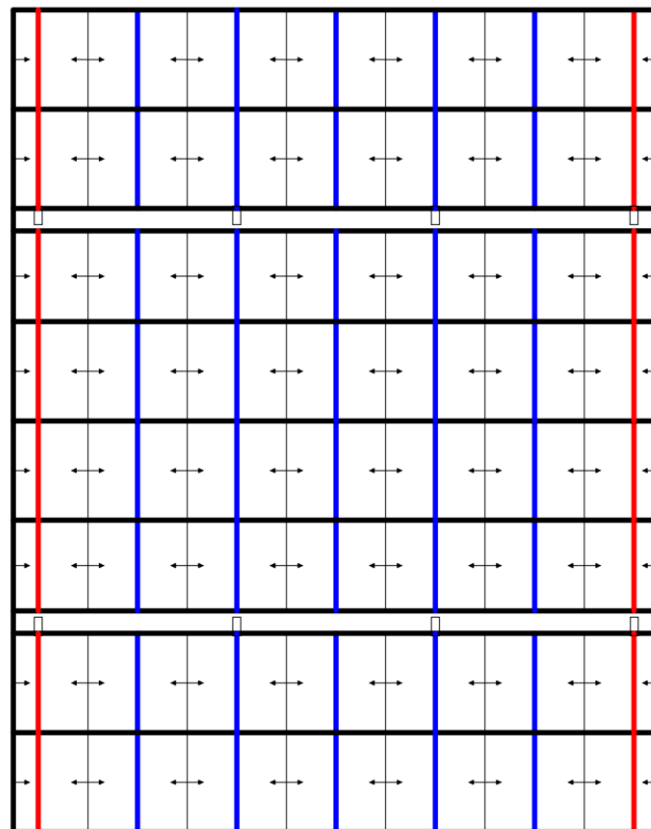
gdje je ρ_{air} gustoća zraka ($\rho_{air} = 1,25 \text{ kg/m}^3$)

$$q_p(8,9) = [1 + 7 \cdot 0,295] \cdot 1,25 \cdot 18,65^2 = 1332,6 \text{ N/m}^2 = 1,33 \text{ kN/m}^2 = w_x = w_y$$

7.1.5. Shematski prikazi prijenosa opterećenja

U nastavku je prikazan način odrađivanja linijskog opterećenja nosača na način kako se i prenosi opterećenje na građevini.

Opterećenje u ravnini krova



Slika 99. Shema za određivanje opterećenja u krovu.

Stalno opterećenje

$$\Delta g_1 = 2,2 \cdot (1,2 + 2) = 7,04 \text{ kN/m}$$

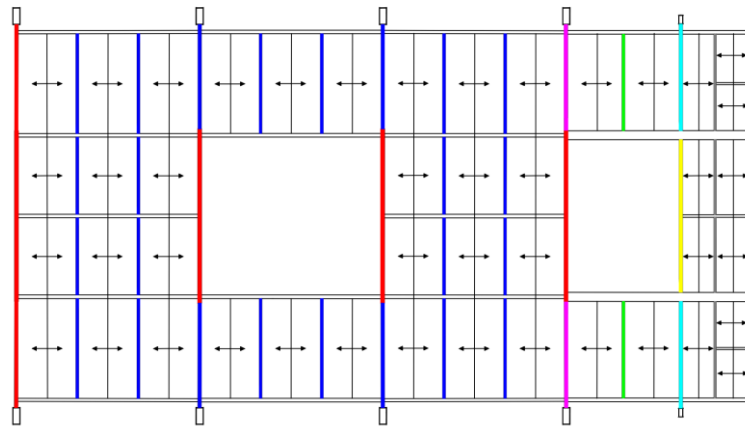
$$\Delta g_2 = 2,2 \cdot 4 = 8,8 \text{ kN/m}$$

Opterećenje snijegom

$$s_1 = 1,05 \cdot (1,2 + 2) = 3,36 \text{ kN/m}$$

$$s_2 = 1,05 \cdot 4 = 4,20 \text{ kN/m}$$

Opterećenje u ravni međukatne konstrukcije



Slika 100. Shema za određivanje opterećenja u ravni međukatne konstrukcije (stalno i snijeg).

Stalno opterećenje

$$\Delta g_3 = 1,51 \cdot 1,33 = 2,01 \text{ kN/m}$$

$$\Delta g_4 = 1,51 \cdot 2,67 = 4,07 \text{ kN/m}$$

$$\Delta g_5 = 1,51 \cdot 1,33 + 1,95 \cdot 1,25 = 4,45 \text{ kN/m}$$

$$\Delta g_6 = 1,95 \cdot 2,5 = 4,88 \text{ kN/m}$$

$$\Delta g_7 = 1,95 \cdot (1,25 + 0,75) = 3,90 \text{ kN/m}$$

$$\Delta g_8 = 1,95 \cdot 0,75 = 1,46 \text{ kN/m}$$

$$\Delta g_9 = 1,95 \cdot 1,5 = 2,93 \text{ kN/m}$$

Snijeg na terasi

$$s_3 = 1,05 \cdot 1,25 = 1,31 \text{ kN/m}$$

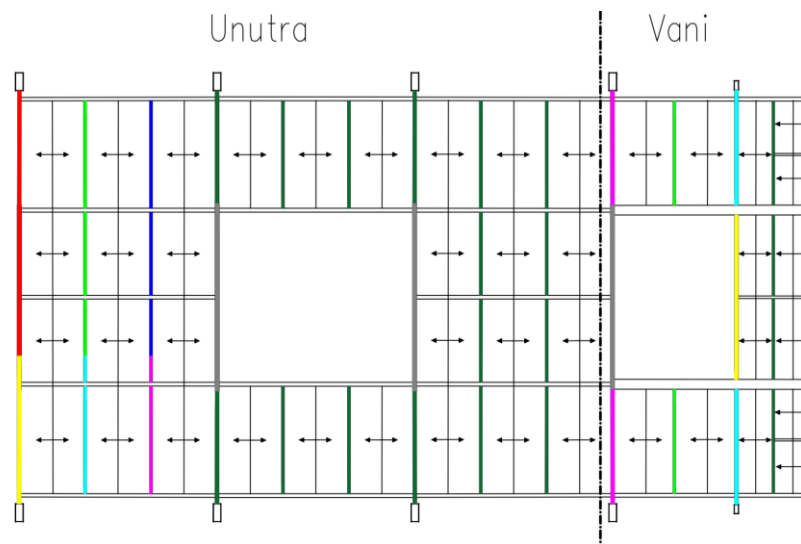
$$s_4 = 1,05 \cdot 2,5 = 2,63 \text{ kN/m}$$

$$s_5 = 1,05 \cdot (1,25 + 0,75) = 2,10 \text{ kN/m}$$

$$s_6 = 1,95 \cdot 0,75 = 1,46 \text{ kN/m}$$

$$s_7 = 1,05 \cdot 1,5 = 1,58 \text{ kN/m}$$

Uporabno simetrično opterećenje



Slika 101. Shema za određivanje opterećenja u ravni međukatne konstrukcije (uporabno simetrično opterećenje).

Opterećenje za unutarnji prostor

$$q_{1s} = 3 \cdot 1,33 = 4 \text{ kN/m} \quad q_{2s} = 4 \cdot 1,33 = 5,32 \text{ kN/m}$$

$$q_{3s} = 3 \cdot 2,67 = 8,00 \text{ kN/m} \quad q_{4s} = 4 \cdot 2,67 = 10,68 \text{ kN/m}$$

$$q_{5s} = 3 \cdot 1,33 + 5 \cdot 1,33 = 10,64 \text{ kN/m}$$

$$q_{6s} = 4 \cdot 1,33 + 5 \cdot 1,33 = 11,97 \text{ kN/m}$$

$$q_{7s} = 5 \cdot 1,33 = 6,65 \text{ kN/m}$$

$$q_{8s} = 5 \cdot 2,67 = 13,35 \text{ kN/m}$$

Opterećenje za vanjski prostor

$$q_{9s} = q_{7s} = 6,65 \text{ kN/m}$$

$$q_{10s} = 5 \cdot (1,33 + 1,25) = 12,90 \text{ kN/m}$$

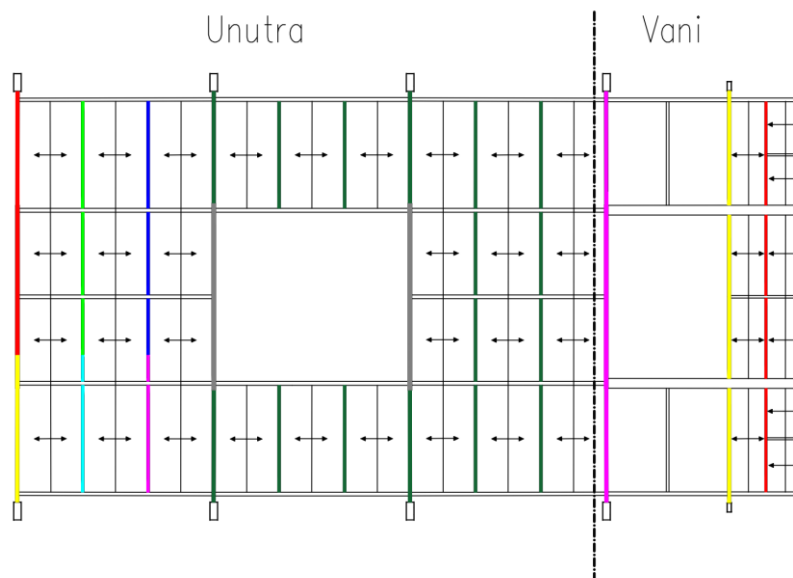
$$q_{11s} = 5 \cdot 2,5 = 12,5 \text{ kN/m}$$

$$q_{12s} = 5 \cdot (1,25 + 0,75) = 10 \text{ kN/m}$$

$$q_{13s} = 5 \cdot 0,75 = 3,75 \text{ kN/m}$$

$$q_{14s} = 5 \cdot 1,5 = 7,5 \text{ kN/m}$$

Uporabno nesimetrično opterećenje



Slika 102. Shema za određivanje opterećenja u ravni međukatne konstrukcije (uporabno nesimetrično opterećenje).

Za unutarnji prostor raspored opterećenja je identičan uporabnom simetričnom opterećenju, a za vanjski prostor vrijedi:

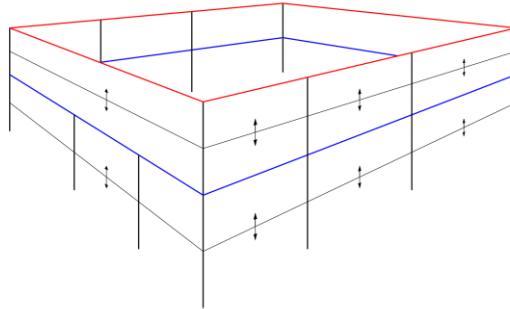
$$q_{n1} = 5 \cdot 1,33 = 6,65 \text{ kN/m}$$

$$q_{n2} = 5 \cdot 0,75 = 3,75 \text{ kN/m}$$

$$q_{n3} = 5 \cdot 1,5 = 7,5 \text{ kN/m}$$

Opterećenje vjetrom

Vjetar se promatra kao konstantno površinsko opterećenje na površinu fasade od međukatne konstrukcije do krova. U nastavku je skica i izračun linijskog opterećenja po elementima na rubu.

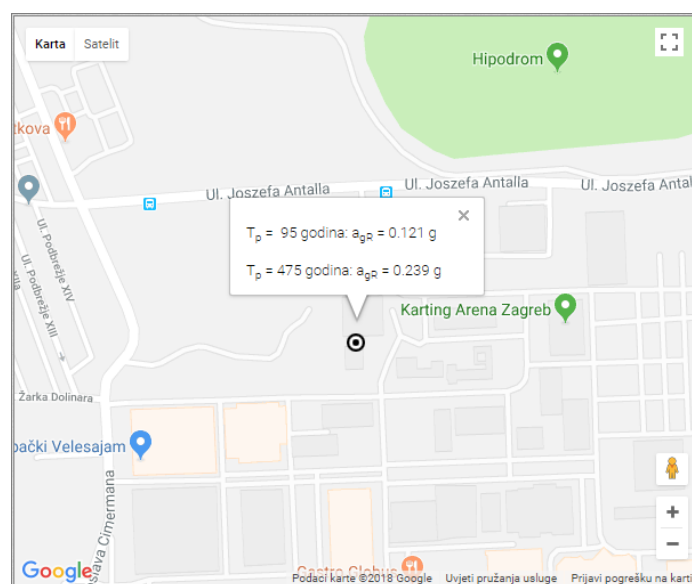


Slika 103. Shema za određivanje opterećenja vjetrom.

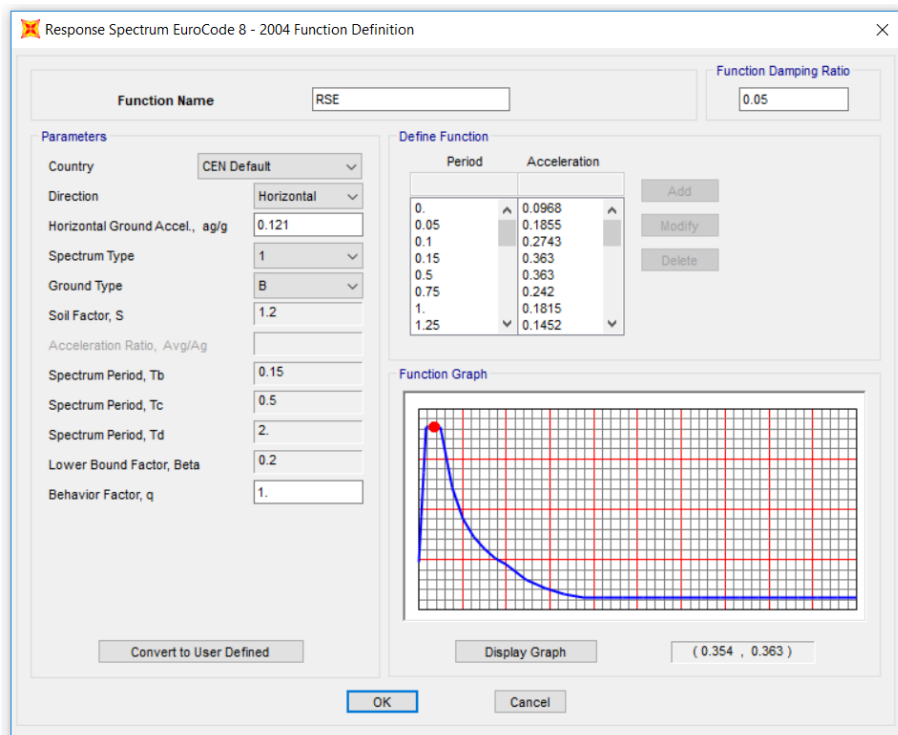
$$w_x = 1,33 \cdot 1,85 = 2,46 \text{ kN/m} \quad w_y = 2 \cdot 1,33 \cdot 1,85 = 4,92 \text{ kN/m}$$

7.1.6. Potresno opterećenje

Provjera unutarnjih sila od potresnog opterećenja uzimaju se u obzir projektnim potresnim spektrom, a provjera pomaka elastičnim projektnim spektrom. Vrijednosti ubrzanja tla su preuzete s *Karte potresnih područja Republike Hrvatske* [18] Geofizičkog odsjeka Prirodoslovno – matematičkog fakulteta i u skladu su s nacionalnim dodatkom norme HRN EN 1998-1:2011/NA:2011 [19].



Slika 104. Horizontalno vršno ubrzanje tla [18].



Slika 105. Elastični spektrar odgovora.

Load Case Data - Response Spectrum

Load Case Name: RSE
Notes: Modify/Show...
Load Case Type: Response Spectrum Design...

Modal Combination

- CQC
- SRSS
- Absolute
- GMC
- NRC 10 Percent
- Double Sum

GMC f1: 1.
GMC f2: 0.
Periodic + Rigid Type: SRSS

Modal Load Case

Use Modes from this Modal Load Case: MODAL

- Standard - Acceleration Loading
- Advanced - Displacement Inertia Loading

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	RSE	10.
Accel	U2	RSE	10.

Show Advanced Load Parameters

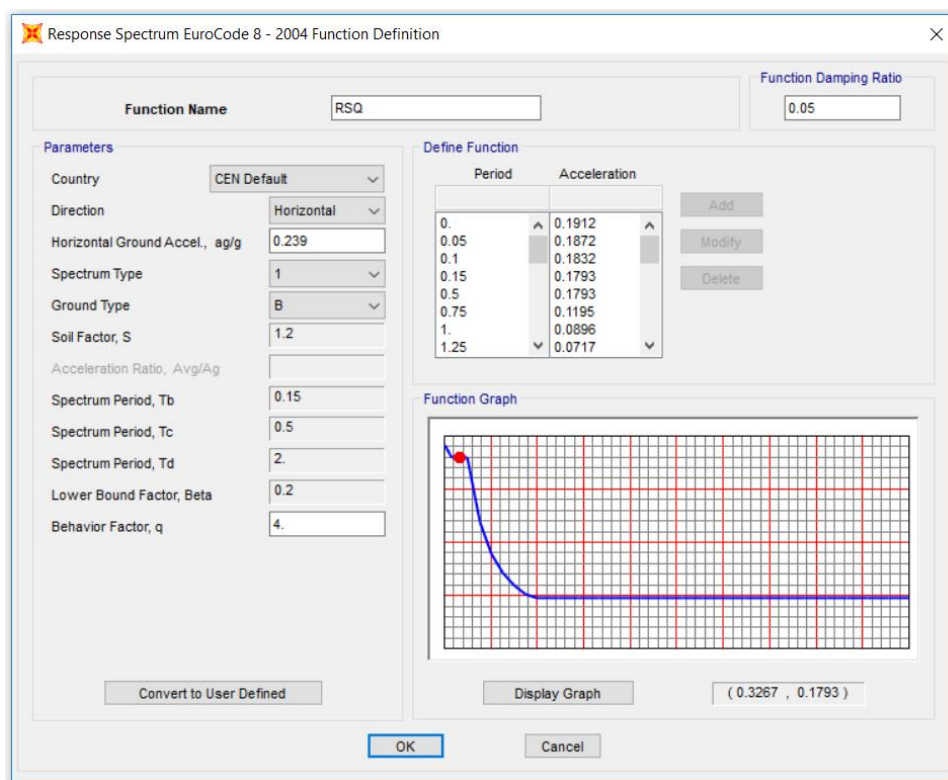
Other Parameters

Mass Source: Previous (MSSSRC1)

Diaphragm Eccentricity: Eccentricity Ratio: 0. Override Eccentricities: Override...

Modal Damping: Constant at 0.05

Slika 106. Potresno opterećenje za granično stanje uporabivosti.



Slika 107. Proračunski spektar odgovora.

Load Case Data - Response Spectrum

Load Case Name: Set Def Name

Notes

Load Case Type: Response Spectrum

Modal Combination

- CQC
- SRSS
- Absolute
- GMC
- NRC 10 Percent
- Double Sum

GMC f1: GMC f2:

Periodic + Rigid Type: SRSS

Modal Load Case

Use Modes from this Modal Load Case: MODAL

- Standard - Acceleration Loading
- Advanced - Displacement Inertia Loading

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	RSQ	10.
Accel	U2	RSQ	10.

Show Advanced Load Parameters

Other Parameters

Modal Damping: Constant at 0.05

Slika 108. Potresno opterećenje za granično stanje nosivosti.

7.2. Proračun i usporedba nosivosti karakterističnih elemenata

Za početak su prikazane kombinacije opterećenja za granično stanje nosivosti i granično stanje uporabivosti. Nakon njih je prikazana analiza nosivosti karakterističnih elemenata konstrukcije s obzirom na model koji se promatra.

Tablica 18. Kombinacije za granično stanje nosivosti.

1,35(G+dG)	STALNO	1.35
	DODATNO STALNO	1.35
GSN1	1,35(G+dG)	1
	UPORABNO N	1.5
GSN2	1,35(G+dG)	1
	UPORABNO S	1.5
GSN3	1,35(G+dG)	1
	SNIJEG	1.5
GSN4	1,35(G+dG)	1
	VJETAR x	1.5
GSN5	1,35(G+dG)	1
	VJETAR y	1.5
GSN6	1,35(G+dG)	1
	UPORABNO S	1.5
	SNIJEG	0.75
GSN7	1,35(G+dG)	1
	UPORABNO N	1.5
	SNIJEG	0.75

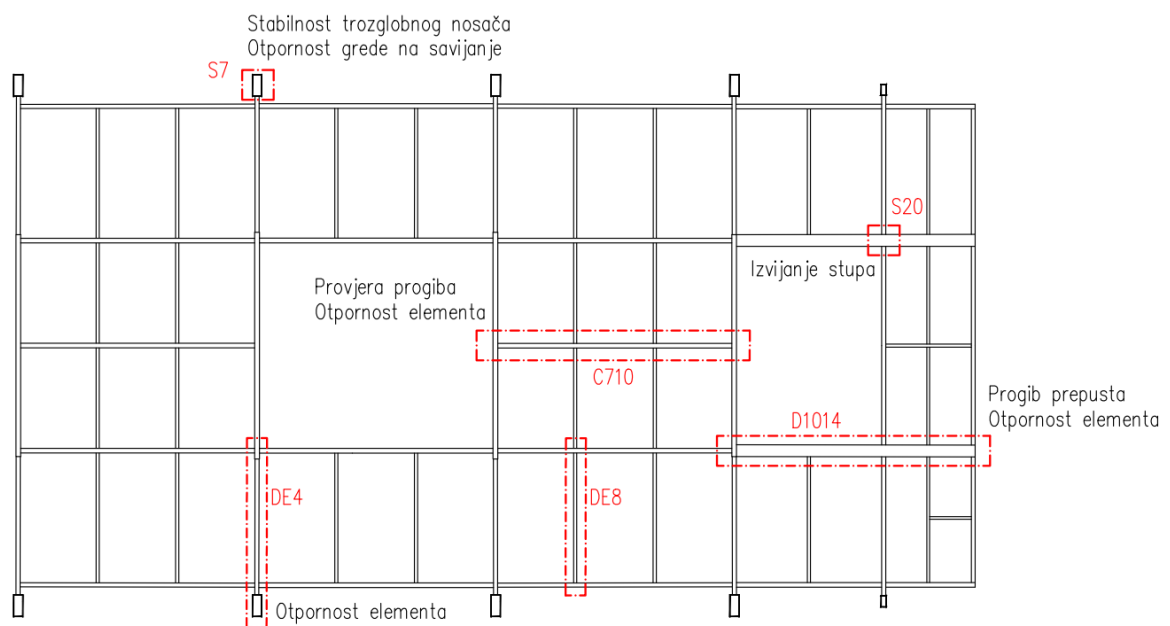
Tablica 19. Kombinacije za granično stanje uporabivosti.

GSU1	STALNO	1
	DODATNO STALNO	1
	SNIJEG	1
GSU2	STALNO	1
	DODATNO STALNO	1
	VJETAR x	1
GSU3	STALNO	1
	DODATNO STALNO	1
	VJETAR y	1
GSU4	STALNO	1
	DODATNO STALNO	1
	UPORABNO S	1
GSU5	STALNO	1
	DODATNO STALNO	1
	UPORABNO N	1
GSU6	STALNO	1
	DODATNO STALNO	1
	UPORABNO N	1
	SNIJEG	0.5
GSU7	STALNO	1
	DODATNO STALNO	1
	UPORABNO S	1
	SNIJEG	0.5

Tablica 20. Potresne kombinacije.

POTRES GSU	STALNO	1
	DODATNO STALNO	1
	UPORABNO S	0.3
	RSQ	1
POTRES GSN	STALNO	1
	DODATNO STALNO	1
	UPORABNO S	0.3
	RSE	1

U nastavku je analizirana mehanička otpornost elemenata označenih na slici 109. Osim provjera elemenata na zadana opterećenja, bit će prikazana i provjera stabilnosti karakterističnog statičkog sustava – trozglobni nosač.



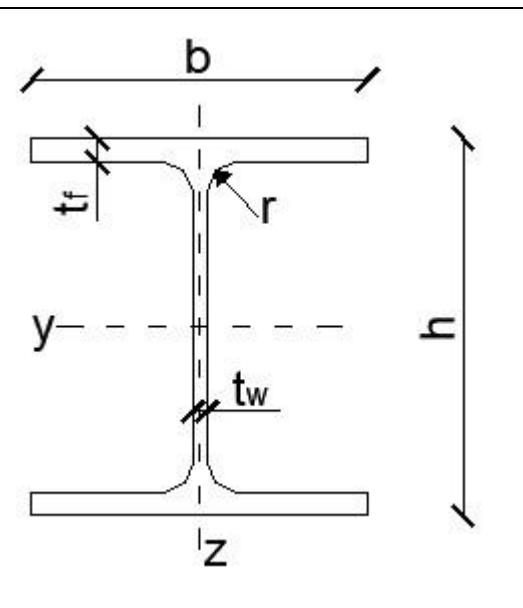
Slika 109. Shematski prikaz odabranih elemenata za provjeru.

7.2.1. Provjera grede D1014 (mjerodavna kombinacija GSN7)

U nastavku je provjera poprečnog presjeka grede HE400M na poprečnu silu i savijanje.

Tablica 21. Geometrijske karakteristike profila HE400M.

HEM 400			
h [mm]	432,0	b [mm]	307,0
t _w [mm]	21,0	t _r [mm]	40,0
r [mm]	27	d [mm]	298,0
A [cm ²]	325,80	G [kg/m]	256,0
I _y [cm ⁴]	104100	W _{y,el} [cm ³]	4820,0
W _{y,pl} [cm ³]	5571,0	i _y [cm]	18,88
I _z [cm ⁴]	19340	W _{z,el} [cm ³]	1260,0
W _{z,pl} [cm ³]	1934,0	i _z [cm]	7,70
I _t [cm ⁴]	1515,0	I _w [cm ⁶]	7410



Klasifikacija poprečnog presjeka

$$t_f = 40 \text{ mm} \quad i \quad S235 \quad \rightarrow \quad f_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1,0$$

Hrbat:

$$c = h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r = 432 - 2 \cdot 40,0 - 2 \cdot 27 = 298,0 \text{ mm}$$

$$t = t_w = 21,0 \text{ mm}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{298}{21} = 14,19 \leq 72 \cdot \varepsilon = 72,00 \rightarrow \text{hrbat je klase 1.}$$

Pojasnica

$$c = \frac{b - t_w - 2 \cdot r}{2} = \frac{307 - 40 - 2 \cdot 27}{2} = 106,5$$

$$t = t_f = 40,0$$

$$\frac{c}{t} = \frac{106,5}{40} = 2,66 \leq 9 \cdot \varepsilon = 9 \rightarrow \text{pojasnica je klase 1.}$$

Poprečni presjek je KLASE 1.

Otpornost poprečnog presjeka na savijanje

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{5,571 \cdot 235}{1,0} = 1309,2 \text{ kNm}$$

Posmična otpornost poprečnog presjeka

Provjera izbočavanja hrpta na posmik

$$\frac{h_w}{t_w} > 72 \cdot \frac{\varepsilon}{\eta}$$

$$h_w = h - 2 \cdot t_f = 432 - 2 \cdot 40 = 352 \text{ mm} \quad \eta = 1,2$$

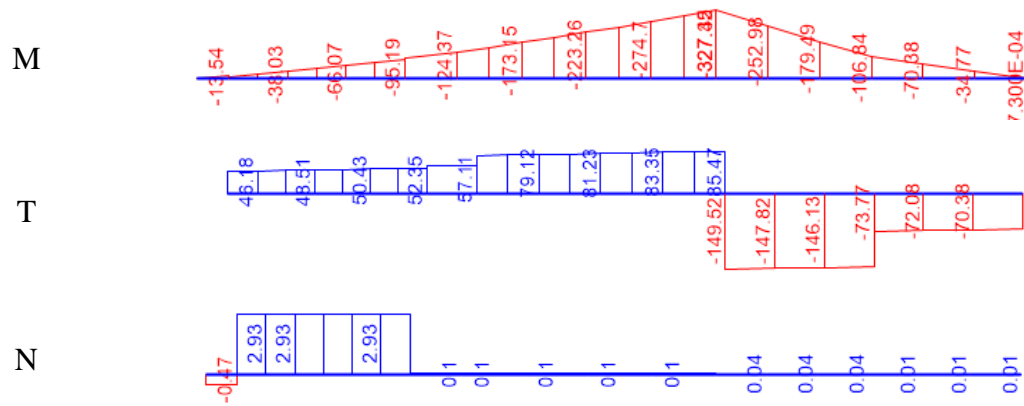
$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{352}{21} = 16,76 \leq 72 \cdot \frac{1,0}{1,2} = 72 \rightarrow \text{Zadovoljava provjeru}$$

$$A_V = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \geq \eta \cdot h_w \cdot t_w$$

$$325,8 - 2 \cdot 30,7 \cdot 4,0 + (2,1 + 2 \cdot 2,7) = 87,7 \leq \eta \cdot h_w \cdot t_w = 88,7 \text{ cm}^2 = A_V$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_V (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} = \frac{88,7 \cdot (23,5 / \sqrt{3})}{1,0} = 1203,5 \text{ kN}$$

Model s popustljivim vezama



Slika 110. Unutarnje sile grede D1014 za model s popustljivim vezama.

Ulazni podaci

$$M_{y,Ed} = 328 \text{ kNm} \quad V_{z,Ed} = 150 \text{ kN}$$

Provjera poprečnog presjeka na savijanje

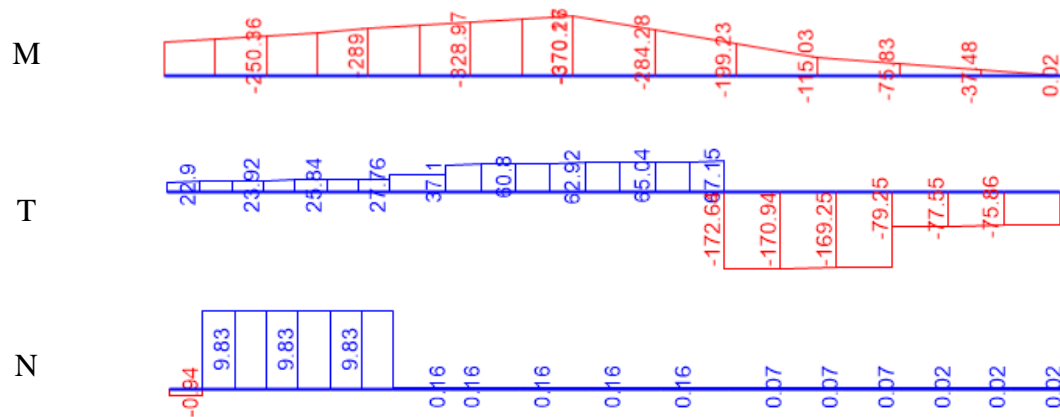
$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{328}{1309} = 0,25 \rightarrow \text{Zadovoljava provjeru}$$

Provjera poprečnog presjeka na posmik

$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{pl,Rd}} = \frac{150}{1204} = 0,12 \rightarrow \text{Zadovoljava provjeru}$$

Zbog male iskorištenosti poprečnog presjeka nije razmatrana interakcija poprečne sile i savijanja.

Model s djelomično popustljivim vezama



Slika 111. Unutarnje sile grede D1014 za model s djelomično popustljivim vezama.

Ulazni podaci

$$M_{y,Ed} = 370 \text{ kNm} \quad V_{z,Ed} = 173 \text{ kN}$$

Provjera poprečnog presjeka na savijanje

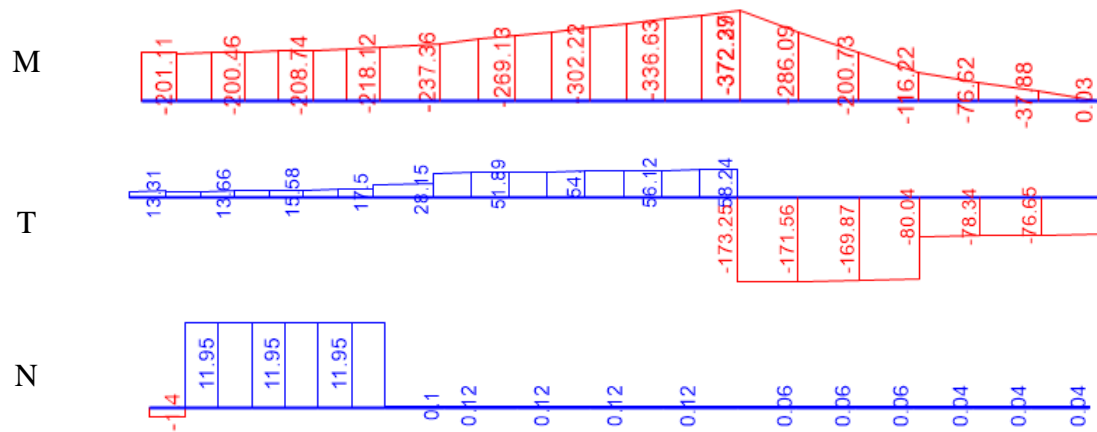
$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{370}{1309} = 0,28 \rightarrow \text{Zadovoljava provjeru}$$

Provjera poprečnog presjeka na posmik

$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{pl,Rd}} = \frac{172}{1204} = 0,14 \rightarrow \text{Zadovoljava provjeru}$$

Zbog male iskorištenosti poprečnog presjeka nije razmatrana interakcija poprečne sile i savijanja.

Model s nepopustljivim vezama



Slika 112. Unutarnje sile grede D1014 za model s nepopustljivim vezama.

Ulazni podaci

$$M_{y,Ed} = 372 \text{ kNm} \quad V_{z,Ed} = 173 \text{ kN}$$

Provjera poprečnog presjeka na savijanje

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{370}{1309} = 0,28 \rightarrow \text{Zadovoljava provjeru}$$

Provjera poprečnog presjeka na posmik

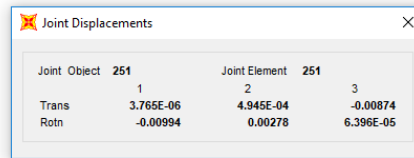
$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{pl,Rd}} = \frac{173}{1204} = 0,14 \rightarrow \text{Zadovoljava provjeru}$$

Zbog male iskorištenosti poprečnog presjeka nije razmatrana interakcija poprečne sile i savijanja.

Provjera progiba (mjerodavna kombinacija GSU5)

Dopušteni progib:

$$w_{dop} = \frac{L}{100} = \frac{300}{100} = 3,0 \text{ cm}$$

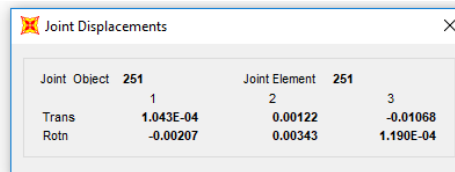


	Joint Object 251			Joint Element 251		
	1	2	3	1	2	3
Trans	3.765E-06	4.945E-04	-0.00874			
Rotn	-0.00994	0.00278	6.396E-05			



Slika 113. Progib grede D1014 za model s popustljivim vezama.

$$w = 0,87 \leq w_{dop} = 3,0 \text{ cm} \rightarrow \text{Zadovoljava provjeru}$$

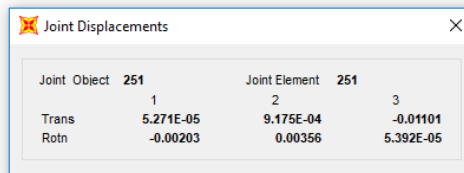


	Joint Object 251			Joint Element 251		
	1	2	3	1	2	3
Trans	1.043E-04	0.00122	-0.01068			
Rotn	-0.00207	0.00343	1.190E-04			



Slika 114. Progib grede D1014 za model s djelomično popustljivim vezama.

$$w = 1,1 \leq w_{dop} = 3,0 \text{ cm} \rightarrow \text{Zadovoljava provjeru}$$



	Joint Object 251			Joint Element 251		
	1	2	3	1	2	3
Trans	5.271E-05	9.175E-04	-0.01101			
Rotn	-0.00203	0.00356	5.392E-05			



Slika 115. Progib grede D1014 za model s nepopustljivim vezama.

$$w = 1,1 \leq w_{dop} = 3,0 \text{ cm} \rightarrow \text{Zadovoljava provjeru}$$

Tablica 22. Tablični prikaz kriterija nosivosti grede D1014.

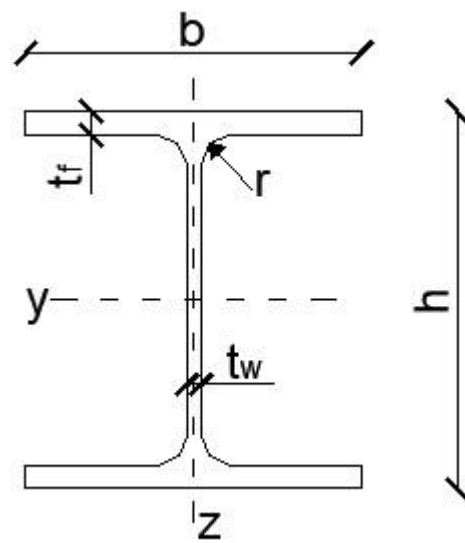
Oznaka numeričkog modela	GSN	GSU		Provjera
	Iskoristivost	Uvjet	Proračun	
Model a	25 %	3,0 cm	0,87 cm	Zadovoljava
Model b	28 %	3,0 cm	1,1 cm	Zadovoljava
Model c	28 %	3,0 cm	1,1 cm	Zadovoljava

7.2.2. Provjera grede D14 (mjerodavna kombinacija (GSN6))

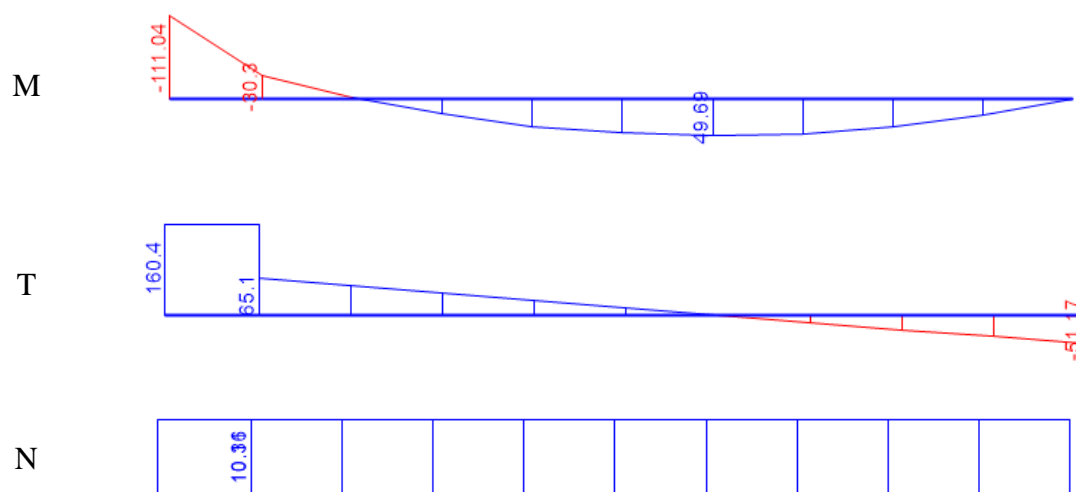
U nastavku je provjera poprečnog presjeka grede IPN340 na uzdužnu, poprečnu silu i savijanje.

Tablica 23. Geometrijske karakteristike profila IPN340.

IPN340			
h [mm]	340,0	b [mm]	137,0
t _w [mm]	12,2	t _f [mm]	18,3
r [mm]	12,2	d [mm]	274,3
A [cm ²]	86,7	G [kg/m]	68,0
I _y [cm ⁴]	15700	W _{y,el} [cm ³]	923
W _{y,pl} [cm ³]	1080	i _y [cm]	13,05
I _z [cm ⁴]	674	W _{z,el} [cm ³]	98,4
W _{z,pl} [cm ³]	166,0	i _z [cm]	2,8
I _t [cm ⁴]	90,4	I _w [cm ⁶]	176



Model s popustljivim vezama



Slika 116. Unutarnje sile grede D14 za model s popustljivim vezama.

$$M_{y,Ed} = 111 \text{ kNm} \quad V_{z,Ed} = 160 \text{ kN} \quad N_{Ed} = 10 \text{ kN}$$

Klasifikacija poprečnog presjeka

$$t_f = 18,3 \text{ mm} \quad i \quad S235 \quad \rightarrow \quad f_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1,0$$

Hrbat:

$$c = h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r = 340 - 2 \cdot 18,3 - 2 \cdot 12,2 = 279 \text{ mm}$$

$$t = t_w = 12,2 \text{ mm}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{279}{12,2} = 22,8$$

$$a = \frac{N_{Ed}}{2 \cdot t_w \cdot f_y / \gamma_{M0}} = \frac{10,35}{2 \cdot 1,22 \cdot 23,5} = 0,18 \text{ cm}$$

$$\alpha = \frac{1}{c} \cdot \left(\frac{c}{2} + a \right) = \frac{1}{27,9} \cdot \left(\frac{27,9}{2} + 0,18 \right) = 0,51 > 0,5$$

$$\frac{c}{t} = 22,8 \leq \frac{396 \cdot \varepsilon}{13 \cdot \alpha - 1} = 70,34 \rightarrow \text{hrbat je klase 1}$$

Pojasnica

$$c = \frac{b - t_w - 2 \cdot r}{2} = \frac{137 - 12,2 - 2 \cdot 12,2}{2} = 50,2 \text{ mm}$$

$$t = t_f = 18,3 \text{ mm}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{50,2}{18,3} = 2,74 \leq 9 \cdot \varepsilon = 9 \rightarrow \text{pojasnica je klase 1.}$$

Poprečni presjek je KLASE 1.

Otpornost poprečnog presjeka na vlačno naprezanje

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{86,7 \cdot 23,5}{1,0} = 2037 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Ed}} = \frac{10}{2037} = 0,005 \rightarrow \text{Zadovoljava provjeru}$$

Otpornost poprečnog presjeka izloženog savijanju

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{10,8 \cdot 23,5}{\gamma_{M0}} = 254 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{111}{254} = 0,44 \rightarrow \text{Zadovoljava provjeru}$$

Posmična otpornost poprečnog presjeka

$$\frac{h_w}{t_w} > 72 \cdot \frac{\varepsilon}{\eta}$$

$$h_w = h - 2 \cdot t_f = 340 - 2 \cdot 18,3 = 303,4 \text{ mm}$$

$$\frac{303,4}{12,2} = 24,9 < 72 \cdot \frac{1,0}{1,2} = 60 \rightarrow \text{Nije potrebna provjera izbočavanja hrpta}$$

Iako se ne očekuje izbočavanje hrpta, ojačao se ovaj dio grede upravo kako bi reducirao utjecaj posmičnih naprezanja (slika 117. iz arhive Hrvatskog muzeja arhitekture)



Slika 117. Ojačanje grede D14 na spoju međukatne konstrukcije i trozglobnog nosača.

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_{V,z}(f_y/\sqrt{3})}{\gamma_{M0}}$$

$$A_{V,z} = A - 2 b t_f + (t_w + 2 r) \cdot t_f$$

$$A_{V,z} = 86,7 - 2 \cdot 13,7 \cdot 1,83 + (1,22 + 2 \cdot 1,22) \cdot 1,83 = 43,26 \text{ cm}^2$$

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{43,26 \cdot (23,5/\sqrt{3})}{1,0} = 587 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{pl,z,Rd}} = \frac{160}{587} = 0,27 \rightarrow \text{Zadovoljava provjeru}$$

Interakcija M-V-N

Uvjet reduciranja zbog djelovanja poprečne sile

$$V_{z,Ed} > 0,5 V_{pl,z,Rd}$$

$$160 < 0,5 \cdot 587 = 294 \rightarrow \text{Nema redukcije zbog djelovanja poprečne sile}$$

Uvjet reduciranja zbog djelovanja uzdužne sile

$$N_{Ed} \leq 0,25 N_{pl,Rd}$$

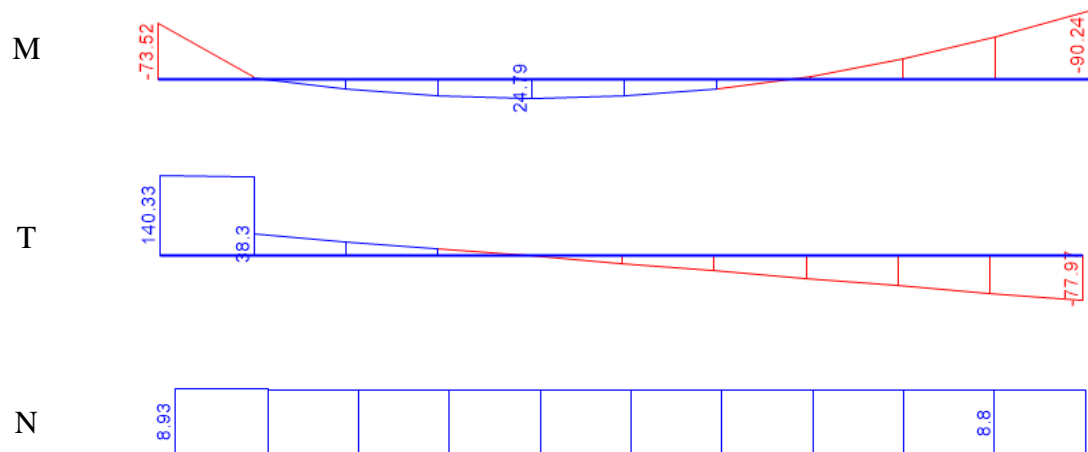
$$10,4 \text{ kN} \leq 0,25 \cdot 2037 = 509 \text{ kN} \rightarrow \text{Uvjet je zadovoljen}$$

$$N_{Ed} \leq \frac{0,5 h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$10,4 \text{ kN} \leq \frac{0,5 \cdot 30,3 \cdot 1,22 \cdot 23,5}{1,0} = 434 \text{ kN} \rightarrow \text{Uvjet zadovoljen}$$

Nema redukcije zbog djelovanja uzdužne sile.

Model s djelomično popustljivim vezama



Slika 118. Unutarnje sile grede D14 za model s djelomično popustljivim vezama.

$$M_{y,Ed,1} = 74 \text{ kNm} \quad M_{y,Ed,2} = 90 \text{ kNm} \quad V_{z,Ed,1} = 140 \text{ kN} \quad N_{Ed} = 8 \text{ kN}$$

Klasifikacija poprečnog presjeka

Hrbat:

$$c = h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r = 340 - 2 \cdot 18,3 - 2 \cdot 12,2 = 279 \text{ mm}$$

$$t = t_w = 12,2 \text{ mm}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{279}{12,2} = 22,8$$

$$a = \frac{N_{Ed}}{2 \cdot t_w \cdot f_y / \gamma_{M0}} = \frac{8}{2 \cdot 1,22 \cdot 23,5} = 0,14 \text{ cm}$$

$$\alpha = \frac{1}{c} \cdot \left(\frac{c}{2} + a \right) = \frac{1}{27,9} \cdot \left(\frac{27,9}{2} + 0,14 \right) = 0,51 > 0,5$$

$$\frac{c}{t} = 22,8 \leq \frac{396 \cdot \varepsilon}{13 \cdot \alpha - 1} = 70,34 \rightarrow \text{hrbat je klase 1}$$

Pojasnica je klase 1 (kao i prethodni slučaj)

Poprečni presjek je KLASE 1.

Otpornost poprečnog presjeka na vlačno naprezanje

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Ed}} = \frac{8}{2037} = 0,004 \rightarrow \text{Zadovoljava provjeru}$$

Otpornost poprečnog presjeka izloženog savijanju

$$\frac{M_{y,Ed,1}}{M_{c,Rd}} = \frac{74}{254} = 0,29 \rightarrow \text{Zadovoljava provjeru}$$

$$\frac{M_{y,Ed,2}}{M_{c,Rd}} = \frac{90}{254} = 0,35 \rightarrow \text{Zadovoljava provjeru}$$

Posmična otpornost poprečnog presjeka

$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{pl,z,Rd}} = \frac{140}{587} = 0,24 \rightarrow \text{Zadovoljava provjeru}$$

Interakcija M-V-N

Uvjet reduciranja zbog djelovanja poprečne sile

$$V_{z,Ed} > 0,5 V_{pl,z,Rd}$$

$$140 < 0,5 \cdot 587 = 294 \rightarrow \text{Nema redukcije zbog djelovanja poprečne sile}$$

Uvjet reduciranja zbog djelovanja uzdužne sile

$$N_{Ed} \leq 0,25 N_{pl,Rd}$$

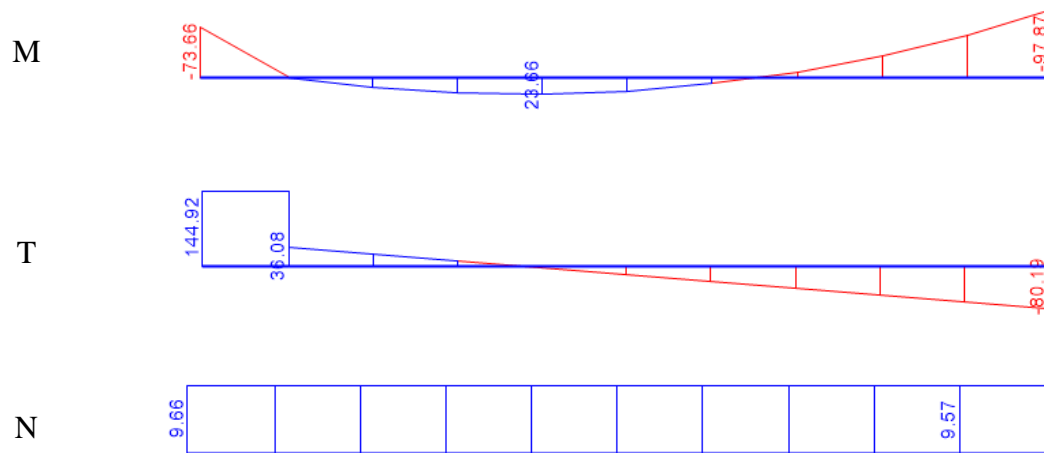
$$8 \text{ kN} \leq 0,25 \cdot 2037 = 509 \text{ kN} \rightarrow \text{Uvjet je zadovoljen}$$

$$N_{Ed} \leq \frac{0,5 h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$8 \text{ kN} \leq \frac{0,5 \cdot 30,3 \cdot 1,22 \cdot 23,5}{1,0} = 434 \text{ kN} \rightarrow \text{Uvjet zadovoljen}$$

Nema redukcije zbog djelovanja uzdužne sile.

Model s nepopustljivim vezama



Slika 119. Unutarnje sile grede D14 za model s nepopustljivim vezama.

$$M_{y,Ed,1} = 74 \text{ kNm} \quad M_{y,Ed,2} = 98 \text{ kNm} \quad V_{z,Ed,1} = 144 \text{ kN} \quad N_{Ed} = 10 \text{ kN}$$

Klasifikacija poprečnog presjeka

Hrbat:

$$c = h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r = 340 - 2 \cdot 18,3 - 2 \cdot 12,2 = 279 \text{ mm}$$

$$t = t_w = 12,2 \text{ mm}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{279}{12,2} = 22,8$$

$$a = \frac{N_{Ed}}{2 \cdot t_w \cdot f_y / \gamma_{M0}} = \frac{10}{2 \cdot 1,22 \cdot 23,5} = 0,18 \text{ cm}$$

$$\alpha = \frac{1}{c} \cdot \left(\frac{c}{2} + a \right) = \frac{1}{27,9} \cdot \left(\frac{27,9}{2} + 0,14 \right) = 0,51 > 0,5$$

$$\frac{c}{t} = 22,8 \leq \frac{396 \cdot \varepsilon}{13 \cdot \alpha - 1} = 70,34 \rightarrow \text{hrbat je klase 1}$$

Pojasnica je klase 1 (kao i prethodni slučaj)

Poprečni presjek je KLASE 1.

Otpornost poprečnog presjeka na vlačno naprezanje

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Ed}} = \frac{10}{2037} = 0,005 \rightarrow \text{Zadovoljava provjeru}$$

Otpornost poprečnog presjeka izloženog savijanju

$$\frac{M_{y,Ed,1}}{M_{c,Rd}} = \frac{74}{254} = 0,29 \rightarrow \text{Zadovoljava provjeru}$$

$$\frac{M_{y,Ed,2}}{M_{c,Rd}} = \frac{98}{254} = 0,39 \rightarrow \text{Zadovoljava provjeru}$$

Posmična otpornost poprečnog presjeka

$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{pl,z,Rd}} = \frac{144}{587} = 0,25 \rightarrow \text{Zadovoljava provjeru}$$

Interakcija M-V-N

Uvjet reduciranja zbog djelovanja poprečne sile

$$V_{z,Ed} > 0,5 V_{pl,z,Rd}$$

$$144 < 0,5 \cdot 587 = 294 \rightarrow \text{Nema redukcije zbog djelovanja poprečne sile}$$

Uvjet reduciranja zbog djelovanja uzdužne sile

$$N_{Ed} \leq 0,25 N_{pl,Rd}$$

$$10 \text{ kN} \leq 0,25 \cdot 2037 = 509 \text{ kN} \rightarrow \text{Uvjet je zadovoljen}$$

$$N_{Ed} \leq \frac{0,5 h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$10 \text{ kN} \leq \frac{0,5 \cdot 30,3 \cdot 1,22 \cdot 23,5}{1,0} = 434 \text{ kN} \rightarrow \text{Uvjet zadovoljen}$$

Nema redukcije zbog djelovanja uzdužne sile.

Tablica 24. Tablični prikaz kriterija nosivosti grede D14.

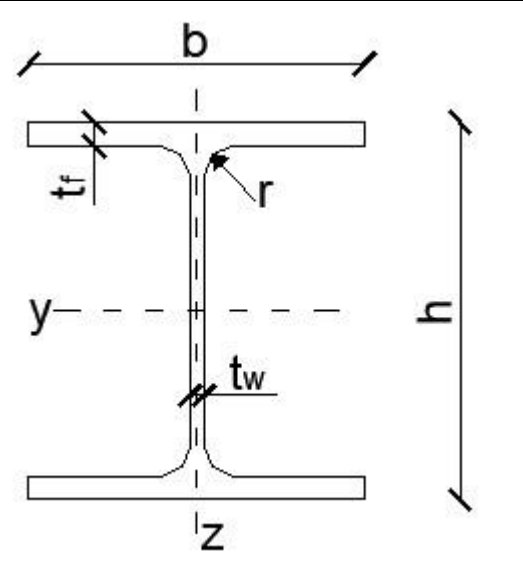
Oznaka numeričkog modela	GSN	Provjera
	Iskoristivost	
Model a	44 %	Zadovoljava
Model b	35 %	Zadovoljava
Model c	39 %	Zadovoljava

7.2.3. Provjera grede C710 (mjerodavna kombinacija GSN2)

U nastavku je provjera poprečnog presjeka grede IPN340 na uzdužnu, poprečnu silu i savijanje.

Tablica 25. Geometrijske karakteristike profila IPN400.

IPN400			
h [mm]	400,0	b [mm]	155,0
t _w [mm]	14,4	t _r [mm]	21,6
r [mm]	14,4	d [mm]	322,9
A [cm ²]	118	G [kg/m]	92,4
I _y [cm ⁴]	29210	W _{y,el} [cm ³]	1460
W _{y,pl} [cm ³]	1714	i _y [cm]	15,7
I _z [cm ⁴]	1160	W _{z,el} [cm ³]	149
W _{z,pl} [cm ³]	253	i _z [cm]	3,13
I _t [cm ⁴]	170	I _w [cm ⁶]	420



Klasifikacija poprečnog presjeka

$$t_f = 21,6 \text{ mm} \quad i \quad S235 \quad \rightarrow \quad f_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon = \sqrt{f_y/235} = 1,0$$

Hrbat:

$$c = h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r = 400 - 2 \cdot 21,6 - 2 \cdot 14,4 = 328 \text{ mm}$$

$$t = t_w = 14,4 \text{ mm}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{328}{14,4} = 22,8 \leq 72 \cdot \varepsilon = 72,00 \rightarrow \text{hrbat je klase 1.}$$

Pojasnica

$$c = \frac{b - t_w - 2 \cdot r}{2} = \frac{155 - 14,4 - 2 \cdot 14,4}{2} = 56$$

$$t = t_f = 21,6$$

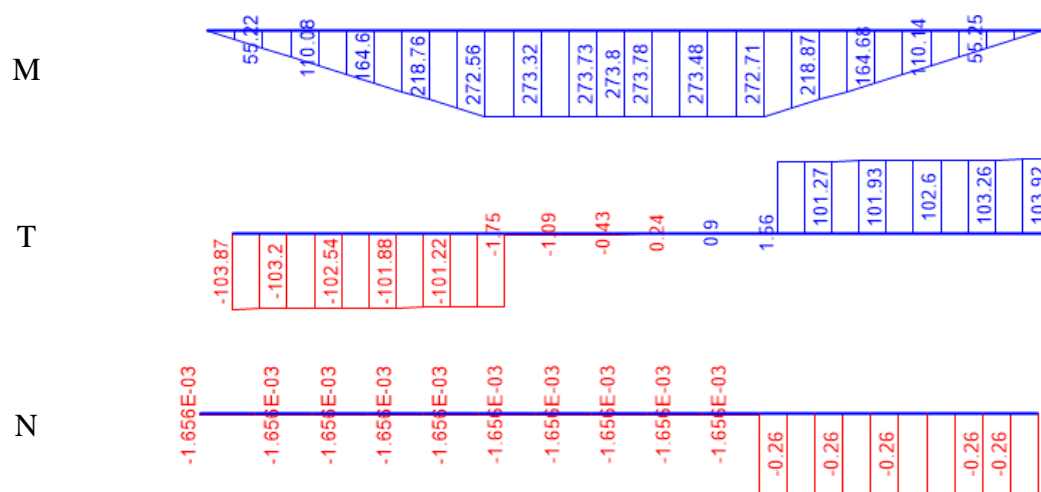
$$\frac{c}{t} = \frac{56}{21,6} = 2,59 \leq 9 \cdot \varepsilon = 9 \rightarrow \text{pojasnica je klase 1.}$$

Poprečni presjek je KLASE 1.

Otpornost presjeka na savijanje

$$M_{C,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{17,14 \cdot 23,5}{1,0} = 402,79 \text{ kNm}$$

Model s popustljivim vezama



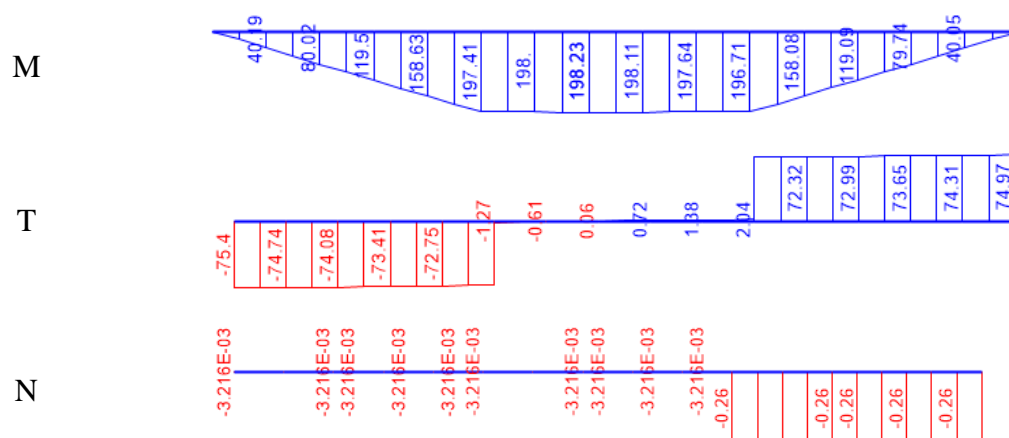
Slika 120. Unutarnje sile grede C710 za model s popustljivim vezama.

Provjera poprečnog presjeka na savijanje

$$M_{y,Ed} = 274 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{274}{403} = 0,58 \rightarrow \text{Zadovoljava provjeru}$$

Model s djelomično popustljivim vezama



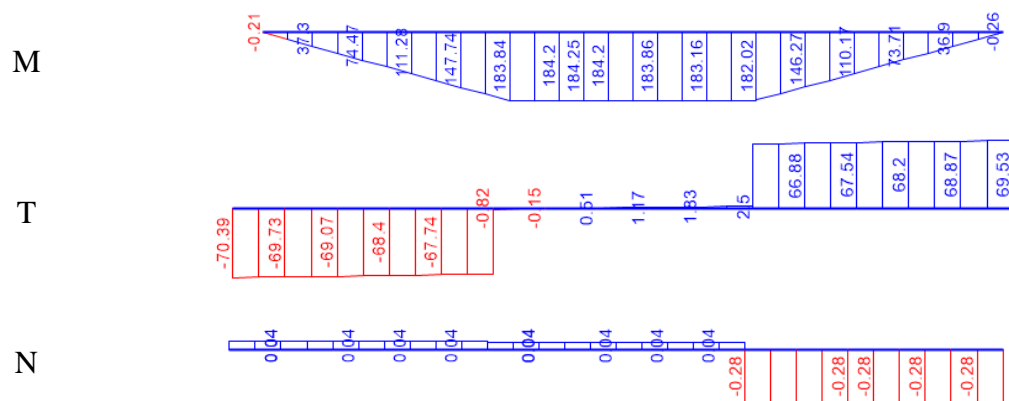
Slika 121. Unutarnje sile grede C710 za model s djelomično popustljivim vezama.

Provjera poprečnog presjeka na savijanje

$$M_{y,Ed} = 198 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{198}{403} = 0,49 \rightarrow \text{Zadovoljava provjeru}$$

Model s nepopustljivim vezama



Slika 122. Unutarnje sile grede C710 za model s nepopustljivim vezama.

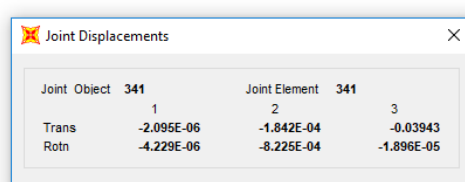
Provjera poprečnog presjeka na savijanje

$$M_{y,Ed} = 184 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{184}{403} = 0,46 \rightarrow \text{Zadovoljava provjeru}$$

Provjera progiba (mjerodavna kombinacija GSU4)

$$w_{dop} = \frac{L}{300} = \frac{800}{300} = 2,67 \text{ cm}$$

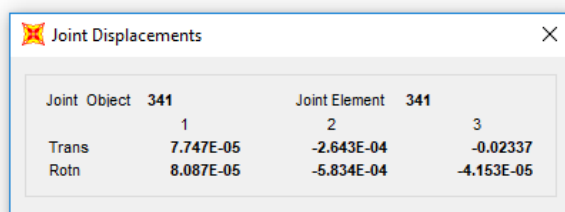


Joint	Object	341	Joint Element	341
		1	2	3
Trans		-2.095E-06	-1.842E-04	-0.03943
Rotn		-4.229E-06	-8.225E-04	-1.896E-05



Slika 123. Progib grede C710 za model s popustljivim vezama.

$$w_{Ed} = 3,9 \text{ cm} > w_{dop} = 2,67 \text{ cm} \rightarrow \text{Ne zadovoljava}$$



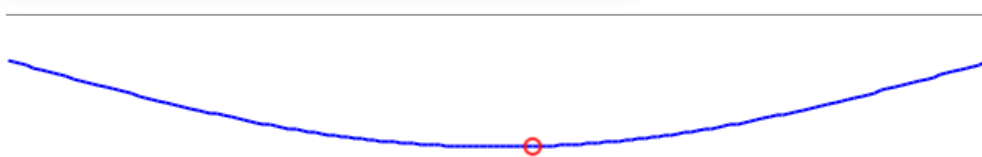
Joint	Object	341	Joint Element	341
		1	2	3
Trans		7.747E-05	-2.643E-04	-0.02337
Rotn		8.087E-05	-5.834E-04	-4.153E-05



Slika 124. Progib grede C710 za model s djelomično popustljivim vezama.

$$w_{Ed} = 2,3 \text{ cm} > w_{dop} = 2,67 \text{ cm} \rightarrow \text{Zadovoljava}$$

Joint	Object	332	Joint Element	332
		1	2	3
Trans		3.226E-05	-1.521E-04	-0.02129
Rotn		1.632E-04	-5.389E-04	-3.150E-05



Slika 125. Progib grede C710 za model s nepopustljivim vezama.

$$w_{Ed} = 2,2 \text{ cm} > w_{dop} = 2,67 \text{ cm} \rightarrow \text{Zadovoljava}$$

Tablica 26. Tablični prikaz kriterija nosivosti grede C710.

Oznaka numeričkog modela	GSN	GSU		Provjera
	Iskoristivost	Uvjet	Proračun	
Model a	58 %	2,7 cm	3,9 cm	Ne zadovoljava GSU
Model b	49 %	2,7 cm	2,3 cm	Zadovoljava
Model c	46 %	2,7 cm	2,2 cm	Zadovoljava

7.2.4. Provjera stupa S20 (mjerodavna kombinacija GSN6)

Poprečni presjek

Pravokutni poprečni presjek s geometrijskim karakteristikama u nastavku:

Promatrani profil: 120 mm x 140 mm x 7 mm

Toplo dogotovljeni, materijal S235 → $\varepsilon = 1,0$

$$A = 34,44 \text{ cm}^2 \quad I_y = 3735 \text{ cm}^4$$

$$h = 120 \text{ mm} \quad b = 140 \text{ mm} \quad t = 7 \text{ mm}$$

Klasifikacija poprečnog presjeka

$$\frac{c_1}{t} = \frac{120 - 2 \cdot 7}{7} = 15,14 < 33 \cdot \varepsilon = 33 \rightarrow \text{klasa 1}$$

$$\frac{c_2}{t} = \frac{140 - 2 \cdot 7}{7} = 18 < 33 \cdot \varepsilon = 33 \rightarrow \text{klasa 1}$$

Poprečni presjek je svrstan u klasu 1.

Otpornost poprečnog presjeka u tlaku

$$N_{c,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{34,44 \cdot 23,5}{1,0} = 809,34 \text{ kN}$$

Otpornost elementa na izvijanje

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0$$

$$\Phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_{cr}^2}$$

$$L_{cr} = L = 450 \text{ cm} \quad (\text{prosta greda})$$

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 3735}{450^2} = 3823 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{34,44 \cdot 23,5}{3823}} = 0,46$$

Nije poznato je li element toplo ili hladno dogotovljen, stoga se promatra sigurniji slučaj, odnosno za odabir krivulje imperfekcije se odabire krivulja *c*. Za mjerodavnu krivulju faktor imperfekcije je $\alpha = 0,49$.

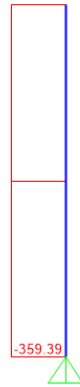
$$\Phi = 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (0,46 - 0,2) + 0,46^2] = 0,6695$$

$$\chi = \frac{1}{0,6695 + \sqrt{0,66695^2 - 0,46^2}} = 0,869$$

$$N_{b,Rd} = 0,869 \cdot 809,34 = 703 \text{ kN}$$

Provjera elemenata na izvijanje

Model s popustljivim vezama

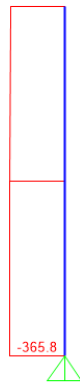


Slika 126. Sila u stupu S20 za model s popustljivim spojevima.

$$N_{Ed} = 360 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Ed}} = \frac{360}{703} = 0,51 \quad \rightarrow \quad \text{Zadovoljava}$$

Model s djelomično popustljivim vezama

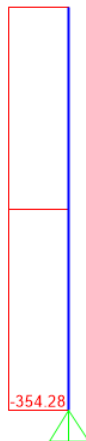


Slika 127. Sila u stupu S20 za model s djelomično popustljivim spojevima.

$$N_{Ed} = 366 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Ed}} = \frac{366}{703} = 0,52 \quad \rightarrow \quad \text{Zadovoljava}$$

Model s nepopustljivim vezama



Slika 128. Sila u stupu S20 za model s nepopustljivim spojevima.

$$N_{Ed} = 354 \text{ kN}$$

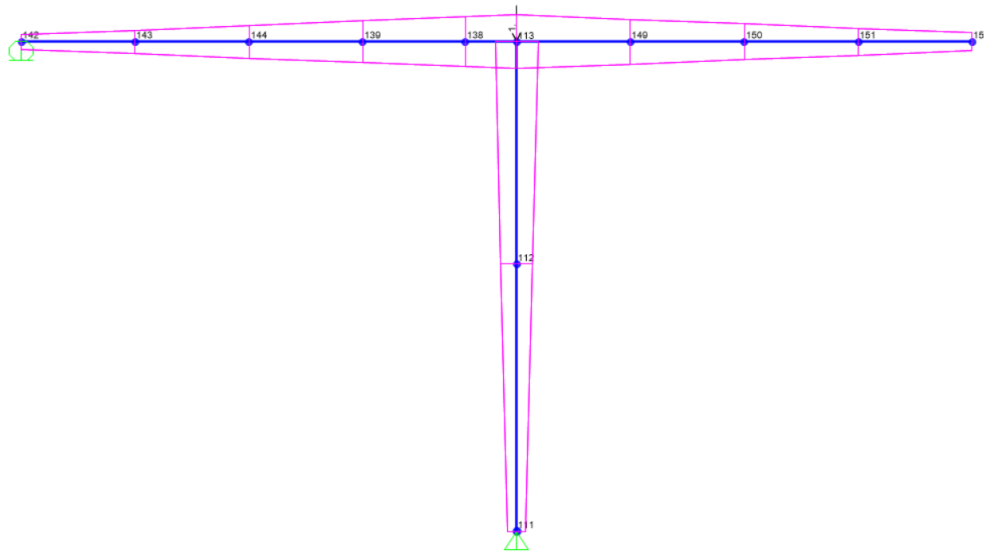
$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Ed}} = \frac{354}{703} = 0,50 \quad \rightarrow \quad \text{Zadovoljava}$$

Tablica 27. Tablični prikaz kriterija nosivosti stupa S20.

Oznaka numeričkog modela	GSN	Provjera
	Iskoristivost	
Model a	51 %	Zadovoljava
Model b	52 %	Zadovoljava
Model c	50 %	Zadovoljava

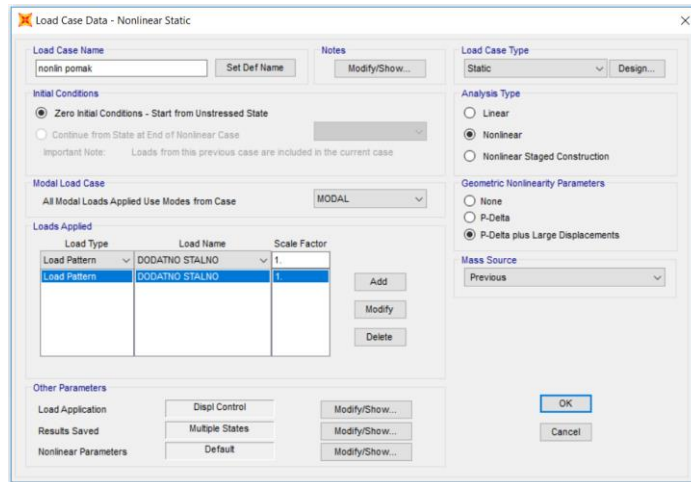
7.2.5. Provjera stabilnosti poluokvira (stup S8, mjerodavna GSN7)

Stabilnost okvira je analizirana nelinearnim proračunom na poluokviru trozglobnog okvira sa zadanim geometrijskim karakteristikama na tlačnu silu u stupu nosača. Geometrija, poprečni presjeci i rubni uvjeti su preuzeti iz prethodno analiziranih modela. Prikaz geometrije modela sa zadanom jediničnom silom na koju je analiziran sustav je nastavku.

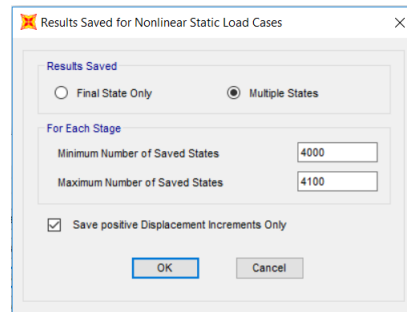
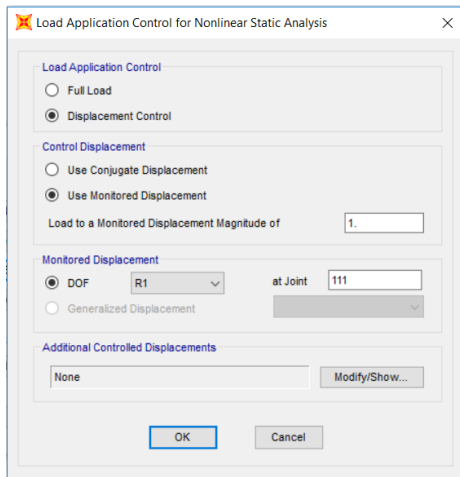


Slika 129. Geometrija i jedinična sila nelinearnog modela za analizu stabilnosti trozglobnog nosača.

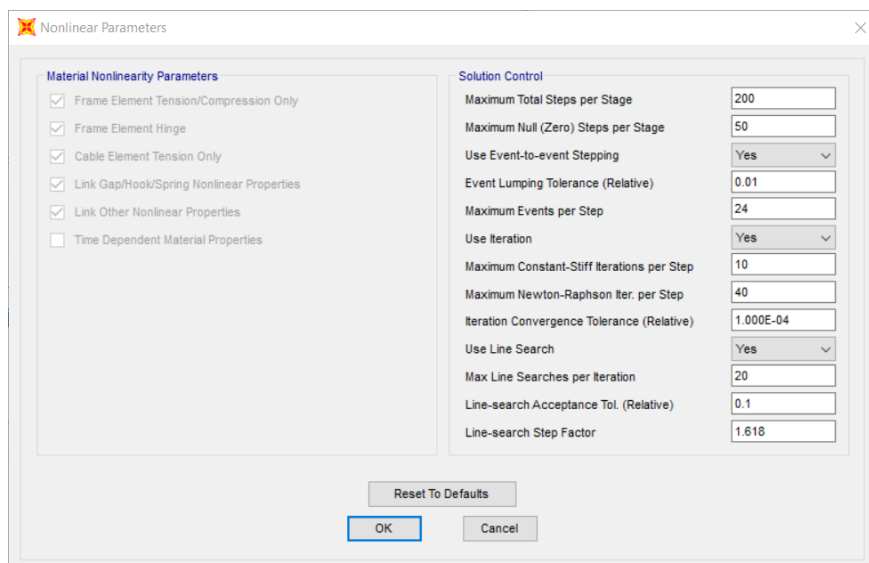
Osim za sustav bez imperfekcije, analizirani su sustavi kojima je imperfekcija zadana na vrhu stupa, a reprezentira djelovanje koje rezultira bočnim pomakom nosača. Postavke nelinearnog modela su prikazane u nastavku.



Slika 130. Postavke nelinearnog proračuna (1).

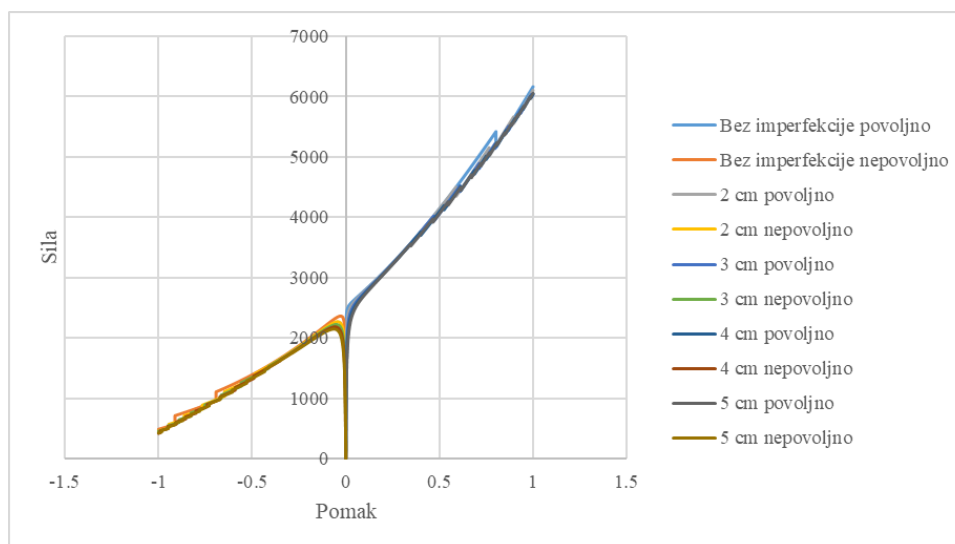


Slika 131. Postavke nelinearnog proračuna (2).



Slika 132. Postavke nelinearnog proračuna (3).

Kako se može vidjeti na slici 132., prirast opterećenja se zadavao kontrolom pomaka kako bi se mogla detektirati nestabilna grana sustava što je ograničeno metodom Newton-Raphson. Kada bi prirast opterećenja zadavali kontrolom sile, u kritičnoj bi točki bi proračun stao jer bi tangentna matrica krutosti bila bliska nuli pa se ne bi moglo prikazati ponašanje sustava u nestabilnom stanju, a što nam je potrebno da znamo klasificirati sustav prema jednom od 4 temeljna primjera teorije stabilnosti [28].

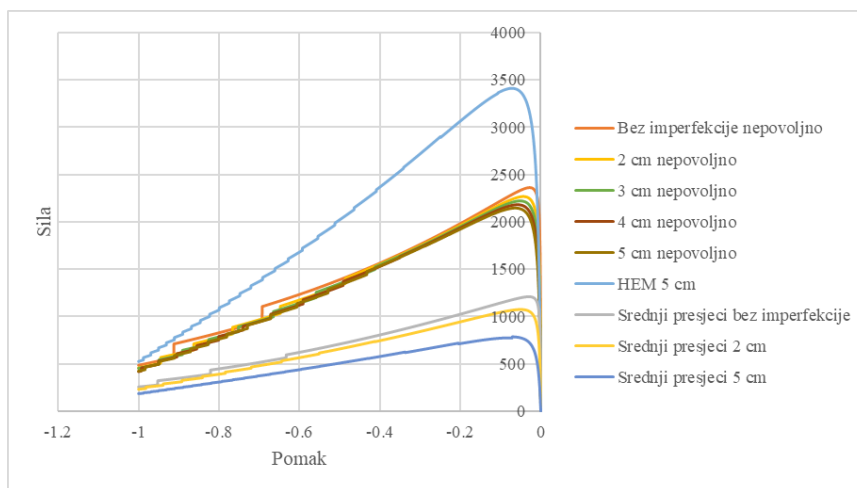


Grafikon 1. Prikaz ponašanja okvira za imperfektni sustav i s obzirom na zadane imperfekcije.

Kako možemo vidjeti na grafikonu 1, sustav se ponaša kao treći Koiterov temeljni primjer, što je i karakteristično ponašanje za bočno pomične okvire. Može se zaključiti da sustav nije u većoj mjeri osjetljiv na imperfekcije jer za pomak od 5 cm, koji je relativno velik, imamo smanjenje kritične sile tek za 9,1 %. Kritična sila za sustav bez imperfekcije iznosi 2363 kN, a za sustav s imperfekcijom 5 cm na vrhu stupa 2147 kN.

Osim spomenutog okvira, zbog usporedbe promatrani su i okviri s jednakim geometrijskim karakteristikama, ali s poprečnim presjecima jednakima srednjim vrijednostima zadanih promjenjivih poprečnih presjeka te za slučaj kada bi se okvir izveo iz poprečnog presjeka HE400M.

Kako vidimo na grafikonu 1 sustav ima dva oblika ponašanja, a u nastavku će se analizirati samo nestabilni koji daje smanjenje kritične sile.

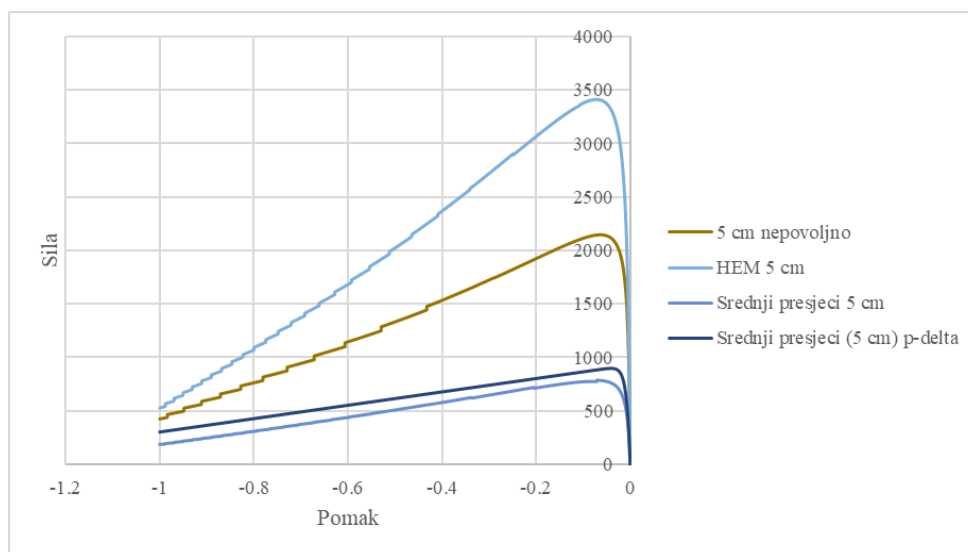


Grafikon 2. Ovisnost troglobnog okvira o imperfekciji.

Na grafikonu 2 se može ponovno vidjeti smanjenje kritične sile za određenu imperfekciju u usporedbi s dodatna dva analizirana slučaja. Za slučaj okvira sa srednjim presjecima se vidi da je za sustav s imperfekcijom kritična sila 1210 kN , što je za 49 % manja vrijednost u usporedbi s izvedenom konstrukcijom. Osim toga, vidimo da je okvir takvih karakteristika puno osjetljiviji na imperfekciju u smislu bočnog pomaka. Za imperfekciju 5 cm određena je kritična sila 787 kN što je 35 % manja sila od kritične.

Kako se ne očekuje bočni pomak veći od 5 cm (provjera bočnog pomaka na vjetar i potres), mjerodavna sila u stupu će biti manja vrijednost birana između vrijednosti za imperfekciju 5 cm (2147 kN) i najmanje otpornosti poprečnog presjeka u tlaku.

Prethodni je model iskorišten i za prikaz nepovoljnog proračuna $p - delta$ za analizirani sustav. Za bočno pomične se okvire ne smije koristiti jer daje veću vrijednost kritične sile u odnosu na proračun teorijom drugog reda. Proračun $p - delta$ u ovom slučaju daje za 14 % (898 kN) veću vrijednost kritične sile (787 kN).



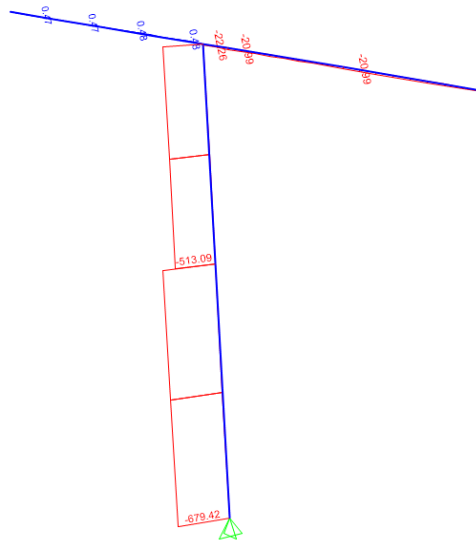
Grafikon 3. Prikaz svih primjera za imperfekciju 5 cm .

Otpornost poprečnog presjeka na tlak:

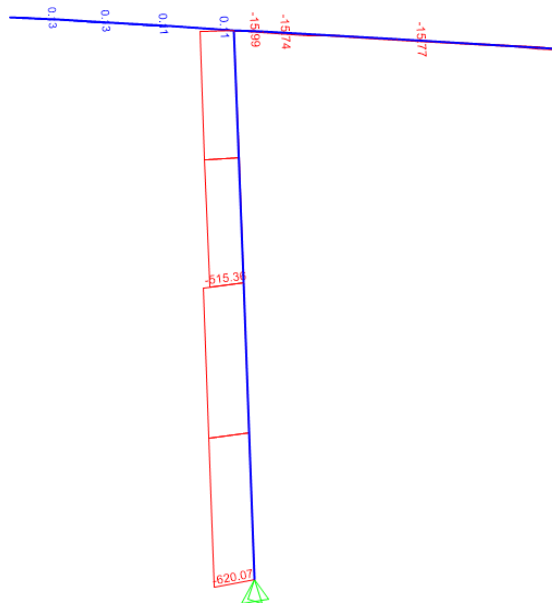
$$N_{c,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{75,36 \cdot 27,5}{1,0} = 2072,4 \text{ kN}$$

$$N_{stabilnost} = 2147 \text{ kN} > N_{c,Rd} = 2072 \text{ kN} \rightarrow N_{c,Rd} \text{ je mjerodavno.}$$

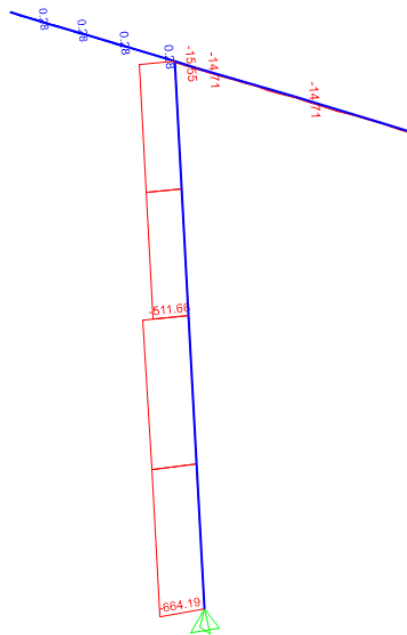
U nastavku su vrijednosti uzdužne sile u stupu S8 za mjerodavni slučaj opterećenja GSN7, nakon čega slijedi provjera nosivosti.



Slika 133. Sila u stupu S8 za model a.



Slika 134. Sila u stupu S8 za model b.

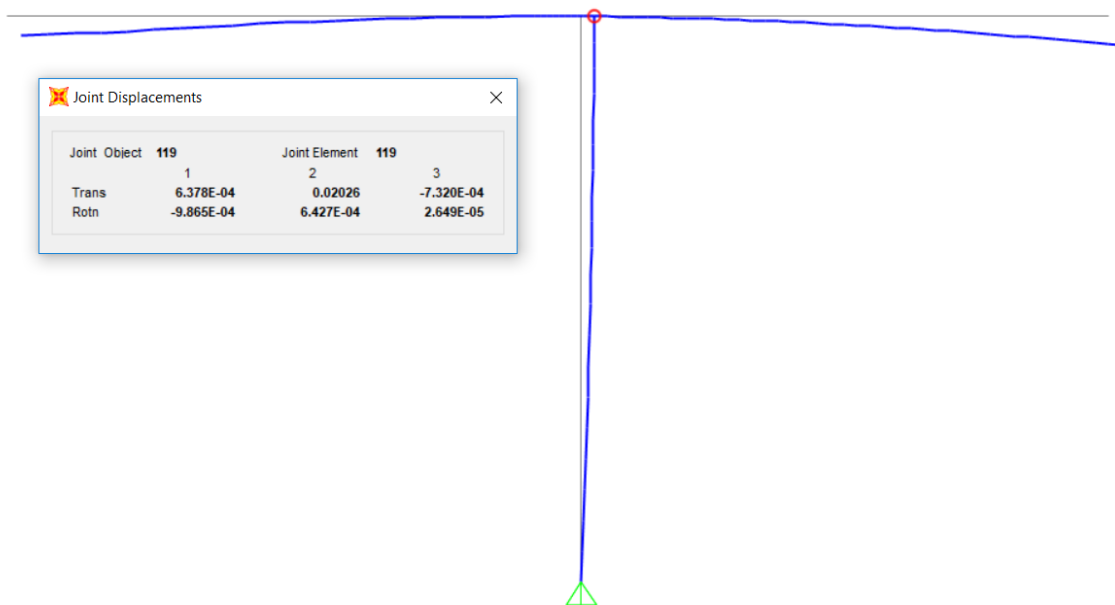


Slika 135. Sila u stupu S8 za model c.

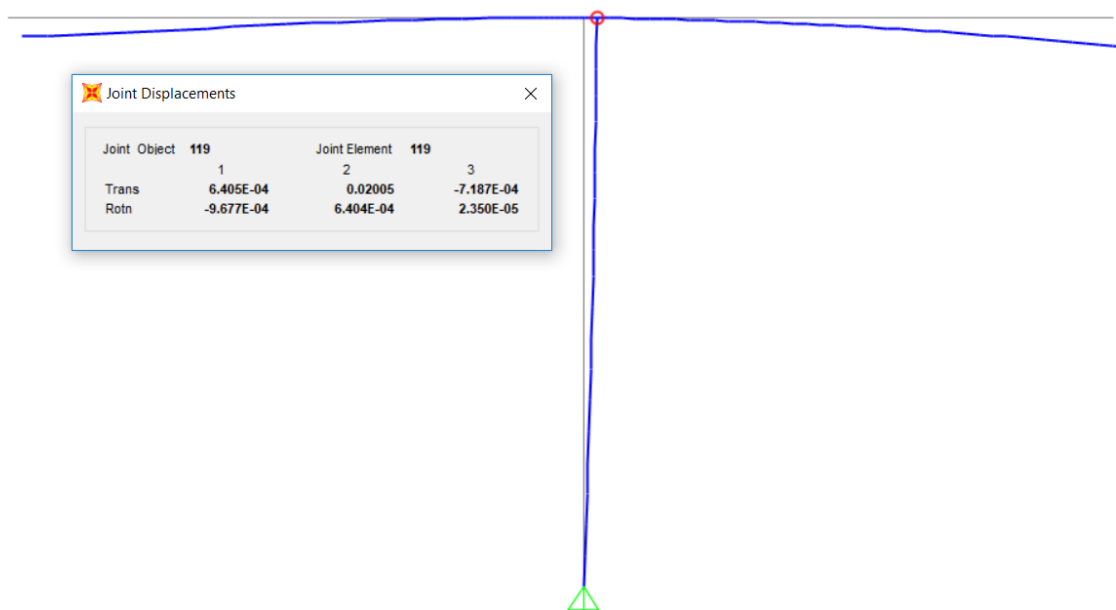
Tablica 28. Tablični prikaz kriterija nosivosti stupa S8.

Oznaka numeričkog modela	GSN		Provjera
	Sila u stupu	Iskoristivost	
Model a	679 kN	33 %	Zadovoljava
Model b	620 kN	30 %	Zadovoljava
Model c	664 kN	32 %	Zadovoljava

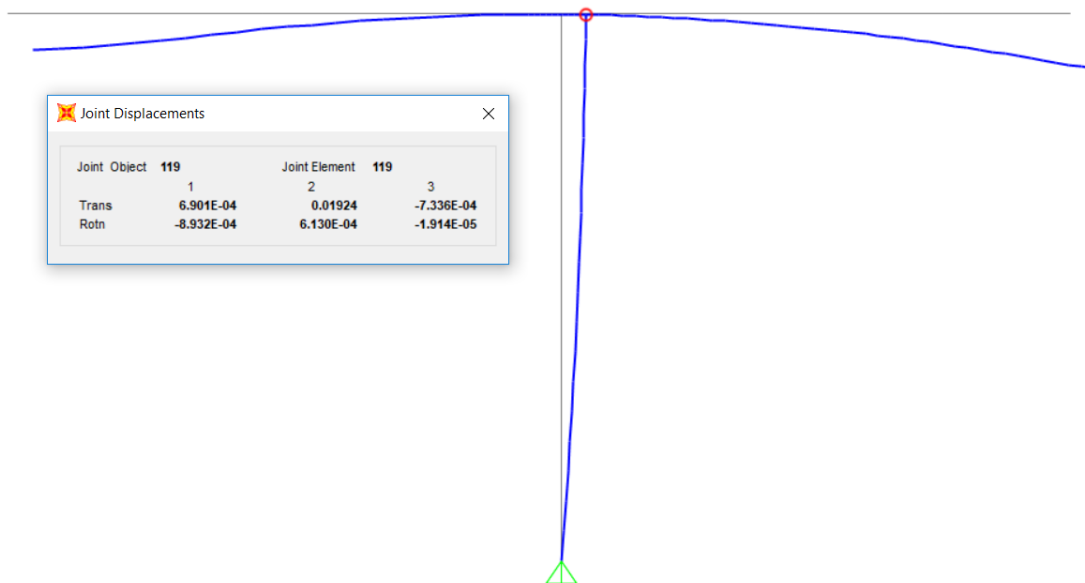
Za provjeru bočnog pomaka usvaja se preporuka kako pomak vrha građevine mora zadovoljavati uvjet $h/500$, odnosno $b = 860/500 = 1,7 \text{ cm}$. U nastavku su prikazani pomaci bočnog okvira od djelovanja vjetra.



Slika 136. Bočni pomak okvira modela a za mjerodavni slučaj GSU3.



Slika 137. Bočni pomak okvira modela b za mjerodavni slučaj GSU3.



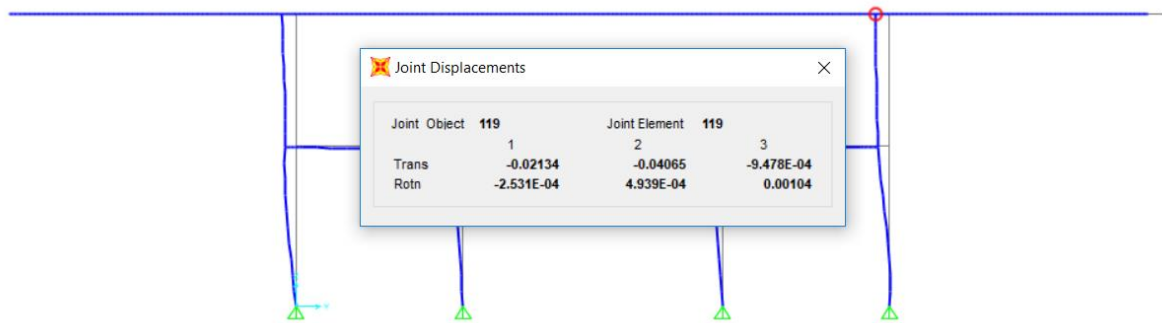
Slika 138. Bočni pomak okvira modela c za mjerodavni slučaj GSU3.

Tablica 29. Kontrola bočnog pomaka okvira od djelovanja vjetra.

Oznaka numeričkog modela	Kontrola pomaka		Provjera
	Pomak	Dopušten pomak	
Model a	2,0 cm	1,7 cm	Ne zadovoljava
Model b	2,0 cm	1,7 cm	Ne zadovoljava
Model c	1,9 cm	1,7 cm	Ne zadovoljava

7.2.6. Provjera na potres

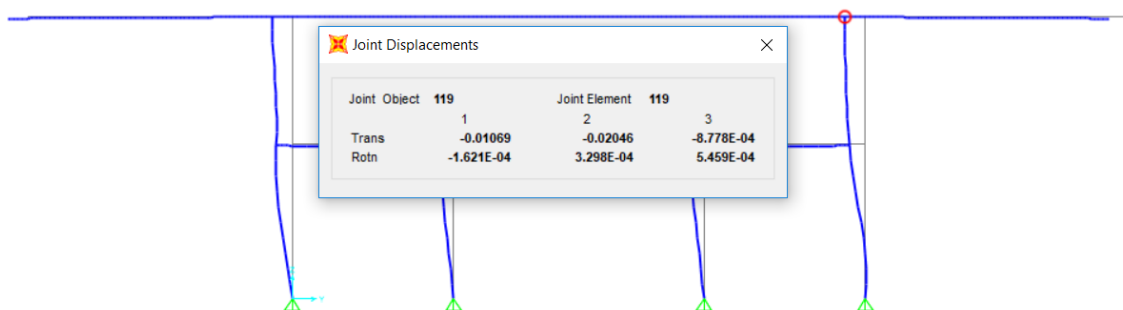
Sve unutarnje sile za potresno opterećenje su manje od mjerodavnih za granično stanje nosivosti. Zbog male krutosti na bočni pomak, pomak vrha stupa trozglobnog nosača je mjerodavan za kombinaciju POTRES GSU. Pomaci okvira su prikazani u nastavku.



Slika 139. Bočni pomak okvira modela a od kombinacije POTRES GSU.



Slika 140. Bočni pomak okvira modela b od kombinacije POTRES GSU.



Slika 141. Bočni pomak okvira modela c od kombinacije POTRES GSU.

Tablica 30. Kontrola bočnog pomaka okvira od djelovanja potresa.

Oznaka numeričkog modela	Kontrola pomaka		Provjera
	Pomak	Dopušten pomak	
Model a	4,1 cm	1,7 cm	Ne zadovoljava
Model b	4,1 cm	1,7 cm	Ne zadovoljava
Model c	2,0 cm	1,7 cm	Ne zadovoljava

7.2.7. Provjera grede okvira na savijanje (mjerodavno GSN3)

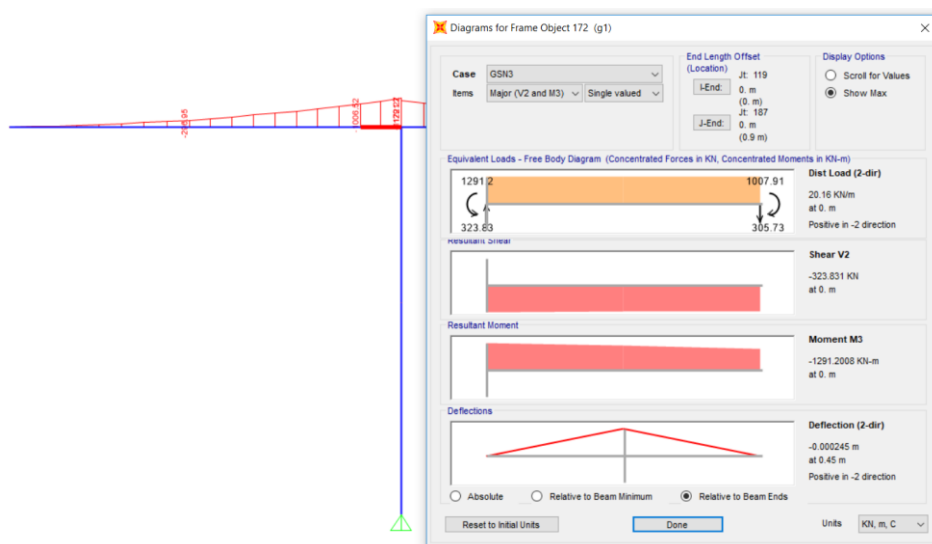
Karakteristike poprečnog presjeka grede (I poprečni presjek) pri spoju sa stupom. Promatrati će se slučaj za karakteristike poprečnog presjeka u elastičnom području do granice popuštanja.

$$b = 300 \text{ mm} \quad h = 950 \text{ mm} \quad t_w = 10 \text{ mm} \quad t_f = 12.5 \text{ mm}$$

$$I_y = 1037996 \text{ cm}^4 \quad f_y = 275 \text{ N/mm}^2$$

Otpornost presjeka na savijanje

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{I_y \cdot f_y}{z \cdot \gamma_{M0}} = \frac{10379,96 \cdot 27,5}{47,5} = 6009 \text{ kNm}$$



Slika 142. Unutarnje sile grede trozglobnog nosača za sva tri modela za GSN3.

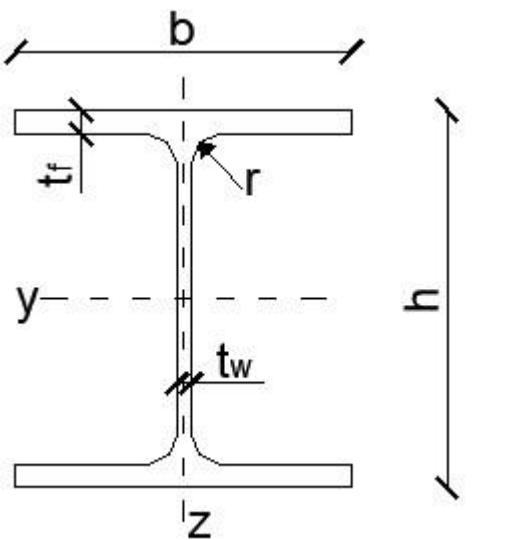
$$\frac{M_{Ed}}{M_{y,Rd}} = \frac{1291 \text{ kN}}{6009 \text{ kN}} = 0,21 \rightarrow \text{Zadovoljava} \rightarrow \text{iskoristivost 21\%}$$

7.2.8. Provjera grede DE8 (mjerodavno GSN 6)

U nastavku je provjera poprečnog presjeka grede IPN340 na uzdužnu, poprečnu silu i savijanje.

Tablica 31. Geometrijske karakteristike profila IPN240.

IPN400			
h [mm]	240,0	b [mm]	106,0
t _w [mm]	8,7	t _r [mm]	13,1
r [mm]	8,7	d [mm]	192,5
A [cm ²]	46,1	G [kg/m]	36,2
I _y [cm ⁴]	42500	W _{y,el} [cm ³]	354
W _{y,pl} [cm ³]	412	i _y [cm]	9,59
I _z [cm ⁴]	221	W _{z,el} [cm ³]	41,7
W _{z,pl} [cm ³]	70,0	i _z [cm]	2,20
I _t [cm ⁴]	25	I _w [cm ⁶]	28,7



Klasifikacija poprečnog presjeka

$$t_f = 13,1 \text{ mm} \quad i \quad S235 \quad \rightarrow \quad f_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon = \sqrt{f_y/235} = 1,0$$

Hrbat:

$$c = h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r = 240 - 2 \cdot 13,1 - 2 \cdot 8,7 = 196,4 \text{ mm}$$

$$t = t_w = 8,7 \text{ mm}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{196,4}{8,7} = 22,6 \leq 72 \cdot \varepsilon = 72,00 \rightarrow \text{hrbat je klase 1.}$$

Pojasnica

$$c = \frac{b - t_w - 2 \cdot r}{2} = \frac{106 - 8,7 - 2 \cdot 8,7}{2} = 39,95 \quad t = t_f = 13,1$$

$$\frac{c}{t} = \frac{39,95}{13,1} = 31 \leq 9 \cdot \varepsilon = 9 \rightarrow \text{pojasnica je klase 1.}$$

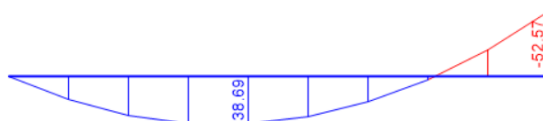
Poprečni presjek je KLASE 1.

Otpornost presjeka na savijanje

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{4,12 \cdot 23,5}{1,0} = 96,8 \text{ kNm}$$



Slika 143. Moment u gredi DE8 za model a i GSN6.



Slika 144. Moment u gredi DE8 za model b i GSN6.



Slika 145. Moment u gredi DE8 za model c i GSN6.

Tablica 32. Tablični prikaz kriterija nosivosti grede DE8 za GSN6.

Oznaka numeričkog modela	GSN		Provjera
	Sila u stupu	Iskoristivost	
Model a	62 kN	64 %	Zadovoljava
Model b	53 kN	55 %	Zadovoljava
Model c	57 kN	59 %	Zadovoljava

8. ZAKLJUČAK

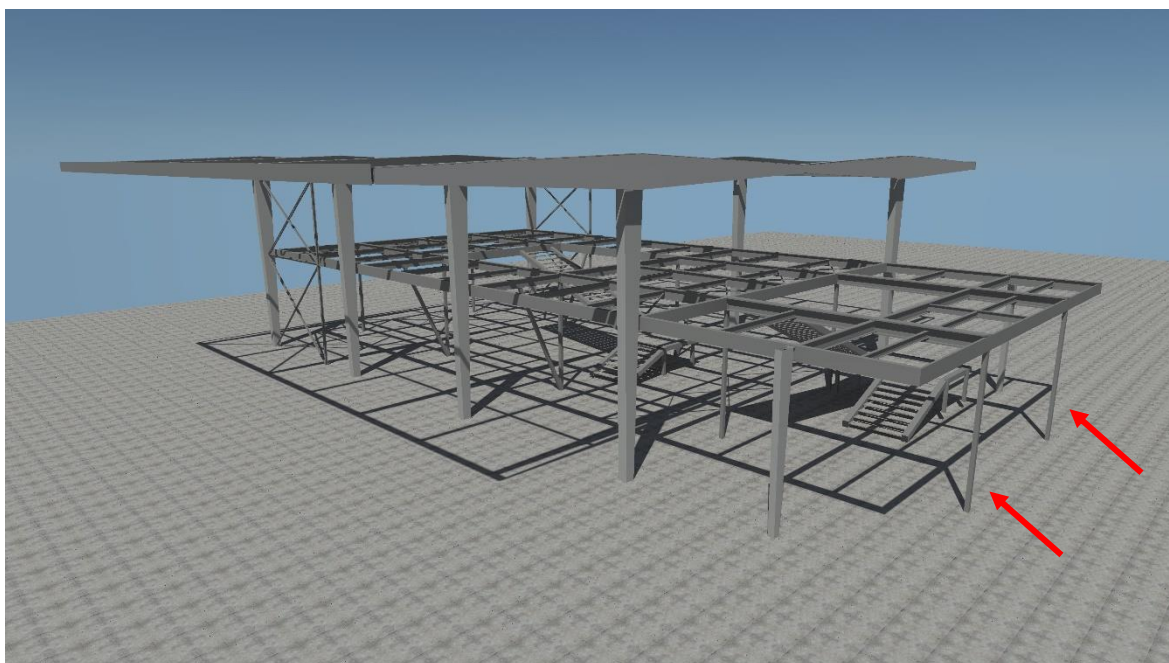
Prikupljenim podlogama i istražnim radovima dobiven je kvalitetan prikaz zatečenog stanja građevine koju je potrebno obnoviti. Istražnim radovima su eliminirane sve uočene razlike između prikupljenih podloga i zatečenog stanja. Također su i određeni svi poprečni presjeci elemenata konstrukcije te mehaničke karakteristike materijala potrebne za izradu numeričkog modela.

S ciljem kalibracije modela mjerili su se dinamički parametri konstrukcije, ali samo do razine međukatne konstrukcije. Zbog nepristupačnosti građevine nisu se mogle prikupiti nikakve informacije odgovora krovne konstrukcije na ambijentalnu pobudu stoga su se razmatrali samo globalni pomaci konstrukcije. Prethodno iskazano ne umanjuje usklađenost numeričkih modela sa stvarnom konstrukcijom jer djelovanjem dinamičke pobude krovište se ponaša blisko ponašanju krutog tijela na stupovima. U sklopu projekta obnove građevine se predviđa uklanjanje krovišta stoga je ono dodatno analizirano u sklopu diplomskog rada projektiranja novog stanja gdje se za krovište predlaže konstrukcija s dva valovita lima između kojih se nalazi toplinska izolacija što je znatno manje opterećenje u odnosu na zatečeno.

Na različitim verzijama numeričkih modela je nanoseno dodatno stalno opterećenje slojeva konstrukcije u skladu s projektiranim stanjem kako bi se reprezentiralo izvedeno stanje u fazi korištenja paviljona. Osim dodatnog stalnog opterećenja, određeno je i uporabno s obzirom na nacrt projektiranog stanja, a u skladu s današnjim normama propisanih Eurokodom 1. Opterećenje vjetrom je promatrano kao tlak vjetera pri udaru u skladu s propisima za djelovanje vjetera [9], a snijeg prema propisima za djelovanje snijega [7] i [8]. Dinamički odgovor konstrukcije na potresno opterećenje se promatrao prema Eurokodu 8 [27]. Promatrane su različite kombinacije opterećenja te je napravljena analiza nosivosti i usporedba progiba za mjerodavna opterećenja. Na analize konstruktivnog sustava i elemenata konstrukcije donesene su smjernice koje saniraju postojeće stanje ojačanjem konstrukcije u cjelini.

Kako je od izgradnje konstrukcije prošlo 55 godina te zbog nesigurnosti u razlici između projektiranoga i stvarnog opterećenja, predlažem sanaciju središnjih stupova koji nose međukatnu konstrukciju. Podsjećam da je građevina bila korištena kao izložbeni paviljon pa postoji određena vjerojatnost da je u nekom trenutku primila više ljudi nego za što je bila projektirana. Radi se o kritičnim elementima građevine jer prenose većinu opterećenja međukatne konstrukcije preko temelja u tlo. Također naglašavam da u usporedbi s ostalim troškovima projekta zamjena stupova je mala stavka, a mnogo doprinosi sigurnosti korisnika pošto će se građevina prenamijeniti u muzej. Predlažem da se ugrade novi stupovi poprečnog presjeka $140\text{ mm} \times 140\text{ mm}$ s debljinom stjenke 10 mm .

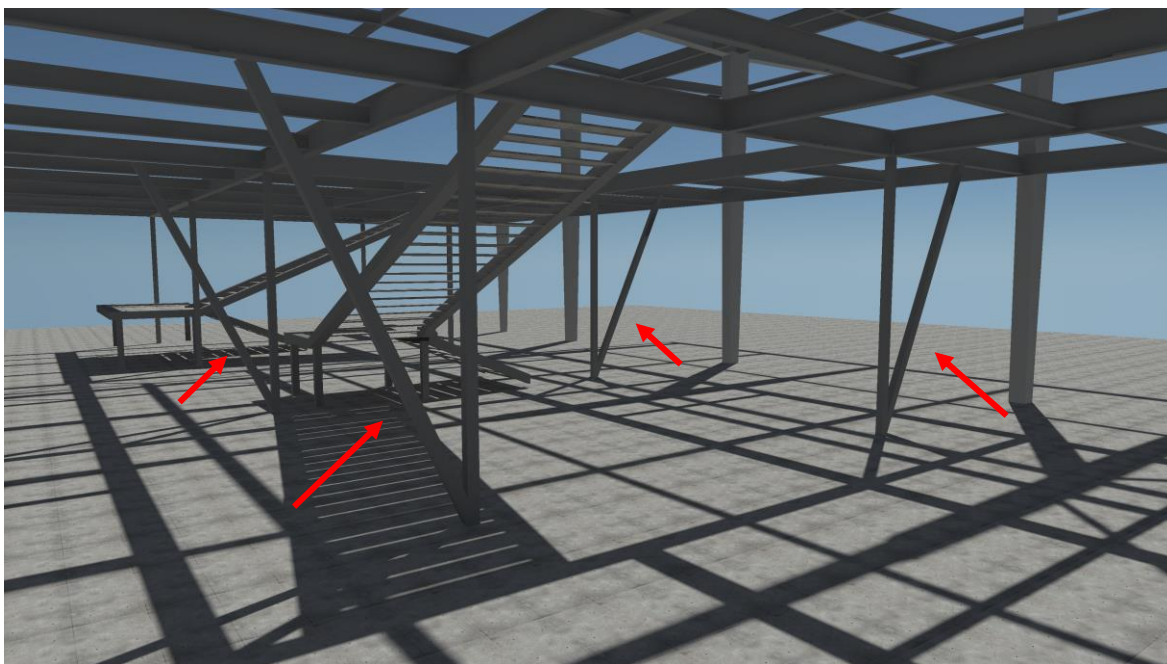
Osim prethodnog, preporučam pomicanje stupova terase za 3 m prema kraju građevine, čime ne interveniramo previše u konstrukciju (s estetske strane gotovo nikako), a sustav s konzolnim dijelom se pretvara u mnogo učinkovitiji roštiljni sustav. Osim toga, smanjuje se progib na konzolnom kraju i ostvaruje se jednostavniji prijenos opterećenja. U nastavku je grafički prikaz na kojemu je novi položaj stupova S15 i S20, a u skladu su s prethodno iznesenim.



Slika 146. Prikaz konstrukcije s naznačenim novim položajem stupova S15 i S20.

Statičkim proračunom i analizama nosivosti je utvrđeno da konstrukcija ima malu krutost na bočni pomak. Iako nije normiran dopušten pomak vrha konstrukcije u odnosu na razinu poda, preporuka je da se taj graniči vrijednošću $h/500$ što analizirani sustav pri djelovanju vjetra koje generira bočni pomak ne zadovoljava.

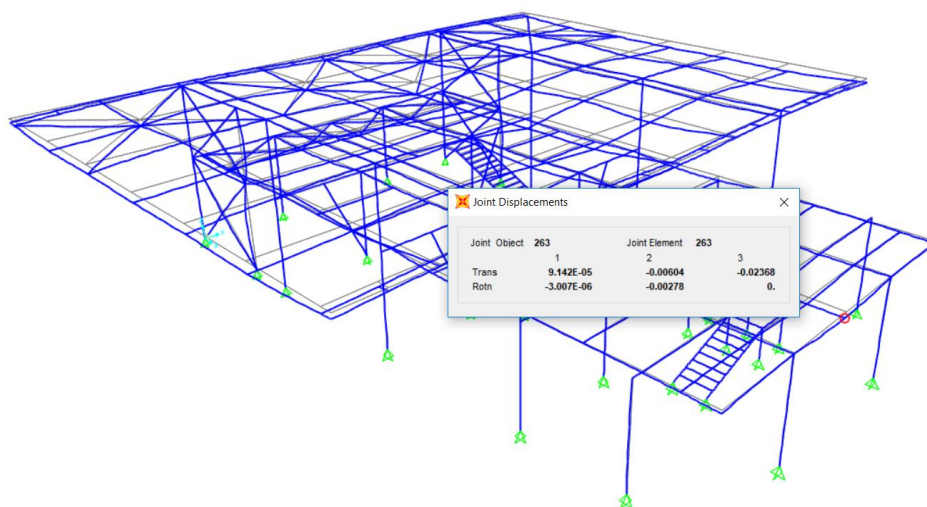
Uzevši prethodno u obzir preporučam ojačanje smjera sjever-jug umetanjem kosnika koji bi išli od temelja središnjih stupova do sredine grede koja spaja međukatnu konstrukciju sa stupom trozglobnog nosača. Intervencija nije zahtjevna, a puno doprinosi krutosti što je i provjereno novim numeričkim modelom. Preporučam da kosnici budu poprečnog presjeka jednakog središnjim stupovima na koje se spajaju, a pojasnica grede IPN340 je 137 mm pa detalj spoja ne bi trebao biti kompliciran. Predlažem da se detalji priključaka odrede u sklopu projektiranja novog stanja ako se usvoji predloženo. U nastavku je grafički prikaz ideje ojačanja smjera sjever – jug.



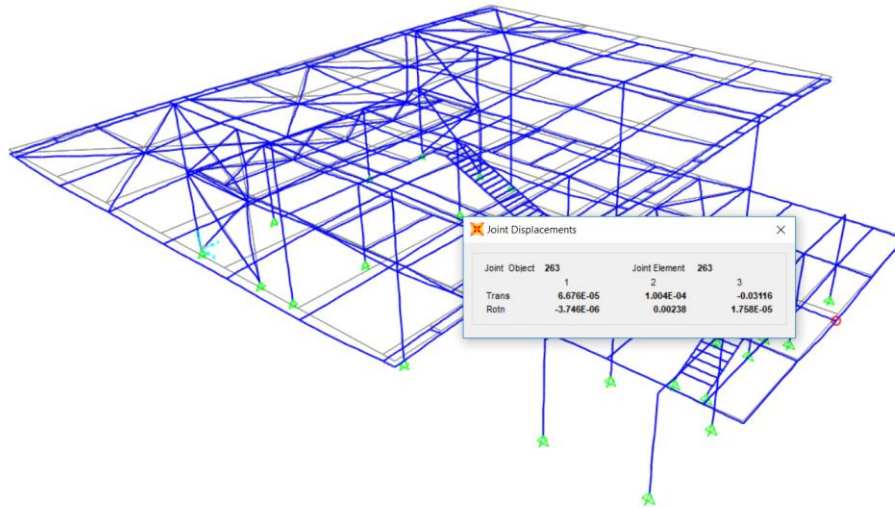
Slika 147. Primjer ojačanja smjera sjever – jug.

Osim opisanih intervencija predlažem zamjenu svih vijaka u spojevima uz analizu i dokaz nosivosti priključaka za novo projektirano stanje. Također ne preporučam bilo kakvo oslabljenje konstrukcijskih elemenata bez obzira na razlog oslabljenja jer se radi o obnovi konstrukcije koja je prepuštena zubu vremena pa je potrebno osigurati što veću rezervu nosivosti.

Na osnovu prethodno iznesenog, izrađen je novi numerički model kojim su provjerene pretpostavke rješenja iskazanih problema, a rezultati i provjere su u nastavku.

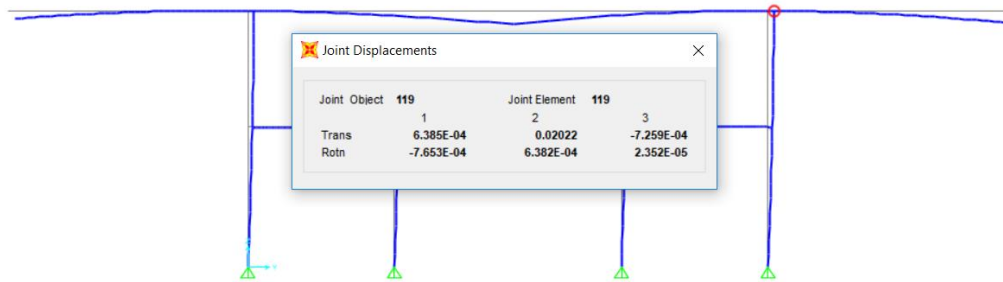


Slika 148. Maksimalan pomak na terasi za prijedlog sanacije.

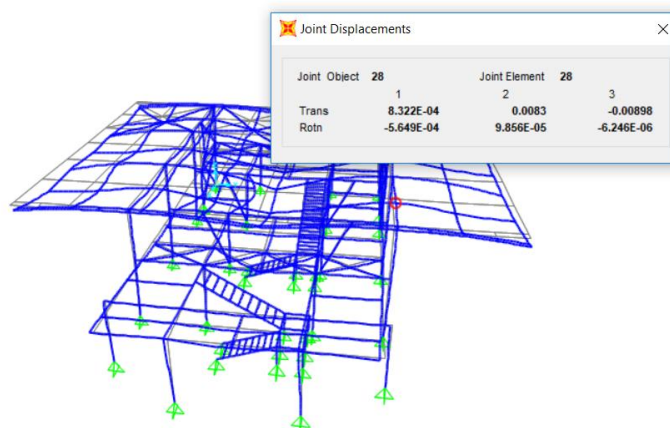


Slika 149. Maksimalan pomak na terasi za projektirano stanje.

$$w_{sanacija} = 2,4 \text{ cm} \quad w_{projektirano} = 3,1 \text{ cm}$$



Slika 150. Bočni pomak projektirane konstrukcije za mjerodavno opterećenje.



Slika 151. Najveći bočni pomak sanirane konstrukcije za mjerodavno opterećenje.

Usporedbom rezultata se može vidjeti da je predloženim rješenjem bočni pomak smanjen za $\Delta w = w_{projektirano} - w_{sanacija} = 2,02 - 0,83 = 1,19 \text{ cm}$ što uzrokuje zadovoljenje preporučene vrijednosti $h/500 = 1,72 \text{ cm}$.

Ako se u novom projektom rješenju ne bude pridržavalo prethodno iznesenih preporuka, potrebno je dokazati nova rješenja s ciljem obnove građevine tako da zadovoljava temeljne zahtjeve za građevinu koji su propisani Zakonom o gradnji.

9. LITERATURA

- [1] <http://pogledaj.to/arhitektura/moze-li-zagrebacki-velesajam-postati-inovativno-srediste-novog-zagreba/>. [18. svibanj 2018.].
- [2] <http://pogledaj.to/arhitektura/moze-li-zagrebacki-velesajam-postati-inovativno-srediste-novog-zagreba/>. [18. svibanj 2018.].
- [3] [http://www.oris.hr/hr/casopis/clanak/\[241\]precizno-materijalizirana-ideja,3938.html](http://www.oris.hr/hr/casopis/clanak/[241]precizno-materijalizirana-ideja,3938.html). [18. svibanj 2018.].
- [4] Kuzmić-Kalogjera, G., *Adaptacija objekta paviljon 28 na Zagrebačkom Velesajmu*, KLASA: UP/1-350-05/99-01/875, URBROJ: 251-05-41-99-6, lok. doz. br.: 637/99, Zagreb, 1999..
- [5] Hrvatski zavod za norme, *Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije -- Dio 1-1: Opća djelovanja -- Obujamske težine, vlastite težine i uporabna opterećenja zgrada (EN 1991-1-1:2002+AC:2009)*, HZN, Zagreb, 2012.
- [6] Hrvatski zavod za norme, *Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije -- Dio 1-1: Opća djelovanja -- Obujamske težine, vlastite težine i uporabna opterećenja za zgrade -- Nacionalni dodatak*, HZN, Zagreb, 2012.
- [7] Hrvatski zavod za norme, *Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije -- Dio 1-3: Opća djelovanja -- Opterećenja snijegom (EN 1991-1-3:2003+AC:2009)*, HZN, Zagreb, 2012.
- [8] Hrvatski zavod za norme, *Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije -- Dio 1-3: Opća djelovanja -- Opterećenja snijegom -- Nacionalni dodatak*, HZN, Zagreb, 2016.
- [9] Hrvatski zavod za norme, *Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije -- Dio 1-4: Opća djelovanja -- Djelovanja vjetra (EN 1991-1-4:2005+AC:2010+A1:2010)*, HZN, Zagreb, 2012.
- [10] Hrvatski zavod za norme, *Eurokod 3: Projektiranje čeličnih konstrukcija -- Dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade (EN 1993-1-1:2005+AC:2009)*, HZN, Zagreb, 2014.
- [11] Hrvatski zavod za norme, *Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija -- 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade (EN 1998-1:2004+AC:2009)*, HZN, Zagreb, 2011.

- [12] Hrvatski zavod za norme, *Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija -- 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade -- Nacionalni dodatak*, HZN, Zagreb, 2011.
- [13] Androić, B., Dujmović, D., Džeba, I., *Metalne konstrukcije 1*, Zagreb: Institut građevinarstva Hrvatske, 1994..
- [14] Androić, B., Dujmović, D., Džeba, I., *Čelične konstrukcije 1*, Zagreb: IA PROJEKTIRANJE, 2009..
- [15] Androić, B., Dujmović, D., Džeba, I., *Čelične konstrukcije 2*, Zagreb: IA PROJEKTIRANJE, 2007..
- [16] Dujmović, D., Androić, B., Džeba, I., *Modeliranje konstrukcija prema Eurocode 3*, Zagreb: IA PROJEKTIRANJE, 2004..
- [17] Hrvatski zavod za norme, *Metalni materijali -- Ispitivanje tvrdoće prema Leebu -- 1. dio: Metoda ispitivanja (ISO 16859-11:2015; EN ISO 16859-1:2015)*, HZN, Zagreb, 2015..
- [18] Hrvatski zavod za norme, *Metalni materijali -- Ispitivanje tvrdoće prema Leebu -- 2. dio: Provjeravanje i umjeravanje ispitnih uređaja (ISO 16859-2:2015; EN ISO 16859-22:2015)*, HZN, Zagreb, 2015..
- [19] Hrvatski zavod za norme, *Metalni materijali -- Ispitivanje tvrdoće prema Leebu -- 3. dio: Umjeravanje referentnih ispitnih pločica (ISO 16859-3:2015; EN ISO 16859-3:2015)*, HZN, Zagreb, 2015..
- [20] <https://www.ashtead-technology.com/rental-equipment/proceq-equotip-3-portable-hardness-tester/>. [23. lipanj 2018.].
- [21] Hrvatski zavod za norme, *Toplo valjani proizvodi od konstrukcijskih čelika -- 2. dio: Tehnički uvjeti isporuke za nelegirane konstrukcijske čelike (EN 10025-2:2005)*, HZN, Zagreb, 2007..
- [22] Hrvatski zavod za norme, *Nerazorno ispitivanje -- Mjerenje debljine ultrazvukom (EN 14127:2001)*, HZN, Zagreb, 2012..
- [23] Brincker, R., Zhang, L., Andersen, P., *Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition*, Smart Materials and Structures, svez. 10, br. 3, p. 441-449, 2001..

- [24] D. Damjanović, *Utjecaj temperature na dinamičke parametre građevinskih konstrukcija (doktorska disertacija)*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu (Mentor: Mladenko Rak), 2010..
- [25] <https://www.google.hr/maps/@45.7798391,15.9711921,101a,35y,358.83h,51.89t/data=!3m1!1e3?hl=en>. [19. svibanj 2018.].
- [26] Geofizički zavod PMF-a, *Karte potresnih područja Republike Hrvatske*, 2011. Dostupno na: <http://seizkarta.gfz.hr/karta.php>. [26 6 2018].
- [27] Hrvatski zavod za norme, *Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija - 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade*, HZN, Zagreb, 2011.
- [28] W. T. Koiter, *The Stability of Elastic Equilibrium (doktorska disertacija)*, Technische Hooge School Delft (Mentor: C. B. Biezeno), 1945.
- [29] Herlufsen, H., Andersen, P., Gade, S., Møller, N., *Identification Techniques for Operational Modal Analysis – An Overview and Practical Experiences*, Proceedings of the 1st International Operational Modal Analysis Conference, IOMAC 2005, Copenhagen, 2005..
- [30] Lamarche, C. P., Paultre, P., Proulx, J., Mousseau, S., *Assessment of the frequency domain decomposition technique by forced-vibration tests of a full-scale structure*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, svez. 37, br. 3, pp. 487-494, 2008..
- [31] Hrvatski zavod za norme, *Nerazorno ispitivanje -- Mjerenje debljine ultrazvukom (EN 14127:2001)*, HZN, Zagreb, 2012..
- [32] Hrvatski zavod za norme, *Toplo valjani proizvodi od konstrukcijskih čelika -- 2. dio: Tehnički uvjeti isporuke za nelegirane konstrukcijske čelike (EN 10025-2:2005)*, HZN, Zagreb, 2007..

POPIS TABLICA

Tablica 1. Mehaničke karakteristike čeličnih elemenata pri ambijentalnoj temperaturi. ...	10
Tablica 2. Profili međukatne konstrukcije.....	31
Tablica 3. Elementi krovišta.....	38
Tablica 4. Ispitivanje tvrdoće prema Leebu.	39
Tablica 5. Procjena vlačne čvrstoće elemenata.	40
Tablica 6. Izmjerene vrijednosti debljine stjenke S3.....	40
Tablica 7. Obrada rezultata debljine stjenke S3.....	41
Tablica 8. Izmjerene vrijednosti debljine stjenke S8.....	41
Tablica 9. Obrada rezultata debljine stjenke S8.....	41
Tablica 10. Izmjerene vrijednosti debljine stjenke S13.....	42
Tablica 11. Obrada rezultata debljine stjenke S13.....	42
Tablica 12. Izmjerene vrijednosti debljine stjenke <i>Stubište sjever</i>	42
Tablica 13. Kategorizacija čelika u odnosu na vlačnu čvrstoću i debljinu stjenke.	43
Tablica 14. Eksperimentalno određene vlastite frekvencije objekta.	44
Tablica 15. Karakteristike materijala.....	49
Tablica 16. Usporedba dinamičkih parametara numeričkog modela i mjerenja.	59
Tablica 17. Usporedba dinamičkih parametara analiziranih numeričkih modela.	67
Tablica 18. Kombinacije za granično stanje nosivosti.	80
Tablica 19. Kombinacije za granično stanje uporabivosti.....	81
Tablica 20. Potresne kombinacije.....	82
Tablica 21. Geometrijske karakteristike profila HE400M.	83
Tablica 22. Tablični prikaz kriterija nosivosti grede D1014.....	89
Tablica 23. Geometrijske karakteristike profila IPN340.....	89
Tablica 24. Tablični prikaz kriterija nosivosti grede D14.....	98
Tablica 25. Geometrijske karakteristike profila IPN400.....	98
Tablica 26. Tablični prikaz kriterija nosivosti grede C710.....	102
Tablica 27. Tablični prikaz kriterija nosivosti stupa S20.....	106
Tablica 28. Tablični prikaz kriterija nosivosti stupa S8.....	111
Tablica 29. Kontrola bočnog pomaka okvira od djelovanja vjetra.....	113
Tablica 30. Kontrola bočnog pomaka okvira od djelovanja potresa.....	115
Tablica 31. Geometrijske karakteristike profila IPN240.....	116
Tablica 32. Tablični prikaz kriterija nosivosti grede DE8 za GSN6.....	117

POPIS SLIKA

Slika 1. Paviljon Đuro Đaković izvedeno stanje – pogled s istoka. [1].....	4
Slika 2. Paviljon Đuro Đaković izvedeno stanje – pogled iznutra. [2].....	5
Slika 3. Pogled na paviljon iz smjera jugoistok.	6
Slika 4. Zatečeno stanje – pogled iznutra. [3].....	6
Slika 5. Primjer nacрта iz Državnog arhiva.	7
Slika 6. Jedan od nacрта postojećeg stanja. [4]	8
Slika 7. Uređaj za ispitivanje tvrdoće prema Leebu. [12].....	10
Slika 8. Određivanje debljine stjenke prvim načinom po normi [14].	11
Slika 9. Određivanje debljine stjenke drugim načinom po normi [14].	11
Slika 10. Određivanje debljine stjenke trećim načinom po normi [14].	12
Slika 11. Određivanje debljine stjenke četvrtim načinom po normi [14].	12
Slika 12. Ispitivanje debljine stjenke. [14].....	12
Slika 13. Uređaj za ispitivanje debljine stjenke ultrazvučnom metodom.	13
Slika 14. Određivanje vrhova funkcije spektralne gustoće.	16
Slika 15. Sustav za prikupljanje i analizu podataka <i>Pulse Analyzer 3560C</i>	17
Slika 16. Akcelerometri <i>PCB 393B31</i> i <i>B&K 8340</i> korišteni u istražnim radovima.	17
Slika 17. Situacija (1).	18
Slika 18. Situacija (2).	19
Slika 19. Situacija (3).	19
Slika 20. 3D pogled na konstrukciju. [17]	20
Slika 21. Shematski prikaz glavne rasponske konstrukcije.	20
Slika 22. Fotografija zglobnog ležaja nosača.	21
Slika 23. Pogled na aneks sa stubištem.	21
Slika 24. Vertikalni uzdužni spreg.	22
Slika 25. Horizontalni poprečni spreg u razini međukatne konstrukcije.	22
Slika 26. Odstupanje od projektirane geometrije.	25
Slika 27. Elementi međukatne konstrukcije koji nedostaju.	26
Slika 28. Shematski prikaz elemenata međukatne konstrukcije.	26
Slika 29. Mjerna mjesta na južnom pročelju.	28
Slika 30. Raspored mjernih mjesta interijer prizemlje.	28
Slika 31. Raspored mjernih mjesta interijer međukatna konstrukcija.	29
Slika 32. Primjer mjernog mjesta S8.	30
Slika 33. Shematski prikaz elemenata međukatne konstrukcije.	31
Slika 34. Shematski prikaz poprečnih presjeka elemenata vertikalnog sprega.	32
Slika 35. Pogled na fasadni element oslonjen na međukatnu konstrukciju.	32
Slika 36. Pogled na unutarnje stubište.	33
Slika 37. Pogled na vanjsko stubište.	33
Slika 38. Pogled na paviljon s označenim mjestima vizualnog pregleda krova.	34
Slika 39. Detalj spoja dvije grede trozglobnog nosača.	34
Slika 40. Detalj spoja stup – greda.	35

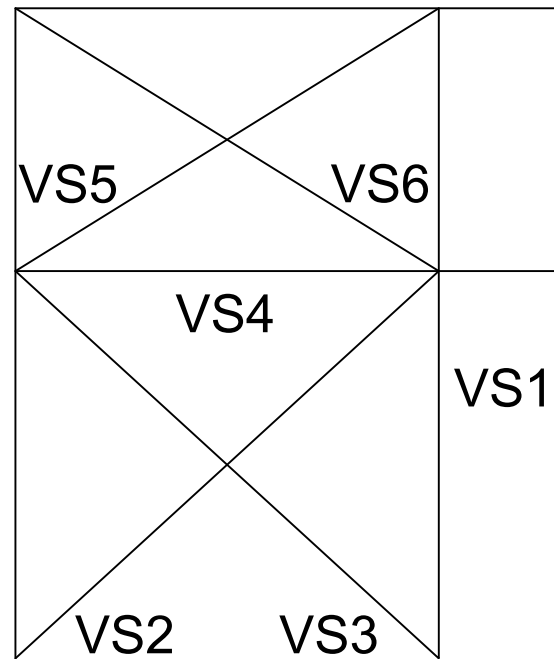
Slika 41. Poprečni presjek krovne konstrukcije.....	36
Slika 42. Detalj spoja sprega u sredini polja i skica poprečnog presjeka sprega.....	36
Slika 43. Shema elemenata krovišta.....	37
Slika 44. Ispitivanje dinamičkih parametara konstrukcije.....	38
Slika 45. Akcelerometri na visini 5 m.....	39
Slika 46. Prikaz mjernih mjesta operacijske modalne analize s prikazanom nomenklaturom ispitanih stupova u skladu s priložima 1 i 2.....	44
Slika 47. Zapis singularne dekompozicije funkcije odgovora konstrukcije.....	44
Slika 48. Prvi oblik osciliranja konstrukcije $f = 2,56 \text{ Hz}$	45
Slika 49. Drugi oblik osciliranja konstrukcije $f = 3,38 \text{ Hz}$	45
Slika 50. Treći oblik osciliranja konstrukcije $f = 6,00 \text{ Hz}$	46
Slika 51. Pogled na numerički model građevine s istoka.....	47
Slika 52. Pogled na numerički model građevine s juga.....	48
Slika 53. Perspektivni prikaz numeričkog modela građevine.....	48
Slika 54. Poprečni presjek IPN400.....	49
Slika 55. Poprečni presjek IPN340.....	50
Slika 56. Poprečni presjek IPN300.....	50
Slika 57. Poprečni presjek IPN240.....	50
Slika 58. Poprečni presjek IPN200.....	51
Slika 59. Poprečni presjek IPN180.....	51
Slika 60. Poprečni presjek pendl stupa.....	51
Slika 61. Poprečni presjek H400M.....	52
Slika 62. Poprečni presjek HPS-a u međukatnoj konstrukciji (L60x6).....	52
Slika 63. Poprečni presjek HPS-a u krovu (2L70x7/10).....	52
Slika 64. Poprečni presjek VPS-a (2L60x6/8).....	53
Slika 65. Poprečni presjek stupa VPS-a (2UPN100/8).....	53
Slika 66. Poprečni presjek grede na stupom trozglobnog nosača.....	53
Slika 67. Poprečni presjek grede na konzolnom kraju.....	54
Slika 68. Greda na spoju poluokvira.....	54
Slika 69. Poprečni presjek stupa terase pri dnu.....	54
Slika 70. Poprečni presjek stupa terase pri vrhu.....	55
Slika 71. Poprečni presjek stupa trozglobnog nosača pri dnu.....	55
Slika 72. Poprečni presjek stupa trozglobnog nosača u razini međukatne konstrukcije.....	55
Slika 73. Poprečni presjek stupa trozglobnog nosača pri vrhu.....	56
Slika 74. Poprečni presjek krovne plohe.....	56
Slika 75. Primjer korištenih rubnih uvjeta.....	56
Slika 76. Numerički model zatečenog stanja s i bez modeliranog utjecaja fasade.....	57
Slika 77. Shematski prikaz linkova.....	57
Slika 78. Karakteristike opruge LIN1.....	58
Slika 79. Karakteristike opruge LIN2.....	58
Slika 80. Karakteristike opruge LIN3.....	58
Slika 81. Dinamički stupnjevi slobode promatrane građevine.....	59

Slika 82. Prvi oblik titranja modela bez utjecaja fasade (1,258 Hz).....	60
Slika 83. Drugi oblik titranja modela bez utjecaja fasade (2,006 Hz).....	60
Slika 84. Treći oblik titranja modela bez utjecaja fasade (2,203 Hz).....	61
Slika 85. Prvi oblik titranja modela s utjecajem fasade (2,557 Hz).....	61
Slika 86. Drugi oblik titranja modela s utjecajem fasade (3,389 Hz).....	62
Slika 87. Treći oblik titranja modela s utjecajem fasade (3,865 Hz).....	62
Slika 88. Prikaz karakterističnog detalja često ponavljano na konstrukciji (a) i njegova idealizacija (b) u skladu s projektantskom praksom prema [6].	63
Slika 89. IPN 400. Pod a) je prikaz geometrije modela, a pod b) raspodjela normalnih naprezanja za opterećenje vlastitom težinom.	64
Slika 90. Usporedba progiba od stalnog opterećenja IPN400 grede spojene kao na građevini i štapnog modela s oprugom.	64
Slika 91. Usporedba progiba od opterećenja 1000 kN u sredini raspona IPN400 grede spojene kao na građevini i štapnog modela s oprugom.	65
Slika 92. Prvi oblik titranja grede (štapno gore – $f = 32,45$ Hz, plošno dolje – $35,11$ Hz). 65	
Slika 93. Opruga vijčanog spoja.	66
Slika 94. Raspored zglobova u međukatnoj konstrukciji.....	66
Slika 95. Primjer elementa sa zadanom oprugom.....	66
Slika 96. Shematski prikaz uporabnog opterećenja.	70
Slika 97. Shematski prikaz nesimetričnog uporabnog opterećenja (opis u fusnoti 4).	70
Slika 98. Plohe na koje je promatrano djelovanje vjetra.....	71
Slika 99. Shema za određivanje opterećenja u krovu.	73
Slika 100. Shema za određivanje opterećenja u ravnini međukatne konstrukcije (stalno i snijeg).	74
Slika 101. Shema za određivanje opterećenja u ravnini međukatne konstrukcije (uporabno simetrično opterećenje).....	75
Slika 102. Shema za određivanje opterećenja u ravnini međukatne konstrukcije (uporabno nesimetrično opterećenje).....	76
Slika 103. Shema za određivanje opterećenja vjetrom.	77
Slika 104. Horizontalno vršno ubrzanje tla [18].	77
Slika 105. Elastični spektar odgovora.	78
Slika 106. Potresno opterećenje za granično stanje uporabivosti.	78
Slika 107. Proračunski spektar odgovora.	79
Slika 108. Potresno opterećenje za granično stanje nosivosti.....	79
Slika 109. Shematski prikaz odabranih elemenata za provjeru.	82
Slika 110. Unutarnje sile grede D1014 za model s popustljivim vezama.....	85
Slika 111. Unutarnje sile grede D1014 za model s djelomično popustljivim vezama.....	86
Slika 112. Unutarnje sile grede D1014 za model s nepopustljivim vezama.	87
Slika 113. Progib grede D1014 za model s popustljivim vezama.	88
Slika 114. Progib grede D1014 za model s djelomično popustljivim vezama.	88
Slika 115. Progib grede D1014 za model s nepopustljivim vezama.....	88
Slika 116. Unutarnje sile grede D14 za model s popustljivim vezama.....	90

Slika 117. Ojačanje grede D14 na spoju međukatne konstrukcije i trozglobnog nosača. ..	92
Slika 118. Unutarnje sile grede D14 za model s djelomično popustljivim vezama.....	93
Slika 119. Unutarnje sile grede D14 za model s nepopustljivim vezama.	96
Slika 120. Unutarnje sile grede C710 za model s popustljivim vezama.	99
Slika 121. Unutarnje sile grede C710 za model s djelomično popustljivim vezama.	100
Slika 122. Unutarnje sile grede C710 za model s nepopustljivim vezama.	100
Slika 123. Progib grede C710 za model s popustljivim vezama.	101
Slika 124. Progib grede C710 za model s djelomično popustljivim vezama.	101
Slika 125. Progib grede C710 za model s nepopustljivim vezama.	102
Slika 126. Sila u stupu S20 za model s popustljivim spojevima.....	104
Slika 127. Sila u stupu S20 za model s djelomično popustljivim spojevima.....	105
Slika 128. Sila u stupu S20 za model s nepopustljivim spojevima.	105
Slika 129. Geometrija i jedinična sila nelinearnog modela za analizu stabilnosti trozglobnog nosača.	106
Slika 130. Postavke nelinearnog proračuna (1).....	107
Slika 131. Postavke nelinearnog proračuna (2).....	107
Slika 132. Postavke nelinearnog proračuna (3).....	107
Slika 133. Sila u stupu S8 za model a.	110
Slika 134. Sila u stupu S8 za model b.	110
Slika 135. Sila u stupu S8 za model c.	111
Slika 136. Bočni pomak okvira modela a za mjerodavni slučaj GSU3.	112
Slika 137. Bočni pomak okvira modela b za mjerodavni slučaj GSU3.	112
Slika 138. Bočni pomak okvira modela c za mjerodavni slučaj GSU3.	113
Slika 139. Bočni pomak okvira modela a od kombinacije POTRES GSU.....	114
Slika 140. Bočni pomak okvira modela b od kombinacije POTRES GSU.	114
Slika 141. Bočni pomak okvira modela c od kombinacije POTRES GSU.....	114
Slika 142. Unutarnje sile grede trozglobnog nosača za sva tri modela za GSN3.	115
Slika 143. Moment u gredi DE8 za model a i GSN6.	117
Slika 144. Moment u gredi DE8 za model b i GSN6.....	117
Slika 145. Moment u gredi DE8 za model c i GSN6.	117
Slika 146. Prikaz konstrukcije s naznačenim novim položajem stupova S15 i S20.	119
Slika 147. Primjer ojačanja smjera sjever – jug.....	120
Slika 148. Maksimalan pomak na terasi za prijedlog sanacije.....	120
Slika 149. Maksimalan pomak na terasi za projektirano stanje.	121
Slika 150. Bočni pomak projektirane konstrukcije za mjerodavno opterećenje.	121
Slika 151. Najveći bočni pomak sanirane konstrukcije za mjerodavno opterećenje.	121

PRILOZI

S1



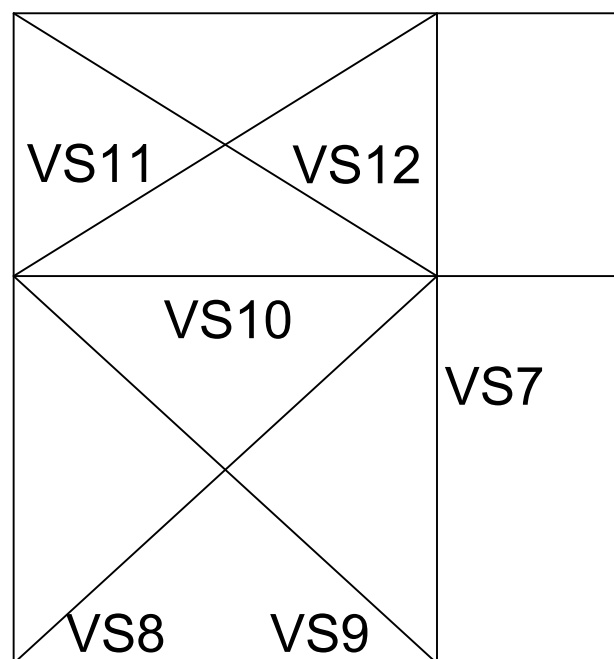
S2

S3

S4

S5

S6

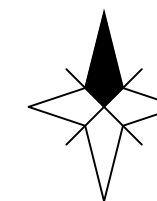


S7

S8

S9

S10



S16

S17

S18

S19

S20



S11

S12

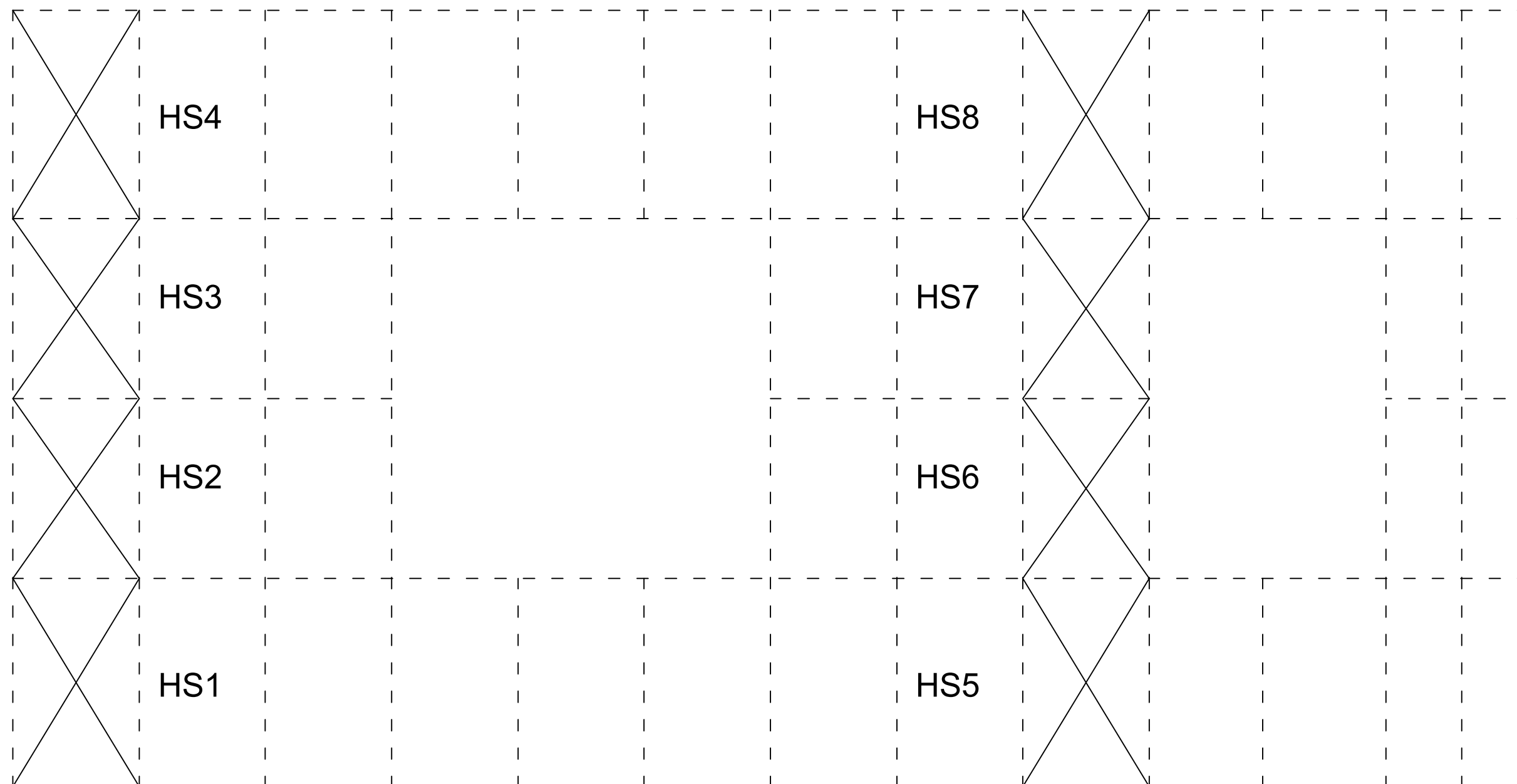
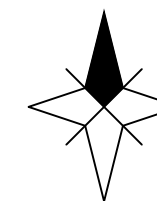
S13

S14

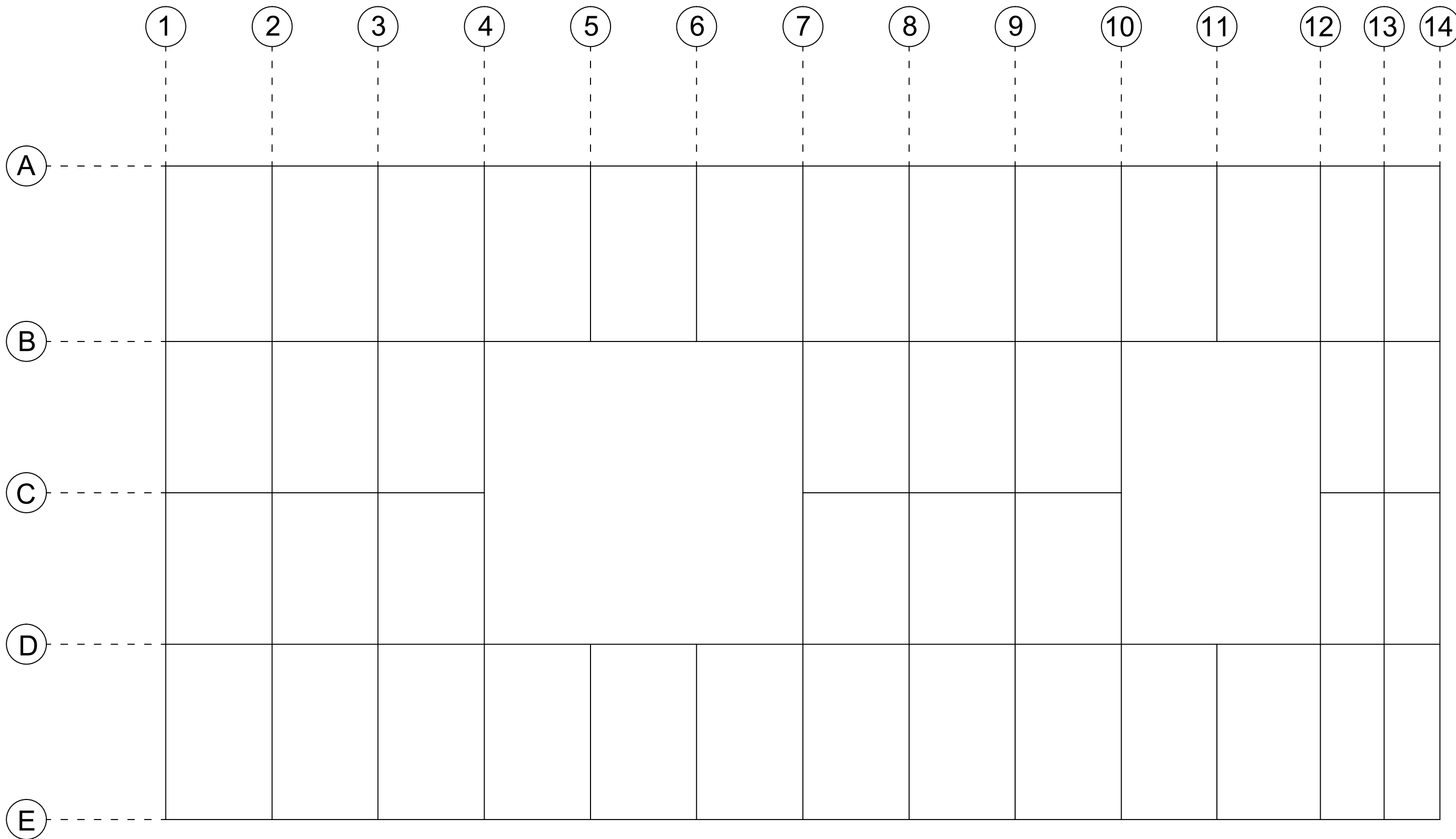
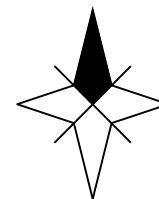
S15



PODLOGA ZA MJERENJE - NOMENKLATURA CENTRALNO ORJENTIRANIH PENDL STUPOVA		
OZNAKA PRILOGA	3	MJERILO : 1:100
INVESTITOR	ZAGREBAČKI VELESAJAM	
RAZINA PROJEKTA	IDEJNO RJEŠENJE	
PROJEKTANT	SANJIN GUMBAREVIĆ	

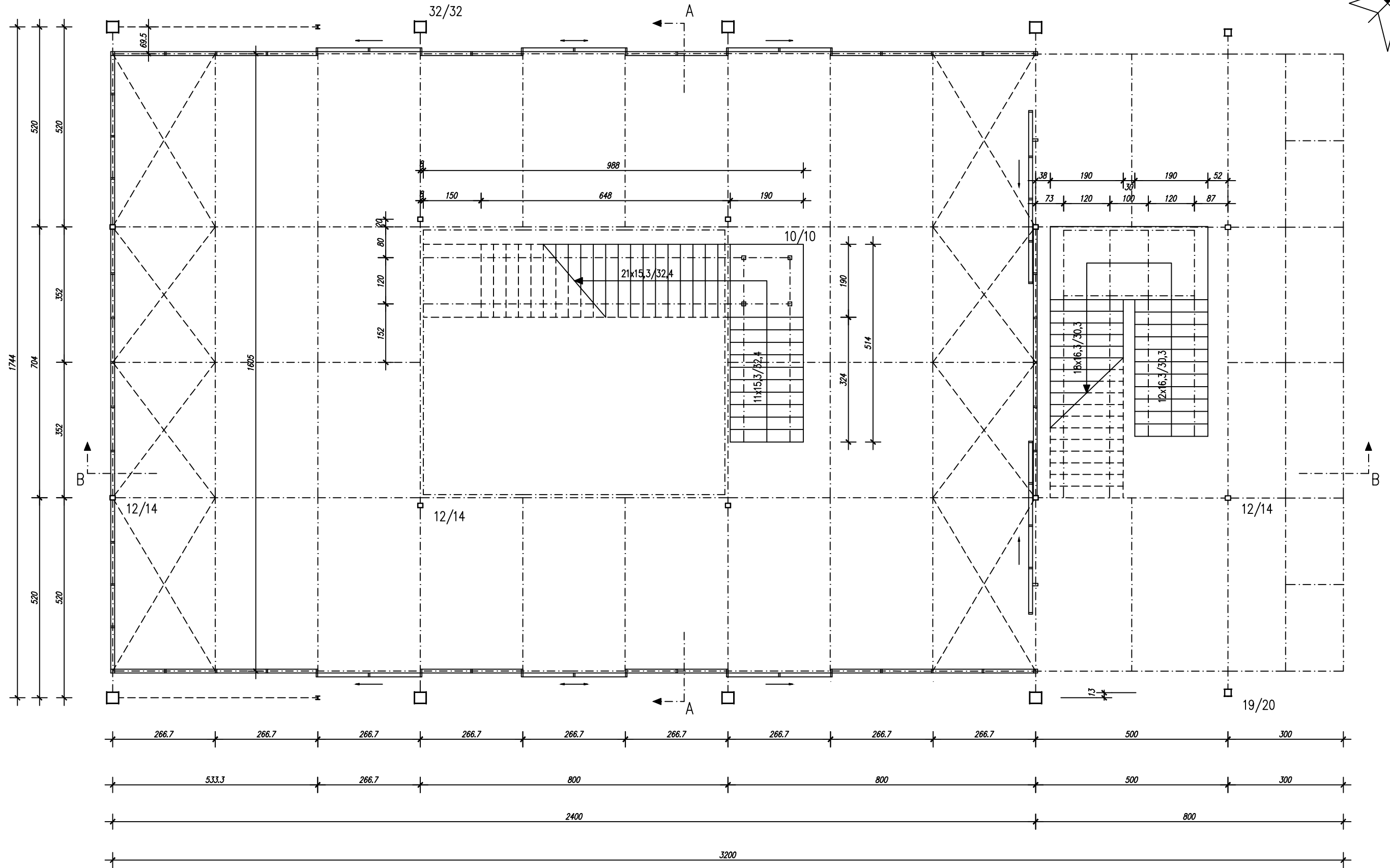
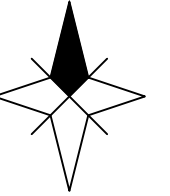


PODLOGA ZA MJERENJE - NOMENKLATURA HORIZONTALNIH SPREGOVA MEĐUKATNE KONSTRUKCIJE		
OZNAKA PRILOGA	4	MJERILO : 1:100
INVESTITOR	ZAGREBAČKI VELESAJAM	
RAZINA PROJEKTA	IDEJNO RJEŠENJE	
PROJEKTANT	SANJIN GUMBAREVIĆ	

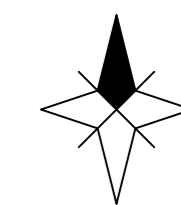
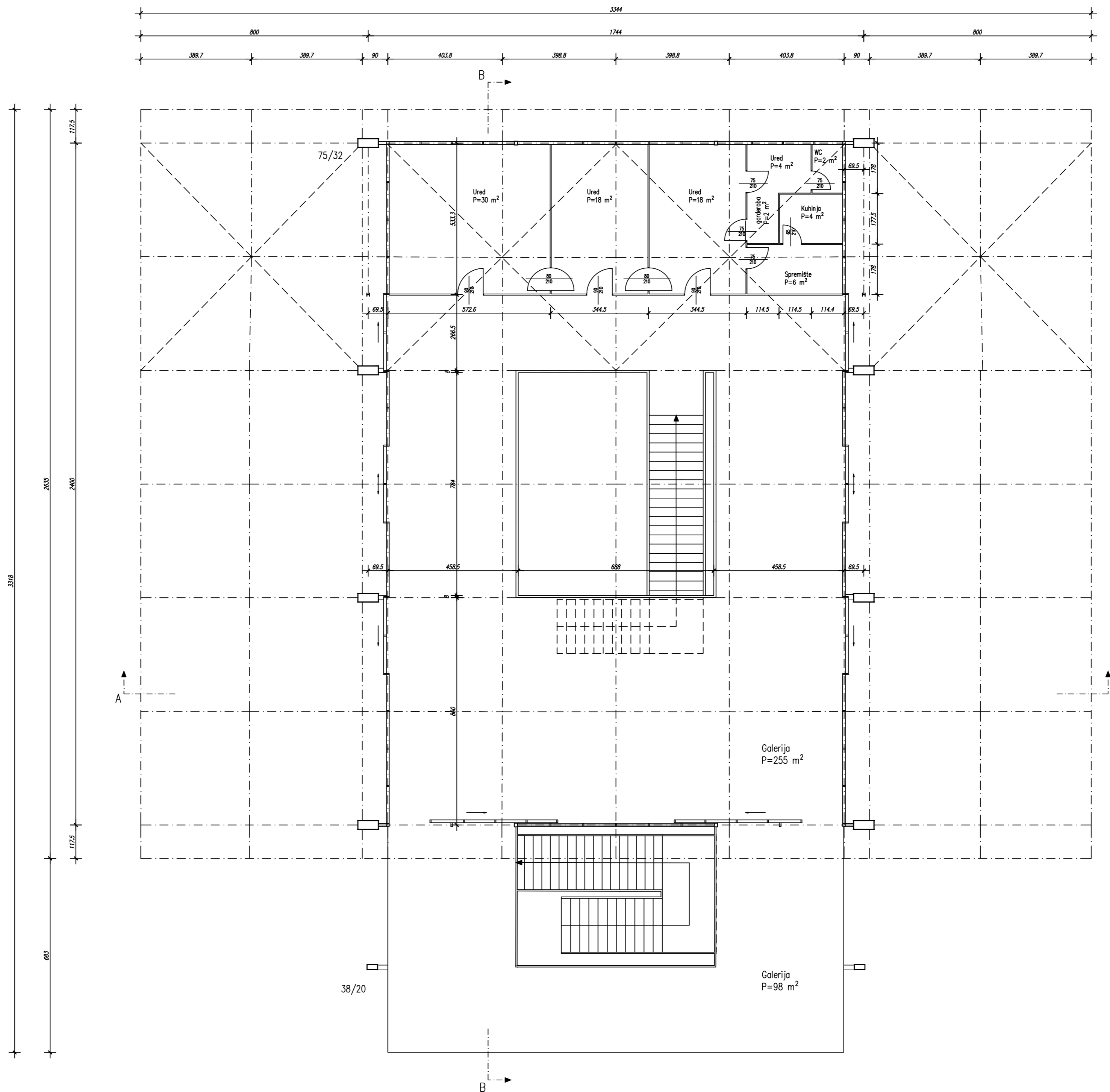


PODLOGA ZA MJERENJE - OSI MEĐUKATNE KONSTRUKCIJE
KORIŠTENE ZA NOMENKLATURU ELEMENATA

OZNAKA PRILOGA	5	MJERILO : 1:100
INVESTITOR	ZAGREBAČKI VELESAJAM	
RAZINA PROJEKTA	IDEJNO RJEŠENJE	
PROJEKTANT	SANJIN GUMBAREVIĆ	

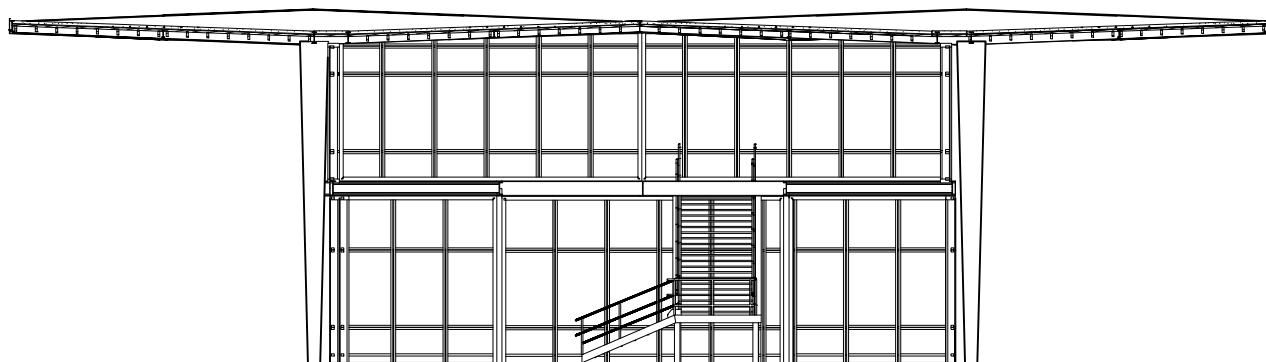


TLOCRT PRIZEMLJA GRAĐEVINE (PROJEKTIRANO I ZATEČENO STANJE)		
OZNAKA PRILOGA	6	MJERILO : 1:100
INVESTITOR	ZAGREBAČKI VELESAJAM	
RAZINA PROJEKTA	IDEJNO RJEŠENJE	
PROJEKTANT	SANJIN GUMBAREVIĆ	

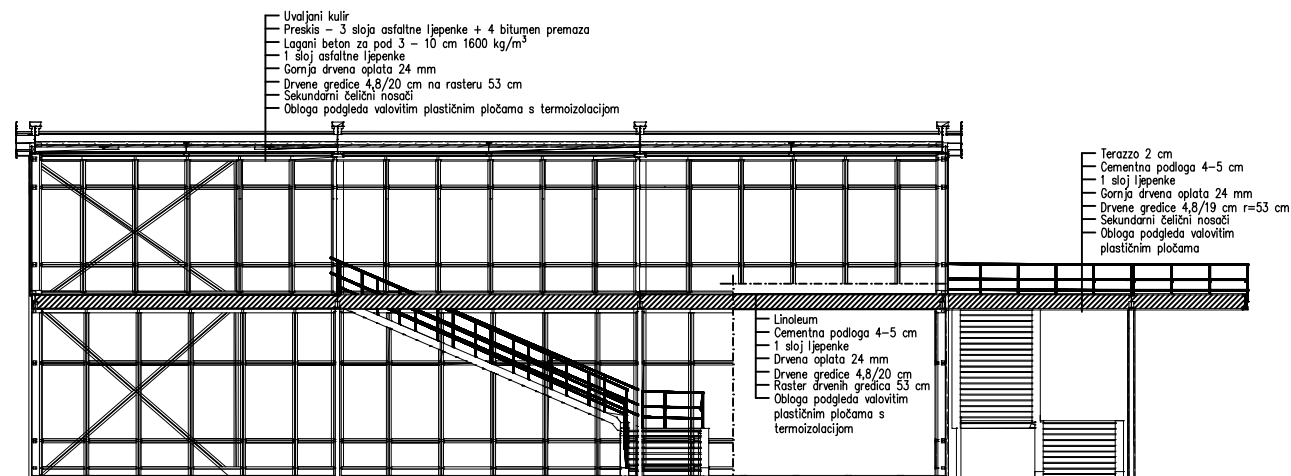


TLOCRT KATA GRAĐEVINE (PROJEKTIRANO STANJE)		
OZNAKA PRILOGA	7	MJERILO : 1:100
INVESTITOR	ZAGREBAČKI VELESAJAM	
RAZINA PROJEKTA	IDEJNO RJEŠENJE	
PROJEKTANT	SANJIN GUMBAREVIĆ	

Presjek A-A



Presjek B-B

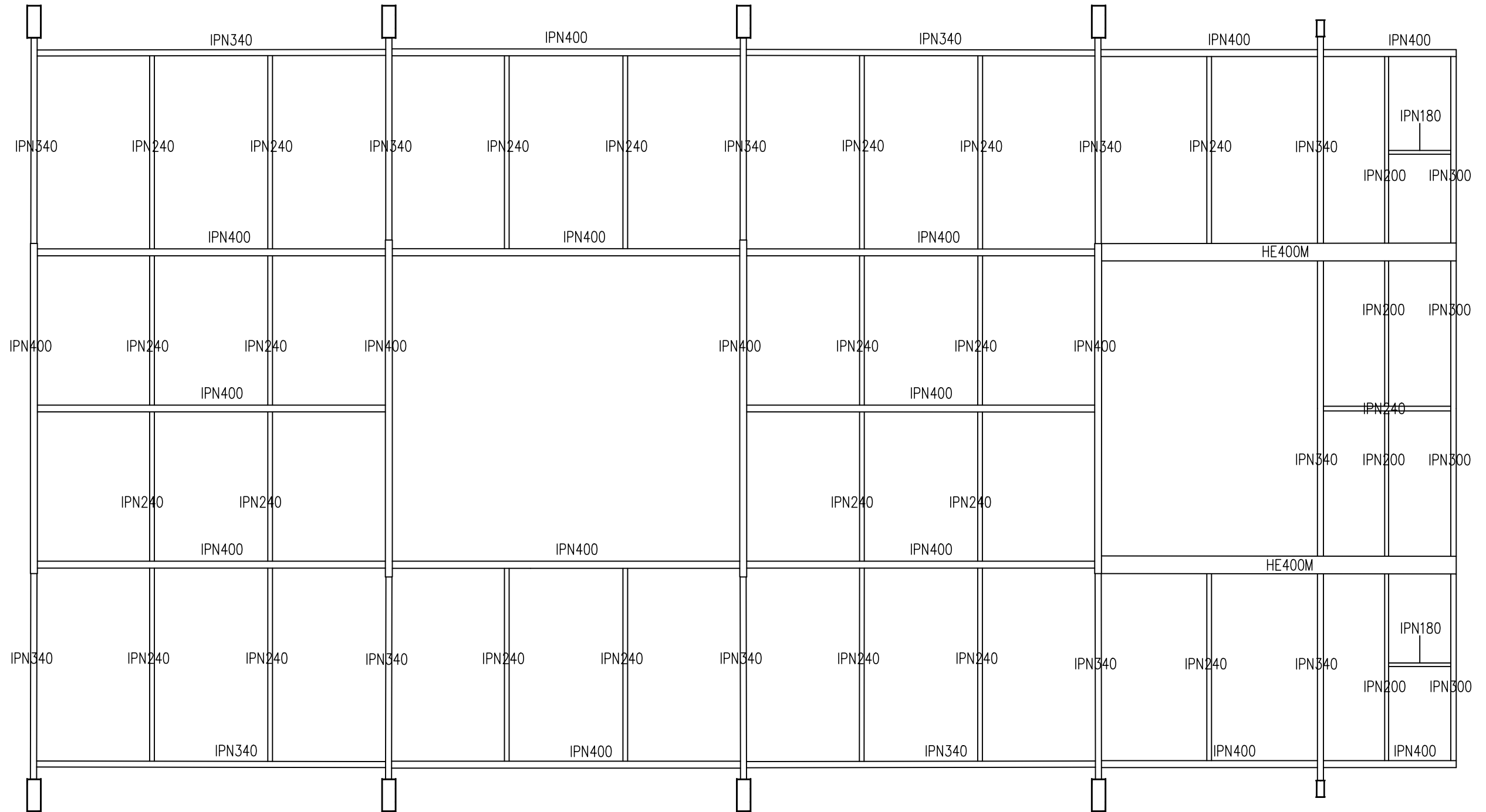
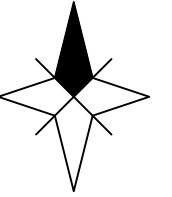


PRESJECI (PROJEKTIRANO STANJE) S PRIKAZANIM SLOJEVIMA

OZNAKA PRILOGA	8	MJERILO : 1:200
INVESTITOR	ZAGREBAČKI VELESAJAM	
RAZINA PROJEKTA	IDEJNO RJEŠENJE	
PROJEKTANT	SANJIN GUMBAREVIĆ	



GRAĐEVINSKI FAKULTET
 SVEUČILIŠTA U ZAGREBU



SHEMATSKI PRIKAZ PROFILA MEĐUKATNE KONSTRUKCIJE (PROJEKTIRANO STANJE)		
OZNAKA PRILOGA	10	MJERILO : 1:100
INVESTITOR	ZAGREBAČKI VELESAJAM	
RAZINA PROJEKTA	IDEJNO RJEŠENJE	
PROJEKTANT	SANJIN GUMBAREVIĆ	