

IZRAČUN NIHAJNIH ČASOV RAZLIČNIH SISTEMOV VEČETAŽNIH LESENIH ZGRADB

VIBRATION PERIODS OF VARIOUS TYPES OF MULTI-STOREY TIMBER STRUCTURES

Katja Pintarič, univ. dipl. inž. grad.
prof. dr. Miroslav Premrov, univ. dipl. inž. grad.
asist. Matjaž Tajnik, univ. dipl. inž. grad.

Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo,
 Smetanova 17, 2000 Maribor

Znanstveni članek

UDK: 624.011.1

Povzetek | Članek obravnava analizo nihajnih časov različnih sistemov 3-etažne lesene zgradbe, in sicer skeletni sistem, montažni okvirni sistem z obložnimi ploščami in masivni sistem s križno lepljenimi lesenimi paneli. Analizirani so nihajni časi, ki jih lahko določimo s približnimi enačbami v skladu s standardi ali z natančnejšimi metodami, ki temeljijo na metodah iz dinamike konstrukcij. Izvedene so primerjave nihajnih časov tako med posameznimi sistemi kot tudi med različnimi metodami analize.

Summary | This paper deals with the analysis of vibration periods of various types of 3-storey timber structure such as a "Post and Beam" system, a timber-framed system and a cross-laminated panel system. Vibration periods, which can be calculated with approximate equations in accordance with standards or with more accurate methods based on structural dynamics, are analysed. The comparisons between different structural systems and different methods are then performed.

1 • UVOD

Izmed vseh naravnih katastrof na Zemlji velja potres za eno izmed najbolj uničujočih in nepredvidljivih dejavnikov. Močan potres ne povzroči le velike materialne škode, ampak vodi tudi do izgube življenj ter povzroči tako fizične kot psihične travme. Izkušnje iz potresov v preteklih letih po svetu so pokazale, da se lesene konstrukcije dobro obnašajo na potresnih območjih in da prenesejo močan potres z minimalno škodo na sami zgradbi. Njihova prednost se kaže predvsem v majhni lastni teži in duktilnih spojih. Prav tako so bile lesene konstrukcije v preteklosti, predvsem zaradi

požarnih razlogov, omejene z etažno višino. Z razvojem novejših dognanj in primernejših oprijemov pri projektiranju in izvedbi pa doživlja les svoj preporod v gradbeništvu tudi na področju večetažne gradnje. Za izračun potresnih obremenitev je določitev lastnih nihajnih časov konstrukcije eden izmed bistvenih potrebnih podatkov. Veliko predpisov omogoča določitev nadomestne potresne sile zgolj na podlagi poznavanja nihajnega časa, med drugim tudi SIST EN 1998-1:2005, ki se uporablja v Sloveniji. V praksi zato obstajajo trije izrazi, s katerimi se lahko približno oceni

vrednost nihajnega časa konstrukcije. Ni pa nujno, da ti izrazi dovolj natančno opišejo obnašanje konstrukcije. Eden izmed dovolj natančnih postopkov je analiza konstrukcije po znanih metodah iz dinamike konstrukcij. Največkrat zahteva uporabo programske opreme in je v primerjavi z uporabo približnih enačb dolg in zamuden. Zato se še toliko bolj pokaže potreba po uporabi krajših postopkov, ki bi dovolj natančno opisali obnašanje konstrukcije, hkrati pa bi zmanjšali računski napor, potreben za izračun. Postopki so primerni za potresno pravilno zasnovane objekte v skladu z zahtevami s SIST EN 1998-1:2005. Članek je nastal na podlagi diplomskega dela na Fakulteti za gradbeništvo Univerze v Mariboru (Pintarič, 2010).

2 • OBRAVNAVANI SISTEMI GRADNJE

Analizo in primerjavo bomo izvedli za tri najpogostejše sisteme gradnje na področju lesenih konstrukcij:

- skeletni sistem,
- montažni okvirni sistem z obložnimi ploščami,
- masivni sistem s križno lepljenimi lesenimi paneli – sistem XL.

V analizi smo zaradi boljše primerljivosti rezultatov za vse obravnavane sisteme ohranili enake tlorske dimenzije, etažno višino, število etaž ter razporeditev sten. 3-etažna konstrukcija je tlorskih dimenzij 10,00 m x 12,50 m ter skupne višine 7,65 m.

2.1 Skeletni sistem

Nosilna konstrukcija je sestavljena iz stebrov dimenzij 40/40 cm in nosilcev dimenzij 30/40 cm, kakovost lesa GL28h. Za stikovanje se uporabijo vijaki M20. Dodatno horizontalno stabilnost sistema se zagotovi z jeklenimi diagonalami $d = 2,5$ cm (slika 2.2).

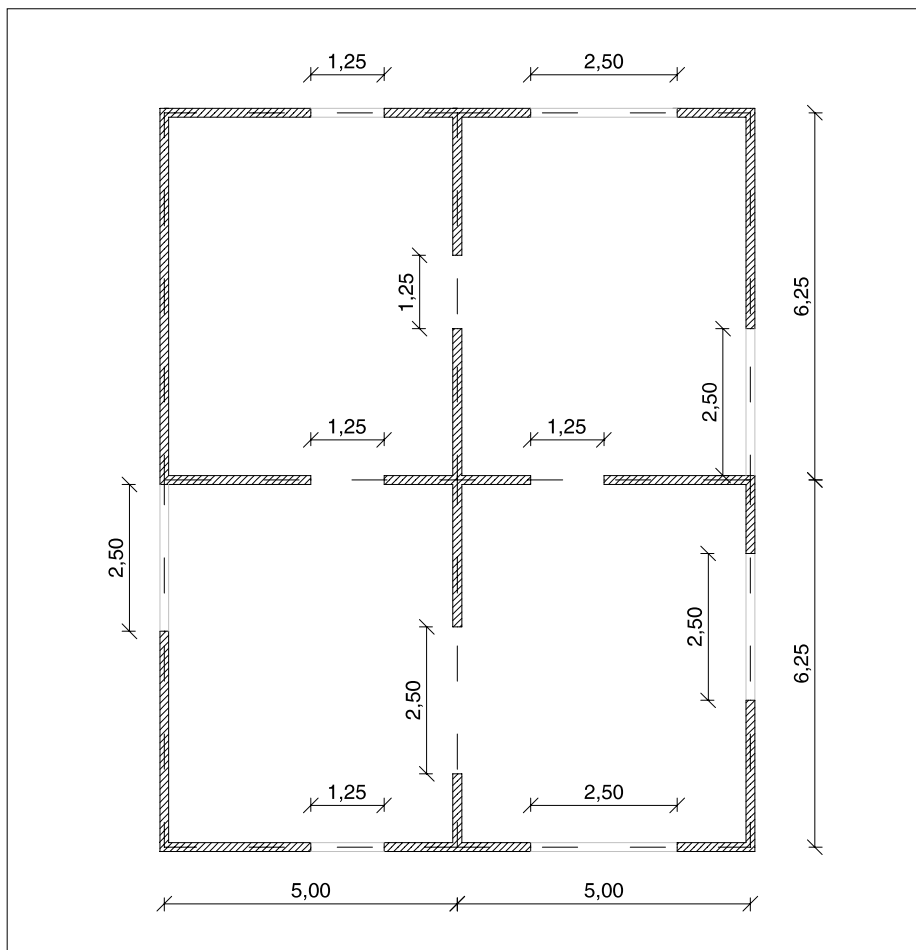
V praksi bi se takega sistema zavetrovanja posluževali pri notranjih okvirjih konstrukcije. V našem primeru smo namerno privzeli enostavno simetrično zavetrovanje skeletnega sistema zaradi primernejših oz. objektivnejših primerjav med enostavnimi simetričnimi večetažnimi sistemi – saj bi s spremembo zavetrovanja v tem primeru ustvarili neprimerno večjo nesimetrijo kot pri drugih primerjalnih konstrukcijskih sistemih.

2.2 Montažni okvirni sistem z obložnimi ploščami

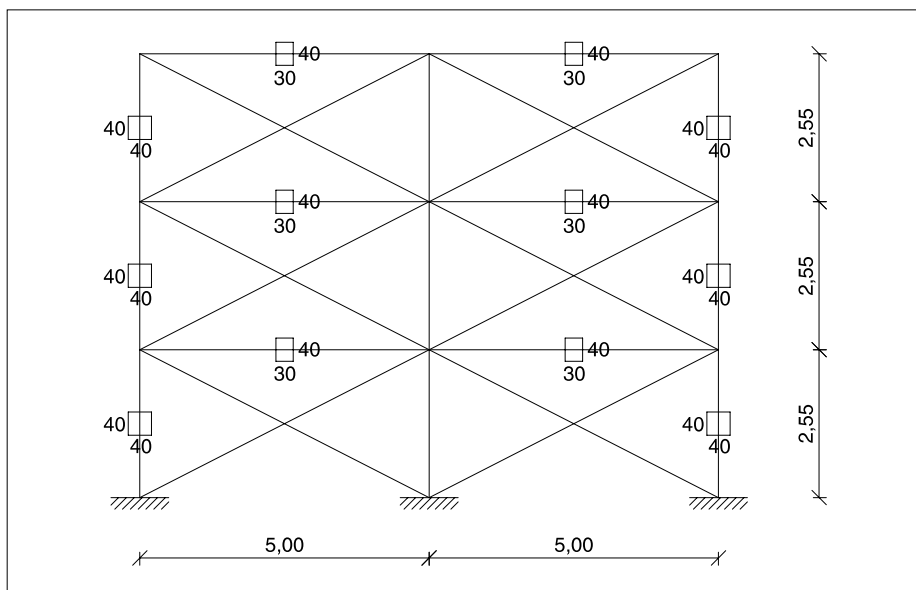
Uporabljeni so tipski paneli širine 125 cm in višine 255 cm (slika 2.3). Obložne plošče so na leseni okvir pritrjene s sponkami KG 750 na konstantni razdalji 7,5 cm. Za lesene pokončnike in prečke je uporabljen les kakovosti C22.

Za obložne plošče smo v obravnavani analizi uporabili naslednje:

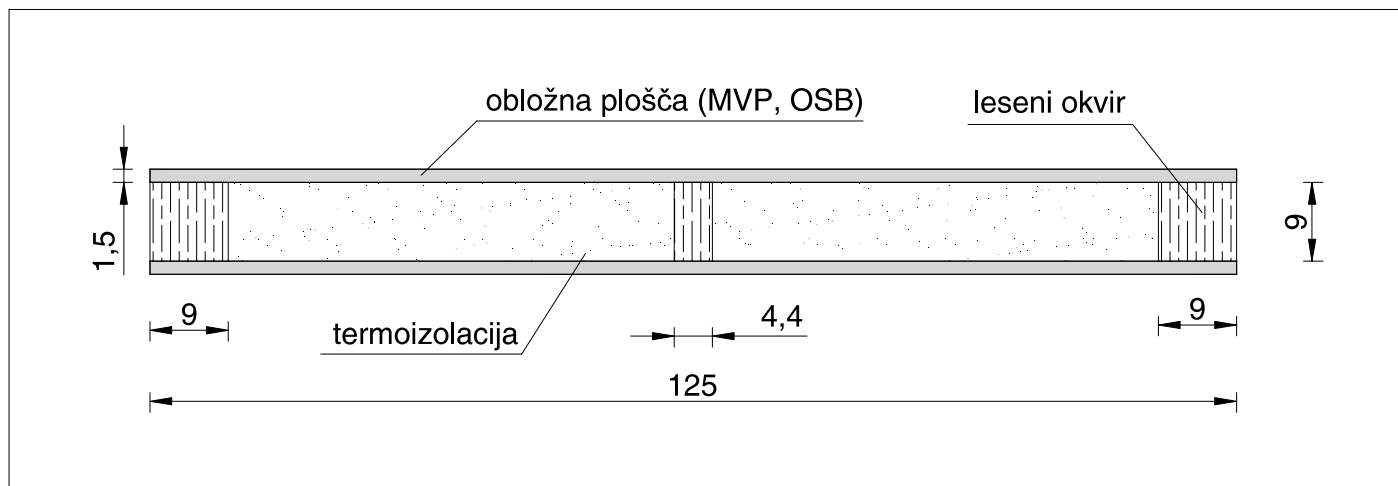
- mavčno-vlaknaste plošče – MVP,
- plošče OSB.



Slika 2.1 • Tloris tipične etaže



Slika 2.2 • Načrt tipičnega okvirja



Slika 2.3 • Prikaz sestave panela

2.3 Križno lepljeni lamelni sistem

Križno lepljeni les sestavljajo križno zložene lesene lamele oziroma deske, ki so pod visokim pritiskom ploskovno zlepljene v večji masivni element (slika 2.4). Plošče so izdelane v lihem številu slojev – 3, 5, 7 ali več, do maksimalne debeline 50 cm. Paneli so sposobni prenašati obtežbo v obeh smereh, zato so uporabni tako za stenske kot tudi stropne elemente. Za analizo je uporabljen 3-slojni panel XL debeline 94 mm, kakovost lesa C24 po ETA-06/0138.

Materialne karakteristike posameznega sloja:

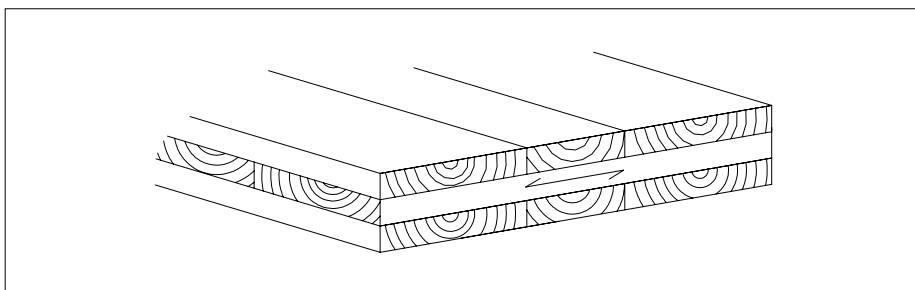
Elastični modul: $E_{0,mean} = 12000 \text{ MPa}$

$E_{90,mean} = 370 \text{ MPa}$

Strižni modul: $G_{mean} = 690 \text{ MPa}$

	$E_{0,mean}$ (N/mm ²)	G_{mean} (N/mm ²)	$f_{m,k}$ (N/mm ²)	$f_{t,0,k}$ (N/mm ²)	$f_{c,0,k}$ (N/mm ²)	$f_{v,k}$ (N/mm ²)	ρ_m (kg/m ³)
Les C22	10000	630	22	13	20	2,4	410
MVP	3000	1200	/	2,5	20	5,0	1050
OSB 3	3500	240	20	20	20	/	600

Preglednica 2.1 • Fizikalne lastnosti uporabljenih materialov



Slika 2.4 • Skica 3-slojnega panela XL debeline 94 mm

3 • DOLOČITEV NIHAJNIH ČASOV

3.1 Uporabljene metode

Nihajne čase za obravnavane sisteme smo določili po različnih metodah, in sicer:

– s približnimi enačbami po SIST EN 1998-1:2005 in SIST EN 1991-1-4:2005:

$$T_1 = n_1^{-1} = \frac{h}{46} \quad (1)$$

$$T_1 = C_1 \cdot H^{\frac{3}{4}} \quad (2)$$

$$T_1 = 2 \cdot \sqrt{d} \quad (3)$$

kjer je:

n_1 ... prva lastna upogibna frekvenca (Hz),

h, H ... višina konstrukcije v m,

d ... vodoravni pomik na vrhu stavbe v m zaradi vodoravnih vztrajnostnih sil.

C_1 ... 0,085 za prostorske jeklene momentne okvire, 0,075 za prostorske betonske momentne okvire in za ekscentrično zavetrovane jeklene okvire ter 0,050 za vse druge konstrukcije;

– z ravninskim modelom s pomočjo programa za statično analizo in postopkov iz dinamike konstrukcij;

– s prostorskim modelom s pomočjo programa za statično analizo in modalno analizo.

Uporabljene metode se med seboj razlikujejo predvsem v zahtevnosti in natančnosti pristopa. Preden se odločimo za določeno poenostavitev analize, je treba preveriti zahteve, ki jih podaja SIST EN 1998-1:2005. Posebna pravila so navedena za uporabo ravninskega in prostorskega modela, kar je v pravilniku definirano s pravilnostjo v tlorisu.

3.2 Statični sistemi

3.2.1. Skeletni sistem

Večina pristopov pri modeliranju pogosto idealizira obnašanje spojev kot popolnoma toga ali kot členkasto vozlišče. V resničnosti pa je v lesenih gradnjah, kjer je konstrukcija povezana z mehanskimi vezmi, zelo težko izdelati spoj, ki bi bil popolnoma tog. Zato se pri tovrstnih konstrukcijah pogosto srečamo z delno togimi spoji, ki morajo biti v analizi obravnavani drugače, in ne kot popolnoma toga ali členkasta vozlišča. Delno togo stikovanje, v primerjavi s členkastim stikovanjem, lahko prevzame momentno obtežbo, vendar manjšo kot elementi, ki jih stikujemo. Pri modeliranju klasičnega okvirnega sistema smo delno toge spoje simulirali z dovolj majhnimi elementi, katerih togost je enaka zasučni togosti spoja, ki smo jo določili na podlagi zveze med zasučno togostjo spoja K_{φ} , modulom pomika veznega sredstva K_{ser} ter razdalje med središčem zasuka in posameznim veznim sredstvom r_i , ki je podana kot (Kermani, 1996):

$$K_{\varphi} = \sum K_{ser} \cdot r_i^2 = \sum K_{ser} \cdot (r_x^2 + r_y^2) \quad (4)$$

Primer izračuna stika:
Modul pomikov se določi kot:

$$K_{ser} = \frac{\rho_m^{1.5} \cdot d}{80} = \frac{(410 \cdot 1,21)^{1.5} \cdot 20}{23} = 9608,51 N / mm \quad (5)$$

Zasučna togost je:

$$K_{\varphi} = \sum K_{ser} \cdot r_i^2 = 9608,51 \cdot (6 \cdot 0,12^2 + 6 \cdot 0,12^2) = 1660,35 kNm \quad (6)$$

Zasučna togost je enaka togosti elementa dolžine 0,1 m:

$$K_{\varphi} = \frac{E \cdot I}{L} \quad (7)$$

Izberemo si:

$$L = 0,1 m \quad (8)$$

$$I = \frac{0,1 \cdot 0,1^3}{12} = 8,333 \cdot 10^{-6} \quad (9)$$

$$\Rightarrow E = \frac{K_{\varphi} \cdot L}{I} = 1,9925 \cdot 10^7 kN / m^2 \quad (10)$$

Za izračun smo uporabili program Tower 6. Ker program nima vgrajenega primerne modula, s katerim bi lahko pravilno podali stikovanje prečk z notranjimi stebri, smo delno toge stike modelirali le na stikovanju prečk z zunanji stebri. Stik prečk z notranjimi stebri je obravnavan kot členkast spoj. Ker je v tem sistemu smer sile podana, so za izračun podane le natezne diagonale, ki so edine upoštevane kot nosilne. Delno togi spoji so prikazani odebeljeno na sliki 3.1.

3.2.2. Montažni okvirni sistem z obložnimi ploščami

Zaradi specifične sestave panela (leseni okvir, na katerega so s sponkami pritrjene obložne plošče) je v montažnem okvirnem sistemu z računalniškim programom običajno težko simulirati podajnost veznih sredstev γ v priključni ravnini. V praksi pri modeliranju to najpogosteje rešujemo z vzmetmi ali z dodajanjem vmesnih slojev, s pomočjo katerih je upoštevana podajnost veznega sredstva. V predstavljeni analizi smo se temu poenostavljeno izognili z upoštevanjem dodatnih diagonal, katerih efektivni prečni prerez aproksimativno upošteva tako horizontalno togost obložnih plošč kot podajnost veznih sredstev v priključnih ravninah obložna plošča-leseni okvir.

Tako smo panele nadomestili z jeklenimi diagonalami (slika 3.2), kjer smo pri izračunu togosti elementa upoštevali tako upogibno kot tudi strižno togost elementa, ki ju določimo s pomočjo spodnjih enačb:

Upogibna togost panelne stene:

$$(EI_y)_{eff} = E_b I_b + E_t I_t = E_b \cdot \frac{2t \cdot b^3}{12} + E_t \cdot \left(\frac{2a^3 \cdot c}{12} + \frac{d^3 \cdot c}{12} + 2\gamma_{yi} \cdot A_{t1} \cdot z_p^2 \right) \quad (11)$$

Strižna togost panelne stene:

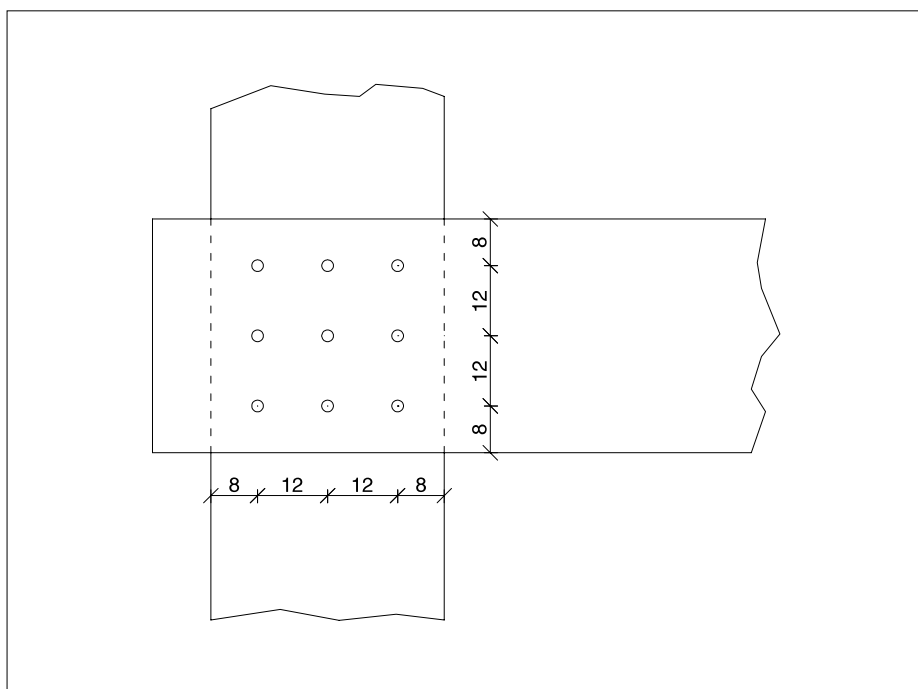
$$(GA)_{eff} = G_b \cdot A_b + G_t \cdot A_t \quad (12)$$

kjer indeks b označuje obložno ploščo in indeks t les.

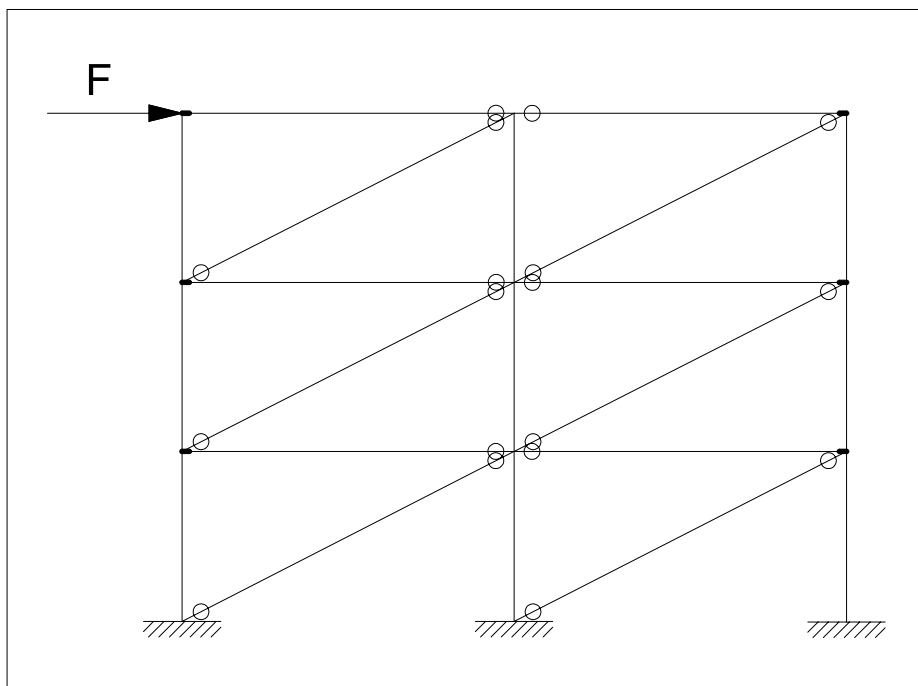
Tako dobimo:

– obložne plošče MVP

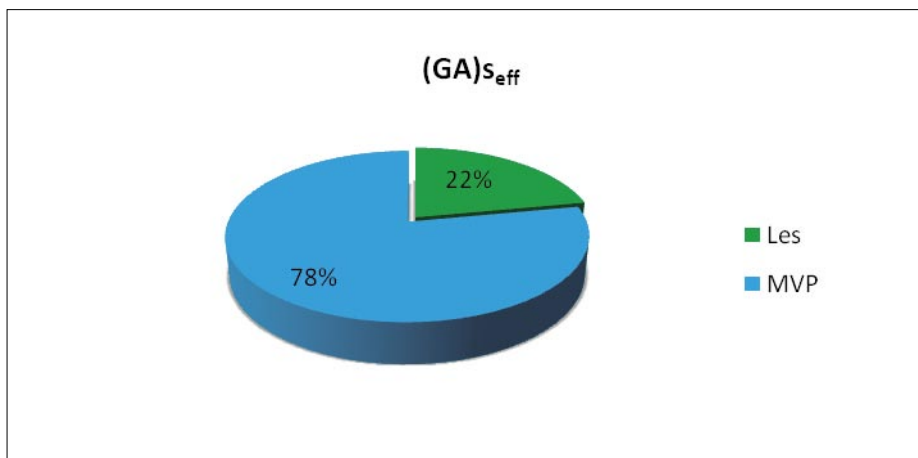
$$(EI_y)_{eff} = (1,465 + 1,122) \cdot 10^8 = 2,587 \cdot 10^8 kNcm^2 = 2,587 \cdot 10^4 kNm^2 \quad (13)$$



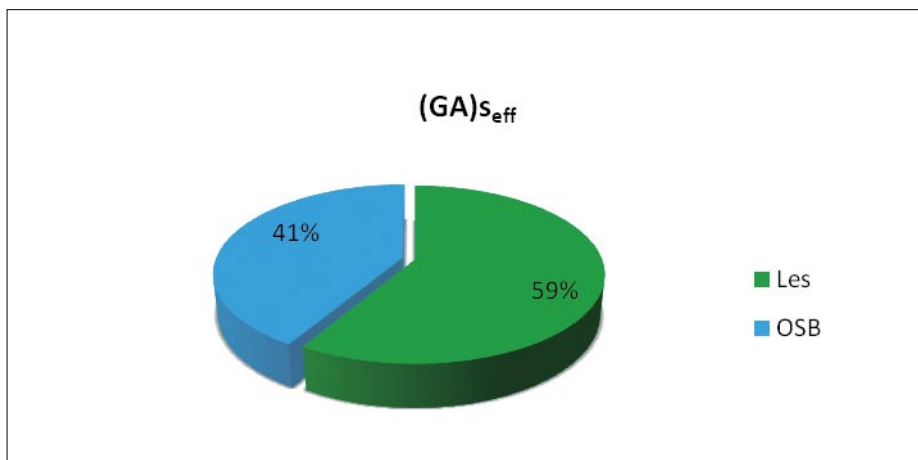
Slika 3.1 • Skica spoja v konstrukciji



Slika 3.2 • Statični sistem za skeletno konstrukcijo z upoštevanjem delno togih spojev



Slika 3.3 • Prispevek lesenega okvirja in plošče MVP k skupni strižni togosti panela



Slika 3.4 • Prispevek lesenega okvirja in plošče OSB k skupni strižni togosti panela

$$(GA)_{eff} = 45000 + 12700,8 = 57700,80 \text{ kN} \quad (14)$$

– Obložne plošče OSB:

$$(EI_y)_{eff} = (1,709 + 0,797) \cdot 10^8 = 2,506 \cdot 10^8 \text{ kNcm}^2 = 2,506 \cdot 10^4 \text{ kNm}^2 \quad (15)$$

$$(GA)_{eff} = 9000 + 12700,8 = 21700,8 \text{ kN} \quad (16)$$

Ker imajo obložne plošče OSB približno petkrat manjši strižni modul G v primerjavi z obložnimi ploščami MVP, je strižna togost panela z obložnimi ploščami OSB manjša (enačbi (14) in (16)). To posledično privede tudi do manjše skupne togosti sistema OSB, v primerjavi s sistemom MVP. Večja togost sistema z obložnimi ploščami MVP je bila dokazana tudi eksperimentalno v (Premrov, sprejet v objavo). Pri tem je privzeto, da v obeh primerih kot vezna sredstva uporabimo sponke.

Pri izračunu bi se lahko pojavil tudi vpliv veznih sredstev, če bi pri pritrdjevanju plošč MVP na leseni okvir uporabili drugačen razmik med sponkami, kar je eksperimentalno raziskano v (Premrov, 2009).

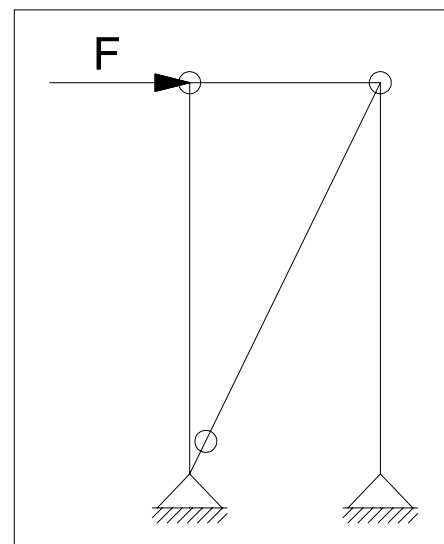
Tako sledi togost panela:

$$k_p = \frac{1}{D_p} = \left(\frac{H^3}{3 \cdot EI_{eff}} + \frac{H}{GA_{s,eff}} \right)^{-1} \quad (17)$$

kjer je:

$$(GA_s)_{eff} = \frac{(GA)_{eff}}{1,2} \quad (18)$$

Pri tem predpostavimo absolutno togo sidranje.



Slika 3.5 • Statični sistem za posamezni panel

3.2.3. Križno lepljeni lamelni sistem

Pri modeliranju križno lepljenih panelov je treba upoštevati različne materialne karakteristike v obeh pravokotnih smereh zaradi različne orientiranosti medsebojno zlepljenih slojev. Izračun je opravljen s programom Tower 6, kjer smo panele modelirali kot stenske elemente enojnega sloja, pri čemer smo uporabili proces homogenizacije 3-slojnega prereza.

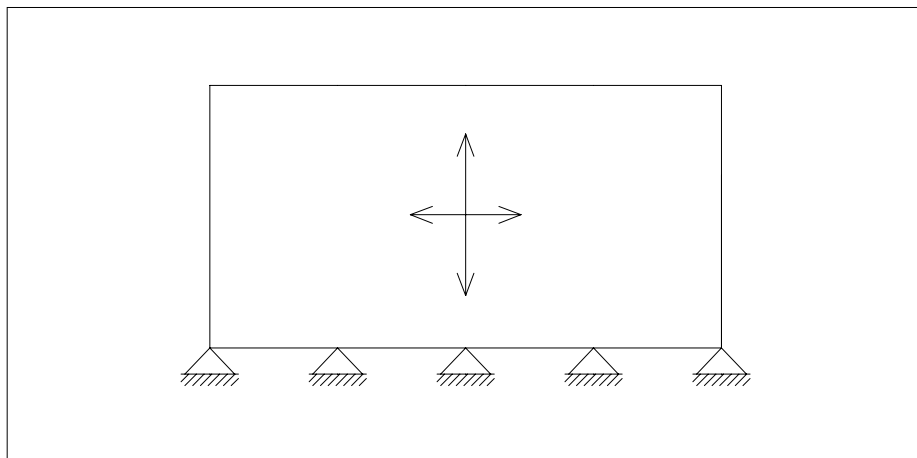
Materialne karakteristike homogeniziranega prereza so:

$$E_{0,mean} = 7793 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{90,mean} = 4577 \text{ N/mm}^2$$

Ker vpetje panelov ni popolnoma togo, ampak je panel sidran na podlago samo na določenih mestih, je to pri modeliranju upoštevano s togim vpetjem na razdalji, ki najbolje simulira dejansko medsebojno razdaljo pritrjevanja (slika 3.3).

Pri izračunu togosti smo upoštevali tako upogibno kot strižno togost elementa.



Slika 3.6 • Statični sistem za steno dolžine 5,0 m

3.3 Rezultati analize

Vrsta modela		$T_1 = \frac{h}{46}$	$T_1 = C_i \cdot H^{\frac{3}{4}}$	$T_1 = 2 \cdot \sqrt{d}$	2D-model	3D-model
Skeletni sistem	smer x	0,166 s	0,230 s	0,363 s	0,273 s	0,279 s
	smer y			0,384 s	0,290 s	
Montažni okvirni sistem - plošče MVP	smer x	0,166 s	0,230 s	0,333 s	0,306 s	0,291 s
	smer y			0,292 s	0,268 s	
Montažni okvirni sistem - plošče OSB	smer x	0,166 s	0,230 s	0,381 s	0,349 s	0,325 s
	smer y			0,334 s	0,306 s	
Sistem XL, 94 mm	smer x	0,166 s	0,230 s	0,182 s	0,164 s	0,142 s
	smer y			0,141 s	0,136 s	

Pri 2D-modelu so za posamezno smer obravnavani vsi trije okvirji, kjer je skupna togost vzeta kot seštevek togosti posameznih okvirjev.

4 • SKLEP

Določitev nihajnega časa s približnimi enačbami je relativno hitro in enostavno. Kot je pokazala analiza, katere rezultati so prikazani v poglavju 3.3, s temi enačbami dobimo dokaj nenatančne rezultate. Posebej problematični sta prvi dve približni enačbi, kajti vrednost nihajnega časa je odvisna le od višine konstrukcije H , zato posledično dobimo enake vrednosti nihajnih časov za vse sisteme, čeprav imajo ti zelo različne togosti, ki seveda neposredno vplivajo na lastni nihajni čas konstrukcije. Naslednja približna enačba, ki jo navaja pravil-

nik, se izkaže za natančnejšo, čeprav dobimo nekoliko večje vrednosti nihajnih časov kot s pomočjo ravninskega in prostorskega modela. Sta pa v enačbi v vodoravnem pomiku d posredno že upoštevani tako togost kot masa konstrukcije, kar je za analizo ugodneje kot le višina konstrukcije. Izmed obravnavanih sistemov ima sistem XL največjo togost, zato je ta sistem tudi najprimernejši za večetažno gradnjo. Analiza nihajnih časov montažnega okvirnega sistema je pokazala, da v primeru uporabe obložnih plošč MVP dosežemo večjo

togost sistema, kot če uporabimo obložne plošče OSB. Enaki rezultati so bili doseženi tudi eksperimentalno na vzorcu stene (Premrov, sprejet v objavo).

Za ugodno poenostavitev se je izkazala uporaba ravninskega modela. Rezultati so, ob izvedeni primerjavi s prostorskim modelom, pokazali zelo majhna odstopanja nihajnih časov, kar zagotavlja zadostno primerljivost rezultatov. Tako že uporaba ravninskega modela v praksi daje dovolj natančne rezultate, seveda ob predhodni izpolnitvi meril za tlorisno pravilnost, določeni s pravilnikom SIST EN 1998-1:2005. Nadalje pa bo smiselno preiskati tudi konstrukcije, ki teh pogojev ne izpolnjujejo povsem.

5 • LITERATURA

- Pintarič, K., Dinamična analiza različnih sistemov večetažnih lesenih zgradb, diplomsko delo, Fakulteta za gradbeništvo, Maribor, 2010.
- Premrov, M., Kuhta, M., Experimental Analysis on Behaviour of Timber-Framed Walls with Different Types of Sheathing Boards, Nova Science Publishers – sprejet v objavo.
- Premrov, M., Kuhta, M., Influence of fasteners disposition on behaviour of timber-framed walls with single fibre-plaster sheathing boards, Constr. build. mater. (Print ed.), vol. 23, iss. 7, str. 2688–2693, julij 2009.
- Kermani, A., A study of semi-rigid and non-linear behaviour of nailed joints in timber portal frames, Journal of forest engineering, januar 1996, vol. 7, št. 2, str. 17–33. Dostopno na: <http://www.lib.unb.ca/Texts/JFE/backissues/pdf/vol7-2/kermani.pdf> (10. 5. 2010).
- SIST EN 1991-1-4, Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije, 1–3. del, Splošni vplivi – Vplivi vetra, 2005.
- SIST EN 1998-1, Evrokod 8: Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij, 1. del, Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe, 2005.