

... Kozarić, Vojnić Purčar, Živković: Vibracije križno lameliranih drvenih međukatnih panela

Ljiljana Kozarić, Martina Vojnić Purčar, Smilja Živković¹

Vibracije križno lameliranih drvenih međukatnih panela

Vibrations of Cross-Laminated Timber Floors

Professional paper • Stručni rad

Received – prispjelo: 25. 5. 2018.

Accepted – prihvaćeno: 4. 7. 2019.

UDK: 630*812.75; 630*833.12; 630*833.18

<https://doi.org/10.5552/drvind.2019.1822>

SAŽETAK • U radu su ispitane vibracije peteroslojnih međukatnih križno lameliranih drvenih panela visine 14 cm izazvane ljudskim djelovanjem. Analizirana su tri međukatna panela identičnih visina, ali s različitim kombinacijama debljine lamela u križnim slojevima variranjem njihovih raspona. Navedeni su bitni kriteriji što ih pri projektiranju treba zadovoljiti međukatna konstrukcija da bi se osiguralo njezino prihvatljivo ponašanje u uvjetima dinamičkog opterećenja. Izračun efektivne krutosti na savijanje panela obavljen je Gamma metodom, K-metodom i Kreuzingerovom analogijom. Analitički je određena osnovna frekvencija vibriranja svakog panela, kao i maksimalni progib zbog jedinične statičke sile, a dobiveni su rezultati uspoređeni s vrijednostima dobivenim modalnom i statičkom analizom u programskom paketu Ansys. Svi su dobiveni podatci uspoređeni s važećim kriterijima i selektirani su paneli koji ispunjavaju kriterije sa stajališta graničnog stanja uporabivosti. Rezultati su pokazali da su analizirani međukatni paneli raspona do 4,5 m prihvatljivi sa stajališta adekvatnoga dinamičkog ponašanja pri ljudskom djelovanju. Rezultati su također pokazali da su kombinirani kriterij i kriterij maksimalnoga dopuštenog progiba zbog jedinične statičke sile znatno stroži od kriterija minimalne vrijednosti osnovne frekvencije vibriranja.

Ključne riječi: križno lamelirano drvo, međukatna konstrukcija, vibracije

ABSTRACT • This paper investigates the vibrations caused by human action of five-layer cross-laminated timber panels with a height of 14 cm. Analysis is made of three floor panels of identical height, but with different combinations of thicknesses of the laminas in cross-layers, varying their spans. The longitudinal layers of the panels have better physical and mechanical characteristics than transverse layers. The relevant criteria to be observed in floor construction at the designing stage are specified in order to ensure acceptable behavior regarding the dynamic load. Limit values are also given. As it is very difficult to determine the threshold of human acceptability, since vibrations that someone finds disturbing do not have to be disturbing for others, the relevant criteria used in the work has been chosen on the basis of the highest representation in the literature: Natural Frequency Limit, Unit Load Deflection Limit and the Combined Criterion. Calculation of the effective bending stiffness of the panel was performed using Gamma method, K-method and Kreuzinger analogy. The natural frequency of each panel was determined analytically, and so was the maximum deflection due to unit static force and the obtained results were compared with the values obtained by modal and static analysis in the Ansys software package. All the obtained data were compared with the valid criteria, and panels that meet the criteria in terms of the serviceability limit state were selected. The results showed that the analyzed floor panels of the span up to 4.5 m are acceptable in terms of adequate dynamic behavior related to human action according to all criteria. Also, the results showed that the Combined Criterion and the Unit Load Deflection Limit are significantly stricter due to the unit static force compared to the Natural Frequency Limit. If the minimum required natural frequency of the CLT panel were

¹ Autorice su istraživačice Sveučilišta u Novom Sadu, Građevinski fakultet u Subotici, Zavod za konstrukcije i materijale, Subotica, Srbija.

¹ Authors are researchers at University of Novi Sad, Faculty of Civil Engineering in Subotica, Department of Constructions and Materials, Subotica, Serbia.

accepted with a value of 8 Hz, which corresponds to the milder recommendations in the available literature, the spans could go up to 6 m.

On the basis of the obtained results, it can be concluded that in the design of floor structures, in addition to static stability, an adequate dynamic response to the initiative caused by everyday human activities must be provided. The results also show that the analyzed floor CLT panels can be very successfully applied in the floor constructions of residential and commercial buildings, provided that the required dynamic calculations are made.

Keywords: cross-laminated timber, floor construction, vibrations

1. UVOD

1 INTRODUCTION

Križno lamelirano drvo (CLT – cross-laminated timber) moderni je proizvod visoke tehnologije koji je znatno unaprijedio fizička svojstva punog drva (Wieruszewski i Mazela, 2017.; Jeleč *et al.*, 2018.). Križno slaganje drva osigurava stabilnost, a paneli su dovoljno jaki da se rabe kao konstruktivni elementi, bez potrebe da se konstrukcije zbog statičkog opterećenja ojačavaju opekom ili betonom

Međutim, pri svakodnevnim ljudskim aktivnostima kao što su hodanje, skakanje, plesanje i trčanje ljudi mogu osjetiti nelagodu ako su amplitude vibracija međukatnih konstrukcija nekontrolirane. Neugodne vibracije međukatnih konstrukcija najčešće su posljedica njihove male osnovne frekvencije zbog uporabe lakih konstrukcijskih materijala i projektiranja konstrukcija velikih raspona.

Da bi vibracije međukatnih konstrukcija bile prihvatljive, njihova osnovna frekvencija mora biti veća od frekvencije dinamičke sile. Određivanje osnovne frekvencije vibracija međukatnih konstrukcija uglavnom se temelji na izračunu osnovne frekvencije jednostavnog modela s jednim stupnjem slobode (Wyatt, 1989.; Allen, 1990.; Murray *et al.*, 2003.; Eurokod 5, 2009.).

Vibracije spregnutih međukatnih konstrukcija problem su graničnog stanja uporabivosti koji se odnosi na neudobnost tijekom uporabe te pri opterećenjima koja se redovito pojavljuju pri svakodnevnom korištenju konstrukcije.

2. GRANIČNO STANJE UPORABIVOSTI KONSTRUKCIJA

2 SERVICEABILITY LIMIT STATE OF CONSTRUCTIONS

Osjećaj nelagode pri vibriranju međukatne konstrukcije zbog ljudske aktivnosti individualan je i varira od osobe do osobe. Vrlo je teško odrediti prag ljudske prihvatljivosti vibracija jer one koje su za jednu osobu uznemirujuće ne moraju takve biti i za nekoga drugog. U standardima i literaturi mogu se pronaći različiti predloženi kriteriji koje međukatna konstrukcija pri projektiranju treba ispuniti da bi se osiguralo njezino prihvatljivo ponašanje pod dinamičkim opterećenjem, pri čemu se kao kriterij najčešće uzima kombinacija kriterija minimalne vrijednosti osnovne frekvencije vibriranja i kriterija maksimalnoga dopuštenog progiba zbog jedinične statičke sile (CLT Handbook, 2011.), a on glasi:

$$\frac{f}{d^{0.7}} \geq 13 \text{ ili } d \leq \frac{f^{1.43}}{39} \quad (1)$$

gdje je f – osnovna frekvencija vibriranja u Hz; d – maksimalni statički progib zbog sile $F = 1$ kN, izražen u mm.

2.1. Kriterij minimalne vrijednosti osnovne frekvencije vibriranja

2.1 Natural Frequency Limit

Jedan od zahtjeva pri dokazivanju graničnog stanja uporabivosti međukatne konstrukcije jest i provjera osnovne frekvencije vibriranja kako bi se spriječile neželjene vibracije koje u korisnika izazivaju nelagodu i smanjuju osjećaj komfora. Hanes je (1970.) upozorio projektante da izbjegavaju međukatne konstrukcije čija je osnovna frekvencija niža od 3 Hz jer su one osjetljive na ljudski korak, tj. hodanje može lako uzrokovati rezonanciju. Osim toga, naglasio je da treba izbjegavati i frekvencije između 5 i 8 Hz jer je to osnovna frekvencija vibriranja naših unutarnjih organa. Taj je raspon frekvencija utvrđen različitim studijama i istraživanjima udobnosti putnika u automobilima i zrakoplovima. Ispitujući više od sto problematičnih međukatnih konstrukcija, Murray je (1991.) također ustanovio da je njihova frekvencija najčešće između 5 i 8 Hz. Stoga bi se trebali izbjegavati ovi rasponi osnovnih frekvencija međukatnih konstrukcija:

- frekvencije niže od 3 Hz, da bi se izbjegla rezonancija zbog ljudskih koraka
- frekvencije između 5 i 8 Hz, da bi se izbjegla neugoda i neudobnost korisnika.

U literaturi se mogu naći različite preporuke za projektiranje minimalnih osnovnih frekvencija međukatnih konstrukcija. Prema Hanesu (1970.), minimalna osnovna frekvencija međukatnih konstrukcija stambeno-poslovnih objekata mora biti 10 Hz. Norma Eurokod 5 (EN 1995-1-1) donosi upozorenje da u međukatnim konstrukcijama s osnovnom frekvencijom nižom od 8 Hz postoji realna opasnost od rezonancije, pa je potrebno provesti posebna ispitivanja. Dolan *et al.* (1999.) iznose mnogo strože kriterije – prema njima, osnovna frekvencija lakih drvenih međukatnih konstrukcija poslovnih objekata mora biti najmanje 15 Hz, a stambenih najmanje 14 Hz. Smith i Chui (1988.) preporučuju minimalnu osnovnu frekvenciju od 8 Hz, dok Allen i Pernica (1998.) za međukatne konstrukcije izložene ritmičkim aktivnostima preporučuju minimalne osnovne frekvencije navedene u tablici 1.

Iz svega navedenog može se zaključiti da je minimalna osnovna frekvencija vibriranja međukatne konstrukcije veća od 10 Hz sa stajališta graničnog stanja uporabivosti zadovoljavajuća.

2.2. Kriterij maksimalnoga dopuštenog progiba zbog jedinične statičke sile

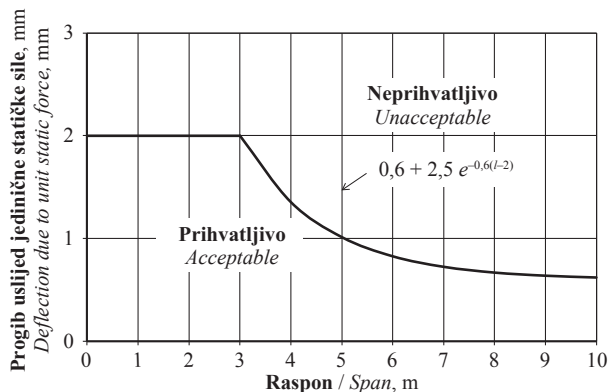
2.2 Unit Load Deflection Limit

Allen i Pernica (1998.) predlažu da se pri projektiranju lakih međukatnih konstrukcija uzme u obzir i kriterij maksimalnoga dopuštenog progiba zbog jedi-

Tablica 1. Minimalne osnovne frekvencije vibriranja međukatnih konstrukcija (Hz)

Table 1 Minimum floor fundamental frequencies (Hz)

Ritmička aktivnost <i>Rhythmic activity</i>	Čelične ili betonske međukatne konstrukcije <i>Steel or concrete floor constructions</i>	Lagane međukatne konstrukcije <i>Lightweight floor structures</i>
restorani i plesne dvorane / <i>Restaurants and ballrooms</i>	5	10
dvorane za aerobik / <i>Aerobics halls</i>	9	13



Slika 1. Kriterij maksimalnog progiba zbog jedinične statičke sile (Allen i Pernica, 1998.)

Figure 1 Unit Load Deflection Limit (Allen and Pernica, 1998)

nične statičke sile i tako izbjegniju neprihvatljive vibracije konstrukcija koje su posljedica hodanja. Predloženi je kriterij prikazan na slici 1.

Maksimalni dopušteni progib zbog jedinične statičke sile u međukatnim konstrukcijama raspona manjeg od 3 m iznosi do 2 mm, a u međukatnim konstrukcijama raspona većeg od 3 m on eksponencijalno pada (sl. 1.). Progib od 0,6 mm zbog jedinične sile prihvatljiv je za sve raspone međukatnih konstrukcija.

3. MATERIJALI I METODE 3 MATERIALS AND METHODS

Analizirane su efektivne krutosti i osnovne frekvencije vibriranja za tri slobodno oslonjena međukatna CLT panela. Rasponi su varirani od 4,5 m do 6 m. Visina panela iznosila je 14 cm, a debljine lamela u poprečnom presjeku panela (sl. 2.) bile su 3 cm × 3,4 cm + 2 cm × 1,9 cm (P1), zatim 3 cm × 3 cm + 2 cm × 2,5 cm (P2) i 5 cm × 2,8 cm (P3), (Kozarić *et al.*, 2015.; Kozarić *et al.*, 2016.).

Fizičko-mehanička svojstva uzdužnih i poprečnih lamela međukatnih panela prikazana su u tablici 2. Smicanje uzdužnih lamela se zanemaruje jer je odnos raspona i visine CLT panela veći od 30. Efektivne krutosti izračunane su Gamma metodom, K-metodom i Kreuzingerovom analogijom. Obujam drva bio je 480 kg/m³, a Poissonov omjer (koeficijent) 0,3.

Vlastita frekvencija slobodno oslonjenoga međukatnog panela može se analitički izračunati uz pomoć jednadžbe:

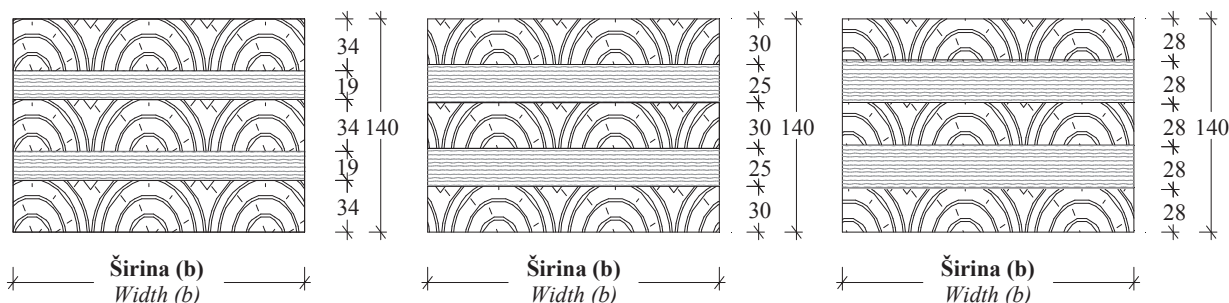
$$f = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI)_{ef}}{\gamma A}} \quad (2)$$

gdje je: l – raspon međukatne konstrukcije u m; $(EI)_{ef}$ – efektivna krutost panela širine 1 m u smjeru raspona izražena u Nm²; γ – obujam drva u kg/m³; A – površina poprečnog presjeka panela u m².

Tablica 2. Fizičko-mehanička svojstva uzdužnih i poprečnih lamela

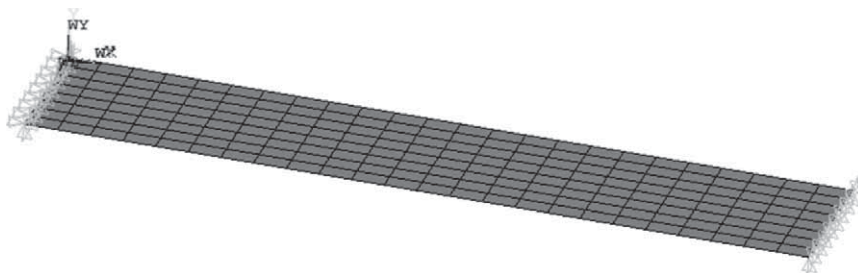
Table 2 Physical and mechanical properties of the longitudinal and lateral laminates

Uzdužne lamele / <i>Longitudinal laminates</i>	Poprečne lamele / <i>Lateral laminates</i>
$E_0 = 11000 \text{ MPa}$	$E_0 = 9000 \text{ MPa}$
$E_{90} \approx \frac{E_0}{30} = \frac{11000}{30} = 367 \approx 370 \text{ MPa}$	$E_{90} \approx \frac{E_0}{30} = \frac{9000}{30} = 300 \text{ MPa}$
$G_0 \approx \frac{E_0}{16} = \frac{11000}{16} = 688 \approx 690 \text{ MPa}$	$G_0 \approx \frac{E_0}{16} = \frac{9000}{16} = 563 \approx 560 \text{ MPa}$
$G_R \approx \frac{G_0}{10} = \frac{690}{10} = 69 \text{ MPa}$	$G_R \approx \frac{G_0}{10} = \frac{560}{10} = 56 \text{ MPa}$



Slika 2. Geometrijska obilježja CLT panela P1, P2 i P3

Figure 2 Geometric characteristics of CLT panels P1, P2 and P3



Slika 3. Raspored čvorova i konačnih elemenata CLT panela P1 raspona 4,5 m
Figure 3 Arrangement of nodes and finite elements of CLT panel P1 with 4.5 m span

Maksimalni progib zbog jedinične statičke sile iskazan u mm može se odrediti iz jednadžbe:

$$d = \frac{1000Pl^3}{48(EI)_{ef}} \quad (3)$$

gdje je: $P = 1000$ N.

Metoda konačnih elemenata primijenjena je upotrebom kompjutorskog softvera Ansys 14.0. Međukatna konstrukcija modelirana je kao 2D laminatni ortotropni model sastavljen od slojeva – *layera* (međuslojeva), koji čine treću dimenziju modela (debljinu). Modeliranje konstrukcije provedeno je uz pomoć elemenata iz Ansysove knjižnice, i to putem 4-čvornoga dvodimenzionalnog elementa SHELL181. Upotrijebljen je kao 2D element debljine unutar koje se definira raspored i debljina *layera*, kao i njihova pojedinačna orijentacija. Element je definiran s četiri čvora i šest stupnjeva slobode u svakom čvoru te trima translacijama i trima rotacijama. Osnovni ulazni podaci za taj element jesu modul elastičnosti, Poissonov omjer (koeficijent) i obujam drva.

Konačni je element veličine $0,125 \text{ mm} \times 0,25 \text{ m}$ (sl. 3.). Usvojena gustoća mreže određena je iterativnim postupkom tako da je progušćivana do trenutka kad se rezultati dvaju uzastopnih koraka nisu razlikovali manje od 1 %.

3. REZULTATI I RASPRAVA 3 RESULTS AND DISCUSSION

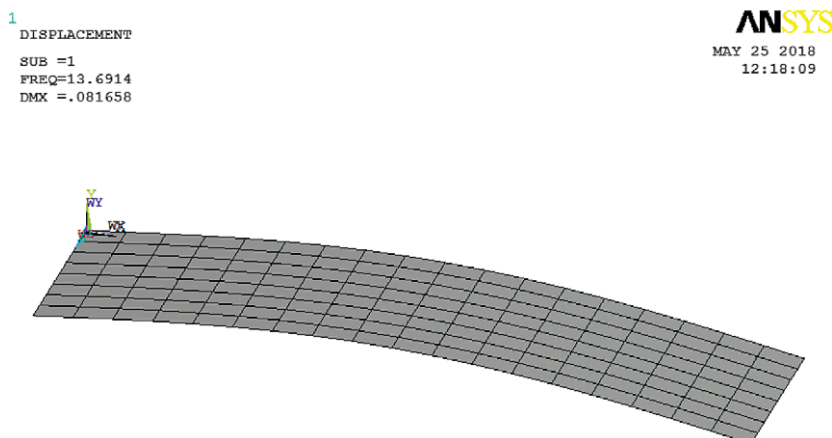
Osnovna vlastita frekvencija osciliranja i maksimalni progib zbog jedinične statičke sile analiziranih međukatnih CLT panela izračunani su analitički, uz

pomoć jednadžbi (2) i (3), te numerički (metodom konačnih elemenata), modalnom i statičkom analizom u programskom paketu Ansys radi provjere dobivenih vrijednosti. Na slici 4. prikazan je prvi vlastiti oblik vibriranja međukatnog CLT panela P1 raspona 4,5 m.

Vlastite frekvencije vibriranja za sva tri međukatna CLT panela prikazane su u tablici 3., a maksimalni progib zbog jedinične statičke sile naveden je u tablici 4.

Uzimajući u obzir navedeni kombinirani kriterij predočen jednadžbom (1), koji uzima u obzir vrijednost osnovne frekvencije vibriranja, ali i vrijednost maksimalnoga dopuštenog progiba zbog jedinične statičke sile, u tablicu 5. uvrštene su prihvatljive vrijednosti za odgovarajuće međukatne CLT panele.

Dobiveni rezultati navedeni u tablici 3. pokazuju pad vrijednosti osnovne vlastite frekvencije vibriranja CLT panela s povećanjem njegovog raspona, dok se njezina vrijednost neznatno mijenja s promjenom debljine lamela u križnim slojevima. Modalna analiza u programskom paketu Ansys potvrdila je analitički dobivene vrijednosti, što upućuje na vrlo visoku preciznost analitičkih izraza. Ako bi se za potrebnu minimalnu osnovnu frekvenciju vibriranja lake međukatne konstrukcije usvojila vrijednost od 10 Hz, što odgovara strožim preporukama u dostupnoj literaturi, CLT paneli visine 14 cm i raspona do 5 m bili bi prihvatljivi sa stajališta graničnog stanja uporabivosti. Ali ako bi se kao minimalna potrebna osnovna frekvencija vibriranja CLT panela prihvatila vrijednost od 8 Hz (Smith i Chui, 1988.; Eurokod 5, 2009.), rasponi bi se mogli kretati i do 6 m.



Slika 4. Prvi vlastiti oblik vibriranja međukatnog CLT panela P1 raspona 4,5 m
Figure 4 First characteristic mode shape of CLT panel P1 with 4.5 m span

Tablica 3. Efektivna krutost i osnovna vlastita frekvencija vibriranja CLT panela

Table 3 Effective stiffness and fundamental frequency of CLT panels

CLT panel	Metoda izračuna Calculation method		Efektivna krutost, kNm ² Effective stiffness, kNm ²	$f_{dop} = 10$ Hz			
				Osnovna vlastita frekvencija f , Hz Fundamental frequency f , Hz			
				l = 4,5 m	l = 5,0 m	l = 5,5 m	l = 6,0 m
P1	analitički	γ-metoda	2087	13,67	11,07	9,15	7,69
		K-metoda	2218	14,09	11,42	9,43	7,93
		Kreuzinger	2218	14,09	11,42	9,43	7,93
	numerički (Ansys)			13,69	11,15	9,25	7,80
P2	analitički	γ-metoda	2069	13,61	11,02	9,11	7,66
		K-metoda	2082,88	13,65	11,06	9,14	7,68
		Kreuzinger	2082,88	13,65	11,06	9,14	7,68
	numerički (Ansys)			13,21	10,77	8,94	7,54
P3	analitički	γ-metoda	1990,60	13,35	10,81	8,94	7,51
		K-metoda	2006,41	13,40	10,85	8,97	7,54
		Kreuzinger	2006,41	13,40	10,85	8,97	7,54
	numerički (Ansys)			12,95	10,56	8,77	7,40

Tablica 4. Efektivne krutosti i maksimalni progibi CLT panela zbog jedinične statičke sile

Table 4 Effective stiffness and unit point load deflection of CLT panels

CLT panel	Metoda izračuna Calculation method		Efektivna krutost, kNm ² Effective stiffness, kNm ²	$d_{dop} \leq 1,15$ mm	$d_{dop} \leq 1,01$ mm	$d_{dop} \leq 0,09$ mm	$d_{dop} \leq 0,82$ mm
				Maksimalni progib uslijed jedinične statičke sile d , mm Unit point load deflection d , mm			
				l = 4,5 m	l = 5,0 m	l = 5,5 m	l = 6,0 m
P1	analitički	γ-metoda	2087	0,91	1,25	1,66	2,16
		K-metoda	2218	0,86	1,17	1,56	2,03
		Kreuzinger	2218	0,86	1,17	1,56	2,03
	numerički (Ansys)			0,96	1,29	1,68	2,16
P2	analitički	γ-metoda	2069	0,92	1,26	1,68	2,17
		K-metoda	2082,88	0,91	1,25	1,66	2,16
		Kreuzinger	2082,88	0,91	1,25	1,66	2,16
	numerički (Ansys)			1,03	1,38	1,80	2,30
P3	analitički	γ-metoda	1990,60	0,95	1,31	1,74	2,26
		K-metoda	2006,41	0,95	1,30	1,73	2,24
		Kreuzinger	2006,41	0,95	1,30	1,73	2,24
	numerički (Ansys)			1,07	1,43	1,87	2,39

Tablica 5. Kombinirani kriterij koji osigurava prihvatljivo dinamičko ponašanje CLT panela

Table 5 Combined design criterion that provides acceptable dynamic behavior of CLT panels

CLT panel	Metoda izračuna Calculation method l = 4,5 m		Kombinirani kriterij / Combined design criterion $\frac{f}{d^{0.7}} \geq 13$			
			l = 5,0 m	l = 5,5 m	l = 6,0 m	
P1	analitički	γ-metoda	14,60	9,47	6,42	4,49
		K-metoda	15,66	10,23	6,91	4,83
		Kreuzinger	15,66	10,23	6,91	4,83
	Ansys		14,09	9,33	6,43	4,55
P2	analitički	γ-metoda	14,43	9,37	6,34	4,45
		K-metoda	14,58	9,46	6,41	4,48
		Kreuzinger	14,58	9,46	6,41	4,48
	Ansys		12,94	8,60	5,92	4,21
P3	analitički	γ-metoda	13,84	8,95	6,07	4,24
		K-metoda	13,89	9,03	6,11	4,29
		Kreuzinger	13,89	9,03	6,11	4,29
	Ansys		12,35	8,22	5,66	4,02

Međutim, kriterij maksimalnoga dopuštenog progiba zbog jedinične statičke sile i kombinirani kriterij, čiji su rezultati prikazani u tablicama 4. i 5., znatno su stroži pri ocjenjivanju dinamičke prihvatljivosti CLT međukatnih panela. Prema tim kriterijima, samo paneli raspona do 4,5 m ne bi izazvali nelagodu u korisnika pri njihovim svakodnevnim aktivnostima.

Evidentno je da povećanje visine slabije nosivih lamela postavljenih u poprečnom smjeru ne utječe značajno na dinamičko ponašanje panela jer se vrijednosti kriterija s promjenom njihovih visina znatnije ne mijenjaju.

5. ZAKLJUČAK 5 CONCLUSIONS

Prikazani rezultati analiziranih međukatnih CLT panela pokazuju da se oni mogu vrlo uspješno primjenjivati u međukatnim konstrukcijama stambenih i poslovnih zgrada, uz uvjet da se provede adekvatan dinamički izračun.

Dobivene vrijednosti najčešće primjenjivanih kriterija za ocjenu dinamički prihvatljivih međukatnih konstrukcija pri dimenzioniranju CLT konstrukcija pokazuju da i sama ocjena je li međukatna konstrukcija prihvatljiva ili ne umnogome ovisi i o izboru kriterija. Kombinirani kriterij i kriterij maksimalnoga dopuštenog progiba zbog jedinične statičke sile daju slične rezultate, dok je kriterij minimalne vrijednosti osnovne frekvencije vibriranja znatno blaži. Stoga je preporučljivo da se pri dokazu graničnog stanja uporabivosti međukatne CLT konstrukcije sa stajališta prihvatljivoga dinamičkog ponašanja uzme u obzir kombinirani kriterij jer se njime kombinira vrijednost osnovne frekvencije vibriranja kao jedno od najbitnijih obilježja konstrukcije pri dinamičkom proračunu, ali i progib zbog jedinične statičke sile kao mjera deformabilnosti.

Buduća istraživanja vibracija međukatnih CLT panela u konstrukcijama stambenih i poslovnih zgrada bit će usmjerena na analizu utjecaja vrste, broja i rasporeda mehaničkih spojnih sredstava CLT međukatnih i zidnih panela na vibracije izazvane ljudskim djelovanjem.

6. LITERATURA 6 REFERENCES

1. Allen, D. E., 1990: Building vibrations from human activities. American Concrete Institute, Concrete International: Design and Construction, 12 (6): 66-73.

2. Allen, D. E.; Pernica, G., 1998: Control of floor vibration. Construction Technology, 22.
3. Dolan, J. D.; Murray, T. M.; Johnson, H.; Runte, D.; Shue, B. C., 1999: Preventing annoying wood floor vibrations. Journal of Structural Engineering, 15 (1): 19-24.
4. Hanes, R. M., 1970: Human sensitivity to whole-body vibration in urban transportation systems: A literature review. Applied Physics Laboratory, the John Hopkins University, Silver Springs, MD.
5. Jeleč, M.; Varevac, D.; Rajčić, V., 2018: Križno lamelirano drvo (CLT) – pregled stanja područja. Građevinar, 70 (2): 75-95. <https://doi.org/10.14256/JCE.2071.2017>.
6. Kozarić, Lj.; Prokić, A.; Bešević, M., 2015: Unakrsno lamelirani drveni elementi u savremenim drvenim konstrukcijama zgrada. Građevinski materijali i konstrukcije, 4: 51-69.
7. Kozarić, Lj.; Prokić, A.; Bešević, M.; Vojnić Purčar, M., 2016: Proračun ugiba unakrsno lameliranog drvenog međuspratnog panela. Zbornik radova Građevinskog fakulteta, 30: 63-72. <https://doi.org/10.14415/zbornikGFS30.06>.
8. Murray, T. M., 1991: Building floor vibrations. T.R. Higgins lectureship paper presented at the AISC National Steel Construction Conference, Washington, D.C.
9. Murray, T. M.; Allen, D. E.; Ungar, E. E., 2003: Steel Design Guide Series 11: Floor vibrations due to human activity. American Institute of Steel Construction (AISC), Chicago, USA.
10. Smith, I.; Chui, Y. H., 1988: Design of lightweight wooden floors to avoid human discomfort. Canadian Journal of Civil Engineering, 15: 254-262.
11. Wieruszewski, M.; Mazela, B., 2017: Cross Laminated Timber (CLT) as an Alternative Form of Construction Wood. Drvna industrija, 68 (4): 359-367. <https://doi.org/10.5552/drind.2017.1728>.
12. Wyatt, T. A., 1989: Design guide on the vibration of floors. SCI Publication 076: Steel construction Institute, Construction Industry Research and Information Association, UK.
13. ***EN 1995-1-1: 2004 Eurocode 5, Design of timber structures, Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings.
14. *** 2013: Handbook cross-laminated timber. FPInnovations and Binational Softwood Lumber Council, USA.

Corresponding address:

MARTINA VOJNIĆ PURČAR, Ph.D

University of Novi Sad
Faculty of Civil Engineering in Subotica
Department of Constructions and Materials
Kozaračka 2a, 24000 Subotica, SERBIA
e-mail: vojnicmartina@gmail.com