

asist. dr. Blaž Kurent, mag. inž. str.
blaz.kurent@fgg.uni-lj.si



prof. dr. Boštjan Brank, univ. dipl. inž. grad.
bostjan.branc@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana



Znanstveni članek
UDK 69.032.2+624.011.1:531.1

PARAMETRIČNA ANALIZA ODZIVA VEČNADSTROPNIH LESENIH STAVB NA VETRNO OBTEŽBO

PARAMETRIC ANALYSIS OF THE RESPONSE OF MULTI-STOREY TIMBER BUILDINGS TO WIND LOADING

Povzetek

Večnadstropne lesene stavbe so zaradi svoje lahкости občutljive na nihanje zaradi vetra, kar lahko povzroča neugodje pri uporabi. Zato je merilo ugodja stanovalcev pogosto eden ključnih kriterijev pri projektiranju večnadstropnih lesenih stavb. V članku izračunamo pričakovane pospeške nihanja zaradi vetra za deset lesenih in hibridnih lesenih stavb z višinami med 22 m in 74 m, za katere so bili pridobljeni podatki o dimenzijah, masi ter dinamičnih lastnostih. Pospeški so bili izračunani po SIST EN 1991-1-4:2005 ter ovrednoteni po ISO 10137. Parametrična analiza je pokazala, da lokacija stavbe najbolj vpliva na njen odziv, izmed dejavnikov oblike stavbe ima največji vpliv zaobljenost oziroma prirezanost robov. Ugotovljeno je bilo tudi, da je za doseganje merila ugodja pri nižjih stavbah primerneje povečati togost, pri višjih pa dodati maso. V analizo je bila vključena tudi trenutno najvišja lesena stavba na svetu, analiza pa je pokazala potencial gradnje še višjih lesenih stavb v prihodnosti.

Ključne besede: lesene stavbe, vetrna obtežba, nihanje stavbe, mejno stanje uporabnosti, parametrična analiza

Summary

Due to their light-weight nature, multi-storey timber buildings are susceptible to wind-induced vibration, which can cause discomfort to the occupants. Therefore, vibration serviceability is often one of the key criteria in the design of multi-storey timber buildings. In this article, we calculate the expected accelerations of wind-induced vibration for 10 timber and hybrid timber buildings with heights between 22 m and 74 m, for which we have obtained data on dimensions, mass and modal properties. The accelerations were calculated according to SIST EN 1991-1-4:2005 and evaluated according to ISO 10137. The parametric analysis showed that the location of the building has the greatest influence on the expected wind-induced accelerations. Among the parameters of the building shape, the radius of the rounded edges proved to have the greatest impact. It was also found that increasing the stiffness of the building contributes better to improving the comfort criterion for lower buildings, while adding mass is better for taller buildings. The analysis also included the current tallest timber building in the world and showed the potential for even taller timber buildings in the future.

Key words: timber buildings, wind loading, building oscillations, serviceability limit state, parametric analysis

1 UVOD

Pri projektiranju večnadstropnih stavb je konstrukcija pogosto dimenzionirana na podlagi kriterijev mejnega stanja uporabnosti [Orr, 2019]. Razumevanje, kako učinkovito izpolniti merila uporabnosti, povečuje udobje uporabnikov ter prispeva k manjši porabi materiala in stroškovno učinkovitejšim projektnim odločitvam. Pri obravnavi uporabnosti je vključenih več vidikov, kot so navpične deformacije, horizontalni etažni pomiki, vibracije etažnih plošč in nihanje celotne stavbe [ASCE/SEI 7-22, 2022]. Slednje lahko poškodujejo nekonstrukcijske elemente in povzročijo nelagodje pri stanovalcih. Pri lesenih stavbah je pogosta težava nihanje, ki ga povzroča veter [Johansson, 2015, 2016; Malo, 2016].

Merila udobja za ocenjevanje uporabnosti temeljijo na človeškem zaznavanju nihanja [Lamb, 2017], ki pa se med posamezniki znatno razlikuje. Nivo nihanja je lahko karakteriziran z različnimi lastnostmi gibanja (kot so premik, hitrost, pospešek ter višji odvodi premika) [Johann, 2015], vendar pa se za merilo udobja običajno uporabljajo pospeški. Pri tem sta na voljo dva ISO-standarda za ocenjevanje sprejemljivosti nihanja – ISO 10137 [ISO 10137, 2007] in ISO 6897 [ISO 6897, 1984]. Oba podajata frekvenčno odvisno mejno krivuljo sprejemljivega nihanja. Primeri izračunov merila udobja so prikazani za stavbe iz križno lepljenega lesa (CLT) in lepljenega lesa (GLT) v skladu s švedskimi [Edskär, 2019] in britanskimi predpisi [Zhao, 2021].

Za izračun pospeškov zaradi vetra po SIST EN 1991-1-4:2005 (v nadaljevanju EC1) [Slovenski standard, 2005a] je potrebna določitev lastnih frekvenc stavbe. EC1 za stavbe, višje od 50 m, predlaga poenostavljeno empirično enačbo za izračun osnovne lastne frekvence (v hercih)

$$f = \frac{46}{h}, \quad (1)$$

kjer je h višina stavbe (v metrih). Čeprav so poenostavljene metode zaželeni zaradi časovne učinkovitosti, je zanesljivost enačbe (1) za lesene stavbe vprašljiva. Osnovana je bila na podlagi študije [Ellis, 1980], ki je uporabila podatke meritev 163 stavb in ni vključevala modernih visokih lesenih stavb. Nedavna študija [Reynolds, 2016] je učinkovitost enačbe preverila na enajstih lesenih in hibridnih lesenih stavbah ter ugotovila, da enačba (1) pri teh stavbah podcenjuje vrednost prve lastne frekvence. Kot omenjeno, se priporočilo EC1 pri uporabi enačbe (1) omejuje na stavbe, višje od 50 m, čeprav je nihanje zaradi vetra lahko težavno že pri precej nižjih stavbah [Bezabeh, 2020]. Slednje ugotavlja tudi analiza, predstavljena v tem članku. Po drugi strani SIST EN 1998-1:2005 [Slovenski standard, 2005b] sicer ponuja empirično enačbo za izračun prve lastne frekvence stavb, nižjih od 40 m, vendar pa je namenjena za uporabo v potresni analizi. Za natančnejši izračun dinamičnih lastnosti je nujno modeliranje s končnimi elementi (KE), kjer se v primeru križno lepljenih plošč (CLT) uporabljajo ploskovni elementi ter v primeru lepljenih nosilcev (GLT) linijski elementi.

Modelu KE je treba podati materialne lastnosti, ki so za lesene konstrukcije še posebno negotove, saj je variabilnost med posameznimi (nazivno enakimi) elementi velika. To gre pripisati predvsem nehomogeni strukturi, ki jo sestavljajo celuloza, hemiceluloza in lignin, ki se med seboj močno razlikujejo po togosti in gostoti. Glede na njihovo vsebnost v lesu se materialne lastnosti razlikujejo. Na primer, gostota navadne smreke

z 12-odstotno vsebnostjo vlage se lahko giblje med 350 in 600 kg/m³, modul elastičnosti vzdolž vlaken pa med 13,5 in 16,7 GPa [Persson, 2000]. V primeru konstrukcijskih lesenih elementov (kot so CLT in GLT) se kompleksnost zaradi lepljenih povezav med deskami še poveča. Na primer, ravninski strižni modul CLT-plošč se na podlagi evropskih tehničnih ocen (ETA) različnih proizvajalcev giblje med 250 MPa in 500 MPa, čeprav je vedno uporabljen les navadne smreke kakovosti C24. Brandner in sodelavci [Brandner, 2016] za take CLT-plošče priporočajo ravninski strižni modul v višini 450 MPa, če ozki robovi lamel niso lepljeni, oziroma 650 MPa, kadar so. Na negotovost materialnih lastnosti nadalje vpliva še vsebnost vlage, ki v splošnem zmanjšuje trdnost in togost lesa [Akter, 2023; Brandner, 2018]. Nasprotno pa vsebnost vlage vpliva na togost CLT-plošč. Sušenje plošč namreč povzroči razpoke v lamelah, zaradi česar se togost zmanjša. Pri ponovnem navlaženju les nabrekne, togost pa se poveča.

Les se zaradi svoje vlaknaste strukture v inženirskih aplikacijah pogosto obravnava kot prečno izotropen material, pri čemer je togost vzdolž vlaken bistveno večja (pri navadni smreki 20- do 30-krat večja) od togosti pravokotno na vlakna [Persson, 2000]. Razlika med togostjo lesa vzdolž vlaken ter pravokotno na njih postane pomembna pri konstrukcijah, kjer se navpične obremenitve prenašajo preko etažnih plošč iz CLT (angleško se ta tip konstrukcije imenuje »platform frame«). Zaradi manjše trdnosti se pri velikih navpičnih tlačnih obremenitvah pojavijo neelastične deformacije etažne plošče iz CLT pravokotno na vlakna [D'Arenzo, 2021]. To lahko povzroči dovolj velike deformacije, da se poškodujejo nekonstrukcijski elementi, kot so zunanje in notranje obloge.

Poleg materialnih lastnosti lesa je treba določiti še togost povezav med lesenimi elementi. Pri potresu imajo te povezave velik vpliv na dinamično obnašanje stavbe, saj sipajo energijo. Za razumevanje obnašanja jeklenih povezav pri ekstremnih dinamičnih obremenitvah so bili izvedeni mnogi statični in ciklični testi [D'Arenzo, Casagrande, 2019; D'Arenzo, Rinaldin, 2019; Gavric, 2015c, 2015a, 2015b]. Ko pa gre za dinamično obremenjevanje lesene konstrukcije z majhnimi amplitudami, pa je vpliv povezav manj raziskan. V primeru lesene CLT-konstrukcije z navpično obremenitvijo je jasno, da se zibanje CLT-stene pojavi, šele ko prečna sila prekorači določeno mejno silo [Casagrande, 2021]. Togost je tako odvisna od amplitude dinamičnega vzbujanja, kar je bilo opaženo tudi v primeru lesene stavbe, kjer je dolgotrajno spremljanje dinamičnega obnašanja zabeležilo potres [Cisterna, 2024]. Lastna frekvenca je bila pri vzbujanju potresa za 15 % nižja kot pri vetrni obtežbi. Z uporabo meritev dinamičnega vzbujanja manjših amplitud so bili kalibrirani modeli KE treh stavb [Kurent, Friedman, & Brank, 2024], na podlagi česar je bilo osnovanih nekaj priporočil, vendar pa splošno uveljavljenih smernic za modeliranje togosti jeklenih povezav v primeru vetrne obtežbe še ni.

2 METODOLOGIJA

Analiziranih je bilo deset lesenih in hibridnih lesenih stavb, za katere so v literaturi na voljo podatki, potrebni za izračun merila ugodja na podlagi standarda ISO 10137 ter za izračun odziva na vetrno obtežbo po EC1 [Slovenski standard, 2005a]. Podatki o dimenzijah in masah stavb, izmerjene prve lastne frekvence ter razmerja dušenja so zbrani v Preglednici 1. Dve

izmed analiziranih stavb poleg lesa v nosilni konstrukciji vsebujeta še druge konstrukcijske materiale. Nosilno konstrukcijo stavbe 6 sestavljajo leseni stebri in nosilci, armiranobetonsko jedro ter armiranobetonske etažne plošče, prva etaža pa je v celoti armiranobetonska. Stavba 9 vsebuje jeklene stebre, lesene nosilce in etažne plošče ter armiranobetonsko jedro. Prve tri etaže so v celoti armiranobetonske. Preostale analizirane stavbe imajo nosilno konstrukcijo izključno iz lesa. Za primerjavo med stavbami je v Preglednici 1 podana tudi prostorninska masa m_v , pri čemer je celotna masa stavbe normirana na njeno prostornino, izračunano kot produkt med bruto tlorisno površino tipične etaže in višino stavbe. Hibridni leseni stavbi (6 in 9) imata najvišjo prostorninsko maso. Poleg tega izstopata stavbi 3 in 5, kjer je uporabljen betonski estrih debeline med 8 in 10 cm. Stavba 10 pa vključuje dodano maso v zgornjih etažah v obliki betonskih etažnih plošč prav za zmanjševanje odziva stavbe na vetrno obtežbo. Pri preostalih lesenih stavbah se prostorninska masa giblje med 90 in 140 kg/m³.

Standard ISO 10137 za določitev sprejemljivosti nihanja uporablja maksimalne pospeške zaradi vetra s povratno dobo enega leta. Pri tem loči med dvema mejnima krivuljama – eno za stanovanjske in drugo za poslovne prostore. Grafa sta prikazana na Sliki 1, sprejemljivi pospeški so pod ustrezno krivuljo.

Izračun največjih karakterističnih pospeškov nihanja v smeri vetra a_{max} se izvede na podlagi EC1 (dodatek B) kot

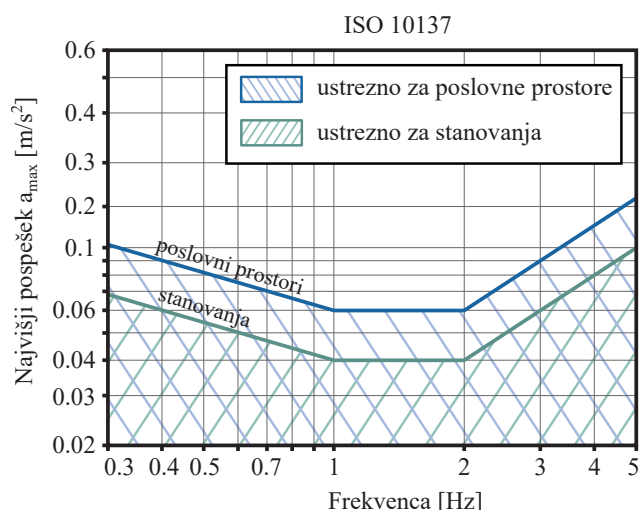
$$a_{max} = k_p \sigma_a, \quad (2)$$

kjer k_p predstavlja faktor največjih pospeškov (odvisen je od karakteristik stavbe in najpogosteje zavzema vrednost med 3 in 4), σ_a pa standardno deviacijo pospeškov, ki se po EC1 izračuna kot

$$\sigma_a(z) = \frac{c_f \rho b I_p(z_s) v_m^2(z_s)}{m_e} R K_x \phi(z), \quad (3)$$

Stavba	Št. etaž	$h \times b \times d$ [m]	f [Hz]	ζ [%]	m [t]	m_v [kg/m ³]	Ref.
1	7	22×31×28	2,85	1,56	1270	105	[Kurent, Brank, 2023]
2	8	27×23×15	1,88	1,60	1000	107	[Kurent, Friedman, Aloisio, 2024]
3	9	28×27×22	1,98	1,51	1153	98	[Tulebekova, 2023]
4	8	28×21×16	1,88	1,89	900	96	[Janot, 2025]
5	10	30×26×14	2,15	1,47	2400	220	[Tulebekova, 2023]
6	12	36×46×16	1,39	1,69	7385	274	[Manthey, 2021]
7	13	39×26×14	1,30	1,31	2639	186	[Tulebekova, 2023]
8	14	51×23×21	0,98	1,73	3325	135	[Olsen, 2016]
9	16	56×30×17	0,95	1,62	6976	252	[Flamand, 2023]
10	18	74×36×15	0,49	1,30	7106	174	[Tulebekova, 2022]

Preglednica 1. Podatki o desetih analiziranih stavbah, kjer so višina h , širina b in globina d podane v skladu z definicijo poglavja 2.1. Dinamične lastnosti stavbe vključujejo izmerjene prve lastne frekvence stavbe f in razmerja dušenja ζ . Za celotno maso stavbe m je predpostavljeno, da je enakomerno porazdeljena, na podlagi česar je izračunana prostorninska masa m_v .



Slika 1. Merilo ugodja po ISO 10137 za stanovanjske in poslovne prostore.

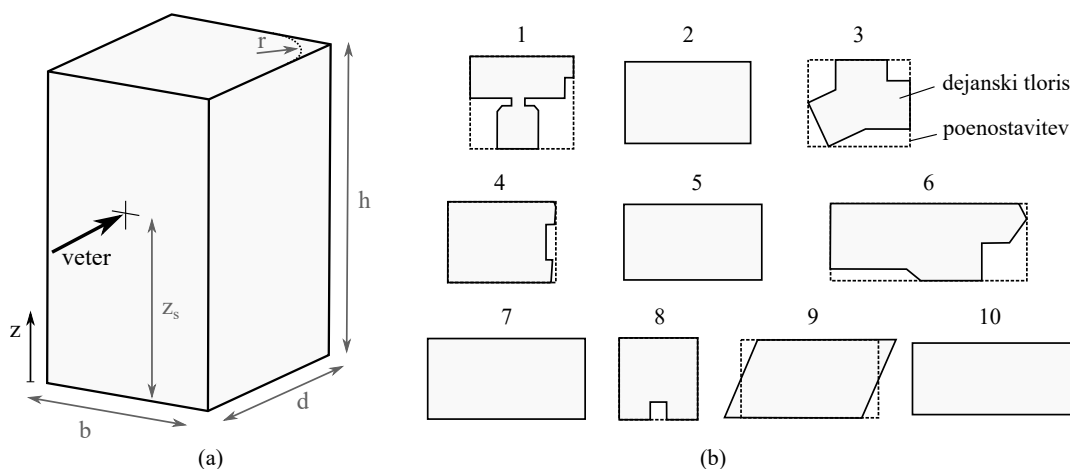
pri čemer so ρ gostota zraka, b širina stavbe (kot definirana v poglavju 2.1) ter m_e ekvivalentna masa (kot definirana v poglavju 2.3). Na koeficient sile c_f vpliva oblika stavbe (kot so dimenzije in zaobljenost robov stavbe). Okoliški teren vpliva na intenzivnost turbulence $I_p(z)$ ter na srednjo hitrost vetra $v_m(z)$. Slednja je na podlagi vplivov terena transformirana temeljna vrednost osnovne hitrosti vetra $v_{b,0}$, ki je definirana s strani nacionalnega dodatka EC1 [Slovenski standard, 2008]. Za Slovenijo se $v_{b,0}$ določi v treh conah (cona 1: večina Slovenije, cona 2: Trnovski gozd, Notranjska, Karavanke in cona 3: Primorje, Kras in del Vipavske doline) glede na nadmorsko višino. Dinamične lastnosti stavbe so upoštevane v resonančnem odzivu R , brezdimenzijskem koeficientu K_x ter lastnem vektorju $\phi(z)$. Koordinata z je definirana po višini stavbe, kot prikazuje Slika 2a. Referenčna višina z_s pa je za stavbe definirana kot $z_s=0.6 h$.

Parametre, ki jih je treba določiti za izračun maksimalnih pospeškov, lahko ločimo na parametre okolice ter parametre stavbe. Med parametri okolice sta pomembni temeljna vrednost osnovne hitrosti vetra $v_{b,0}$ ter prisotnost visokih ovir v

okolici stavbe, ki se upoštevajo z izbiro kategorije terena (od 0 do 4 glede na višino stavb v okolici). Hribovitost terena je prav tako pomemben dejavnik, ki vpliva na $v_m(z)$, vendar pa je zaradi osredotočenosti tega članka na dimenzioniranje lesenih stavb v nadaljnji analizi privzet raven teren. Parametri stavbe, ki vključujejo dimenzije stavbe, dinamične lastnosti ter maso, so natančneje opisani v poglavjih od 2.1 do 2.3.

2.1 Dimenzije

Pri stavbah prizmatične oblike, še posebej takšnih s tlorisom pravokotne oblike, je določitev dimenzij za izračun po EC1 preprosta. Tlorisi stavb, ki odstopajo od pravokotne oblike, so bili poenostavljeni, kot je razvidno s Slike 2b. Širina b in globina d stavbe sta definirani glede na smer vetra. Širina je dimenzija, ki je pravokotna na smer vetra, globina pa je z njo vzporedna (glej Sliko 2a). Višina h je definirana kot razdalja do vrhnje etažne plošče. V primeru stavbe 10, kjer je na strehi še dodatna konstrukcija, je bila ta zanemarljiva. V primeru zaobljenih robov se upošteva še njihov radij r . Pri vseh stavbah je na začetku privzeta predpostavka ostrih robov, vpliv zaobljenosti pa je preverjen v poglavju 3.2.



Slika 2. Predpostavljene so stavbe v obliki kvadra. Definirane so (a) dimenzije stavbe ter prikazani (b) poenostavljeni pravokotni tlorisi.

2.2 Dinamične lastnosti

Za izračun dinamičnega odziva stavbe so potrebne dinamične lastnosti – prva upogibna lastna frekvenca, pripadajoča nihajna oblika ter dušenje. EC1 ponudi poenostavljen izračun lastne frekvence stavbe po enačbi (1), vendar se v tej analizi uporabijo izmerjene lastne frekvence stavb, kot prikazuje Preglednica 1. Nihajna oblika stavbe se lahko privzame kot normiran pomik ϕ po koordinati višine stavbe z

$$\phi(z) = \left(\frac{z}{h}\right)^{\xi}, \quad (4)$$

kjer je ξ eksponent, ki definira obliko lastnega vektorja. Za različne stavbe EC1 priporoča vrednosti ξ med 0,6 in 1,5.

Dušenje je pomemben dejavnik za določitev resonančnega obnašanja. EC1 dušenje upošteva v obliki logaritmskega dekrementa δ , ki se določi kot seštevek

$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d, \quad (5)$$

kjer je δ_s logaritmski dekrement zaradi dušenja konstrukcije, δ_a logaritmski dekrement zaradi aerodinamičnega dušenja ter δ_d logaritmski dekrement zaradi dušenja posebnih naprav, ki dušijo nihanje strukture. EC1 predlaga različne vrednosti δ_s glede na tip in material konstrukcije, vendar nima specifičnega priporočila za lesene stavbe. Za dušenje je tako določena vrednost na podlagi izmerjenega viskoznega razmerja dušenja ζ [Maia, 1997] kot

$$\delta = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}. \quad (6)$$

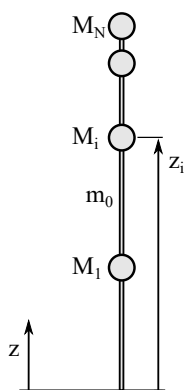
Razmerja dušenja ζ analiziranih stavb so prikazana v Preglednici 1, kjer je zaradi velike negotovosti določanja dušenja uporabljena povprečna vrednost dušenja prve in druge nihajne oblike.

2.3 Ekvivalentna masa

Ekvivalentna masa m_e je v EC1 definirana kot

$$m_e = \frac{\int_0^h m(z) \phi^2(z) dz}{\int_0^h \phi^2(z) dz}. \quad (7)$$

Kadar je masa $m(z)$ enakomerno porazdeljena, se izračun linijsko porazdeljene mase poenostavi na $m_e = M/h$, kjer je M celotna masa stavbe. Za neenakomerno porazdeljeno maso EC1 predlaga poenostavitev, kjer se za m_e vzame linijsko porazdeljena masa v zgornji tretjini stavbe. Za bolj natančen izračun v primeru neenakomerno porazdeljene mase po višini se lahko uporabi predpostavka kombinacije med enakomerno linijsko porazdeljeno maso $m_0 = M_0/h$ ter N diskretnih mas M_i , ki so locirane na višinah z_i , kot je prikazano na Sliki 3.



Slika 3. Kombinacija enakomerno porazdeljene mase m_0 in diskretnih mas M_i na višinah z_i .

Linijsko porazdeljena masa je tako definirana kot

$$m(z) = m_0 + \sum_{i=1}^N M_i \delta_{\text{Dirac}}(z - z_i), \quad (8)$$

kjer je $\delta_{\text{Dirac}}(z)$ Diracova delta funkcija. Ob uporabi Enačbe (8) se Enačba (7) pretvori v

$$m_e = \frac{\int_0^h m_0 \phi^2(z) dz + \sum_{i=1}^N M_i \delta_{\text{Dirac}}(z - z_i) \phi^2(z) dz}{\int_0^h \phi^2(z) dz}. \quad (9)$$

Ob upoštevanju pravil integriranja vsote ter zmnožka s konstanto, se Enačba (9) pretvori v

$$m_e = m_0 + \sum_{i=1}^N \frac{M_i \int_0^h \delta_{\text{Dirac}}(z - z_i) \phi^2(z) dz}{\int_0^h \phi^2(z) dz} \quad (10)$$

ter ob upoštevanju pravila za integriranje Diracove delta funkcije v

$$m_e = m_0 + \sum_{i=1}^N \frac{M_i \phi^2(z_i)}{\int_0^h \phi^2(z) dz}. \quad (11)$$

Ob predpostavki lastnega vektorja v obliki iz Enačbe (4) se integral $\int_0^h \phi^2(z) dz$ izračuna kot

$$\begin{aligned} \int_0^h \phi^2(z) dz &= \int_0^h \left(\frac{z}{h}\right)^{2\xi} dz = \left(\frac{1}{h}\right)^{2\xi} \int_0^h z^{2\xi} dz = \left(\frac{1}{h^{2\xi}}\right) \left[\frac{z^{2\xi+1}}{2\xi+1}\right]_0^h = \\ &= \left(\frac{1}{h^{2\xi}}\right) \left(\frac{h^{2\xi+1}}{2\xi+1}\right) = \frac{h}{2\xi+1}. \end{aligned} \quad (12)$$

Enačba (11) se tako pretvori v

$$m_e = m_0 + \sum_{i=1}^N \frac{M_i}{h} (2\xi + 1) \left(\frac{z_i}{h}\right)^{2\xi} \quad (13)$$

ali ob poenostavitvi $\xi=1$ (kar EC1 priporoča za nekatere stavbe) in dodajanju ene točkovne mase M_1 na vrhu stavbe

$$m_e = m_0 + 3 \frac{M_1}{h}. \quad (14)$$

Iz te enačbe je razvidno, da ima dodajanje mase na vrhu stavbe trikratni vpliv na ekvivalentno maso.

3 REZULTATI

Najprej za analizirane stavbe izračunamo najvišji pospešek po Enačbi (2) ter ovrednotimo njegovo ustreznost na podlagi ISO 10137. Za izračun so bile uporabljene dejanske dimenzije, masa in dinamične lastnosti stavbe, kot so podane v Pre-

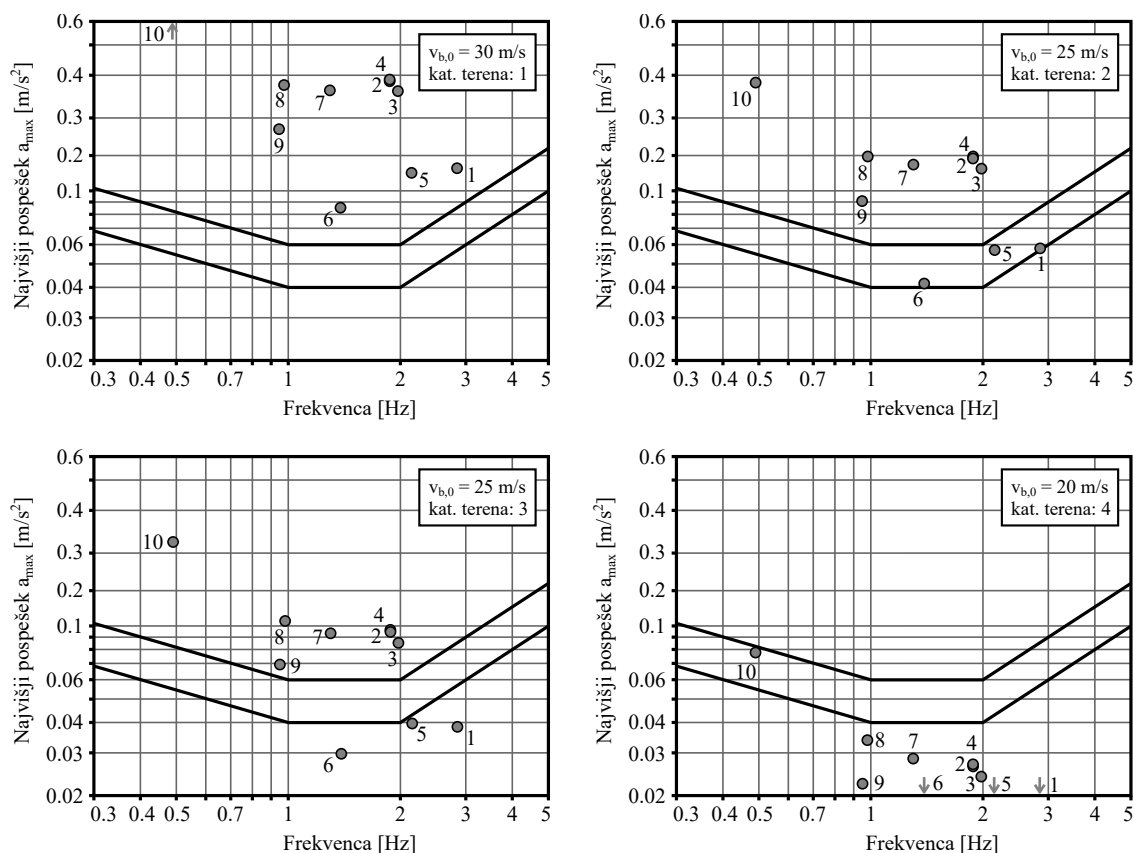
glednici 1. Niso pa se upoštevali dejanski pogoji okolice, kot so temeljna vrednost osnovne hitrosti vetra (podana na podlagi ustreznih nacionalnih dodatkov, hribovitost in kategorija terena). Analiza je namreč osredotočena na primerjavo med konstrukcijami stavb in njihov odziv na enotno vetrno obtežbo. Zaradi tega je treba poudariti, da izračuni ne izražajo dejanske ustreznosti analiziranih stavb in jih je treba razumeti v kontekstu predpostavljenih obremenitvenih pogojev. Poleg tega je izračun narejen na celotni višini stavbe $z=h$, čeprav je najvišja točka, kjer se zagotavlja ugodje uporabnikov, po navadi nižje (recimo višina etažne plošče najvišjega uporabnega nadstropja). Slika 4 prikazuje najvišji pospešek analiziranih stavb ob predpostavki različnih kombinacij temeljne vrednosti osnovne hitrosti vetra $v_{b,0}$ ter kategorije terena. Iz rezultatov je razvidno, da je ustreznost konstrukcije z vidika uporabnosti stavbe pri vetrni obtežbi zelo odvisna od pogojev okolice. Na vetrovno bolj izpostavljenih lokacijah (kot so denimo Primorje, Kras in del Vipavske doline, kjer se predpostavlja $v_{b,0}=30$ m/s) so vse analizirane stavbe neustrezne ne glede na namen rabe (stanovanjski ali poslovni). Po drugi strani pa je večina stavb ustreznih pri pogojih v manj izpostavljenem mestnem okolju (v primeru Ljubljane se predpostavlja $v_{b,0}=20$ m/s). V nadaljevanju se izvede občutljivostna analiza parametrov stavbe in okolice, kjer se za začetne pogoje uporabita hitrost vetra $v_{b,0}=25$ m/s ter kategorija terena 3.

3.1 Vpliv terena

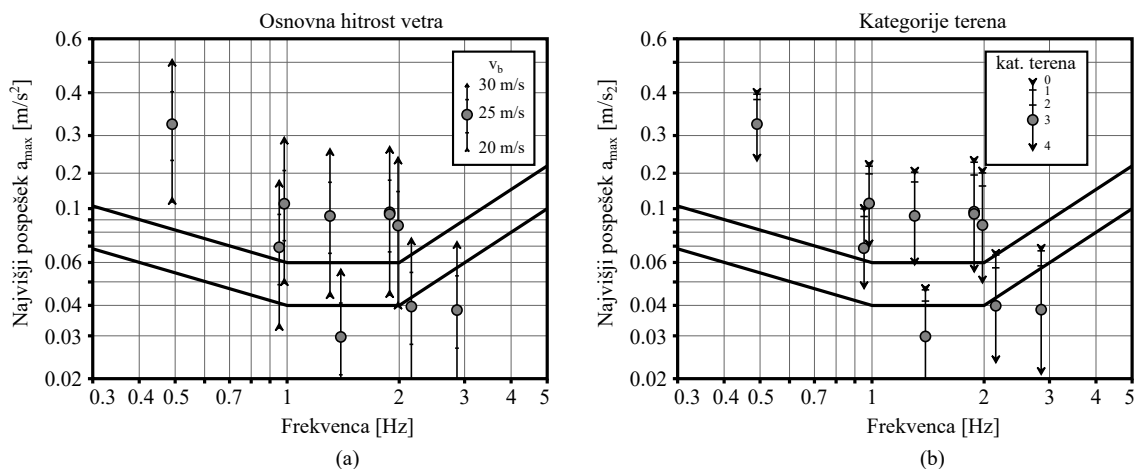
Izpostavljenost vetrovnim pogojem je eden najpomembnejših vplivov na uporabnost stavbe zaradi vetrne obtežbe. Pri tem sta upoštevana dva parametra, temeljna vrednost osnovne hitrosti vetra $v_{b,0}$ in kategorija terena. V nižinskih legah do 800 m nadmorske višine se v Sloveniji glede na lokacijo upošteva $v_{b,0}$ med 20 m/s in 30 m/s, kar je primerljivo s predpisanimi vrednostmi za večji del Evropske unije. Iz Slike 5a je razvidno, da se zgornja meja vrednosti $v_{b,0}$ v primerjavi s spodnjo odraža v več kot petkratni vrednosti največjih pospeškov pri vseh analiziranih stavbah. Pri analizi terena, kot prikazuje Slika 5b, so pospeški v kategoriji 0 (ki ustreza izpostavljenim obmorskim legam) dva- do štirikratni v primerjavi s kategorijo 4 (ki ustreza mestnemu okolju z višjimi stavbami). Iz tega je razvidno, da je težavnost zadovoljevanja meril ugodja v veliki meri odvisna od lokacije stavbe.

3.2 Vpliv oblike stavbe

Kadar je v začetnih fazah zasnove ugotovljeno, da bo vetrna obtežba eden od pomembnih kriterijev pri projektiranju stavbe, je možnih ukrepov za izboljšanje uporabnosti zaradi nihanja pri vetrni obtežbi več. Eden od njih je spreminjanje dimenzij stavbe za boljše uporabnost zaradi nihanja pri vetrni obtežbi. Te so sicer omejene s kapacitetami zemljišča, prostorskimi načrti ter željami in sredstvi investitorja. V občutljivo- stni analizi so se od dejanskih dimenzij za do 20 % zmanjšale oziroma zvišale širina, globina ter višina, pri čemer pa se je proporcionalno spremenila tudi masa stavbe, tako da je prostorninska masa ostala enaka. Pri spreminjanju višine stavbe se je uskladila tudi frekvenca na podlagi predpostavke obratnega sorazmerja med višino in lastno frekvenco iz Enačbe (1). Pri povečanju višine za faktor 1,2 se je torej lastna frekvenca



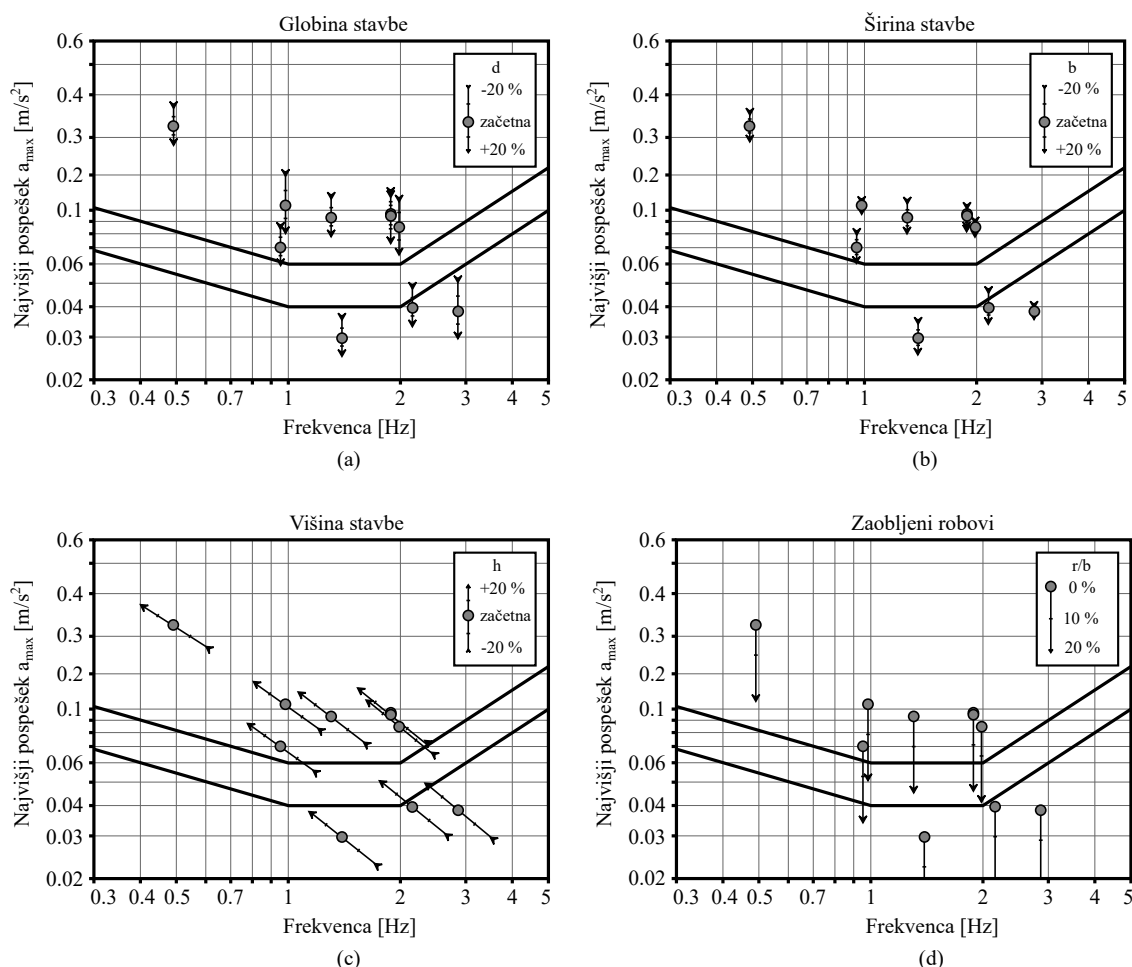
Slika 4. Najvišji pospeški nihanja stavb, izračunani po EC1, ob različnih predpostavkah temeljne vrednosti hitrosti vetra $v_{b,0}$ in kategorije terena. Grafi prikazujejo mejni krivulji po ISO 10137. Na grafih so označene tudi številke desetih analiziranih stavb.



Slika 5. Vpliv (a) hitrosti temeljne vrednosti hitrosti vetra $v_{b,0}$ in (b) kategorije terena na pričakovane pospeške nihanja stavb. Grafi prikazujejo mejni krivulji po ISO 10137.

zmanjšala za faktor 1,2. Iz rezultatov analiz, ki so prikazani na Sliki 6, je razvidno, da povečanje globine ali širine zmanjšuje pričakovane pospeške, povečanje višine pa jih poveča. Zanimivo opažanje je tudi, da pri stavbah z lastno frekvenco, nižjo od 1 Hz, povišanje stavbe kljub povečanju pospeškov ne poslabša znatno merila ugodja zaradi oblike mejne krivulje ISO 10137. To namiguje na možnost izgradnje še višjih lesenih stavb v prihodnosti.

Poleg gabaritov stavbe se je analiziral še vpliv zaobljenih robov. Razmerje med radijem zaobljenih robov in širine stavbe se je povečalo do vrednosti 0,2, kar znatno zmanjša silo vetra ter posledično pričakovane pospeške nihanja.



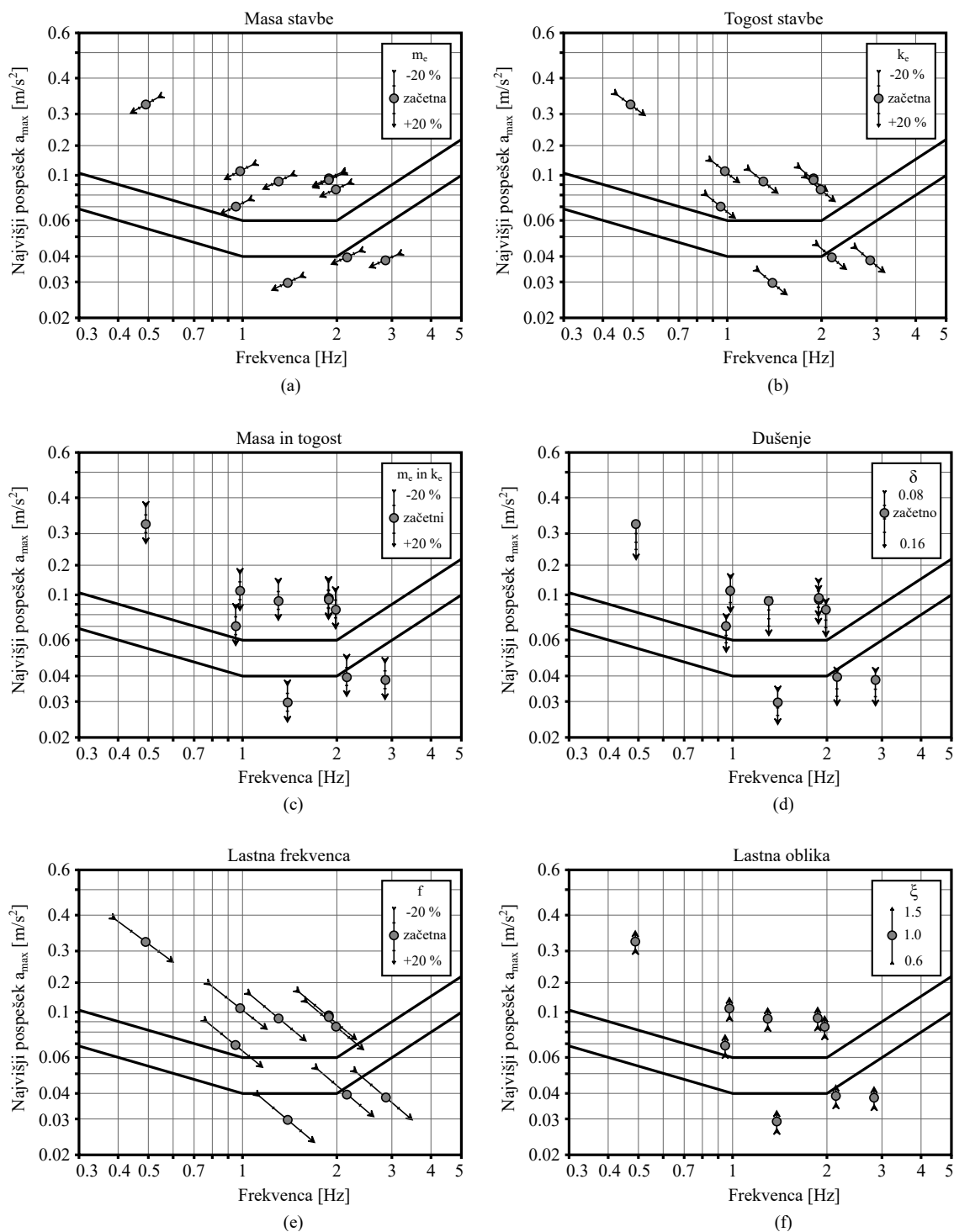
Slika 6. Vpliv spreminjanja (a) globine, (b) širine, (c) višine stavbe ter (d) radija zaobljenih robov na pričakovane pospeške nihanja stavb. Grafi prikazujejo mejni krivulji po ISO 10137.

3.3 Vpliv dinamičnih lastnosti

Nazadnje se je analiziral vpliv dinamičnih lastnosti na pričakovane pospeške. Na lastno frekvenco se lahko vpliva preko spreminjanja ekvivalentne mase m_e ali ekvivalentne togosti k_e , pri čemer je upoštevana enačba za izračun lastne frekvence dinamičnega sistema z eno prostostno stopnjo $f = \sqrt{k_e/m_e}$. V primeru spreminjanja mase se je predpostavila konstantna togost, pri spreminjanju togosti pa se je predpostavila konstantna masa. Treba je poudariti, da je povečanje ekvivalentne mase večje, če se jo dodaja na vrhu stavbe. Ob upoštevanju Enačbe (14) ima masa, dodana na vrhu stavbe, trikrat večji vpliv kot masa, ki se jo enakomerno doda po vsej višini. Povečanje ekvivalentne mase za 20 % se z dodajanjem mase na vrhu stavbe tako lahko doseže že s približno 6,7 % celotne mase. Zanimivo opazanje na Slikah 7a in 7b je, da je za stavbe z lastno frekvenco, nižjo od 1 Hz, bolj učinkovito dodajanje mase, za stavbe z lastno frekvenco, višjo od 2 Hz, pa dodajanje togosti. Sočasno proporcionalno povečevanje mase in togosti, kot je prikazano na Sliki 7c, je najustreznejše pri stavbah z lastno frekvenco med 1 Hz in 2 Hz.

Dinamične lastnosti stavbe so v fazi projektiranja izredno težko napovedane natančno. Dušenje armiranobetonskih

stavb ali stavb z jekleno konstrukcijo se določi na podlagi priporočila EC1 za logaritemski dekrement dušenja konstrukcij. Priporočilo obstaja tudi za lesene mostove, ne pa tudi za lesene stavbe. Izmed izmerjenih podatkov desetih stavb se vrednosti viskoznega dušenja ζ gibljejo med 1,3 % in 1,9 %, kar po Enačbi (6) pomeni logaritemski dekrement δ med 0,08 in 0,12. Pri nekaterih lesenih stavbah so se izmerile celo precej višje vrednosti dušenja [Kurent, Ao, 2023], zato je parametrična analiza upoštevala negotovost δ med 0,08 in 0,16. Vpliv negotovosti določitve dušenja je prikazan na Sliki 7d. Tudi z določanjem lastnih frekvenc stavbe je povezano precej negotovosti. Za parametrično analizo, prikazano na Sliki 7e, je bila predpostavljena možnost napake pri določanju osnovne lastne frekvence do 20 %. Ta ima še posebej velik vpliv pri stavbah s frekvenco, višjo od 2 Hz. Nazadnje se je preveril vpliv nihajne oblike s spreminjanjem eksponenta ξ med vrednostma 0,6 in 1,5 (kar za različne stavbe priporoča EC1). Ta se je izkazal za manj pomembnega, kot je prikazano na Sliki 7f.



Slika 7. Vpliv spreminjanja (a) mase, (b) togosti, (c) mase ter togosti stavbe hkrati, (d) dušenja, (e) lastne frekvence in (f) nihajne oblike na pričakovane pospeške nihanja stavb. Grafi prikazujejo mejni krivulji po ISO 10137.

4 SKLEP

Na podlagi podatkov o desetih lesenih in hibridnih lesenih stavbah so se izračunali pričakovani pospeški nihanja zaradi vetrne obtežbe po EC1. Pospeški so bili uporabljeni za določitev merila ugodja po standardu ISO 10137. Ugotovljeno je

bilo, da ima lokacija (preko pričakovane hitrosti vetra) velik vpliv na težavnost zagotavljanja ugodja zaradi nihanja ob vetrni obtežbi. Večina izmed analiziranih stavb bi namreč zadostila merilom ugodja, če bi bile postavljene v Ljubljani, nobena izmed njih pa ga ne bi, če bi bile postavljene v Primorju ali na Krasu. Pri parametrični analizi dimenzij

stavbe je bilo ugotovljeno, da povečevanje širine ali globine (ob proporcionalnem povečanju mase) zmanjšuje pričakovane pospeške, medtem ko višina stavbe pospeške poveča. Zaradi neenakomerne percepcije nihanja in višje tolerance pospeškov pri nižjih frekvencah se pri povišanju stavb nad 50 m merilo ugodja ne poslabša drastično. To nakazuje na možnost izgradnje še višjih lesenih stavb v prihodnosti. Pri analizi dinamičnih lastnosti je bilo ugotovljeno, da povečanje tako mase kot togosti zmanjšuje pričakovane pospeške, vendar pa ima zaradi frekvenčno odvisne krivulje merila ugodja togost večji vpliv na stavbe s prvo lastno frekvenco nad 2 Hz ter masa na stavbe pod 1 Hz.

5 ZAHVALA

Raziskavo je podprla Evropska komisija preko projekta Horizon Europe Innovation Action 101092052 BUILDCHAIN.

6 LITERATURA

Akter, S. T., Binder, E., Bader, T. K., Moisture and short-term time-dependent behavior of Norway spruce clear wood under compression perpendicular to the grain and rolling shear, *Wood Material Science & Engineering*, 18(2), 580–593, <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2056715>, 2023.

ASCE/SEI 7-22, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, 2022.

Bezabeh, M. A., Bitsuamlak, G. T., Popovski, M., Tesfamariam, S., Dynamic Response of Tall Mass-Timber Buildings to Wind Excitation, *Journal of Structural Engineering*, 146(10), [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0002746](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002746), 2020.

Brandner, R., Cross laminated timber (CLT) in compression perpendicular to plane: Testing, properties, design and recommendations for harmonizing design provisions for structural timber products, *Engineering Structures*, 171(March), 944–960, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.02.076>, 2018.

Brandner, R., Flatscher, G., Ringhofer, A., Schickhofer, G., Thiel, A., Cross laminated timber (CLT): overview and development, *European Journal of Wood and Wood Products*, 74(3), 331–351, <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5>, 2016.

Casagrande, D., Pacchioli, S., Polastri, A., Pozza, L., Influence of the rocking behavior of shearwalls on the fundamental period of CLT structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 50(6), 1734–1754, <https://doi.org/10.1002/eqe.3420>, 2021.

Cisterna, A. J., Benedetti, F., Rosales, V., Almazán, J. L., Vega, A. O., Vibration based monitoring of a cross laminated timber building in a high seismicity zone, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, (0123456789), <https://doi.org/10.1007/s13349-024-00862-1>, 2024.

D'Arenzo, G., Casagrande, D., Polastri, A., Fossetti, M., Fragiaco, M., Seim, W., CLT Shear Walls Anchored with Shear-Tensi-

on Angle Brackets: Experimental Tests and Finite-Element Modeling, *Journal of Structural Engineering*, 147(7), 1–15, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0003008](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0003008), 2021.

D'Arenzo, G., Casagrande, D., Reynolds, T., Fossetti, M., In-plane elastic flexibility of cross laminated timber floor diaphragms, *Construction and Building Materials*, 209, 709–724, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.060>, 2019.

D'Arenzo, G., Rinaldin, G., Fossetti, M., Fragiaco, M., An innovative shear-tension angle bracket for Cross-Laminated Timber structures: Experimental tests and numerical modelling, *Engineering Structures*, 197(July), 109434, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109434>, 2019.

Edskär, I., Lidelöw, H., Dynamic properties of cross-laminated timber and timber truss building systems, *Engineering Structures*, 186, 525–535, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.136>, 2019.

Ellis, B. R., An assessment of the accuracy of predicting the fundamental natural frequencies of buildings and the implications concerning the dynamic analysis of structures, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 69(2), 763–776, 1980.

Flamand, O., Giovannelli, G., Manthey, M., Data Processing to Assess Structural Damping of Tall Timber Buildings, *Lecture Notes in Civil Engineering*, 432 LNCE, 640–648, https://doi.org/10.1007/978-3-031-39109-5_65, 2023.

Gavric, I., Fragiaco, M., Ceccotti, A., (a), Cyclic Behavior of CLT Wall Systems: Experimental Tests and Analytical Prediction Models, *Journal of Structural Engineering*, 141(11), [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0001246](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0001246), 2015.

Gavric, I., Fragiaco, M., Ceccotti, A., (b), Cyclic behavior of typical screwed connections for cross-laminated (CLT) structures, *European Journal of Wood and Wood Products*, 73(2), 179–191, <https://doi.org/10.1007/s00107-014-0877-6>, 2015.

Gavric, I., Fragiaco, M., Ceccotti, A., (c), Cyclic behaviour of typical metal connectors for cross-laminated (CLT) structures, *Materials and Structures*, 48, 1841–1857, <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0278-7>, 2015.

ISO 6897, Guidelines for the evaluation of the response of occupants of fixed structures, especially buildings and off-shore structures, to low-frequency horizontal motion (0.063 to 1 Hz). Geneva, 1984.

ISO 10137, Bases for design of structures—Serviceability of buildings and walkways against vibrations. Geneva, 2007.

Janot, D., Vieux-Champagne, F., Gueguen, P., Boudaud, C., Jung, A., 8-storey CLT building dynamical properties analysis and monitoring from construction to operating phase, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 58(1), <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02540-6>, 2025.

Johann, F. A., Carlos, M. E. N., Ricardo, F. L. S., Wind-induced motion on tall buildings: A comfort criteria overview, *Journal*

of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 142, 26–42, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.03.001>, 2015.

Johansson, M., Linderholt, A., Bolmsvik, Å., Jarnerö, K., Olsson, J., Reynolds, T., Building higher with light-weight timber structures - The effect of wind induced vibrations, In INTER-NOISE 2015 - 44th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, San Francisco, CA, USA, 2015.

Johansson, M., Linderholt, A., Jarnerö, K., Landel, P., Tall timber buildings - A preliminary study of wind-induced vibrations of a 22-storey building, WCTE 2016 - World Conference on Timber Engineering, (August), 2016.

Kurent, B., Ao, W. K., Pavic, A., Pérez, F., Brank, B., Modal testing and finite element model updating of full-scale hybrid timber-concrete building, Engineering Structures, 289, 116250, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116250>, 2023.

Kurent, B., Brank, B., Ao, W. K., Model updating of seven-storey cross-laminated timber building designed on frequency-response-functions-based modal testing, Structure and Infrastructure Engineering, 19(2), 178–196, <https://doi.org/10.1080/15732479.2021.1931893>, 2023.

Kurent, B., Friedman, N., Aloisio, A., Pasca, D., Tomasi, R., Brank, B., Bayesian model updating of eight-storey CLT building using modal data, Probabilistic Engineering Mechanics, 77(June), 103642, <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2024.103642>, 2024.

Kurent, B., Friedman, N., Brank, B., Modelling of Multi-Storey Cross-Laminated Timber Buildings for Vibration Serviceability, Buildings, 14, 689, 2024.

Lamb, S., Kwok, K. C. S., The fundamental human response to wind-induced building motion, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 165(December 2016), 79–85, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.03.002>, 2017.

Maia, N. M. M., Silva, J. M. M., Theoretical and Experimental Modal Analysis (1st Ed). Baldock, UK: Research Studies Press, 1997.

Malo, K. A., Abrahamsen, R. B., Bjertnæs, M. A., Some structural design issues of the 14-storey timber framed building "Treet" in Norway, European Journal of Wood and Wood Products, 74(3), 407–424, <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1022-5>, 2016.

Manthey, M., Flamand, O., Jalil, A., Pavic, A., Ao, W. K., Effect of non-structural components on natural frequency and damping of tall timber building under wind loading, World Conference on Timber Engineering 2021, WCTE 2021, 2021.

Olsen, M. F., Hansen, O., Measuring vibrations and assessing dynamic properties of tall timber buildings (Master thesis). Norwegian University of Science and Technology, 2016.

Orr, J., Drewniok, M. P., Walker, I., Ibell, T., Copping, A., Emmitt, S., Minimising energy in construction: Practitioners' views

on material efficiency, Resources, Conservation and Recycling, 140(June 2018), 125–136, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.09.015>, 2019.

Persson, K., Micromechanical Modelling of Wood and Fibre Properties. Lund University, <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1389.7685>, 2000.

Reynolds, T., Feldmann, A., Ramage, M., Chang, W.-S., Harris, R., Dietsch, P., Design Parameters for Lateral Vibration of Multi-Storey Timber Buildings, In Rainer Görlacher (Ed.), Proceedings of the International Network on Timber Engineering Research (pp. 365–376). Graz, Austria: Timber Scientific Publishing, 2016.

Slovenski standard, SIST EN 1991-1-4:2005 - Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije. Del 1-4: Splošni vplivi - Obtežba vetra (2005), 2005.

Slovenski standard, SIST EN 1998-1:2005 - Evrokod 8, Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij. Del 1, Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe (2005), 2005.

Slovenski standard, SIST EN 1991-1-4:2005/A101:2008 - Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije. Del 1-4: Splošni vplivi - Obtežba vetra - Nacionalni dodatek (2008), 2008.

Tulebekova, S., Malo, K. A., Rønnquist, A., Dynamic identification and model calibration of connection stiffness in multi-storey cross-laminated timber buildings, Journal of Building Engineering, 72, 106607, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106607>, 2023.

Tulebekova, S., Malo, K. A., Rønnquist, A., Nåvik, P., Modeling stiffness of connections and non-structural elements for dynamic response of taller glulam timber frame buildings, Engineering Structures, 261, 114209, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114209>, 2022.

Zhao, X., Zhang, B., Kilpatrick, T., Sanderson, I., Liu, D., Numerical Analysis on Global Serviceability Behaviours of Tall Glulam Frame Buildings to the Eurocodes and UK National Annexes, Journal of Civil Engineering and Construction, 10(3), 109–122, <https://doi.org/10.32732/jceec.2021.10.3.109>, 2021.