

Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet

Anamarija Perić

**NUMERIČKA ANALIZA VISOKE CLT ZGRADE S KRUTOM JEZGROM U SEIZMIČKI
AKTIVNOM OKRUŽENJU**

Zagreb, 2016.

Ovaj rad izrađen je pri Zavodu za konstrukcije Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom Prof. dr. sc. Vlatke Rajčić, dipl. ing. građ. i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2015./2016.

Sadržaj

1.	UVOD	1
1.1.	Povijest drvene gradnje.....	1
1.2.	Suvremeni nosivi sustavi drvene gradnje - CLT	5
2.	MOTIVACIJA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA.....	7
3.	KRIŽNO LAMELIRANO DRVO.....	10
3.1.	Definiranje CLT-a	10
3.2.	Prednosti CLT panela.....	13
3.3.	Postupak proizvodnje i ugradnje.....	15
3.4.	Današnji doseg gradnje CLT-om	18
3.5.	Razvitak novih hibridnih sustava s CLT-om	22
3.6.	Parametri proračuna i uporabivosti CLT-a	23
3.7.	Analitičke i eksperimentalne metode proračuna	23
3.8.	Seizmička otpornost CLT Zgrada	24
4.	POSTUPAK PRORAČUNA CLT ELEMENATA	26
4.1.	Elementi opterećeni savijanjem.....	26
4.2.	Elementi opterećeni savijanjem: Savijanje (izvan ravnine).....	26
4.3.	Elementi opterećeni savijanjem: Posmik (izvan ravnine).....	27
4.4.	Elementi opterećeni savijanjem: Izvijanje izvan ravnine	28
4.5.	Tlačni elementi, puni i masivni stupovi i zidovi	28
4.6.	Čimbenik stabilnosti stupa, C_p	29
4.7.	Minimalna krutost savijanja, $E_{I_{app-min}}$	29
4.8.	Vlačni elementi.....	29
4.9.	Elementi opterećeni savijanjem i uzdužnom silom.....	30
4.10.	Nosivost elemenata.....	30
	Okomito na vlakanca	30
	Paralelno na vlakanca.....	31
5.	MODELIRANJE CLT ELEMENATA	32
5.1.	Uvod u modeliranje CLT međukatnih, krovnih i zidnih konstrukcija i njihova ograničenja ..	32
6.	OPIS NUMERIČKOG MODELA	34
6.1.	Opis modela zgrade od CLT-a	35
6.2.	Opis Mehaničke karakteristike križno lameliranog drva i ab elemenata	39
6.3.	Analiza opterećenja.....	40

6.4.	Modeliranje spojnih sredstva	41
6.5.	Seizmički proračun i spektralna analiza.....	47
7.	REZULTATI NUMERIČKIH ANALIZA	50
8.	Analiza rezultata numeričkog modela.....	60
8.1.	Analiza rezultata u osi A	61
8.2.	Analiza rezultata u osi B	63
8.3.	Analiza rezultata u osi C	65
8.4.	Diskusija analize rezultata	67
9.	DIMENZIONIRANJE CLT ELEMENATA.....	68
10.	ZAKLJUČAK.....	72

1. UVOD

Iako je drvo jedno od najstarijih i najučestalijih konstrukcijskih materijala, često se percipira kao slabije i podložnije požaru za razliku od čelika i betona. Tako, u prošlom stoljeću došlo je do naglog pada gradnje drvom iz razloga što su manje stambene konstrukcije, zbog novih zahtjeva u građevinarstvu, zamijenjene visokim i površinski većim građevinama za koje klasična drvena gradnja nije prikladna. No, posljednjih desetljeća stručnjaci su bili privučeni njegovim održivim značajkama, a neke od njih su ta što drvo pohranjuje ugljikov dioksid i može se u potpunosti obnoviti, te sprječava zagađenje koje se uobičajeno dešava u procesu proizvodnje čelika i betona. Također, ono nudi jedinstvene mogućnosti arhitektonskog oblikovanja. Zahvaljujući brojnim ispitivanjima u Europi, Kanadi i Novom Zelandu, inženjeri su se počeli uvjeravati u prednosti drveta kao materijala za izgradnju građevina. Ipak, iako drvene visoke strukture postaju arhitektonski sve zanimljivije, projektantske norme većine zemalja ograničavaju katnost drvenih konstrukcija, posebice u seizmički aktivnim zonama, stoga su istraživanja na području ponašanja i mogućnosti izgradnje drvenih visokih građevina relativno rijetke i nedovoljno istražene. Da bi se na posljetku osigurala detaljna analiza mogućnosti primjene drva u izgradnji visokih građevina, potrebno je razmotriti čitav niz čimbenika o kojima takva mogućnost ovisi. Takva analiza ujedno zahtjeva ne samo znanstveni pristup kojim će se razmotriti ponašanje materijala i spojeva u takvoj konstrukciji, već inženjerski pristup koji će voditi ka optimiziranju oblika i visine konstrukcije.

1.1.Povijest drvene gradnje

Yingxian Pagoda, deveterokatna, 67m visoka pagoda smještena u pokrajini Shanxi koja se nalazi u Sjevernoj Kini, izgrađena 1056.g.je najstarija svjetska postojeća višekatna drvena zgrada. Izgrađena je na 4 metra visokim kamenim temeljima i u potpunosti se sastoji od drveta. Interijer i eksterijer kružnog rasporeda drvenih stupova podupire 5 vidljivih katova i 4 dodatna skrivena. Preživjela je 900 godina seizmičke aktivnosti, uključujući 7 jakih potresa sa minimalnim oštećenjima. UNSECO ju opisuje kao čudo u povijesti kineske arhitekture (Slika 1.1.)

Prema UNESCO crkve, predstavljaju jednu od najrazrađenijih i tehnološki naprednih tipova drvenih konstrukcija koje postoje u sjeverno-zapadnoj Europi tijekom srednjeg vijeka. Izgrađena oko 1130.u Sognog Fjordane, Norveška, Urnes Stavkirke je jedna od najstarijih i najbolje očuvanih primjera (Slika 1.2). Izgrađena djelomično od elemenata druge crkve

sagrađene na istom mjestu stoljeće ranije sastoji se u potpunosti od drveta sa velikim stupovima i lukovima koji podupiru konstrukciju.



Slika 1.1 Yingxian Pagoda, Shanxi, China, 1056



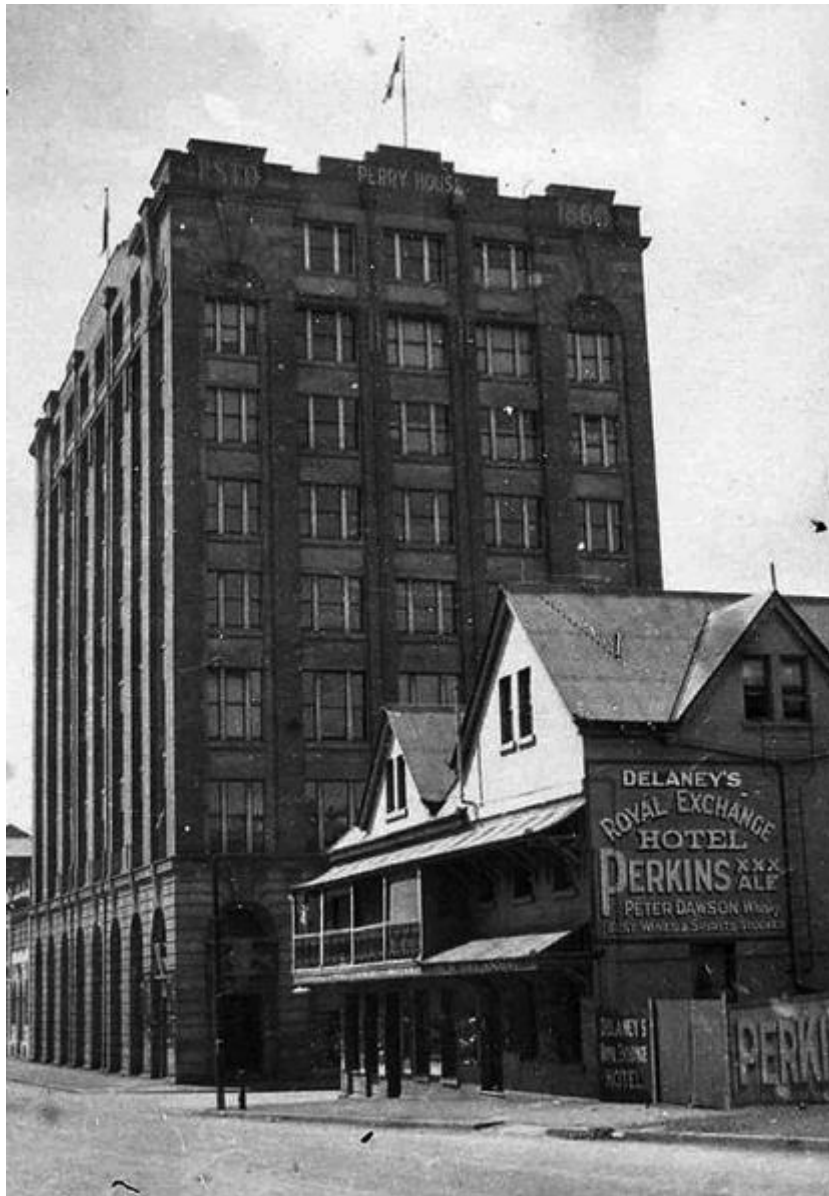
Slika 1.2 Urnes Stavkirke, Sognog Fjordana, Norway, 1132

Šesterokatna Leckie zgrada je izgrađena 1908. godine u Vancouveru, Kanada (Slika 1.3). Zgrada je izgrađena tehnikom građenja opeka i greda koja je bila popularna u ranom dvadesetom stoljeću te se sastoji od fasade od opeke teškim drvenim kosturom. Uporaba ove tehnike dopustila je velike otvorene tlocrte koji su se koristili za urede i industrijsku namjenu Leckie kompanije. Građevina je seizmički renovirana ranih 1990-ih i trenutačno posjeduje urede, dućane i restorane.



Slika 1.3 Leckie Building, Vancouver, Canada, 1908

Perry kuća je 37 metara visoka sedmerokatnica izgrađena od teškog drvenog interijera i fasade od opeke. Izgrađena 1923. U Brisbaneu, Australija, Perry zgrada je jedna od najstarijih i najviših drvenih konstrukcija u Australiji (Slika 1.4). Poduzetnik William Perry izgradio je konstrukciju temeljenu na drvu da bi održavao obiteljski posao. Nedavno je prenamijenjena u hotel.



Slika 1.4 Perry House, Brisbane, Australia, 1913

Prije otprilike 10 godina švedski grad Vaxjo odlučio je promovirati upotrebu drva u gradnji započevši s razvojem područja poznatim kao ValleBroar. Prvi projekt koji je bio dio ove inicijative je osmerokatna konstrukcija sa 134 apartmana koja se sastojala od sedam drvenih katova iznad betonskih temelja i prvog kata (Slika 1.5).



Slika 1.5 Limnologe, Vaxjo, Sweden, 2009

1.2.Suvremeni nosivi sustavi drvene gradnje - CLT

Križno lamelirano drvo (eng. Cross-Laminated Timber - CLT) je relativno novi sistem građenja najviše zastupljen u Sjevernoj Americi i Europi gdje se definira novi val drvenih proizvoda (građe), poznatih kao masivna građa ("mass" timber). To je potencijalno cjenovno konkurentna solucija bazirana na drvetu koja upotpunjuje jaka svojstva drveta u smislu čvrstoće i male težine elemenata i prikladna je zamjena za neke opcije koje trenutačno koriste beton, opeku i čelik.

CLT je inovativan drveni proizvod koji je ranih 90-ih predstavljen u Austriji i Njemačkoj te mu od tada raste popularnost primjene za stambene i druge građevine diljem Europe. Sredinom 90-ih, u Austriji je provedeno zajedničko istraživanje industrije i sveučilišta koje je rezultiralo razvoju modernog (suvremenog) CLT-a.

Nakon nekoliko sušnih godina, gradnja CLT-om se značajno povećala početkom 2000. godine, djelomično potaknuta zelenom gradnjom te također većom efikasnošću, intenzivnijim reklamiranjem i distribucijom. Važan čimbenik je bio predočiti da je CLT, kao i gradnja betonom, pouzdan konstrukcijski sistem gradnje. Takav sistem je tipičan za gradnju

obiteljskih kuća i višekatnih stambenih zgrada u mnogim Europskim zemljama. Korištenje CLT panela u građevinarstvu se zadnjih godina u Europi znatno se povećao. Iskustvo je pokazalo da je gradnja CLT-om konkurentna, pogotovo u srednje visokim i visokim konstrukcijama (zgradama). Lagano rukovanje i montaža tijekom gradnje i rezultira bržim završavanjem projekta. To je ključna prednost pogotovo za srednje visoke građevine (5-10 katova). Zbog male mase panela temelji ne moraju biti velikih dimenzija, te se prilikom montaže i transporta mogu koristiti dizalice manje nosivosti. Dobra toplinska i zvučna izolacija te velika požarna otpornost su dodatne prednosti masivne drvene konstrukcije.

Pokretačka snaga razvoja CLT-a u Sjevernoj Americi je bila potreba za pružanjem izbora proizvoda i sustava na bazi drveta za arhitekate, inženjere i građevinare. Paralelno s razvitkom CLT sustava u Europi, afirmacija CLT proizvoda i sustava je započela i u Sjevernoj Americi. Interes za korištenjem CLT-om se osim u Sjevernoj Americi se povećava i u drugim ne-Europskim zemljama. Postignut je značajan napredak objavljivanjem Kanadskog izdanja CLT priručnika (FPIinnovations, 2011) koji je trenutačno korišten za jednostavnije dizajniranje i gradnju CLT-om u Kanadskim građevinskim normama. CLT priručnik je dobro prihvaćen od strane Kanadskog društva arhitekata i inženjera.

Tehnička saznanja u CLT priručniku su bila važna u ostvarivanju primjene CLT-a u Kanadske inženjerske standarde dimenzioniranja u drvetu (CSA O86) i Kanadskim nacionalnim građevinskim normama.

CLT priručnik pruža ključna tehnička saznanja o proizvodnji, dimenzioniranju i performansama CLT-a u sljedećim područjima:

- Proizvodnja križno lameliranog drva,
- Dimenzioniranje križno lameliranih drvenih elemenata,
- Analiza opterećenja (uključujući utjecaj vjetra i potresa) križno lameliranih drvenih građevina,
- Spojevi u križno lameliranim drvenim građevinama,
- Trajanje opterećenja i čimbenici puzanja za križno lamelirane drvene panele,
- Vibracije konstrukcije,
- Požarna svojstva križno lameliranih konstrukcija,
- Zvučna izolacija križno lameliranih konstrukcija,
- Utjecaj na okoliš
- Rukovanje križno lameliranih drvenih elemenata

2. MOTIVACIJA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA

Gradnja drvom u povijesti je poznata od samih začetaka ljudskog roda. Iako danas zamijenjeno drugima gradivima, drvo kao građevni materijal i dalje plijeni pažnju kako u arhitektonskim tako i u građevinskim krugovima. Najveću primjenu drvo je našlo u izgradnji krovnih i međukatnih konstrukcija, u izgradnji industrijskih ili gospodarskih objekata, trgovačkih centara, objekata kulture i turizma te općenito, zbog dobrog odnosa male mase i velike nosivosti, kod savladavanja većih raspona. Tako, može se zaključiti da su osnovne forme koje se upotrebljavaju u gradnji drvom štapni elementi, dok su plošni drveni elementi rijetki i upotrebljavaju se samo kao ne nosivi elementi konstrukcije. Osim spomenutog svojstva dobre nosivosti, drvo kao materijal karakteriziraju i dobra termička/izolacijska svojstva te jednostavnost i praktičnost u proizvodnji i građenju, što ga čini jednom od poželjnijih materijala pri izgradnji stambenih građevina.

Visoke drvene građevine vrlo su rijetke u zgradarstvu i ne nameću se kao alternativa visokim konstrukcijama načinjenima od betona, žida ili spregnutim sustavima. Glavni razlog ovom razmišljanju u praksi nedovoljna je nosivost pojedinih sustava izvedbe drvetom, kao i popustljivost, odnosno mala nosivost spojeva u drvenim konstrukcijama. Uobičajena rješenja drvenih stambenih objekata podrazumijevaju panelni sustav gradnje pri čemu takve panele sačinjavaju okviri od punog ili lameliranog drva spregnuti drvenim pločama (pločama vlaknaticama, furnirskim pločama, ivericama,...). Takav način gradnje podrazumijeva jednostavne čavlane ili vijčane spojeve između drvnih elemenata, odnosno vijčane spojeve između drvnih elemenata i krute podloge (temelja). Navedeno često vodi ka nemogućnosti izgradnje višetažnog objekta iz razloga što uslijed horizontalnih djelovanja sama konstrukcija nema dostatnu krutost u spojevima što rezultira kako prekoračenjem dozvoljenih pomaka, tako i nestabilnošću cjelokupne građevine.

Razvojem tehnologije i drvne industrije došlo je do patentiranja novog drvnog materijala koji se bazira na lameliranju drvenih dasaka u križnim slojevima čime se postigla značajna krutost i nosivost elementa kako pri opterećenju u ravnini, tako i van ravnine ploče. Upotrebom

takvih drvenih plošnih nosača znatno se povećala mogućnost gradnje visokih stambenih objekata, posebice ako se u obzir uzme i razvitak različitih načina spajanja, koji sada osim vijčanih spojeva podrazumijevaju i spojeve uz podsretstvo čeličnih limova i kutnika, ulijepljenih šipki itd. Međutim, primjenom takvih elemenata povećava se masa objekta (za razliku od "šuplje" panelne izvedbe) te, iako i dalje značajno manje mase u odnosu na betonske, zidane i čelične, tj. spregnute konstrukcije, takve konstrukcije postaju osjetljive na horizontalna djelovanja vjetra te na dinamička seizmička djelovanja. Prilikom takvih djelovanja javlja se ista problematika kako i kod panelne gradnje, manjak nosivosti i stabilnost građevine. Zbog navedenog, u praksi je zaživjela gradnja visokih stambenih građevina visine do 13 etaža u područjima koji nisu osjetljivi na seizmička djelovanja, dok su se u područjima aktivnih seizmičkih djelovanja izgrađeni stambeni objekti do maksimalne visine od 6 etaža.

Usljed naglog porasta broja stanovnika u gradovima (posebice na jugu i zapadu Europe), a time i veće potrebe za brzom i jednostavnom izgradnjom dovoljnog broja stambenih jedinica (npr. u Dublinu je trenutni manjak stambenih jedinica za 40 000 ljudi), u zajednici arhitekata sve je češća ideja o izgradnji drvenih nebodera. Takva gradnja je jednostavna, brza, energetski učinkovita i održiva, a s druge strane i estetski vrlo zanimljiva i dovoljno trajna. No, kako je već spomenuto, gradnja takvih objekata relativno je ograničena na određeni broj etaža. Dakle, potrebno je ponuditi sustav kojim bi se izbjegla spora i složena gradnja, a ujedno osigurati nosivost i stabilnost te dostatnu duktilnost i trošenje energije uslijed djelovanja horizontalnih opterećenja. Takav sustav podrazumijeva kombinaciju gradnje drvenim križno-lameliranim pločama koje će se oslanjati na krutu jezgru koja će biti dovoljno duktilna da preuzme većinu horizontalnih djelovanja i pri tome osigura stabilnost. No, navedeni sustavi zasada su zaživjeli tek kao ideja, no detaljnija ispitivanje ili proračuni dosada nisu provedeni.

Prvi cilj ovog rada, a ujedno i motivacija za njegovo provođenje, ispitati je ponašanje višetažne stambene drvene građevine s krutom armiranobetonskom jezgrom u seizmički aktivnim područjima, kao dominantnim izvorom horizontalnih djelovanja.

Drugi cilj rada je pak, dokazati da pri minimalnoj dimenziji krute jezgre (samo za okno stubišta i lifta), uz upotrebu standardnih tipova detalja spajanja križno-lameliranih ploča, dvadesetetažna stambena zgrada zadovoljava uvjete propisane Europskim normama. Na takav način, preliminarnim proračunima, arhitektonska ideja bila bi tehnički-znanstveno dokazana, i kao takva mogla bi naći daljnju primjenu i zaživjeti u praksi.

3. KRIŽNO LAMELIRANO DRVO

3.1. Definiranje CLT-a

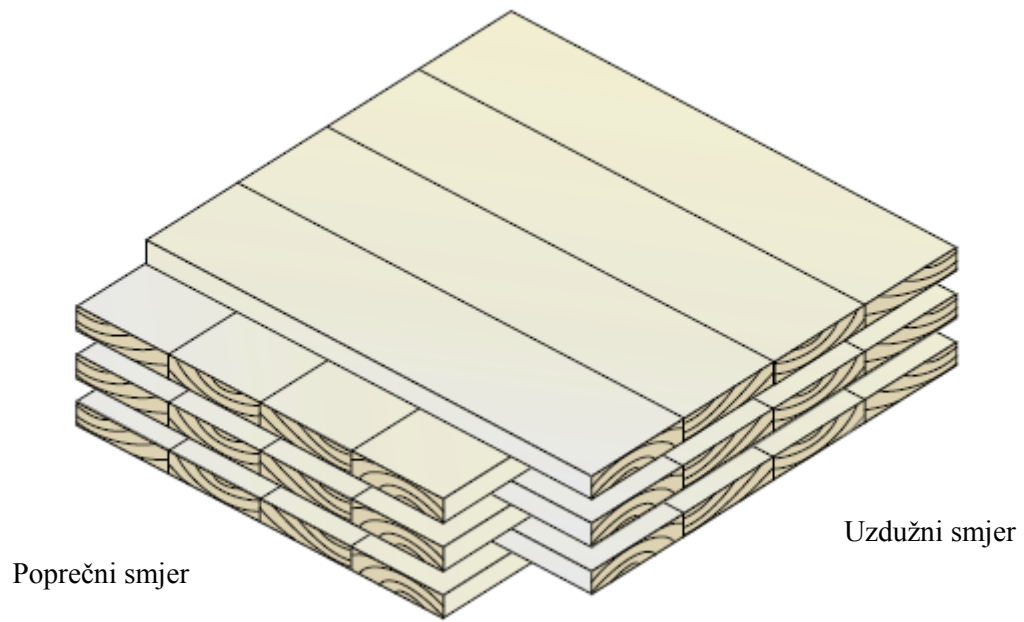
Križno lamelirani panel (eng. Cross-Laminated Timber - CLT) sastoji se od nekoliko slojeva drvenih ploča postavljene jedna na drugu najčešće međusobno okomito (pod kutem od 90 stupnjeva). Veza slojeva ostvarena je odgovarajućim ljepilom koje se postavlja između ploča. Osim lijepljenjem veza se može ostvariti s nekim od spojnih sredstava kao što su čavli ili drveni trnovi.

Križno lamelirani panel sastoji se minimalno od tri međusobno spojene ploče čije su smjerovi lamela međusobno okomito položeni. Ploču u križno lameliranom panelu čine paralelne daske koje su zalijepljene jedna do druge. CLT paneli uobičajeno se proizvode u specijaliziranim tvornicama najčešće s neparnim brojem slojeva drvenih ploča počevši od tri pa do sedam [1].

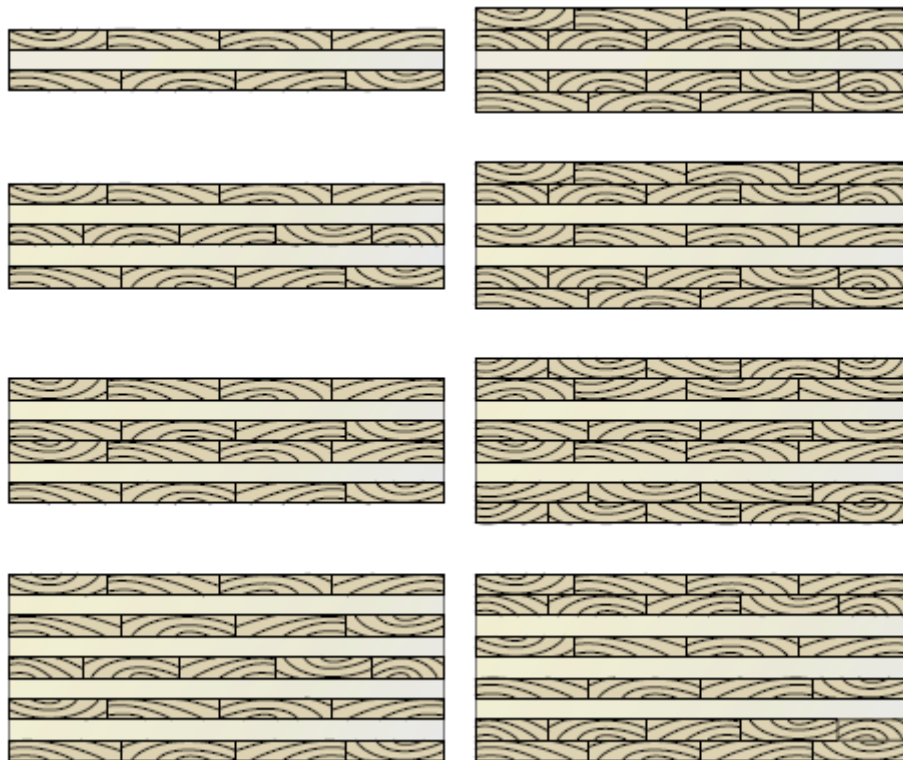
Debljina pojedine daske kreće se od 16 mm do 51 mm te širine od 60 mm do 240 mm. Dimenzija panela varira zavisno o proizvođaču, uobičajene širine križno lameliranog panela su 0.6 m, 1.2 m, 2.4 m ili 3 m potom debljina može doseći dimenziju od 508 mm a dužina jednog panel elementa može biti do 24m [2]. Najveće ograničenje u dužini panel elementa zavisno je o načinu transporta.

Daske u vanjskim slojevima panela kod zidova orijentiraju se najčešće u smjeru gravitacije. Razlog tome je veća otpornosti elementa na vertikalna opterećenja. Nadalje, kod stropnih i krovnih elementa vanjski slojevi dasaka u panel elementu orijentirani su paralelno s glavnim nosivim smjerom.

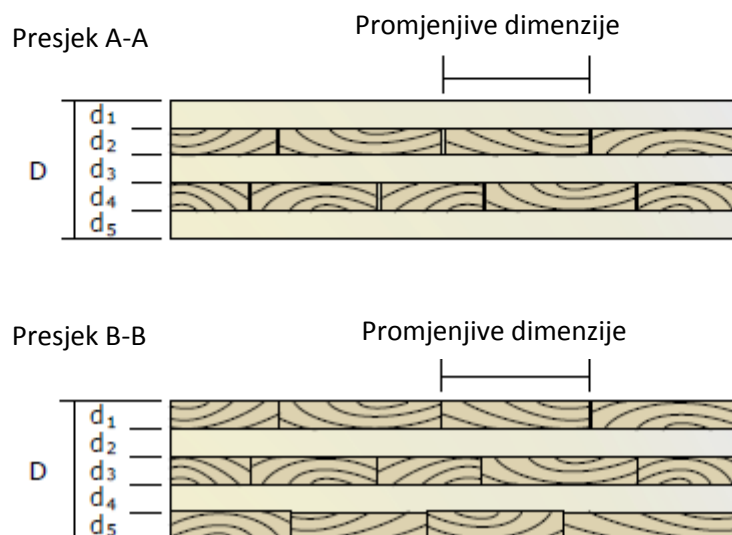
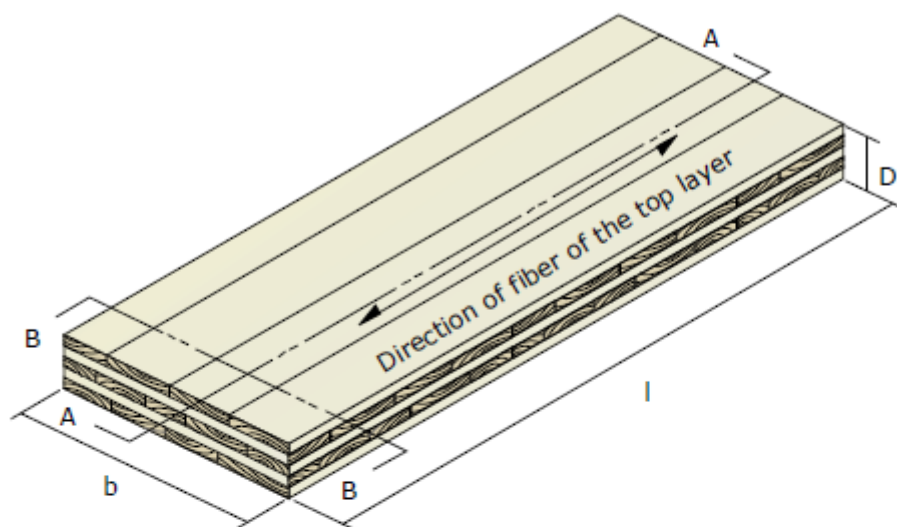
Na slici 1 prikazana je konfiguracija CLT panela s šest drvenih slojeva međusobno okomito položenih. Na slici 2 dani su primjeri presjeka CLT panela od tri do devet slojeva, te primjeri panela od tri do sedam slojeva s dvostrukim pločama na vanjskim slojevima. Na slici 3 prikazan je CLT panel s pet slojeva u tri 3D pogledu te dva poprečna presjeka.



Slika 3.1 Konfiguracija CLT panela



Slika 3.2 Primjeri CLT panela

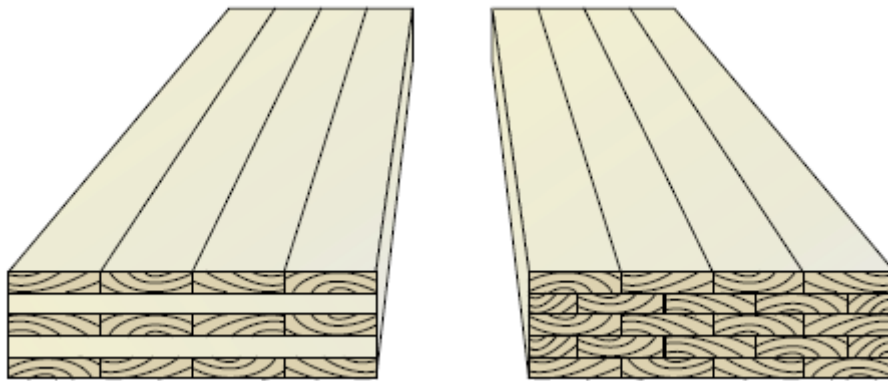


Slika 3.3 Prikaz CLT panela u 3D pogledu te dva poprečna presjeka

3.2. Prednosti CLT panela

Križno lamelirani paneli koji se koriste za predgotovljene zidove i stropove imaju značajne prednosti. Križno lamelirano drvo pruža velike mogućnosti u oblikovanju kao predgotovljeni element velikih dužina i širina. Moguće je proizvesti jako dugačke zidove i debele ploče. Nadalje, križno lamelirani elementi imaju veliku čvrstoću na djelovanja u svojoj ravnini te okomito na ravninu elementa[3]. Kod CLT elementa posebno se ističe otpornost na cijepanje zbog karakterističnog „armiranja“ u slojevima.

Potrebno je naglasiti razliku između križno lameliranog elementa te lijepljeno lameliranih elementa (eng. glulam) čije su drvene daske međusobno paralelne. Na sljedećoj slici prikazana je usporedba ove dvije vrste elemenata.

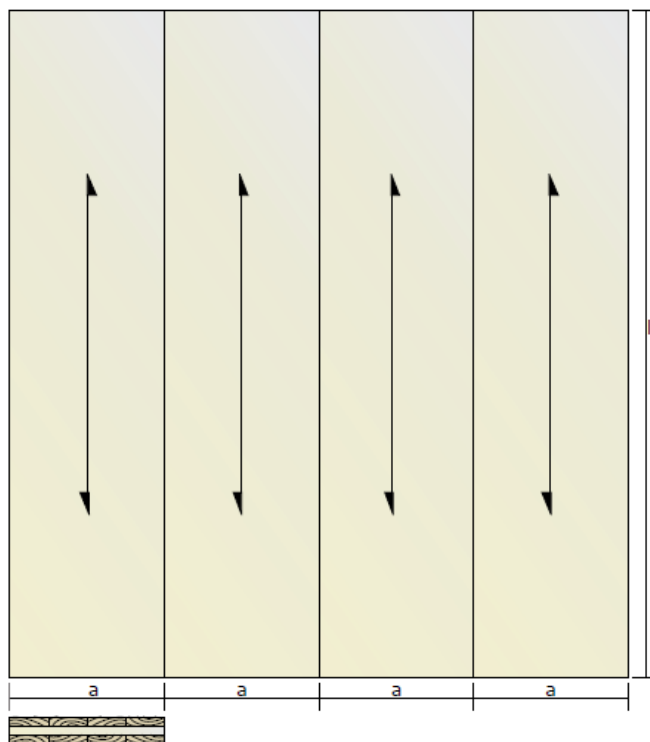


Slika 3.4 Prikaz CLT panela i lijepljeno lameliranog panela[4]

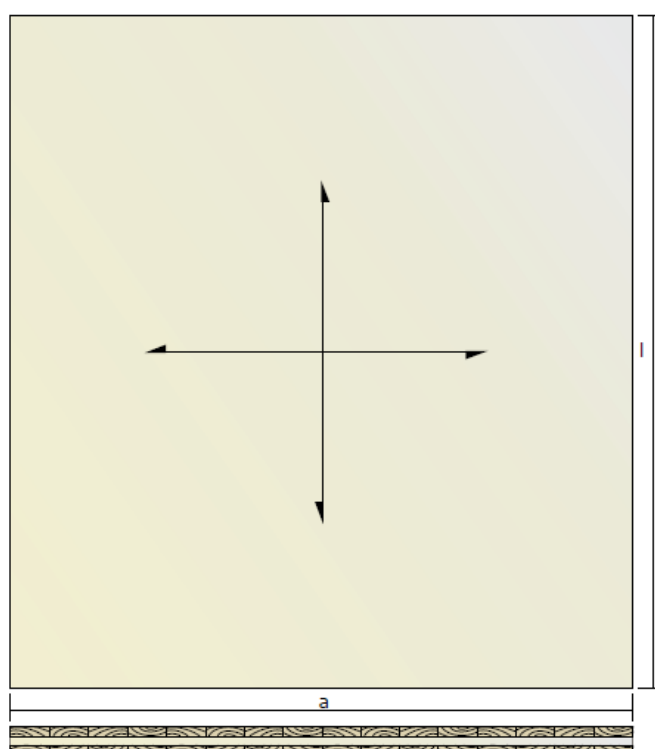
CLT paneli s obzirom na njihovu nosivost mogu se podijeliti na dvije grupe:

- dominantno nosivi u jednom smjeru (slika 3.5.),
- nosivi paneli u dva smjera (slika 3.6.).

Na sljedećim slikama 3.5 i 3.6 izdvojeni ova dva tipa stropnih CLT panela. Na slikama je izdvojena dimenzija elementa u smjeru a koja može iznositi do 3m.



Slika 3.5 CLT panel od tri sloja dominantno nosiv u jednom smjeru



Slika 3.6 CLT panel od tri sloja nosiv u dva smjera

3.3. Postupak proizvodnje i ugradnje

Uobičajeni postupak proizvodnje CLT panela sastoji se od niza radnji: selekcija dasaka, njihovo grupiranje i postavljanje, primjena ljepila, polaganje panela i pritiskanje, rezanje panela, površinska obrada, označavanje i spremanje proizvoda[5]. Ključni element proizvodnje CLT panela je kvaliteta drvenih dasaka i kontrola kvalitete ljepila koji se primjenjuje za spajanje elemenata.

Važan parametar pri proizvodnji CLT panela je sadržaj vlage u drvenim daskama. Dozvoljena vrijednost vlage kreće se od $12\% \pm 3\%$ [6]. Odgovarajuća količina vlage osigurava konstantne dimenzije panela te sprječava nastanak površinskih pukotina. Ukoliko dostavljena građa nema zahtijevanu vlažnost potrebno je izložiti sušenju u prikladnim sušionicama.

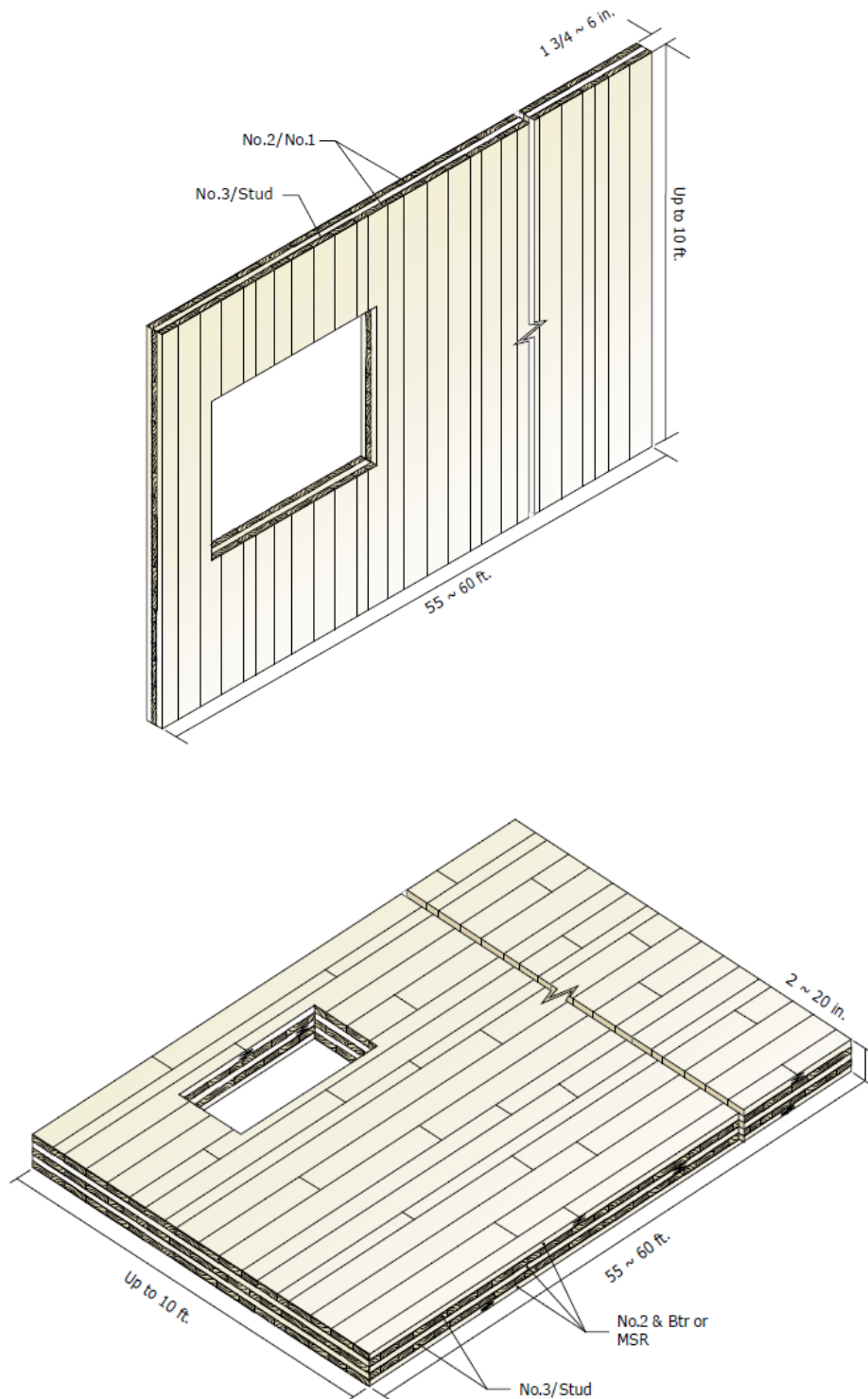
Kao što je navedeno dimenzije panela zavise o proizvođaču. Proces spajanja jednog panela s obzirom na dimenzije, prikladnu opremu i ljepilo može trajati od 15 do 60 minuta. Najčešće sredstvo koje se koristi za lijepljenje jednako je onom koje se koristi za lijepljeno lamelirano drvo, a sastoji se od poliuretana, melamina i fenola. Koristi se površinsko lijepljenje kao i lijepljenje po rubovima dasaka. Nakon primjene ljepila na daske, cijeli element se stavlja pod pritisak hidraulikom ili primjenom vakuma, zavisno o debljini panela i tipu ljepila. Nakon površinske obrade elementa isti se reže na odgovarajuće dimenzije te otvore kao što su prozori i vrata. Za potrebe visoke točnosti pri rezanju panela koriste se CNC (eng. ComputerNumericalControlled) uređaji (Slika 3.7)



Slika 3.7 CNC uređaj

Pri kontroli kvalitete proizvoda i za potrebe provjere sukladnosti u tvornici se vrše standardna ispitivanja kao što su: vlačna čvrstoća, posmična čvrstoća i pregled spojeva[7].

Na sljedećim slikama izdvojeni su karakteristični elementi zida te stopa ili krova s otvorima.



Slika 3.8 Primjeri CLT panela zida i stropa ili krova

Postupak ugradnje CLT elementa zidova i stropova relativno je jednostavan. Elementi prethodno pripremljeni u strogo kontroliranom proizvodnom pogonu dopremaju se kao

predgotovljeni na gradilište te ugrađuju na točno predviđeno mjesto. Paneli se međusobno spajaju spojnim sredstvima ili primjenom ljepila. Na sljedećim slikama prikazan je postupak ugradnje.



Slika 3.9 Primjeri ugradnje CLT panela

3.4. Današnji doseg gradnje CLT-om

Križno lamelirano drvo kao proizvod je vrlo pogodno za primjenu kod više etažnih zgrada zbog njegove raznovrsnosti. Najveći rasponi CLT panela koji se danas koriste mogu doseći i do 24 m. Uz pomoć mehaničkih spajala ili lijepljenjem možemo imati različite debljine ovih elemenata[8][9]. Danas, primjena CLT u visokim zgrada je u širokoj primjeni te se kao proizvod sve više razvija. Jedna mogućnosti je primjena CLT elemenata kod visokih zgrada u kombinaciji s armirano betonskom jezgrom[10].

Jedan od poznatijih objekata izgrađenih samo od CLT elemenata je zgrada Murray Grove u Londonu. Ova zgrada ima ukupno devet etaža čija je jezgra izgrađena također od CLT-a.



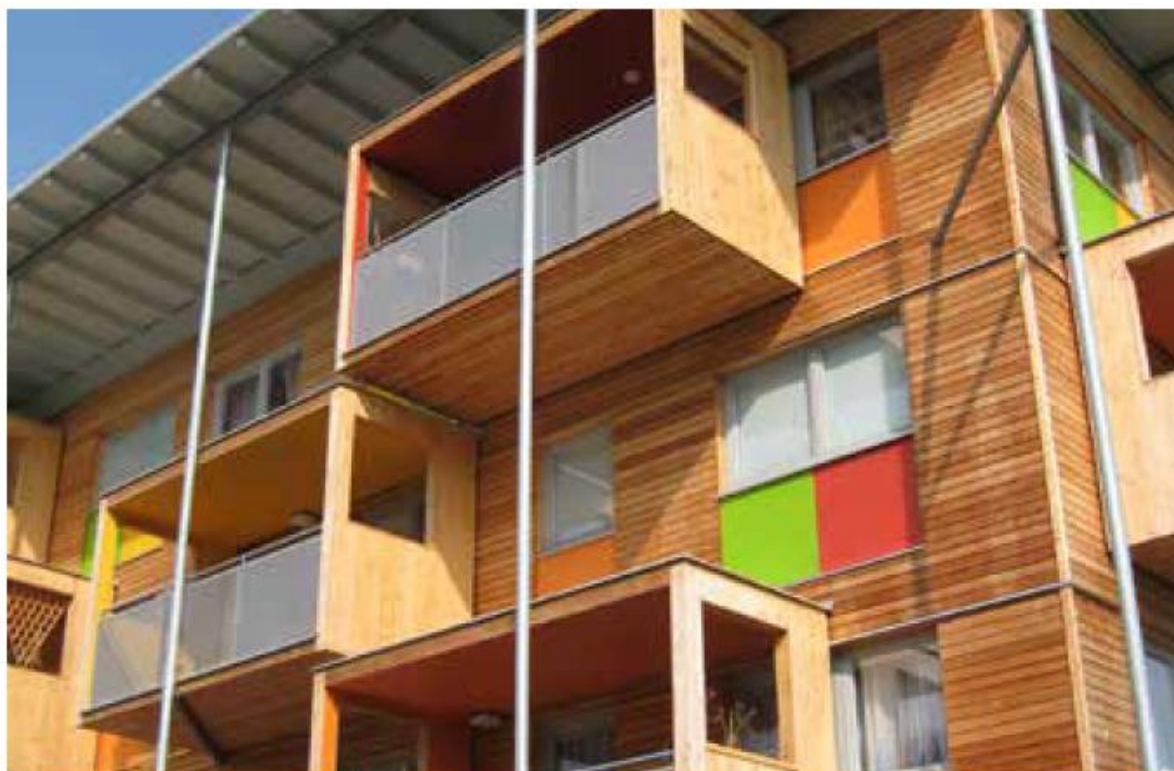
Slika 3.10 CLT zgrada Murray Grove u Londonu

Potrebno je naglasiti da elementi od CLT-a imaju veliku nosivost na opterećenja u svojoj ravnini kao i okomito na nju. Ukoliko se koriste samo elementi od CLT-a očekivana maksimalna visina zgrade je između 15 i 20 etaža[11]. Jedno od važnijih parametara koje je potrebno zadovoljiti je požarna otpornost zgrada od CLT-a. Nadalje, primjena ovih zgrada samo od CLT elemenata u područjima velike potresne osjetljivosti je ograničena.

Na sljedećim fotografijama izdvojiti će se neki od postojećih zgrada izgrađenih od CLT-a.



Slika 3.11 Obiteljska kuća u Klagenfurtu, Austrija



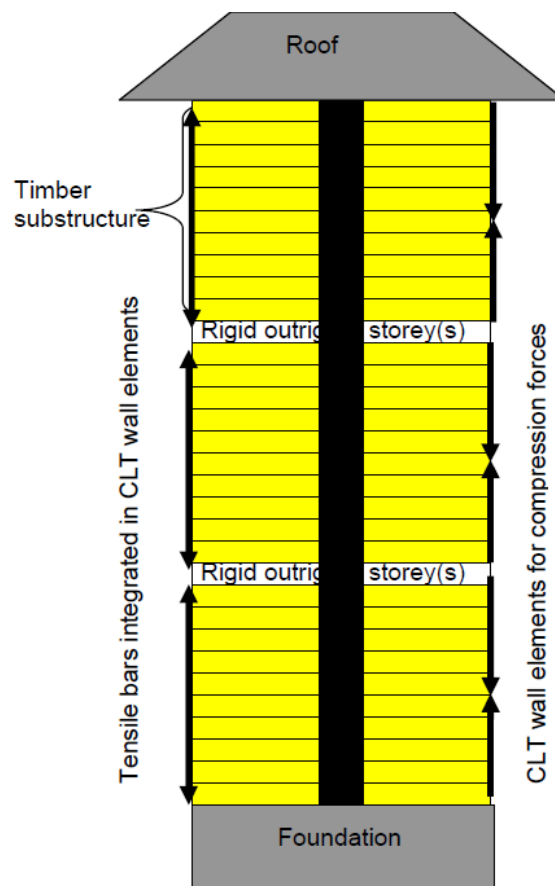
Slika 3.12 Više etažna zgrada u Judenburgu, Austrija



Slika 3.13 Više etažna zgrada u Berlinu, Njemačka

3.5. Razvitak novih hibridnih sustava s CLT-om

U područjima velike koncentracije naseljenosti kao i česte migracije stanovništva zahtijeva se brza, jeftina i ekološki prihvatljiva izgradnja vitkih i visokih zgrada. Primjer ovakve populacije jesu zemlje Kine i Indije kao i Brazila, Egipta, Pakistana te preostale zemlje velike populacije. Navedene kriterije razvoja ovih megapolisa moguće je zadovoljiti s neboderima kao kombinacija drveta i betona. Princip ovakve brze i visoke gradnje može se temeljiti na takozvanim „outrigger“ sustavima[12]. Ovaj sustav predviđa krutu jezgru unutar koje bi se nalazio lift i/ili stubište. Kruta jezgra otporna je na posmična djelovanja te djelomično na savijanje. Uz jezgru nosivi sustav čini kruti disk kao međukatna ukruta koja se može nalaziti na vrhu zgrade, njenoj polovici ili više njih po etažama. Primjer jednog rješenja prikazan je grafički na sljedećoj slici. Dakle osnovne nosive elemente čini kruta jezgra te međukatne stropna ploča kao i kruta krovna struktura. Uloga CLT elemenata u ovom hibridnom sustavu predvidio bi njegovu nosivost na tlak uslijed horizontalnih djelovanja, dok bi vlačna naprezanja bila preuzeta vlačnim, najčešće čeličnim elementima.



Slika 3.14 Primjer hibridnog outrigger sustava s CLT elementima

3.6. Parametri proračuna i uporabivosti CLT-a

CLT paneli je element koji se koristi za prijenos opterećenja kod zidova, stropova i krovova. Za stropne i krovne CLT elemente, pri analizi nosivosti potrebno je uzeti sljedeće parametre:

- U ravnini i okomito na ravninu uzeti u obzir naprezanja od savijanja i posmika,
- Pri dugotrajnom i kratkotrajnom opterećenju uzeti u obzir,
 - trenutni progib,
 - dugotrajni progib (puzanje materijala),
 - čvrstoća pri dugotrajnom opterećenju.
- Dinamičke karakteristike stropova,
- Tlačna čvrstoća okomito na vlakanca,
- Otpornost na požar,
- Zvučna izolacija,
- Trajnosna svojstva ,

Pri modeliranju zidnih elemenata potrebno je uzeti u obzir sljedeće:

- Granično stanje nosivosti,
- Čvrstoća na savijanje i posmična nosivost u ravnini zida i izvan ravnine,
- Otpornost na požar,
- Zvučna izolacija,
- Trajnosna svojstva.

Ovdje će se navesti kratki pregled ključnih karakteristika projektiranja, svojstva izvođenja i montaže CLT panela.

3.7. Analitičke i eksperimentalne metode proračuna

Postoje dva pristupa za proračun nosivosti CLT panela. Prvi se temelji se na eksperimentalnom pristupu, a drugi je onaj jeftiniji koji se temelji na analitičkom pristupu. Eksperimentalni pristup zahtijeva provođenje ispitivanja cijelih panela. Kod stropnih elemenata provode se ispitivanja pri određivanju krutosti na savijanje i to na elementima u stvarnoj dimenziji ili dijelovima panela. Ovakvo dokazivanje nosivosti iziskuje puno vremena te je iznimno skupo. Nadalje je problem što se paneli razlikuju s obzirom na proizvođača karakteristike materija. Kod ovog pristupa se preporuča provoditi i daljnja ispitivanja osnovnih karakteristika CLT panela pri savijanju i posmiku .

Pri analitičkom pristupu, jednom kada se provedu ispitivanja na osnovnim mehaničkim karakteristikama materijala moguće je definirati analitički model ponašanja cijelog CLT panela. Analitički pristup predviđa nosivost CLT panela (čvrstoća i krutost) s obzirom na poznate materijalne karakteristike pojedinih drvenih elemenata. Analitički pristup je jeftiniji od eksperimentalnog ali može biti i nepouzdaniji. Danas postoje razne upute i norme koje definiraju metode za provođenje ispitivanja mehaničkih karakteristika kao i ispitivanja cijelih panela i konstrukcija od panela.



Slika 3.15 CLT zgrada od 7 etaža opterećena na seizmičko djelovanje

3.8. Seizmička otpornost CLT Zgrada

Do sada na svijetu provedena su mnoga istraživanja na uzdužnoj nosivosti visokih zgrada od CLT-a. Ceccotti i dr.[10] provodili su kvazi-statička ispitivanja na visokoj zgradi od CLT panela, gdje su dokazali djelotvornu otpornost na horizontalna djelovanja (Slika 3.15 i Slika 3.16). Nadalje, 2009. godine provedena su dva ispitivanja na seizmičko djelovanje na manjem i većem modelu CLT zgrade u Japanu (Trees&TimberResearch Institute). Provedena su ispitivanja nosivosti zgrada od dvije i sedam etaža. Pokazano je da konstrukcija od CLT-a

ima dobru otpornost na seizmička djelovanja. Ovim istraživanjem pokazano je da paneli od samo tri sloja imaju učinkovitu nosivost usporedivu s pet slojeva CLT.



Slika 3.16 CLT zgrada od dvije etaže opterećena na seizmičko djelovanje

4. POSTUPAK PRORAČUNA CLT ELEMENATA

4.1. Elementi opterećeni savijanjem

Pri proračunu elemenata opterećenih savijanjem u ravnini okomitij na ravninu CLT elementa mogu se koristiti metoda analogije posmika i pojednostavljena metoda. Metoda analogije posmika usvojena je u normi PRG 320 za ocjenjivanje savojne i posmične čvrstoće. Pojednostavljena metoda za savojnu čvrstoću također je usvojena u normi PRG 320.

Za elemente opterećene u vlastitoj ravnini, kao što su npr. nadvoji, potreban je drugačiji model. Trenutno se provode ispitivanja kako bi se razvio model koji bi objasnio kompozitno djelovanje CLT-a.

4.2. Elementi opterećeni savijanjem: Savijanje (izvan ravnine)

Za opterećenje izvan ravnine, čimbenik stabilnosti grede treba biti 1.0.

Pojednostavljena metoda usvojena je u normi PRG 320 i proračunava nosivost koristeći metodu nosivosti najopterećenijeg vlakna?. Modul efektivnog presjeka računa se tako da se podijeli efektivna čvrstoća savijanja sa modulom elastičnosti vanjskog sloja i polovicom debljine panela. Izraz glasi:

$$S_{eff} = \frac{2EI_{eff}}{E_1 h}$$

gdje je:

EI_{eff} = efektivna krutost savijanja

E_1 = modul elastičnosti vanjskog sloja

h = ukupna debljina panela

Modul efektivnog presjeka tada se množi dozvoljenim naprezanjem savijanja vanjskog sloja i „proračunati momenti nosivosti u glavnom nosivom smjeru množe se čimbenikom 0,85“ (PRG 320-2011). Proizvođači ovaj proračun imaju već gotov kako bi ponudili momente nosivosti elemenata. Pri proračunu, izazvani moment savijanja mora biti manji od momenta nosivosti. U obliku jednadžbe:

$$M_b \leq F_b S_{eff}$$

Gdje je:

M_b = moment savijanja izazvan vanjskim opterećenjem

$F_b S_{eff}$ = proračunska čvrstoća na savijanje panela ponuđena od strane proizvođača, proračunata ili navedena u normi PRG 320 te pomnožena odgovarajućim čimbenicima prilagodbe.

4.3. Elementi opterećeni savijanjem: posmik (izvan ravnine)

Analogno savojnoj čvrstoći, može se koristiti pojednostavljena metoda koja koristi nosivost najopterećenijeg vlakna i predložena je u normi PRG 320. Koristeći pojednostavljenu metodu, efektivnu veličinu $(Ib/Q)_{eff}$ možemo proračunati na sljedeći način:

$$(Ib/Q)_{eff} = \frac{EI_{eff}}{\sum_{i=1}^{n/2} E_i h_i z_i}$$

gdje je:

EI_{eff} = efektivna krutost savijanja

E_i = modul elastičnosti pojedinog sloja

h_i = debljina pojedinog sloja, osim srednjeg sloja, čija debljina je dvostruko manja

z_i = udaljenost između težišta sloja i neutralne osi, osim srednjeg sloja, gdje je potrebna udaljenost između težišta gornje polovice srednjeg sloja i neutralne osi

Proizvođači uglavnom imaju već gotove proračune posmične nosivosti elemenata. Izraženo jednadžbom, proračun mora zadovoljiti sljedeći uvjet:

$$V_{planar} \leq F_v (Ib/Q)_{eff}$$

gdje je:

V_{planar} = posmik izazvan opterećenjem

$F_v (Ib/Q)_{eff}$ = posmična čvrstoća panela ponuđena od strane proizvođača ili proračunata preko pojednostavljene metode pomnožene odgovarajućim čimbenicima prilagodbe.

4.4. Elementi opterećeni savijanjem: Izvijanje izvan ravnine

Jedna od metoda proračuna posmične deformacije je da se reducira vrijednost efektivne krutosti savijanja, EI_{eff} , na vrijednost EI_{app} , što je dano sljedećim izrazom:

$$EI_{app} = \frac{EI_{eff}}{1 + \frac{K_s EI_{eff}}{GA_{eff} L^2}}$$

Konstanta K_s temelji se na utjecaju posmične deformacije i njena je vrijednost dana u sljedećoj tablici za različite slučajeve opterećenja:

Opterećenje	Oslanjanje krajeva	K_s
Jednoliko distribuirano	Zglobno	11.5
	Upeto	57.6
Konc. sila u sredini raspona	Zglobno	14.4
	Upeto	57.6
Konc. sile u četvrtinama raspona	Zglobno	10.5
Jednoliki moment	Zglobno	11.8
Jednoliko distribuirano	Konzola	4.8
Konc. sila na slobodnom kraju	Konzola	3.6

4.5. Tlačni elementi, puni i masivni stupovi i zidovi

Čimbenik stabilnosti stupova zahtijeva zbog svoje kompleksnosti i potrebne razine pouzdanosti dodatnu raspravu o proračunskim veličinama. Pri proračunu stupova i zidova, opterećenje mora biti manje od tlačne čvrstoće pomnožene sa površinom lamela sa vlakancima položenima paralelno sa smjerom opterećenja, odnosno izraženo jednadžbom:

$$P_{parallel} \leq F_c A_{parallel}$$

Gdje je:

$P_{parallel}$ = opterećenje koje djeluje u smjeru vlakana

F_c = prilagođena tlačna čvrstoća

$A_{parallel}$ = površina laminata sa vlaknima položenima paralelno sa smjerom opterećenja

4.6. Čimbenik stabilnosti stupa, C_p

Čimbenik stabilnosti stupa računa se zbog sklonosti stupova izvijanju. Kako je CLT pločasti element, izvijanje je potrebno provjeriti samo izvan ravnine. Izraz za čimbenik stabilnosti CLT stupa dobiven iz NDS-a je sljedeći:

$$C_p = \frac{1 + (P_{cE} / P_c^*)}{2c} - \sqrt{\left[\frac{1 + (P_{cE} / P_c^*)}{2c} \right]^2 - \frac{P_{cE} / P_c^*}{c}}$$

Gdje je:

P_c^* = proračunska tlačna nosivost ($F_c^* A$) gdje je F_c^* pomnožen sa svim odgovarajućim čimbenicima prilagodbe osim s C_p

$c = 0,9$ za CLT

$$P_{cE} = \frac{\pi^2 EI'_{app-min}}{l_e^2}$$

4.7. Minimalna krutost savijanja, $EI_{app-min}$

EI_{app} određuje se izrazom:

$$EI_{app} = \frac{EI_{eff}}{1 + \frac{K_s EI_{eff}}{GA_{eff} L^2}}$$

Sljedeći izraz može se upotrijebiti kako bi se pri proračunu izvijanja stupa srednja vrijednost EI_{app} prilagodila na minimalnu vrijednost $EI_{app-min}$:

$$EI_{app,min} = 0.5184 EI_{app}$$

4.8. Vlačni elementi

Kako drvo nema značajnu vlačnu čvrstoću okomitu na vlakanca, u efektivno područje uključuju se samo vlakanca koja su položena u smjeru paralelnom na opterećenje. Ukupno opterećenje mora biti manje od vlačne čvrstoće pomnožene sa površinom lamela s vlakancima položenima paralelno sa smjerom opterećenja, odnosno izraženo jednadžbom:

$$T_{parallel} \leq F_t A_{parallel}$$

Gdje je:

$T_{parallel}$ = opterećenje koje djeluje u smjeru vlakana

F_t = prilagođena vlačna čvrstoća

$A_{parallel}$ = površina laminata sa vlaknima položenima paralelno sa smjerom opterećenja

4.9. Elementi opterećeni savijanjem i uzdužnom silom

U sljedećoj jednadžbi prilagođena su opterećenja i naprezanja kako bi se proračunali CLT elementi opterećeni uzdužnim tlakom i savijanjem u ravnini.

$$\left(\frac{P}{F_c A_{parallel}} \right)^2 + \frac{M + P\Delta \left(1 + 0.234 \frac{P}{P_{cE}} \right)}{F_b S_{eff} \left(1 - \frac{P}{P_{cE}} \right)}$$

Gdje je:

P = aksijalno opterećenje

M = moment savijanja

Δ = ekscentricitet aksijalnog opterećenja, mjereno okomito na ravninu panela

P_{cE} = kritično opterećenje izvijanja

4.10. Nosivost elemenata

Okomito na vlakanca

Čimbenik nosive površine CLT-a je 1,0. Izraz za proračun:

$$P \leq F_{c\perp} A$$

Gdje je:

P = opterećenje koje djeluje

F_t = prilagođena vlačna čvrstoća okomito na vlakanca

Paralelno na vlakanca

Nosivost paralelno na vlakanca ili pri kombinaciji paralelno i okomito na vlakanca, kao što je to slučaj na dnu zida, dominira nad nosivošću okomito na vlakanca.

$$P_{parallel} \leq F_c^* A_{parallel}$$

Gdje je:

P = opterećenje koje djeluje u smjeru vlakanca

F_c^* = referentna proračunska tlačna nosivost paralelno na vlakanca pomnožena sa svim odgovarajućim čimbenicima prilagodbe osim s čimbenikom stabilnosti stupa, C_p

$A_{parallel}$ = površina lamela sa vlaknima položenima paralelno sa smjerom opterećenja

5. MODELIRANJE CLT ELEMENATA

5.1. Uvod u modeliranje CLT međukatnih, krovnih i zidnih konstrukcija i njihova ograničenja

U Europi su usvojene različite metode određivanja mehaničkih karakteristika CLT-a. Neke od tih metoda su eksperimentalne, dok su druge analitičke. Za zidne elemente, eksperimentalno ocjenjivanje savojnih karakteristika provodi se ispitivanjem panela u stvarnoj veličini ili dijelova panela sa specifičnim omjerom raspona i debljine. Problem kod eksperimentalnog pristupa je u tome, da svaki puta kada se promijeni materijal ili bilo koji od proizvodnih parametara, potrebno je provesti dodatna ispitivanja kako bi se utvrdila savojna svojstva takvih proizvoda. Očito je da analitički pristup, jednom kada je potvrđen pokusnim podacima, nudi općenitiju i manje skupu alternativu.

Često korišten analitički pristup usvojen u Europi za CLT temelji se na „Mechanically Jointed Beams Theory“ (također zvana i "Gama metoda") dostupan u Aneksu B Eurocode-a 5 (EN 2004). Prema ovoj teoriji, koristi se koncept „efektivne čvrstoće“ i „čimbenik učinkovitosti spajanja“ (γ_i) koji se koristi za posmičnu deformaciju okomitog sloja, pri čemu $\gamma=1$ predstavlja potpuno zalijepljeni element, a $\gamma=0$ predstavlja element koji uopće nije zalijepljen. Ovakav pristup nudi zatvoreno (egzaktno) rješenje diferencijalne jednadžbe samo za jednostavno oslonjene grede/panele sa sinusoidalnom raspodjelom opterećenja. Međutim, razlike između takvog rješenja i onog za jednoliko raspodijeljeno i koncentrirano opterećenje su minimalne i prihvatljive za građevinarsku praksu (Ceccotti, 2003).

Blass i Fellmoser (2004) primijenili su „teoriju kompozita“ (također zvanu K-metoda) kako bi odredili neke proračunske karakteristike CLT-a. Međutim, ova metoda nije primjenjiva za posmične deformacije u pojedinim slojevima, ali je prilično točna pri velikim omjerima raspona i debljine.

Objašnjenje i primjeri obje prethodno navedene metode mogu se pronaći u kanadskom izdanju „CLT priručnika“.

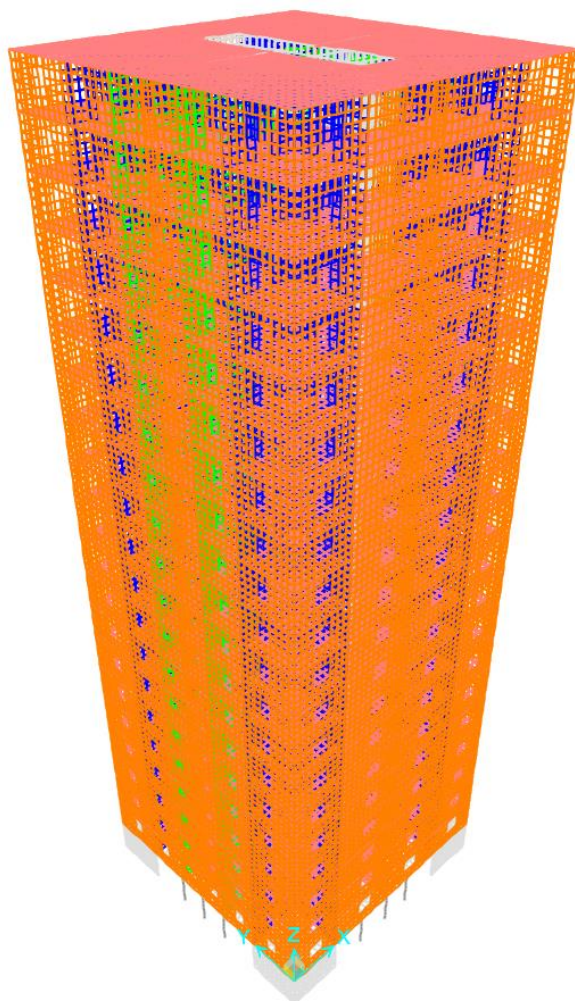
Nedavno je razvijena metoda analogije posmika (Kreuzinger 1999) i primjenjiva je za masivne križno uslojene panele gdje je opterećenje okomito na panel[13]. Metoda pri

proračunu uzima u obzir posmične deformacije križno uslojenih slojeva i nije ograničena brojem slojeva u panelu. Čini se kako je ova metoda najpreciznija i najadekvatnija za CLT panele i usvojena je u normi (Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber – ANSI/APA PRG 320). Očekuje se da će buduća izdanja NDS-a uključivati CLT i biti temeljena na ovoj metodi.

Važna napomena: Predloženi postupci proračuna u ovom poglavlju odnose se samo na križno uslojene proizvode spajane lijepljenjem. Stoga, CLT proizvodi spajani čavlima i klamfama izvan su okvira ovog sadržaja.

6. OPIS NUMERIČKOG MODELA

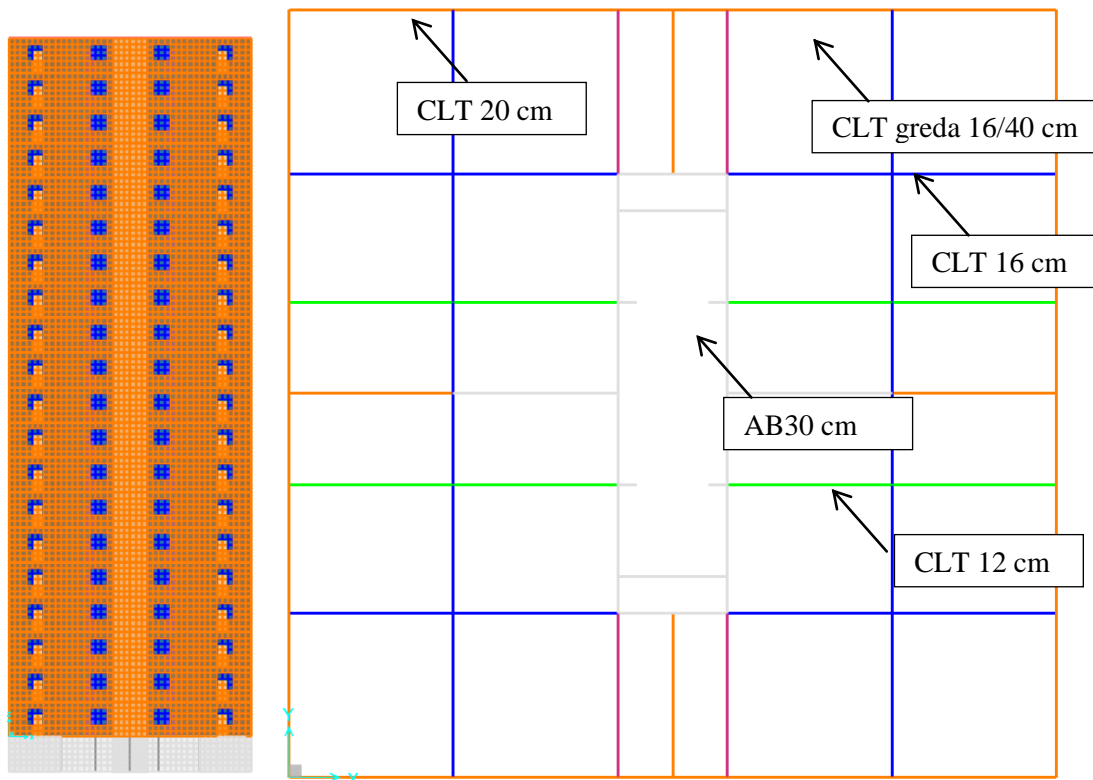
Numerički model visoke zgrade od CLT-a modeliran je u programskom paketu SAP2000 koji se smatra jednim od najboljih programskih paketa za projektiranje konstrukcija posebice u područjima izloženim potresima (slika 5.1). Cilj numeričke analize je što vjernije opisati ponašanje sustava zgrade od 20 katova izgrađene od CLT panela. U numerički model uključeno je ponašanje materijala CLT panela kao zidnog i stropnog elementa dobiveno iz eksperimentalnih rezultata do sada postojećih ispitivanja[14], [15]. Nadalje, opisano je spajanje CLT elemenata s nelinearnim ponašanjem spojnih sredstava. Za modeliranje stropnih i zidnih elemenata korišteni su kvadratni tanki plošni elementi (eng. thinshell element) približne dimenzije 50x50 cm. Ovakvo opisani plošni elementi temeljeni su na Kirchhoffovoj teoriji koja uzima u obzir savijanje od opterećenja okomito na površinu te zanemaruje posmičnu deformaciju u poprečnom smjeru.



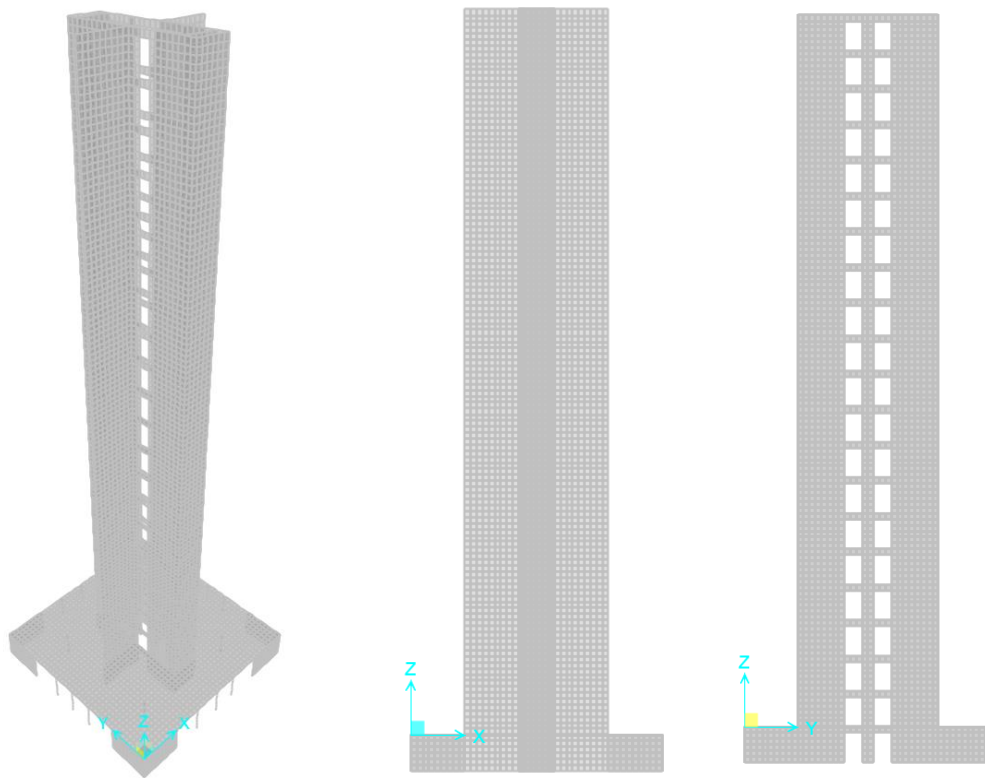
Slika 6.1 Prikaz modelirane zgrade od CLT-a u programskom paketu SAP2000

6.1. Opis modela zgrade od CLT-a

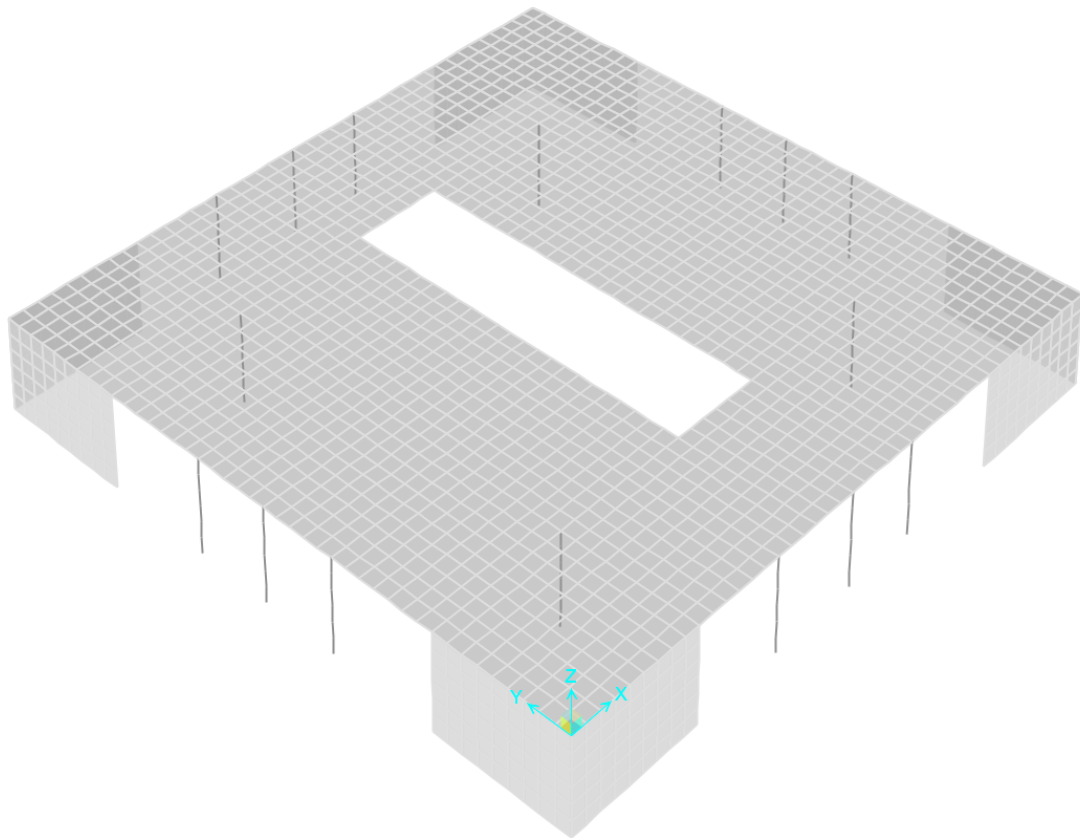
U okviru ovog istraživanja proveden je numerički proračun nosivosti visoke CLT zgrade s armirano betonskom jezgrom i armirano betonskim prizemljem. Ukupna visina zgrade s prizemljem iznosi 66 m, tlocrtnih dimenzija 21 x 21m (Slika 6.2). Glavnu nosivu strukturu čini AB jezgra tlocrtnih dimenzija 3 x 12 m (Slika 6.3). Prizemlje čine AB zidovi (debljine 40cm) na uglovima zgrade te 16AB stupova dimenzija (60x60 cm). Prva stropna AB ploča debljine 30 cm oslonjena je na AB zidove i stupove (Slika 6.4). Glavnu nosivu strukturu čine CLT paneli od nosivih zidova i CLT stropnih elemenata (Slika 6.5, Slika 6.6 i Slika 6.7.) Nosivi vanjski zidovi čine CLT panel debljine 20 cm, unutrašnji nosivi CLT zidovi dimenzija su 12 cm, 14 cm i 16 cm. Međukatnu konstrukciju čini CLT ploča debljine 20 cm (Slika 6.8.) Rasponi i dimenzije predgotovljenih panela prikladni su dimenzijama dostupnima na tržištu[16]. Otvori kao što su prozori i vrata pripremaju se u proizvodnom pogonu s CNC tehnologijom[17].



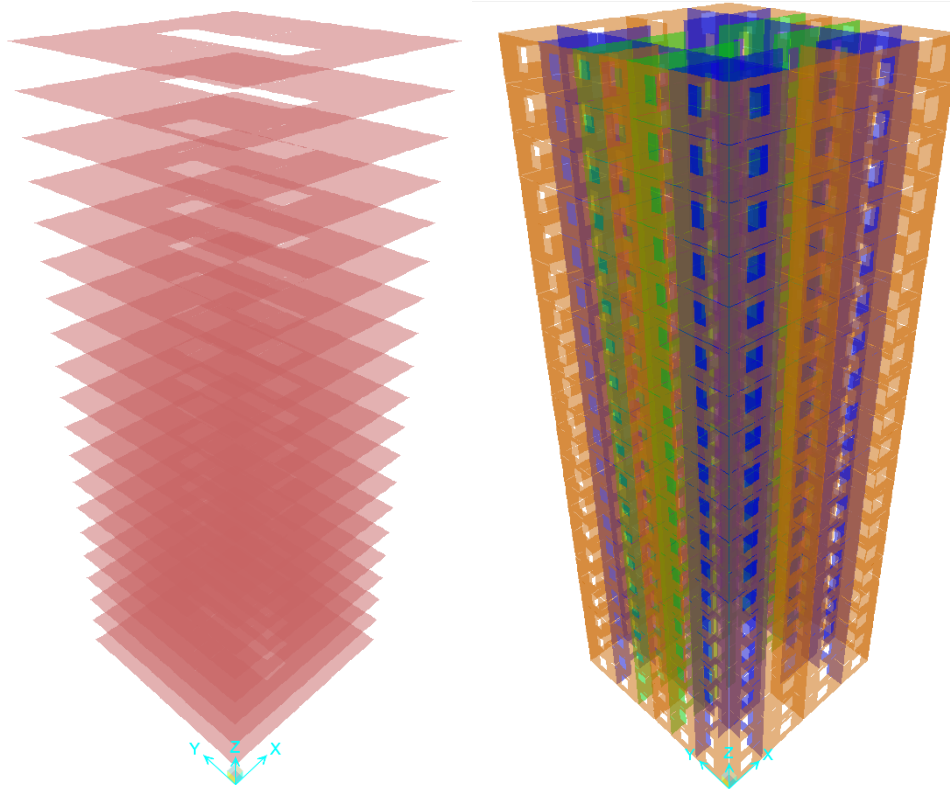
Slika 6.2 Prikaz zgrade u pogledu x-z i tlocrtni prikaz



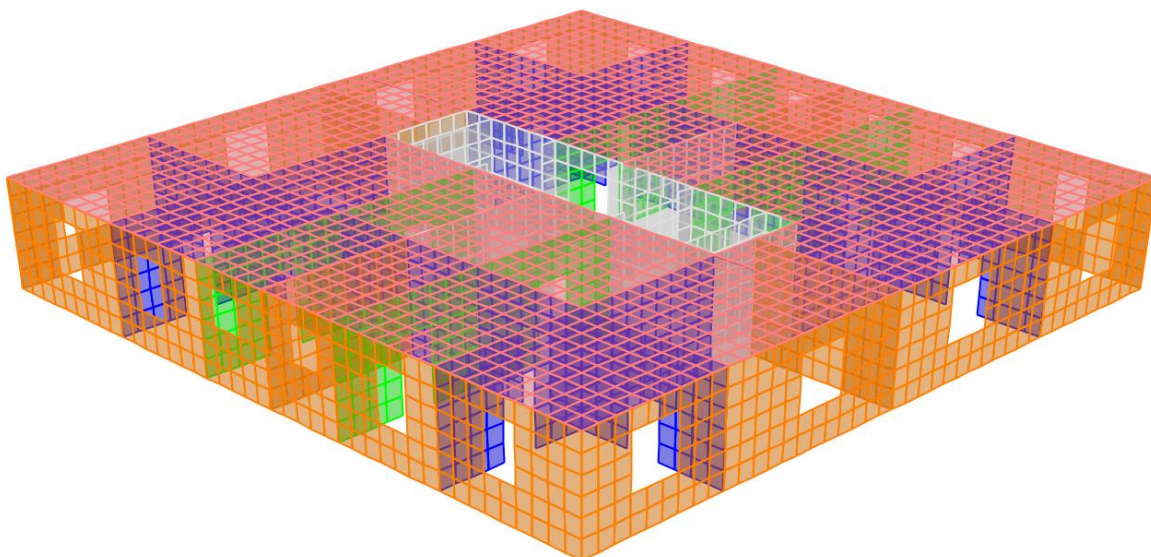
Slika 6.3 Prikaz AB dijela konstrukcije



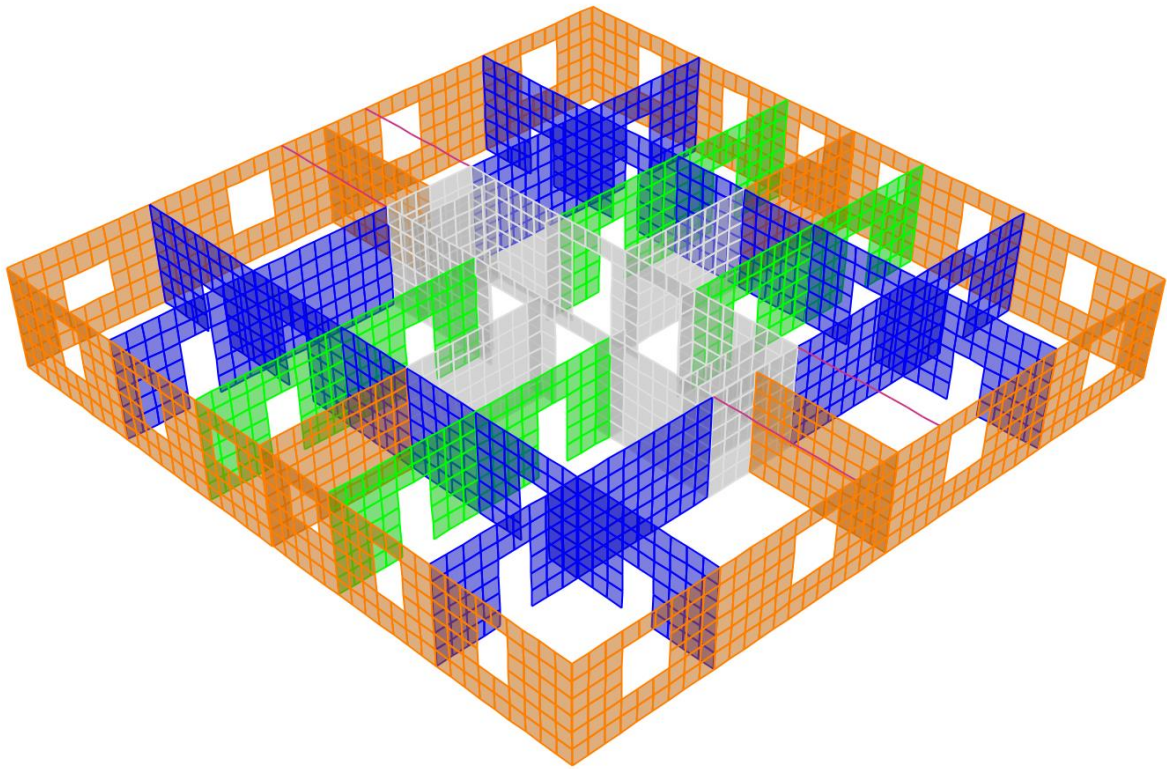
Slika 6.4 Prikaz AB prizemlja s stropnom pločom, zidovima i stupovima



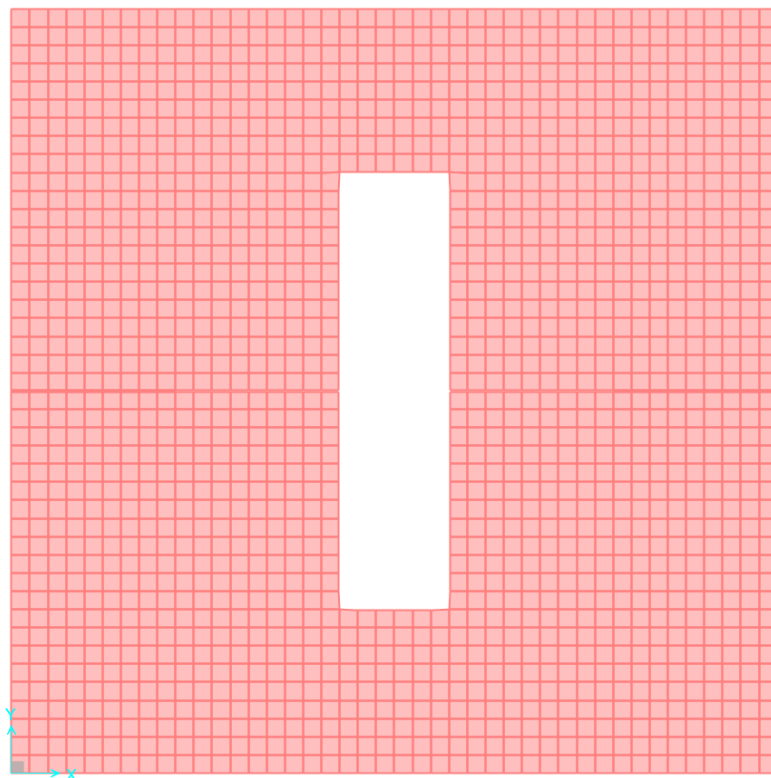
Slika 6.5 Prikaz stropnih ploča od CLT panela i CLT nosivi zidovi



Slika 6.6 Pogled na karakterističnu etažu



Slika 6.7 Pogled na karakterističnu etažu bez stropne ploče



Slika 6.8 Tlocrtni prikaz diskretizirane CLT stropne ploče

6.2. Opis Mehaničke karakteristike križno lameliranog drva i ab elemenata

Križno lamelirani paneli izrađeni su od 5 i 7 slojeva lameliranih panela s četiri različite debljine (14 cm, 16 cm, 18 cm i 20 cm) (Slika 6.8).

CLT wall elements (C panels)								
The grain direction of the cover layers is always parallel to the panel widths.								
Nominal thickness [mm]	Designation [-]	Layers [-]	Lamella structure [mm]					
			C	L	C	L	C	L
60	C3s	3	20	20	20			
80	C3s	3	30	20	30			
90	C3s	3	30	30	30			
100	C3s	3	30	40	30			
120	C3s	3	40	40	40			
100	C5s	5	20	20	20	20	20	
120	C5s	5	30	20	20	20	30	
140	C5s	5	40	20	20	20	40	
160	C5s	5	40	20	40	20	40	

CLT ceiling elements (L panels)									
The grain direction of the cover layers is always at right angles to the panel widths.									
Nominal thickness [mm]	Designation [-]	Layers [-]	Lamella structure [mm]						
			C	L	C	L	C	L	C
60	L3s	3	20	20	20				
80	L3s	3	30	20	30				
90	L3s	3	30	30	30				
100	L3s	3	30	40	30				
120	L3s	3	40	40	40				
100	L5s	5	20	20	20	20	20		
120	L5s	5	30	20	20	20	30		
140	L5s	5	40	20	20	20	40		
160	L5s	5	40	20	40	20	40		
180	L5s	5	40	30	40	30	40		
200	L5s	5	40	40	40	40	40		
160	L5s-2*	7	60	40	60				
180	L7s	7	30	20	30	20	30	20	30
200	L7s	7	20	40	20	40	20	40	20
240	L7s	7	30	40	30	40	30	40	30
220	L7s-2*	7	60	30	40	30	60		
240	L7s-2*	7	80	20	40	20	80		
260	L7s-2*	7	80	30	40	30	80		
280	L7s-2*	7	80	40	40	40	80		
300	L8s-2**	8	80	30	80	30	80		
320	L8s-2**	8	80	40	80	40	80		

* cover layers consisting of two lengthwise layers
 ** cover layers and inner layer consisting of two lengthwise layers

Width (charged widths): 245 cm, 275 cm, 295 cm
 Length (production lengths): from minimum production length of 8.00 m per charged width up to max. 16.00 m (in 10 cm increments)

Slika 6.9 Informacije proizvođača „Stora enso“ o proizvodu CLT panela [16]

Za potrebe izrade numeričkom modela korištene su mehaničke karakteristike CLT panela koje su dobivene iz eksperimentalnog istraživanja autora Dujić i drugi [18][19]. CLT panel modeliran je kao pojednostavljeni jednoslojni ortotropni plošni element[20].

U tablici 1 prikazane su vrijednosti modula elastičnosti za zidne i stropne elemente korištene u numeričkom modelu. Vrijednosti modula elastičnosti iskazani su za tri smjera, modul elastičnosti u ravnini ($E_1 = E_{0ef}$ i $E_2 = E_{90ef}$) te okomito na ravninu ($E_3 = E_{90ef}$). Vlastita težina križno lameliranog drveta zadana je $0,422 \text{ kN/m}^3$.

Tablica 6.1 Mehaničke karakteristike križno lameliranog drveta

Element	E_{0ef} [MPa]	E_{90ef} [MPa]
Zidni	9680	3330
Stropni	10100	2900

Za modeliranje armirano betonskih elemenata jezgre, stropna ploče prizemlja, stupova i zidova prizemlja primijenjeni su uobičajeni materijali za visoke zgrade. Dakle, korišten je modul elastičnosti 37GPa, tlačne čvrstoće betona C50/60 i težine betona 2,45 kN/m³[21].

6.3. Analiza opterećenja

Kao dominantno opterećenje modela uzeta je u obzir vlastita težina, dodatno stalno opterećenje, uporabno i opterećenja nastala kao posljedica seizmičkih djelovanja u dva smjera x i y definirana dvjema spektralnim funkcijama (Tablica 6.2). Od navedenih opterećenja definirane su dvije kombinacije djelovanja kombinacija 1 i kombinacija 2 (Tablica 6.3).

Tablica 6.2 Pridružena opterećenja iz softverskog paketa SAP2000

TABLE: Case - Static 1 - LoadAssignments			
Case	LoadType	LoadName	LoadSF
Text	Text	Text	Unitless
DEAD	Loadpattern	DEAD	1
STALNO	Loadpattern	STALNO	1
UPORABNO	Loadpattern	UPORABNO	1
ptrx	Loadpattern	POTRES X	1
ptry	Loadpattern	POTRES Y	1

Tablica 6.3 Pridružene kombinacije opterećenja

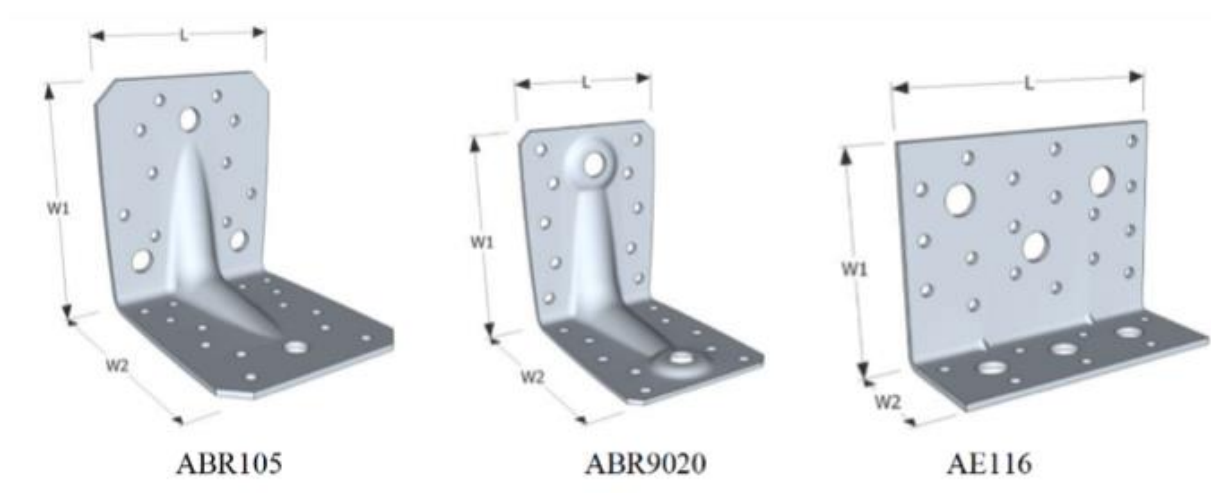
TABLE: CombinationDefinitions					
ComboName	ComboType	AutoDesign	CaseType	CaseName	ScaleFactor
Text	Text	Yes/No	Text	Text	Unitless
COMB1	LinearAdd	No	LinearStatic	DEAD	1
COMB1			LinearStatic	STALNO	1
COMB1			LinearStatic	UPORABNO	0,3
COMB1			LinearStatic	ptrx	1
COMB1			LinearStatic	ptry	0,3
COMB2	LinearAdd	No	LinearStatic	DEAD	1
COMB2			LinearStatic	STALNO	1
COMB2			LinearStatic	UPORABNO	0,3
COMB2			LinearStatic	ptrx	0,3
COMB2			LinearStatic	ptry	1

U prvom koraku provedena je linearna statička analiza nosivosti zgrade od CLT za dominantna opterećenja, gdje je uzeto u obzir nelinearno ponašanje spojnih sredstava. U sljedećem koraku provedena je ista analiza s nelinearnim spojnim sredstvima, ali algoritam nije mogao konvergirati zbog problema s silaznom granom kod opisivanja ponašanja spojnih sredstava. Stoga je u sljedećem koraku uvedeno pojednostavljeno ponašanje spojnih sredstava na način da je provedena linearna analiza sa sekantnom krutosti link elemenata. Njihova krutost određena je kao sekantna linija pri maksimalnoj sili. Kod linearne analize prigušenje u modelu je uzeto kao 5 postotno prigušenje. Prigušenijem se pokriva utjecaj kapaciteta trošenja energije kroz nelinearne učinke. U Tablica 6.4 prikazane su vrijednosti sekantnih krutosti čeličnih spojnih sredstava.

6.4. Modeliranje spojnih sredstva

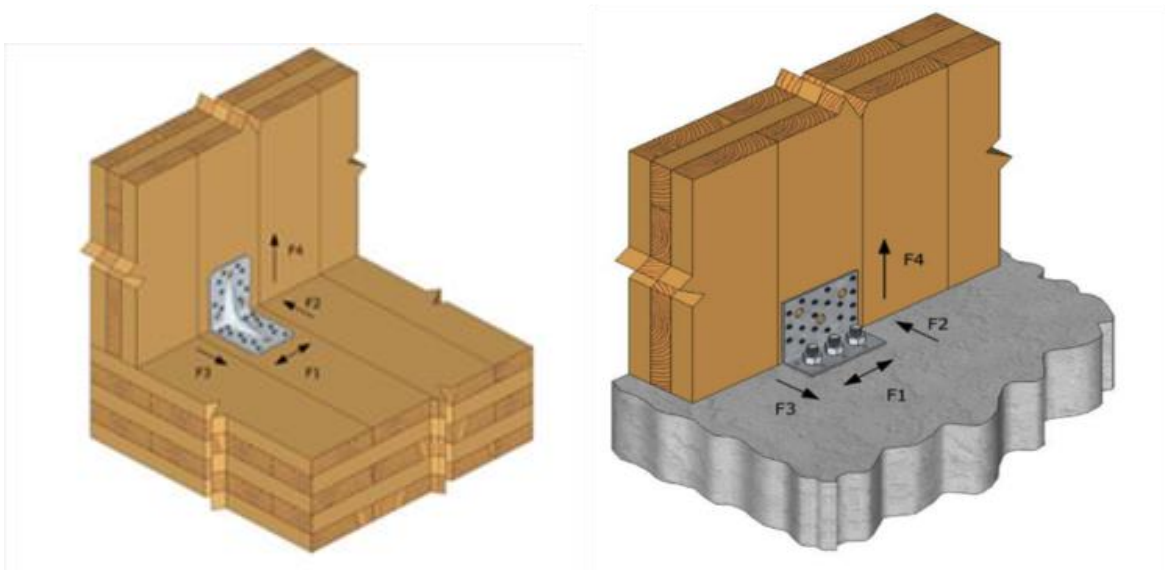
Osnovna funkcija spajala je da elemente drvene konstrukcije spoje u jednu cjelinu – u nosivu konstrukciju. Kako bi konstrukcija tokom svog životnog vijeka obavljala svoju funkciju bitno je da su spojevi kvalitetno i precizno izvedeni. Kod križno lameliranog drva osnovna mehanička spajala su vijci (čavli) i čelični kutnici koji omogućavaju međusobnu vezu nosivih elemenata.

U kontaktnim zonama između panela (veza zid-zid i strop – zid) numerički je primijenjen odgovarajući tip vijaka i kutnika zajedno s ankerima (sidra) kako bi prenijeli posmične i vlačne sile koje djeluju na konstrukciju uslijed potresnog djelovanja. Primjer spajala od proizvođača Simpson Strnog-Tie prikazan je na slici niže[22].



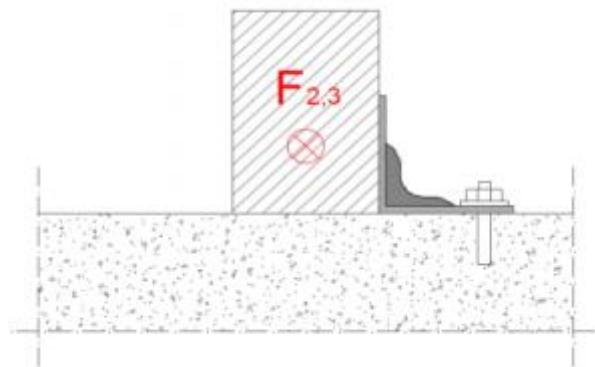
Slika 6.10 Spajala (kutnici) za CLT panele

Nadalje dani su primjeri spajala dva CLT panela te spoj CLT panela s ab elementom.



Slika 6.11 Spajalo 105 za vezu dva CLT panela i AE116 za vezu CLT panela i betona

Primjer sidrenja CLT panela za AB ploču prikazan je u poprečnom presjeku na sljedećoj slici.

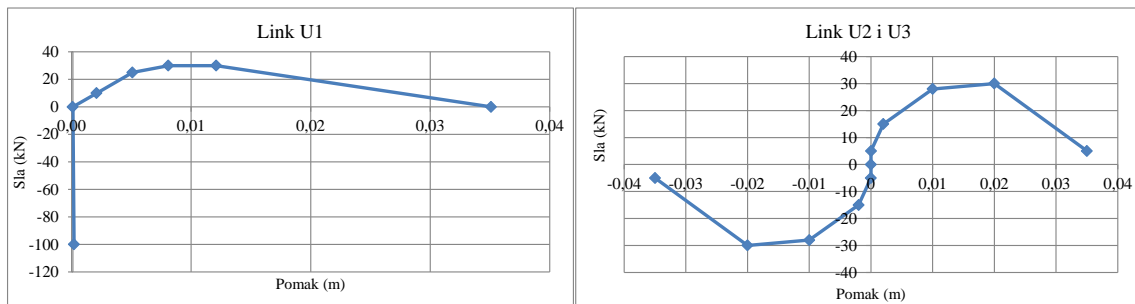


Slika 6.12. Spajalo 105 za vezu dva CLT panela i AE116 za vezu CLT panela i betona [23]

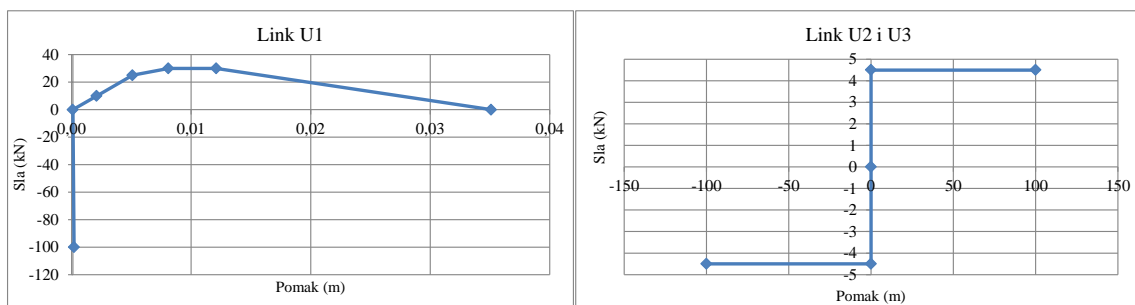
Uz modeliranje materijala u numeričkim proračunima najveći izazov je modeliranje ponašanja spojeva. Kako bi se što vjernije opisalo ponašanje spojnih sredstava korištena su spojna sredstva čije osnovne karakteristike su dobivene iz eksperimentalnog dijela istraživanja (prema autorima Dujič i dr [19]). Spojna sredstava modelirana su kao „link“ elementi čije ponašanje je opisano kao nelinearno. Za svaki od „link“ elemenata opisano je ponašanje u tri smjera, prvi smjer (u_1) je ponašanje elementa u tlaku i vlaku u smjeru u kojem se pruža te dva posmična smjera (u_2 i u_3). U numeričkom modelu za spajanje pojedinih CLT elemenata korištena su četiri vrste link elemenata:

- CLT zid – CLT zid Slika 6.13
- beton – CLT element (Slika 6.14)
- CLT zid – CLT ploča (dvije vrste spajala):
 - spajala veće nosivosti (Slika 6.15)
 - spajala manje nosivosti (Slika 6.16)

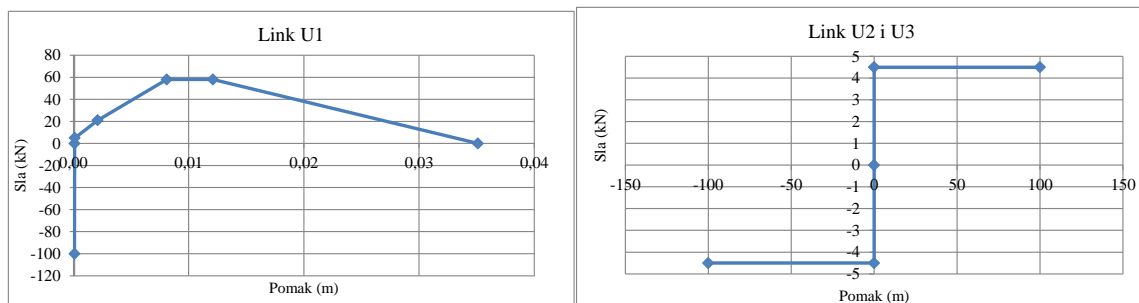
Nelinearno ponašanje elementa spojnih sredstava prikazano je na sljedećim grafovima kao zavisnost sile o pomaku.



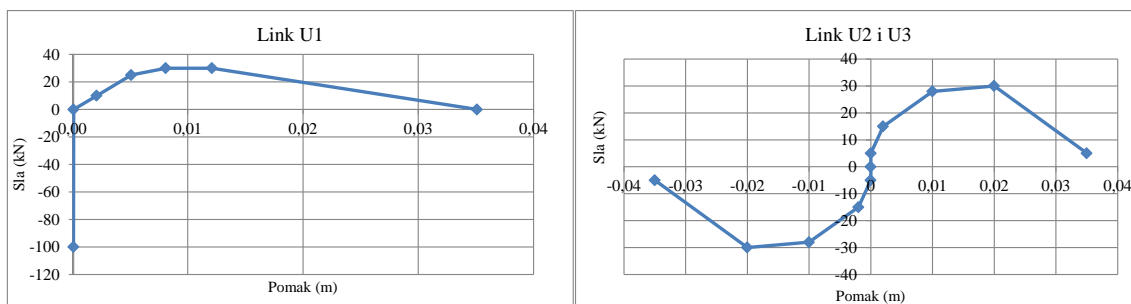
Slika 6.13 Nosivost spojnog sredstva CLT zid – CLT zid u uzdužnom i posmičnom smjeru



Slika 6.14 Nosivost spojnog sredstva beton – CLT u uzdužnom i posmičnom smjeru



Slika 6.15 Nosivost spojnog sredstva CLT zid – CLT ploča spajala veće nosivosti u uzdužnom i posmičnom smjeru



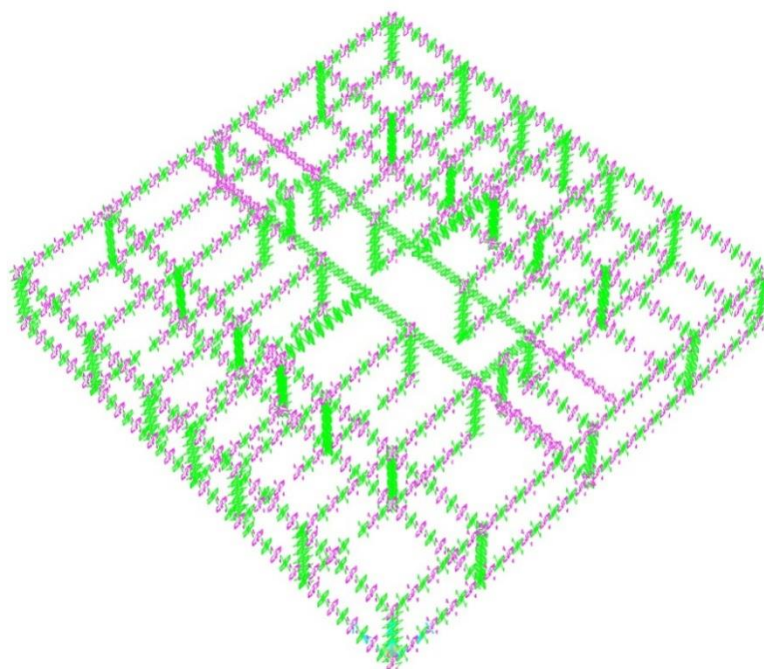
Slika 6.16 Nosivost spojnog sredstva CLT zid – CLT ploča spajalo manje nosivosti u uzdužnom i posmičnom smjeru

Sekantne krutosti čeličnih spojnih elemenata prikazane su u sljedećoj tablici.

Tablica 6.4 Krutosti čeličnih spojnih sredstava [kN/m]

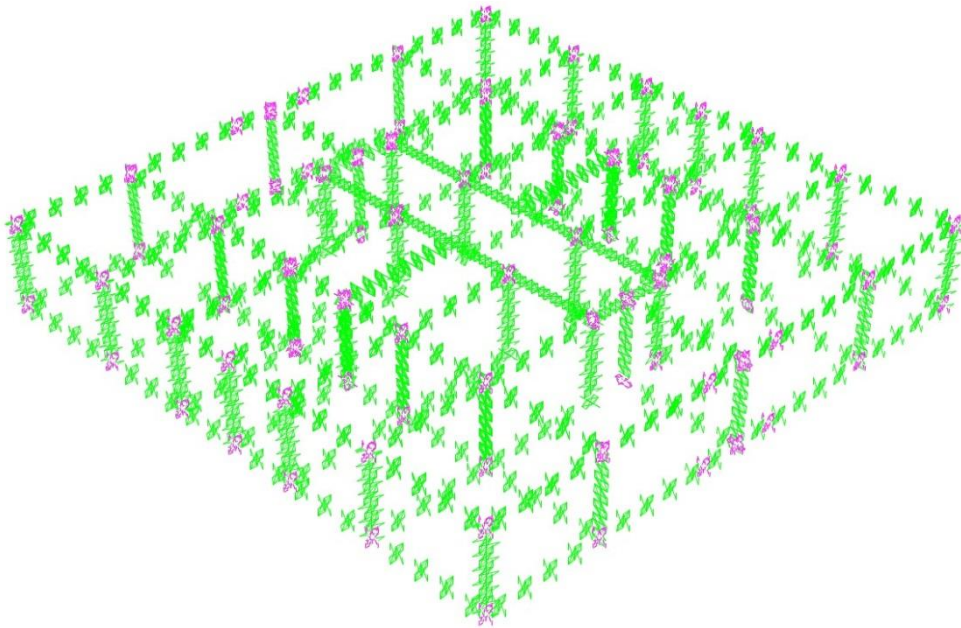
Spojno sredstvo	U1	U2	U3
CLT zid – CLT zid	3750	2800	2800
beton – CLT element	3750	2000	2000
CLT zid – CLT ploča, spajalo veće nosivosti	7250	3000	3000
CLT zid – CLT ploča, spajalo manje nosivosti	3750	2800	2800

Modelirana spojna sredstva nalaze se između čvorova konačnih elemenata. Njihov raspored i položaj prikazan je na sljedećim slikama.

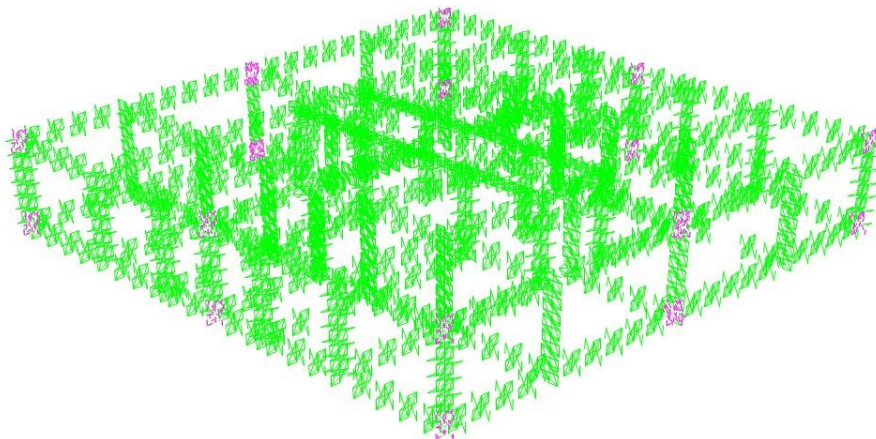


Slika 6.17 Položaj spojnih sredstava na etažama od 1 do 10, rozom bojom označena spojna sredstva veće nosivosti

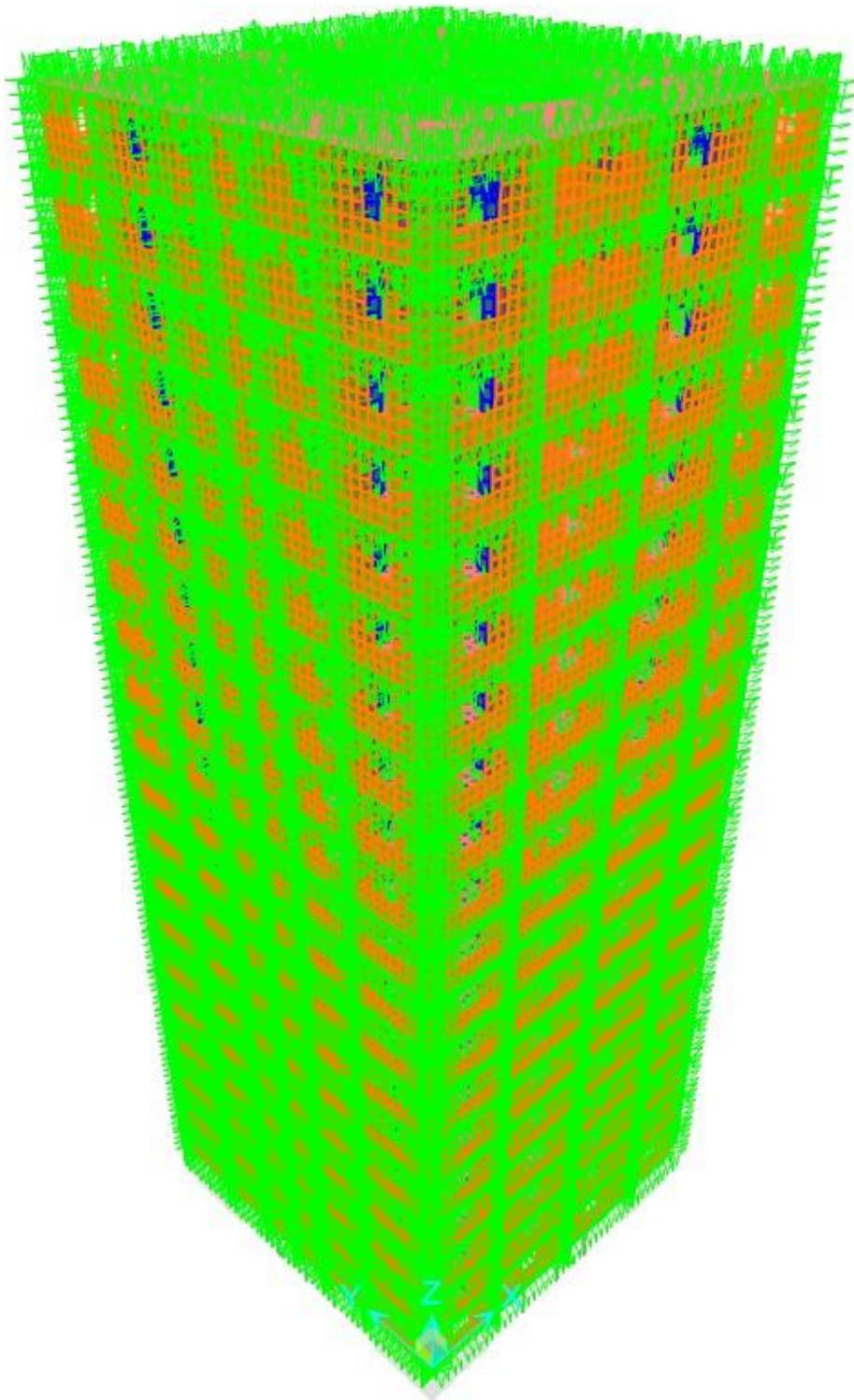
Broj spojnih sredstava podijeljen je na tri grupe. Prvu grupu spojnih sredstava predstavljaju link elementi od 1 do 10 etaže (Slika 6.17), potom od 11 do 15 etaže (Slika 6.18) i konačno od 16 do 20 etaže (Slika 6.19). Veći broj spojnih sredstava nalazi se na nižim etažama. Spojna sredstva veće nosivosti zadužena za vezu zida i ploče naznačena su rozom bojom, njihov broj s brojem etaža opada. Konstantan je broj spojnih sredstava (nezavisan o broju etaža) između CLT zida i CLT zida (link elementi u vertikalnoj ravnini) te betona i CLT elementa (link elementi u okolišu AB jezgre).



Slika 6.18 Položaj spojnih sredstava na etažama od 11 do 15, rozom bojom označena spojna sredstva veće nosivosti



Slika 6.19 Položaj spojnih sredstava na etažama od 16 do 20, rozom bojom označena spojna sredstva veće nosivosti



Slika 6.20 Prikaz svih spojnih sredstava na cijeloj zgradi

6.5. Seizmički proračun i spektralna analiza

Seizmički proračun konstrukcije izuzetno je značajan za ovaj tip konstrukcije čiji je glavni nosivi sustav uz CLT elemente čini ab jezgra. Cilj seizmičkog proračuna je dokazati mehaničku otpornost i stabilnost ovog tipa građevine. Do sada u svijetu je izgrađeno nekoliko visokih zgrada od CLT-a ali u područjima manjeg seizmičkog djelovanja. Stoga su ovom radu želi istražiti mogućnost nosivosti sustava ab jezgre s nosivom strukturom od CLT na područjima većeg seizmičkog djelovanja.

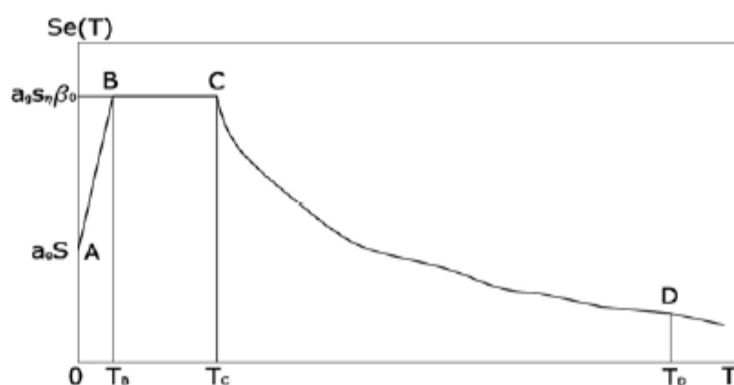
Površinsko potresno gibanje tla modelirano je pomoću elastičnog spektralnog odgovora. Za određivanje jedne komponente potresnog djelovanja obično se koristi spektar potresnog ubrzanja tla u jednom translacijskom smjeru. Elastični spektar odgovora (ubrzanja) definira se analitički prema izrazima:

$$0 \leq T \leq T_B S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot \beta_0 - 1) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot \beta_0$$

$$T_C \leq T \leq T_D S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot \beta_0 \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right]^{k_1}$$

$$T_D \leq T \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot \beta_0 \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right]^{k_1} \cdot \left[\frac{T_D}{T} \right]^{k_2}$$



Slika 6.21 Elastični spektar odaziva

Gdje su:

$S_e(T)$ - ordinata spektra odgovora u jedinici ubrzanja

a_g - osnovno računsko ubrzanje tla

S - modificirani čimbenik tla

T - osnovni period osciliranja linearnog sustava

T_B, T_C - granice intervala konstantnog spektralnog ubrzanja

T_D - granica koja definira početak područja spektra s konstantnim pomacima

β_0 - čimbenik spektralnog ubrzanja

k_1, k_2 - eksponenti koji utječu na oblik spektra odgovora

η - korekcijski čimbenik prigušenja

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2 + \zeta}} \geq 0,7$$

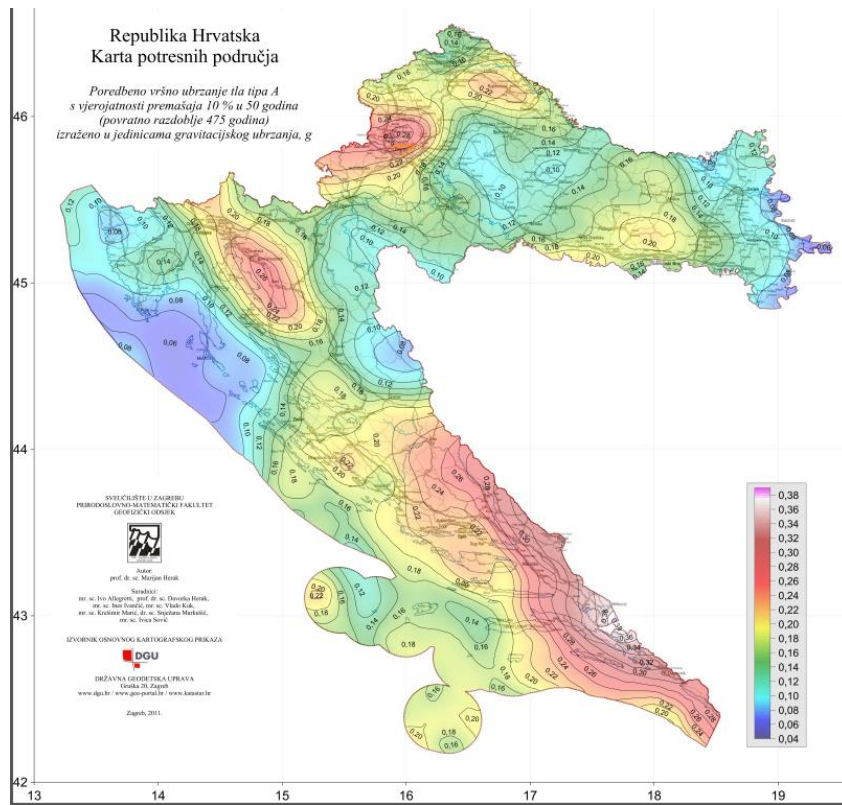
ζ - vrijednost viskoznog prigušenja dana u postocima koja je obično pretpostavljena s 5 %

Iz spektra je vidljivo da spektar modificiraju parametri sukladno kategorijama tla. Za ovu analizu odabrana je C kategorija koja je dana u sljedećoj tablici.

Tablica 6.5 Potresni parametri za kategoriju tla C

Kategorija tla	S	β_0	k_1	k_2	T_B	T_C	T_D
C	0.9	2.5	1.0	2.0	0.20	0.80	3.0

Za lokaciju zgrade odabrano je područje grada Zaprešića s ubrzanjem tla od 2,67 m/s², sukladno karti seizmičkih djelovanja u Republici Hrvatskoj (Slika 6.22). Horizontalno potresno djelovanje prikazano su u dva okomita smjera koja djeluju nezavisno, a prikazani su istim spektrom odaziva. U kombinacijama opterećenja uzeta su u obzir horizontalna djelovanja od potresa dominantno u jednom smjeru te 30% djelovanja u drugom smjeru (Tablica 6.3).

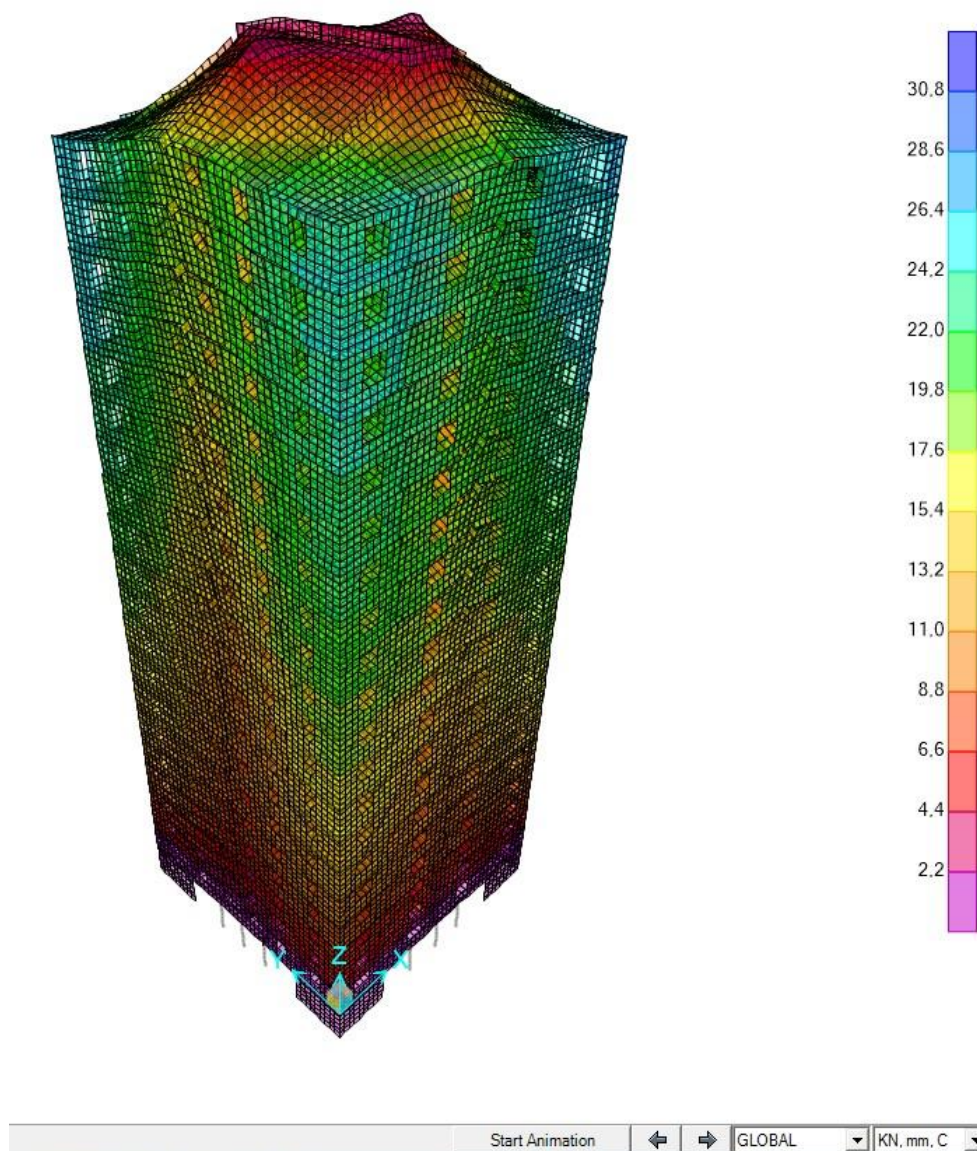


Slika 6.22 Karta seizmičkih područja RH[24]

7. REZULTATI NUMERIČKIH ANALIZA

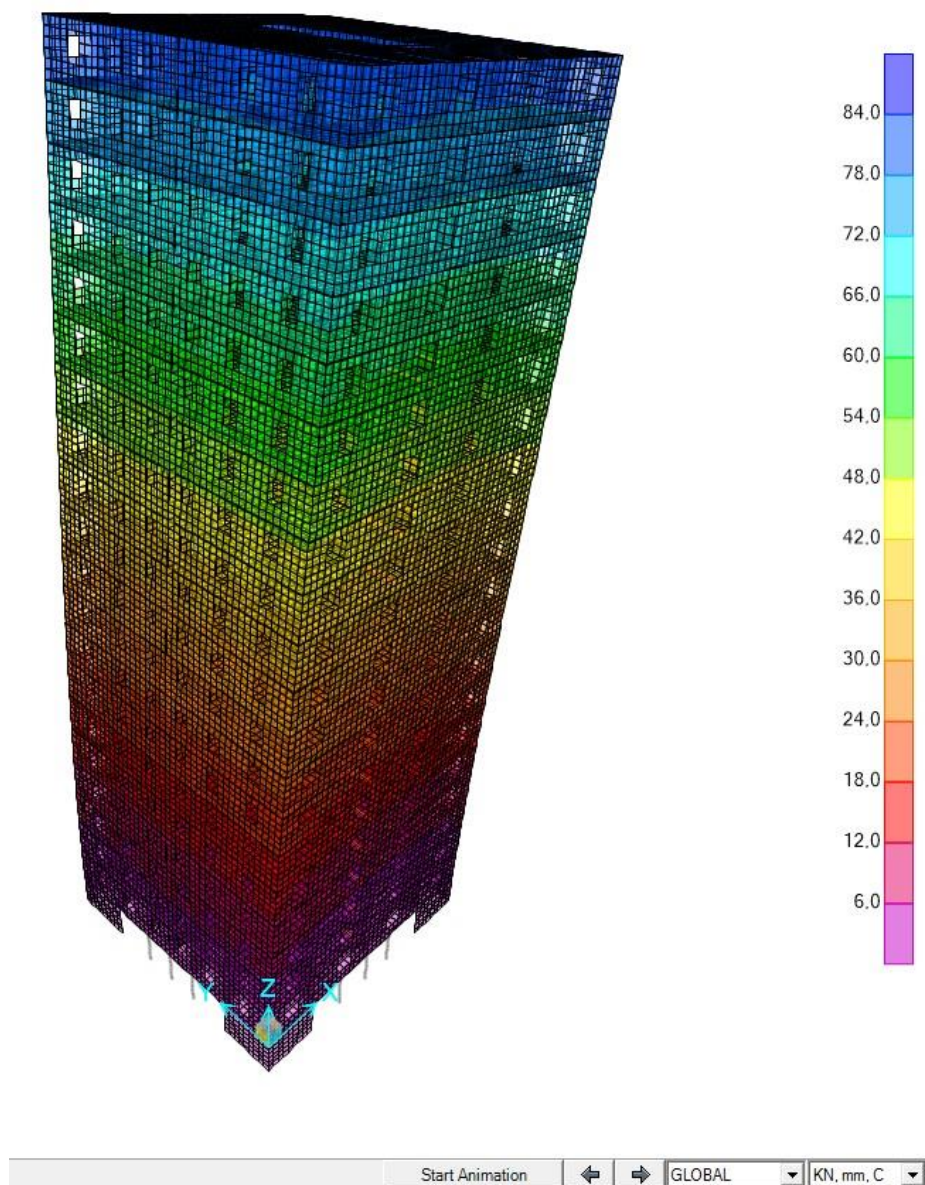
Rezultati numeričke analize predstaviti će se kao grafička interpretacija izlaznih rezultata iz softverskog paketa SAP2000 za mjerodavna zadana opterećenja te njihove kombinacije.

Na sljedećoj prikazani su rezultati vertikalnog pomaka uslijed vlastite težina cijele konstrukcije. Iz prikazanih rezultata može se vidjeti da je vertikalni pomak AB jezgre gotovo zanemariv. Najveći pomak ističe se na uglovima zgrade na mjestu spoja zida CLT panela i to 30,8 mm.

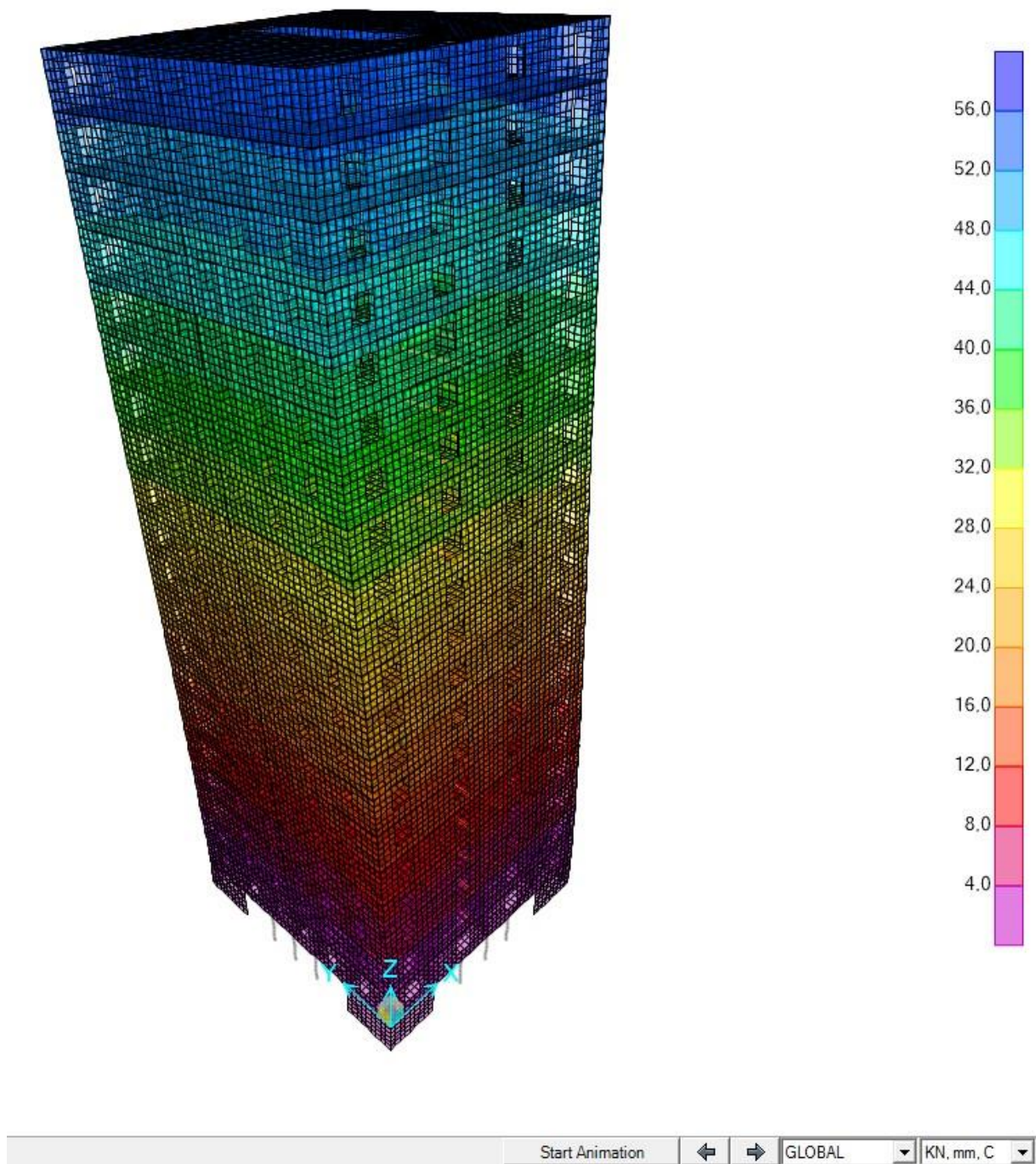


Slika 7.1 3D prikaz vertikalnog pomaka za djelovanje vlastite težine u smjeru Z

Rezultati pomaka uslijed djelovanja potresnog opterećenja u smjeru X i smjeru Y prikazani su na sljedećim slikama. Iz prikazanih rezultata može se vidjeti da je horizontalni pomaka visoke zgrade za potresno opterećenje u smjeru osi X maksimalno iznosi 84 mm, dok za smjer Y iznosi 56 mm.

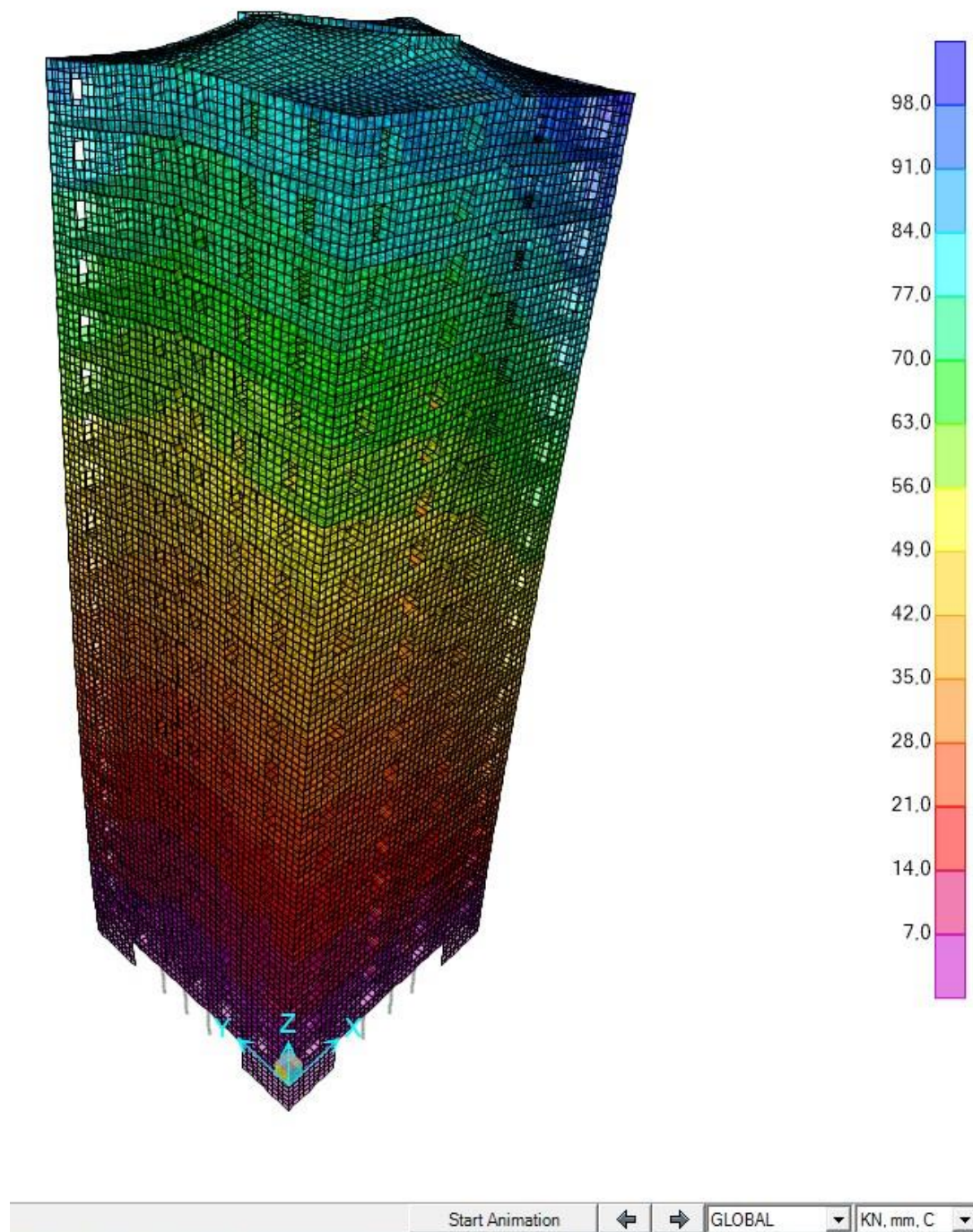


Slika 7.2 3D prikaz horizontalnog pomaka za djelovanje potresa u smjeru X

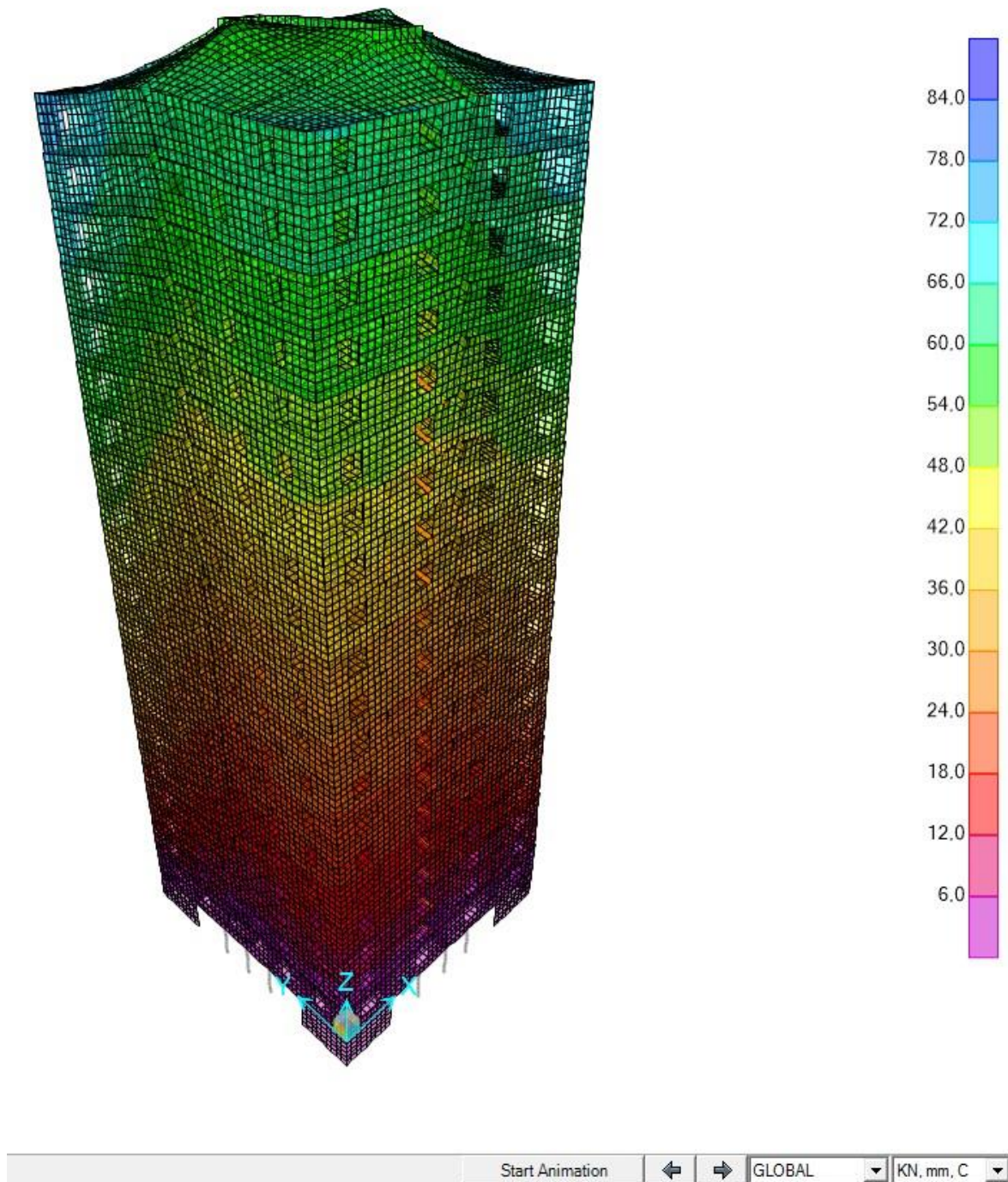


Slika 7.3 3D prikaz horizontalnog pomaka za djelovanje potresa u smjeru Y

Nadalje, prikazani su rezultanti pomaci za zadane dvije kombinacije opterećenja. Prva kombinacija obuhvaća dominantan potresu smjeru X dok druga kombinacija u smjeru Y.



Slika 7.4 3D prikaz resultantnog pomaka za djelovanje kombinacije 1



Slika 7.5 3D prikaz rezultatnog pomaka za djelovanje kombinacije 2

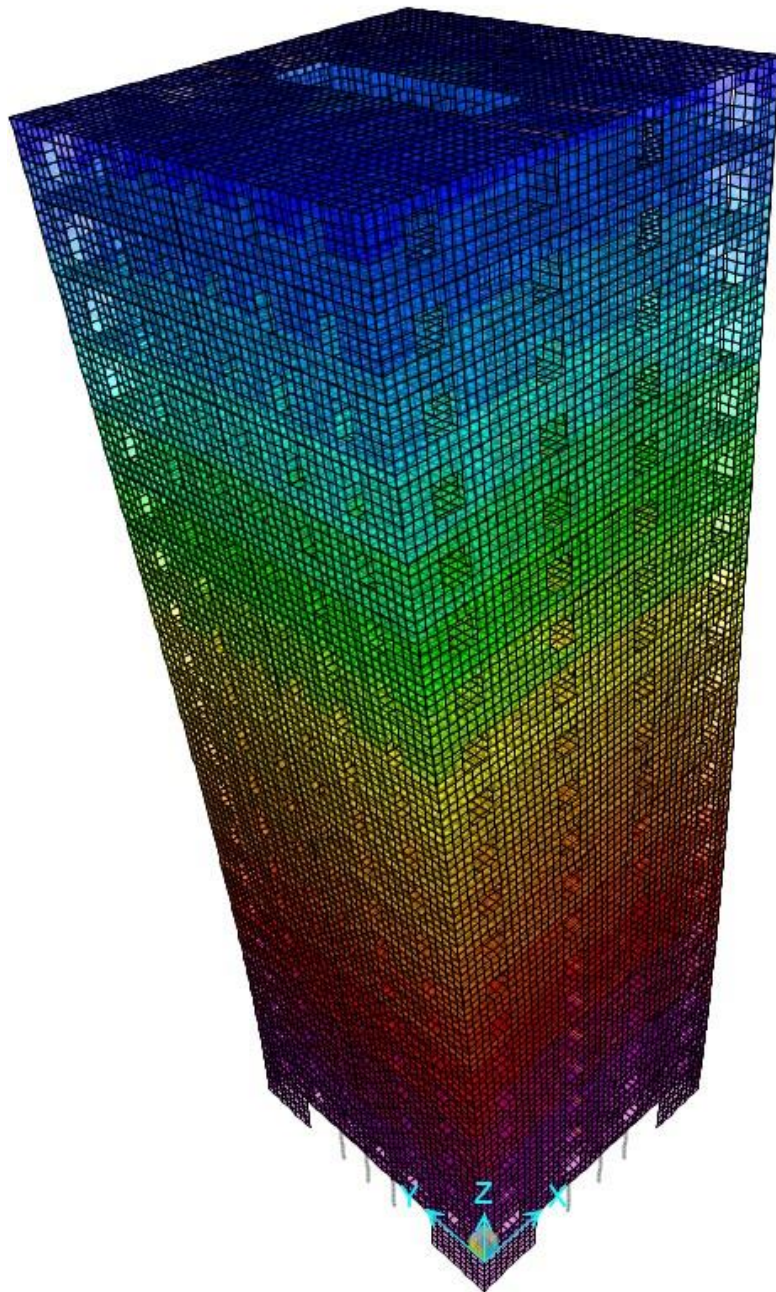
Osim prikazanih rezultata pomaka ovdje su izdvojene vlastite frekvencije i oblici titranja visoke zgrade. U tablici dolje prikazani su rezultati numeričke analize sudjelovanja masa pri pobudi svakog modalnog oblika.

Tablica 7.1 Udio sudjelovanja masa pri modalnim oblicima

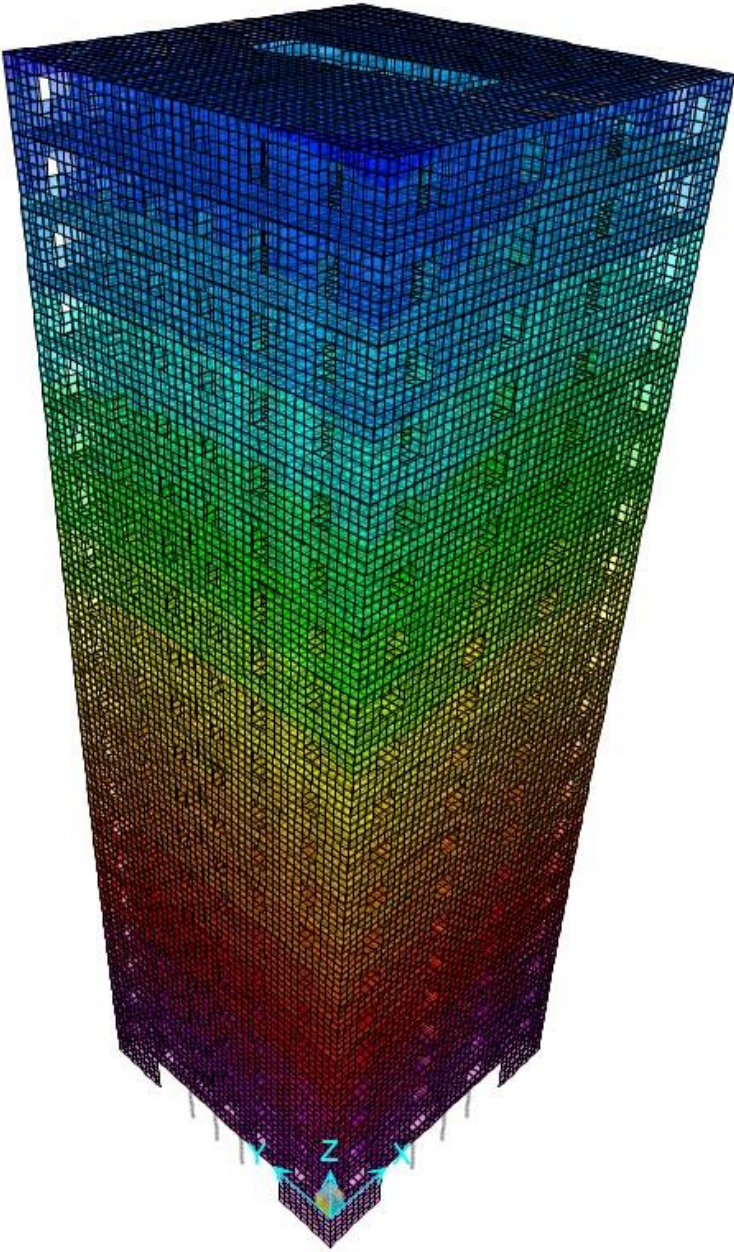
TABLE: Modal Participating Mass Ratios									
OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	1,490	0,58	0,00	0,00	0,58	0,00	0,00
MODAL	Mode	2	1,154	0,00	0,00	0,00	0,58	0,00	0,00
MODAL	Mode	3	1,046	0,00	0,62	0,00	0,58	0,62	0,00
MODAL	Mode	4	0,448	0,00	0,00	0,00	0,58	0,62	0,00
MODAL	Mode	5	0,364	0,14	0,00	0,00	0,72	0,62	0,00
MODAL	Mode	6	0,359	0,00	0,09	0,00	0,72	0,71	0,00
MODAL	Mode	7	0,327	0,00	0,00	0,30	0,72	0,71	0,30
MODAL	Mode	8	0,299	0,00	0,00	0,00	0,72	0,71	0,30
MODAL	Mode	9	0,290	0,00	0,07	0,00	0,72	0,78	0,30
MODAL	Mode	10	0,287	0,00	0,00	0,00	0,72	0,78	0,30
MODAL	Mode	11	0,267	0,04	0,00	0,00	0,77	0,78	0,30
MODAL	Mode	12	0,248	0,00	0,01	0,01	0,77	0,79	0,31
MODAL	Mode	13	0,246	0,00	0,00	0,09	0,77	0,79	0,40
MODAL	Mode	14	0,239	0,00	0,00	0,00	0,77	0,79	0,40
MODAL	Mode	15	0,232	0,01	0,00	0,00	0,78	0,79	0,41
MODAL	Mode	16	0,220	0,00	0,00	0,00	0,78	0,79	0,41
MODAL	Mode	17	0,212	0,00	0,03	0,00	0,78	0,81	0,41
MODAL	Mode	18	0,202	0,00	0,00	0,00	0,78	0,81	0,41
MODAL	Mode	19	0,198	0,00	0,00	0,00	0,78	0,82	0,41
MODAL	Mode	20	0,190	0,00	0,00	0,02	0,78	0,82	0,43

Ističu se sljedeći tonovi konstrukcije:

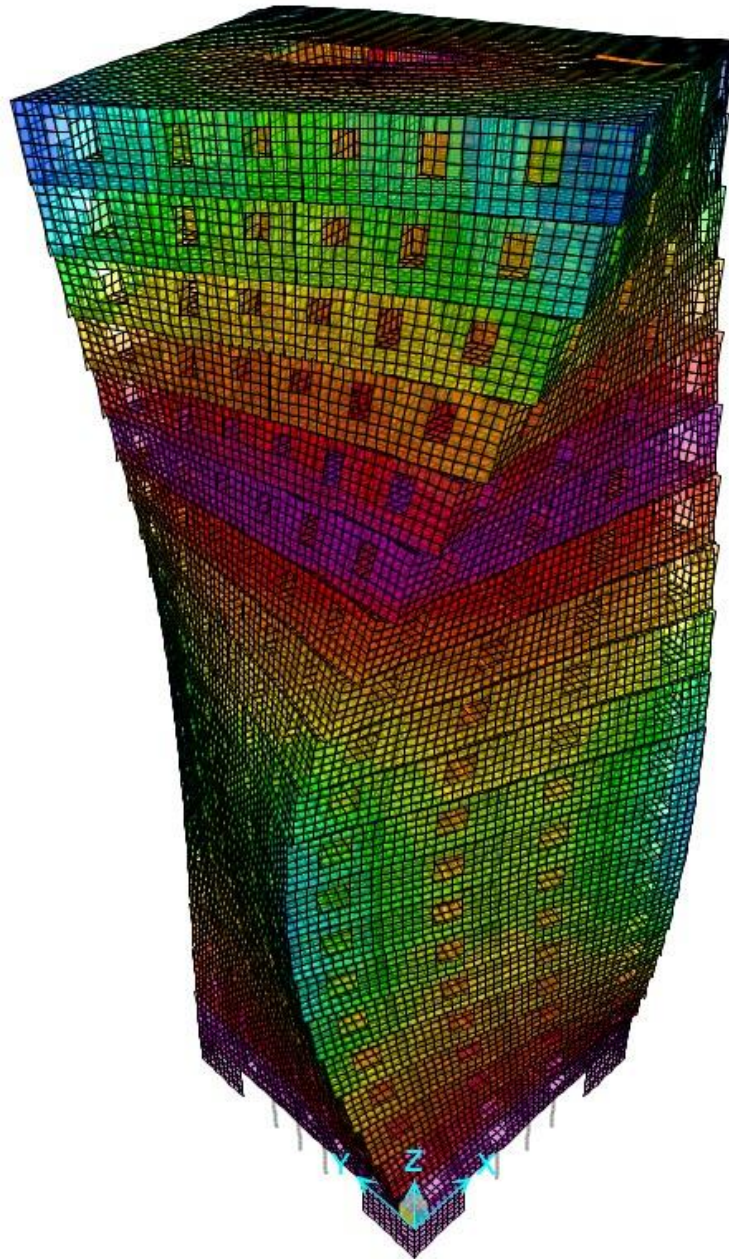
- prvi oblik titranja, period 1,490 s
- drugi oblik titranja, period 1,046 s
- treći oblik titranja, period 0,448
- četvrti oblik titranja, period 0,364



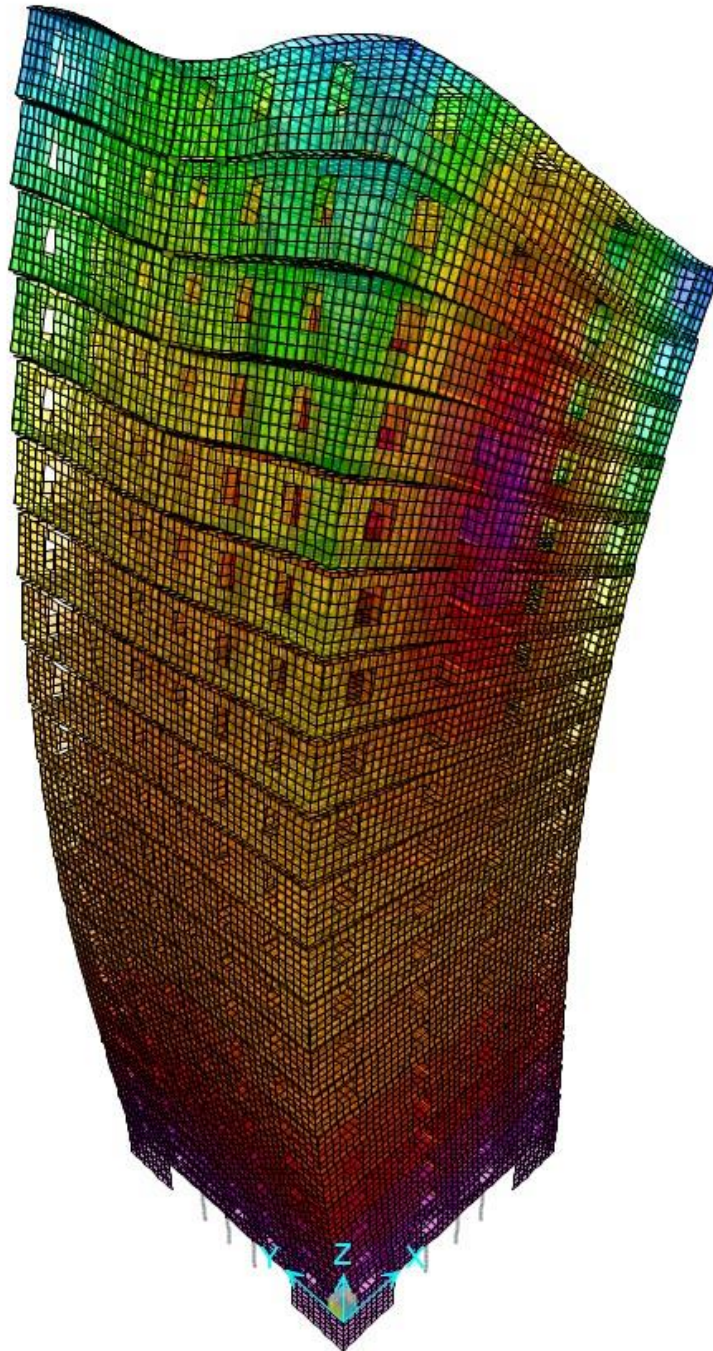
Slika 7.6 3D prikaz prvog modalnog oblika



Slika 7.7 3D prikaz drugog modalnog oblika



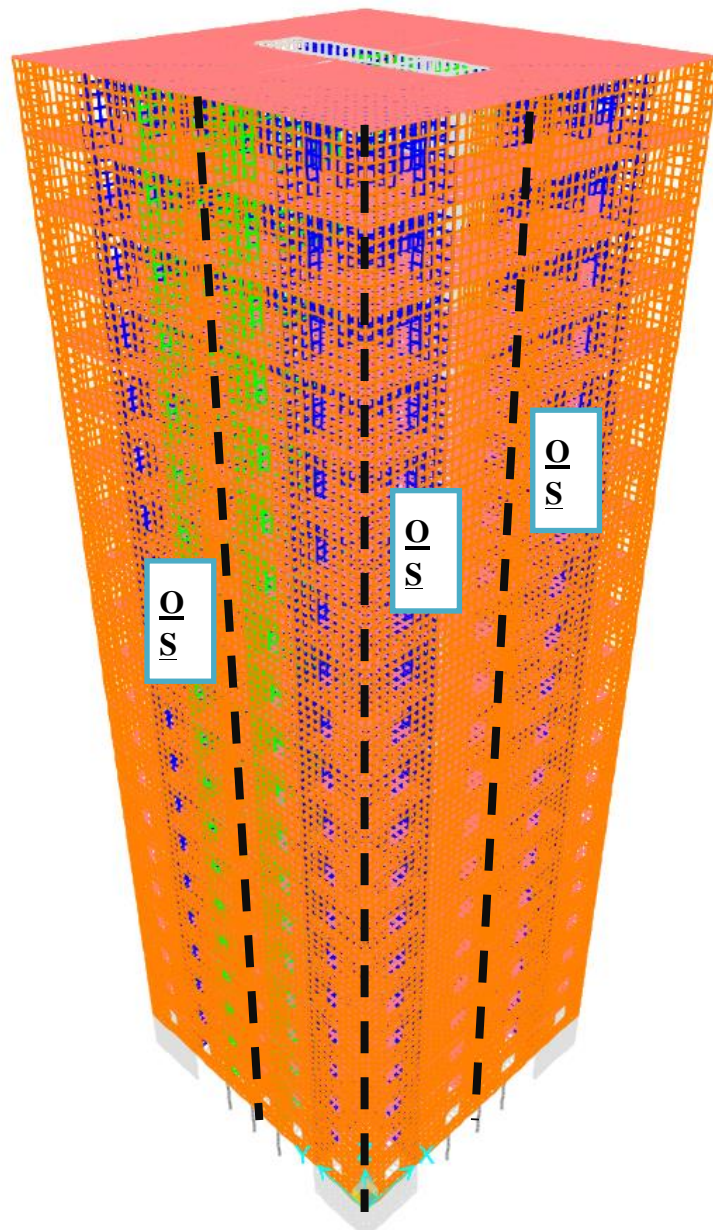
Slika 7.8 3D prikaz trećeg modalnog oblika



Slika 7.9 3D prikaz četvrtog modalnog oblika

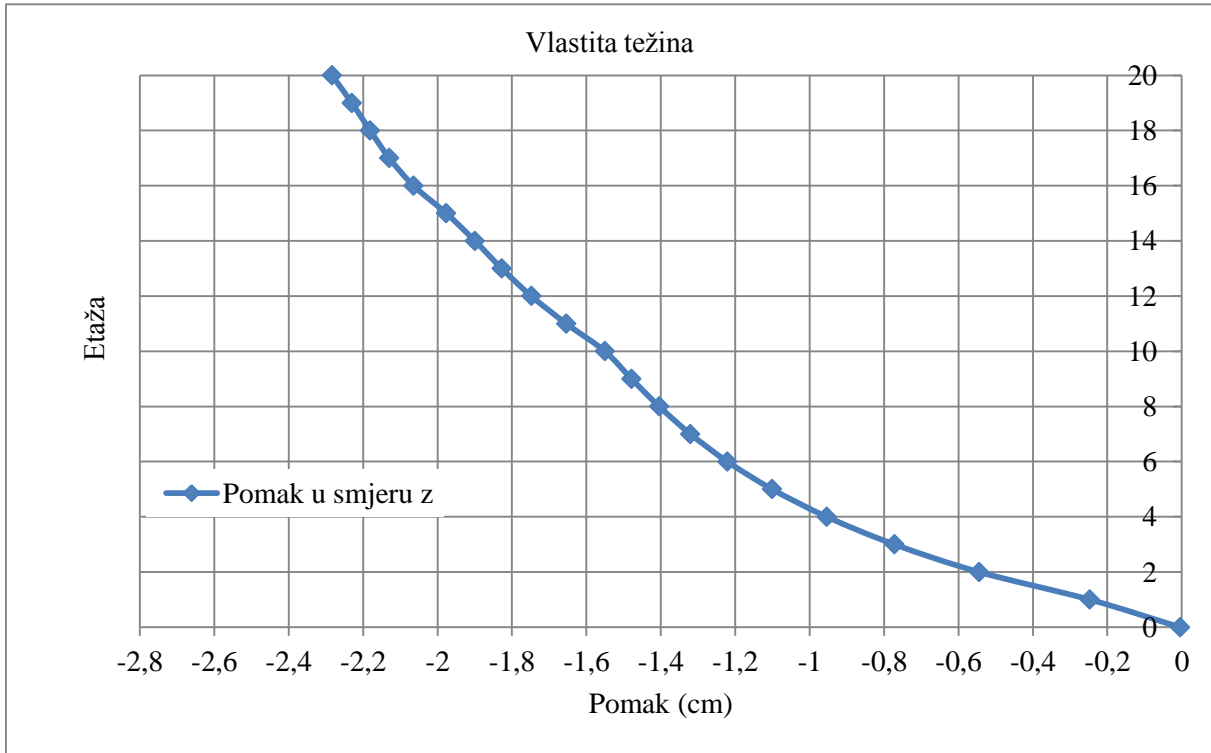
8. Analiza rezultata numeričkog modela

Analiza rezultata pomaka za mjerodavna opterećenja te njihove kombinacije prikazana je grafički na sljedećim prikazima. Za lakšu analizu rezultata odabrane su tri osi po visini zgrade s jednom točkom po svakoj od etaža. Prva os A nalazi se u polovici raspona u smjeru x, druga os B na rubu zgrade i treća os C u polovici raspona smjera y.

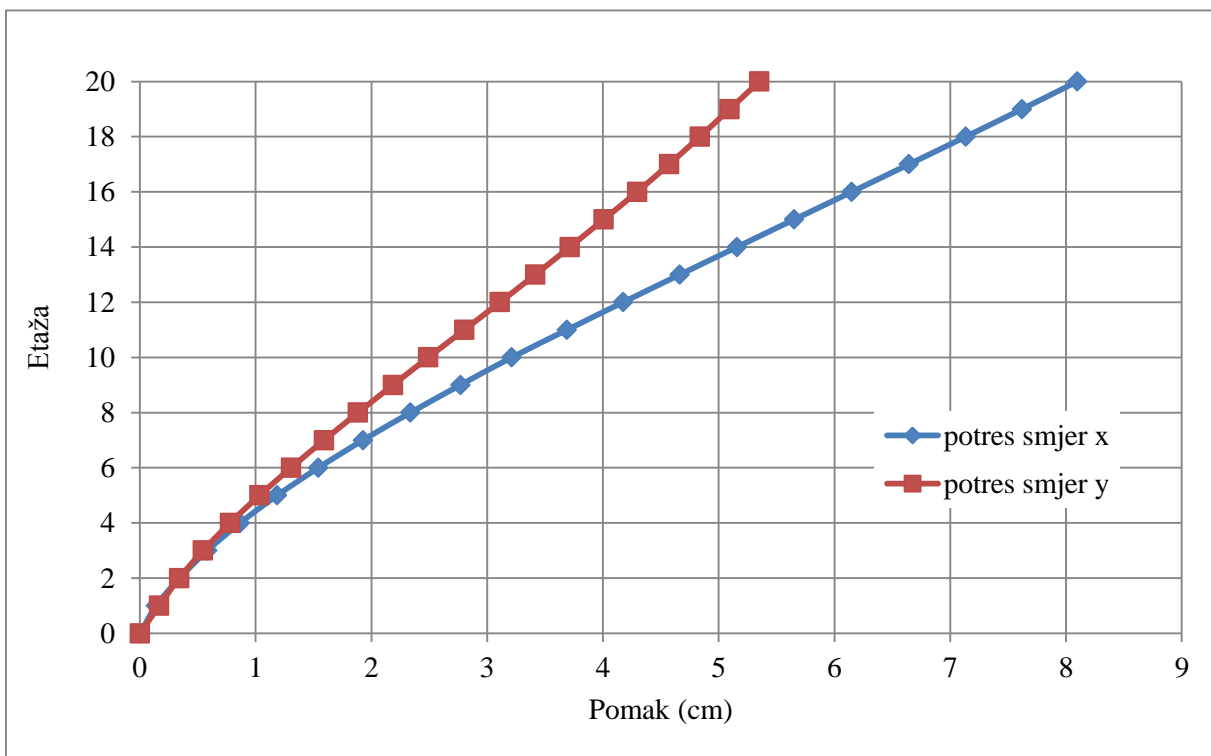


Slika 8.1 Položaj osi A, B i C

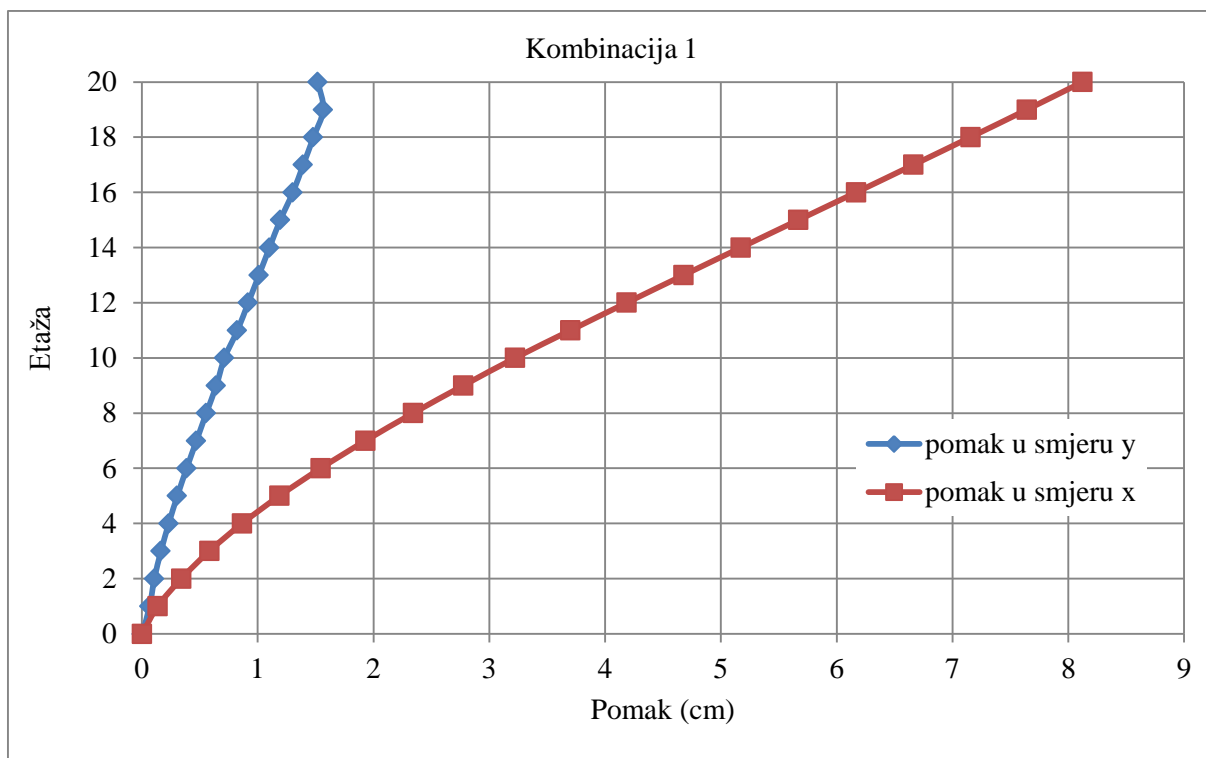
8.1. Analiza rezultata u osi A



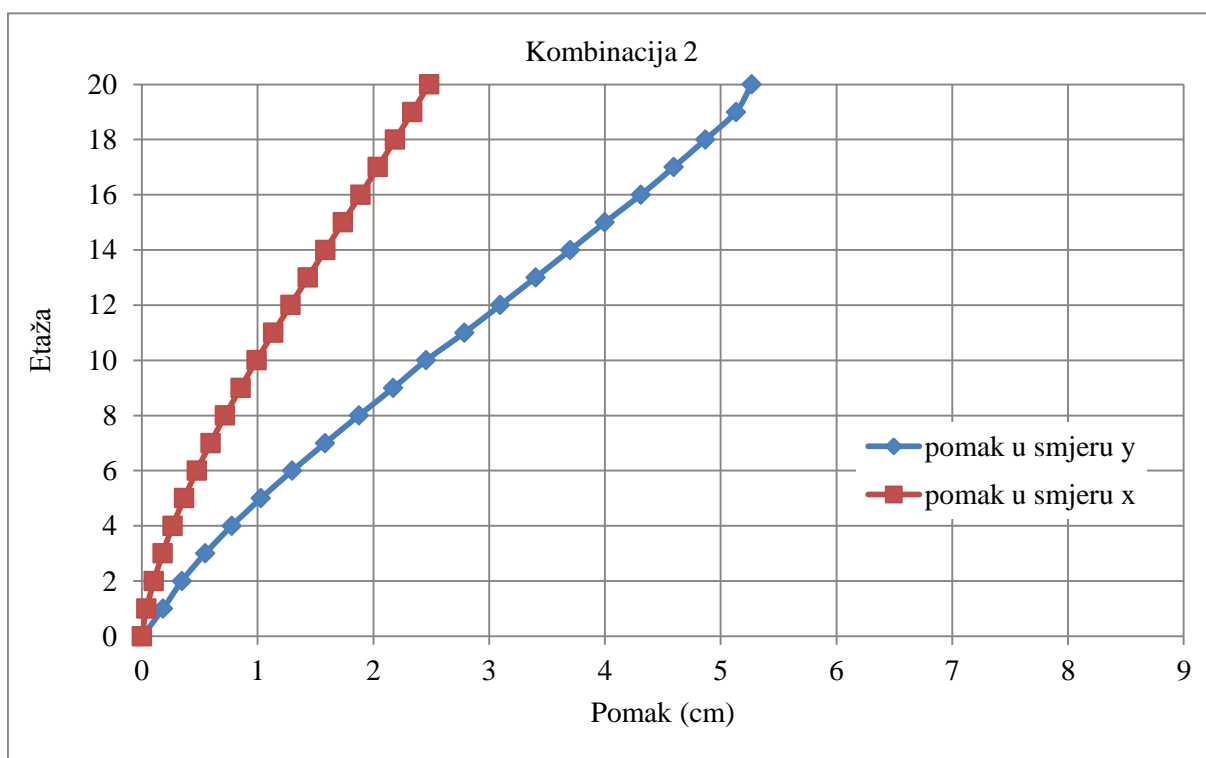
Slika 8.2 Rezultati vertikalnog pomaka za djelovanje vlastite težine u smjeru Z



Slika 8.3 Rezultati horizontalnog pomaka za djelovanje potresa u smjeru X i Y

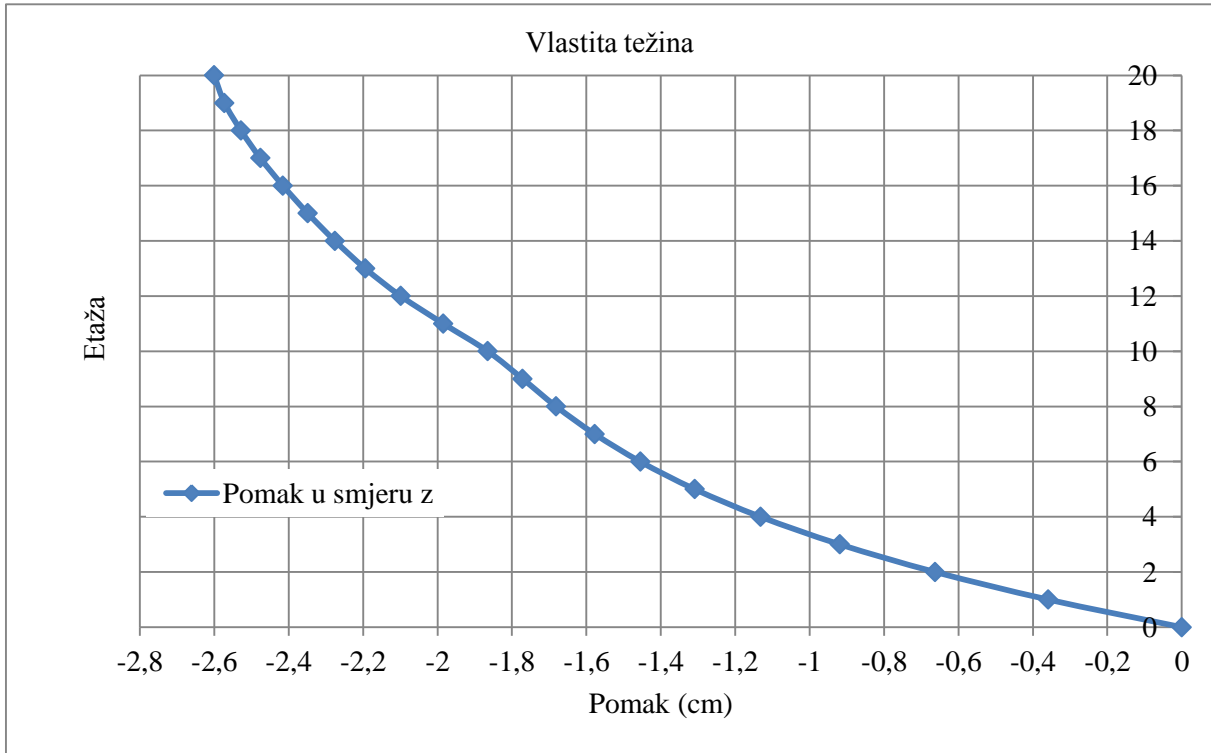


Slika 8.4 Rezultati horizontalnog pomaka za djelovanje kombinacije 1 u smjeru X i Y

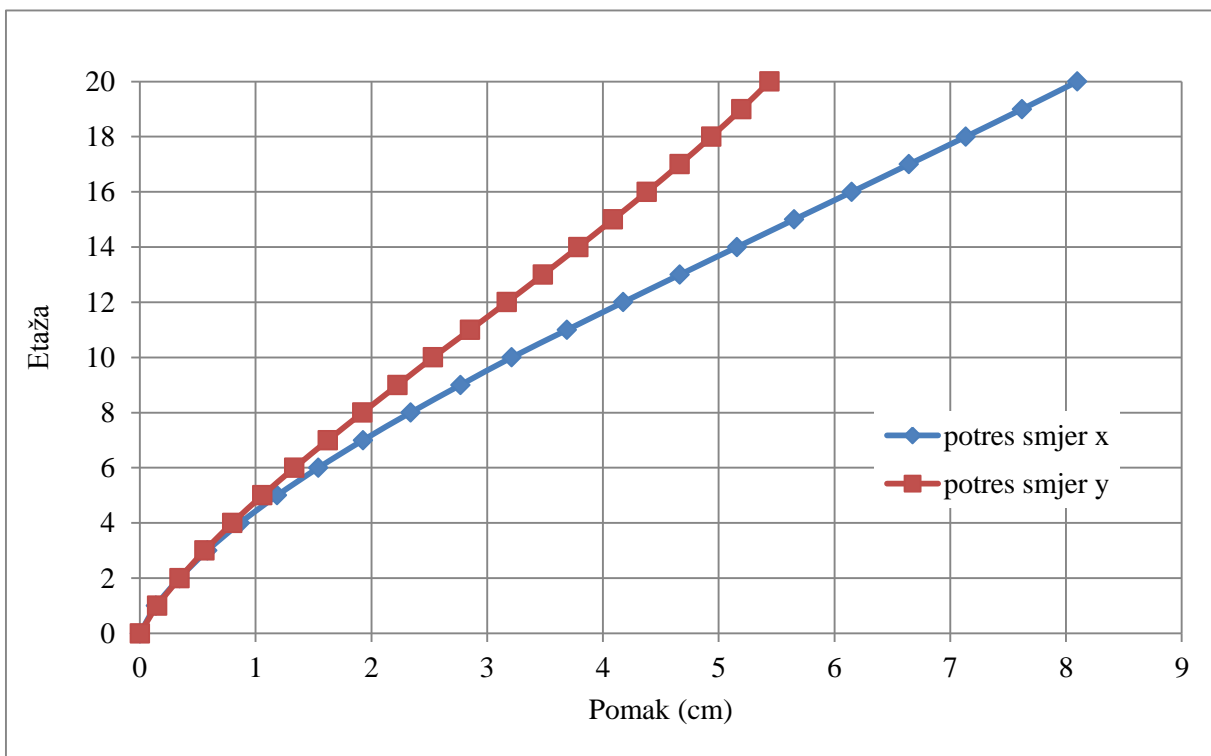


Slika 8.5 Rezultati horizontalnog pomaka za djelovanje kombinacije 2 u smjeru X i Y

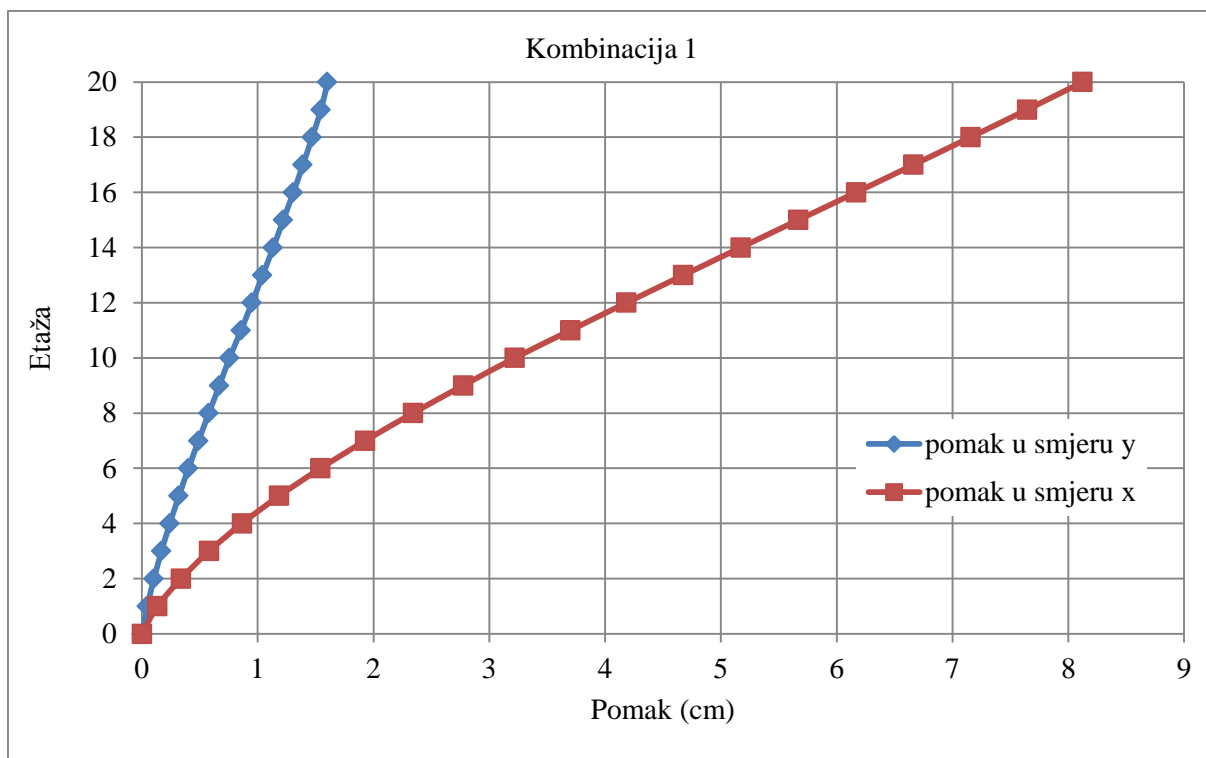
8.2. Analiza rezultata u osi B



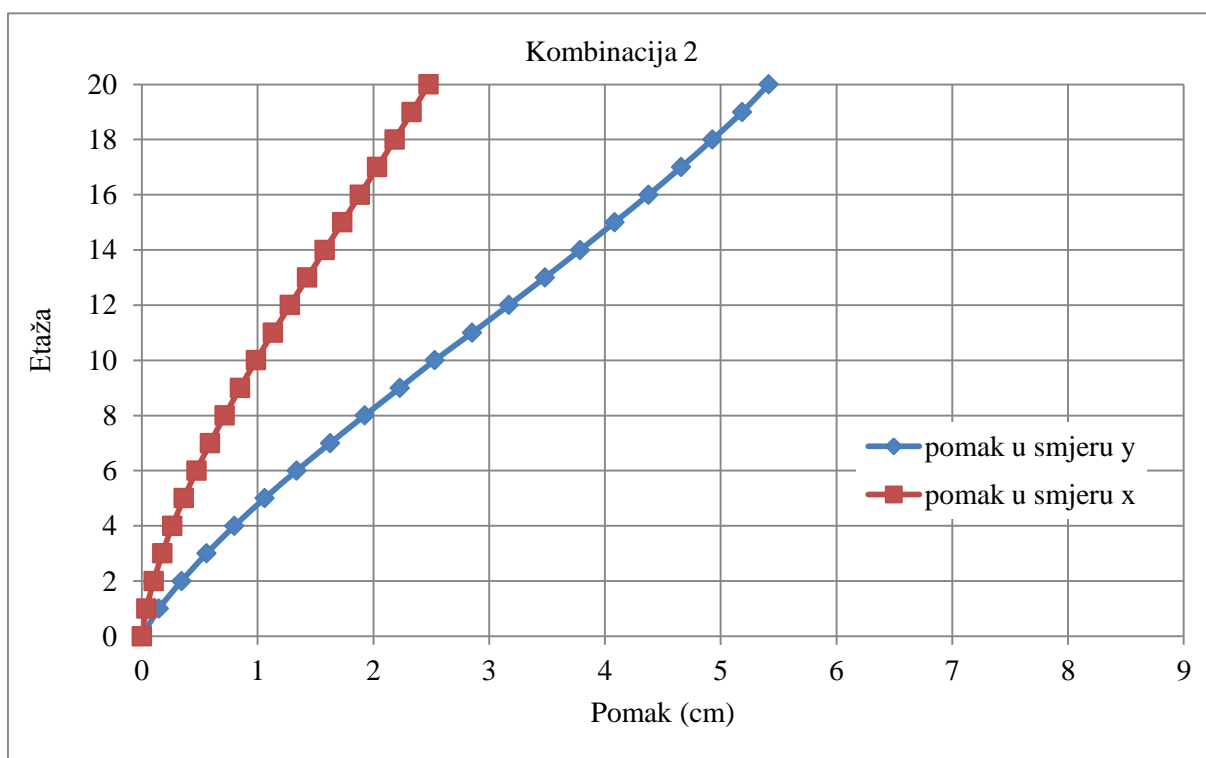
Slika 8.6 Rezultati vertikalnog pomaka za djelovanje vlastite težine u smjeru Z



Slika 8.7 Rezultati horizontalnog pomaka za djelovanje potresa u smjeru X i Y

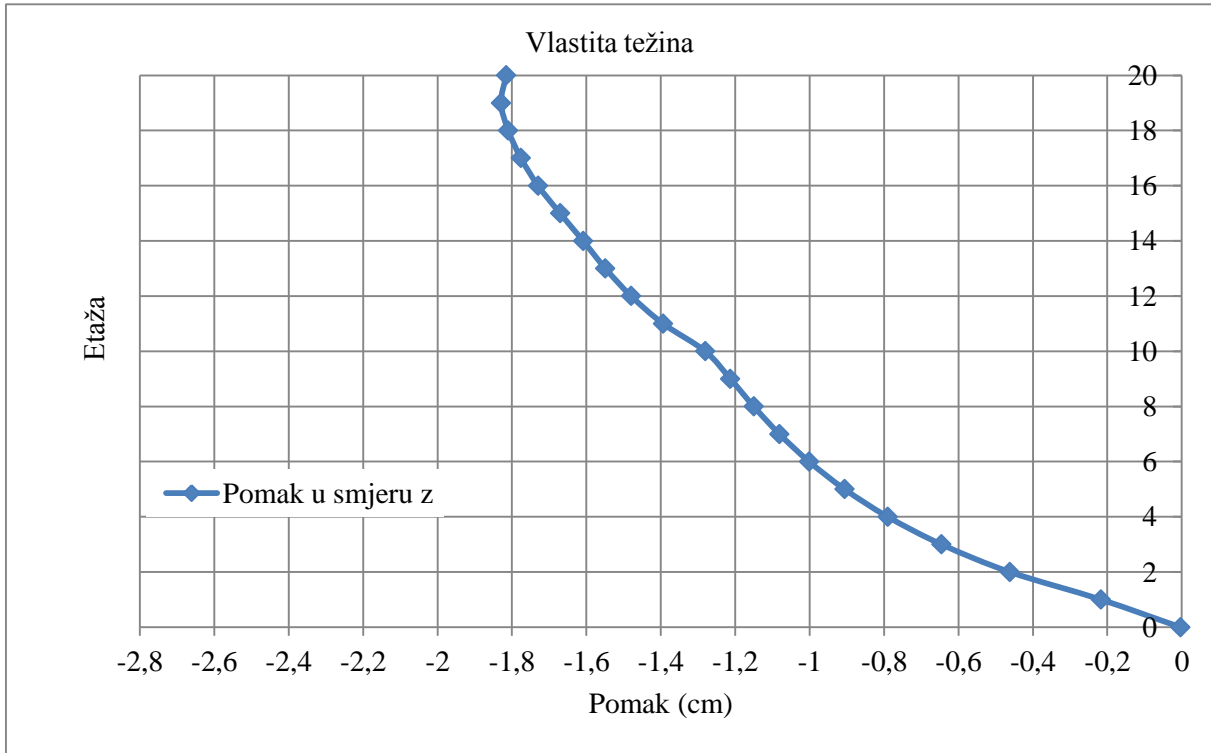


Slika 8.8 Rezultati horizontalnog pomaka za djelovanje kombinacije 1 u smjeru X i Y

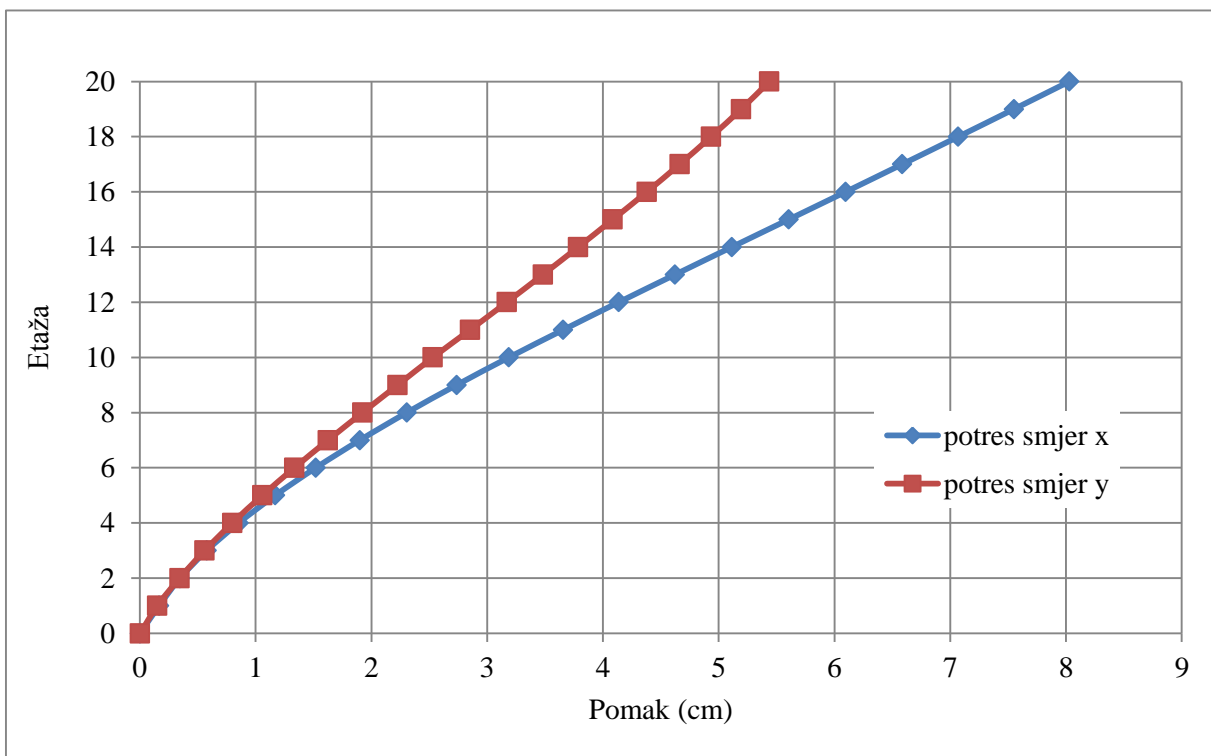


Slika 8.9 Rezultati horizontalnog pomaka za djelovanje kombinacije 2 u smjeru X i Y

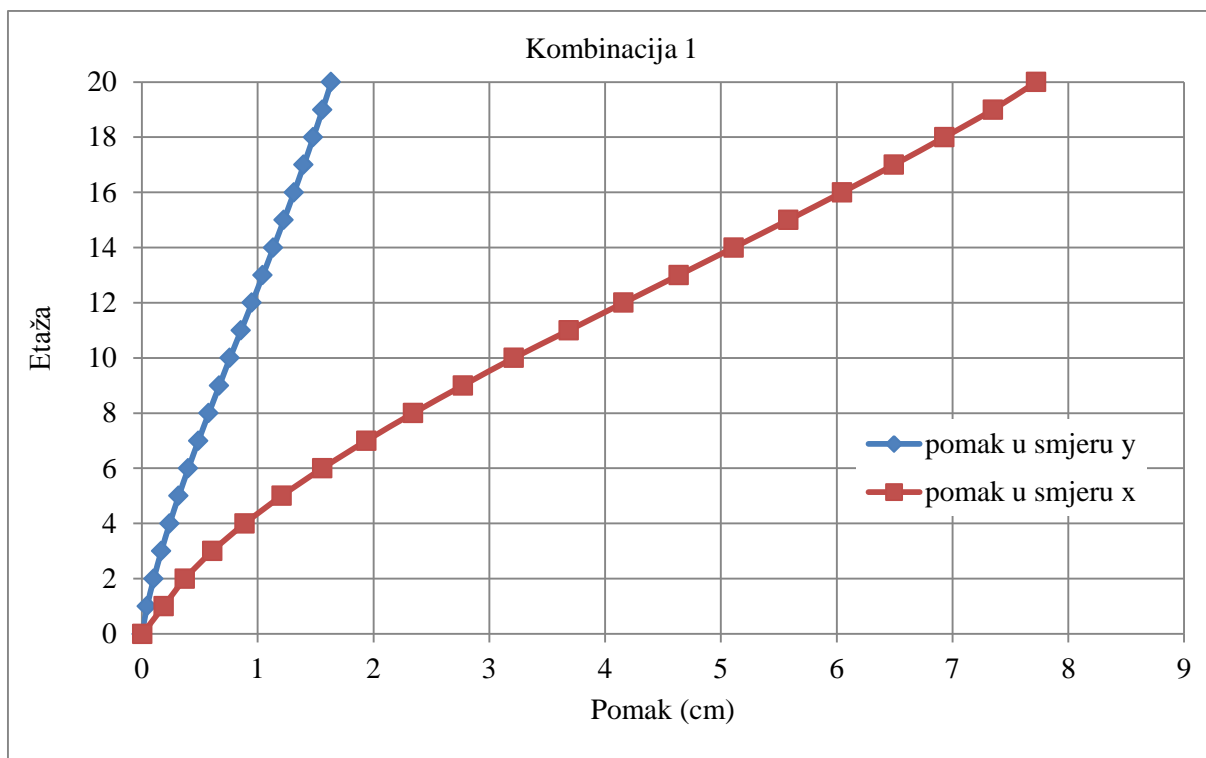
8.3. Analiza rezultata u osi C



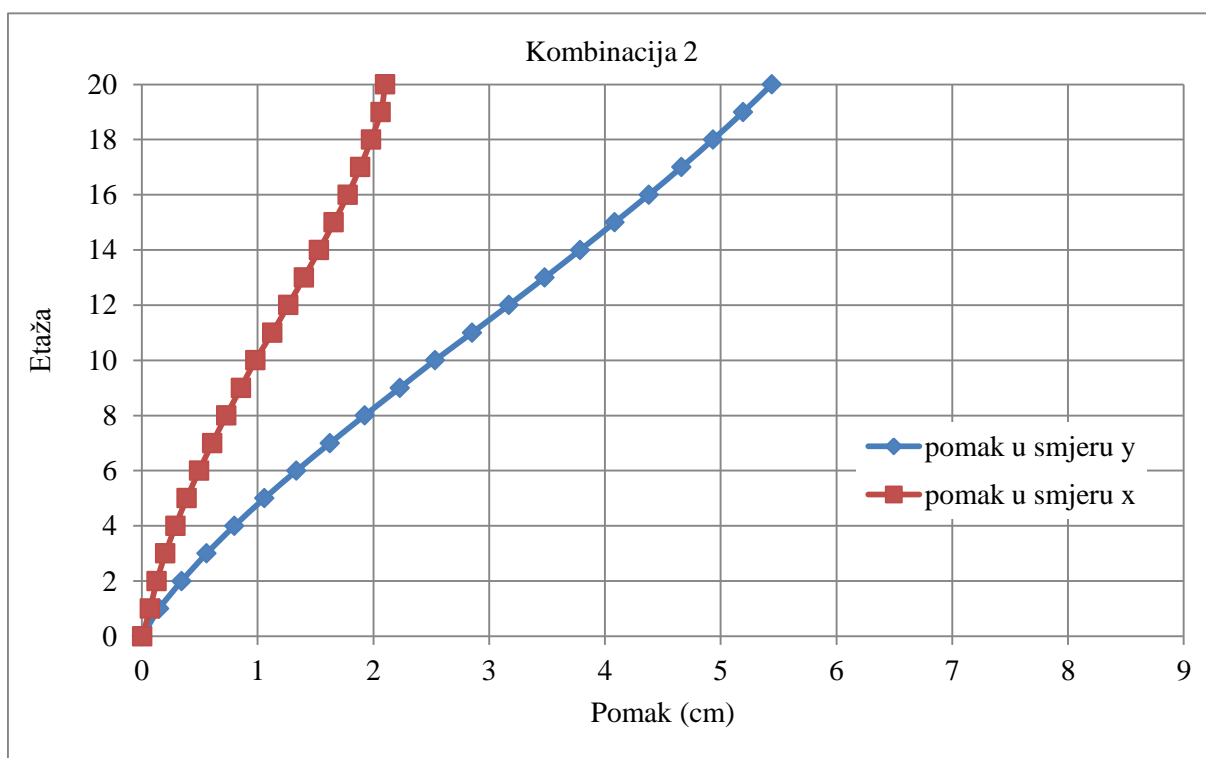
Slika 8.10 Rezultati vertikalnog pomaka za djelovanje vlastite težine u smjeru Z



Slika 8.11 Rezultati horizontalnog pomaka za djelovanje potresa u smjeru X i Y



Slika 8.12 Rezultati horizontalnog pomaka za djelovanje kombinacije 1 u smjeru X i Y



Slika 8.13 Rezultati horizontalnog pomaka za djelovanje kombinacije 2 u smjeru X i Y

8.4.Diskusija analize rezultata

Ova konstrukcija po karakteru pripada tipu visokih zgrada. Jedna od osnovnih karakteristika je da svaka etaža jednakih poprečnih presjeka, jednake krutosti, tlocrtno simetrična preko dvije osi simetrije.

Iz prikazanih rezultata može se zaključiti da su najveći horizontali pomaci ostvareni pri djelovanju seizmičkog opterećenja u smjeru osi x. Ovaj najveći ostvari pomak iznosi nešto više od 8cm. Ujedno u kombinaciji opterećenja 1 gdje je istaknuto opterećenje od potresa u smjeru x ostvaruje se najveći rezultanti pomak. U usporedbi s drugim smjerom y u kojem se ostvaruje nešto manji pomak. Analizom tlocrtne dispozicije zgrade navedeni rezultati ukazuju da su ostvareni veći pomaci oko slabije osi tromosti AB jezgre.

Nadalje iz većine rezultata primjećuje se linearni prirast pomaka zajedno s prirastom etaže odnosno visine zgrade.

Dakle iz rezultata može se zaključiti da značajnu ulogu u nosivosti preuzima AB jezgra. U konačnici i cilj ovog nosivog sustava AB jezgre s CLT elementima je da jezgra preuzima značajna opterećenja kod visokih zgrada u seizmičko aktivnim područjima.

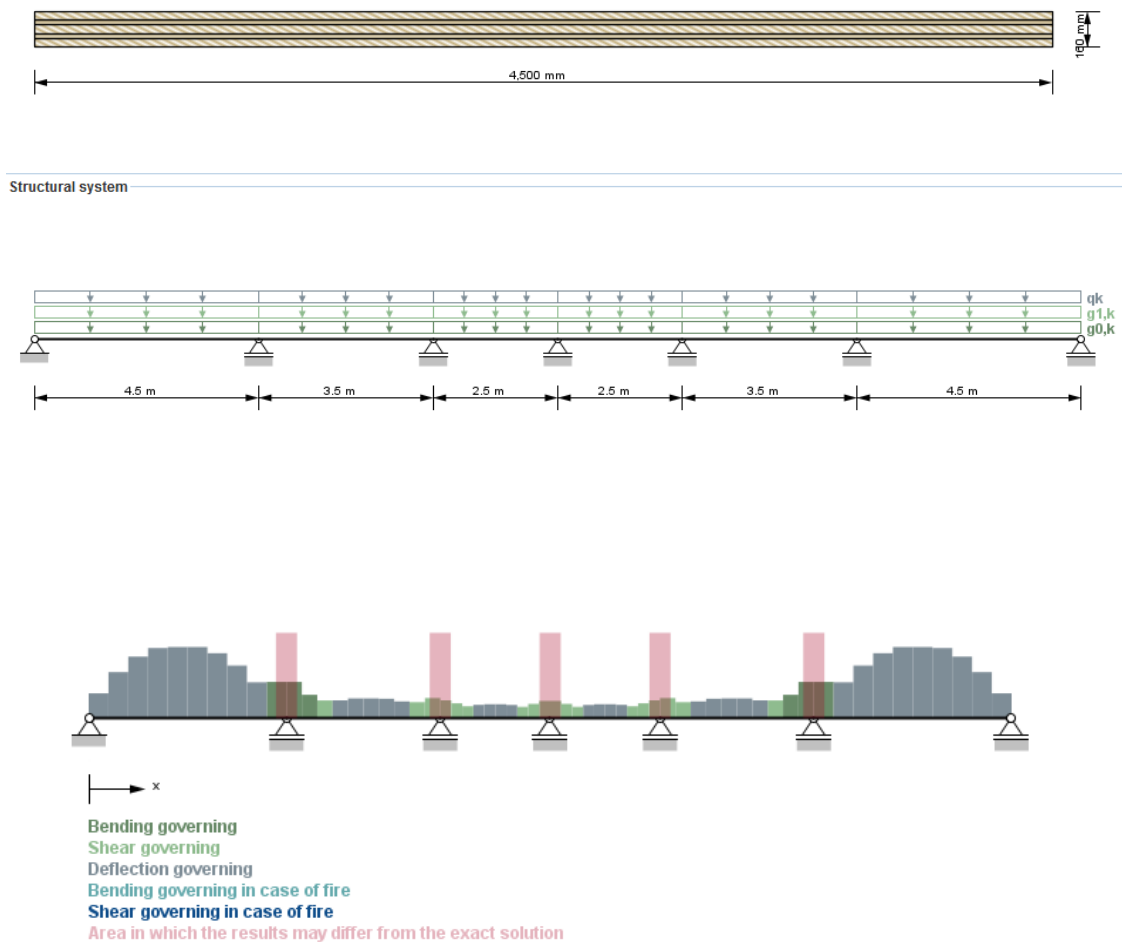
Ovim tipom jezgre kao i povoljnim rasporedom CLT zidova izbjegnuta je pojava torzijskog efekta pri prvom tonu konstrukcije. Što je vrlo važno pri proračunu ovakvog tipa konstrukcija.

9. DIMENZIONIRANJE CLT ELEMENATA

Postupak dimenzioniranja proveden je u programskom paketu CLTdesigner koji se temelji na modeliranju elemenata od CLT-a. Softver omogućuje dizajniranje elemenata opterećenih na savijanje. Nadalje, proračun ploča kao kontinuiranih nosača za provjeru graničnog stanja nosivosti opterećenih na savijanje, posmik kao i na opterećenja od požara. Potom, moguće je provesti analizu nosivosti na osnovu unutarnjih sila. Također omogućuje proračun ploča opterećenih okomito na njihovu ravninu.

Za potrebe dimenzioniranja visoke zgrade od CLT-a provedena je analiza nosivosti na osnovnim elementima u kritičnim presjecima.

Proračun ploče



General

Service class **1**

Structural system

Number of spans **6**

Cantilever left

Cantilever right

Support	x	Width
A	0 m	0.2 m
B	4.5 m	0.12 m
C	8 m	0.12 m
D	10.5 m	0.12 m
E	13 m	0.12 m
F	16.5 m	0.12 m
G	21 m	0.16 m

Cross section

User-defined CLT-products with technical approvals

Preferred cross sections

Stora Enso **160 L5s**

Number of layers **5**

Layer	Thickness	Orientation	Material
1	40 mm	0	C24-STORA EN...
2	20 mm	90	C24-STORA EN...
3	40 mm	0	C24-STORA EN...
4	20 mm	90	C24-STORA EN...
5	40 mm	0	C24-STORA EN...

Width **4,500** mm Thickness **160** mm

Fire **Vibrations**

Fire above

Fire below

Fire duration **90** min

Fire protection

above **0** min

below **30** min

Heat resistant adhesive

Without gaps or with bonded edge

k_{fire} **1.15**

d_0 **7** mm

Charring rate **0.65** mm/r

Loads

Field	Span	$g_{0,k}$	$g_{1,k}$	q_k	Category	S_k	Altitude/Region	W_k
1	4.5 m	3.96 kN/m	0.87 kN/m ²	2 kN/m ²	A			
2	3.5 m	3.96 kN/m	0.87 kN/m ²	2 kN/m ²	A			
3	2.5 m	3.96 kN/m	0.87 kN/m ²	2 kN/m ²	A			
4	2.5 m	3.96 kN/m	0.87 kN/m ²	2 kN/m ²	A			
5	3.5 m	3.96 kN/m	0.87 kN/m ²	2 kN/m ²	A			
6	4.5 m	3.96 kN/m	0.87 kN/m ²	2 kN/m ²	A			

ULS

Bending η_M **16.1 %** k_{mod} **0.8** at x = 4.5 m Fundamental combination: $1.35 \cdot g_{0,k} + 1.35 \cdot g_{1,k} + 1.50 \cdot 1.00 \cdot q_k$

Shear η_V **14.2 %** k_{mod} **0.8** at x = 4.5 m Fundamental combination: $1.35 \cdot g_{0,k} + 1.35 \cdot g_{1,k} + 1.50 \cdot 1.00 \cdot q_k$

Bearing pressure $\eta_{c,90}$ **7.7 %** k_{mod} **0.8** at x = 4.5 m Fundamental combination: $1.35 \cdot g_{0,k} + 1.35 \cdot g_{1,k} + 1.50 \cdot 1.00 \cdot q_k$

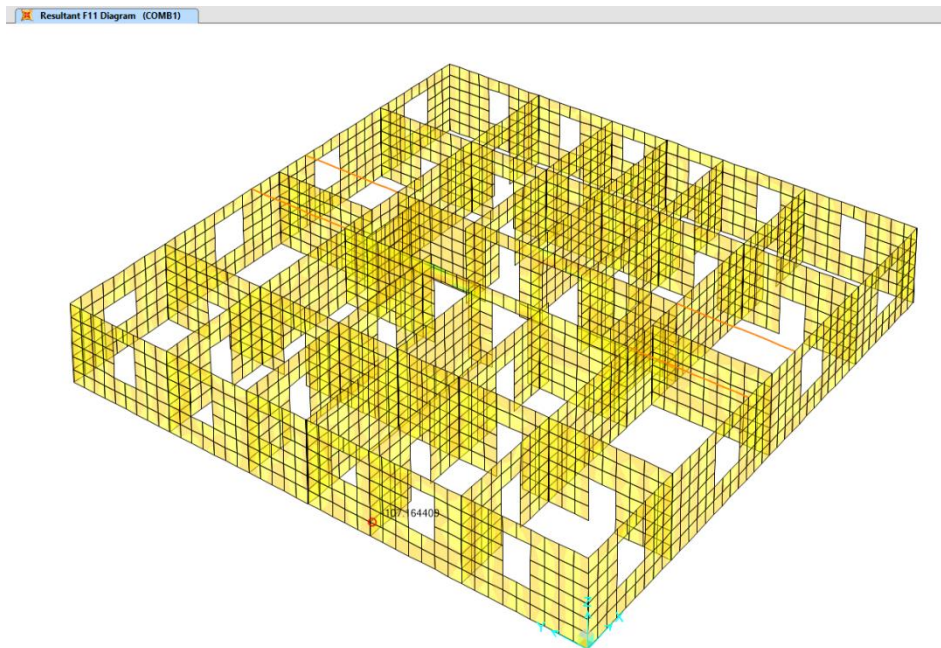
SLS

Deflection η_w **31.6 %** k_{def} **0.85** at x = 2.25 m Final deformation $w_{net,fin} \ t = \infty$: $g_{0,k} + (g_{0,k})_{creep} + g_{1,k} + (g_{1,k})_{creep} + 1.00 \cdot q_k + (0.30 \cdot q_k)_{creep}$

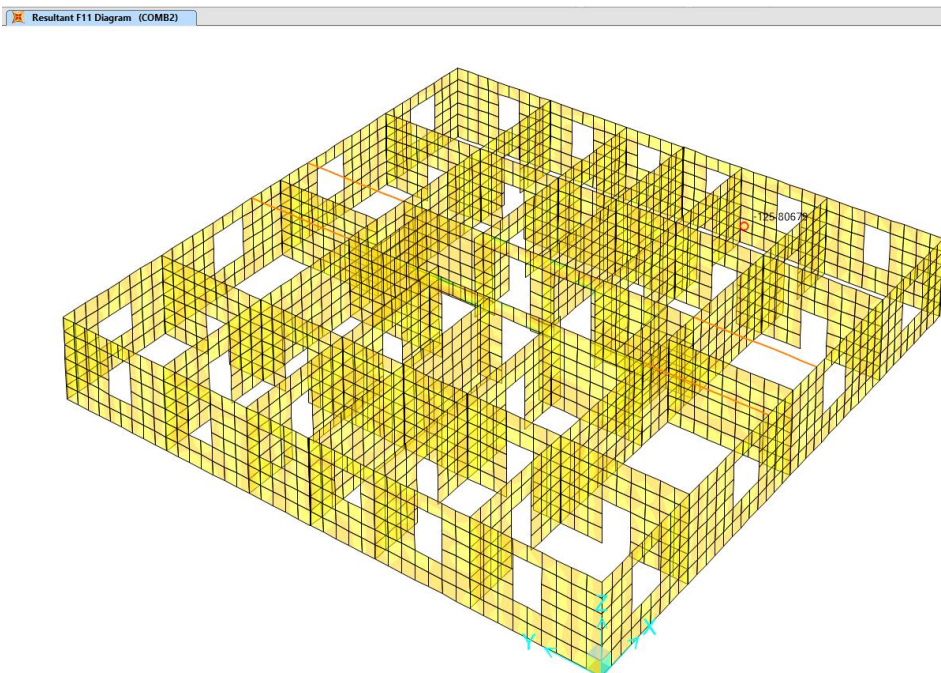
Vibration
 Vibration verification according to DIN 1052 fulfilled
 Vibration verification according to EN 1995-1-1 fulfilled
 Vibration verification according to ON B 1995-1-1/NA:2014-11-15 fulfilled
 Vibration verification according to Hamm/Richter fulfilled
 Vibration verification according to modified Hamm/Richter fulfilled

Slika 9.1 Proračun nosivosti CLT ploče

Proračun zida



Slika 9.2 Maksimalna posmična sila na zidu prizemlja (COMB 1)




Slika 9.3 Maksimalna posmična sila na zidu prizemlja (COMB 2)

Cross section

User-defined CLT-products with technical approvals

Preferred cross sections

Stora Enso  200 L5s

Number of layers 5

Layer	Thickness	Orientation	Material
1	40 mm	0	C24-STORA EN...
2	40 mm	90	C24-STORA EN...
3	40 mm	0	C24-STORA EN...
4	40 mm	90	C24-STORA EN...
5	40 mm	0	C24-STORA EN...

Width 1,000 mm Thickness 200 mm

Fire

Fire right
 Fire left

Fire duration 90 minutes

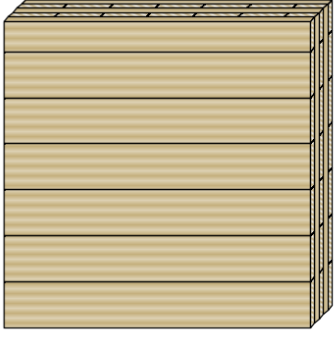
Fire protection

right 30 minutes
left 0 minutes

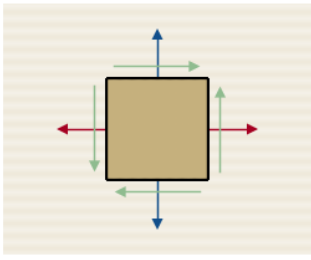
Heat resistant adhesive

Without gaps or with bonded edges

k_{fire} 1.15
 d_0 7 mm
Charring rate 0.65 mm/min



Internal forces



$n_{xy,d}$ 125.8 kN/m

Design factors

k_{mod} 0.9
 V_M 1.3
Board width 150 mm

Substituted thicknesses

RVSE	t_i^*
1	40 mm
2	40 mm
3	40 mm
4	40 mm
Σt_i^*	
160 mm	

Stresses of RVSE

Ideal nominal shear stress $\tau_{0,d}^*$ 0.79 N/mm²
Shear stress in the board $\tau_{v,d}^*$ 1.57 N/mm²
Torsional shear stress in the glueing interface $\tau_{T,d}^*$ 0.63 N/mm²

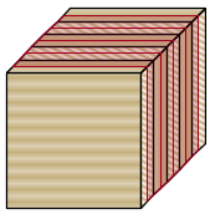
Utilisation ratios

Shear force n_{xy} (Mechanism I - Shear) $\eta_{nxy,V}$ 90.9 %
Shear force n_{xy} (Mechanism II - Torsion) $\eta_{nxy,T}$ 36.3 %

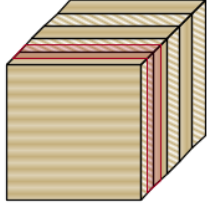
According to ETA-09/0036 and ETA-08/0242

Shear force n_{xy} (Mechanism I - Shear) $\eta_{nxy,V}$ 90.9 %
Shear force n_{xy} (Mechanism II - Torsion) $\eta_{nxy,T}$ 36.3 %

Substituted thickness



Dominating RVSE



Slika 9.4 Proračun posmične iskoristivosti CLT zida

10.ZAKLJUČAK

Križno lamelirano drvo postalo je posljednjih godina vrlo atraktivno za gradnju kao novi nosivi sustav vitkih i visokih građevina. Brza, jeftina i ekološki prihvatljiva izgradnja ovakvih objekata dovela je do njihove popularnosti. Najveći broj izgrađenih objekata do sada nalazi se u seizmički manje aktivnim područjima kao što su Austrija, Njemačka i Norveška.

Do sada u svijetu postoji samo nekoliko istraživanja provedenih na potresno opterećenje zgrada u naravnoj veličini. Smatra se da sustav CLT-a kao glavni nosivi element visokih zgrada ne može odolijevati potresnom djelovanju. Stoga do sada u svijetu je izgrađeno samo nekoliko visokih zgrada od nosivog sustava CLT-a s maksimalno šesnaest etaža.

Područje Republike Hrvatske kao i dio južne Europe (mediteranske zemlje) pripadaju iznimno seizmičkom aktivnom području. Iz prethodno navedenog proizašla je ideja i motivacija za ovim područjem istraživanja. Dakle, cilj je utvrditi mogućnost primjene nosivog sustava od CLT-a u seizmičko aktivnom području.

Dosadašnja istraživanja pokazala su da nije moguće primijeniti nosivi sustav samo od CLT-a za gradnju visokih zgrada. Stoga je u radu provedena numerička analiza visoke zgrade na potresno opterećenje od CLT-a zajedno s armirano betonskom jezgrom. Numerički dio istraživanja, odnosno modeliranje materijala i spojeva predstavlja poseban izazov.

Na osnovu dosadašnjih eksperimentalnih istraživanja u svijetu, o mehaničkim karakteristikama CLT materijala i prikladnih spojnih sredstava, numerički je opisano ponašanje svakog od elemenata. Materijal od CLT-a opisan je kao plošni ortotropni materijal, a spojna sredstva modelirana su kao nelinearni link elementi. Za lokaciju visoke dvadeset etažne zgrade odabrano je seizmički aktivno područje grada Zaprešića.

Na osnovu rezultata provedene numeričke analize može se zaključiti da prikazani hibridni sustav CLT elementa i AB jezgre može u potpunosti odgovoriti na složena opterećenja kao što je potresno djelovanje. Ovaj sustav zadovoljava zahtjeve graničnog stanja nosivosti i uporabivosti te je moguća primjena nosivog sustava CLT-a uz dovoljno krutu AB jezgru.

Za daljnja istraživanja u ovom području predlaže se optimalizacija broja spojnih sredstava i redukcija krutosti armirano betonske jezgre. Nadalje, potrebno je istražiti i mogućnosti primjene nekog drugog nosivog sustava zajedno s nosivim elementima od CLT panela.

SAŽETAK

Anamarija Perić

NUMERIČKA ANALIZA VISOKE CLT ZGRADE S KRUTOM JEZGROM U SEIZMIČKI AKTIVNOM OKRUŽENJU

Provedena je numerička analiza dvadeset etažne zgrade od križno lameliranog drva (CLT) s krutom armiranobetonskom jezgrom. Glavni cilj numeričkog modela je odrediti ponašanje ovakvog tipa zgrada u seizmičkim aktivnim područjima. Poseban izazov je bio modelirati mehaničke karakteristike CLT materijala kao i nelinearno ponašanje spojnih sredstava. Iz analize vidljivo je da primjenom CLT panela s armiranobetonskom jezgrom može se značajno povećati krutost zgrade i smanjiti pomake uslijed seizmičkih djelovanja.

Ključne riječi: Križno lamelirano drvo, visoke zgrade, numerički model, betonska jezgra, krutost, potresna otpornost

NUMERICAL ANALYSIS OF TALL CLT BUILDING STRUCTURE WITH STIFF CORE IN SEISMICALLY ACTIVE AREAS.

Numerical analysis was performed on the twenty story building made of Cross laminated timber (CLT) panels with stiff concrete core. The main goal of the numerical model is to obtain performance of this kind of buildings under seismic activity. Main challenge was to model mechanical properties of CLT material and nonlinear behaviour of fasteners. It was observed that combining CLT with concrete core significantly improves the buildings stiffness and consequently reduce building displacement under seismic activity.

Key words: Cross laminated timber, tall buildings, numerical model, concrete core, stiffness, seismic resistance.

Literatura

- [1] W. I. Sheet, "Cross-laminated timber : introduction for specifiers," pp. 1–11, 2011.
- [2] "B&K Structures." [Online]. Available: <http://www.bkstructures.co.uk/solutions/products/cross-laminated-timber/>.
- [3] L. Evans, "Cross Laminated Timber - Taking wood buildings to the next level," *Eng. News-Record*, vol. October, pp. 1–12, 2013.
- [4] M. Mohammad, S. Gagnon, B. K. Douglas, and L. P. P. E, "Introduction to Cross Laminated Timber," pp. 3–12, 2011.
- [5] R. Brandner, "Production and Technology of Cross Laminated Timber (CLT): A state-of-the-art Report," *Focus Solid Timber Solut. - Eur. Conf. Cross Laminated Timber*, pp. 3–36, 2014.
- [6] R. Brandner, "Product and Testing," pp. 149–155, 2008.
- [7] R. Steiger, A. Gulzow, and D. Gsell, "Non-destructive evaluation of elastic material properties of cross-laminated timber (CLT)," *Conf. COST E*, no. October, pp. 29–30, 2008.
- [8] T. Wiegand, A. Seidel, P. Mestek, N. Werther, and S. Winter, "Building with cross laminated timber," 2011.
- [9] S. Aicher, H. W. Reinhardt, and H. Garrecht, "Materials and Joints in Timber Structures: Recent Developments of Technology," *RILEM Bookseries*, vol. 9, no. JUNE 2014, 2014.
- [10] A. Ceccotti, "New technologies for construction of medium-rise buildings in seismic regions: The XLAM case," *Struct. Eng. Int. J. Int. Assoc. Bridg. Struct. Eng.*, vol. 18, no. 2, pp. 156–165, 2008.
- [11] J. Van De Kuilen, A. Ceccotti, Z. Xia, and M. He, "Wood Concrete Skyscrapers," *World Conf. timber Eng.*, no. April 2016, p. 9, 2010.
- [12] J. W. G. Van De Kuilen, A. Ceccotti, Z. Xia, and M. He, "Very tall wooden buildings with Cross Laminated Timber," *Procedia Eng.*, vol. 14, pp. 1621–1628, 2011.
- [13] T. Bogensperger, M. Augustin, and G. Schickhofer, "Properties of CLT-Panels Exposed to Compression Perpendicular to their Plane," *44th Int. Counc. Res. Innov. Build. Constr. Work. Comm. W18 - Timber Struct.*, pp. 1–15, 2011.
- [14] E. K. Marjan Popovski, "Seismic behavior of cross-laminated timber structures," 2012.
- [15] I. Gavric, G. Rinaldin, C. Amadio, M. Fragiaco, and A. Ceccotti, "Experimental-numerical analyses of the seismic behaviour of cross-laminated wall systems," *15th World Conf. Earthq. Eng.*, 2012.
- [16] "Stora Enso CLT." [Online]. Available: <http://assets.storaenso.com/se/buildingandliving/ProductServicesDocuments/CLT Image brochure EN.pdf>.
- [17] P. Crespell and S. Gagnon, "Cross Laminated Timber: a Primer." [Online]. Available: <https://fpinnovations.ca/media/factsheets/Documents/cross-laminated-timber-the-book.pdf>.

- [18] B. Dujic, K. Strus, R. Zarnic, and A. Ceccotti, "Prediction of dynamic response of a 7-storey massive XLam wooden building tested on a shaking table," *11th World Conf. Timber Eng. 2010, WCTE 2010*, vol. 4, no. March 2016, pp. 3450–3457, 2010.
- [19] B. Dujic and S. Aicher, "Testing of Wooden Wall Panels Applying Realistic Boundary Conditions," *Proc. 9th World Conf. Timber Eng. Portl. OR USA*, 2006.
- [20] R. Sturenbecher, K. Hofstetter, and J. Eberhardsteiner, "Structural design of Cross Laminated Timber (CLT) by advanced plate theories," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 70, no. 9, pp. 1368–1379, 2010.
- [21] P. Augustin, "Elastic deformation of concrete. Determination of secant modulus of elasticity in compression.," vol. 55, no. 2, 2012.
- [22] P. McEntee, "Mass Timber Construction – Building for the Future," 2016. [Online]. Available: <http://seblog.strongtie.com/tag/clt/>.
- [23] Stora Enso, "CLT – Cross Laminated Timber: Connections," p. 36, 2014.
- [24] M. Herak, "Hrvatska karta potresne opasnosti – kako je nastala i kako dalje?," 2012.

Popis slika

Slika 1.1 Yingxian Pagoda ,Shanxi, China, 1056.....	2
Slika 1.2 Urnes Stavkirke,Sogn og Fjordanena , Norway, 1132	3
Slika 1.3 Leckie Building, Vancouver, Canada, 1908.....	3
Slika 1.4 Perry House,Brisbane, Australia, 1913	4
Slika 1.5 Limnologe,Vaxjo, Sweden, 2009	5
Slika 3.1 Konfiguracija CLT panela	11
Slika 3.2 Primjeri CLT panela	11
Slika 3.3 Prikaz CLT panela u 3D pogledu te dva poprečna presjeka	12
Slika 3.4 Prikaz CLT panela i lijepljeno lameliranog panela [2].....	13
Slika 3.5 CLT panel od tri sloja dominantno nosiv u jednom smjeru	14
Slika 3.6 CLT panel od tri sloja nosiv u dva smjera	14
Slika 3.7 CNC uređaj	15
Slika 3.8 Primjeri CLT panela zida i stropa ili krov	16
Slika 3.9 Primjeri ugradnje CLT panela	17
Slika 3.10 CLT zgrada Murray Grove u Londonu	18
Slika 3.11 Obiteljska kuća u Klagenfurtu, Austrija.....	19
Slika 3.12 Više etažna zgrada u Judenburgu, Austrija	20
Slika 3.13 Više etažna zgrada u Berlinu, Njemačka	21
Slika 3.14 Primjer hibridnog outrigger sustava s CLT elementima	22
Slika 3.15 CLT zgrada od 7 etaža opterećena na seizmičko djelovanje.....	24
Slika 3.16 CLT zgrada od dvije etaže opterećena na seizmičko djelovanje	25
Slika 6.1 Prikaz modelirane zgrade od CLT-a u programskom paketu SAP2000	34
Slika 6.2 Prikaz zgrade u pogledu x-z i tlocrtni prikaz.....	35
Slika 6.3 Prikaz AB dijela konstrukcije	36
Slika 6.4 Prikaz AB prizemlja s stropnom pločom, zidovima i stupovima.....	36
Slika 6.5 Prikaz stropnih ploča od CLT panela i CLT nosivi zidovi	37
Slika 6.6 Pogled na karakterističnu etažu.....	37
Slika 6.7 Pogled na karakterističnu etažu bez stropne ploče	38
Slika 6.8 Tlocrtni prikaz diskretizirane CLT stropne ploče	38
Slika 6.9 Informacije proizvođača „Stora enso“ o proizvodu CLT panela [6]	39
Slika 6.10 Spajala (kutnici) za CLT panele	41
Slika 6.11 Spajalo 105 za vezu dva CLT panela i AE116 za vezu CLT panela i betona.....	42
Slika 6.12. Spajalo 105 za vezu dva CLT panela i AE116 za vezu CLT panela i betona [13]	42
Slika 6.13 Nosivost spojnog sredstva CLT zid – CLT zid u uzdužnom i posmičnom smjeru	43
Slika 6.14 Nosivost spojnog sredstva beton – CLT u uzdužnom i posmičnom smjeru	43
Slika 6.15 Nosivost spojnog sredstva CLT zid – CLT ploča spajalo veće nosivosti u uzdužnom i posmičnom smjeru	43
Slika 6.16 Nosivost spojnog sredstva CLT zid – CLT ploča spajalo manje nosivosti u uzdužnom i posmičnom smjeru	44
Slika 6.17 Položaj spojnih sredstava na etažama od 1 do 10, rozom bojom označena spojna sredstva veće nosivosti	44
Slika 6.18 Položaj spojnih sredstava na etažama od 11 do 15, rozom bojom označena spojna sredstva veće nosivosti	45

Slika 6.19 Položaj spojnih sredstava na etažama od 16 do 20, rozom bojom označena spojna sredstva veće nosivosti	46
Slika 6.20 Prikaz svih spojnih sredstava na cijeloj zgradi.....	46
Slika 6.21 Elastični spektar odaziva	47
Slika 6.22 Karta seizmičkih područja RH [14]	49
Slika 7.1 3D prikaz vertikalnog pomaka za djelovanje vlastite težine u smjeru Z	50
Slika 7.2 3D prikaz horizontalnog pomaka za djelovanje potresa u smjeru X.....	51
Slika 7.3 3D prikaz horizontalnog pomaka za djelovanje potresa u smjeru Y	52
Slika 7.4 3D prikaz resultantnog pomaka za djelovanje kombinacije 1.....	53
Slika 7.5 3D prikaz resultantnog pomaka za djelovanje kombinacije 2.....	54
Slika 7.6 3D prikaz prvog modalnog oblika.....	56
Slika 7.7 3D prikaz drugog modalnog oblika	57
Slika 7.8 3D prikaz trećeg modalnog oblika.....	58
Slika 7.9 3D prikaz četvrtog modalnog oblika	59
Slika 8.1 Položaj osi A, B i C	60
Slika 8.2 Rezultati vertikalnog pomaka za djelovanje vlastite težine u smjeru Z	61
Slika 8.3 Rezultati horizontalnog pomaka za djelovanje potresa u smjeru X i Y	61
Slika 8.4 Rezultati horizontalnog pomaka za djelovanje kombinacije 1 u smjeru X i Y.....	62
Slika 8.5 Rezultati horizontalnog pomaka za djelovanje kombinacije 2 u smjeru X i Y.....	62
Slika 8.6 Rezultati vertikalnog pomaka za djelovanje vlastite težine u smjeru Z	63
Slika 8.7 Rezultati horizontalnog pomaka za djelovanje potresa u smjeru X i Y	63
Slika 8.8 Rezultati horizontalnog pomaka za djelovanje kombinacije 1 u smjeru X i Y.....	64
Slika 8.9 Rezultati horizontalnog pomaka za djelovanje kombinacije 2 u smjeru X i Y.....	64
Slika 8.10 Rezultati vertikalnog pomaka za djelovanje vlastite težine u smjeru Z	65
Slika 8.11 Rezultati horizontalnog pomaka za djelovanje potresa u smjeru X i Y	65
Slika 8.12 Rezultati horizontalnog pomaka za djelovanje kombinacije 1 u smjeru X i Y.....	66
Slika 8.13 Rezultati horizontalnog pomaka za djelovanje kombinacije 2 u smjeru X i Y.....	66
Slika 9.1 Proračun nosivosti CLT ploče	69
Slika 9.2 Maksimalna posmična sila na zidu prizemlja (COMB 1)	70
Slika 9.3 4 Maksimalna posmična sila na zidu prizemlja (COMB 2).....	70
Slika 9.5 Proračun posmične iskoristivosti CLT zida	71

Popis tablica

Tablica 6.1 Mehaničke karakteristike križno lameliranog drveta	40
Tablica 6.2 Pridružena opterećenja iz softverskog paketa SAP2000.....	40
Tablica 6.3 Pridružene kombinacije opterećenja	40
Tablica 6.4 Krutosti čeličnih spojnih sredstava [kN/m]	44
Tablica 6.5 Potresni parametri za kategoriju tla C	48
Tablica 7.1 Udio sudjelovanja masa pri modalnim oblicima	55

Životopis

Anamarija Perić je rođena 01. siječnja 1992. godine u Zagrebu. Nakon završenog srednjoškolskog obrazovanja u X. Gimnaziji " Ivan Supek" u Zagrebu, 2010. godine upisuje Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Dana 28. rujna 2014. godine završila je preddiplomski studij građevinarstva, pod mentorstvom izv.prof.dr.sc. Krešimira Fresla i teme završnog rada " Zidovi s otvorima ". 2010. godine polaže ispit "D.E.L.E" iz španjolskog jezika na Filozofskom fakultetu u Zagrebu te dobiva službeni certifikat međunarodnog karaktera priznat od strane španjolskog Ministarstva obrazovanja.