

VIŠJA STROKOVNA ŠOLA ACADEMIA

MARIBOR

LESENE VISOKE GRADNJE ZA TRAJNOSTNO PRIHODNOST

Kandidat: Jernej Zrnko

Vrsta študija: študent izrednega študija

Študijski program: Gradbeništvo

Mentor predavatelj: Bojan Dapčević, univ. dipl. inž. grad.

Mentor v podjetju: Vladimir Dragorajac, univ. dipl. inž. grad.

Lektor: Maja Horvat, univ. dipl. slov.

Maribor, 2024

IZJAVA O AVTORSTVU DIPLOMSKEGA DELA

Podpisani Jernej Zrnko, sem avtor diplomskega dela z naslovom Lesene visoke gradnje za trajnostno prihodnost, ki sem ga napisal pod mentorstvom Bojana Dapčevića, univ. dipl. inž. grad.

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- je predloženo delo izključno rezultat mojega dela,
- sem poskrbel, da so dela in mnenja drugih avtorjev, ki jih uporabljam v predloženi nalogi, navedena oz. citirana skladno s pravili Višje strokovne šole Academia Maribor,
- se zavedam, da je plagiatorstvo – predstavljanje tujih del oz. misli, kot moje lastne kaznivo po Zakonu o avtorski in sorodnih pravicah (Uradni list RS, št. 16/07 – uradno prečiščeno besedilo, 68/08, 110/13, 56/15 in 63/16 – ZKUASP); prekršek pa podleže tudi ukrepom Višje strokovne šole Academia Maribor skladno z njenimi pravili,
- skladno z 32.a členom ZASP dovoljujem Višji strokovni šoli Academia Maribor objavo diplomskega dela na spletnem portalu šole.

Maribor, december 2024

Podpis študenta:

ZAHVALA

Iskreno bi se rad zahvalil vsem, ki so mi na kakršen koli način pomagali in me podpirali pri pripravi tega diplomskega dela

Najprej bi se rad zahvalil mentorju, ki me je skozi celoten projekt usmerjal z nasveti, predlogi in strokovno podporo.

Posebno zahvalo namenjam tudi svoji družini, dekletu Melani ter prijateljem, ki so me vseskozi podpirali in mi stali ob strani. Njihova podpora in razumevanje sta mi vlivala dodatno voljo in motivacijo.

POVZETEK

Lesene visoke gradnje postajajo vse bolj priljubljen odgovor na globalne izzive trajnostne gradnje. Z naraščanjem ozaveščenosti o podnebnih spremembah in nujnostjo zmanjšanja emisij CO₂ se les kot obnovljiv naravni material uveljavlja kot ključna alternativa betonu in jeklu. Zgodovina lesenih konstrukcij sega stoletja nazaj, a šele z razvojem tehnologij, kot sta križno lepljen les (CLT) in lepljeni lameliran les (glulam), je les pridobil pomembno mesto v visoki gradnji. Prve moderne lesene stolpnice so bile eksperimentalne, danes pa so projekti, kot je Mjøstårnet na Norveškem, dokaz tehničnih zmožnosti lesa. Razvoj teh materialov in napredna tehnologija načrtovanja sta postavila temelje za gradnjo impresivnih lesenih objektov po vsem svetu.

Ključni gradbeni element takšnih visokih gradenj je les, ki je izjemen gradbeni material zaradi svoje visoke trdnosti, lahкости in estetske vrednosti. Pri gradnji visokih lesenih objektov se največ uporabljata CLT in lepljen les, ki omogočata hitro montažo, visoko nosilnost in stabilnost. Gradnja poteka modularno, kar skrajša čas na gradbišču in zmanjša odpadke. Pomembna prednost lesa je trajnost – med rastjo drevesa zajemajo CO₂, medtem ko gradnja prispeva k manjšemu ogljičnemu odtisu v primerjavi z betonom in jeklom, katerih proizvodnja zahteva ogromno energije in povzroča visoke emisije. Poleg tega les nudi prijetno notranje bivalno okolje zaradi naravne izolativnosti in regulacije vlage. V primerjavi z drugimi gradbenimi materiali se lesene konstrukcije hitreje prilagodijo lokalnim in okoljskim razmeram ter jih je mogoče lažje reciklirati.

Prihodnost lesenih visokih gradenj je obetavna, saj združuje trajnostne, estetske in funkcionalne vidike gradnje. Napredki v požarni varnosti, zaščiti pred vlago in potresni odpornosti omogočajo večjo varnost in zaupanje v to tehnologijo. Lesene visoke gradnje predstavljajo odgovor na potrebo po zeleni urbanizaciji, saj lahko zmanjšajo vpliv gradbene industrije na okolje. Kljub temu je število lesenih visokih gradenj še vedno majhno v primerjavi z betonskimi in jeklenimi, prav tako je na voljo manj podatkov o njihovi dolgoročni zmogljivosti. Z večjimi vlaganji v raziskave in boljšimi določili ima les potencial, da postane osrednji gradbeni material prihodnosti. Treba se je zavedati, da bo beton še vedno potreben za temelj stavbe, vendar ne več toliko za konstrukcijo – to lahko nadomesti les.

Ključne besede: lesena visoka gradnja, križno lepljen les, lepljen les, ogljični odtis, trajnost

ABSTRACT

WOODEN HIGH-RISE BUILDINGS FOR A SUSTAINABLE FUTURE

Wooden high-rise buildings are becoming an increasingly popular response to the global challenges of sustainable construction. With growing awareness of climate change and the need to reduce CO₂ emissions, wood, as a renewable natural material, is emerging as a key alternative to concrete and steel. While the history of wooden structures spans centuries, it is only with the development of technologies such as cross-laminated timber (CLT) and glued laminated timber (glulam) that wood has gained significant prominence in high-rise construction. Early modern wooden towers were experimental, but today projects like Mjøstårnet in Norway demonstrate the technical capabilities of wood. The advancement of these materials, coupled with cutting-edge design technology, has laid the groundwork for the construction of impressive wooden structures worldwide.

Wood is an exceptional construction material due to its high strength, light weight, and aesthetic appeal. CLT and glulam are the most commonly used materials in the construction of tall wooden buildings, enabling rapid assembly, high load-bearing capacity, and structural stability. Construction is often modular, reducing on-site building time and minimizing waste. A key advantage of wood is its sustainability—trees absorb CO₂ during growth, and wooden construction contributes to a significantly lower carbon footprint compared to concrete and steel, whose production requires vast amounts of energy and results in high emissions. Additionally, wood provides a comfortable indoor environment due to its natural insulation and moisture-regulating properties. Compared to other building materials, wooden structures adapt more efficiently to local and environmental conditions and are easier to recycle.

The future of wooden high-rise buildings is promising, as they combine sustainable, aesthetic, and functional aspects of construction. Advances in fire safety, moisture protection, and seismic resistance are enhancing the safety and reliability of this technology. Wooden high-rise buildings represent a response to the need for green urbanization, as they can reduce the construction industry's environmental impact. However, the number of wooden high-rise buildings remains small compared to concrete and steel structures, and there is limited data on their long-term performance. With increased investment in research and improved regulations, wood has the potential to become a central building material of the future. It is important to

acknowledge that concrete will still be needed for the building's foundation, but it may no longer be necessary for the structure, which can be replaced by wood.

Keywords: wooden high-rise buildings, cross-laminated timber, glued laminated timber, carbon footprint, sustainability

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	9
1.1	OPIS PODROČJA IN OPREDELITEV PROBLEMA	9
1.2	NAMEN, CILJI IN OSNOVNE TRDITVE	10
1.3	PREDPOSTAVKE IN OMEJITVE	10
1.4	UPORABLJENE RAZISKOVALNE METODE	11
2	DELO V PROJEKTNI SKUPINI	12
3	RAZVOJ LESENIH VISOKIH GRADENJ	14
3.1	ZGODOVINA LESENIH GRADENJ	14
3.2	RAZVOJ	15
3.3	PRIHODNOST	16
4	LESENE VISOKE GRADNJE	18
4.1	LES KOT OSNOVNI ELEMENT	19
4.2	POTEK GRADNJE	21
4.3	TEMELJENJE	23
4.4	SPAJANJE	25
5	PRIMERJAVA Z BETONSKIMI IN JEKLENIMI VISOKIMI GRADNJAMI	27
5.1	TEŽA MATERIALA	27
5.2	ENERGIJSKA UČINKOVITOST	27
5.3	TRAJNOST	29
6	HITROST GRADNJE	31
7	POŽARNA VARNOST	33
8	TRAJNOSTNA PRIHODNOST LESENIH VISOKIH GRADENJ	38
9	NOVE TEHNOLOGIJE LEPLJENEGA LESA KOT SESTAVNEGA ELEMENTA	41
9.1	KRIŽNO LEPLJEN LES (CLT)	41
9.2	LAMELIRAN LES (GLULAM)	43
10	UMETNA INTELIGENCA V GRADBENIŠTVU	45

11 HIPOTEZE	48
11.1 H1: LESENA GRADNJA JE ZA 25 % HITREJŠA OD DRUGIH GRADENJ	48
11.2 H2: LESENE VISOKE GRADNJE SO POŽARNO VARNEJŠE OD TRADICIONALNIH BETONSKIH IN JEKLENIH VISOKIH GRADENJ 49	
11.3 H3: LESENE GRADNJE PRIPOMOREJO K ZMANJŠEVANJU IZPUSTOV OGLJIKA V OKOLJE ZA 15 % V PRIMERJAVI Z DRUGIMI GRADNJAMI.....	50
11.4 H4: UMETNA INTELIGENCA (AI) LAHKO ŽE ZDAJ BISTVENO POMAGA PRI NAČRTOVANJU IZGRADNJE LESENIH VISOKIH GRADENJ	52
12 SKLEP	54
13 VIRI IN LITERATURA	57

KAZALO SLIK

SLIKA 1: KOLIŠČE	14
SLIKA 2: HOHO VIENA – PRIMER LESENE VISOKE GRADNJE	19
SLIKA 3: LEPLJEN LES IN OKOLJE	20
SLIKA 4: CLT PLOŠČA NA KONČNI OBDELAVI	22
SLIKA 5: CLT STENA.....	22
SLIKA 6: JEDRO IN OKVIR	23
SLIKA 7: TEMELJ Z NOSILCEM	25
SLIKA 8: POVEZAVA NA TEMELJU	26
SLIKA 9: RAZLIČNI SISTEMI SPAJANJA NOSILCEV	26
SLIKA 10: VISOKI GRADNJI MJØSTÅRNET (LEVO) IN SPEKTRA (DESNO)	32
SLIKA 11: PROTIPOŽARNA ZAŠČITA PRIKLJUČKOV	34
SLIKA 12: POŽARNI PREIZKUS LEPLJENEGA LESA	36
SLIKA 13: SKUPNA UPORABA CLT PLOŠČE IN LEPLJENEGA NOSILCA	41
SLIKA 14: CLT PLOŠČA.....	42
SLIKA 15: LEPLJEN LES (NOSILEC)	44

KAZALO TABEL

TABELA 1: ČAS, POTREBEN ZA IZGRADNJO LESENE IN BETONSKE VISOKE GRADNJE.....	48
TABELA 2: TABELA PRIKAŽUJE RAZLIČNE MATERIALE GLEDE NA IZPUSTE OGLJIKA NA M ³ MED NJIHOVO PROIZVODNJO	50

1 UVOD

1.1 Opis področja in opredelitev problema

Gradbeništvo je ena najstarejših panog na svetu. Človek je vedno stremel k zatočišču pred plenilci in vremenskimi vplivi. V zgodovini je gradil z materiali, ki so bili v njegovi bližini in jih je z orodji, ki jih je takrat poznal, lahko v najboljši meri izkoristil. Na razpolago je imel kamen, glino in les. Tako so se lesene in druge vrste gradenj ohranile vse do danes.

Stavbe, ki jih poznamo danes, so grajene predvsem iz betona, opeke, lesa in jekla. Beton in opeka kot glavna materiala pri gradnji objektov sta hkrati tudi ena večjih onesnaževalcev ozračja in njuna pridelava povzroča negativne vplive na okolje. Glede na podnebne spremembe vse več pozornosti posvečamo trajnosti, obnovljivim virom energije ter zmanjšanju količine izpuščenih emisij v ozračje. Glede na vedno več problemov, ki se pojavljajo v zvezi z omenjenim, je čas, da poiščemo ukrepe, ki bodo negativne posledice vsaj omilili ali zmanjšali, če jih že preprečiti ne moremo.

Ravno zaradi teh in številnih drugih razlogov se zadnje čase pri gradnji objektov uporablja tudi les, kot naraven material. Les je bil od nekdaj eden izmed glavnih materialov za gradnjo, v prejšnjem stoletju pa se je njegova uporaba, v smislu grajenja objektov, precej zmanjšala; uporabljali so ga predvsem za ostrešja. V zadnjih nekaj letih je doživel revolucijo in vedno bolj se uporablja tudi za gradnjo stanovanjskih in nestanovanjskih objektov.

Lesna industrija je ena izmed industrij, ki doživlja velik razvoj. Z novimi tehnologijami, ki se uporabljajo v lesni industriji, lahko svetu pripomoremo tudi k manjšemu onesnaževanju in zmanjšamo negativne vplive na naš planet Zemljo ter tako poskrbimo za lepšo prihodnost za naše zanamce.

Dandanes je na svetu vse več ljudi, medtem ko je prostora vedno manj, zato so stavbe iz leta v leto višje. Na tak način lahko najbolje izkoristimo pomanjkanje prostora, saj gradimo v višino in ne v širino. Novi stroji, tehnologije in metode nam že omogočajo, da tudi z lesom začnemo graditi zelo visoko. Lepljen in križno lepljen les, kot novi tehnologiji, sta lesni industriji in gradbeništvu prinesla nove meje.

1.2 Namen, cilji in osnovne trditve

Cilj diplomskega dela je spoznati tudi druge načine gradenj, poleg standardnih betonskih in jeklenih, ter raziskati potencial lesa kot trajnostnega materiala za gradnjo, pri čemer se bom osredotočil na njegove tehnične lastnosti, vplive na okolje ter ekonomske in arhitekturne prednosti. Z diplomskim delom si prizadevam ovreči predsodke o omejitvah lesa v visokih gradnjah in prikazati, kako lahko nove tehnologije in pristopi omogočijo njegovo širšo uporabo. Namen diplomskega dela je spodbuditi prehod k bolj trajnostnim gradbenim rešitvam ter poudariti vlogo lesa pri zmanjševanju ogljičnega odtisa v gradbeništvu. Raziskati želim les kot obnovljiv vir in kako lahko vpliva na boljše zdravje in počutje ljudi. Les kot naravni material ustvarja toplo in prijetno bivalno okolje, kar pozitivno vpliva na psihološko dobrobit ter zmanjšuje stres. Poleg tega lahko leseni materiali regulirajo notranjo vlago, kar izboljšuje kakovost zraka in zmanjšuje tveganje za razvoj alergij ter težav z dihalni.

Moje hipoteze so:

- **H1:** Lesena gradnja je za 25 % hitrejša od drugih gradenj.
- **H2:** Lesene visoke gradnje so požarno varnejše od tradicionalnih betonskih in jeklenih visokih gradenj.
- **H3:** Lesene visoke gradnje pripomorejo k zmanjševanju izpustov ogljika za 15 % v primerjavi z drugimi gradnjami.
- **H4:** Umetna inteligenca (AI) lahko že zdaj bistveno pomaga pri načrtovanju lesenih visokih gradenj.

1.3 Predpostavke in omejitve

Do leta 2022 je bilo po nekaterih podatkih na svetu zgrajenih samo 84 lesenih visokih gradenj z 8 nadstropji ali več, v primerjavi s približno več kot 100.000 visokimi gradnjami, narejenimi iz betona ali jekla. To nam pove, da se je ta tehnologija šele začela razvijati, kar posledično pomeni tudi, da je na tem področju zelo malo literature v primerjavi z ostalimi zgradbami iz drugih materialov. V Sloveniji je trenutno najvišja lesena zgradba narejena v Izoli in ima 3 nadstropja. Tudi to je eden izmed razlogov za diplomsko delo, da se želim poglobiti v takšno obliko gradenj. Večino literature, primerne glede na temo diplomskega dela, bom moral pridobiti iz spletnih virov, predvsem tujih.

Težavo predstavljajo tudi poslovne skrivnosti, ki se jih morajo podjetja držati. Tako je težko dobiti podrobne informacije v povezavi z že zgrajenimi lesenimi visokimi gradnjami po svetu.

1.4 Uporabljene raziskovalne metode

Uporabil bom kvantitativen pristop, saj sem si postavil hipoteze, ki jih želim potrditi ali ovreči na osnovi podatkov, ki jih bom raziskal. Vsi podatki, ki jih bom prikazal, temeljijo na virih in raziskavah, ki so preizkušeni in se dajo pridobiti. Izbrane metode za analizo podatkov vključujejo primerjalne analize, statistične izračune ter interpretacijo pridobljenih rezultatov. S tem bom zagotovil, da so sklepi, ki jih bom podal, objektivni in podprti z dokazi. Poseben poudarek bom namenil tudi preverjanju zanesljivosti in veljavnosti uporabljenih virov ter kritični analizi morebitnih omejitev, ki bi lahko vplivale na rezultate raziskave. Cilj takšnega pristopa je zagotoviti jasno, strukturirano in argumentirano predstavitev ugotovitev, ki bodo osnova za nadaljnjo diskusijo ter razmislek o možnostih za uporabo teh spoznanj v praksi.

2 DELO V PROJEKTNi SKUPINI

Prava skupina je ključnega pomena za uspešno izvedbo projekta, saj vsak član zase prinaša edinstvene veščine in znanja, ki so nujna za uspeh. Prvi in najpomembnejši član pri gradnji je arhitekt, ki oblikuje estetske in funkcionalne vidike objekta. Njegova vizija se nato uresniči s pomočjo gradbenega inženirja, ki skrbi za tehnične specifikacije in varnostne standarde. Gradbeni izvajalec nato igra ključno vlogo pri fizični izvedbi projekta, saj upravlja s potrebnim gradbenim materialom, delovno silo in časovnimi roki. Projektni vodja je zavezan k usklajevanju vseh aktivnosti, kar zagotavlja učinkovito komunikacijo med člani skupine. Ob tem sta pomembna skladnost projekta z zakonodajo in pridobitev potrebnih dovoljenj, kar je ključno za preprečevanje pravnih težav. Uspeh projekta je pogosto odvisen od sodelovanja med vsemi člani skupine, kar omogoča boljše in hitrejše reševanje izzivov in doseg zastavljenih ciljev.

Na podoben način smo to storili tudi na Višji strokovni šoli Academia Maribor. Na začetku smo vsi opravili Belbinov in Myers-Briggsov test osebnosti, po katerem so nas lahko razdelili v različne projektne skupine. Delo v projektni skupini po Belbinovem testu vključuje razumevanje različnih vlog, ki jih člani ekipe igrajo, kar povečuje učinkovitost skupnega dela. Pri projektu trajnostne lesene visoke gradnje, kar moje diplomsko delo zajema, smo se člani razdelili v specifične vloge: vodja projekta, projektant, komercialist, kalkulant, varnostni koordinator in oseba za pripravo dela.

Sam sem bil postavljen v vlogo vodje projekta. Moja naloga je bila vodenje in usklajevanje skupine. Članom skupine sem predstavil temo diplomskega dela, ki smo jo kasneje skupaj raziskovali. S sodelovanjem in različnimi predlogi članov skupine smo uspešno zasnovali projekt, ki združuje inovacije in praktičnost.

Na prvem srečanju projektne skupine smo se osredotočili na temo lesenih visokih gradenj in razpravljali o prednostih takšnih gradenj. Poudarili smo hitrost gradnje kot ključno prednost v primerjavi z betonskimi konstrukcijami, saj montaža lesenih elementov zahteva manj časa in omogoča večjo fleksibilnost. Leseni elementi so običajno izdelani v tovarnah in prihajajo na gradbišče v vnaprej pripravljenih panelih ali modularnih delih, kar omogoča hitro montažo na terenu. Ta proces skrajša čas gradnje, saj ni potrebe po dolgotrajnem sušenju materialov ali nalogah, kot sta betoniranje ali polaganje armature, ki so potrebne pri betonskih strukturah. Zaradi hitre montaže so lahko lesene stavbe pogosto zaključene v krajšem času, kar zmanjša

tudi stroške dela in omogoči hitrejšo vrnitev investicije. Hitrost gradnje je še posebej pomembna v urbanih okoljih, kjer je potreba po hitri gradnji velikokrat ključna.

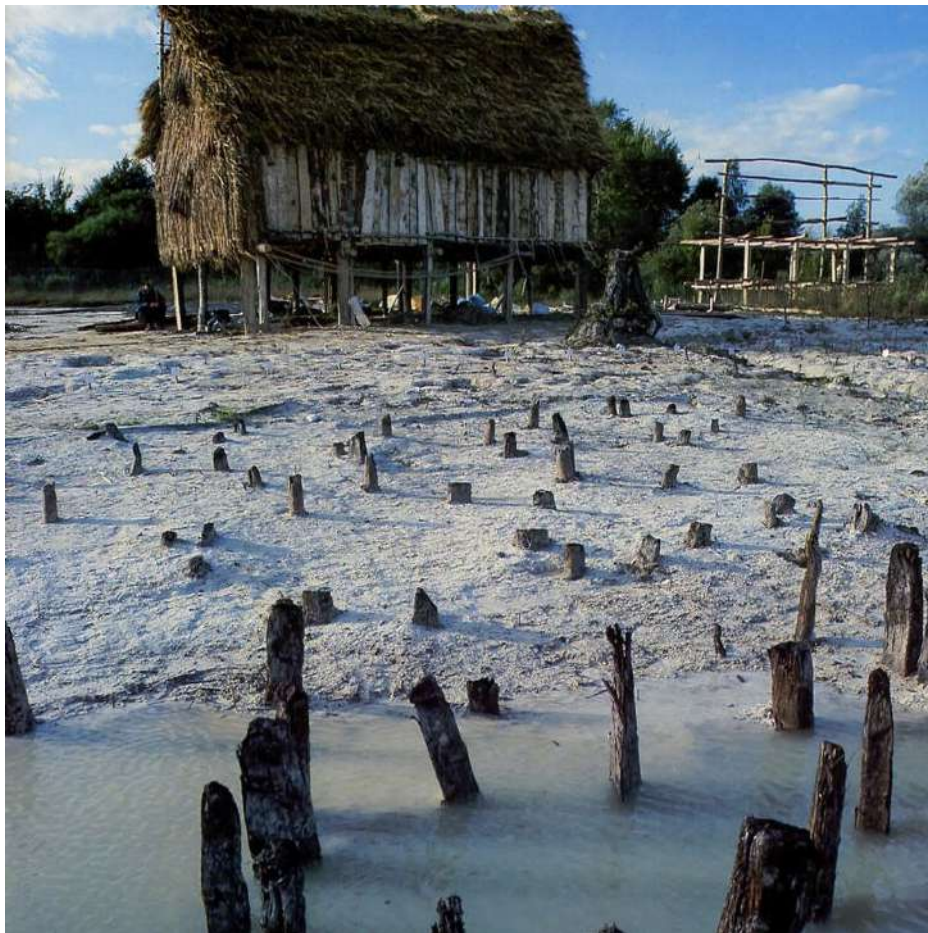
Na drugem srečanju smo se osredotočili na vprašanje požarne odpornosti lesenih visokih gradenj v primerjavi z jeklenimi konstrukcijami. Razpravljali smo o tem, kako se les ob izpostavljenosti ognju obnaša v primerjavi z jeklom. Les, še posebej križno lepljen les (CLT), pri požaru ogleni, kar ustvarja zaščitno plast, ki upočasni širjenje ognja. Po drugi strani jeklo pri visokih temperaturah izgubi svojo trdnost, kar lahko ogrozi celovitost strukture. Kljub temu jeklene konstrukcije zaradi večje gostote materiala po navadi preživijo daljši čas, preden pride do večjih poškodb. Zavedali smo se, da pravilna zaščita lesa, kot je uporaba požarnih premazov ali dodatnih zaščitnih plasti, omogoča izboljšanje požarne odpornosti.

Pri skupinskem delu smo spoznali, da probleme in vprašanja rešujemo hitreje in učinkoviteje, kar je največja prednost dela v skupini. Skozi pogovor in raziskovanje obravnavane teme smo lažje obravnavali vprašanja, ki smo si jih zastavili, in skupaj prišli do učinkovitih rešitev.

3 RAZVOJ LESENIH VISOKIH GRADENJ

3.1 ZGODOVINA LESENIH GRADENJ

Lesene gradnje na svetu niso nobena novost. Lesena gradnja na svetu obstaja že od nekdaj. Prve znane lesene zgradbe v srednji Evropi segajo v leto 2500 pr. n. š. Stavbe so bile sprva grajene predvsem kot brunarice ali skeletne konstrukcije s stebri, zabitimi v zemljo. Zaradi trajne izpostavljenosti stebrov vlagi te stavbe niso imele dolge življenjske dobe. Lesene gradnje so se uveljavile šele v 12. stoletju in se postopoma razvijale v daleč najpogosteje uporabljen način gradnje vse do danes. Največji napredek so dosegli, ko so stebre prenehali zabijati neposredno v tla in so tako konstrukcijo oddaljili od tal, zemeljske vlage in tekoče vode ter s tem omogočili gradnjo več sto let obstojnih objektov. Dele takšnih zgradb je bilo mogoče zamenjati, ne da bi pri tem ogrozili celotno konstrukcijo. Podaljšala se je tudi življenjska doba takšnih objektov, prihranili so se stroški rekonstrukcije takšne stavbe ali izgradnje nove.



Slika 1: Kolišče

Vir: (Unesco, 2011)

Lesene stebre je zamenjal material druge vrste, na primer kamen. S polovično leseno gradnjo se je uveljavilo veliko znanja o konstrukcijski zaščiti lesa, ki se uporablja še danes. S tem je bilo mogoče graditi tudi večnadstropne zgradbe, visoke tudi do 6 nadstropij. Industrializacija in modernost od 19. stoletja naprej sta omogočili, da so tradicionalne lesene stavbe v mestih vedno bolj nadomeščale zidane. V sredini 19. stoletja, ko sta se jeklo in beton v veliki meri začela proizvajati, je les, v povezavi z gradnjo objektov, skoraj popolnoma izginil, uporabljal se je večinoma le še za ostrešja. Leta 1906 je mizarški mojster Otto Hetzer prejel patent za svoj izum "ukrivljeni leseni sestavni del za kombinirane strešne stebre in špirovce", ki so bili lepljeni in stisnjeni pod tlakom, kar je omogočilo ekonomičen način gradnje. Ti nosilci so bili takrat cenejši od armirane betonske konstrukcije in so prinesli vzpon v lesenih konstrukcijah, ki so jih sprva uporabili za strehe dvoran in ploščadi. Lepljen les je pomembno prispeval k nastanku lesene inženirske gradnje. V kombinaciji z novimi pritrdilnimi elementi so bile takrat zgrajene številne konstrukcije dvoran in mostov po Hetzerjevi gradbeni metodi.

Po letu 1950 je lesena gradnja začela doživljati prelom, saj so ekološke prednosti lesa postajale vse pomembnejše. Začele so se pojavljati OSB plošče, ki so jih uvozili iz Združenih držav Amerike (ZDA). Žal se kljub temu vsa pričakovanja o znižanju stroškov še vedno niso uresničila. Vseeno so prepoznali prednosti lesenih gradenj, v smislu energetske učinkovitosti in njenih možnostih ter prednosti pri montaži. Največjo spremembo v lesni gradnji predstavljata lepljen les (ang. gluelam) in križno lepljen les (ang. cross laminated timber (CLT)), ki sta tudi glavna konstrukcijska elementa za moderne visoke gradnje.

3.2 RAZVOJ

Lesene gradnje v svetu niso novost,  za razliko od lesenih visokih gradenj, ki še vedno veljajo za veliko novost, ki me zanima in si jo želim raziskati. Lesene visoke gradnje so doživele preboj nekje po letu 2010. Takrat so se v Evropi začele pojavljati prve moderne visoke gradnje z 10 ali več nadstropji. Lesene stolpnice ali visoke gradnje v zadnjih letih pridobivajo pomen. Prej tega niso uporabljali, saj je bilo to zelo težko narediti, še posebej brez primernih tehnologij. Od kar poznamo lepljen les in križno lepljen les ali CLT, to ni več tako velika uganka kot včasih. Lesene visoke gradnje postajajo vedno bolj priljubljene zaradi svoje estetske privlačnosti in trajnosti, najbolj v teh časih pa zaradi varovanja okolja, saj te vrste gradenj zelo pripomorejo k zmanjšanju ogljika v ozračju, ki je eden izmed glavnih dejavnikov globalnega segrevanja.

Poleg tega je prizadevanje za trajnostne gradbene prakse privedlo do ponovnega zanimanja za leseno gradnjo, saj je les obnovljiv vir, ki nase veže ogljikov dioksid. To je spodbudilo razvoj gradbenih predpisov in standardov, ki podpirajo uporabo masivnega lesa v visokih gradnjah. Sodelovanje med zainteresiranimi stranmi v industriji, raziskovalnimi ustanovami in vladnimi agencijami je imelo prav tako ključno vlogo pri napredku tehnologije in znanja o lesenih visokih zgradbah. Z raziskavami, testiranjem in pilotnimi projekti je gradbena industrija pridobila zaupanje v strukturno celovitost in varnost masivnih lesenih zgradb, kar je utrlo pot njihovi široki uporabi. Na splošno je bil razvoj lesenih visokih stavb rezultat skupnega prizadevanja, ki ga je poganjala kombinacija tehnoloških inovacij, trajnostnih ciljev in naraščajočega povpraševanja po okolju prijaznejših gradbenih rešitvah. Razvoj lesenih stavb lahko torej pripišemo napredku v tehnologiji, skrbem za trajnost in prehodu k okolju prijaznejšim gradbenim praksam.

3.3 PRIHODNOST

Lesene visoke gradnje predstavljajo obetavno smer v arhitekturi in gradbeništvu v prihodnosti. S povečanjem zavedanja o podnebnih spremembah in trajnostnem razvoju se les, kot obnovljiv vir, ponovno uveljavlja kot eden izmed najbolj ekoloških gradbenih materialov.

Lesene visoke gradnje ponujajo tudi odlične estetske in prostorske možnosti, saj les ustvarja prijetno in toplo bivalno okolje. V prihodnosti lahko pričakujemo, da bodo lesene stavbe postajale vse bolj priljubljene v urbanih okoljih, saj se bosta poudarjala trajnostno načrtovanje in uporaba naravnih materialov. S pravim pristopom in raziskavami lahko lesene visoke gradnje postanejo ključni element trajnostnih mest v prihodnosti.

Glede na najnovejše podatke je bilo od leta 2009 do 2022 zgrajenih samo 84 lesenih visokih gradenj, največ leta 2014, kar pomeni, da se priljubljenost z leti veča. Pravzaprav napovedi ocenjujejo, da bo do leta 2025 v ZDA vsako leto zgrajenih 750 novih masivnih lesenih stavb – do leta 2035 se bo število povečalo na 5000 na leto. To predstavlja veliko tržno priložnost v Severni Ameriki. Trenutno je v Evropi približno 30–40 visokih lesenih zgradb (nad 8 nadstropij), pri čemer so države, kot so Norveška, Švedska, Avstrija in Nemčija, vodilne v tem segmentu. Najvišja lesena stavba v Evropi in ena najvišjih na svetu je stavba, poimenovana Mjøstårnet, zgrajena na Norveškem, ki je visoka 85,4 metra. Po ocenah naj bi se število visokih lesenih zgradb v prihodnjih letih hitro povečalo, saj so številne nove zgradbe že v načrtovanju

ali gradnji. Pričakovana je rast v prihodnosti. Po napovedih industrijskih analitikov naj bi se trg visokih lesenih zgradb v Evropi povečeval z letno stopnjo rasti približno 10–15 %. To bi pomenilo, da bi lahko v naslednjih desetih letih dosegli več kot 100 visokih lesenih stavb v Evropi, odvisno od lokalne zakonodaje, finančnih spodbud in podpore trajnostnim projektom (Safarik, Elbrecht, & Miranda, 2022).

4 LESENE VISOKE GRADNJE

Da lahko govorimo o lesenih visokih gradnjah, moramo najprej vedeti, kam jih, kot objekte, uvrščamo. Gradbeni zakon Republike Slovenije "predpisuje" Uredbo o razvrščanju objektov, v katerem visoke gradnje spadajo med zahtevne objekte.

8. člen

(zahtevni objekt)

(1) Zahtevni objekti so določeni v Prilogi 1 te uredbe.

(2) Zahtevni objekt je poleg objektov iz prejšnjega odstavka tudi objekt, ki izpolnjuje eno od naslednjih splošnih meril:

- je objekt s kesonskim temeljenjem,
- je objekt s pilotnim temeljenjem, če so piloti daljši od 15 m,
- njegovi podzemni deli so globlji od 15 m,
- ima tri ali več podzemnih etaž,
- višina objekta presega 25 m,
- ima prednapet, na gradbišču izdelan konstrukcijski element, katerega nosilni razpon je večji od 10 m, ali
- najnižja točka konstrukcije objekta je več kot 5 m nad terenom.

(Uradni list, 2018)

Lesene visoke gradnje so stavbe, ki uporabljajo lesene materiale, predvsem križno lepljen les (CLT) in lepljen les, ter druge inovativne lesene komponente za gradnjo večnadstropnih objektov. Sodobne tehnologije omogočajo gradnjo stolpnic in večnadstropnih stavb, ki so ekološke, energetsko učinkovite in hitreje zgrajene v primerjavi z betonskimi in jeklenimi objekti. Leseni materiali so obnovljivi in imajo majhen ogljični odtis, saj vežejo ogljik, kar prispeva k boju proti podnebnim spremembam.



Slika 2: HOHO Viena – primer lesene visoke gradnje

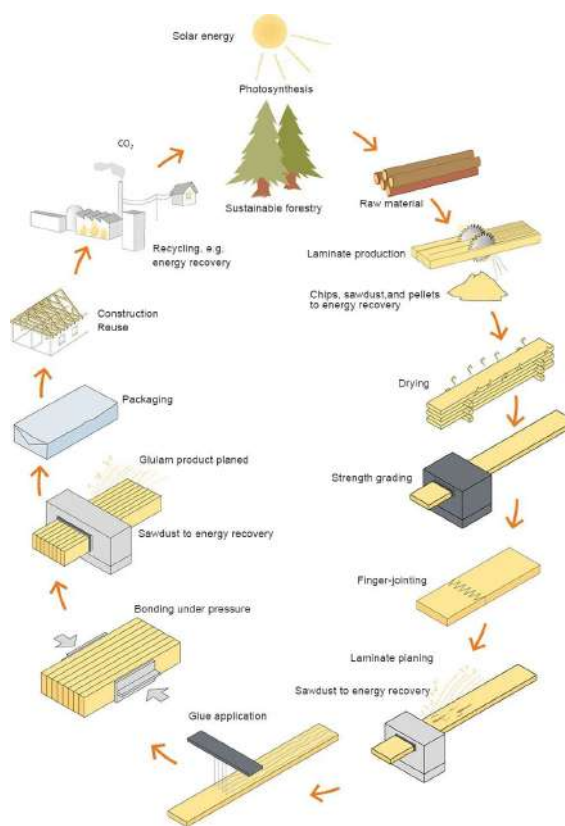
Vir: (Derfritz, 2020)

4.1 LES KOT OSNOVNI ELEMENT

Les je naravni, obnovljiv material, ki je skozi zgodovino igral ključno vlogo v gradbeništvu, obrtništvu in industriji. Njegove edinstvene lastnosti, kot so visoka trdnost glede na težo, dobra toplotna in zvočna izolacija ter prijetna estetska narava, ga uvrščajo med najbolj priljubljene materiale. Ekološka vrednost lesa je izjemna, saj med rastjo drevesa absorbirajo ogljikov dioksid, kar prispeva k zmanjšanju toplogrednih plinov. Poleg tega je les obnovljiv, saj ga je

mogoče pridobivati iz trajnostno upravljanih gozdov, kjer je posek nadomeščen z novo zasaditvijo.

Les je tudi vsestransko uporaben, saj ga uporabljamo v gradbeništvu, pohištveni industriji, papirni proizvodnji in celo kot vir energije. Različne vrste lesa imajo raznolike lastnosti, zaradi česar so primerne za različne namene. Na primer, mehki lesovi, kot sta smreka in bor, so priljubljeni za gradbeništvo, medtem ko so trdi lesovi, kot sta hrast in bukev, primernejši za pohištvo in parket. Poleg tehničnih prednosti ima les pozitiven vpliv tudi na počutje ljudi. Naravna tekstura in toplina lesa ustvarjata prijetno in sproščujoče okolje, kar je pomembno pri oblikovanju notranjih prostorov.



Slika 3: Lepljen les in okolje

Vir: (Swedish wood, n.d.)

Kljub številnim prednostim ples zahteva tudi primerno obdelavo in zaščito, da je odporen proti vlagi, škodljivcem in požaru. Napredne tehnologije, kot sta lepljeni in modificirani les, še dodatno povečujejo njegove zmogljivosti in življenjsko dobo. Les tako ostaja eden najpomembnejših materialov za trajnostno prihodnost, saj združuje naravno lepoto, funkcionalnost in okoljsko prijaznost.

Letni posek lesa v Sloveniji se giblje okoli 4,5 milijona kubičnih metrov na leto. Ta količina odraža trajnostno gospodarjenje z gozdovi in zagotavlja, da letni posek ne presega letnega prirasta, ki je v Sloveniji približno 10,6 milijona kubičnih metrov. To pomeni, da gozdovi v Sloveniji rastejo hitreje, kot se sekajo, kar je pomembno za ohranjanje zdravega in trajnostnega gozdnega ekosistema.

Na svetu letni posek in prirast lesa močno nihata glede na regije, vrste gozdov in okoljske razmere. Po podatkih Organizacije za prehrano in kmetijstvo (FAO) je globalni letni prirast lesa ocenjen na približno 3,3 milijarde kubičnih metrov. V istem obdobju letni posek lesa znaša okoli 1,8 milijarde kubičnih metrov, kar pomeni, da globalno letni prirast lesa še vedno znatno presega letni posek. To zagotavlja, da se gozdovi na splošno obnavljajo in ohranjajo zdravi, čeprav obstajajo regionalne razlike. Na primer, v tropskih gozdovih pogosto prihaja do večjih stopenj deforestacije, kar ogroža trajnost gozdnih ekosistemov, zato bo povpraševanje po lesu raslo, kar lahko vpliva na trajnostno upravljanje gozdov in strategije za ohranjanje gozdnih virov (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020).

4.2 POTEK GRADNJE

Izdelava modularnih elementov za lesene visoke gradnje zahteva skrbno načrtovanje in natančno izvedbo, saj gre za gradnjo z večjim številom vnaprej izdelanih elementov, ki se nato sestavijo na gradbišču. Postopek poteka v nekaj ključnih korakih:

1. Načrtovanje in projektiranje: Na začetku se pripravijo podrobni arhitekturni in inženirski načrti, ki opredeljujejo zasnovo zgradbe, strukturo in specifikacije modularnih elementov. Načrtovanje vključuje tako konstrukcijske zahteve kot energetska učinkovitost in upoštevanje zakonodaje. Pomembno je tudi sodelovanje med arhitekti, inženirji in proizvajalci.
2. Izbira lesa in drugih materialov: Za izdelavo modularnih elementov se običajno uporabljajo visokokakovostne vrste lesa, kot so smreka, macesen ali hrast, odvisno od zahtev projekta in okolja. Uporabljajo se tudi drugi naravni ali predelani materiali, kot so CLT (navzkrižno lepljene lesene plošče), lameliran les (Glulam), OSB (orientirane iverne plošče) ali lesni kompoziti, ki zagotavljajo moč in stabilnost.
3. Predproizvodnja v tovarni: Modularni elementi se običajno proizvajajo v tovarniških pogojih, kjer je možno zagotoviti večjo natančnost in hitrost dela kot na gradbišču. To vključuje:
 - rezanje lesa in sestavljanje nosilnih elementov,

- lepljenje in pritrditev CLT plošč, če se uporabljajo,
- izdelavo sten, stropov in tal z ustrezno izolacijo in notranjimi ter zunanji oblogami,
- vgradnjo električnih, vodovodnih in ogrevalnih inštalacij, če so del modularnega sistema.



Slika 4: CLT plošča na končni obdelavi

Vir: (Borgström & Fröbel, Swedish wood , 2019)

4. Kontrola kakovosti: Vsak modularni element mora biti pregledan in preverjen, da zagotavlja ustrezno kakovost in ustreza specifikacijam ter standardom. Preverijo se strukturna stabilnost, izolacija, tesnost spojev, odpornost na vlago in ognjevarnost. Pravilna kontrola v tej fazi omogoča, da so elementi brezhibni, ko prispejo na gradbišče.



Slika 5: CLT stena

(Borgström & Fröbel, Swedish wood, 2019)

5. Transport na gradbišče: Ko so modularni elementi izdelani in preverjeni, se prepeljejo na gradbišče. Zaradi velikosti in teže elementov je transport pogosto zahteven, zato se uporabljajo posebna vozila in oprema, vključno z dvigali za namestitev elementov na mesto.

6. Montaža na gradbišču: Na gradbišču se modularni elementi sestavijo in pritrdijo po načrtih. Montaža poteka hitro, saj so elementi že pripravljeni. Zlaganje posameznih modulov, ki tvorijo etaže ali prostorske enote, omogoča hitro rast zgradbe. Na tej stopnji se običajno izvedejo še finalna dela, kot so priključitev instalacij, montaža notranje opreme in zaključna obdelava.

7. Finalna obdelava in preizkus: Po montaži se preveri celoten objekt, vključno z vsemi instalacijami, funkcionalnostjo in varnostjo. Sledita finalna obdelava in priprava za vselitev. Modularna lesena gradnja omogoča hitro, trajnostno in prilagodljivo rešitev za visoke gradnje, poleg tega pa zmanjšuje potrebo po delu na gradbišču in vpliv na okolje.



Slika 6: Jedro in okvir

Vir: (Framework: The first wood high-rise)

4.3 TEMELJENJE

Čeprav je tehnično mogoče zgraditi leseno stolpnico brez betonskega temelja ali betonske plošče, to ni običajna praksa zaradi konstrukcijskih in varnostnih razlogov. Betonski temelji in plošče se običajno uporabljajo pri visokih gradnjah, da zagotovijo stabilnost, podpirajo težo stavbe in enakomerno porazdelijo obremenitve na tla. Pri lesenih visokih stavbah se lahko namesto betona uporabijo alternativni sistemi temeljenja, kot so jekleni piloti, vijačni piloti ali leseni piloti. Ti temeljni sistemi lahko zagotovijo ustrezno podporo stavbi ter hkrati zmanjšajo uporabo betona. Vendar je pomembno upoštevati, da bi načrtovanje in gradnja visoke stavbe brez betonskega temelja ali plošče zahtevala skrbno upoštevanje dejavnikov, kot so razmere tal, višina zgradbe, strukturne obremenitve in potresne zahteve. Inženirji in arhitekti bi morali oceniti izvedljivost in varnost takšne gradbene metode, da bi zagotovili strukturno celovitost in

stabilnost zgradbe. Skratka, čeprav je mogoče zgraditi leseno stolpnico brez betonskega temelja ali plošče, bi bili za zagotovitev varnosti in stabilnosti konstrukcije potrebni temeljito načrtovanje, inženirsko strokovno znanje ter upoštevanje gradbenih predpisov in standardov.

- Zato se za temeljenje visokih lesenih zgradb običajno uporablja betonska temeljna plošča, saj zagotavlja stabilno in trdno osnovo, potrebno za prenos obremenitev na tla. Lesene konstrukcije so sicer lahke v primerjavi z betonom ali jeklom, a pri visokih stavbah še vedno ustvarijo znatne obremenitve, ki jih je treba učinkovito prenesti na temelje. Glavni razlogi za uporabo betonske temeljne plošče so:
- Stabilnost in odpornost proti posedanju: betonska plošča zagotavlja stabilnost, kar zmanjšuje tveganje za posedanje zgradbe, ki bi lahko ogrozilo celotno strukturo objekta.
- Enakomerna porazdelitev obremenitev: visoke stavbe ustvarjajo velike točkovne obremenitve, ki jih betonska plošča enakomerno razporedi po tleh, kar zmanjšuje koncentracije napetosti.
- Zaščita pred vlago: betonska plošča deluje kot ovira proti vlagi in preprečuje stik z leseno strukturo, kar je ključno za ohranjanje trajnosti lesa.

Pri visokih lesenih konstrukcijah iz cross-laminated timber (CLT) in glulam (lepljen les) je betonska plošča pogosto nujna, saj tudi omogoča povezavo s sistemi za sidranje, ki zgradbo dodatno stabilizirajo v primeru potresov ali močnih vetrov in drugih zunanjih vplivov.



Slika 7: Temelj z nosilcem

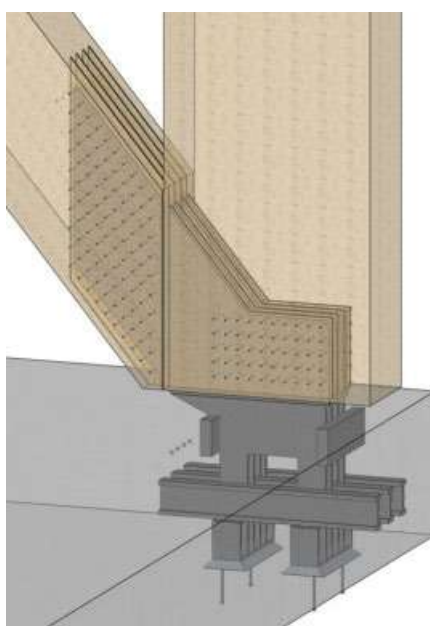
Vir: (Vollark, n.d.)

4.4 SPAJANJE

Povezovanje velikih lesenih konstrukcijskih elementov je ključno za zagotavljanje stabilnosti, trajnosti in varnosti v lesenih visokih stavbah. Najpogosteje se uporabljajo različni kovinski spojni elementi, kot so jekleni kotniki, nosilci, plošče in sidra, ki omogočajo zanesljive povezave med glavnimi nosilci, stebri in ploščami. Jekleni elementi prenesejo velike obremenitve in zagotavljajo visoko strukturno odpornost na sile, kot so veter, potresi ali vertikalne obremenitve. Vijaki in dolga sidra se uporabljajo za spajanje velikih površin, na primer križno lepljenih lesenih (CLT) plošč in lepljenih lesenih nosilcev (glulam). Ti elementi se vgrajujejo pod določenimi koti in na strateških mestih, kar zagotavlja optimalen prenos obremenitev in preprečuje premikanje ali zvijanje konstrukcije. Ker kovinski deli lahko pospešujejo prenos toplote in vplivajo na požarno varnost, se ti elementi pogosto obložijo z negorljivimi materiali ali uporabijo požarno odporne premaze.

V trajnostnih konstrukcijah se lahko uporabljajo tudi leseni čepi in mozniki, kar omogoča povezave brez kovine. Leseni čepi zagotavljajo fleksibilnost ter zmanjšujejo toplotne mostove in vpliv na okolje, saj se v celoti razgradijo, če stavbo porušimo. Leseni mozniki so zasnovani tako, da so primerni za nosilne elemente in s tem ustvarjajo estetsko povezavo, ki je skladna s trajnostnim ciljem zgradbe.

Povezave velikih lesenih elementov pogosto vključujejo tudi lepljenje, kjer se uporabljajo močna, prožna in na vlago odporna lepila, zlasti za notranje konstrukcijske dele. Tako dosežemo gladke, nevidne spoje, kar je pomembno pri vidnih lesenih površinah v notranjosti stavbe (Harvey, 2021).



Slika 8: Povezava na temelju

Vir: (Wood, Safarik, Will, & Elbrecht, 2023)



Slika 9: Različni sistemi spajanja nosilcev

(Harvey, 2021)

5 PRIMERJAVA Z BETONSKIMI IN JEKLENIMI VISOKIMI GRADNJAMI

5.1 TEŽA MATERIALA

Ena od ključnih prednosti lesenih struktur je njihova nizka teža v primerjavi z betonom in jeklom, kar omogoča lažjo gradnjo ter zmanjšuje potrebo po obsežnih temeljih. Lesene zgradbe so približno 50–70 % lažje od primerljivih betonskih in jeklenih zgradb enake velikosti. Ta razlika se pojavi predvsem zaradi nižje gostote lesa, v primerjavi z betonom in jeklom. Les je zelo lahek material, saj se njegova gostota giblje med 400 in 900 kg/m³, odvisno od vrste lesa, v primerjavi z betonom, pri katerem se gostota betona giblje med 2200 in 2400 kg/m³ ali celo več. Najtežje je jeklo, katerega gostota se giblje okoli 7800 kg/m³, kar je približno 3- do 4-krat težje od betona in več kot 8-krat težje od lesa.

5.2 ENERGIJSKA UČINKOVITOST

Les je naravno dober izolator, saj ima nizko toplotno prevodnost, kar pomeni, da lesene stavbe običajno potrebujejo manj energije za ogrevanje in hlajenje. To pomeni, da les ohranja notranjo temperaturo bolj stabilno ter zmanjšuje potrebo po ogrevanju pozimi in hlajenju poleti. Zaradi tega so obratovalni stroški (stroški ogrevanja, hlajenja) v leseni stavbi pogosto nižji, kar pripomore k dolgoročnemu prihranku. Lesene stavbe z dobro toplotno izolacijo lahko pripomorejo k 20–30 % nižjim stroškom ogrevanja v primerjavi z betonskimi stavbami.

Beton ima slabšo toplotno izolacijo kot les, vendar se zaradi svoje mase uporablja kot termalni zadrževalnik (shranjevanje toplote). Beton je veliko boljši prevodnik toplote kot les, kar pomeni, da hitreje izgubi notranjo toploto v hladnejših podnebjih. To povečuje potrebo po stalnem ogrevanju za ohranjanje želene temperature v prostoru. Beton ima višjo toplotno kapaciteto, kar pomeni, da se segreje in ohlaja počasneje. V hladnih mesecih to pomeni, da se stavbe iz betona počasneje segrevajo, vendar tudi počasneje izgubijo toploto, zaradi česar je potrebne več energije za ohranjanje udobne temperature. Ravno zaradi teh lastnosti ima beton lahko do 20–30 % višje stroške ogrevanja v primerjavi z lesom, še posebej v hladnejših podnebjih.

30 cm debela CLT (križno lepljena lesena) plošča ima precej boljše toplotnoizolacijske lastnosti v primerjavi z enako debelo betonsko ploščo. Toplotna prevodnost materialov CLT in betona je bistveno različna:

$$d_{\text{CLT}}: 30 \text{ cm}, \lambda_{\text{CLT}}: 0,13 \text{ W/mK}$$

$$R_{\text{CLT}} = \frac{d}{\lambda} = \frac{0,30}{0,13} = 2,30 \quad \text{m}^2\text{K/W} \quad U_{\text{CLT}} = \frac{1}{R} = \frac{1}{2,3} = \underline{0,43 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

Toplotna prevodnost lesa (CLT): CLT plošča ima toplotno prevodnost (λ) med 0,12 in 0,15 W/m·K (odvisno od vrste lesa). Za 30 cm CLT ploščo je vrednost toplotne prehodnosti (U-vrednost) približno 0,43 W/m²K, kar pomeni dobro toplotno izolativnost.

$$d_{\text{beton}}: 30 \text{ cm}, \lambda_{\text{beton}}: 1,5 \text{ W/mK}$$

$$R_{\text{beton}} = \frac{d}{\lambda} = \frac{0,30}{1,5} = 0,2 \text{ m}^2\text{K/W} \quad U_{\text{CLT}} = \frac{1}{R} = \frac{1}{0,2} = \underline{5 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

Toplotna prevodnost betona: Betonska plošča ima toplotno prevodnost (λ) med 1,4 in 1,7 W/m·K. Pri 30 cm debelini je U-vrednost betonske plošče okoli 5 W/m²K, kar je precej slabše v primerjavi z leseno CLT ploščo.

Razlika pomeni, da lesena CLT plošča zagotavlja veliko boljšo toplotno izolacijo. Za doseganje enakovredne izolativnosti bi morala biti betonska plošča kombinirana z dodatno izolacijo, na primer s stiroporom ali mineralno volno, da bi zmanjšala toplotno izgubo. Če želimo betonsko ploščo z debelino 30 cm toplotno izenačiti s 30 cm debelo leseno CLT ploščo, ki ima U-vrednost okoli 0,43 W/m²K, moramo dodati toplotno izolacijo, saj ima beton bistveno višjo toplotno prevodnost.

$$R_{\text{SKUPAJ}} = \frac{1}{U_{\text{CLT}}} = \frac{1}{0,43} = 2,32 \text{ m}^2\text{K/W} \quad R_{\text{izolacija}} = R_{\text{skupaj}} - R_{\text{beton}} = 2,32 - 0,2 = 2,12 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$\lambda_{\text{eps}}: 0,04 \text{ W/mK} \quad d_{\text{izolacija}} = R_{\text{izolacija}} \times \lambda_{\text{izolacija}} = 2,12 \times 0,04 = 0,0848 \text{ m}$$

Za izračun potrebne dodatne izolacije lahko uporabimo standardne izolacijske materiale, kot sta mineralna volna ali steklena volna s toplotno prevodnostjo okoli 0,04 W/m·K. Da dosežemo skupno U-vrednost 0,43 W/m²K, potrebujemo približno 8,5 cm izolacije na betonsko ploščo. Na splošno je treba debelino izolacije prilagoditi lokalnim gradbenim predpisom.

Lesene visoke gradnje dosežejo zahtevano toplotno prehodnost stavbe z uporabo večplastne sestave sten, ki vključuje leseno nosilno konstrukcijo in dodatne sloje izolacije. Lesena struktura, kot je CLT (križno lepljen les), že ima določene izolacijske lastnosti, vendar ne

zadostuje za doseg nizkih U-vrednosti, ki jih predpisujejo standardi za skoraj ničenergijske stavbe (Franks).

Ključni pristop za zagotavljanje ustrezne toplotne izolacije je dodajanje izolacijskih materialov na zunanjo ali notranjo stran lesene konstrukcije, kot so mineralna volna, steklena volna, lesna vlakna ali sodobnejši izolacijski materiali (npr. grafitni EPS ali vakuumске izolacijske plošče). Ti materiali imajo toplotno prevodnost med 0,02 in 0,4 W/m·K, kar bistveno izboljša izolativnost stene.

Kombinacija CLT ali masivnih lesenih elementov z izolacijskim slojem omogoča doseganje zahtevanih vrednosti toplotne prehodnosti. Na primer, 10–20 cm debele izolacijske plošče v kombinaciji z leseno konstrukcijo zadoščajo za doseganje U-vrednosti pod 0,28 W/m²K, kar ustreza slovenskim predpisom.

V leseni gradnji se posebna pozornost namenja zrakotesnosti stavbe, da se preprečijo toplotne izgube skozi stike in povezave. Uporaba parnih zapor, tesnilnih trakov in posebnih fasadnih sistemov zmanjšuje toplotne mostove, ki bi lahko povečali U-vrednost.

Nekatere lesene konstrukcije uporabljajo lesna vlakna kot del stene, kar dodatno prispeva k toplotni izolativnosti. Lesna vlakna imajo nižjo toplotno prevodnost kot CLT in lahko izboljšajo toplotno zaščito stavbe. S kombinacijo teh tehnik lahko lesene visoke gradnje dosežejo zahtevano toplotno prehodnost in so pogosto zasnovane za nizkoenergijski ali pasivni standard, kar še dodatno zmanjša potrebo po ogrevanju in hlajenju stavbe (Enso, 2020).

5.3 TRAJNOST

Lesena gradnja je pogosto bolj trajnostna (zmanjšanje ogljičnega odtisa), ker je les obnovljiv material, ki absorbira ogljikov dioksid med rastjo dreves. Vendar je les občutljiv na vlago, plesen in insekte, kar lahko poveča stroške vzdrževanja, če ni ustrezno zaščiten.

Beton je zelo trpežen, odporen na vlago, ogenj in insekte ter ima daljšo življenjsko dobo brez potrebnega vzdrževanja, vendar ima visoke emisije CO₂ pri proizvodnji, zaradi česar ima večji ogljični odtis kot les.

Lesene stavbe so tudi energetsko učinkovitejše, kar zmanjša dolgoročne obratovalne stroške. Betonske stavbe so za razliko od lesenih lahko primernejše za določene vrste projektov, kjer sta potrebna večja stabilnost, vzdržljivost ali odpornost na vremenske vplive. Kljub začetnemu strošku so lesene stavbe dolgoročno cenejše zaradi nižjih stroškov vzdrževanja, energetske

učinkovitosti in trajnosti, kar predstavlja pomembno prednost pri trajnostni gradnji (Green spec).

6 HITROST GRADNJE

Lesene visoke gradnje se od drugih vrst gradnje razlikujejo po več ključnih vidikih. Prvič, uporabljajo napredne materiale, kot sta križno laminiran les (CLT) in lepljeni lamelni les (glulam), ki omogočajo gradnjo višjih in stabilnejših struktur. Drugič, izkoriščajo modularne pristope, pri katerih se posamezni moduli izdelajo v tovarni in nato sestavijo na gradbišču, kar skrajša čas gradnje in zmanjšuje odpadke. Poleg tega je les lažji od tradicionalnih gradbenih materialov, kar omogoča preprostejše temelje in zmanjšuje potrebo po težki opremi. Les se tudi preprosto obdeluje, kar omogoča hitre prilagoditve in modificiranje zasnove med gradnjo.

Modularna lesena gradnja je lahko do 30–50 % hitrejša od tradicionalne gradnje z betonom ali jeklom, saj omogoča predproizvodnjo elementov, hitrejšo montažo in manjšo odvisnost od vremenskih razmer (Abrahamsen, Moelven, 2018).

Gradnja lesene stavbe je običajno hitrejša, saj so leseni elementi lažji, preprostejši za montažo in obdelavo. Na primer, montaža predizdelanih lesenih panelov ali lepljenega lesa lahko zmanjša čas gradnje. Ker lesene konstrukcije pogosto vključujejo predizdelane komponente (npr. lesene hiše iz panelov ali montažnih elementov), to pomeni manj dela na gradbišču in manj napak, kar zmanjšuje stroške dela. V leseni gradnji so stroški dela lahko nižji, saj montaža lesenih elementov zahteva manj časa in delovne sile v primerjavi z večjimi betonskimi deli (betonski temelji, montaža železobetonskih elementov).

Gradnja betonskih objektov je običajno počasnejša zaradi teže betonskih elementov in zahtevnejših gradbenih postopkov, kot so priprava opažev, vlivanje betona, utrjevanje in montaža težjih elementov. Prav tako je potrebnega več časa za obdelavo betonskih temeljev in montažo večjih betonskih plošč ali tramov. V gradnji z betonom so stroški dela višji zaradi potrebe po daljšem času gradnje, večji obremenitvi z deli, kot so betoniranje temeljev, montaža težkih konstrukcij in delo z večjimi betonskimi elementi (Archdaily, 2020).

Mjøstårnet je bil pionirski projekt v trajnostni gradnji, saj je dokazal, da lahko lesena konstrukcija zagotovi stabilnost, varnost in trajnost, ki so potrebne za višje zgradbe, in tako navdihnil številne podobne projekte po svetu. Mjøstårnet, kot prva najvišja lesena zgradba z višino 85,4 m, je imela naslednjo časovnico gradnje: temeljna dela so se začela aprila 2017, prva faza lesene gradnje se je začela septembra istega leta. Stavba je bila dokončana in uradno odprta marca 2019. To pomeni, da je proces gradnje trajal približno 1,5 leta po začetku temeljev, medtem ko je celoten projekt od začetka do zaključka trajal približno dve leti.

Za izgradnjo te stavbe so potrebovali približno 2.600 m³ lesa. Ta količina lesa vključuje križno lepljen les in lepljen les, ki sta bila uporabljena za glavne nosilne elemente, stene, tla in druge konstrukcijske dele stavbe. Toliko lesa v svetovnih gozdovih zraste izjemno hitro. Ocenjuje se, da svetovni gozdovi vsako sekundo prirastejo približno 1 kubični meter lesa. Glede na to bi za ta projekt les zrasel v samo 2600 sekundah, kar je enako kot nekaj manj kot 45 minut. Te ocene temeljijo na povprečnem globalnem prirastu, ki pa se seveda razlikuje glede na vrsto gozdov, lokacijo in podnebne razmere (Wood, Safarik, Will, & Elbrecht, 2023).

Primerljiva betonska visoka gradnja je Spektra complex v Ljubljani, ki je visoka 85 m in ima 21 nadstropij ter se lahko primerja z omenjeno leseno visoko gradnjo Mjøstårnet. Konstrukcija je izvedena kot skeletna armirano betonska konstrukcija, sestavljena iz AB medetažnih plošč, ki so v nadstropnih ploščah prednapete, ter masivnih AB komunikacijskih delov in AB stebrov. Gradnja te betonske visoke gradnje je trajala od junija 2021 do oktobra 2023 (Spektra.si, 2024).



Slika 10: Visoki gradnji Mjøstårnet (levo) in Spektra (desno)

(RTV.no, 2024), (Elea.si, n.d.)

7 POŽARNA VARNOST

9. člen

(gradbeni predpisi)

(1) Z gradbenimi predpisi se za posamezne vrste objektov določijo njihove tehnične značilnosti tako, da ti objekti glede na svoj namen izpolnjujejo eno, več ali vse naslednje bistvene zahteve:

- mehanske odpornosti in stabilnosti,
- varnosti pred požarom,
- higienske in zdravstvene zaščite in zaščite okolice,
- varnosti pri uporabi,
- zaščite pred hrupom in
- varčevanja z energijo in ohranjanja toplote.

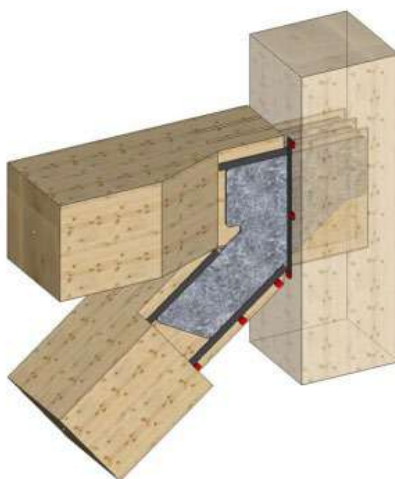
(Pravno-informacijski sistem Republike Slovenije, 2017)

Požarna varnost v stanovanjskih in poslovnih objektih v Sloveniji je urejena z zakonodajo in standardi, ki določajo ukrepe za zaščito ljudi in premoženja pred požari. Ključni vidiki požarne varnosti vključujejo:

- Zakonodajo in regulative: V Sloveniji je področje požarne varnosti urejeno z Zakonom o varstvu pred požarom (ZVPoz) in različnimi podzakonskimi akti, ki določajo obveznosti lastnikov in uporabnikov objektov. Zakon določa načela požarne varnosti, ukrepe za preprečevanje požarov in organizacijo zaščite pred požarom.
- Načrtovanje in izvedbo požarne varnosti: V vseh novogradnjah, in tudi pri prenovah, morata biti v projektno dokumentacijo vključena ocena tveganja za požar ter načrt požarne varnosti. Ta načrt mora vsebovati določila o materialih, ki so odporni na ogenj, postavitvi evakuacijskih poti, sistemih za gašenje in obveščanje ter usposabljanju osebja.
- Požarno varnost: Prilagaja se glede na vrsto objekta. Stanovanjski objekti, kot so večstanovanjske zgradbe, morajo imeti ustrezne evakuacijske poti, medtem ko poslovni objekti, zlasti tisti z večjimi kapacitetami, zahtevajo dodatne ukrepe, kot so požarni nadzorni sistemi, redne vaje evakuacije in protipožarni treningi za zaposlene.

- V obeh vrstah objektov so ključni elementi požarne varnosti, kot so požarni alarmni sistemi, ki zaznavajo dim in toploto ter obveščajo prebivalce o morebitni nevarnosti, sistem za gašenje, kamor spada uporaba Sprinklerjev, gasilnih aparatov in drugih sredstev za hitro gašenje požara, ter evakuacijski načrti, ki jasno označujejo evakuacijske poti in izhode, ki omogočajo hitro in varno evakuacijo.
- Usposabljanje in ozaveščanje: Usposabljanje zaposlenih in prebivalcev o pravih postopkih v primeru požara je ključno. To vključuje usposabljanje o evakuacijskih načrtih, uporabi gasilnih aparatov in splošnih varnostnih ukrepih. Redne vaje in simulacije lahko znatno pripomorejo k pripravljenosti na morebitne izredne razmere.
- Nadzor in inšpekcijo: Požarni nadzor in inšpekcije zagotavljajo, da objekti izpolnjujejo zakonske zahteve in standarde. Inšpekcijski organi lahko izvajajo redne preglede, da preverijo delovanje požarnih sistemov in ustreznost ukrepov za preprečevanje požara. Neizpolnjevanje predpisov lahko vodi do kazni ali celo zaprtja objekta.
- Sodelovanje z gasilskimi enotami: Sodelovanje med lastniki objektov in lokalnimi gasilskimi enotami je ključnega pomena. Gasilci morajo biti seznanjeni z načrti objektov, dostopnimi potmi in posebnimi tveganji, kar omogoča učinkovitejše posredovanje v primeru požara. Z upoštevanjem teh ukrepov in predpisov lahko Slovenija učinkovito zmanjšuje tveganja, povezana s požarom in zagotavlja varnost tako v stanovanjskih kot poslovnih objektih.

(Pravno-informacijski sistem Republike Slovenije, 2022)



Slika 11: Protipožarna zaščita priključkov

(Abrahamsen, Moelven, 2017)

Požarna varnost pri lesenih visokih gradnjah je ključnega pomena, saj les, kljub svojim prednostim, kot sta trajnost in ekološka naravnost, predstavlja poseben izziv, kadar gre za zaščito pred požarom. Lesene konstrukcije morajo izpolnjevati stroge požarne varnostne standarde, ki jih določa zakonodaja. V Sloveniji je zakonodaja, kot je Zakon o varstvu pred požarom (ZVPoz), ključna pri oblikovanju pravil in smernic za načrtovanje in gradnjo, kar vključuje tudi ustrezno dimenzioniranje lesenih elementov, tako da zagotavljajo ustrezno odpornost proti ognju. Uporaba posebnih obdelav lesa, kot so impregniranje z ognjeodpornimi kemikalijami, lahko bistveno poveča požarno odpornost lesenih konstrukcij. Na trgu so tudi materiali, kot so križno lepljeni les (CLT), ki so zasnovani z mislijo na požarno varnost. Takšni materiali pogosto vključujejo več plasti lesa, kar povečuje skupno maso in tako izboljšuje požarno odpornost.

Lesene visoke gradnje in konstrukcije iz betona ali jekla se razlikujejo glede požarne odpornosti. Številni bi mislili, da lesene gradnje niso požarno varne, saj je les gorljiv material, a lahko lesene strukture z ustrezno obdelavo in načrtovanjem dosežejo primerljive ravni varnosti. Les se obdeluje z ognjeodpornimi kemikalijami in ima naravno lastnost, da pri gorenju razvija zaščitno plast žerjavice, kar upočasni širjenje ognja. Debelina in konstrukcija lesenih elementov sta ključni; debelejši elementi nudijo boljšo požarno odpornost.

Beton in jeklo sta naravno odporna na ogenj. Beton ne gori in ne proizvaja dima, jeklo se lahko oslabi pri izjemno visokih temperaturah, kar vpliva na nosilnost konstrukcije. Jekleni elementi pogosto zahtevajo dodatno zaščito z ognjeodpornimi prevlekami, da se podaljša njihova odpornost proti ognju.

Evropski standard EN 13501-2 določa požarno odpornost gradbenih elementov in gradbenih sistemov. Požarna odpornost se običajno meri v minutah in temelji na tem, kako dolgo lahko gradbeni element vzdrži požar, preden začne izgubljati svojo funkcijo. Za lesene elemente se pogosto uporablja razred REI (Resist, Evacuate, Integrity), ki določa, kako dolgo element ohrani svojo strukturalno nosilnost, odpornost proti prenikanju ognja in nepropustnost za dim.

Standard REI (Resist, Evacuate, Integrity): Ta sistem ocenjevanja upošteva čas, ki ga element potrebuje za zadrževanje ognja, dimov in ohranjanje svoje strukturne nosilnosti. Za klasične in visoke stavbe mora biti minimalna požarna odpornost običajno 60 minut (R60), v nekaterih primerih tudi 90 minut (R90) za bolj kritične elemente, kot so nosilci in tla, kjer je potrebna večja zaščita.

Pri gradnji stavb se je treba osredotočiti tudi na evakuacijo ljudi, v primeru, da pride do požara in morajo ljudje stavbo nemudoma zapustiti. Požarna odpornost materialov in konstrukcij mora omogočiti vsaj 60 do 90 minut za evakuacijo ljudi. To vključuje čas, da se ljudje premaknejo iz stavbe ali dosežejo varna območja, preden začnejo nosilci ogrožati strukturno stabilnost stavbe (iTeh Standards, 2016).

Nekatere raziskave so pokazale, da lahko lesene konstrukcije s pravilnim načrtovanjem in obdelavo dosežejo požarno odpornost, ki je primerljiva z betonskimi in jeklenimi objekti. Na primer, sodobni križno lepljeni les (CLT) lahko zagotovi ustrezno požarno odpornost, ki se lahko izenači z nekaterimi jeklenimi in betonskimi konstrukcijami. Na splošno lahko rečemo, da lahko lesene visoke gradnje z ustrezno tehnologijo in načrtovanjem dosežejo varnostne standarde, primerljive s tistimi iz betona in jekla. Vse tri vrste konstrukcij so lahko varne, če so pravilno zasnovane in vzdrževane (Gernay & Ni, 2020).



Slika 12: Požarni preizkus lepljenega lesa

(Abrahamsen, Moelven, 2017)

Poročilo o požarni strategiji za Mjøstårnet navaja, da morajo glavni nosilni sistemi zdržati 120 minut požara. Sekundarna obremenitev, kot so tla, pa mora prenesti 90 minut. Poleg tega

mora struktura prenesti polno izgorelost in preprečiti popoln kolaps. To pomeni, da bo po izgorelosti nosilni sistem še vedno nedotaknjen, požar na konstrukcijskih elementih pa bodo pogasili. Zasnova požara se preveri z 90-minutnimi testi izgorevanja, ki so bili v letu 2016 opravljeni pri SP Fire Research AS v Trondheimu. Preizkusi dokazujejo požarno obnašanje velikih profilov lepljenega lesa in njihovih povezav.

8 TRAJNOSTNA PRIHODNOST LESENIH VISOKIH GRADENJ

Les je vsestranski in široko uporabljen naravni material v gradbeništvu, cenjen zaradi svoje estetske privlačnosti, strukturnih lastnosti in trajnosti. Les je obnovljiv vir, zlasti če izvira iz trajnostno upravljanih gozdov. V primerjavi s številnimi drugimi gradbenimi materiali ima nižji ogljični odtis, saj med rastjo veže nase ogljikov dioksid. Raziskave kažejo, da bi se s povečano uporabo lesa v gradnji v Evropi lahko emisije zmanjšale za približno 12–14 % na letni ravni. Zmanjšanje emisij s temi projekti je v skladu s cilji Evropske unije za trajnostni razvoj.

Les ponuja topel in vabljen videz, zaradi česar je priljubljena izbira za notranjo in zunanjo uporabo. Njegova naravna vlakna in barvne različice lahko povečajo vizualno privlačnost strukture. Les ima odlično razmerje med trdnostjo in težo, zaradi česar je primeren za različne konstrukcijske namene, vključno s tramovi, rešetkami in okvirjem. Učinkovito lahko prenese obremenitve, medtem ko je razmeroma lahek, še posebej, ko ga zlepimo skupaj.

Les ima naravne izolacijske lastnosti, ki lahko prispevajo k energetski učinkovitosti stavb. Pomaga uravnati temperaturo in lahko zmanjša stroške ogrevanja in hlajenja. Les je preprost za obdelavo, kar omogoča vrsto možnosti oblikovanja. Lahko ga režemo, oblikujemo in spajamo na različne načine, zaradi česar je primeren tako za tradicionalne kot sodobne arhitekturne stile. Čeprav je les dovzeten za škodljivce in propadanje, lahko ustrezna obdelava in vzdrževanje povečata njegovo vzdržljivost. Nekatere vrste, kot sta cedra in sekvoja, so naravno odporne na vlago in insekte (Timber industry news, 2022).

Les lahko absorbira zvok, zaradi česar je odlična izbira za prostore, kjer je akustika pomembna, kot so koncertne dvorane in snemalni studii. Vključitev lesa v zasnovo stavbe spodbuja povezavo z naravo, ki lahko izboljša dobro počutje stanovalcev.

Trajnostna prihodnost lesenih visokih stavb je vznemirljivo in razvijajoče se področje v arhitekturi in gradbeništvu. Ker urbanizacija še naprej narašča, postaja povpraševanje po trajnostnih gradbenih rešitvah vse bolj kritično. Les naravno veže ogljik, kar pomeni, da med rastjo absorbira ogljikov dioksid iz ozračja. Ob uporabi v gradbeništvu lahko lesene visoke stavbe shranijo ta ogljik in tako pomagajo ublažiti podnebne spremembe. Dlje kot je les v uporabi, več ogljika se veže. Za razliko od tradicionalnih gradbenih materialov, kot sta beton in jeklo, ki med proizvodnjo močno vplivajo na okolje, je les obnovljiv vir. Če je pridobljen iz

trajnostno upravljanih gozdov, ga je mogoče nabirati brez izčrpavanja ekosistema in je okolju prijaznejša možnost.

Lesene konstrukcije nudijo boljšo toplotno izolacijo v primerjavi z betonom in jeklom, kar vodi do zmanjšane porabe energije za ogrevanje in hlajenje. Ta energetska učinkovitost prispeva k nižjim obratovalnim stroškom in manjšemu ogljičnemu odtisu v življenjskem ciklu stavbe.

Zaradi vseh teh lastnosti je les dragocen naravni graditeljski material v gradbeništvu, ki ponuja kombinacijo trajnosti, estetske privlačnosti in funkcionalnih prednosti. Njegova uporaba se še naprej razvija z napredkom tehnologije in oblikovalskih praks, zaradi česar je ustrezna izbira za sodobne gradbene projekte.

Predizdelava lesenih sestavnih delov lahko povzroči manj odpadkov med gradnjo. Izdelava na kraju omogoča natančno rezanje in sestavljanje, kar zmanjša odvečni material in izboljša splošno učinkovitost.

Napredek v tehniki in tehnologiji, kot sta križno laminiran les (CLT) in lepljen les (lepljen laminiran les), je omogočil varno in učinkovito gradnjo višjih lesenih zgradb. Ti inženirski leseni izdelki zagotavljajo moč in stabilnost, ki sta potrebni za visoke strukture, ter hkrati ohranjajo prednosti lesa. Vključevanje lesa v visoke stavbe krepí povezavo z naravo, kar lahko izboljša dobro počutje stanovalcev in produktivnost. Les pozitivno vpliva na duševno zdravje in splošno kakovost življenja. Številna mesta in države začenjajo prepoznavati prednosti lesenih visokih zgradb ter posodablajo gradbene in druge predpise, da olajšajo njihovo gradnjo. Takšne vrste podpora lahko pomaga pospešiti sprejemanje lesa v urbanih okoljih že danes in v prihodnosti (Benton, 2020).

Trajnostna prihodnost lesenih visokih stavb je obetavna, saj jo poganjajo njihove okoljske koristi, inovativne inženirske rešitve in vse večja sprejemljivost v urbanističnem načrtovanju. Ker tehnologija še naprej napreduje in se povečuje povpraševanje po trajnostnih gradbenih praksah, bodo lesene stolpnice verjetno igrale pomembno vlogo pri oblikovanju mest prihodnosti. Življenjska doba lesene visoke stavbe se lahko močno razlikuje glede na več dejavnikov, vključno s kakovostjo uporabljenih materialov, zasnovo, metodami gradnje, praksami vzdrževanja in okoljskimi pogoji. S pravilnim načrtovanjem in nego imajo lahko lesene stolpnice življenjsko dobo, primerljivo z življenjsko dobo tradicionalnih betonskih in jeklenih konstrukcij.

Življenjska doba sodobne lesene visoke gradnje se po ocenah giblje med 50 in 100 leti, pri čemer lahko z ustreznim vzdrževanjem in zaščito trajnost doseže tudi do 200 let ali več. Na

trajnost lesenih konstrukcij vplivajo kakovost lesa, uporabljeni zaščitni premazi, podnebni pogoji ter pravilna gradbena zasnova, ki zmanjšuje izpostavljenost lesa vlagi in škodljivcem. Vzdrževalci morajo biti še posebej pozorni na kakršno koli zamakanje vode v objekt ali veliko izpostavljenost vlagi, saj je to ena od stvari, ki predstavlja največji problem lesa, saj začne nastajati plesen ali pa les začne gniti in začne izgubljati trdnost. Pomembni so tudi redni pregledi elementov proti škodljivcem in termitom, ki lahko napadejo les. Na mestih, ki so izpostavljena vlagi, UV žarkom ali škodljivcem, se po navadi uporabljajo zaščitni premazi, da se povečata vzdržljivost in odpornost proti vremenskim vplivom.

Ugotovimo, da imajo lesene visoke gradnje, ki so ustrezno zasnovane in vzdrževane, primerljivo življenjsko dobo z zgradbami iz betona ali jekla (Correa, n.d.).

9 NOVE TEHNOLOGIJE LEPLJENEGA LESA KOT SESTAVNEGA ELEMENTA

Poznamo dve najpogostejši metodi lepljenja lesa, ki se razlikujeta po konstrukciji. To sta lepljen les ter križno lepljen les (CLT).



Slika 13: Skupna uporaba CLT plošče in lepljenega nosilca

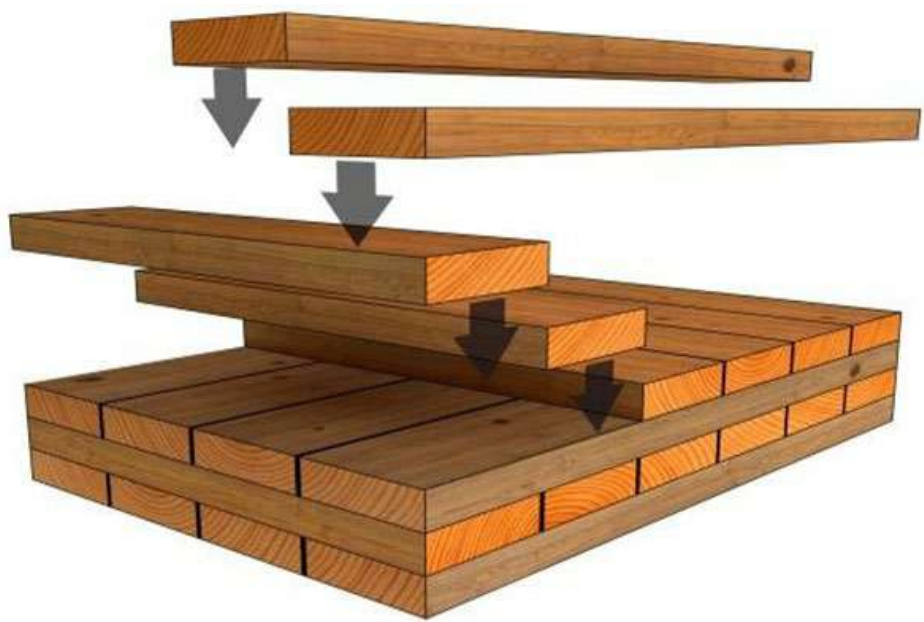
Vir: (Kremer, 2023)

9.1 Križno lepljen les (CLT)

Križno lepljen les (v angleščini Cross-Laminated Timber, CLT) so predstavili leta 1990 v Avstriji in je sodoben gradbeni material, narejen iz več plasti lesa, ki so lepljene križno, kar pomeni, da so letve v vsaki plasti orientirane pod pravim kotom v primerjavi z naslednjo plastjo. To povečuje stabilnost in trdnost materiala ter zmanjšuje skrčenje in raztezanje, ki ju običajno povzroča sprememba vlažnosti.

Najprej je treba izbrati primeren les. Za izdelavo CLT se najpogosteje uporabljajo iglavci, kot so smreka, bor, jelka ali macesen. Les mora biti visokokakovosten, brez večjih napak, kot so grče, razpoke ali deformacije. Pomembno je, da je les pravilno posušen, saj mora imeti vlažnost

med 8 % in 12 %, da se prepreči kasnejše zvijanje ali deformacije. Izbran les se nato razreže na deske, katerih širina in debelina sta odvisni od zahtev projekta in potrebnega končnega izdelka. Za običajne CLT plošče se uporabljajo deskane plošče, katerih debelina je običajno med 20 mm in 40 mm. Plošče morajo biti natančno obdelane, da so primerne za lepljenje v večplastne plošče. Ključna značilnost CLT plošče je, da so naslednje plasti lesene deske nameščene pod pravim kotom (90°) glede na prejšnjo plast. Ta križna orientacija vlaknin povečuje stabilnost materiala in zmanjšuje verjetnost skrčenja ali zvijanja plošče.



Slika 14: CLT plošča

Vir: (India wood, 2024)

Običajno so CLT plošče sestavljene iz 3 do 7 plasti. Za lepljenje plasti lesa se uporabljajo specializirana lepilna sredstva. Običajno se uporabljajo strukturirana poliuretanska lepila ali epoksi lepila, ki zagotavljajo visoko trdnost in obstojnost povezave med plastmi. Lepljenje mora biti natančno in enakomerno, da se zagotovi dolgotrajna stabilnost in trdnost končnega izdelka. Po nanosu lepila se plošče postavijo v stiskalnice, kjer se pod pritiskom in določenim temperaturnim režimom lepilo strdi. Ta faza traja nekaj ur, odvisno od vrste lepila in debeline plošče. Med tem postopkom se doseže, da so vse plasti enakomerno in trajno povezane. Plošča mora biti popolnoma suha, preden se nadaljuje z nadaljnjimi obdelavami.

CLT plošče so pogosto potrebne, da so natančno prilagojene specifičnim dimenzijam projekta. To vključuje rezanje robov, utore ali luknje za montažo. Plošče se lahko tudi površinsko obdelajo z brušenjem ali lakiranjem, da dobijo gladko in estetsko površino. To je še posebej pomembno, kadar so plošče vidne v končni gradbeni strukturi.

Ko so CLT plošče pripravljene, se transportirajo na gradbišče. Ker so plošče lahko precej velike, je pomembno, da so prevozi ustrezno načrtovani. Na gradbišču se plošče povezujejo v konstrukcijo s pomočjo posebnih montažnih naprav, kot so viličarji in dvigala.

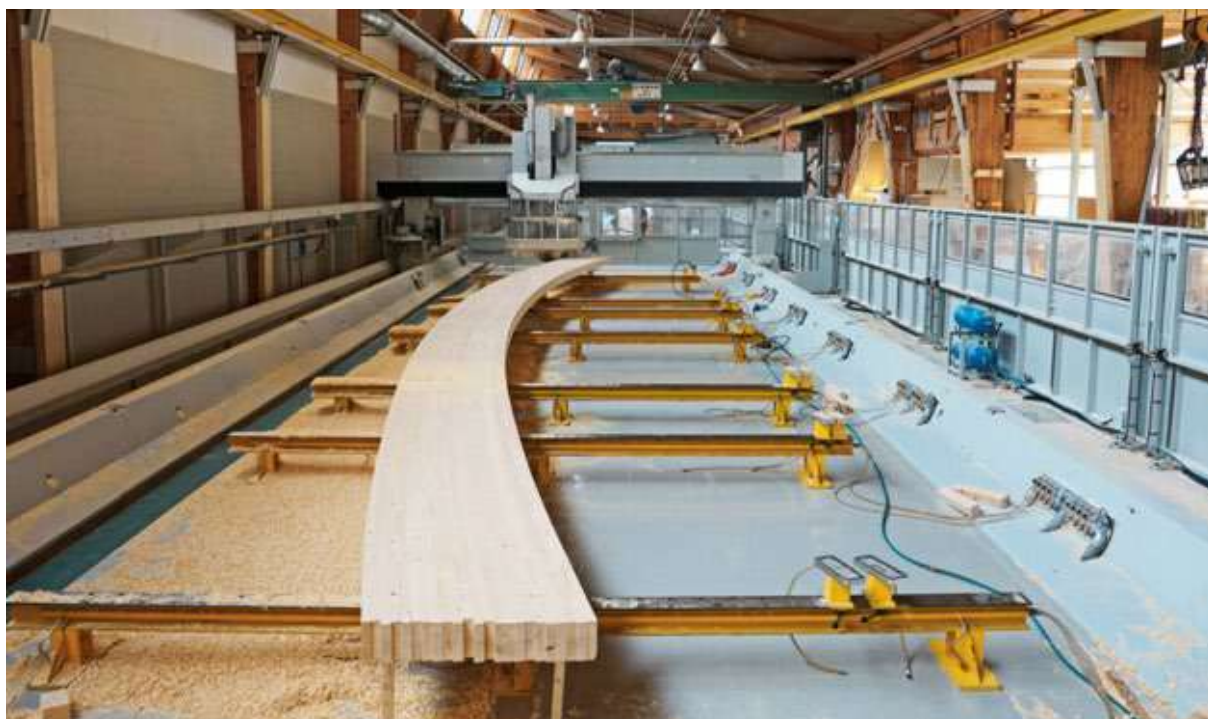
Izdelava križno lepljenega lesa je zapleten, vendar natančen postopek, ki vključuje številne faze obdelave lesa, od priprave materiala, lepljenja, stiskanja in obdelave do končnega izdelka. Ta material je izjemno trden, stabilen in ekološki, zato je vse bolj priljubljen v sodobnem gradbeništvu. Proizvodnja CLT plošč zahteva kompleksno in napredno tehnologijo, ki vključuje različne vrste strojev za obdelavo lesa, lepljenje, stiskanje in končno obdelavo. Ta proces je visoko avtomatiziran, kar omogoča hitro in natančno izdelavo plošč, ki izpolnjujejo stroge standarde kakovosti. Sodobni CNC stroji, stiskalnice, sistemi za lepljenje in brušenje omogočajo izdelavo visokokakovostnih in strukturno stabilnih CLT plošč, primernih za širok spekter gradbenih aplikacij (Fröbel, 2024).

Eno takšnih vodilnih podjetij je tudi podjetje Ledinek Engineering iz Slovenije, ki je vodilni proizvajalec strojev in opreme za obdelavo lesa, ki omogoča hitro, natančno in učinkovito proizvodnjo križno lepljenih plošč (CLT). S svojo napredno tehnologijo in široko paleto strokovnih rešitev za lesno industrijo so ključni akter na globalnem trgu za proizvodnjo CLT in drugih lesnih kompozitov. S stroji Ledinek je mogoče doseči visoko produktivnost, natančnost in kakovost v vseh fazah proizvodnje CLT plošč, od priprave lesa do končne obdelave in montaže.

9.2 Lameliran les (GLULAM)

Lameliran les (GLULAM) je leseni kompozitni material, ki se uporablja v gradbeništvu za ustvarjanje struktur z visoko nosilnostjo in stabilnostjo. Izdelek je sestavljen iz več slojev lesa, povezanih z lepilom. Vsak sloj lesa je običajno narejen iz desk, ki so razrezane, poravnane, posušene in lepljene v večplastno strukturo. Ker so sloji lesene ploskve postavljeni tako, da je smer vlaknin različnih slojev usmerjena v enaki smeri, je tako zelo močan in stabilen material. Najpogosteje se uporablja za izdelavo dolgih, močnih tramov, ki podpirajo strešne konstrukcije in talne plošče. Glulam omogoča tudi oblikovanje ukrivljenih in kompleksnih streh, kar je priljubljeno v sodobni arhitekturi. Najpogosteje ga torej uporabljajo za stebre ali nosilce. Običajno so debeline 30 mm do 100 mm (za običajne tramove, nosilce in manjše strukturne elemente), lahko pa dosežejo debelino tudi do 300 mm ali več za velike nosilce, mostove in druge kritične strukturne komponente. V širino običajno merijo nekje med 90 mm do 500 mm.

Za večje strukture širine lahko segajo tudi do 600 mm ali več, zlasti pri večplastnih elementih, kjer so kombinirane večje širine za povečanje nosilnosti. V glulam ni strogo določenih omejitev za dolžino, saj so glulam elementi pogosto narejeni po meri glede na projektne zahteve. Običajno so glulam tramovi, nosilci ali plošče dolgi od 6 m do 24 m. Ekstremne dolžine v nekaterih primerih, predvsem pri mostovih ali velikih industrijskih konstrukcijah, lahko dosežejo dolžine tudi do 30 m ali več. Vendar dolžina običajno ni omejena, saj so glulam elementi lahko povezani v daljše segmente s pomočjo sklopov. Največja omejitev tega je seveda transport.



Slika 15: Lepljen les (nosilec)

Vir: (MM holz, 2021)

Inženirji in arhitekti proučujejo uporabo masovnih lesenih izdelkov, kot sta CLT in lameliran les, kot izvedljive alternative tradicionalnim jeklenim in armirano betonskim konstrukcijskim materialom. Ti leseni izdelki nudijo trdnost, vzdržljivost in požarno odpornost, zaradi česar so nujni za visoke zgradbe (Borgström & Fröbel, Swedish wood , 2019).

10 UMETNA INTELIGENCA V GRADBENIŠTVU

Umetna inteligenca (UI) v gradbeništvu je v zadnjih letih postala ključna tehnologija, ki omogoča povečanje produktivnosti, izboljšanje varnosti, optimizacijo projektov ter zmanjšanje stroškov. S pomočjo naprednih algoritmov in orodij strojnega učenja, računalniškega vida, robotike in drugih tehnologij lahko gradbeni sektor doseže večjo natančnost, hitrost in učinkovitost v vseh fazah gradbenega procesa, od načrtovanja in oblikovanja do gradnje in vzdrževanja.

UI se uporablja za analizo podatkov, kar omogoča optimizacijo projektov na osnovi preteklih izkušenj. Z naprednimi algoritmi lahko napovejo morebitne zamude, prekoračitve stroškov in druge težave, kar pomaga pri boljšem upravljanju projektov. Uporaba UI pri nadzoru in avtomatizaciji delovnih procesov povečuje učinkovitost in varnost na gradbiščih.

Ko govorimo o lesenih visokih gradnjah, UI prinaša dodatne prednosti. S pomočjo simulacij in modeliranja lahko arhitekti optimizirajo zasnove za strukturalno trdnost in energetsko učinkovitost. Napredni analitični programi omogočajo oceno različnih materialov in tehnik gradnje ter njihovo združljivost. UI tudi izboljšuje procese načrtovanja, kar pomeni hitrejše odkrivanje težav v zgodnji fazi projekta. Poleg tega UI omogoča spremljanje gradbenih dejavnosti v realnem času. S senzorji in analitičnimi orodji lahko ekipe hitro prepoznajo morebitna odstopanja od načrta, kar pripomore k večji varnosti in zmanjšanju napak. Integracija umetne inteligence v lesene visoke gradnje tako ne izboljša le učinkovitosti, ampak tudi prispeva k bolj trajnostnim rešitvam, kar je ključnega pomena v sodobnem gradbeništvu. S temi inovacijami se lesene visoke gradnje postavljajo v ospredje trajnostne gradnje, kar omogoča boljšo rabo naravnih virov in zmanjšanje ogljičnega odtisa (Thinhwood, n.d.).

BIM (Building Information Modeling) in umetna inteligenca (UI) se medsebojno dopolnjujeta in prinašata številne prednosti v gradbeni industriji. BIM omogoča 3D modeliranje stavb ter obsežno dokumentacijo, kar izboljša sodelovanje med različnimi deležniki. Ko se UI integrira v BIM, lahko analizira velike količine podatkov in predlaga optimizacije v realnem času, kar pripomore k boljši zasnovi, zmanjšanju napak in izboljšanju procesov odločanja. UI lahko tudi napoveduje morebitne težave, analizira izvedljivost projektov ter optimizira načrte, kar posledično povečuje učinkovitost in zmanjšuje stroške. S tem pristopom se ustvarjajo bolj trajnostne in inovativne rešitve, kar je ključnega pomena za prihodnost gradbeništva. UI omogoča oblikovanje, kjer računalnik predlaga več različnih oblikovalskih rešitev glede na

vhodne parametre, kot so material, velikost, funkcionalnost, stroški in energetska učinkovitost. Arhitekti in inženirji lahko nato izberejo najboljšo rešitev. UI omogoča izvajanje simulacij za analizo vplivov različnih dejavnikov, kot so svetloba, temperatura, obremenitve in energetska učinkovitost, že v fazi načrtovanja, kar povečuje natančnost in zmanjšuje napake.

S pomočjo algoritmov strojnega učenja računalniki analizirajo slike ali video posnetke, ki jih zajemajo kamere na gradbišču, da prepoznajo napake, preverijo napredek gradnje ali nadzorujejo skladnost z načrti. Droni, opremljeni s kamerami ali senzorji, omogočajo, da se gradbišča spremljajo v realnem času. S pomočjo analize slik in podatkov iz dronov UI prepozna morebitne težave, zamude ali neskladnosti. Na osnovi prejšnjih podatkov o napredku gradnje, vremenskih razmerah in drugih dejavnikih lahko UI napoveduje časovni okvir za dokončanje posameznih nalog in celotnega projekta ter opozori na morebitne zamude (Ross, Woodcentral, 2024).

Gradbena industrija se pogosto sooča z izzivi na področju logistike in oskrbe z materiali. UI omogoča optimizacijo teh procesov in zmanjšanje napak. S pomočjo naprednih algoritmov za napovedovanje potrebščin in analizo porabe materialov UI lahko zmanjša količino nepotrebnih zalog in omogoči pravočasno naročanje potrebnih materialov. To zmanjša stroške in prepreči zamude zaradi pomanjkanja materialov. Algoritmi lahko optimizirajo uporabo gradbenih strojev, delovne sile in materialov ter zmanjšajo izgube in povečajo produktivnost.

Varna gradbišča so ključna za zmanjšanje poškodb in nesreč pri delu. UI omogoča napredne sisteme za obvladovanje varnosti in spremljanje tveganj. S pomočjo računalniškega vida in analize video posnetkov lahko sistemi umetne inteligence prepoznajo nevarne situacije (npr. neuporaba zaščitne opreme, nepravilna raba strojev) in opozorijo delavce ali nadzornike. Predvsem predstavlja dodaten varnostni faktor.

S pomočjo UI se lahko avtomatizirajo nekateri gradbeni procesi, kar povečuje natančnost in hitrost izvedbe ter zmanjšuje potrebo po človeškem delu. Traktorska vozila, dvigala in drugi stroji, ki uporabljajo UI, lahko delujejo brez človeške intervencije in optimizirajo naloge na gradbišču, kot sta premikanje materialov in delo s težkimi stroji.

Umetna inteligenca se uporablja tudi v fazi vzdrževanja zgradb, kjer omogoča napovedovanje potrebnih vzdrževalnih dejavnosti na osnovi analiz podatkov. Z uporabo senzorjev in podatkov iz objektov lahko UI napoveduje, kdaj bo potrebno vzdrževanje določenih sistemov ali delov objekta (npr. ogrevanje, prezračevanje, električna napeljava). To pomaga zmanjšati stroške vzdrževanja in podaljšati življenjsko dobo zgradb. Z uporabo UI za analizo porabe energije v

objektih je mogoče optimizirati energetske sisteme za zmanjšanje stroškov in povečanje energetske učinkovitosti.

Umetna inteligenca omogoča napovedovanje stroškov gradbenih projektov in prepoznavanje morebitnih odstopanj od proračuna v zgodnjih fazah projekta. Algoritmi strojnega učenja na osnovi preteklih podatkov o projektih lahko napovedo natančnejše stroške za prihodnje projekte, vključno z morebitnimi tveganji za prekoračitev proračuna (Ross, Woodcentral, 2024).

Umetna inteligenca tako prinaša številne prednosti tudi na področju gradbeništva in visokih gradenj. Pomembno je, da se poleg vseh njenih prednosti zavedamo tudi morebitnih slabosti, ki jih lahko prinaša. Največjo prednost lahko umetna inteligenca doprinese k projektu, če jo v glavni meri še vedno upravlja človek in jo hkrati preverja.

11 HIPOTEZE

11.1 H1: Lesena gradnja je za 25 % hitrejša od drugih gradenj

Hitrost posamezne vrste gradnje je izjemno težko napovedati, kaj šele dokazati, saj je čas izjemno relativen. Določena dela nekateri delavci opravijo hitreje kot drugi in obratno. Vsak projekt ima lahko svoje specifike in tudi posebne zahteve, ki jih drugi nima. Enako je pri posameznem materialu ali vrsti gradnje. Svojo hipotezo zato želim dokazati na osnovi primerjave časa gradnje dveh približno enakih projektov in že znanih dejstev.

Primerjati želim v diplomskem delu že omenjeno leseno visoko gradnjo Mjøstårnet, izvedeno na Norveškem, ter betonsko visoko gradnjo Spektra, izvedeno v Ljubljani. Čeprav sta grajeni na različnih koncih Evrope, imata podobne karakteristike. Stavba Mjøstårnet je bila dokončana leta 2019 in je bila tisti čas najvišja lesena zgradba na svetu. Ima 18 nadstropij in v višino meri 85,4 m. Zgrajena je iz lepljenega lameliranega lesa (glulam) in križno lepljenega lesa (CLT), pridelanih iz lokalnih virov. Njena tlorisna površina meri 16.500 m².

Spektra v Ljubljani je najvišja stavba v Sloveniji. Zgrajena je iz betona in ima 21 nadstropij, ki v višino merijo 85 m. Njena tlorisna površina meri 17.500 m².

Tabela 1: Čas, potreben za izgradnjo lesene in betonske visoke gradnje

PRIMER GRADNJE	ČAS ZA IZGRADNJO	RAZLIKA
Mjøstårnet (lesena visoka gradnja)	23 mesecev	
Spektra (betonska visoka gradnja)	29 mesecev	
		6 mesecev

Vir: lasten vir

$$\frac{\text{časovna razlika}}{\text{čas gradnje (Spektra)}} \times 100 = \frac{6 \text{ mesecev}}{29 \text{ mesecev}} \times 100 = 20,69 \%$$

Primer lesene visoke gradnje se je gradil 23 mesecev, medtem ko so betonsko stolpnico zgradili v 29 mesecih, torej 6 mesecev kasneje. Na osnovi teh podatkov lahko primerjam obe vrsti gradnje. S pomočjo izračuna zgoraj pridem do ugotovitve, da je bila lesena visoka gradnja 21 % hitreje zgrajena od betonske. To ugotovitev sem pridobil na dveh dejansko izvedenih primerih, saj drugače težko primerjamo potek izgradnje zaradi različnih dejavnikov, ki lahko vplivajo na gradnjo.

Ena od ključnih prednosti lesene gradnje je uporaba predizdelanih komponent. Leseni paneli in druge gradbene enote so pogosto predhodno izdelani v tovarnah, kar zmanjša potrebo po dolгих gradbenih postopkih na terenu. To omogoča hitrejšo montažo in zmanjšanje skupnega časa gradnje. Lesene gradnje so običajno hitrejša tudi zaradi manjše teže materiala, kar poenostavi prevoz in montažo ter zmanjša potrebo po težki gradbeni opremi.

Poleg tega les ne potrebuje sušenja, kot to zahteva beton, kar skrajša čakalne roke za strjevanje materialov in omogoča hitrejši napredek gradnje. Modularni pristopi pri gradnji lesenih objektov omogočajo, da se deli stavbe hitro sestavijo na terenu, brez obsežnega zidanja. Vendar to ni vedno mogoče, saj lahko zapleteni projekti ali težki gradbeni pogoji zahtevajo daljše gradbene postopke. Pri večjih ali tehnično zahtevnejših stavbah, kot so visoke stavbe ali objekti z naprednimi inženirskimi zahtevami, lahko gradnja traja dlje.

Kljub tem omejitvam lahko v številnih primerih lesena gradnja resnično pripomore k hitrejšemu zaključku projekta, še posebej v primerih z modularnimi in predizdelanimi rešitvami.

Hipotezo, da je lesena gradnja za 25 % hitrejša od drugih vrst gradenj, ovržem, saj sem na osnovi izračunov primerjave dveh karakteristično primerljivih visokih gradenj iz betona prišel do izračuna, da je lesena visoka gradnja za 21 % hitrejša od betonske.

11.2 H2: Lesene visoke gradnje so požarno varnejše od tradicionalnih betonskih in jeklenih visokih gradenj

Hipotezo želim dokazati na osnovi podatkov o gorljivosti obeh materialov. Lesen lepljen nosilec dimenzij 30 x 30 cm gori s hitrostjo približno 0,6–0,8 mm na minuto, kar pomeni, da bi konstrukcija zdržala približno 30 do 60 minut, preden bi izgubila svojo nosilnost, odvisno od intenzivnosti požara, popolnoma pa bi zgorela v 187–250 minutah (3–4 ure). Kljub temu zoglenela plast na površini deluje kot izolacija in ščiti notranjost, kar omogoča, da nosilec dlje

časa ohrani nosilnost. Po drugi strani betonski nosilec iste velikosti ne gori, vendar lahko zaradi visokih temperatur začne izgubljati nosilnost po približno 60 do 90 minutah, zdrži pa lahko tudi do 120 minut. Beton je naravno negorljiv material, ki ohranja nosilnost pri visokih temperaturah, vendar lahko ekstremna vročina povzroči razpoke in oslabi strukturo. Če je požar kratkotrajen in so temperature zmerne, je beton bolj odporen. V primeru daljšega požara pa leseni lepljeni nosilec lahko ponudi boljšo dolgoročno nosilnost zaradi izolacijskega učinka zoglenitve. Jeklo je prav tako negorljivo, a hitro izgubi nosilnost pri temperaturah nad 500 °C, zato zahteva dodatno zaščito.

Masivni les, kot sta križno lepljeni les (CLT) in lepljen les (glulam), gori predvidljivo in počasi, saj zoglenela plast ščiti notranje plasti pred gorenjem in ima obenem nizko toplotno prevodnost, kar omogoča več časa za evakuacijo.

Vse tri vrste materialov – les, beton in jeklo – lahko dosežejo stroge zahteve požarne varnosti, vendar je to odvisno od zasnove stavbe, vključujoč zaščitne ukrepe, evakuacijske načrte in požarne sisteme, kot so Sprinklerji ali požarne obloge. Zato lesene visoke gradnje niso požarno varnejše od tradicionalnih, vendar so lahko ob ustrezni zasnovi in izvedbi enako varne.

Hipotezo, da so lesene visoke gradnje požarno varnejše od tradicionalnih betonskih in jeklenih visokih gradenj, lahko ovržemo. Lesene stavbe niso naravno požarno varnejše, saj je les gorljiv material, medtem ko sta beton in jeklo negorljiva. Vendar lahko s sodobnimi gradbenimi tehnologijami in zaščitnimi ukrepi lesene stavbe dosežejo dokaj enako visoko raven požarne varnosti kot betonske in jeklene.

11.3 H3: Lesene gradnje pripomorejo k zmanjševanju izpustov ogljika v okolje za 15 % v primerjavi z drugimi gradnjami

Hipotezo, da lesene gradnje pripomorejo k zmanjševanju izpustov ogljika v okolje za 15 % v primerjavi z drugimi gradnjami, poskušam dokazati na osnovi podatkov, koliko ogljika proizvaja posamezen material in kolikšen je posledično njegov ogljični odtis.

Tabela 2: Tabela prikazuje različne materiale glede na izpuste ogljika na m³ med njihovo proizvodnjo

Material	Proizvodnja ogljika (kgCO ₂ /kg)	Gostota (kg/m ³)	Ogljični odtis (kgCO ₂ /m ³)

Lepljen les (glulam)	0,5	500	250
Beton	0,11	2400	264
Jeklo	2	7850	15700

Vir: Lasten vir

Na osnovi prikazanega ima lepljen les, ki se pri lesenih visokih gradnjah največ uporablja, 5,6 % manjši ogljični odtis in posledično vpliv na okolje kot beton in 6180 % manjšega kot jeklo. Opazim, da razlika med ogljičnim odtisom lesa in jekla ni izjemno velika, pravzaprav dosti manjša od pričakovane, vendar je razlika z jeklom izjemno velika, kar je najverjetneje posledica težke industrije pridobivanja jekla kot materiala.

Pri analizi je treba upoštevati tudi, da les med rastjo shranjuje ogljik, in to približno 1 tono na 1m³ lesa, kar pomeni, da lepljen les deluje kot ponor ogljika in nase veže 750 kg CO₂ na kubični meter več, kot znašajo emisije, nastale med njegovo proizvodnjo. To pomeni, da je razlika med lesenim nosilcem in betonskim nosilcem v tem primeru 1014 kgCO₂/m³.

$$\frac{1014 \text{ CO}_2 / \text{m}^3}{264 \text{ CO}_2 \text{m}^3} \times 100 = 384 \%$$

Vpliv ogljika lepljenega lesa je približno 384 % manjši od ogljičnega odtisa betona. To pomeni, da lepljen les nima le nižjega ogljičnega odtisa kot beton, ampak ob upoštevanju vezanja ogljika nase dejansko odstrani skoraj štirikrat več ogljika iz okolja v primerjavi z emisijami betona.

Raziskave iz Skandinavije so pokazale, da lesena gradnja zmanjša emisije toplogrednih plinov v fazi gradnje in proizvodnje za 30–50 %, kanadske študije pa so potrdile, da je zmanjšanje celotnega ogljičnega odtisa stavbe približno 15–20 % v življenjskem ciklu. To zmanjšanje je še posebej izrazito v fazi proizvodnje in gradnje, vendar tudi med uporabo in po življenjski dobi, saj je les mogoče reciklirati ali uporabiti kot biomaso.

Učinkovitost tega zmanjšanja je odvisna od trajnostnega pridobivanja lesa, kratkih transportnih razdalj, ustrezne zaščite materialov in energetske učinkovitosti stavbe. Čeprav lesene gradnje dokazano prispevajo k zmanjšanju emisij ogljika, so koristi najbolj izrazite le, če so izpolnjeni pogoji za trajnostno zasnovo in gradnjo.

Hipoteza, da lesene gradnje pripomorejo k zmanjšanju izpustov ogljika v okolje za 15 % v primerjavi z drugimi gradnjami, je ovržena. Glede na predstavljeno je trditev sicer resnična, vendar doprinos ni zgolj 15 %, temveč 5,6 % v primerjavi z betonom in kar 6180 % v primerjavi z jeklom. Takšen rezultat je že brez upoštevanja absorpcije ogljika med rastjo lesa, sicer je ta odstotek bistveno večji. Lesena gradnja namreč bistveno zmanjša emisije ogljika zaradi skladiščenja CO₂, ki ga les absorbira med rastjo, ter nižje energetske intenzivnosti proizvodnje in gradnje v primerjavi z materiali, kot sta beton in jeklo.

11.4 H4: Umetna inteligenca (AI) lahko že zdaj bistveno pomaga pri načrtovanju izgradnje lesenih visokih gradenj

Umetna inteligenca (AI) že zdaj bistveno pomaga pri načrtovanju in izvedbi lesenih visokih gradenj. Z njeno pomočjo je mogoče optimizirati konstrukcijske rešitve, saj AI analizira obremenitve, kot so veter in potresi, ter predlaga najboljšo razporeditev panelov in nosilnih elementov za stabilnost in trajnost. Generativno oblikovanje omogoča arhitektom in inženirjem, da ustvarijo več rešitev za določeno zasnovo, pri čemer AI išče ravnovesje med estetikom, nosilnostjo, energetsko učinkovitostjo in stroški.

AI omogoča tudi napredno simulacijo požarov in drugih ekstremnih razmer ter pomaga pri izbiri materialov, ki ustrezajo varnostnim standardom. Poleg tega z analizo podatkov o emisijah in življenjskem ciklu materialov prispeva k trajnostnemu načrtovanju, kar je pomembno pri gradnji z materiali, kot je CLT. Z uporabo digitalnih dvojčkov in naprednih algoritmov AI odkriva možne napake v načrtih ter optimizira gradbene procese.

Primeri uporabe AI v lesenih visokih gradnjah:

- HoHo Tower (Avstrija): Pri gradnji so uporabili BIM (Building Information Modeling), kjer AI pomaga pri analizi podatkov in simulacijah.
- Mjøstårnet (Norveška): Pri načrtovanju konstrukcije so uporabljali napredne simulacije, podprte z algoritmi AI, za optimizacijo materialov in obremenitev.

Kljub temu so še vedno določeni izzivi, kot so zagotavljanje zadostne dostopnosti podatkov, usklajevanje različnih vrst inženirskih disciplin in usposabljanje strokovnjakov za uporabo AI orodij v gradbeništvu, ki jih bo v prihodnosti treba še dodatno razviti, da bo AI dejansko postala neodvisna in učinkovita sila pri načrtovanju teh vrst zgradb.

Hipotezo, da umetna inteligenca (AI) že zdaj bistveno pomaga pri načrtovanju izgradnje lesenih visokih gradenj, lahko potrdim, saj AI že danes prinaša napredne rešitve, ki izboljšujejo procese načrtovanja, optimizacije in izvedbe. Zato je možno trditi, da AI že danes lahko pozitivno prispeva ne samo pri leseni visoki gradnji, ampak nasploh v gradbeništvu.

12 SKLEP

Skozi pisanje diplomskega dela sem raziskal lesene visoke gradnje od njihovega začetka pa vse do vizije v njihovi prihodnosti. Predstaviti sem želel lesene visoke gradnje kot trajnostno rešitev za prihodnost. So hitra, trajna in kakovostna gradnja, ki zagotavlja ustrezno bivalno okolje. Les, ki je glavni element takšne gradnje, kot naraven material nudi številne ugodnosti, ki se odražajo v takšni obliki gradnje. V diplomskem delu sem predstavil tudi zgodovino, postopek gradnje, požarno varnost in odpornost ter kako lahko umetna inteligenca pripomore h gradnji takšnih stavb.

Diplomsko delo mi je prineslo nova znanja na področju, ki me zanima. Skozi pisanje sem z raziskovanjem in pridobivanjem podatkov prišel do dejstev, ki so mi pomagala pri preverjanju zastavljenih hipotez. Ugotovil sem:

H1: Lesena gradnja je za 25 % hitrejša od drugih gradenj. Hipotezo **ovržem** na osnovi analize dveh primerov, kjer je lesena visoka gradnja zaključena 21 % hitreje kot primerljiva betonska stavba. To pomeni, da je bilo moje predvidevanje pravilno, vendar je odstotek nekoliko manjši. Lesena gradnja ima zaradi uporabe predizdelanih komponent, modularnega pristopa in hitrejšega napredka brez potrebe po sušenju materialov pogosto prednost pred drugimi vrstami gradenj v hitrosti izvedbe. Analiza primera lesene visoke gradnje, ki je bila zgrajena 21 % hitreje od betonske stolpnice, potrjuje to prednost, vendar poudarja, da so takšne primerjave odvisne od specifičnih pogojev projekta. Hitrost gradnje se lahko spreminja glede na kompleksnost zasnove, velikost objekta in okoljske pogoje, vendar lesena gradnja pogosto omogoča hitrejšo montažo in skrajšanje skupnega časa gradnje, še posebej pri uporabi modularnih rešitev.

H2: Lesene visoke gradnje so požarno varnejše od tradicionalnih betonskih in jeklenih visokih gradenj. Hipotezo, da so lesene visoke gradnje požarno varnejše od tradicionalnih betonskih in jeklenih visokih gradenj, **ovržem**. Les kot gorljiv material ni naravno požarno varnejši od betona in jekla, ki sta negorljiva. Vendar lahko s sodobnimi tehnologijami in zaščitnimi ukrepi lesene stavbe dosežejo enako visoko raven požarne varnosti kot betonske in jeklene stavbe.

Masivni les, kot sta križno lepljeni les (CLT) in lepljen les (glulam), gori počasi in predvidljivo. Zoglenela plast na površini deluje kot izolacija, ki ščiti notranjost in omogoča, da konstrukcija dlje ohrani nosilnost. Betonski nosilci so negorljivi, vendar lahko zaradi visokih temperatur

izgubljajo nosilnost po 60–90 minutah, medtem ko pri ekstremnih temperaturah lahko pride do odlusčenja in oslavljenja armature. Jeklo, čeprav negorljivo, pri temperaturah nad 500 °C hitro izgubi trdnost in zahteva dodatno zaščito, če želimo to preprečiti.

V primeru kratkotrajnih in zmernih požarov je beton običajno odpornejši, medtem ko lahko leseni nosilci ob daljših požarih zaradi izolacijskega učinka zогlenitve ponujajo boljšo dolgoročno nosilnost.

Požarna varnost je pri vseh treh materialih dosegljiva z ustreznimi ukrepi, kot so požarne obloge, Sprinklerji in dobro načrtovane evakuacijske poti. Zato lesene visoke gradnje niso naravno požarno varnejše, a lahko ob pravilni zasnovi dosežejo enako varnost kot tradicionalne betonske in jeklene konstrukcije.

H3: Lesene gradnje pripomorejo k zmanjšanju izpustov ogljika v okolje za 15 % v primerjavi z drugimi gradnjami. Hipotezo, da lesene gradnje zmanjšajo izpuste ogljika v okolje za 15 % v primerjavi z drugimi gradnjami, **ovržem**, saj raziskave kažejo, da je zmanjšanje emisij lahko še večje. Lesena gradnja pomembno prispeva k zmanjšanju ogljičnega odtisa zaradi skladiščenja CO₂ v lesu, manjše energetske intenzivnosti proizvodnje ter možnosti recikliranja po življenjski dobi.

Lesene gradnje k zmanjšanju izpustov ogljika torej ne pripomorejo le za 15 %, ampak za 5,6 % v primerjavi z betonom in 6180 % v primerjavi z jeklom. Če upoštevamo tudi, koliko ogljika les absorbira med rastjo, je ta odstotek bistveno večji. Les absorbira približno 1 tona CO₂ na kubični meter med rastjo, lepljen les pa na neto ravni shrani približno 750 kg CO₂/m³ več, kot znašajo emisije njegove proizvodnje. To pomeni, da les deluje kot ogljični ponor, njegov ogljični odtis pa je kar 384 % manjši od betona. Študije iz Skandinavije in Kanade potrjujejo, da lesena gradnja lahko zmanjša emisije toplogrednih plinov v fazi proizvodnje in gradnje za 30–50 % ter celoten ogljični odtis stavbe v življenjskem ciklu za 15–20 %.

Koristi lesenih gradenj so najizrazitejše ob trajnostnem pridobivanju lesa, krajših transportnih razdaljah in ustrezni zaščiti materialov. Čeprav lesene gradnje bistveno zmanjšujejo emisije, je njihov dejanski vpliv odvisen od trajnostne zasnove, izvedbe in upravljanja življenjskega cikla stavbe.

H4: Umetna inteligenca (AI) lahko že zdaj bistveno pomaga pri načrtovanju izgradnje lesenih visokih gradenj. Hipotezo, da umetna inteligenca (AI) že bistveno pomaga pri načrtovanju izgradnje lesenih visokih gradenj, lahko **potrdim**. AI prinaša napredne rešitve, ki izboljšujejo procese načrtovanja, optimizacije in izvedbe.

Z uporabo AI je mogoče optimizirati konstrukcijske rešitve, simulirati obremenitve, kot so veter in potresi, ter generirati več zasnov za dosego ravnovesja med estetiko, nosilnostjo, trajnostjo in stroški. Napredne simulacije požarov in drugih ekstremnih razmer omogočajo izbiro varnih materialov, medtem ko analiza podatkov o življenjskem ciklu materialov spodbuja trajnostno načrtovanje. Digitalni dvojčki in algoritmi AI omogočajo zgodnje odkrivanje napak in izboljšujejo učinkovitost gradbenih procesov.

Primeri, kot sta HoHo Tower v Avstriji, kjer so uporabljali BIM z AI za analize in simulacije, ter Mjøstårnet na Norveškem, kjer je AI optimizirala razporeditev materialov in obremenitev, dokazujejo obstoječo uporabo teh tehnologij.

Kljub temu so še vedno prisotni izzivi, kot so dostopnost podatkov, usklajevanje različnih inženirskih disciplin in usposabljanje strokovnjakov za uporabo AI. Z nadaljnjim razvojem teh področij ima AI potencial, da postane ključna neodvisna sila ne le pri načrtovanju lesenih visokih gradenj, temveč tudi širše v gradbeništvu.

13 VIRI IN LITERATURA

- (brez datuma). Pridobljeno iz Framework: The first wood high-rise: https://events.forum-holzbau.com/pdf/70_IHF2017_Robinson.pdf
- (25. februar 2020). Pridobljeno iz Archdaily: <https://www.archdaily.com/934374/mjostarnet-the-tower-of-lake-mjosa-voll-arkitekter>
- Abrahamsen, R. (2017). *Moelven*. Pridobljeno iz Papers about the construction of Mjøstårnet: <https://www.moelven.com/globalassets/moelven-limtre/mjostarnet/mjostarnet---construction-of-an-81-m-tall-timber-building.pdf>
- Abrahamsen, R. (2018). *Moelven*. Pridobljeno iz Mjøstårnet - 18 storey timber building: <https://prod.moelven.com/globalassets/moelven-limtre/mjostarnet/mjostarnet---18-storey-timber-building-completed.pdf>
- Benton, D. (16. maj 2020). *Construction Digital*. Pridobljeno iz Europe leads the way in rise of mass timber construction: <https://constructiondigital.com/construction-projects/europe-leads-the-way-in-rise-of-mass-timber-construction>
- Borgström, E., & Fröbel, J. (maj 2019). *Swedish wood*. Pridobljeno iz The CLT Handbook: <https://www.swedishwood.com/siteassets/5-publikationer/pdf/clt-handbook-2019-eng-m-svensk-standard-2019-2022.pdf>
- Borgström, E., & Fröbel, J. (maj 2019). *Swedish wood* . Pridobljeno iz Publications: <https://www.swedishwood.com/siteassets/5-publikationer/pdf/clt-handbook-2019-eng-m-svensk-standard-2019-2022.pdf>
- Correa, D. (brez datuma). *Central Europe Online*. Pridobljeno iz Mass timber construction market is poised for a growth rate of 6%, with an anticipated reach of \$1.5 bn by the year 2031: <https://www.centraleuropeonline.com/article/682904616-mass-timber-construction-market-is-poised-for-a-growth-rate-of-6-with-an-anticipated-reach-of-1-5-bn-by-the-year-2031>
- Derfritz. (2020). *Derfritz*. Pridobljeno iz HoHo Wien: <https://derfritz.at/arbeiten/hoho-wien/>
- Elea.si*. (brez datuma). Pridobljeno iz Business and Residential Building Spektra: <https://www.elea.si/en/portfolio/business-and-residential-building-spektra/>

- Enso, S. (junij 2020). *Storaenso*. Pridobljeno iz Media: <https://www.storaenso.com/-/media/documents/download-center/documents/product-specifications/wood-products/clt-technical/clt-by-stora-enso-technical-documentation---building-physics--2021-9-en.pdf>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). Pridobljeno iz Global Forest Resources Assessment 2020: file:///C:/Users/jerne/Downloads/ca9825en.pdf
- Franks, N. (brez datuma). *Lignacite*. Pridobljeno iz The thermal performance of concrete: an introduction: <https://lignacite.co.uk/the-thermal-performance-of-concrete-an-introduction/>
- Fröbel, J. (marec 2024). *Swedish wood*. Pridobljeno iz Publications: <https://www.swedishwood.com/siteassets/5-publikationer/pdfer/glulamhandbook1-240508.pdf>
- Gernay, T., & Ni, S. (september 2020). *Construct steel*. Pridobljeno iz Timber High Rise Buildings and Fire Safety: https://constructsteel.org/assets/uploads/2021/03/2020-WSA-Timber_Fire-final_report.pdf
- Green spec. (brez datuma). Pridobljeno iz Crosslam timber / CLT - Performance characteristics: <https://www.greenspec.co.uk/building-design/crosslam-timber-performance-characteristics/>
- Harvey, A. (2021). *Woodworks*. Pridobljeno iz Tall Timber Building Design: https://www.woodworks.org/wp-content/uploads/presentation_slides-tall-timber-building-design-harvey-211007.pdf
- India wood. (2024). Pridobljeno iz <https://indiawood.com/industryupdate2022.aspx?pressid=pressRe42>
- iTeh Standards. (22. junij 2016). Pridobljeno iz EN 13501-2:2016: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/81d734a3-7b46-495a-8431-dbb37fe85fdd/en-13501-2-2016?srsId=AfmBOorrq7IWDFYOpbTVuowSAG08SJ87zvQBTvzGNW3B8TKY3IKLWEZy>
- Kremer, P. (2023). *Research gate*. Pridobljeno iz A lightweight CLT panel is hoisted into position a mass timber construction: <https://www.researchgate.net/figure/A->

lightweight-CLT-panel-is-hoisted-into-position-a-mass-timber-construction-project-in_fig1_372345186

MM holz. (2021). Pridobljeno iz High load-bearing capacity, dimensionally stable and lightweight.: <https://www.mm-holz.com/en/products/glued-laminated-timber>

Pravno-informacijski sistem Republike Slovenije. (24. november 2017). Pridobljeno iz Zakon o graditvi objektov: <https://pisrs.si/pregledNpb?idPredpisa=ZAKO3490&idPredpisaChng=ODLU1783>

Pravno-informacijski sistem Republike Slovenije. (25. marec 2022). Pridobljeno iz Zakon o varstvu pred požarom: <https://pisrs.si/pregledNpb?idPredpisa=ZAKO302&idPredpisaChng=ZAKO8525>

Ross, J. (4. oktober 2024). *Woodcentral.* Pridobljeno iz More Timber, Less Steel — AI's Role in Grand Designs of the Future: <https://woodcentral.com.au/more-timber-less-steel-ai-role-in-grand-designs-of-the-future/>

Ross, J. (7. februar 2024). *Woodcentral.* Pridobljeno iz Find Out How Architects Use AI to Amplify Mass Timber Design!: <https://woodcentral.com.au/find-out-how-architects-use-ai-in-mass-timber-building-design/>

RTV.no. (2024). Pridobljeno iz Mjostarnet: <https://rvt.no/cases/mjostarnet/>

Safarik, D., Elbrecht, J., & Miranda, W. (2022). *Council on Tall Buildings and Urban Habitat.* Pridobljeno iz Mass timber data: https://www.ctbuh.org/resources/papers/4530-Journal2022_IssueI_StateofTallTimber+TBIN.pdf

Spektra.si. (2024). Pridobljeno iz Tehnična opremljenost in materiali: <https://spektra.si/tehnicka-opremljenost-in-materijali/>

Swedish wood. (brez datuma). Pridobljeno iz Glulam and the environment: <https://www.swedishwood.com/building-with-wood/about-glulam/glulam-and-the-environment/>

Thinkwood. (brez datuma). Pridobljeno iz Can AI Revolutionize How We Design and Build with Wood?: <https://www.thinkwood.com/blog/can-ai-revolutionize-how-we-design-and-build-with-wood>

- Timber industry news*. (20. januar 2022). Pridobljeno iz European wooden-construction sector is evolving rapidly: <https://www.timberindustrynews.com/european-wooden-construction-sector-evolving-rapidly/>
- Unesco. (2011). *Unesco*. Pridobljeno iz Prehistoric Pile Dwellings around the Alps: <https://whc.unesco.org/en/list/1363/>
- Uradni list*. (6. junij 2018). Pridobljeno iz Uradni list Republike Slovenije: https://www.uradni-list.si/_pdf/2018/Ur/u2018037.pdf
- Vollark*. (brez datuma). Pridobljeno iz OM PROSJEKTET: https://vollark.no/portfolio_page/mjostarnet/
- Wood, A., Safarik, D., Will, M., & Elbrecht, J. (2023). *Tall timber: Mass timber for high-rise building*. Chicago: Council on Tall Buildings and Urban Habitat.