

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Mitja LALOVIĆ

**UPORABA TRISLOJNIH IVERNIH PLOŠČ S POVIŠANO GOSTOTO
V KONSTRUKCIJSKE NAMENE**

DIPLOMSKO DELO
Univerzitetni študij

**THREE LAYER HIGH DENSITY PARTICLEBOARD IN
CONSTRUCTION USE**

GRADUATION THESIS
University Studies

Ljubljana, 2014

Diplomsko delo je zaključek univerzitetnega študija lesarstva. Delo je bilo opravljeno v laboratoriju Katedre za lepljenje, lesne kompozite in obdelavo površin Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja diplomskega dela imenoval doc. dr. Sergeja Medveda in za recenzenta prof. dr. Milana Šerneka.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Delo je rezultat lastnega raziskovalnega dela. Podpisani se strinjam z objavo svoje naloge v polnem tekstu na spletni strani Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete. Izjavljam, da je naloga, ki sem jo oddal v elektronski obliki, identična tiskani verziji.

LALOVIĆ Mitja

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Dn
DK	UDK 630*862.2
KG	iverna plošča/trislojna/gostotni profil/gradbeni material
AV	LALOVIĆ, Mitja
SA	MEDVED, Sergej (mentor)/ ŠERNEK, Milan (recenzent)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2014
IN	UPORABA TRISLOJNIH IVERNIH PLOŠČ S POVIŠANO GOSTOTO V KONSTRUKCIJSKE NAMENE
TD	Diplomsko delo (univerzitetni študij)
OP	X, 52 str., 7 pregl., 33 sl., 40 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	Iskali smo najoptimalnejšo ploščo za konstrukcijske namene glede na mehansko-fizikalne lastnosti izdelanih preizkušancev. V samem eksperimentu smo izdelali 5 serij 3-slojnih ivernih plošč, ki so si bile različne predvsem po gostoti in končni debelini. Gostoto smo povišali v posameznih slojih. Uporabili smo mešano (bukovo in smrekovo) iverje, oblepljeno z urea-formaldehidnim lepilom. Plošča A je bila kontrolna (lastnosti konvencionalne industrijske 3-slojne plošče), ostalim ploščam pa smo dodajali iverje zunanjega sloja v notranji sloj in obratno. Ploščama B in D smo glede na kontrolno ploščo A, dodali relativno malo iverja ($A + \text{cca. } 10 \%$) in dosegli velike spremembe. Ploščama C ($A + 21,4 \%$) in E ($A + 25,8 \%$) smo dodali največ iverja. Plošča C, kjer smo za 60% povečali zunanji sloj z ivermi srednjega sloja, je posledično dosegla enakomerno sestavo, zaradi velikih delcev v zunanjem sloju pa je po končanem stiskanju prišlo do učinka povratne deformacije iveri. Vendar je kljub temu dosegla zelo dobre rezultate, izstopa v strižni trdnosti in strižni trdnosti po robu. Do podobnih povratnih deformacij iveri je prišlo tudi pri plošči E, kjer smo dodali največ delcev glede na kontrolno ploščo. Po odpiranju stiskalnice je v plošči prišlo do porušitve. Plošča se nam je razslojila in dosegla podobne rezultate kot kontrolna. Lahko sklepamo, da nam je uspelo določiti najvišjo količino dodanih delcev, da ploščo izboljšamo. Količina je v območju med 10 in 20%. Ugotovili smo, da že relativno majhna sprememba vhodne surovine za izdelavo plošče, zelo vpliva na končne lastnosti.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Dn
DC UDC 630*862.2
CX particleboard/three-layer/vertical density profile/construction material
AU LALOVIĆ, Mitja
AA MEDVED, Sergej (supervisor)/ ŠERNEK, Milan (reviewer)
PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology
PY 2014
TI THREE-LAYER HIGH DENSITY PARTICLEBOARDS IN CONSTRUCTION USES
DT Graduation Thesis (University studies)
NO X, 52 p., 7 tab., 33 fig., 40 ref.
LA sl
AL sl/en
AB It is well known that different vertical density profiles influence physical and mechanical properties of particleboards. We searched for the optimum particleboard for construction purposes depending on physical and mechanical properties. 5 series of 3-layer particleboards, mostly different in density and thickness were made. The density of individual layers was increased. Beech and spruce particles were used. They were taped over with urea-formaldehyde adhesive. The board A was the control (conventional industrial 3-layer particleboard). Other boards were made differently: particles of the outer layer were added to the inner layer or vice versa. We achieved great increase in physical and mechanical properties with relatively small additions in the B and D boards (A + 10 %) compared to the control. In the C (A + 21.4 %) and E panel (A + 25.8 %) we added more particles. The C board, where we increased outer layer by 60% with particles of the inner layer resulted in a uniform composition. Due to large particles in the outer layer, reverse deformation of particles at the end of compression occurred. However, the C board achieved very good results in shear strength, and shear strength along the edge. A similar reverse deformation of particles also occurred in E panel, having the greatest number of particles added in relation to the control board, which led to a collapse after opening the press. The board was damaged (stratified), it reached similar results to the control; some tests could not even be performed. We defined the maximum amount of particles which could still be added to improve the board. The quantity is in the range between 10 and 20 %; a relatively small change can hugely affects the final properties.

KAZALO VSEBINE

	str.
Ključna dokumentacijska informacija (KDI)	III
Key Words Documentation (KWD)	IV
Kazalo vsebine	V
Kazalo preglednic	VII
Kazalo slik	VIII
Okrajšave in simboli	IX
Slovarček	X
1 UVOD	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA	2
1.2 CILJ NALOGE	3
1.3 DELOVNE HIPOTEZE	3
2 PREGLED OBJAV	4
2.1 TIPI LESENE GRADNJE	4
2.1.1 Okvirna konstrukcija	5
2.1.2 Skeletna konstrukcija	5
2.1.3 Masivna lesena konstrukcija - polna konstrukcija	6
2.1.4 KLH - konstrukcije	6
2.1.5 Zastopanost konstrukcij v Sloveniji	6
2.2 MONTAŽNI STENSKI ELEMENTI	8
2.3 UPORABA PLOŠČ ZA IZDELAVO I-NOSILCA	14
2.4 PLOŠČE	15
2.4.1 Faktorji, ki vplivajo na lastnosti iverne plošče	16
2.4.2 Gostota	17
2.4.3 Nastanek gostotnega profila	17
2.4.4 Debelinski nabrek	19
3 MATERIAL IN METODE.....	20
3.1 UPORABLJENI MATERIALI	20
3.1.1 Iverje	20
3.1.2 Vezivo in aditivi	20
3.2 PRIPRAVA PREIZKUŠANCEV IN VZORČENJE	20
3.2.1 Priprava preizkušancev	20
3.2.2 Izdelava preizkušancev	20
3.3 ZASNOVA PREIZKUSA	22
3.4 TESTIRANJE VZORCEV	23
3.4.1 Merjenje debeline	23
3.4.2 Debelinski nabrek in absorbcija vode	23
3.4.3 Upogibna trdnost in modul elastičnosti	24
3.4.4 Strižna trdnost	25
3.4.5 Merjenje vertikalne porazdelitve prostorninskih mas (VPPM)	27
4 REZULTATI	28
4.1 GOSTOTA IVERNIH PLOŠČ	29
4.2 FAKTOR STISLJIVOSTI	30
4.3 UPOGIBNA TRDNOST IN MODUL ELASTIČNOSTI	32
4.4 UPOGIBNA TRDNOST PO ROBU IN STRIŽNA TRDNOST PO DOLŽINI	36

4.5	STRIŽNA TRDNOST PO debelini	37
4.6	VELIKOST DELCEV	38
4.7	DEBELINA PLOŠČE	38
4.8	DEBELINSKI NABREK	38
4.9	VPIJANJE VODE	40
4.10	GOSTOTNI PROFIL	41
5	RAZPRAVA IN SKLEPI	43
5.1	RAZPRAVA	43
5.1.1	Iverna plošča kot obložna plošča panela	45
5.1.2	Iverna plošča kot del stropne konstrukcije	46
5.1.3	Iverna plošča kot stojina kompozitnega I profila	46
5.2	SKLEPI	47
6	VIRI.....	49

ZAHVALA

KAZALO PREGLEDNIC

	str.
Preglednica 3-1: Receptura za pripravo kontrolne plošče A.....	21
Preglednica 3-2: Receptura za pripravo preizkušancev	22
Preglednica 4-1: Rezultati testov po posameznih ploščah in vrsti testa (povprečna debelina, izračunana gostota, gostota zunanjšega sloja, gostota srednjega sloja, gostotno razmerje slojev, faktor stisljivosti, faktor stisljivosti zunanjšega sloja, faktor stisljivosti srednjega sloja, nabrek, vpijanje vode).....	28
Preglednica 4-2: Rezultati testov po posameznih ploščah in vrsti testa (povprečna debelina, gostota izmerjena s pomočjo merilnika gostotnih profilov (VPPM), upogibna trdnost, upogibni E modul, upogibna trdnost po robu, upogibni E modul po robu, strižna trdnost, strižna trdnost po dolžini).....	28
Preglednica 4-3: Debelina vzorcev pred in po namakanju ter debelinski nabrek	39
Preglednica 5-1: Prikazuje rezultate laboratorijskih testov ter vrednotenje le teh.....	43
Preglednica 5-2: Primerjava med ploščami P7, D, C in OSB 3	44

KAZALO SLIK

str.

Slika 2-1: Sistemi lesene gradnje in način izvedbe elementov (Boršič, 2004)	4
Slika 2-2: Primeri izvedbe lesenih konstrukcij: a) kladna oz. brunasta, b) predalčna, c) steberna, d) okvirna, e) panelna, f) masivna (Lopatič, 2008)	5
Slika 2-3: Tipska sestava stenskega elementa (Kozem Šilih, 2012)	7
Slika 2-4: Modro obarvana področja prikazujejo povečanje koncentracije nateznih napetosti v okolici odprtini pri MVP obložni plošči (Kozem Šilih, 2012)	9
Slika 2-5: Prikaz razmerja med silo (F v kN) in pomikom panelov (W v mm) brez odprtine (G_2) in panelov z vse večjimi odprtinami (OM, O2, O1, OV) (Kozem Šilih, 2012)	9
Slika 2-6: Prikaz obravnave panelnih zidov po kosih (1-5: stenski panel 1-5, 6-8: stena 6-8, 9: sestav več sten, 10: plošča, 11: zgornji veznik, 12: okno, 13: vrata) (EN 1995-1-1)	10
Slika 2-7: Določitev ekvivalentne vertikalne obtežbe q_i in reakcij zaradi vertikalne in horizontalne obtežbe (EN 1995-1-1)	12
Slika 2-8: Prikaz izdelave I nosilca (Ashraf in sod., 2003)	14
Slika 3-1: Prikaz lesenega okvira za izdelavo preizkušancev	21
Slika 3-2: Prikaz preizkušancev, kontrolne plošče A in plošče B, pri kateri smo zunanjemu sloju dodali 30 % iverja sestave srednjega sloja	22
Slika 3-3: Prikaz merjenja upogibne in strižne trdnosti	26
Slika 4-1: Maksimalne, minimalne in povprečne izračunane vrednosti gostote ivernih plošč	29
Slika 4-2: Grafični prikaz povprečnih gostot zunanjih (SL) in srednjih (CL) slojev posameznih plošč	29
Slika 4-3: Grafični prikaz faktorja stisljivosti plošč (CR), zunanjega sloja (CRSL) in faktor stisljivosti srednjega sloja (CRCL)	30
Slika 4-4: Gostota v odvisnosti od faktorja stisljivosti	31
Slika 4-5: Upogibna trdnost plošč	32
Slika 4-6: Upogibna trdnost v odvisnosti od gostote	33
Slika 4-7: Upogibna trdnost v odvisnosti od lokalno najvišje gostote	33
Slika 4-8: Upogibna trdnost v odvisnosti od gostote zunanjega sloja	34
Slika 4-9: Modul elastičnosti v odvisnosti od debeline plošče	35
Slika 4-10: Gostota v odvisnosti od modula elastičnosti	35
Slika 4-11: Upogibna trdnost po robu v odvisnosti od strižne trdnosti po dolžini	36
Slika 4-12: Strižna trdnost po debelini	37
Slika 4-13: Gostota srednjega sloja plošč	37
Slika 4-14: Natresna masa v odvisnosti od debeline plošče	38
Slika 4-15: Nabrek v odvisnosti od gostote plošče	39
Slika 4-16: Razmerje gostot zunanjih in srednjih slojev plošč	40
Slika 4-17: Vpijanje vode v odvisnosti od gostote plošče	40
Slika 4-18: Verikalni gostotni profil po debelini plošče	41
Slika 4-19: Povprečne vrednosti gostot srednjega in zunanjega sloja plošč	42
Slika 5-1: Prikaz vpliva sil na a) panel, b) okvir, c) ploščo (EN 1995-1-1)	45
Slika 5-2: Prikaz elementa stropne konstrukcije (Kozem Šilih 2012)	46
Slika 5-3: Prikaz upogibnih napetosti – tlačne, natezne, nevtralna os	46

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

CATI – (computer-assisted telephone interviewing, računalniško podprto telefonsko anketiranje)
CL – (core-layer, povprečna gostota srednjega sloja)
CR – (compression ratio, faktor stisljivosti)
CRSL – (compression ratio semi-layer, faktor stisljivosti zunanjega sloja)
CRCL – (compression ratio core-layer, faktor stisljivosti srednjega sloja)
FF – (fenol formaldehidno lepilo)
FFT – (fast Fourier transform, metoda za digitalno procesiranje signalov, spektralna analiza)
HDF – (high density fibreboard)
IP – (iverna plošča)
MVP – (mavčno vlaknena plošča)
MDF – (medium density fibreboard, vlaknena plošča, mediapan plošča)
MOE – (modulus of elasticity, modul elastičnosti)
MOR – (modulus of rupture, upogibna trdnost)
MGP 201 – (instrument za merjenje vertikalne porazdelitve prostorninskih mas)
OSB – (oriented strain board, iverna plošča z usmerjenimi ivermi)
SL – (semi-layer, povprečna gostota zunanjega sloja)
UF – (urea formaldehidno lepilo)
VDD – (vertical density distribution, verikalni gostotni profil)
VPPM – (vertikalna porazdelitev prostorninskih mas)
Xlam – (križno lepljen les)

SLOVARČEK

spring back effect – (povratna deformacija iveri, sproščanje napetosti v iverih po odprtju stiskalnice na mestih v plošči, kjer lepilo še ni dokončno utrnilo)

peak density – (ozek pas (ravnina) lokalno najvišje gostote, ponavadi tik pod površino)

curing – (kemični proces, pri katerem lepilo dokončno utrni. Za to fazo je potrebna temperatura, tlak, voda in v nekaterih primerih tudi UV svetloba)

1 UVOD

Les je ena od prvih in najpomembnejših surovin, ki jo je človek uspel izrabiti za izboljšanje kvalitete svojega življenja. Prav les je skupaj z ognjem človeka socializiral. Na začetku je človek les predvsem kuril, kmalu pa je postajal vse pomembnejše naravno gradivo tudi za izdelavo orodja in orožja, transportnih sredstev (npr. obuvala, splavi, brodi, ladje, vozovi idr.) in za gradnjo bivališč. Tako je les eden od najstarejših materialov, ki jih je človek uporabil za gradnjo in se je kot tak ohranil do 20. stoletja. V drugi polovici 20. stoletja pa so se pojavili novi gradbeni materiali, ki so nadomestili to naravno gradivo s še boljšimi lastnostmi. Tako so les zamenjale plošče iz lesnih iveri, vlaken in furnirjev. Tovrstni kompoziti imajo poleg celovite izrabe lesne mase relativno homogeno strukturo, dobre mehanske in reološke lastnosti in boljšo dimenzijsko stabilnost (problem je lahko samo debelinsko nabrekanje). Prednosti so še, da jih lahko izdelujemo v serijski proizvodnji ter enostavna nadaljnja predelava in obdelava. Za našo raziskavo pa je najpomembnejše, da lahko s spremembo količine in sestave vhodne surovine, vplivamo na končne lastnosti plošče.

V Sloveniji ima lesno-predelovalna industrija dokaj močno tradicijo. Glavni razlog je zagotovo dejstvo, da imamo zelo gozdnato pokrajino, saj kar tri petine države pokrivajo gozdovi. Zato je les zelo primeren material, ko se odločamo za gradnjo hiše. Ne le, da lesena hiša ustreza zahtevam po nizki porabi energije za ogrevanje, les je tudi gradivo, ki v celotnem življenjskem ciklu porabi dvakrat manj energije kot npr. beton ali opeka ter več kot dvestokrat manj od aluminija, ugotavlja Zbašnik Senegačnik (2008). Poleg tega je les CO₂ nevtralen in ne povzroča škodljivih emisij, v prostoru izravnava vlago, je topel na otip in nudi visoko nosilnost pri nizki lastni teži. Les izboljšuje bivalno ugodje, je okolju prijazen in zagotavlja energijsko učinkovitost na vseh nivojih.

Smernice razvoja sodobne gradnje temeljijo na povečani uporabi obnovljivih virov, povečani uporabi lesnih kompozitov in večji stopnji prefabrikacije konstrukcijskih elementov v procesu arhitekturnega načrtovanja. V Sloveniji predstavlja gradnja objektov več kot polovico gradbene dejavnosti (52,5 %), od katere je približno tri četrtine aktivnosti namenjenih gradnji novih objektov in le manjši delež prenovi, kot navajata Kitek Kuzman in Vratuša (2011). Največji delež obstoječih stavb (43 %) predstavljajo stanovanjske stavbe. Po podatkih Statističnega urada Republike Slovenije (Statistični letopis... , 2011) je razvidno, da je več kot polovica (87,8 %) stanovanjskih stavb zgrajenih iz opeke, 5,5 % je betonskih in mešanih konstrukcij, 4,5 % je lesenih, ostali materiali pa so zastopani v manjši meri. Dokončane nove stanovanjske stavbe leta 2010 predstavljajo 79 % vseh novogradenj in povečav (Statistični letopis... , 2011). Kiler (2004) ugotavlja, da lahko kot prikaz trenda uporabe materialov v zadnjih petih letih služi delitev stanovanjskih površin za stavbe zgrajene po letu 2000, kjer je razvidna povečana uporaba betonskih konstrukcij (za 60 %) in lesenih konstrukcij (za 35 %), upada pa uporaba kombiniranih konstrukcij. V Sloveniji je bilo leta 2011 zgrajenih 4.021 stanovanjskih stavb, od tega 182 stavb, kjer je bil pretežno

uporabljeni gradbeni material les (Statistični letopis... , 2011). Podatki Sekcije slovenskih proizvajalcev montažnih hiš o realizaciji montažnih hiš v letu 2009 (GZS... , 2009, cit. po Kitek Kuzman, 2011) kažejo, da je bilo v letu 2009 proizvedenih 1.116 montažnih objektov, od tega 709 lesenih montažnih hiš. Manj kot polovica teh lesenih montažnih hiš je bilo prodanih doma. Največji delež izvoza predstavljajo države EU.

Začetki lesene montažne gradnje v Sloveniji segajo že v 60. leta prejšnjega stoletja, v zadnjih letih pa je gradnja v porastu. Poleg večjih proizvodenj, tovarn se pojavljajo tudi lesene hiše, zgrajene v lastni režiji in preko manjših obrtnikov, tesarjev. Na povečano število odločitev za izbiro lesa kot gradbenega materiala kažeta tudi javnomnenjski raziskavi iz leta 2006 in 2011, dobljeni z metodo CATI - računalniško podprto telefonsko anketiranje. V anketi je bilo zajetih 406 oseb. Anketiranje je potekalo za fizične osebe po vsej Sloveniji (Kitek Kuzman 2011). Vzorčni okvir je bil strukturiran glede na regionalno sestavo po dvajsetih statističnih regijah. Raziskava je pokazala, da bi se leta 2006, 60 % vprašanih odločilo za klasičen način gradnje, 34 % za leseno, 6 % pa je bilo neodločenih. Leta 2011 pa bi se za klasičen način gradnje odločilo 51 %, za leseno pa kar 42 %, kar je za 8 % več kot leta 2007.

Kljub temu pa je treba za porast lesene gradnje v Sloveniji narediti še veliko, spremeniti splošno miselnost glede primernosti lesene gradnje, predvsem pa pri razpisih spremeniti merilo najnižjih cen, pravi Bruno Dujić, strokovnjak na področju potresne in požarne varnosti lesenih in kompozitnih konstrukcij. Dokler lahko zaradi najnižje cene projektiranja projekte dobijo podjetja z nepopolno ali ne dovolj kakovostno projektno dokumentacijo, enako velja za izbiro izvajalca, se kaj dosti ne bo spremenilo. Zgled bi bila lahko zelena javna naročila, pri katerih je treba to merilo odpraviti. Oboje skupaj, kakovostne reference in cena, morajo biti merilo, da podjetje dobi naročilo (Dujić 2010).

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Če se omejimo na lesene montažne objekte, kjer je tip gradnje okvirna konstrukcija, ugotovimo, da uporabljajo različni proizvajalci različne sisteme za stene objektov. Poenostavljeno so to sistemi lesenih okvirnih sten, ki jih z obeh strani zaprejo s ploščami, med katere vstavijo izolacijski material. Nosilnost panelnih sten v vertikalni smeri prenašajo pretežno leseni okvirji, za horizontalno stabilnost (veter, potres) pa služijo obložne plošče. Plošča ima veliko togost v svoji ravnini, če jo povežemo z mehanskimi veznimi sredstvi in zelo dobro stabilizira objekt, ki je seveda fiksiran tudi v tla. Na trgu je veliko plošč, ki bi jih lahko uporabili za ta namen. Mi smo se odločil za iverno ploščo, ki je v taki funkciji zelo redko uporabljena, vendar ima veliko prednosti. Raziskali bomo vpliv povečevanja gostote posameznih slojev na mehanske lastnosti. Najprej bomo v laboratoriju s tehnološkimi postopki plošče izdelali, nato pa jih bomo testirali v skladu s slovenskimi standardi za lesene plošče. S tem bomo ugotovili njihovo možno uporabo v gradbeništvu.

1.2 CILJ NALOGE

Cilj tega diplomskega dela je izbrati najoptimalnejšo ploščo za konstrukcijske namene glede na mehansko-fizikalne lastnosti izdelanih preizkušancev. Odločitve bomo argumentirali z rezultati laboratorijskih testov in znanstvene literature, s primerjavo konkurenčnih produktov na trgu ter s svojim znanjem in sklepi. S to diplomsko nalogo želimo prispevati k nadaljnjim raziskavam na tem področju in k večji uporabi tehnološko manjvrednega lesa za namene inovativnih izdelkov. Kvantitativno razumevanje povezav gostotnega profila plošč z željenimi lastnostmi plošč je ključno za specifične končne izdelke. Posledično bi bilo mogoče spremljati lastnosti plošč s kontroliranim spreminjanjem proizvodnih parametrov, ob uporabi obstoječih delovnih sredstev in znotraj ekonomskih omejitev (Wong in sod. 1999).

1.3 DELOVNE HIPOTEZE

Za izvedbo raziskave smo se odločili izdelati trislojne iverne plošče s povišano gostoto v posameznih slojih. Uporabili smo mešano (bukovo in smrekovo) iverje, ki smo ga oblepili z urea-formaldehidnim lepilom (UF). Izdelali smo 5 plošč od katerih je bila plošča A kontrolna (lastnosti konvencionalne industrijske trislojne plošče), ostalim ploščam pa smo dodajali iverje zunanjega sloja v notranji sloj in obratno. Vsaka plošča je imela drugačno gostoto zato domnevamo:

- plošče z višjo gostoto bodo imele boljše mehanske lastnosti,
- plošče z višjo gostoto bodo imele večji debelinski nabrek,
- faktor zgostitve plošč bo naraščal z gostoto plošč,
- velikost iverja v posameznih slojih plošče vpliva na upogibno trdnost ivernih plošč,
- obstaja linearna zveza med modulom elastičnosti in točko najvišje gostote pri gostotnem profilu,
- pri ploščah z največjo dodano količino iverja lahko pričakujemo povratno deformacijo iverja predvsem v srednjem sloju (springback efekt - sproščanje napetosti v iverih po odprtju stiskalnice),
- da je možno izdelati boljšo ploščo za specifično uporabo (obložna plošča panela, stojina pri I-nosilcu) kot primerljive plošče, ki že obstajajo na trgu.

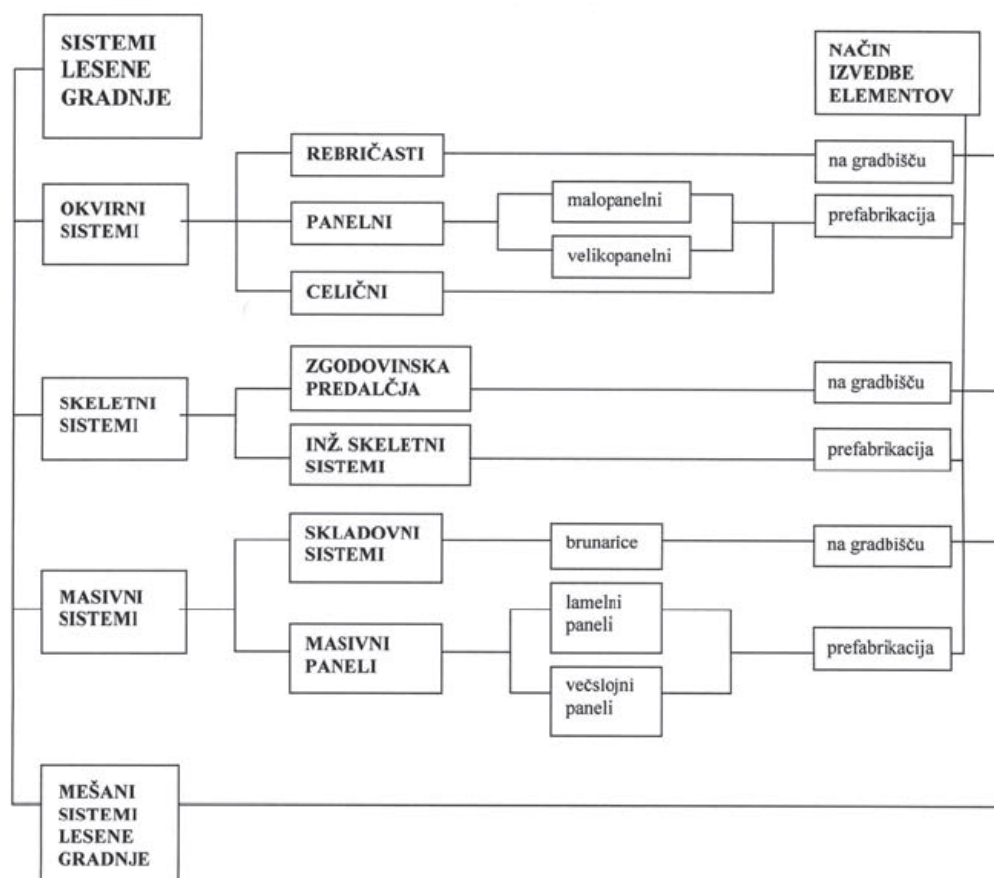
2 PREGLED OBJAV

2.1 TIPI LESENE GRADNJE

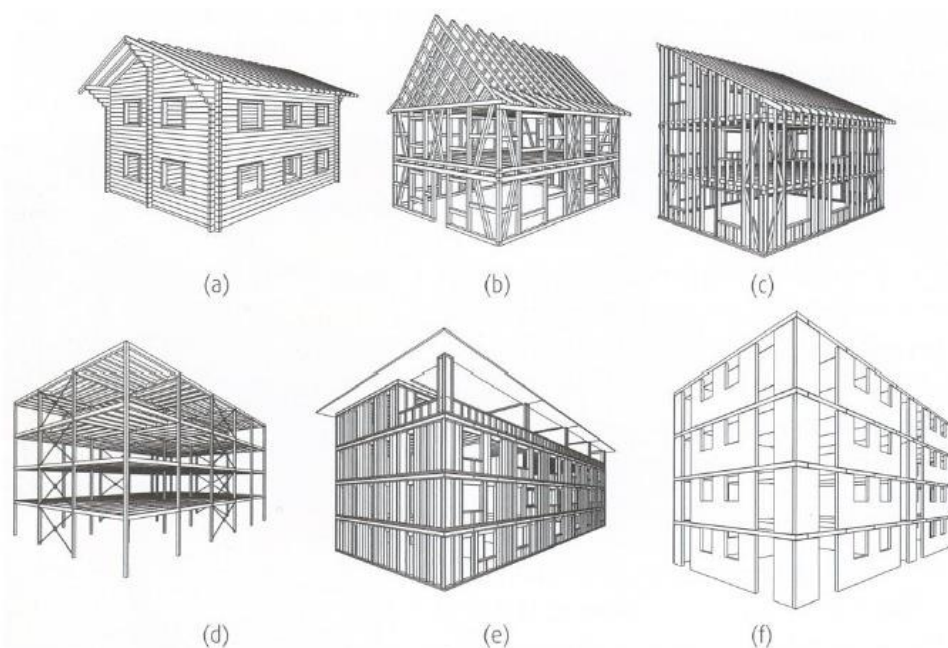
V leseni gradnji ločimo objekte predvsem na tri glavne konstrukcijske sisteme:

- okvirni sistem z obloženimi ploščami,
- skeletni sistem in
- masivni sistem.

Sistemi lesene gradnje in način izvedbe elementov so shematsko prikazani na **Sliki 2-1**, na **Sliki 2-2** pa je prikazano nekaj primerov.



Slika 2-1: Sistemi lesene gradnje in način izvedbe elementov (Boršič, 2004)



Slika 2-2: Primeri izvedbe lesenih konstrukcij: a) kladna oz. brunasta, b) predalčna, c) steberna, d) okvirna, e) panelna, f) masivna (Lopatič, 2008)

2.1.1 Okvirna konstrukcija

Pri okvirni konstrukciji (Kitek Kuzman in Dujič, 2011) so stenski elementi sestavljeni iz lesenih okvirjev (stebrov in prečk) različnih dimenzij. Na zunanjo in notranjo stran okvirjev so nameščene plošče (mavčno kartonske plošče, mavčno vlaknene plošče, iverne plošče, lesno cementne plošče, plošče iz lesnih vlaken, lesne plošče z orientiranimi vlakni, vezane plošče). Vmesni prekat med ploščami je zapolnjen s toplotno izolativnimi materiali. Uporabi se lahko mineralna, steklena ali kamena volna ali pa okolju prijaznejši naravni materiali kot na primer celuloza, volna, kokos, konoplja ali bombaž. Stropno konstrukcijo sestavljajo leseni stropni nosilci različnih dimenzij z obojestransko oblogo iz plošč ter izolacijo večje gostote (mineralna volna). Ker taka konstrukcija spada med lažje, je treba preprečiti prenos udarnega zvoka, zato se izvede plavajoči cementni estrih za boljšo zvočno izolacijo. Objekti izvedeni v okvirni konstrukciji so najbolj razširjeni v Sloveniji, saj elemente izdelajo že v proizvodnji in jih na terenu samo še sestavijo.

2.1.2 Skeletna konstrukcija

Lesena skeletna konstrukcija je grajena iz lepljenega in dolžinsko spojenega lesa. Konstrukcijo sestavljajo leseni pokončniki na določenem rastru in prečnik, ki so med seboj povezani z natančnimi spoji in vijaki. Stene ne prevzemajo nosilne funkcije v smislu prenosa vertikalne obtežbe, zato so možne svobodnejše zasnove. Nad ali med primarne nosilne elemente se polagajo sekundarni nosilni elementi, npr. stropovi. Obremenitve se prenašajo preko nosilcev na stebre in so neodvisni od prefabriciranih elementov iz lesa ali stekla, ki zapirajo prostor. Večinoma ostanejo vidni in tako poudarijo leseni skelet. Pogoste so kombinacije skeletne nosilne konstrukcije s steklenimi polnili in polnimi elementi, ugotavljata Kitek Kuzman in Dujič (2011).

2.1.3 Masivna lesena konstrukcija - polna konstrukcija

Pri masivni leseni gradnji ločimo dva tipa izvedbe in sicer konstrukcijo iz lesenih brun ter konstrukcije iz lepljenih lesenih elementov. Stene so navadno enostransko obložene z izolacijo in ploščami, mogoča pa je tudi izvedba brez obloge, kjer je stena iz vidnih brun, tramov ali plošč iz dezintegriranega lesa. Zunanje stene so lahko zaščitene z oblogo iz lesa ali z ometom ali obzidane s fasadno opeko. Fasada je lahko montažna (prezračevana) ali kontaktna, kar je odvisno od vrste izolacije oz. fasadnega sistema. Stropne konstrukcije so navadno masivne lesene lepljene plošče ali stropni nosilci z obojestransko oblogo iz plošč in polnilom (Kitek Kuzman in Dujič, 2011).

2.1.4 KLH - konstrukcije

V zadnjem obdobju se vse več izvajajo inovativne lesene masivne konstrukcije iz križno lepljenih lesenih masivnih plošč (Kitek Kuzman in Dujič 2011), ki imajo bolj enakomerne in boljše mehanske ter deformacijske lastnosti kot konstrukcijski elementi iz masivnega in enosmerno lepljenega lesa predvsem v smeri pravokotno na vlakna lesa. Križno lepljene elemente sestavljajo križno zložene lesene lamele oz. deske, ki so pod visokim pritiskom ploskovno zlepljene v večji masivni element. Za osnovno surovino se uporablja tehnično suh les iglavcev. Križno lepljenje omogoča obojesmerno nosilnost lesenih ploskovnih elementov, povečuje nosilnost in preprečuje cepitev v smeri pravokotno na vlakna lesa, poleg tega pa zagotavlja dimenzijsko stabilnost plošč, kar pomeni, da je delovanje lesa (krčenje, nabrekanje) zmanjšano na zanemarljivo vrednost. Zaradi križno orientiranih lamel lahko elementi obtežbo prenašajo v dveh pravokotnih smereh, kar omogoča njihovo uporabo tako za stenske kot stropne elemente. Hkrati se XLam plošče lahko uporabljajo kot nosilni in nenosilni elementi in dopuščajo možnost kombiniranja z jeklom, steklom in vsemi ostalimi tradicionalnimi gradbenimi materiali, s čimer ponujajo največjo možno svobodo v arhitekturi. Rezultat tega inovativnega materiala je v zadnjem času vse večje pojavljanje večnadstropnih stavb kot na primer devetnadstropni objekt Stadthaus v Londonu ali pa desetnadstropna stanovanjska stavba Forté v Melbourneu.

2.1.5 Zastopanost konstrukcij v Sloveniji

Nove projektanske rešitve, nove tehnologije lesene gradnje ter vse večja priljubljenost lesa kot gradbenega materiala omogočajo prodor in izvedbo zahtevnejših in večjih lesenih stavb tudi v slovenskem prostoru. Tako so pri gradnji lesenih montažnih hiš zastopani vsi trije glavni leseni konstrukcijski sistemi, pri čemer prevladuje lesen okvirni sistem, ki je glede na uporabo lesa optimalen, s tem pa je cena lesene konstrukcije tudi najnižja, ugotavljata Kitek Kuzman in Dujič (2011).

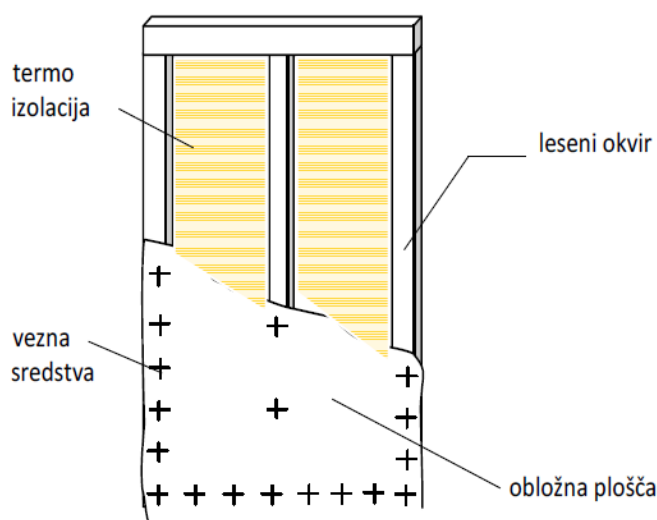
Les je pogosto povezan z lahkimi konstrukcijami, predvsem kot gradbeni material. Gradnja z lesom je pomemben del infrastrukture na številnih področjih po vsem svetu. Dobro zgrajena lesena konstrukcija se dobro obnaša pod vplivi vetra in zlasti potresne sile. Danes se najbolj obnesejo stavbe grajene iz okvirne konstrukcije. Raziskave, predstavljene v 80. letih prejšnjega stoletja, so spodbudile porast stavb tipa lesene okvirne konstrukcije po vsem svetu. Sorodna, konkurenčna področja gradbeništva se zavedajo, da je sodobna lesena

okvirna hiša zelo cenjena in sposobna zadovoljevati stanovalce in okolje, v katerem je postavljena. Obstaja veliko argumentov za gradnjo stanovanjskih zgradb z leseno okvirno konstrukcijo, najpomembnejše pa so dobre gradbene fizikalne lastnosti, vgrajeni materiali so okolju prijazni in imajo malo vgrajene sive energije ter so dobro potresno odporne. V dobro izoliranem objektu prihranimo veliko energije za ogrevanje, kar je okolju prijazno. Tudi stanovalci imajo zelo dober občutek bivanja v teh hišah, saj so v takih zgradbah najbolj uporabljeni naravni materiali, kot na primer les in mavčne plošče. Odlikuje jih tudi hitra izgradnja, saj je veliko delov prefabriciranih v tovarnah (Premrov in Kuhta 2009).

Obstajajo trije glavni gradbeni sistemi prefabriciranih montažnih stanovanjskih lesenih stavb:

- prefabricirani masivni sistemi s križno lepljenimi panelnimi stenami,
- balon sistemi in
- leseni okvirni sistemi.

Mi se bomo bolj posvetili lesenim okvirnim sistemom, kjer osnovno vertikalno obtežbo nosijo panelne stene, sestavljene iz nosilnega lesenega okvirja obloženega s ploščami, ki povečajo togost, ki pa je predvsem odvisna od razporeditve in števila veznih sredstev po obodu plošče (jeklenih sponk, žbljev, vijakov...). Med plošče se vstavi izolacijski material, kot je prikazano na **Sliki 2-3**, da zagotavlja energijsko učinkovitost stene. Stene imajo že tudi vgrajena okna in vrata v tovarni in se jih take prepelje na samo mesto vgradnje. Gradnja poteka sistematično nadstropje za nadstropjem. Ko so stene integrirane v tla, se začne postavljati platformo za tla naslednjega nadstropja. Zato je tak sistem uporaben tudi za večnadstropno gradnjo.



Slika 2-3: Tipika sestava stenskega elementa (Kozem Šilih, 2012)

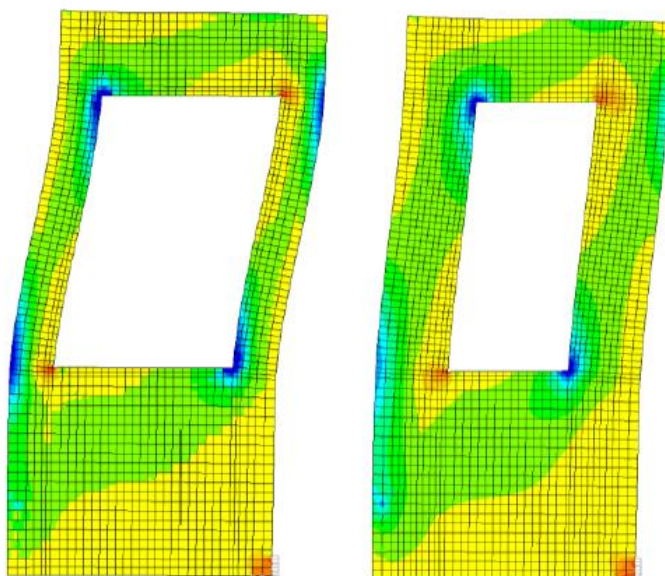
2.2 MONTAŽNI STENSKI ELEMENTI

Montažni stenski elementi so sestavljeni iz panelnih sten tipskih širin 125 cm in višin 250 do 265 cm, navaja Kozem Šilih (2012). Sestavljeni so iz glavnega nosilnega lesenega okvirja, ki ima ponavadi tri stebričke tipskih dimenzij ter dve ali tri grede, pritrjene na stebričke. Na statično in dinamično obnašanje ter nosilnost tovrstnih konstrukcij vplivata predvsem dva parametra:

- nosilnost panelnih sten, kot osnovnih gradbenih in nosilnih elementov in
- medsebojna povezanost med panelnimi elementi, predvsem pri stikovanju v vertikalni smeri.

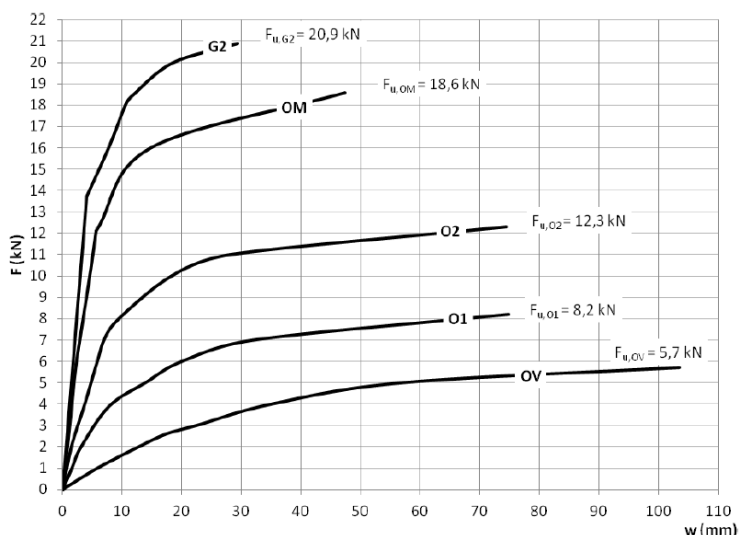
Lesen okvir prenaša vertikalno obtežbo ter večinski delež horizontalne obtežbe (Kozem Šilih, 2012). Na eni ali obeh straneh je obdan z obložnimi ploščami, ki služijo predvsem za horizontalno stabilnost oz. prenos horizontalnih spremenljivih obtežb, na primer zaradi vetra ali potresa. Na lesen okvir so pritrjene z veznimi sredstvi, običajno sponkami. Razmik med veznimi sredstvi je po priključnih ravninah konstanten (običajno 75 mm), le v srednjem stebričku je dvakrat večji kot v krajnih stebričkih. Obložne plošče so lahko mavčne (MVP - mavčno vlaknene plošče), ki jih uporabljajo predvsem v Evropi ali iz predelanega lesa (iverne plošče, furnirne plošče, OSB - oriented strand board plošče), ki jih uporabljajo bolj v Severni Ameriki. Mavčne plošče so bistveno manj duktilne kot OSB plošče (duktilnost je lastnost materiala, da prenese plastično deformacijo, ne da bi se zlomil), njihova natezna trdnost je majhna. Obložne plošče so z mehanskimi veznimi sredstvi pritrjene na lesen okvir, zato jih lahko obravnavamo kot sovprežni sistem. Razdelitev obremenitve je zato odvisna od medsebojnega razmerja togosti plošč in okvirja. Ker lahko upogibno trdnost celotnega sovprežnega prereza zapišemo kot vsoto togosti lesenega okvirja in obložnih plošč, je porazdelitev obremenitve v precejšnji meri odvisna od koeficienta togosti mehanskih veznih sredstev, s katerimi so plošče pritrjene na okvir, kot navaja Kozem Šilih (2012).

Ker je natezna trdnost plošč manjša kot trdnost lesa okvirja, plošče predstavljajo šibkejši del panela. Seveda pa morajo imeti v stanovanjski gradnji zidovi tudi dovolj odprtín za vrata in okna, kjer se pojavljajo natezne napetosti in povzročijo posledično zmanjšanje nosilnosti in vodoravne togosti stene. Koncentracije napetosti se pojavljajo predvsem v kotih odprtín (prikazano na **Sliki 2-4**) in lahko pripeljejo do poškodb materialov.



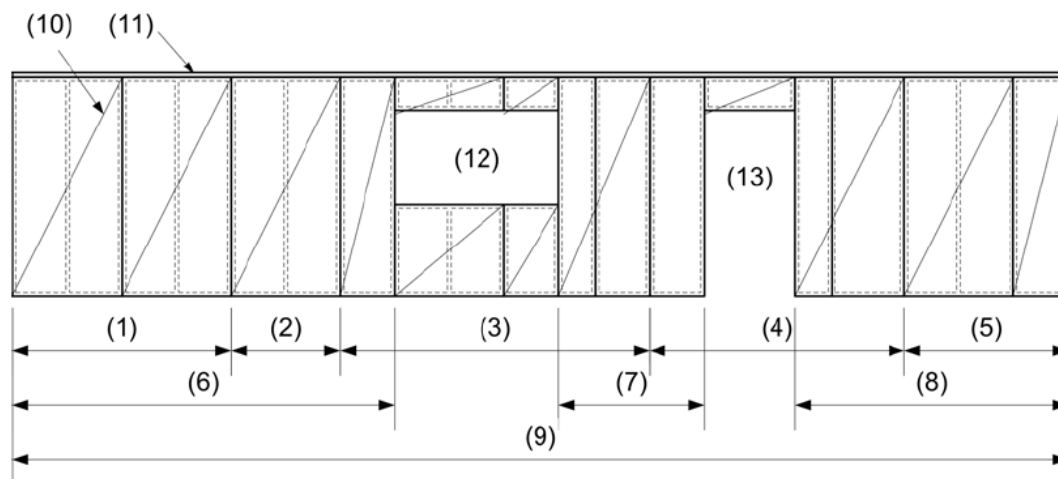
Slika 2-4: Modro obarvana področja prikazujejo povečanje koncentracije nateznih napetosti v okolici odprtin pri MVP obložni ploči (Kozem Šilih, 2012)

Zanimivo pa je, da se s povečevanjem površine odprtine, povečuje razmerje med končno nosilnostjo in nosilnostjo pri nastanku poškodb (prikazano na **Sliki 2-5**). To nakazuje, da imajo paneli z večjimi odprtinami višjo stopnjo duktilnosti, vendar pa je končna nosilnost (porušitev) nižja.



Slika 2-5: Prikaz razmerja med silo (F v kN) in pomikom panelov (W v mm) brez odprtine (G2) in panelov z vse večjimi odprtinami (OM, O2, O1, OV) (Kozem Šilih, 2012)

V standardu za projektiranje lesenih konstrukcij se za računsko analizo uporabljata dve poenostavljeni metodi, poimenovani A in B (EN 1995-1-1). V metodi A se vzame računski model brez upoštevanja obložnega materiala, kar pomeni, da je pokončnik (navpični element) z veznim sredstvom neposredno pritrjen na spodnjo konstrukcijo in naj bi popustil pred obložno ploščo. Pri metodi B pa se delno upošteva tudi sovprežnost med lesnim okvirjem in obložnim materialom in je bolj primerna za našo raziskavo.



Slika 2-6: Prikaz obravnave panelnih zidov po kosih (1-5: stenski panel 1-5, 6-8: stena 6-8, 9: sestav več sten, 10: plošča, 11: zgornji veznik, 12: okno, 13: vrata) (EN 1995-1-1)

Povzeto po računskem modelu evropskega standarda za projektiranje stavb in nizkih gradenj Eurocode 5 (EN 1995-1-1) lahko panelne zidove obravnavamo po kosih, kot je prikazano na **Sliki 2-6**. Širina panela mora znašati vsaj četrtno višine panela. Plošče morajo biti pritrjene z lesnimi vijaki ali žebli in razdalje med njimi morajo biti povsod enake po obodu. Pri metodi B, ob predpostavki, da steno sestavlja več panelov, je treba zadostiti naslednjim zahtevam:

- zgornji rob posameznega panela se mora stikati z naslednjim ali pa mora stik prekrivati nek drug konstrukcijski element,
- preverjena mora biti trdnost vertikalnega stika med dvema paneloma, projektna nosilnost mora znašati vsaj 2,5 Kn/m,
- preprečena mora biti prevrnitev, zdrs panela, ki jo dosežemo s sidranjem ali stalno navpično obtežbo oz. kombinacija obojega.

Projektno nosilnost $F_{v,Rd}$ za prevzem horizontalne obtežbe v ravnini stene za sestav več sten je treba določiti po enačbi (1):

$$F_{v,Rd} = \sum F_{i,v,Rd} \quad \dots(1)$$

kjer je:

$$F_{i,v,Rd} \quad \text{projektna nosilnost stene pri horizontalni obtežbi}$$

Projektno nosilnost stene i pri horizontalni obtežbi $F_{i,v,Rd}$ pa po enačbi (2):

$$F_{i,v,Rd} = \frac{F_{f,Rd} \times b_i}{s_0} \times k_d \times k_{i,q} \times k_s \times k_n \quad \dots(2)$$

kjer je:

$F_{f,Rd}$ projektna bočna nosilnost posameznega veznega sredstva

b_i dolžina stene

s_0 osnovna razdalja med veznimi sredstvi

k_d faktor vpliva dimenzij stene

$k_{i,q}$ faktor vpliva enakomerne obtežbe pri steni i

k_s faktor razporeditve veznih sredstev

k_n faktor vpliva materiala obložnih plošč

Vrednosti faktorjev k_d , $k_{i,q}$, k_s in k_n se izračunajo po dodatnih enačbah, za nas je zanimiv faktor k_n (vpliv materiala obložnih plošč), ki znaša (3):

- 1,0 za enostranske obloge
- $\frac{F_{i,v,Rd,max} + 0,5 \times F_{i,v,Rd,min}}{F_{i,v,Rd,max}}$, za obojestranske obloge ...(3)

kjer je:

$F_{i,v,Rd,max}$ projektna nosilnost za prevzem vodoravne obtežbe v ravnini stene za močnejšo obložno ploščo

$F_{i,v,Rd,min}$ projektna nosilnost za prevzem vodoravne obtežbe v ravnini stene za šibkejšo obložno ploščo

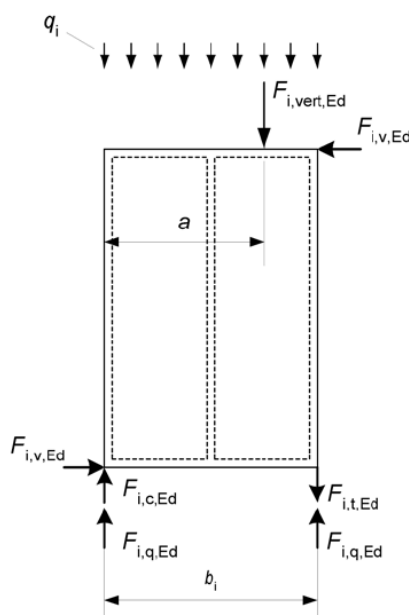
Ekvivalentno vertikalno obtežbo q_i (4), s katero izračunamo faktor $k_{i,q}$, je potrebno določiti skupaj s stalno obtežbo, celotno obtežbo vetra ter ekvivalentne obtežbe zaradi točkovnih in sidrskih sil, ki delujejo na panel. Za izračun faktorja $k_{i,q}$ je treba vertikalne točkovne sile pretvoriti v ekvivalentno enakomerno obtežbo ob predpostavki, da je stena eno samo togo telo in da sila $F_{i,vert,ed}$ deluje na steno tako kot je prikazano na **Sliki 2-7**:

$$q_i = \frac{2 \times a \times F_{i,vert,Ed}}{b_i^2} \quad \dots(4)$$

kjer je:

a vodoravna razdalja med silo F in nasprotnim vogalom stene

b dolžina stene



Slika 2-7: Določitev ekvivalentne vertikalne obtežbe q_i in reakcij zaradi vertikalne in horizontalne obtežbe (EN 1995-1-1)

Zunanje sile $F_{i,c,Ed}$ in $F_{i,t,Ed}$, kot posledica vodoravne obtežbe $F_{i,v,Ed}$ na steno i , se določi z enačbo (5):

$$F_{i,c,Ed} = F_{i,t,Ed} = \frac{F_{i,v,Ed} \times h}{b_i} \quad \dots(5)$$

kjer je:

h višina stene

$F_{i,c,Ed}$ projektna tlačna reakcija na koncu stene

$F_{i,t,Ed}$ projektna natezna reakcija na koncu stene

$F_{i,v,Ed}$ projektna horizontalna sila na steno

Te zunanje sile se lahko prenesejo na sosednji panel preko navpične zveze med paneli ali pa na spodnjo oz. zgornjo konstrukcijo. Če se natezne sile prenašajo na spodnjo konstrukcijo, mora biti panel sidran s togimi veznimi sredstvi.

Evrokod 5 omenja še eno metodo in sicer metodo sovprežnega modela. Sicer se upošteva kot obložno ploščo mavčno vlakneno ploščo, kjer je ta vsekakor kritični del panela. Zaradi bistveno manjše natezne trdnosti, se porušitev pojavi v plošči kot posledica horizontalnih sil, ki delujejo na panel. Evrokod 5 enačbe za izračun karakteristične horizontalne sile, pri kateri nastane v obložni plošči razpoka, ne podaja. Vrednost $F_{cr, k}$ (6) sta definirala Premrov in Dobrila (2008) glede na natezno trdnost in modul elastičnosti mavčno vlaknene plošče po enačbi:

$$F_{cr, k} = \frac{M_{y, cr}}{h_{MVP}} = \frac{2 \times f_{t, 0, k}^{MVP} \times (El_y)}{E_{MVP} \times b \times h_{MVP}} \quad \dots(6)$$

kjer je:

$F_{cr, k}$ sila, pri kateri nastane prva razpoka v obložni plošči

$M_{y, cr}$ moment, pri katerem pride do plastifikacije veznega sredstva ter razpoke

h_{MVP} višina mavčno vlaknene plošče

$f_{t, 0, k}^{MVP}$ karakteristična natezna trdnost mavčno vlaknene plošče

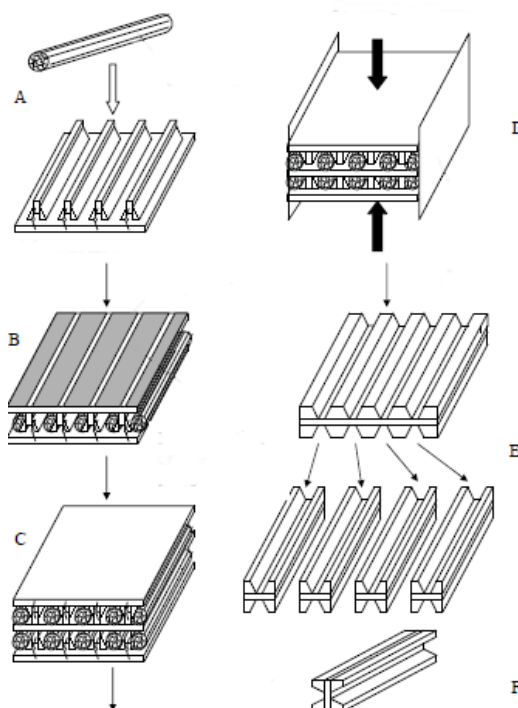
El_y efektivna upogibna togost nosilca sovprežnega prereza z mehanskimi sredstvi (v Evrokodu 5 se izračuna po γ metodi)

E_{MVP} modul elastičnosti mavčno vlaknene plošče

b širina obložne plošče

2.3 UPORABA PLOŠČ ZA IZDELAVO I-NOSILCA

I nosilec je nosilec v obliki črke I. Horizontalna elementa imenujemo pasnici, vertikalnemu pa stojina. Navadno so izdelani iz kovine, v zadnjem času pa se vse bolj uporabljajo tudi kompozitni. Njihova uporaba narašča in spadajo med inovativnejše konstrukcijske elemente. Uporabljajo se pri montažni gradnji, sanacijah ali pa zgolj v primeru premoščanja velikih razpetin. Stojina prenaša strižne sile, pasnici pa tlačne oz. natezne. Prikaz primera izdelave I nosilcev je na **Sliki 2-7**.



Slika 2-8: Prikaz izdelave I nosilca (Ashraf in sod., 2003)

Ashraf in sod. (2004) so izdelali I nosilce, pri čemer so uporabili dolge zlepljene iveri za pasnice in MDF (medium density fibreboard) oz. iverno ploščo kot stojino. V posebno izdelane kalupe (**Slika 2-7-A**) so vstavili dolge iveri, dodali lepilo (**Slika 2-7-B**), jih zaprli s zgornje in spodnje strani (**slika 2-7-C**) ter v enem ciklu vročega stiskanja (**Slika 2-7-D**) izdelali serijo nosilcev (**Slika 2-7-E**). Nato so jih razžagali kot prikazuje zgornja slika (**Slika 2-7-F**). Njihov cilj je bil tehnično preveriti način izdelave in stiskanja nosilcev ter ustreznost dolgih iveri kot materiala za pasnice v kombinaciji z MDF ali iverno ploščo. Nato jih je zanimalo, kako se bo po vročem stiskanju obnašal material za pasnice in pa osnovne lastnosti izdelanih nosilcev. Pri upogibnem testu so prišli do zaključka, da nosilci z gostejšim materialom za pasnice dosegajo boljšo upogibno trdnost. Razlog temu je boljša zlepljenost pri gostejšem materialu, kar se izraža tudi pri poružitvah nosilcev, ki so počili prav v stiku med pasnico in stojino. Razpoka se je začela med pasnico in stojino, sledila pa je pri nekaterih vzorcih porušitev v sredini stojine. To nam nakazuje, da se takoj, ko popusti vez med stojino in pasnicama, sila prenese na stojino, v njej se pojavijo strižne napetosti, ki

na kraju privedejo do strižne porušitve stojine. Najbolj se je to odražalo pri ivernih ploščah, saj sta se tako porušila kar dva vzorca od petih, razlog pa je v njeni nižji gostoti na površini, zato hitreje popusti lepilna vez med pasnico in stojino. Ugotovljeno je bilo tudi, da je temperatura in tlak stiskanja malce poslabšala lastnosti iverne plošče (MOE – modul elastičnosti je padel za 14 %, MOR – upogibna trdnost za 12 %) manj pa lastnosti MDF plošče.

V zadnjem, 4. delu raziskave, so Ashraf in sod. (2006) MDF plošči (ciljna gostota $0,73 \text{ g/cm}^3$) in iverni plošči ($0,82 \text{ g/cm}^3$) za primerjavo dodali še OSB – ploščo z usmerjenimi vlakni ($0,72 \text{ g/cm}^3$) ter vezano ploščo ($0,73 \text{ g/cm}^3$), vse debeline 9 mm. Ugotovljeno je bilo, da uporaba OSB ali vezane plošče kot stojine pomembno ne izboljša končnih upogibnih lastnosti nosilca, kot je naše teoretično prepričanje. S tem je bil cilj raziskave dosežen in obeta uporabo iverne plošče v namene stojine v I nosilcu, predvsem zaradi njenih dobrih strižnih lastnosti. Gostota pasnice $0,6 \text{ g/cm}^3$ (CR – faktor stisljivosti - 1,67), je bila ugotovljena kot spodnja meja, ki zagotavlja I-nosilcu uravnotežene mehanske lastnosti in dimenzijsko stabilnost pri uporabi nizke gostote iverja. Pod to mejo upogibne lastnosti I nosilca strmo padajo, nad njo pa ni zaznati bistvenega izboljšanja.

2.4 PLOŠČE

Znano je, da vrsta lesa in velikost iverja vplivata na upogibno trdnost trislojnih ivernih plošč. Namen raziskave, ki sta jo zasnovala Medved in Resnik (2003), je bil, kako velikost bukovega iverja v zunanjem sloju vpliva na upogibno trdnost ivernih plošč. Uporabila sta bukovo iverje petih različnih velikosti. Iverje je bilo oblepljeno z UF lepilom. Ugotovila sta, da upogibna trdnost narašča z naraščanjem faktorja zgostitve in prostorninske mase zunanjega sloja, kar je predvsem posledica večanja kontakta med ivermi. Z naraščanjem stopnje obljepljenosti iverja upogibna trdnost trislojnih ivernih plošč pada, kar je predvsem posledica slabše povezanosti med lepilom in ivermi.

Wong in sod. (1999) so v svoji študiji ugotavljali vpliv gostotnega profila na lastnosti iverne plošče in prišli do zaključka, da je bolj strm potek krivulje gostotnega profila primeren za gostejše plošče, bolj položen pa za plošče nižjih gostot. Gostejše plošče z visoko lokalno gostoto blizu površine imajo boljši MOE in MOR. Plošče z nizko gostoto bi v primeru strme krivulje gostotnega profila lahko imele v sredici gostoto pod spodnjo mejo kar bi privedlo, da bi se pri upogibu plošča prej strižno porušila.

Suzuki in Miyamoto (1998) sta v laboratoriju izdelala več ivernih plošč in jim spreminjala gostote in količine lepila. Vzorce ($300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$) sta testirala z nedestruktivno vibracijsko metodo, ki uporablja FFT (fast Fourier transform, metoda za digitalno procesiranje signalov, spektralna analiza) in jim določala upogibno in strižno trdnost. Modul elastičnosti in strižni modul sta naraščala z naraščajočo gostoto in količino lepila. Pri gostotnem profilu plošč sta ugotovila, da se z višanjem gostote plošče, sloj (plast) z najvišjo

gostoto formira bolj v notranjosti plošče in s tem poveča upogibno trdnost plošče. Debelinski nabrek plošč je naraščal z naraščajočo gostoto.

Oudjehane in Lam (1998) sta za potrebe svoje raziskave iskala idealno slojeno in natreseno pogačo iveri, ki naj bi imela idealno strnjene iveri brez vmesnih prostorov in število iveri na sloj naj bi bilo enako površini natresene pogače deljeno s površino posamezne iveri.

V tej nalogi smo za preizkušanje uporabili plošče, ki se jih bolj uporablja v pohištveni industriji, vendar se uporabljajo tudi v konstrukcijske namene. Iverne plošče (iverke) so izdelane iz iverja lesa ali drugih lignoceluloznih snovi, zlepljenih v ploščo s sintetičnimi lepili, toploto in tlakom. Uporablja se UF in FF lepila, pa tudi rezocianinska in izocianatna. Kot navaja Čermak (2001), zgodovina ivernih plošč sega v leto 1887, ko je Ernst Hubbard nakazal možnosti proizvodnje iverne plošče iz žagovine, vendar je šele leta 1943 Fred Fahrni rešil vse tehnološko-proizvodne probleme in pod imenom Novopan patentiral industrijski postopek proizvodnje ivernih plošč. Z razvojem sintetičnih lepil, predvsem urea-formaldehidnih, je proizvodnja ivernih plošč skokovito naraščala, posebej v Nemčiji, Švici in ZDA in v drugi polovici 20. stoletja postala osnovno tvorivo v industriji pohištva (Čermak 2001).

Po zgradbi ločimo enoslojne in trislojne plošče ter plošče z enakomernim prehodom iverja. Najbolj razširjene so trislojne plošče. Gostota plošč je v območju od 500 kg/m^3 (lahke), 500 do 800 kg/m^3 (običajne) in plošče gostot večjih od 800 kg/m^3 . Sodobni tehnološki sistemi omogočajo proizvodnjo plošč iz različnih vrst lesa, vendar so njihove fizikalne in mehanske lastnosti že vnaprej opredeljene z vsemi značilnostimi uporabljenih vrst. Najugodnejši je les iglavcev, sodobna proizvodnja pa omogoča izdelavo kakovostnih plošč tudi iz lesa trdih listavcev predvsem bukovine in hrastovine (Čermak 2001).

2.4.1 Faktorji, ki vplivajo na lastnosti iverne plošče

Raziskovanje različnih faktorjev, ki vplivajo na lastnosti iverne plošče, je pripeljalo do izboljšanje njene kvalitete. Najpomembnejši faktorji so kot navaja Kollman (1975) naslednji:

- vrsta lesa (listavci, iglavci), struktura lesa, gostota, trdota in možnost stiskanja,
- oblika in velikost delcev za izdelavo plošče,
- sestava materiala za izdelavo plošč (z lubjem ali brez),
- uporaba ne-lesnih lignoceluloznih materialov,
- tip in velikost delcev,
- metode sušenja delcev za izdelavo plošč (temperatura, čas sušenja, količina vlage po sušenju),
- tip in količina lepila (UF, FF),
- razporeditev delcev po plošči (gostotni profil), struktura plošče (enoslojna, večslojna),
- vlažnost delcev pred stiskanjem,

- pogoji kondicioniranja plošče in cikli,
- debelina plošče,
- kvaliteta površine,
- površinska obdelava in
- oblepljanje plošč.

Nemli in Colakoglu (2004) sta v svoji študiji uporabila različne obloge in tehnike lepljenja le teh na plošče ter prišla do zaključkov, da se je ploščam izboljšala upogibna trdnost in modul elastičnosti, zmanjšano pa je bilo debelinsko nabrekanje in tudi emisije formaldehida so bile manjše. Najboljše rezultate je dosegla plošča, obložena z laminatom brez stikov. Plošče z oblogo iz furnirja so dosegle boljše mehanske lastnosti in imele manjši debelinski nabrek. Plošče obložene z melaminsko folijo pa so imele manjše emisije formaldehida in manjšo toplotno prevodnost.

2.4.2 Gostota

Gostota vpliva na večino fizikalnih, mehanskih in tehnoloških lastnosti iverne plošče. Oba, Lynam (1959) in Plath (1963) sta s pomočjo poskusov pokazala, da gostota narašča proti površini plošče in pada proti sredini plošče. Višja gostota v zunanjih plasteh plošče vpliva na višjo upogibno trdnost, večjo odpornost na absorpcijo in nabrekanje ter večjo odpornost proti vžigu in gorljivosti. V večini primerov pomeni višja gostota proporcionalno tudi boljše mehanske lastnosti (absorpcija, nabrekanje, prenos tolpote, zvočna izolacija, modul elastičnosti, strižna trdnost, upogibna trdnost, torzijsko obnašanje, trdota...).

Turner in Kern (1950) sta ugotovila, da gostoto in kompaktnost plošče določa tlak v stiskalnici med vročim stiskanjem plošče, če upoštevamo tudi ostale faktorje, kot so velikost in vlažnost delcev ter količina lepila. Pri svojem poskusu sta tudi ugotovila, da s povečevanjem količine lepila (5 %, 10 %, 20 %) ob enaki želeni končni gostoti 1000 kg/m^3 potrebni tlak stiskanja pada.

Velikost in razporejenost osnovnih delcev plošč (gradnikov) bistveno vpliva na lastnosti plošče. Daljši in tanjši delci z nižjo vitkostjo in večjo specifično površino imajo boljšo stisljivost (Fan in sod. 2009).

2.4.3 Nastanek gostotnega profila

Pri ivernih ploščah je gostota neenakomerno razporejena. Gostota v sredini plošče je najnižja, maksimum pa doseže nekoliko pod površino. Gostotni profil nastane zaradi postopka natresanja, vendar pa je prisoten tudi pri homogenih ploščah. Nastane pri stiskanju plošče. Ko se vroča stiskalnica, ogreta na $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ali več zapira, se najprej segreje površina natresene preproge. Pri tem takoj začne izhajati vroča para iz površine preproge. Ta vodna para les plastificira in utrdi ter zgosti zunanja sloja. Nato mine kar nekaj sekund, odvisno od debeline plošče, da toplota prodre v sredico plošče in doseže enako plastifikacijo delcev. Med tem časom sta zunanja sloja plošče že močno zgoščena in lepilo že utrjuje (Maloney 1993).

Znano je, da je vertikalni gostotni profil (VDD) pri lesenih ploščnih kompozitih zelo pomemben dejavnik. Xu (1999) je ugotavljal teoretično povezavo med VDD in MOE pri lesenih ploščnih kompozitih. Raziskava je bazirala na prikazu VDD in MOE kot funkciji v trigonometrični obliki. Dokazal je, da obstaja linearna zveza med MOE in točko najvišje gostote pri gostotnem profilu, ki naj bi bila po njegovi raziskavi za največji MOE, približno razdalje 14 % debeline plošče stran od površine plošče proti notranjosti. MOE narašča z naraščanjem gostote.

Za plošče s povišanimi gostotami posameznih slojev se uporabljajo iveri mehkejših lesnih vrst od 300 do 500 kg/m³, kajti s tem lahko dosežemo večjo zgostitev materiala, kot s tršimi vrstami. Plošča gostote 1000 kg/m³ ima lahko faktor stisljivosti kar 2,9:1, s čimer dosežemo boljše mehanske lastnosti, predvsem pa upogibno trdnost (Maloney 1993).

Wong in sod. (1998) so ugotavljali, kako vloga vhodnega materiala (iverja) in hitrost zapiranja stiskalnice vpliva na formacijo gostotnega profila in lastnosti plošče. Ugotovili so, da višja ali nižja vsebnost vlage iverja, v različnih slojih plošče, vpliva na maksimalno gostoto v zunanjem sloju do 22 % in skoraj nič na gostoto v sredini plošče. Hitrejša zapiranje stiskalnice lahko poveča gostoto zunanjega sloja do 6 %, na srednji sloj pa ne vpliva.

V študiji sta Suzuki In Miyamoto (1998) proučevala, kako postopki izdelave vplivajo na linearni raztezek in na gostotni profil iverne plošče. Prišla sta do zaključka, da se je sloj (plast) z najvišjo gostoto ob povečevanju povprečne gostote plošče formiral bolj proti sredini plošče. Ob povečevanju količine lepila s 6 % na 12 % se je rahlo povečal tudi linearni raztezek.

V raziskavi Wonga in sod. (2003) je bil preučevan efekt gostotnega profila na upogibne lastnosti plošče s pomočjo metode končnih elementov. Izračunan modul elastičnosti kaže zanesljive rezultate, ki od eksperimentalno pridobljenih rezultatov odstopajo za manj kot 5 %. Povečevanje gostote sloja z najvišjo gostoto (peak density) je proporcionalno modulu elastičnosti, ob povečanju z 1 g/cm³ na 1,5 g/cm³ se je modul elastičnosti povečal za 9 %, kar je relativno majhna sprememba, saj naj bi po predhodni raziskavi ob povečanju z 0,7 na 1 g/cm³ modul elastičnosti zrasel za kar 48 %. Povečevanje razdalje sloja z najvišjo gostoto (peak density) z 1 mm na 2 mm od površine plošče proti notranjosti je vplivalo na zmanjšanje modula elastičnosti za 11 %. Na modul elastičnosti najbolj vpliva sprememba povprečne gostote, sledi sprememba gostote sloja z maksimalno gostoto in nato razdalja te maksimalne gostote od površine plošče.

2.4.4 Debelinski nabrek

Xu in Winistorfer (1995) sta preučevala večslojne iverne plošče in prišla do ugotovitve, da obstaja povezava med gostoto posameznega sloja in debelinskim nabrekom. Iz rezultatov sklepata, da gostejši zunanji sloj bolj nabreka kot manj gost srednji sloj, kar je posledica manj praznih prostorov, ki bi jih lahko zapolnil nabrekajoči material.

3 MATERIAL IN METODE

3.1 UPORABLJENI MATERIALI

3.1.1 Iverje

V raziskavi smo uporabili industrijsko iverje. Plošče so vsebovale mešano iverje bukovine (25 %) ter smrekovine (75 %) vlažnosti $U = 3 \%$, gostote $\rho = 0,55 \text{ g/cm}^3$.

3.1.2 Vezivo in aditivi

Uporabili smo urea formaldehidno lepilo (UF), vsebovalo je $65 \pm 2 \%$ suhe snovi. Vezivni mešanici smo dodali tudi utrjevalec (zmes vode in amonijevega sulfata v razmerju 40 g amonijevega sulfata / 160 g vode). Utrjevalec smo uporabljali samo v srednjem sloju.

Urea-formaldehidno lepilo je priljubljen predvsem zaradi nizke cene, enostavne uporabe in hitrega utrjevanja (curing). Za utrjevanje lepila je potrebna temperatura, tlak, voda in v nekaterih primerih tudi UV svetloba. Je brezbarvno in ne obarva plošče. Ima slabo odpornost proti vremenskim vplivom (vlaga), za te namene se uporabljajo fenol-formaldehidna in melamin-urea-formaldehidne smole (Maloney 1993).

3.2 PRIPRAVA PREIZKUŠANCEV IN VZORČENJE

3.2.1 Priprava preizkušancev

Preizkušance smo pripravili v laboratoriju Katedre za lepljenje, lesne kompozite in obdelavo površin na Oddelku za lesarstvo Biotehniške fakultete v Ljubljani.

3.2.2 Izdelava preizkušancev

Izdelali smo pet plošč velikosti 500 mm x 500 mm z različnimi deleži zunanega in srednjega sloja. Plošča A je bila kontrolna, s standardno recepturo in parametri izdelave, kot je prikazano v **Preglednici 3-1**. Zunanjemu sloju pri plošči B smo dodali 30 % iverja sestave srednjega sloja. Zunanjemu sloju pri plošči C smo dodali 60 % iveri sestave srednjega sloja. Srednjemu sloju plošče D smo dodali 20 % iveri sestave zunanega sloja in pa srednjemu sloju plošči E smo dodali 40 % iveri sestave zunanega sloja.

Preglednica 3-1: Receptura za pripravo kontrolne plošče A

ZUNANJI SLOJ		SREDNJI SLOJ	
	m (g)		m (g)
Iverje	844,41	Iverje	1596,97
Lepilo	132,62	Lepilo	205,21
Voda	51,27	Utrjevalec	20,93
		Voda	35,89
Σ	1028,3	Σ	1859
Zunanji sloj 1	514,15		
Zunanji sloj 2	514,15		

V stroju za oblepljanje smo oblepili iverje za vsak sloj posebej. Nato smo ga natresli v lesen okvir dimenzij 500 mm x 500 mm (na **Sliki 3-1**), ki je bil položen na natresno pločevino.



Slika 3-1: Prikaz lesenega okvira za izdelavo preizkušancev

Za vsako ploščo so si sledili sloji v izmerjenih količinah, najprej spodnji, nato srednji in nanj še zgornji. Za želeno končno debelino plošče smo uporabili dve železni letvi debeline 16 mm, ki sta nam služili kot distančnik. Iverno pogačo smo stisnili v ogrevani hidravlični stiskalnici pri temperaturi 190 °C in tlaku 90 barov. Čas stiskanja je bil 3 min, z odpiralnim časom 30 s.

Na **Sliki 3-2** sta prikazani kontrolna plošče A in plošča B, pri kateri smo zunanjemu sloju dodali 30 % iverja sestave srednjega sloja.



Slika 3-2: Prikaz preizkušancev, kontrolne plošče A in plošče B, pri kateri smo zunanjemu sloju dodali 30 % iverja sestave srednjega sloja

Plošča E se nam je pri izdelavi delno razslojila. Razlog za to je prevelika količina vhodne surovine glede na končno debelino 16 mm ter prehitro odvajanje vodne pare, čemur je zaslužen krajši čas odpiranja stiskalnice. Na nekaterih mestih je bila plošča tako deformirana, da jo nismo mogli uporabiti za mehanske teste. Odločili smo se, da uporabni del plošče čim bolj izkoristimo. Testa upogibne trdnosti po robu ter strižne trdnosti po dolžini smo izpustili, vse ostale teste pa nam je uspelo izvesti.

V **Preglednici 3-2** so predstavljene količine iveri za pripravo preizkušancev.

Preglednica 3-2: Receptura za pripravo preizkušancev

Oznaka	A	B	C	D	E
Spodnji sloj (g)	514,15	514,15+154,25	514,15+308,50	514,15	514,15
Srednji sloj (g)	1859	1859	1859	1859+371,80	1859+743,60
Zgornji sloj (g)	514,15	514,15+154,25	514,15+308,50	514,15	514,15
Natresna masa (g)	2887,3	3195,8	3504,3	3259,1	3630,9
Masa po stiskanju (g)	2762,89	3062,8	3386,8	3127,17	3500,36
Dodatek iverja na A	A	A+10,7%	A+21,4%	A+12,9%	A+25,8%
Dodatek iverja	kontrolna	30% CL v SL	60% CL v SL	20% SL v CL	40% SL v CL

3.3 ZASNOVA PREIZKUSA

Raziskava je bila zasnovana z namenom primerjave nekaterih mehanskih in fizikalnih lastnosti plošč s spremenjeno sestavo. S takimi ploščami naj bi povečali togost zgradbi oz. konstrukciji.

Danes se za oblaganje panelov največ uporabljajo materiali kot so mavčno-kartonske plošče, mavčno-vlaknene plošče, iverno-cementne in iverne plošče z usmerjenim iverjem (OSB plošče).

Za našo raziskavo smo uporabil iverne plošče. Najbolj razširjene so trislojne iverne plošče, ki smo jih uporabil tudi sami, vendar smo pri sami izdelavi spreminjali sestavo slojev.

3.4 TESTIRANJE VZORCEV

3.4.1 Merjenje debeline

Debelino plošč smo merili po standardu SIST EN 323. Debelina plošč je odvisna od uporabe, saj se s spreminjanjem debeline spreminjajo njene mehansko-fizikalne lastnosti. Iz vsake plošče smo izžagali po šest preizkušancev. Plošče so bile klimatizirane, kot velewa standard, v klimi $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 65\text{ }\%$. Debelino smo merili z mikrometrom na preizkušancih dimenzij $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \pm 0.5\text{ mm}$, na presečišču diagonal na površini plošče.

3.4.2 Debelinski nabrek in absorbcija vode

Debelinski nabrek smo določili po standardu SIST EN 317. Iz vsake plošče smo vzeli po devet vzorcev velikosti $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ in z mikrometrom izmerili debelino vsakega preizkušanca. Nato smo preizkušance potopili za 24 ur v vodo temperature $20 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{pH} \pm 7$. Preizkušanci se niso smeli dotikati sten ali dna kadi, nad njimi pa je moralo biti $25 \pm 5\text{ mm}$ vode. Razmak med vzorci in dnom je moral biti najmanj 15 mm , med seboj so morali biti ločeni. Po 24 urah namakanja smo preizkušance vzeli iz vodne kopeli, jih obrisali in ponovno izmerili njihovo debelino z mikrometrom. Tako smo dobili vse potrebne podatke za izračun debelinskega nabreka po naslednji enačbi (7):

$$G_t = \frac{t_2 - t_1}{t_1} \times 100 \quad \dots(7)$$

kjer je:

$$\begin{aligned} t_1 & \text{ debelina klimatiziranega preizkušanca [mm]} \\ t_2 & \text{ debelina preizkušanca po potopitvi v vodi [mm]} \end{aligned}$$

Izračun absorbcije vode (G_m) v % (na dve decimaliki),(8):

$$G_m = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad \dots(8)$$

kjer je:

$$\begin{aligned} m_1 & \text{ masa klimatiziranega preizkušanca [g]} \\ m_2 & \text{ masa preizkušanca po potopitvi v vodi [g]} \end{aligned}$$

3.4.3 Upogibna trdnost in modul elastičnosti

Upogibno trdnost po ploskvi smo merili s tri-točkovnim testom po standardu SIST EN 310 na stroju ZWICK Z100 (**Slika 3-3-a**). Po definiciji je to napetost pri kateri je nastopila porušitev v natezni ali tlačni coni lesenega nosilca med oporoma proti sili, ki deluje pravokotno na os nosilca. Izžagali smo 2 x 6 preizkušancev na ploščo (6 preizkušancev v smeri proizvodnje in 6 pravokotno na smer proizvodnje), dimenzij 20 kratna debelina plošče + 50 mm x 50mm (d x š). Določali smo silo loma v N pri oporiščni razdalji 20 kratne debeline plošče in času do loma 60 ± 30 s. Vsak drugi preizkušanec smo obrnili, tako da smo enkrat preizkušali zgornjo, drugič pa spodnjo stran plošče (glede na smer proizvodnje). Nato smo upogibno trdnost izmerili še po robu (**Slika 3-3-b**). Preizkušanci so imeli ponovno dimenzije 20 kratne debeline plošče + 50 mm x 50mm (d x š). Pogoji testiranja so bili enaki kot po ploskvi. Uporabili smo po tri preizkušance na ploščo.

Upogibno trdnost izračunamo v N/mm^2 po enačbi (9):

$$f_m = \frac{3 \times F_{\text{loma}} \times l_1}{2 \times w \times t^2} \quad \dots(9)$$

kjer je:

F_{loma}	<i>silna loma [N]</i>
l_1	<i>oporiščna razdalja [mm]</i>
w	<i>širina preizkušanca [mm]</i>
t	<i>debelina preizkušanca [mm]</i>

Izračun modula elastičnosti (E_m) v N/mm^2 pa izračunamo po enačbi (10):

$$E_m = \frac{l_1^3 \times (F_2 - F_1)}{4 \times w \times t^3 \times (a_2 - a_1)} \quad \dots(10)$$

kjer je:

F_1	<i>silna pri 10 % sile loma [N]</i>
F_2	<i>silna pri 40 % sile loma [N]</i>
l_1	<i>oporiščna razdalja [mm]</i>
a_1	<i>poves pri 10 % sile loma [mm]</i>
a_2	<i>poves pri 40 % sile loma [mm]</i>
w	<i>širina preizkušanca [mm]</i>
t	<i>debelina preizkušanca [mm]</i>

3.4.4 Strižna trdnost

Test strižne trdnosti po dolžini smo preizkusili po standardu SIST EN 789. Uporabili smo tri preizkušance od vsake plošče, dolžine 250 mm, širine 50 mm. Širino ter debelino smo nato natančno premerili z mikrometrom na dve decimalki natančno. Na stroju za testiranje ZWICK Z100 smo namestili primerna vpenjala za preizkus in opravili testiranje (**Slika 3-3-d**). Nato smo izvedli še testiranje strižne trdnosti po debelini. Od vsake plošče smo izžagali po štiri preizkušance in jih s posebnimi vpenjali namestili v stroj za testiranje ZWICK Z100 (**Slika 3-3-c**). Vzorci so bili dimenzij 50 mm x 50 mm, vsakega smo še natančno premerili z mikrometrom.

Strižno trdnost izračunamo po enačbi (11):

$$f_v = \frac{F_{loma}}{l_1 \times b_1} \quad \dots (11)$$

kjer je:

F_{loma}	<i>silna loma [N]</i>
l_1	<i>strižna dolžina preizkušanca [mm]</i>
b_1	<i>strižna debelina preizkušanca [mm]</i>
f_v	<i>strižna trdnost [N/mm²]</i>



a) Merjenje upogibne trdnosti po ploskvi



b) Merjenje upogibne trdnosti po robu



c) Merjenje strižne trdnosti po debelini



d) Merjenje strižne trdnosti po dolžini

Slika 3-3: Prikaz merjenja upogibne in strižne trdnosti

3.4.5 Merjenje vertikalne porazdelitve prostorninskih mas (VPPM)

VPPM smo določevali z merilnikom vertikalne porazdelitve prostorninskih mas (MGP 201), ki meri spremembo intenzitet gama žarkov pri prehodu skozi preizkušanec (Medved 2000). Za vir radioaktivnega sevanja je bil uporabljen izotop Am^{241} . Z napravo smo najprej izmerili intenziteto sevanja pri prehodu skozi zrak in nato še skozi vzorec. Čas izpostavitve je znašal 1 sekundo in iz razlike intenzitet ter gravimetrično določene prostorninske mase smo izračunali po enačbi (12) masni absorpcijski koeficient (μ):

$$\mu = \frac{\ln\left(\frac{l}{l_0}\right)}{\rho \times t} \quad \dots(12)$$

kjer je:

l	intenziteta sevanja po prehodu skozi vzorec
l_0	intenziteta sevanja po prehodu skozi zrak
ρ	širina preizkušanca [g/cm^3]
t	debelina preizkušanca [cm]

S pomočjo masnega absorpcijskega koeficienta, število impulzov na časovno enoto ter število impulzov registriranih po absorpciji gama žarkov smo v 0,1 mm debelih odsekih izračunali gostoto preizkušancev po enačbi (13):

$$\mu_{\text{odsek}} = \frac{\ln\left(\frac{l-l_B}{l_0-l_B}\right)}{\mu \times t_{\text{odsek}}} \quad \dots(13)$$

kjer je:

l	intenziteta sevanja po prehodu skozi vzorec
l_0	intenziteta sevanja po prehodu skozi zrak
l_B	intenziteta sevanja po prehodu skozi kovino (ozadje)
μ	masni atenuacijski koeficient [cm^2/g]
t_{odsek}	debelina odseka [cm]

4 REZULTATI

Preizkušali smo iverne plošče s povišano gostoto. Želeli smo ugotoviti, katero ploščo bi izbrali za specifično uporabo v konstrukcijske namene glede na mehansko-fizikalne lastnosti. Nekaterih testov nam pri plošči E ni uspelo izvesti. Plošča se nam je pri izdelavi delno razslojila, zato je bil del plošče neuporaben za testiranje.

V Preglednicah 4-1 in 4-2 je zbor podatkov, ki smo jih dobili po testiranju plošč.

Preglednica 4-1: Rezultati testov po posameznih ploščah in vrsti testa (povprečna debelina, izračunana gostota, gostota zunanega sloja, gostota srednjega sloja, gostotno razmerje slojev, faktor stisljivosti, faktor stisljivosti zunanega sloja, faktor stisljivosti srednjega sloja, nabrek, vpijanje vode)

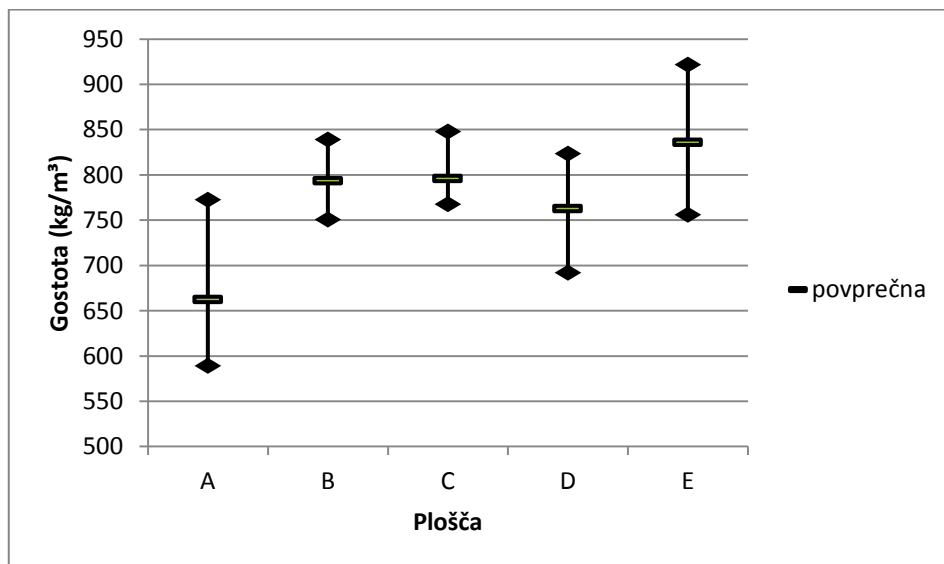
PLOŠČA	A	B	C	D	E
	KONTROLNA	30% CL v SL	60% CL v SL	20% SL v CL	40% SL v CL
t (mm)	15,4	15,7	16,3	15,9	16,3
ρ (g/cm ³) izr.	0,656	0,793	0,796	0,763	0,845
SL (g/cm ³)	0,805	0,890	0,857	0,892	0,948
CL (g/cm ³)	0,599	0,758	0,775	0,716	0,810
SL/CL	1,34	1,18	1,11	1,25	1,17
CR	1,35	1,63	1,64	1,57	1,74
CRSL	1,66	1,83	1,76	1,84	1,95
CRCL	1,23	1,56	1,59	1,47	1,67
Nabrek (%)	29,60	28,35	27,55	27,80	29,13
Vpijanje vode (%)	81,86	73,90	75,69	76,34	68,40

Preglednica 4-2: Rezultati testov po posameznih ploščah in vrsti testa (povprečna debelina, gostota izmerjena s pomočjo merilnika gostotnih profilov (VPPM), upogibna trdnost, upogibni E modul, upogibna trdnost po robu, upogibni E modul po robu, strižna trdnost, strižna trdnost po dolžini)

PLOŠČA	A	B	C	D	E
Povprečna debelina (mm)	15,4	15,7	16,3	15,9	16,3
ρ - VPPM (g/cm ³)	0,663	0,794	0,796	0,763	0,836
Upogibna trdnost (N/mm ²)	18,84	20,80	21,16	24,92	20,06
Upogib E-modul (N/mm ²)	3243	3617	3624	3928	3091
Upogib po robu-trdnost (N/mm ²)	14,90	18,77	22,07	17,37	
Upogib po robu E-modul (N/mm ²)	2422	2855	3361	2703	
Strig-trdnosti (N/mm ²)	1,99	2,50	2,77	3,60	1,97
Strig-trdnosti po dolžini (N/mm ²)	5,19	9,36	11,38	10,57	

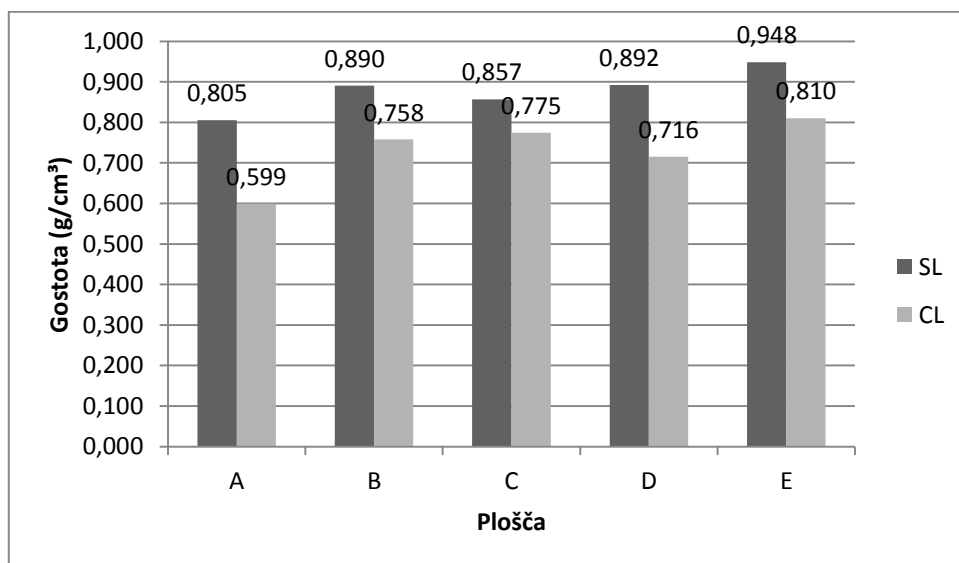
4.1 GOSTOTA IVERNIH PLOŠČ

Na **Sliki 4-1** so prikazane maksimalne, minimalne in povprečne izračunane vrednosti gostote ivernih plošč.



Slika 4-1: Maksimalne, minimalne in povprečne izračunane vrednosti gostote ivernih plošč

Kontrolna plošča A je pričakovano dosegla najnižjo gostoto. Ploščama B in C smo dodajali različno količino iverja v zunanji sloj, vendar sta dosegla precej enake gostote. To je posledica različne debeline, saj je plošča C kar za 6 mm debelejša. Plošča E ima pričakovano najvišjo gostoto. Na **Sliki 4-2** so prikazane povprečne gostote posameznih slojev (zunanji, srednji sloj).

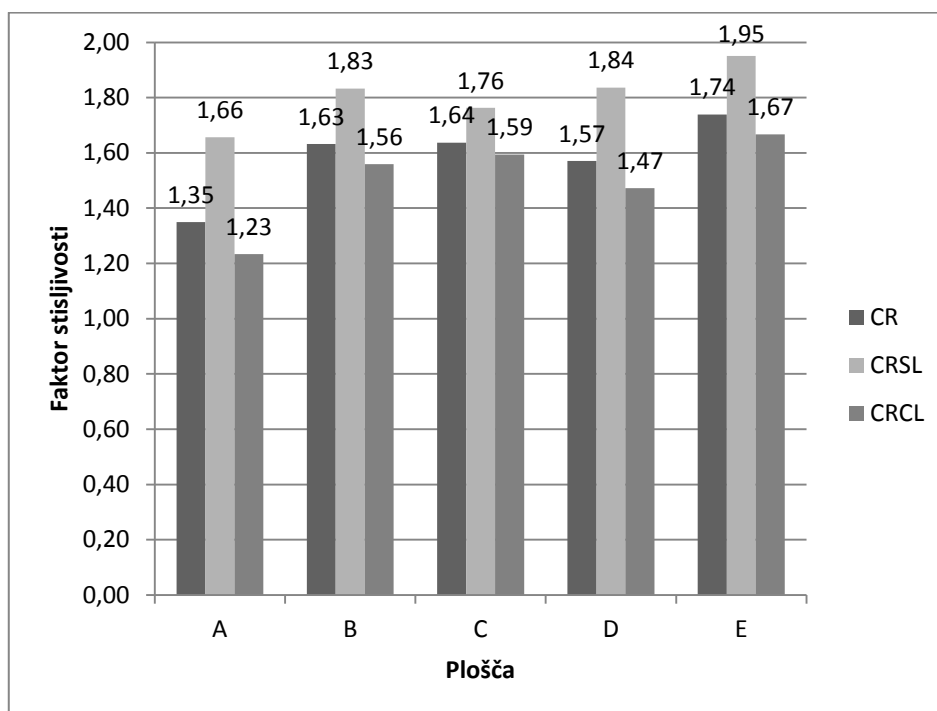


Slika 4-2: Grafični prikaz povprečnih gostot zunanjih (SL) in srednjih (CL) slojev posameznih plošč

Razmerje med srednjim in zunanjim slojem je najvišje pri plošči D, ki ima višjo natresno maso srednjega sloja kot plošči B in C. Zanimivo je, da smo tej plošči dodajali fine frakcije zunanjega sloja v srednji sloj pa vendar gostota tega sloja ni presegla srednjih slojev plošč B in C. Razlog za to je verjetno efekt povratne deformacije iveri, ki nastane po odprtju stiskalnice. Ker se lepilo v srednjem sloju še ni čisto utrdilo, so daljše iveri še prožne in se ob popuščanju tlaka stiskalnice sprostijo približno 10 % energije. Daljše iveri srednjega sloja pritisnejo na zunanji sloj, kar privede do še večje zgostitve zunanjega sloja in zmanjšanje gostote v srednjem sloju.

4.2 FAKTOR STISLJIVOSTI

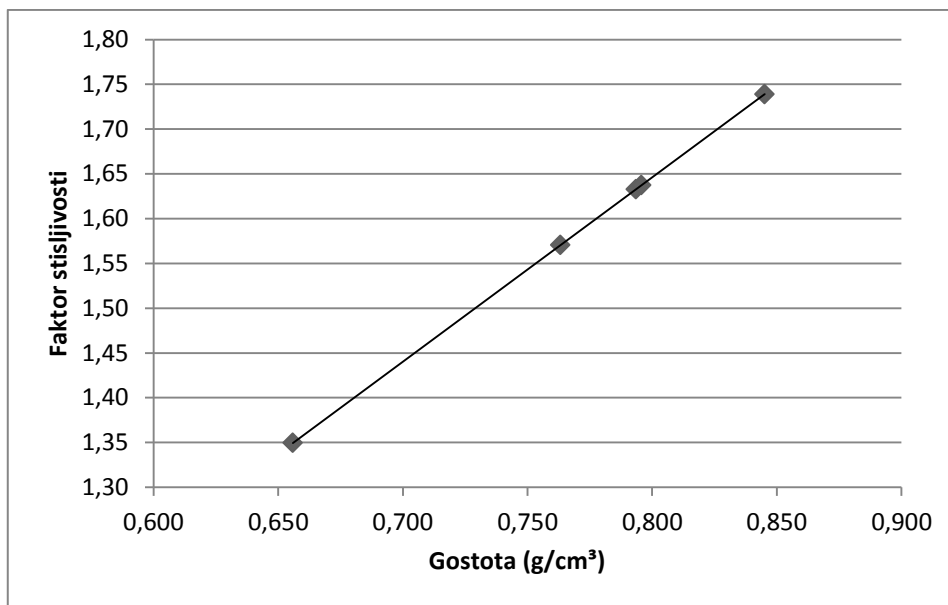
Na **Sliki 4-3** je prikazan faktor stisljivosti po posameznih ploščah.



Slika 4-3: Grafični prikaz faktorja stisljivosti plošč (CR), zunanjega sloja (CRSL) in faktor stisljivosti srednjega sloja (CRCL)

Plošče s povišano gostoto imajo večji faktor stisljivosti (CR), ki predstavlja razmerje med gostoto iverne plošče in gostoto uporabljene surovine.

Na **Sliki 4-4** je prikazano, v kakšni odvisnosti sta gostota plošče in faktor stisljivosti.



Slika 4-4: Gostota v odvisnosti od faktorja stisljivosti

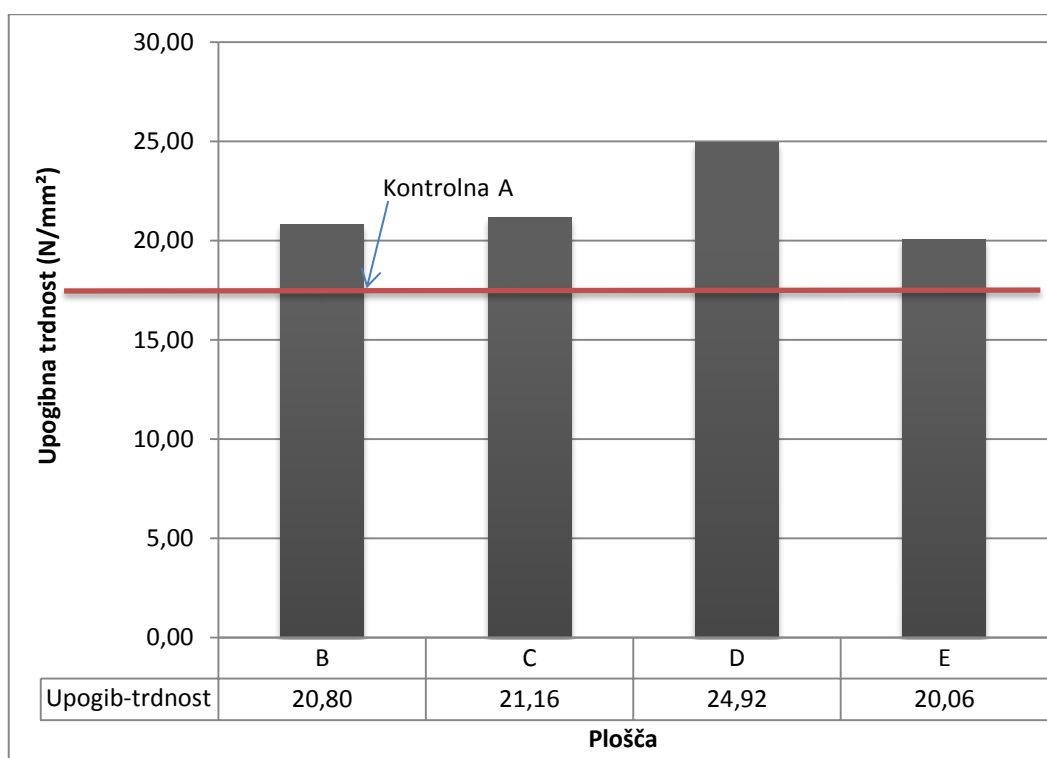
Med stiskanjem iverne plošče z višjim faktorjem stisljivosti (CR) se povečuje deformacija iveri. V tem času lahko pride do loma po celičnih stenah, nakar lepilo utrdi in prevzame funkcijo zadrževanja iveri v končnem položaju. Sposobnost zadrževanja iveri je predvsem odvisno od deleža lepila in vrste uporabljenega lepila.

Pri faktorju stisljivosti zunanjšega sloja nad 1,3 se lepilo zaradi previsokega tlaka apliciranega na iverno pogačo iztisne iz lumnov na površino iveri in v prazne prostore. Lepilo se pred utrditvijo preveč razširi po površini in ne more prodreti globlje v les, kar pomeni, da je povezanost med lepilom in ivermi minimalna.

Velikost in razporejenost osnovnih delcev plošč (gradnikov) bistveno vpliva na lastnosti plošče. Daljši in tanjši delci z nižjo vitkostjo in večjo specifično površino imajo boljšo stisljivost.

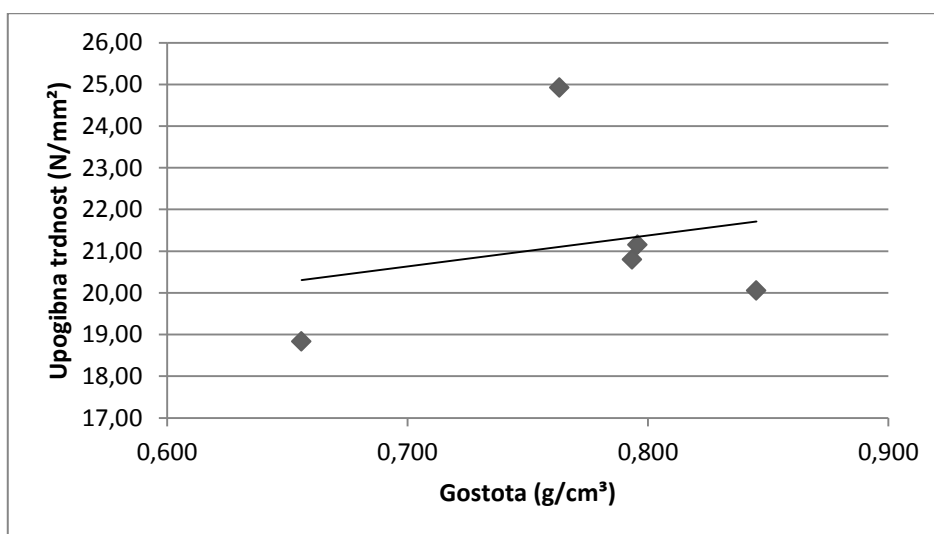
4.3 UPOGIBNA TRDNOST IN MODUL ELASTIČNOSTI

Kot vidimo iz **Preglednice 4-2** so se mehanske lastnosti plošč, kjer smo povišali gostoto posameznih slojev, izboljšale. Najvišjo upogibno trdnost ($24,92 \text{ N/mm}^2$) in pa modul elastičnosti (3.928 N/mm^2) je dosegla plošča D.

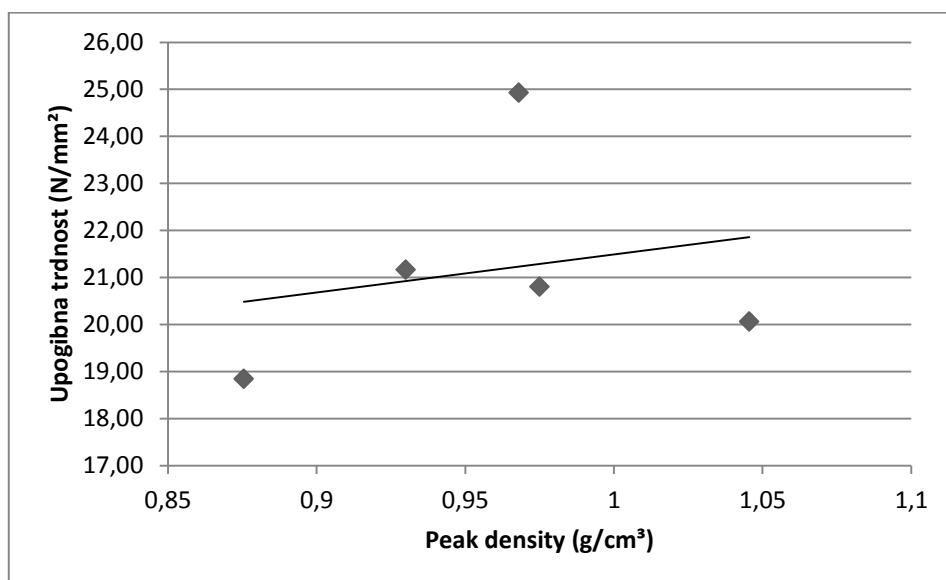


Slika 4-5: Upogibna trdnost plošč

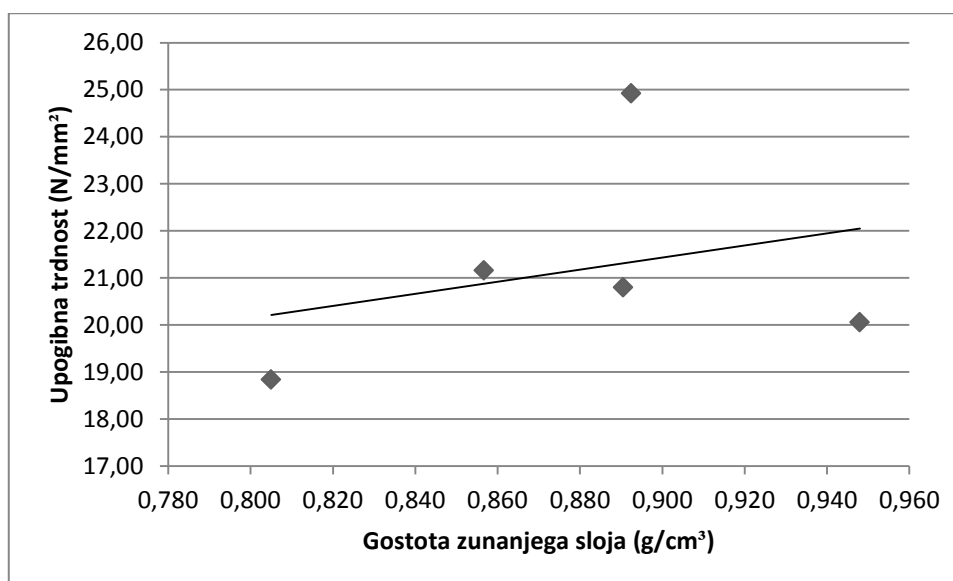
Pri upogibu se največje napetosti pojavljajo na zunanjih straneh plošče, tako je zgornji del preizkušanca obremenjen na tlak, spodnji pa na nateg, medtem ko središče plošče ni obremenjeno (nevtralna os – čisti upogib). Pri naših ploščah se to odraža v najvišji upogibni trdnosti plošče D, ki ima tudi največje gostotno razmerje med zunanjim delom in sredico **Preglednica 4-1**.



Slika 4-6: Upogibna trdnost v odvisnosti od gostote



Slika 4-7: Upogibna trdnost v odvisnosti od lokalno najvišje gostote



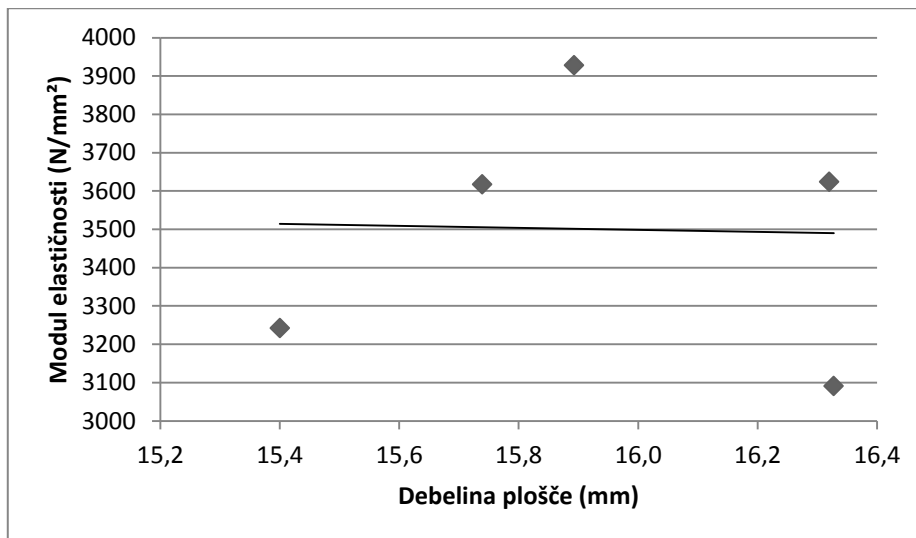
Slika 4-8: Upogibna trdnost v odvisnosti od gostote zunanjega sloja

Ker so bile naše iverne plošče sestavljene iz treh slojev, je zelo pomembna tudi gostota posameznih slojev, ki bistveno vpliva na mehanske lastnosti. Večja gostota zunanjih slojev pomeni tudi boljšo upogibno trdnost. Upogibna trdnost narašča z naraščanjem faktorja zgostitve in prostorninske mase zunanjega sloja, kar je predvsem posledica večanja kontakta med ivermi.

Modul elastičnosti materiala je deformacijski modul, ki nam pokaže razmerje med obremenitvijo in deformacijo. Višji ko je, manj se bo material deformiral. Modul elastičnosti in strižni modul naraščata z naraščajočo gostoto in količino lepila. Pri gostotnem profilu plošč se z višanjem gostote plošče, sloj (plast z najvišjo gostoto) premika proti notranjosti plošče in s tem poveča upogibno trdnost plošče.

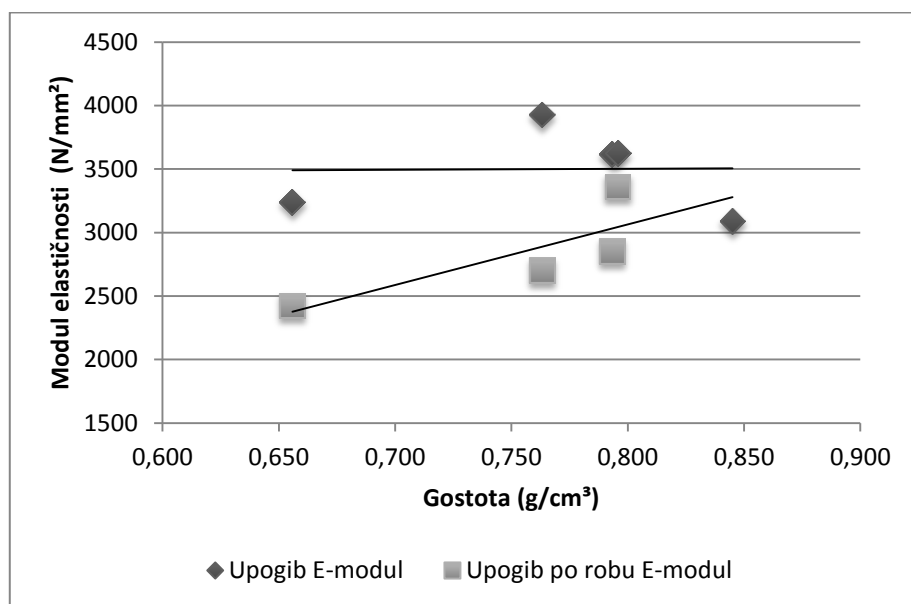
Obstaja linearna zveza med E_m in točko najvišje gostote pri gostotnem profilu, ki naj bi bila po raziskavi za največji E_m , približno razdalje 14 % debeline plošče stran od površine plošče proti notranjosti ugotavlja Xu (1999). Modul elastičnosti E_m narašča z naraščanjem gostote.

Modul elastičnosti naj bi z debelino plošč padal, vendar te korelacije ni zaznati v naši raziskavi. Nasprotno, pri ploščah A, B in C narašča, nato pada pri ploščah D in E.



Slika 4-9: Modul elastičnosti v odvisnosti od debeline plošče

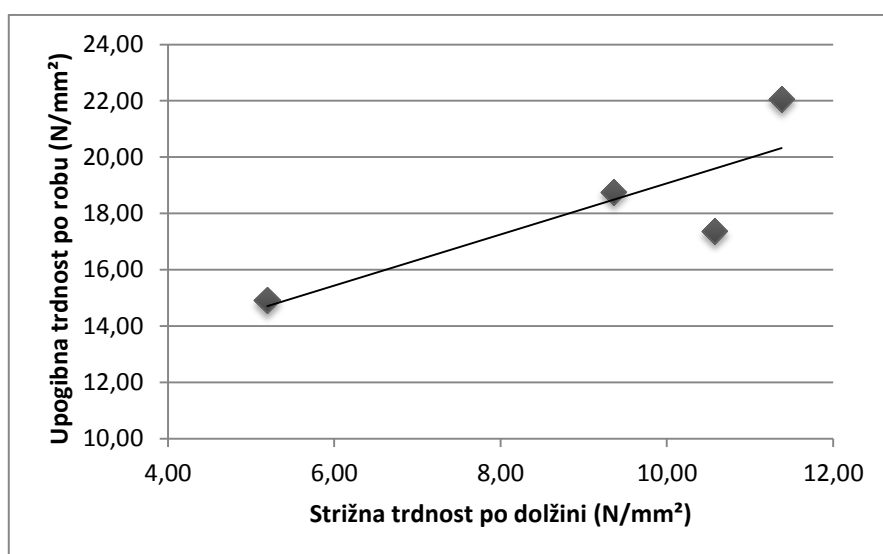
Vzrok za to, bi lahko iskali v usmerjenosti iveri, kajti pri natresanju nekaterih plošč smo lahko naključno usmerili iveri vzdolžno kar izboljša mehanske lastnosti.



Slika 4-10: Gostota v odvisnosti od modula elastičnosti

4.4 UPOGIBNA TRDNOST PO ROBU IN STRIŽNA TRDNOST PO DOLŽINI

Najvišjo upogibno trdnost po robu je dosegla plošča C, ki je imela tudi največjo debelino. Imela je najenakomernejšo, homogeno sestavo, razlika gostot zunanjih in notranjega sloja je bila najmanjša. To lahko vidimo na grafu gostotnega profila na **Sliki 4-16**. Plošči C smo dodali tudi največ delcev srednjega sloja v zunanji sloj, zato predpostavljamo, da bolj enakomerna razporeditev večjih delcev po celotnem preseku, prispeva k boljši upogibni trdnosti po robu. Strm gradient gostote pri ploščah z nizko gostoto povzroča strižno porušitev vzorca, še preden se poruši pri upogibnem testu, torej zelo zmanjša upogibno trdnost (Kawai in Sasaki 1986).

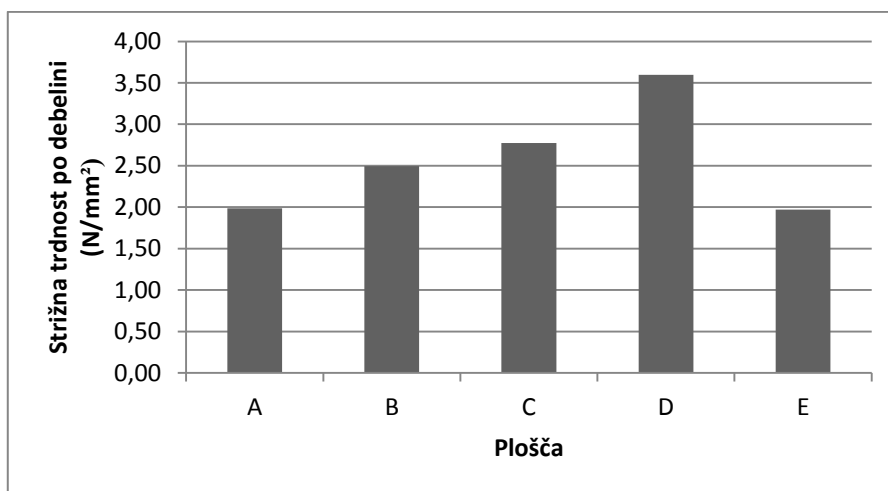


Slika 4-11: Upogibna trdnost po robu v odvisnosti od strižne trdnosti po dolžini

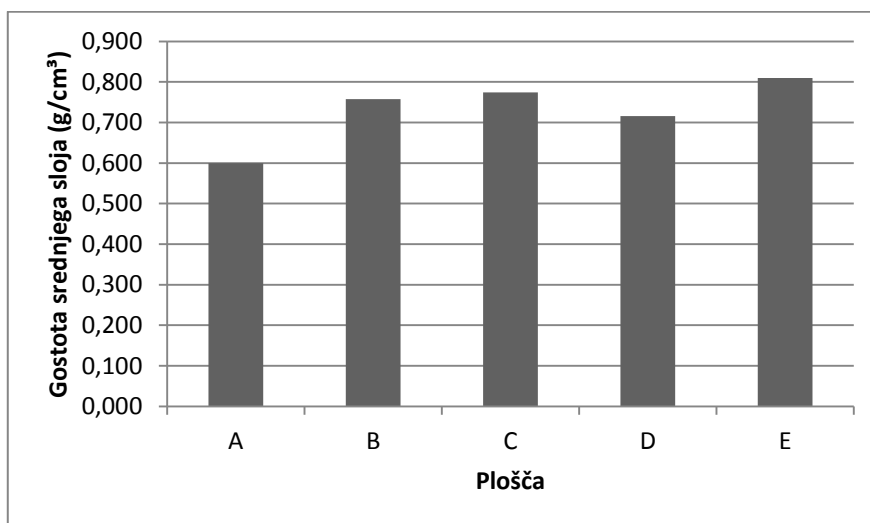
Do podobnih zaključkov pridemo tudi pri strižni trdnosti po dolžini, kjer prav tako plošča C dosega najvišje vrednosti zaradi svoje enakomernejše sestave. Na **Sliki 4-10** vidimo, kako z naraščajočo upogibno trdnostjo po robu narašča strižna trdnost po dolžini. Tako soodvisnost lahko pripišemo dejstvu, da je preizkušanelec v obeh primerih obremenjen v isti smeri. Prav tako se napetosti začnejo pojavljati v istem delu (ravnini) preizkušanca in tudi porušitev se pojavi na skoraj enakem mestu.

4.5 STRIŽNA TRDNOST PO DEBELINI

Pri testu strižne trdnosti po debelini so se vsi preizkušanci porušili v srednjem delu plošče, torej je strižna trdnost po debelini odvisna predvsem od gostote v sredici. Pri naši raziskavi te povezave pri vseh ploščah ni bilo možno zaznati, saj smo spreminjali tudi sestavo posameznih slojev. Najvišjo strižno trdnost po debelini je dosegla plošča D ($3,6 \text{ N/mm}^2$), sledita ji plošči C ($2,77 \text{ N/mm}^2$) in B ($2,5 \text{ N/mm}^2$). Plošči A in E sta dosegli najnižjo (**slika 4-12**). Iz tega lahko sklepamo, da je pri naših ploščah na strižno trdnost bistveno vplivala sestava, namreč plošči D smo dodajali fine delce v srednji sloj, ki je posledično dobila najbolj homogeno, enakomerno sestavo. Fine delce v srednji sloj smo dodajali tudi plošči E, vendar je bila na nekaterih delih razslojena, kar je posledično vplivalo na slabe rezultate strižne trdnosti. Plošči B in C pa sta dosegli višjo strižno trdnost po debelini kakor kontrolna plošča A, kar bi lahko pripisali višji gostoti srednjega sloja (**slika 4-13**).



Slika 4-12: Strižna trdnost po debelini



Slika 4-13: Gostota srednjega sloja plošč

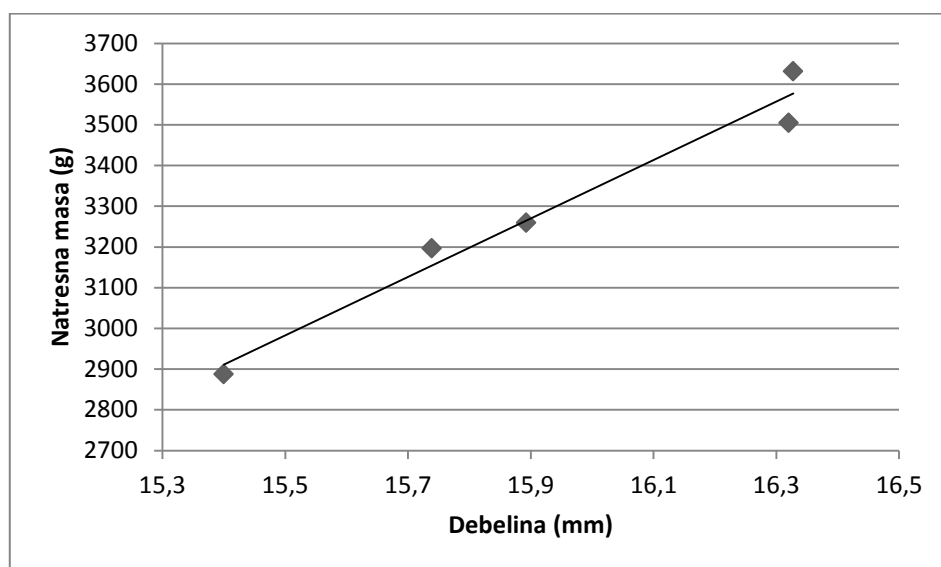
4.6 VELIKOST DELCEV

Z manjšanjem velikosti delcev se manjša anizotropija ter povečuje homogenost, prav tako pa so slabše tudi mehanske lastnosti, ki pa jih lahko zboljšamo z dodajanjem lepila. Manjši kot so delci, večji je delež lepila.

4.7 DEBELINA PLOŠČE

Debelina plošče je odvisna od uporabe, saj se s spreminjanjem debeline plošč spreminjajo mehansko-fizikalne lastnosti. Večja debelina pomeni tudi boljšo izolativnost.

Najdebelejši plošči sta C in E, kar je tudi logično, saj smo tema dvema ploščama dodali tudi največ iverja. Na **Sliki 4-14** lahko vidimo jasno zvezo med natresno maso in debelino plošč.



Slika 4-14: Natresna masa v odvisnosti od debeline plošče

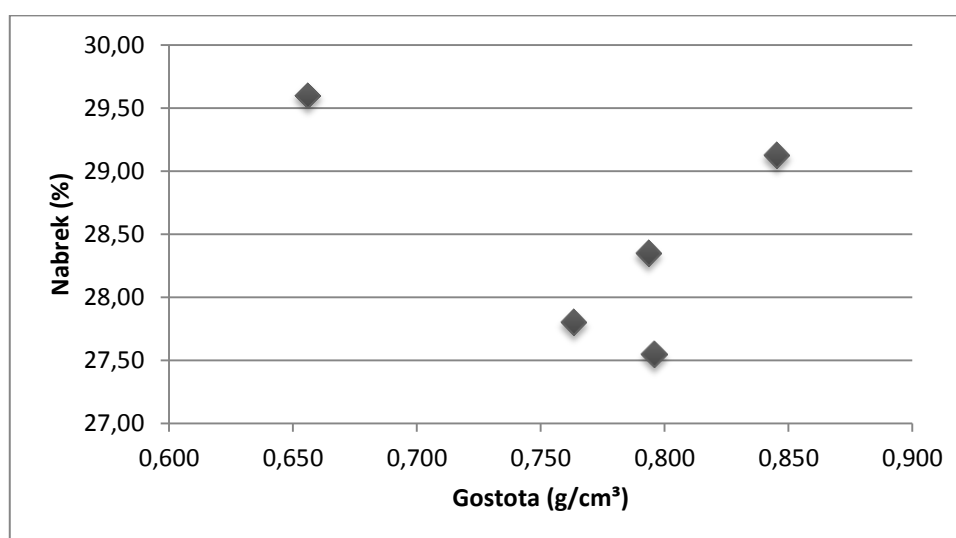
4.8 DEBELINSKI NABREK

Povečanje debelinskega nabreka gostejših ivernih plošč je lahko posledica popuščanja vezi med lepilom in ivermi, ker je tudi napetost v ploščah z višjo gostoto večja kot v ploščah z nizko gostoto. Iverna plošča z višjo gostoto ima tudi večji delež iveri, kar pomeni posledično večji debelinski nabrek. Gostejši zunanji sloj nabreka bolj kot redkejši srednji sloj, kar je posledica manj praznih prostorov, ki bi jih lahko zapolnil nabrekajoči material.

Preglednica 4-3: Debelina vzorcev pred in po namakanju ter debelinski nabrek

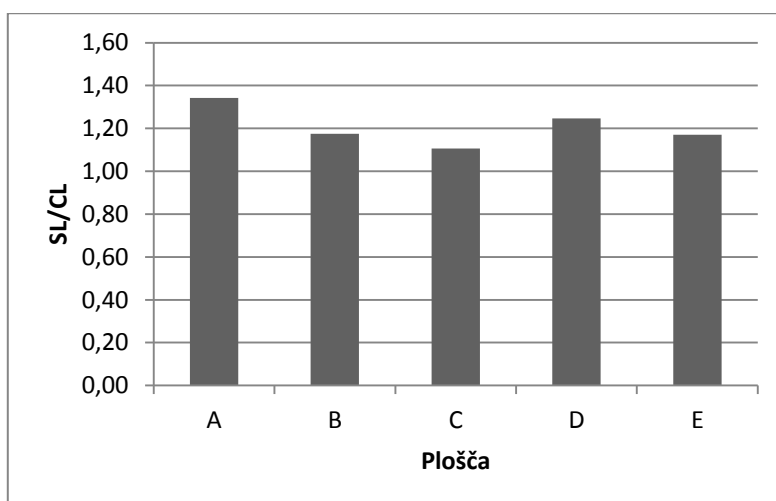
	Pred namakanjem	Po namakanju	
Plošča	Debelina (mm)	Debelina (mm)	Debelinski nabrek (%)
A	15,40	19,96	29,6
B	15,74	20,20	28,3
C	16,32	20,82	27,6
D	15,89	20,31	27,8
E	16,33	21,07	29,1

Zanimivo je, da je naša kontrolna plošča dosegla največji debelinski nabrek, kar je lahko posledica razmerja gostot med zunanjim in srednjim slojem. Pri ploščah z nizko gostoto veliko razmerje gostot zunanjega in srednjega sloja vpliva na povečan debelinski nabrek in vpijanje vode (Kawai and Sasaki 1986).



Slika 4-15: Nabrek v odvisnosti od gostote plošče

Najvišji debelinski nabrek dosega plošča A. Pri ostalih ploščah debelinski nabrek pričakovano narašča z naraščajočo gostoto.

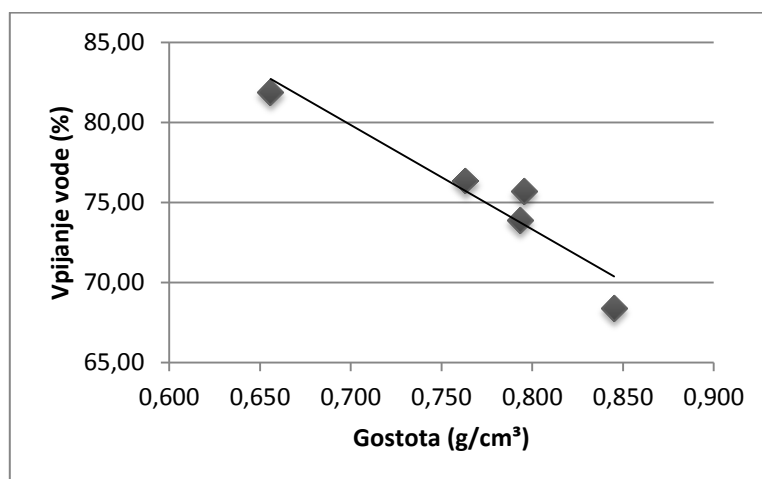


Slika 4-16: Razmerje gostot zunanjih in srednjih slojev plošč

Višja gostota v zunanjih plasteh plošče vpliva na višjo upogibno trdnost, večjo odpornost na absorpcijo in nabrekanje.

4.9 VPIJANJE VODE

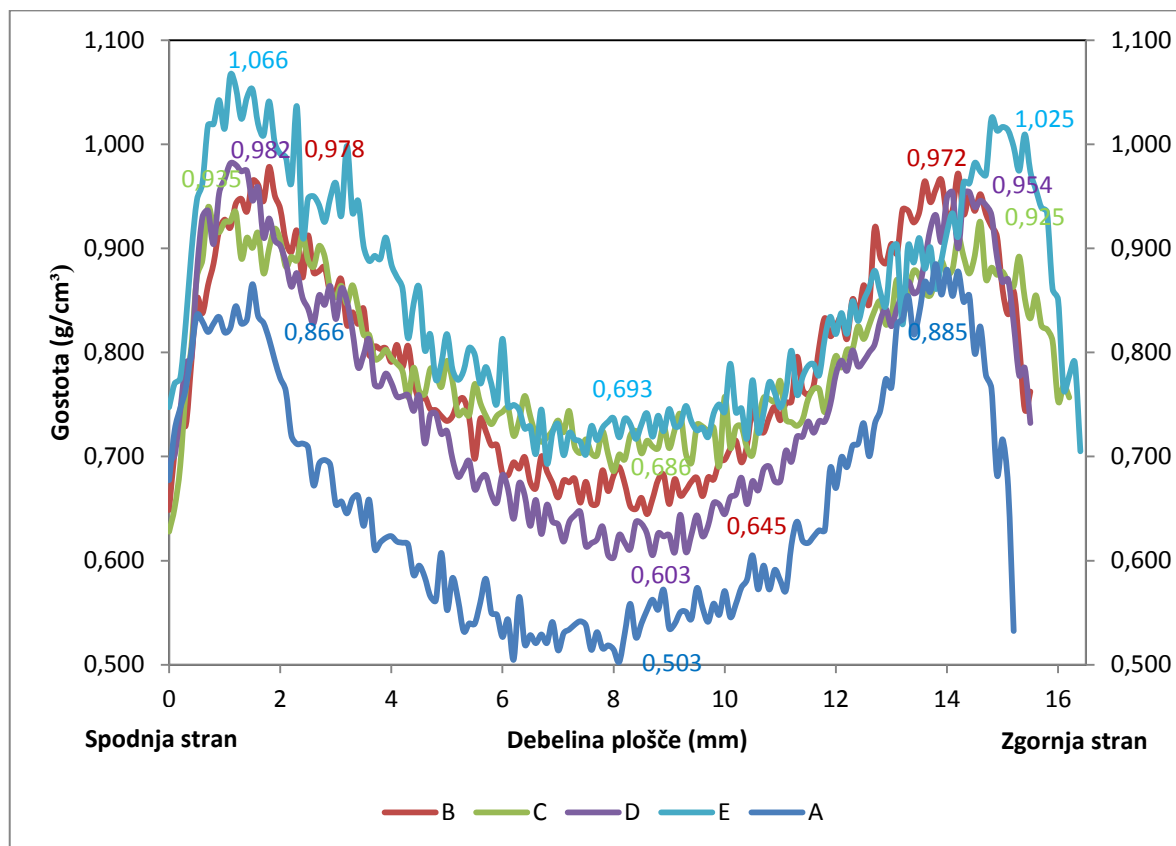
Plošča, ki ima višjo gostoto, bo absorbirala manj vode kot plošča z nižjo gostoto, kar lahko ugotovimo tudi iz grafa na **Sliki 4-17**. Večja zgostitev materiala v plošči pa pomeni tudi več stičnih mest, kar onemogoča vodi, da bi prodrla do iveri, kar privede do boljše dimenzijske stabilnosti.



Slika 4-17: Vpijanje vode v odvisnosti od gostote plošče

Absorpcija vode je odvisna od števila praznih prostorov med ivermi, od uporabljene vrste lepila in od stopnje penetracije lepila v celično steno. Prodiranje lepila ni globoko (le nekaj celic v globino). Čez celotno površino iveri se ustvari nekakšen film, ki zavira vpijanje vode. Trend vpijanja vode tudi pri naših rezultatih pada, kar je razvidno iz **Slike 4-17**.

4.10 GOSTOTNI PROFIL

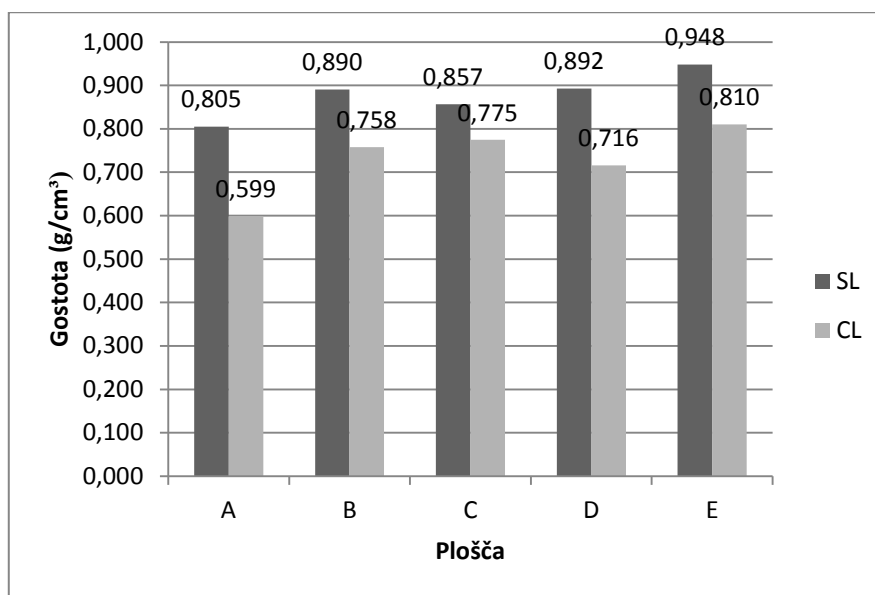


Slika 4-18: Verikalni gostotni profil po debelini plošče

Pričakovano so naše plošče po postopku izdelave dobile značilno U obliko gostotnega profila (**Slika 4-18**). Z večanjem količine vhodnega materiala razmerje med gostoto srednjega in zunanega sloja pada. Opazimo lahko, da imajo spodnje strani plošč rahlo višjo gostoto in širši pas z maksimalno gostoto. Pri zgornjih straneh plošč pa se je območje z lokalno najvišjo gostoto premaknilo bolj proti sredini plošče. Še posebej je to opazno pri plošči C, ki je debela 16,3 mm. Ekstremne vrednosti seveda dosega plošči A in E, kar je pričakovano. Če gledamo z vidika mehanskih lastnosti, ki jih v veliki meri pogojuje oblika gostotnega profila, lahko izpostavimo ploščo D. Med ploščami, ki so dosegale neke srednje vrednosti (B, C, D), ima plošča D največjo razliko med srednjim redkejšim slojem in zunanjim gostejšim slojem (**Slika 4-19**). To tudi pojasnjuje najboljši rezultat plošče D pri testu upogibne trdnosti in testu modula elastičnosti.

Obstaja korelacija, ki nam pomaga pri predvidevanju maksimalne in minimalne gostote v plošči, če poznamo povprečno gostoto plošče, ob specifičnih proizvodnih pogojih. Na obliko gostotnega profila zelo vpliva tudi vlažnost slojev in sicer se večja razlika vlažnosti med slojema odraža v večjih ekstremih gostot po profilu (Wong in sod. 1999).

Medtem, ko ploščo stiskamo v stiskalnici, pride do termične obdelave. Vlaga v ivereh in vlaga v lepilo prehajata na površino ter prihaja do plastifikacije iveri. Iveri se med segrevanjem zmeščajo in omogočajo boljšo zgostitev. V trenutku, ko lepilo utrdi, se stiskalnica odpre in začne se ohlajanje plošče. Plošča, pri kateri je prišlo do večje plastifikacije iveri, ima po kondicioniranju in ohlajanju tudi boljše lastnosti. Pri ivernih ploščah, kjer je bila plastifikacija iveri zadostna, ima lepilo zgolj povezovalno funkcijo in ne nosi obremenitev zadrževanja iveri v prisiljeni legi. V ploščah z nezadostno plastifikacijo iveri pa lepilo nosi večje obremenitve, kadar je plošča izpostavljena povišani vlagi.



Slika 4-19: Povprečne vrednosti gostot srednjega in zunanjega sloja plošč

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

5.1 RAZPRAVA

V eksperimentu smo izdelali 5 serij ivernih plošč, ki so si bile različne predvsem po gostoti in končni debelini. Ciljno smo iskali plošče, ki bi odgovarjale različnim pogojem uporabe. Kot mejo smo postavili standard (SIST EN 312), ki določa zahteve za plosko stisnjene neobdelane iverne plošče. Ploščo P7 in ploščo OSB 3 (primerljivih debelin), ki sta namenjeni za specifično uporabo in naj bi nosili težka bremena v vlažnih razmerah (SIST EN 312-7 talne obloge, stene, ostrešja), smo primerjali z našimi ploščami. Ugotovili smo, da naši plošči C in D, ki po rezultatih izstopata, precej presegata vrednosti plošč P7 in OSB 3, kar je zelo dober rezultat. Ugotovitve so prikazane v **Preglednicah 5.1 in 5-2**.

Preglednica 5-1: Prikazuje rezultate laboratorijskih testov ter vrednotenje le teh

OZNAKA	A	B	C	D	E
Povprečna debelina	15,4	15,7	16,3	15,9	16,3
Gostota	0,663	0,794	0,796	0,763	0,836
Upogibna trdnost	18,84	20,8	21,16	24,92	20,06
Upogib E-modul	3243	3617	3624	3928	3091
Upogib po robu-trdnost	14,9	18,77	22,07	17,37	
Upogib po robu E-modul	2422	2855	3361	2703	
Strig-trdnosti	1,99	2,5	2,77	3,6	1,97
Strig-trdnosti po dolžini	5,19	9,36	11,38	10,57	
Nabrek	29,6	28,35	27,55	27,8	29,13
SPREMEMBE V %					
Povprečna debelina	K	2	6	3	6
Gostota	K	20	20	15	26
Upogibna trdnost	K	10	12	32	6
Upogib E-modul	K	12	12	21	-5
Upogib po robu-trdnost	K	26	48	17	
Upogib po robu E-modul	K	18	39	12	
Strig-trdnosti	K	26	39	81	-1
Strig-trdnosti po dolžini	K	80	119	104	
Nabrek	K	-4	-7	-6	-2
SPREMEMBE PO RAZREDIH					
Povprečna debelina	K	o	-	o	-
Gostota	K	++	++	++	++
Upogibna trdnost	K	+	++	+++	+
Upogib E-modul	K	++	++	++	o
Upogib po robu-trdnost	K	++	+++	++	
Upogib po robu E-modul	K	++	+++	++	
Strig-trdnosti	K	++	+++	++++	o
Strig-trdnosti po dolžini	K	++++	+++++	+++++	
Nabrek	K	o	-	-	o

Legenda:

- Kontrolna plošča A K
- +/- 5 % o
- +/- 5 % do 10 % -/+
- +/- 10 % do 30 % --/++
- +/- 30 % do 70 % ---/+++
- +/- 70 % do 100 % ----/++++
- +/- več kot 100 % -----/+++++

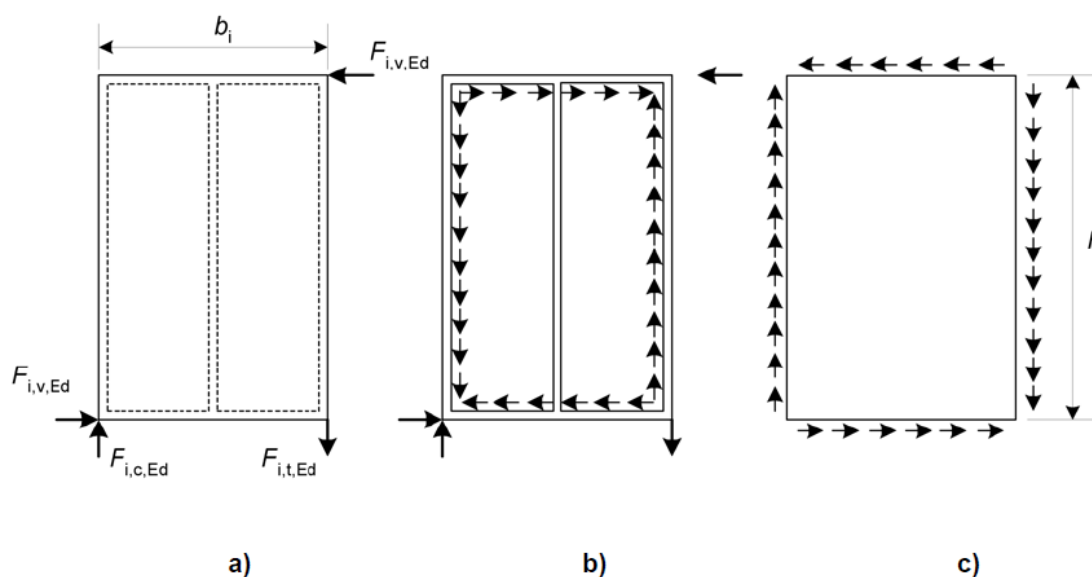
Preglednica 5-2: Primerjava med ploščami P7, D, C in OSB 3

TIP PLOŠČE	C	D	P7	OSB 3
Debelina (mm)	21,16	24,92	13-20	18-25
upogibna trdnost (N/mm ²)	21,16	24,92	20	18
E-modul (N/mm ²)	3624	3928	3100	3500
Razslojna trdnost (N/mm ²)	X	X	0,7	0,32
Strižna trdnost (N/mm ²)	2,77	3,6	X	X

Cilj naše dosedanje raziskave je bil, da se glede na dobljene rezultate lastnosti plošč odločimo za najustreznejšo glede na njeno končno uporabo. Ploščama B in D smo glede na kontrolno ploščo A dodali relativno malo iverja (A + cca. 10 %) in dosegli velike spremembe. Pri ploščah C (A + 21,4 %) in E (A + 25,8 %) smo dodali največ iverja. Če pogledamo rezultate, vidimo, da je plošča C, kjer smo dodali 60 % CL v SL, posledično dosegla enakomerno sestavo, zaradi velikih delcev v zunanjem sloju pa je po končanem stiskanju (pri odpiranju), prišlo do efekta povratne deformacije iveri, kar se kaže tudi v njeni debelini 16,3 mm. Vendar je kljub temu dosegla zelo dobre rezultate, izstopa v strižni trdnosti in strižni trdnosti po robu. Do podobnih povratnih deformacij iveri je prišlo tudi pri plošči E, kjer smo dodali največ delcev glede na kontrolno ploščo. Tu smo dodali največ iverja in prišlo je do porušitve v plošči po odpiranju stiskalnice. Plošča se nam je razslojila in dosegla podobne rezultate kot kontrolna plošča, nekaterih preizkusov pa sploh nismo uspeli izvesti. Lahko sklepamo, da nam je uspelo določiti mejno količino delcev, ki jih še lahko dodamo, da ploščo izboljšamo. Količina je v območju med ploščo D in C. Vidimo pa lahko, kako že relativno majhna sprememba vpliva na končne lastnosti.

5.1.1 Iverna plošča kot obložna plošča panela

Avtorica Kozem Šilih (2012) ugotavlja, da lesen okvir prenaša vertikalno obtežbo in del horizontalne, obložne plošče pa nam delno služijo za prenos horizontalnih obtežb vetra in potresa. Pritrjene so z veznimi sredstvi, običajno sponkami na lesen okvir, zato jih lahko obravnavamo kot sovprežni sistem. Vezna sredstva preprečujejo tudi izbočitev (uklon) plošče. Razdelitev obremenitve je zato odvisna od medsebojnega razmerja togosti plošč in okvirja.



Slika 5-1: Prikaz vpliva sil na a) panel, b) okvir, c) ploščo (EN 1995-1-1)

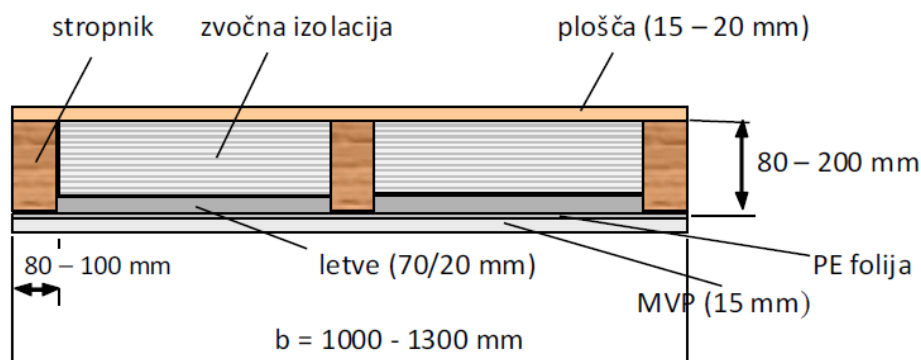
Plošča mora biti sposobna prenašati velike sile in momente – tlačne, natezne in posledično tudi strižne (Slika 5-1). Ker jo obravnavamo kot sovprežni sistem, si lahko njen prerez predstavljamo kot nosilec, kjer nastopajo tudi upogibne sile in momenti. Po Evropskem standardu (EN 1995-1-1) lahko porušno silo $F_{u,k}$ določimo glede na karakteristično natezno trdnost stebričkov lesenega okvirja in efektivno upogibno togost razpokanega prereza.

Kot ugotavljata avtorja Kitek Kuzman in Dujič (2011), je kot zunanjo in notranjo oblogo okvirne konstrukcije možno uporabiti mavčno kartonske plošče, mavčno vlaknene plošče, iverne plošče, lesno cementne plošče, plošče iz lesnih vlaken, lesne plošče z orientiranimi vlakni in vezane plošče. Največ se uporabljajo mavčno vlaknene plošče, vendar so krhke in zato lahko pride v natezni coni do razpok, kar bistveno zmanjša vodoravno nosilnost stenskih elementov in posledično celotno stabilnost objekta. Glede na to, da smo mi izdelali plošče z bistveno boljšimi mehanskimi rezultati, bi lahko kot obložno ploščo panela uporabili katero koli izmed naših plošč. Izmed vseh petih plošč izstopa plošča D, ki kljub svoji manjši debelini 15,9 mm dosega najboljšo upogibno trdnost, najvišji E modul, najvišjo strižno trdnost po robu in zelo dobro strižno trdnost po dolžini. Imela je tudi najustreznejšo obliko gostotnega profila, kar se lepo kaže v njenih mehanskih lastnostih. Pri testu debelinskega nabreka se ni tako dobro obnesla, vendar namen naših plošč ni, da bi bile v

stiku z večjo količino vlage. Smiselno bi bilo plošče tudi obložiti oz. zapreti, saj bi s tem še izboljšali mehanske lastnosti, predvsem pa plošče zaščitili pred različnimi vplivi.

5.1.2 Iverna plošča kot del stropne konstrukcije

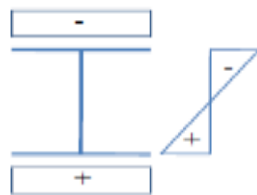
Montažne stropne elemente tipskih dimenzij 100 cm do 130 cm običajno sestavljajo stropniki širine 8 cm do 10 cm ter višine 8 cm do 20 cm, med katere položimo zvočno izolacijo (Slika 5-2). Stropniki so na zgornji pohodni strani običajno pokriti s 15 cm do 20 mm debelo OSB ploščo, na spodnji pa MVP ploščo debeline do 15 mm. Za zgornjo ploščo bi lahko uporabili tudi katero izmed naših plošč, če bi se izkazala kot cenejša varianta, kajti po standardu (EN 1995-1-1) stropne elemente projektiramo tako, da kot primarne nosilne elemente upoštevamo samo lesene nosilce (stropnike), ki morajo prevzeti celotni projektni upogibni moment.



Slika 5-2: Pikaz elementa stropne konstrukcije (Kozem Šilih 2012)

5.1.3 Iverna plošča kot stojina kompozitnega I profila

Pri upogibu enostavnega I nosilca (slika 5-3) se največje napetosti pojavljajo na pasnicah, tako je zgornja pasnica obremenjena na tlak, spodnja pa na nateg, medtem ko središče stojine ni obremenjeno (nevtralna os – čisti upogib). Pri uporabi iverne plošče v namen stojine pri enostavnem I nosilcu izstopa plošča C, ki ima najboljše rezultate pri upogibni trdnosti po robu in strižni trdnosti po dolžini. Ravno upogibna trdnost po robu pa je ključna za nosilnost stojine pri uklonu nosilca.



Slika 5-3: Prikaz upogibnih napetosti – tlačne, natezne, nevtralna os

5.2 SKLEPI

V diplomski nalogi smo skušali s spremembo vhodne surovine za izdelavo iverne plošče izboljšati mehanske lastnosti plošče. To nam je tudi uspelo. Ob približno 20 % povečanju končne gostote plošče nam je nekatere mehanske lastnosti plošče uspelo izboljšati za 10, 20, ali pa kar 50 %. Sicer so vse tri plošče B, C in D bile od kontrolne plošče precej boljše, zato ne bi nobene posebno izpostavljali. Pri vgradnji iverne plošče je potrebno vedeti kakšnemu namenu bo plošča služila in temu primerno tudi izboljšati specifične lastnosti. Prav to pa je prednost in priložnost sodobnih vlakninskih in ivernih tvoriv – kompozitov, spremljati lastnosti plošč s kontroliranim spreminjanjem proizvodnih parametrov, ob uporabi obstoječih delovnih sredstev in znotraj ekonomskih omejitev.

Velikost in razporejenost osnovnih delcev plošč (gradnikov) je bistveno vplivala na lastnosti plošč. Daljši in tanjši delci z nižjo vitkostjo in večjo specifično površino so imeli boljšo stisljivost. Plošče s povišano gostoto so imele večji faktor stisljivosti (CR).

Ker so bile naše iverne plošče sestavljene iz treh slojev, je bila zelo pomembna tudi gostota posameznih slojev, ki je bistveno vpliva na mehanske lastnosti. Večja gostota zunanjih slojev se je odražala z boljšo upogibno trdnostjo preizkušancev. Upogibna trdnost je naraščala z naraščanjem faktorja zgojitve in prostorninske mase zunanjega sloja, kar je bila predvsem posledica večanja kontakta med ivermi.

Modul elastičnosti naj bi z debelino plošč padal, vendar te korelacije ni bilo zaznati v naši raziskavi. Nasprotno, pri ploščah A, B in C je naraščal, nato padal pri ploščah D in E. Vzrok za to, bi lahko iskali v usmerjenosti iveri, kajti pri natresanju nekaterih plošč smo lahko naključno usmerili iveri vzdolžno kar je izboljšalo mehanske lastnosti.

Enakomernejša razporeditev večjih delcev po celotnem preseku, je prispevala k boljši upogibni trdnosti po robu. Do podobnih zaključkov smo prišli tudi pri strižni trdnosti po dolžini, kjer je plošča C dosega najvišje vrednosti zaradi svoje enakomernejše sestave.

Na strižno trdnost po debelini vpliva sestava srednjega sloja. Plošči D, kjer smo dodajali fine delce v srednji sloj je zato dosegla najvišjo strižno trdnost po debelini.

Iverne plošče z višjo gostoto so imele tudi večji delež iveri, kar je pomenilo posledično večji debelinski nabrek. Gostejši zunanji sloj je nabrekal bolj kot redkejši srednji sloj, kar je je bila posledica manj praznih prostorov, ki bi jih lahko zapolnil nabrekajoči material.

Pričakovano so naše plošče po postopku izdelave dobile značilno U obliko gostotnega profila. Z večanjem količine vhodnega materiala je razmerje med gostoto srednjega in zunanjega sloja padal.

V raziskavi Kozem Šilih (2012) je bilo ugotovljeno, da zaradi nizke natezne trdnosti obložnega materiala prihaja do tvorbe razpok v obložnih ploščah pred nastopom plastifikacije veznih sredstev v priključnih ravninah med lesenim okvirjem in obložnimi ploščami. Zato nacionalni dodatek k Evrokodu 5 navaja, da poenostavljeni računski metodi A in B nista primerni za določitev nosilnosti panelnih sten z mavčno-vlaknenimi ploščami. Sklepamo, da bi v našem primeru lahko uporabili sovprežno metodo in tako določali nosilnost panelnih sten z ivernimi ploščami, saj imajo veliko boljše mehanske lastnosti. S tem bi vključili tudi obložne plošče kot del sistema in privarčevali na ostalih konstrukcijskih elementih. To bi lahko bilo nadaljnje raziskovanje uporabe iverne plošče, vendar presega obseg naše raziskave.

S to diplomsko nalogo želimo prispevati k nadaljnjim raziskavam na tem področju in k večji uporabi tehnološko manjvrednega lesa za namene inovativnih izdelkov, kar je tudi eden izmed ciljev sodobnega lesnega tehnologa. Kvantitativno razumevanje povezav gostotnega profila plošč z želenimi lastnostmi plošč je ključno za specifične končne izdelke.

6 VIRI

- Abdalla A. M. A., Noboru S., Norikai J. 2004. Veneer strand flanged I-beam with medium density fiberboard or particleboard as web material I: the forming method and fundamental properties. *J. Wood Science* 50: 223-229
- Abdalla A. M. A., Noboru S. 2006. Veneer strand flanged I-beam with medium density fiberboard or particleboard as web material IV: effect of web material types and flange density on basic properties. *J. Wood Science* 52: 167-172
- Boršič B. 2004. Skeletni sistem lesene gradnje. *LesWood. Zveza lesarjev Slovenije*. 56. 3: 58-62
- Čermak M. 1996. *Furnirji in plošče*. Ljubljana, Lesarska založba: 204 str.
- Dujić B. 2010. Lesena gradnja pri nas lahko seže do pet nadstropij. *Delo in Dom*, 2.6.2010
- EN 1995-1-1. 2004. (E) Eurocode 5. Design of timber structures: 123 str.
- Fan M., Ohlmeyer M., Irle M., Haelvoet W., Athanassiadou E., Rochester I. 2009. Performance in use and new products of wood based composites. London - England, Brunel University Press: 325 str.
- Kawai S., Sasaki H. 1986. Production technology for low-density particleboard. I. Forming a density gradient and its effect on board properties. *Mokuzai Gakkaishi*, 32: 324-330
- Kiler V. 2004. Trendi razvoja in projektiranja sodobnih konstrukcij stavb. V: *Simpozij Družba - prostor - graditev. Inženirska zbornica Slovenije*: 151-155
- Kitek Kuzman M., Dujić B. 2011. Lesene zgradbe in konstrukcije. V: *Strokovni posvet Les iz preteklosti za prihodnost, Čar lesa, Cankarjev dom*, Ljubljana: 1-7
- Kitek Kuzman M., Vratuša S. 2011. Energijsko varčna gradnja v Sloveniji. *AR Arhitektura raziskave*, 1: 29-34
- Kitek Kuzman M. 2008. Prevladujoči sistemi lesene gradnje v Sloveniji. V: *Gradnja z lesom - izziv in priložnost za Slovenijo* Kitek Kuzman M. (ur.). Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 309

- Kollmann F., Kuenzi W. E., Stamm J. A. 1975. Principles of Wood Science and Technology - Volume II: Wood Based Materials. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, Springer-Verlag: 703 str.
- Kozem Šilih E. 2012. Priročnik za izračun togosti in nosilnosti lesenih okvirnih stenskih elementov z odprtinami. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo: 83 str.
- Kozem Šilih E. 2012. Eksperimentalna in numerična analiza lesenih okvirnih stenskih elementov z odprtinami: doktorska disertacija. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo.
<http://dkum.uni-mb.si/IzpisGradiva.php?id=23037> (29. 3. 2014)
- Lopatič J. 2008. Konstrukcijski sistemi naprednih lesenih konstrukcij. V: Gradnja z lesom – izziv in priložnost za Slovenijo. Kitek Kuzman M. (ur.). Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 132-137
- Lynam F. C. 1959. Factors influencing the properties of wood chip board. J. of Inst. of Wood Science, 4: 14-27
- Maloney T. M. 1993. Modern particleboard & dry-proces fiberboard manufacturing. San Francisco, Miller Freeman: 681 str.
- Medved S. 2000. Vpliv zgradbe zunanjšega sloja na sorpcijo in trdnost iverne plošče. Les, 52, 1: 5-12
- Medved S., Resnik J. 2003. Influence of Beech Particle size used in Surface layer on Bending Strenght of three-layer Particleboard. Zbornik gozdarstva in lesarstva, 72: 197-207
- Nemli G., Colakoglu G. 2004. The influence of lamination technique on the properties of particleboard. Building and Environment, 40: 83-87
- Oudjehane A., Lam F. 1998. On the density profile within random and oriented wood-based composite panels: horizontal distribution. Vancouver, University of British Columbia, Faculty of Forestry, Wood Science Department: 687-694
- Plath L. 1963. Influence of density on the properties of wood-based materials. Holz Roh-u Werkstoff, 21, 3: 104-108
- Premrov M., Kuhta M. 2009. Influence of fasteners disposition on behaviour of timber-framed walls with single fibre-plaster sheathing boards. Construction and Building Materials, 23, 7: 2688-2693

- Sitar M. et al., 2005: Trajnostni vidiki prenove večstanovanjskih stavb. V: Arhitektura, raziskave, AR 2005/2: 38
- SIST EN 310. Lesne plošče – Določanje upogibne trdnosti in modula elastičnosti. 1996.
- SIST EN 312. Iverne plošče – Specifikacije. 2011.
- SIST EN 317. Iverne in vlaknene plošče – Ugotavljanje debelinskega nabreka po potapljanju v vodi. 1996.
- SIST EN 323. Lesne plošče - Ugotavljanje gostote. 1996.
- SIST EN 789. Test strižne trdnosti, Lesene konstrukcije – Preiskusni postopki – Ugotavljanje mehanskih lastnosti lesnih plošč. 2005.
- Statistični urad Republike Slovenije, (2011):
<http://www.stat.si/>
- Suzuki S., Miyamoto K. 1998. Effect of manufacturing parameters on the linear expansion and density profile of particleboard. J. Wood Science, 44: 444-450
- Turner H.D., Kern J.D. 1950. Relation of several formation variables to properties of phenolic – resin – bonded wood waste hardboard. U.S. Dept. Of Agr. Forest products laboratory No. R1786: 13 str.
- Wong E. D., Yang P., Zhang M., Wang Q., Nakao T., Li K. F., Kawai S. 2003. Analysis of the effects of density profile on the bending properties of particleboard using finite element method (FEM). Holz als Roh- und Werkstoff, 61: 66-72
- Wong E. D., Zhang M., Wang Q., Kawai S. 1999. Formation of the density profile and its effects on the properties of particleboard. Wood Science and Technology, 33: 327-340
- Wong E., Zhong W., Wang Q., Kawai S. 1998. Effects of mat moisture content and press closing speed on the formation of density profile and properties of particleboard. J. Wood Science, 44: 287-295
- Xu W. 1999. Influence of Vertical Density Distribution on Bending Moduls of Elasticity of Wood Composite Panels: A Theoretical Consideration. Wood and Fiber Science, 30, 3: 277-282

Xu W., Winistorfer M. 1995. Layer thickness swell and layer internal bond of medium density fiberboard and oriented strandboard. Forest Products Journal, 45, 10: 67-71

Zbašnik Senegačnik M. 2008. Pasivna hiša iz lesa. V: Gradnja z lesom - izziv in priložnost za Slovenijo. Kitek Kuzman M. (ur.). Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 309

http://www.smartply.com/images/uploads/product_downloads/SmartPly_OSB3_Datasheet_2012_1.pdf

ZAHVALA

Za vzpodbudo, nasvete in usmerjanje pri izdelavi diplomskega dela se zahvaljujem mentorju doc. dr. Sergeju Medvedu. Zahvaljujem se tudi prof. dr. Milanu Šerneku za strokovno recenzijo diplomskega dela ter tehniškemu sodelavcu Janezu Renku za pomoč v laboratoriju.

Zahvaljujem se svojim staršem in bratu, ki so mi v življenju vseskozi dajali občutek varnosti in samozavesti, verjeli vame ter me podpirali.

Zahvalil bi se tudi vsem prijateljem in sošolcem, ki so mi kakorkoli in na kakršen koli način pomagali skozi študijski čas in pri izdelavi diplomske naloge.

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Mitja LALOVIČ

**UPORABA TIRSLOJNIH IVERNIH PLOŠČ S
POVIŠANO GOSTOTO V KONSTRUKCIJSKE
NAMENE**

DIPLOMSKO DELO

Univerzitetni študij

Ljubljana, 2014