

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Janova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



Univerzitetni program Gradbeništvo,
Konstrukcijska smer

Kandidat:

Igor Gavrić

Študija modularnih enot iz križno lepljenega lesa

Diplomska naloga št.: 3089

Mentor:

izr. prof. dr. Boštjan Brank

Somentor:

asist. dr. Bruno Dujič

Ljubljana, 20. 11. 2009

POPRAVKI

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **IGOR GAVRIĆ** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:
»ŠTUDIJA MODULARNIH ENOT IZ KRIŽNO LEPLJENEGA LESA«.

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL, Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Ljubljana, 11.11.2009

(podpis)

IZJAVE O PREGLEDU NALOGE

Nalogo so si ogledali učitelji konstrukcijske smeri:

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	519.61/.64:624.011.1:624.07(043.2)
Avtor:	Igor Gavrić
Mentor:	izr. prof. dr. Boštjan Brank
Somentor:	asist. dr. Bruno Dujič
Naslov:	Študija modularnih enot iz križno lepljenega lesa
Obseg in oprema:	92 str., 16 pregl., 67 sl., 64 en.
Ključne besede:	modularna gradnja, križno lepljen les, numerično modeliranje, parazitne konstrukcije, strižni modul prečnih slojev, laminati, mobilne konstrukcije

Izvleček

V diplomski nalogi obravnavam modularne enote iz križno lepljenega lesa. Na začetku predstavim križno lepljen les kot gradbeni material. Prikažem možnost njegove uporabe v konstrukcijskem gradbeništvu. V nadaljevanju pogledam na potenciale inovativne modularne gradnje v prihodnosti. Nato se osredotočim na modeliranje laminatov. Predstavim teorijo laminatnih kompozitnih sten in plošč. Analizo modularne enote izvedem s programom SAP 2000 v12. Uporabim slojevite ploskovne elemente, ki nam omogočajo račun napetosti po slojih. Analiziram pet različnih položajev modularne enote ter pri kontroli mejnega stanja nosilnosti in uporabnosti skušam izpolniti vse kriterije. Iz analize ugotovim, da imajo konstrukcije iz križno lepljenih lesenih masivnih plošč veliko specifično nosilnost in togost zaradi razmerja med majhno lastno težo in dobrimi mehanskimi lastnostmi križno lepljenih lesenih plošč.

BIBLIOGRAFIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 519.61/.64:624.011.1:624.07(043.2)
Author: Igor Gavrić
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Boštjan Brank
Cosupervisor: Assist. Dr. Bruno Dujič
Title: Study of modular units made of cross-laminated wood
Notes: 92 p., 16 tab., 67 fig., 64 eq.
Key Words: modular construction, cross-laminated wood, numerical modeling, parasite structures, rolling shear, laminates, mobile structures

Abstract

The study focuses on modular units made of cross-laminated wood. First, there is a comprehensive overview over cross-laminated timber as construction material. The possibilities of using it in civil engineering applications are also shown. This is followed by a short state-of-the-art review of several modular units made of cross-laminated wood and a presentation of its potential use in the future. After that, I focus on modeling of cross-ply laminates. There is a short explanation of the basic theory of thin-walled laminates. The analysis of modular unit is performed in FE software package SAP2000 v12. A 3D shell-layered model with the capability of calculation of stresses in layers of laminate is used for analysis. Based on this analysis the whole modular unit structure is designed for five different shapes of the unit to sustain defined loads and to meet the requirements of ultimate limit state and serviceability limit state of the structure. Due to low mass to high specific load bearing capacity ratio the structures made of cross-laminated solid wooden panels have very good mechanical properties.

ZAHVALA

Za nasvete in pomoč pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. Boštjanu Branku in somentorju asist. dr. Brunu Dujiču, ki sta mi bila ves čas na razpolago. Najlepša hvala tudi Iztoku Šušteršiču za dobre nasvete.

Zahvalil bi se tudi mojim domačim in prijateljem, ki so me ves čas študija vzpodbujali in podpirali ter mi stali ob strani.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	KRIŽNO LEPLJENE PLOŠČE IZ MASIVNEGA LESA	3
2.1	Tehnične karakteristike	3
2.2	Požarna odpornost	6
2.3	Mehanske karakteristike	7
2.3.1	Vpliv strižnega modula pravokotno na vlakna (rolling shear) na trdnost in togost križno lepljenih plošč (Fellmoser et al., 2004)	9
2.4	Konstrukcijski sistemi in prednosti križno lepljenega lesa	15
3	POTENCIAL MODULARNE GRADNJE IZ KRIŽNO LEPLJENEGA LESA	17
3.1	Nanostrukturalna izolacija aerogel	17
3.2	Prednosti inovativne modularne gradnje	21
4	RAČUNSKA ANALIZA KOMPOZITNIH LAMINATOV	31
4.1	Posplošeni Hook-ov zakon	32
4.2	Materialne konstante ortotropnega materiala	35
4.3	Ravninsko napetostno stanje	37
4.4	Transformacija togostne matrike lamine	39
4.5	Teorije kompozitnih plošč	41
4.5.1	Klasična teorija laminatov - CLPT (Classical Laminate Plate Theory)	41
4.5.2	Strižna teorija prvega reda - FSDT (First Order Shear Deformation Theory)	43
4.6	Konstitutivne enačbe laminata	43
4.7	Homogenizacija prereza simetričnega križnega laminata	46
4.8	Reševanje enačb plošč	47

5	PRIMERJALNA ANALIZA LAMINATOV IZ KRIŽNO LEPLJENEGA LESA	49
5.1	Analiza z večslojnim prerezom (Shell-layered)	51
5.2	Analiza z uporabo analitične rešitve	52
5.3	Analiza s homogeniziranim enoslojnim ortotropnim prerezom	53
5.4	Analiza s homogeniziranim izotropnim prerezom z uporabo redukcijskih faktorjev togosti	55
5.5	Analiza z uporabo koeficientov po Blass-u	57
5.6	Primerjava analiz	60
6	NUMERIČNA ANALIZA MODULARNE ENOTE	72
6.1	Geometrija in zgradba modularne enote	72
6.2	Obtežbe na konstrukcijo	76
6.3	Računski model konstrukcije	79
6.4	Materialne karakteristike prečnih prerezov	80
6.5	Analize in rezultati	81
6.5.1	Modularna enota v fazi dviganja	81
6.5.2	Modularna enota v osnovnem položaju	82
6.5.3	Modularna enota v polovično raztegnjenem položaju	83
6.5.4	Modularna enota v raztegnjenem položaju	85
6.5.5	Modularna enota kot parazitna konstrukcija	86
6.5.6	Kontrole napetosti in pomikov	87
7	ZAKLJUČKI	88
VIRI		90

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 2.1:	Mehansko delovanje pravokotno na ploščo iz masivnega lesa (ETA-06/0138, 2006)	8
Preglednica 2.2:	Mehansko delovanje v ravnini plošče iz masivnega lesa (ETA-06/0138, 2006)	8
Preglednica 2.3:	Sestava analiziranih križno lepljenih plošč	13
Preglednica 4.1:	Dogovor o zapisovanju komponent tenzorja napetosti in deformacij (Petelin, 2003)	33
Preglednica 5.1:	Dimenzije in sestava prereza plošč	49
Preglednica 5.2:	Dimenzije in sestava prereza stene in stenastega nosilca	51
Preglednica 5.3:	Sestavni koeficienti za lesene križno lepljene plošče (Blass, 2004)	58
Preglednica 5.4:	Efektivne trdnosti in togosti lesenih križno lepljenih plošč (Blass, 2004)	59
Preglednica 5.5:	Primerjava ortotropnih materialnih karakteristik enoslojnih prerezov laminata	61
Preglednica 5.6:	Številsko poimenovanje različnih pristopov podajanja materialnih karakteristik in načinov izračuna plošč	62
Preglednica 6.1:	Kombinacijski faktorji obtežb	77
Preglednica 6.2:	Osne sile v hidravličnih batih in izvlečnih vodilih – faza dviganja	82
Preglednica 6.3:	Osne sile v hidravličnih batih in izvlečnih vodilih – enota v osnovnem položaju	83
Preglednica 6.4:	Osne sile v hidravličnih batih in izvlečnih vodilih – enota v napol raztegnjenem položaju	84
Preglednica 6.5:	Osne sile v hidravličnih batih in izvlečnih vodilih – enota v raztegnjenem položaju	86
Preglednica 6.6:	Osne sile v hidravličnih batih in izvlečnih vodilih – enota kot parazitna konstrukcija	87

KAZALO SLIK

Slika	2.1: Osnovna struktura plošče iz masivnega lesa (ETA-06/0138, 2006)	3
Slika	2.2: Tipični primeri strukture plošče iz masivnega lesa (ETA-06/0138, 2006)	4
Slika	2.3: Raznos vertikalne obtežbe v ravnini stene (levo) in raznos vertikalne obtežbe v ravnini plošče (desno) (KLH statika)	5
Slika	2.4: Predpostavljena razporeditev napetosti v križno lepljeni leseni plošči (KLH)	9
Slika	2.5: Strižne napetosti τ pravokotno na smer vlaken (Fellmoser et al., 2004)	10
Slika	2.6: Porušitev zaradi "rolling shear" (Fellmoser et al., 2004)	10
Slika	2.7: Preizkušanca obremenjena v smeri vlaken (levo) in pravokotno na smer vlaken (desno) (Fellmoser et al., 2004)	11
Slika	2.8: Upogibne napetosti in strižne napetosti masivnega lesenega panela iz petih križno lepljenih plošč (Fellmoser et al., 2004)	12
Slika	2.9: Efektivni modul elastičnosti v odvisnosti od razmerja razpona panela in njegove debeline (L/d) (Fellmoser et al., 2004)	13
Slika	2.10: Delež strižnih in upogibnih deformacij v odvisnosti od razmerja med razponom in debelino panela z nazivno debelino 60 mm pri upogibu pravokotno glede na ravnino panela z zunanjimi sloji v smeri proizvodne dolžine panela (Fellmoser et al., 2004)	14
Slika	2.11: Primer stanovanjskega objekta iz križno lepljenih masivnih panelov (KLH)	15
Slika	2.12: Primer večnadstropnega objekta iz križno lepljenih masivnih panelov (KLH)	15
Slika	3.1: Aerogel, ki lahko prenese tudi več kot 2000-kratno lastno težo (Aerogel)	18
Slika	3.2: Proizvodni proces aerogela (Aerogel)	19
Slika	3.3: Proces nastanka aerogela (Aerogel)	19
Slika	3.4: Primeri izolacijskih odej iz aerogela (Aerogel)	20
Slika	3.5: Modularni konstrukcijski sistem »Habitat 67«, Montreal (Habitat)	23
Slika	3.6: Modularne enote iz križno lepljenih plošč – Hotel Kornock (Die.modulfabrik)	23
Slika	3.7: Primer parazitne konstrukcije »Las Palmas«, Nizozemska (Las Palmas)	26
Slika	3.8: Primer mobilne bivalne enote (Wee house)	26
Slika	3.9: Primer mobilne parazitne konstrukcije »Rucksack house« na različnih lokacijah (Rucksack house)	27

Slika 3.10:	Osnovni moduli različnih geometrij z možnimi variantami izvleka	29
Slika 3.11:	Dva združena osnovna modula z možnimi variantami izvleka	30
Slika 3.12:	Združeni osnovni moduli različnih geometrij z možnimi variantami izvleka	30
Slika 4.1:	Simetrični laminat (Petelin, 2003)	31
Slika 4.2:	Križni nesimetrični laminat (Petelin, 2003)	32
Slika 4.3:	Prikaz ravninskega stanja napetosti (Petelin, 2003)	37
Slika 4.4:	Geometrijski in materialni koordinatni sistem ortotropne plošče	39
Slika 4.5:	Nedeformiran in deformiran rob plošče v skladu s Kirchhoff-ovimi predpostavkami (Petelin, 2003)	42
Slika 4.6:	Potek deformacij in napetosti po prečnem prerezu: (a) deformacije (b) napetosti (Petelin, 2003)	43
Slika 4.7:	Koordinatni sistem in potek številčenja plasti za kompozitno ploščo (Petelin, 2003)	44
Slika 5.1:	Geometrija prostoležeče podprtih plošč z dimenzijami 3x3 m in 6x6 m	50
Slika 5.2:	Geometrija prostoležeče podprte plošče na robovih v smeri osi y in prosto na robovih v smeri osi x z dimenzijami 3x3 m in 6x6 m	50
Slika 5.3:	Geometrija in obtežba stene (levo) in stenastega nosilca (desno)	51
Slika 5.4:	Podajanje geometrijskih in materialnih karakteristik večslojnega prereza laminata	52
Slika 5.5:	Sestava in oznake slojev križno lepljene plošče ($m=5$) (Blass, 2004)	58
Slika 5.6:	Shema dejanskega modula elastičnosti posamezne plasti ter efektivnega modula elastičnosti namišljenega prereza (Blass, 2004)	59
Slika 5.7:	Pomiki prostoležečih plošč DL 162 (3x3 m in 6x6 m)	63
Slika 5.8:	Momenti M_{11} prostoležečih plošč DL 162 (3x3 m in 6x6 m)	63
Slika 5.9:	Momenti M_{22} prostoležečih plošč DL 162 (3x3 m in 6x6 m)	63
Slika 5.10:	Pomiki plošč DL 162 z dvema prostima robovoma (3x3 m in 6x6 m)	65
Slika 5.11:	Momenti M_{11} plošč DL 162 z dvema prostima robovoma (3x3 m in 6x6 m)	65
Slika 5.12:	Momenti M_{22} plošč DL 162 z dvema prostima robovoma (3x3 m in 6x6 m)	65
Slika 5.13:	Pomiki prostoležečih plošč (2/16/2), (3x3 m in 6x6 m)	64
Slika 5.14:	Momenti M_{11} prostoležečih plošč (2/16/2), (3x3 m in 6x6 m)	66
Slika 5.15:	Momenti M_{22} prostoležečih plošč (2/16/2), (3x3 m in 6x6 m)	67
Slika 5.16:	Pomiki plošč (2/16/2) z dvema prostima robovoma (3x3 m in 6x6 m)	68

Slika 5.17:	Momenti M_{11} plošč (2/16/2) z dvema prostima robovoma (3x3 m in 6x6 m)	68
Slika 5.18:	Momenti M_{22} plošč (2/16/2) z dvema prostima robovoma (3x3 m in 6x6 m)	68
Slika 5.19:	Potek momentov M_{11} v ploščah 1 (levo) in 2 (desno), (2/16/2) 6x6 m z dvema prostima robovoma	69
Slika 5.20:	Potek momentov M_{22} v ploščah 1 (levo) in 2 (desno), (2/16/2) 6x6 m z dvema prostima robovoma	69
Slika 5.21:	Pomiki u_z (levo) desnega robu in napetosti σ_{11} (desno) spodnjega desnega vogala po prerezu stene DQ 162	70
Slika 5.22:	Napetosti σ_{11} zgornjega levega vogala po prerezu stene DQ 162	70
Slika 5.23:	Pomiki u_z (levo) desnega robu stenastega nosilca DQ 162	71
Slika 6.1:	Prečni prerez modularne enote v osnovnem položaju	73
Slika 6.2:	Tloris modularne enote v osnovnem položaju	73
Slika 6.3:	Prečni prerez modularne enote v polovično raztegnjenem položaju	74
Slika 6.4:	Tloris modularne enote v polovično raztegnjenem položaju	74
Slika 6.5:	Prečni prerez modularne enote v raztegnjenem položaju	75
Slika 6.6:	Tloris modularne enote v raztegnjenem položaju	75
Slika 6.7:	Elementi računskega modela modularne enote	80
Slika 6.8:	Sestava plošč in sten ter materialne karakteristike	81
Slika 6.9:	Potek napetosti S_{11} – enota v fazi dviganja	81
Slika 6.10:	Potek napetosti S_{11} – enota v osnovnem položaju	83
Slika 6.11:	Potek napetosti S_{11} – enota v polovično raztegnjenem položaju	84
Slika 6.12:	Potek napetosti S_{11} – enota v raztegnjenem položaju	85
Slika 6.13:	Potek napetosti S_{11} – enota kot parazitna konstrukcija	86

1 UVOD

Križno lepljen les spada v skupino kompozitno laminatnih gradbenih materialov z izredno visokim razvojnim potencialom. Gre za sistem iz križno lepljenih lesenih desk, kjer so sloji desk pravokotni drugi na drugega. S križnim lepljenjem desk v novo laminatno strukturo se dosežejo boljše mehanske lastnosti kot jih ima les v osnovi.

Križno lepljeni leseni paneli so uporabni tako za nosilne kot tudi nenosilne stenske in stropne elemente. Hitra in enostavna gradnja, dobre mehanske lastnosti, visoka stopnja predizdelanosti, ekonomičnost, odlične ekološke lastnosti ter človeku prijazno bivalno okolje, so glavni razlogi, da je uporaba križno lepljenega lesa v vlogi osnovnega gradbenega materiala različnih konstrukcijskih sistemov iz dneva v dan vse večja. Poleg uporabe v eno- in večetažni montažni stanovanjski gradnji, je konstrukcijski sistem iz križno lepljenega lesa v svoji kratki zgodovini že dokazal izredno uporabnost tudi v gradnji poslovnih, industrijskih, servisnih, komunalnih, sakralnih ter inženirskih objektov, kot so na primer mostovi. Zaradi velike nosilnosti in togosti glede na težo, se same po sebi ponujajo tudi velike možnosti pri dozidavah in nadzidavah obstoječih zgradb. Prav tako je možna uporaba omenjenega križno lepljenega sistema v kombinaciji z jeklom, steklom in ostalimi tradicionalnimi gradbenimi materiali, s čimer se ponuja širok spekter uporabe tudi v arhitekturnem smislu.

V Evropi se je montažna gradnja stanovanjskih objektov zelo industrializirala, saj se želi čas izgradnje oz. postavitve objekta zmanjšati na najkrajše možno obdobje in se s tem v veliki meri izogniti spremenljivim vremenskim vplivom, ki bi vplivali na kvaliteto objekta in na čas gradnje. Hkrati je pri gradnji zaželeno, da se financiranje skrči na najkrajše možno obdobje. Tako vedno bolj postajajo aktualne manjše enote, ki bi lahko dopolnile stanovanjske in tudi poslovne potrebe različnih investorjev. V tem se vedno bolj kaže potreba po mobilnosti in sestavljivosti takšnih enot, kjer bi multifunkcionalnost in samozadostnost predstavljala veliko dodano vrednost.

Enote iz križno lepljenega masivnega lesa bi bile zasnovane v modularnem sistemu. To pomeni, da bi se osnovni modularni enoti lahko priključevale dodatne enote in bi skupaj

tvorile nov konstrukcijski sistem. Lahko pa bi se omenjene modularne enote priključevale tudi k že obstoječim objektom. Cilj diplomske naloge je napraviti študijo konstrukcijske zasnove osnovnega gradnika modularnega sistema ter ugotoviti njegovo obnašanje pod vplivi različnih obtežb.

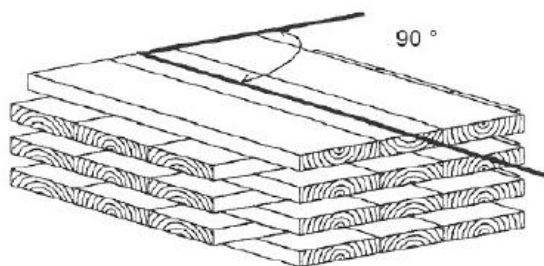
Glede na to, da je les v osnovi izrazito nehomogen in anizotropen material, so zveze med napetostmi in deformacijami odvisne od smeri in vrste obremenjevanja. Elastični modul lesa v smeri vlaken je neprimerno večji (približno 30-krat) od elastičnega modula pravokotno na vlakna, zato tudi primarna smer prenosa obtežbe križno lepljenega panelnega elementa ustreza smeri orientacije vlaken zunanjih plasti. Elastični modul križno lepljene plošče je torej odvisen od debeline, števila in orientiranosti posameznih plasti v panelu. Nanj vpliva tudi vlažnost lesa. Na togost križno lepljenih lesenih panelov vpliva še strižni modul pravokotno na vlakna, ki je pri lesu relativno majhen, zato pride v določenih primerih do znatnih strižnih deformacij. Poleg tega moramo upoštevati še vpliv križnega lepljenja, zaradi česar mehanske karakteristike plošč največkrat določimo ali v laboratoriju ali pa z uporabo ustreznih računskih postopkov.

V diplomski nalogi bomo predstavili računske postopke za določitev mehanskih karakteristik križno lepljenih plošč. Nato bomo računske postopke primerjali med seboj. Pri tem bomo uporabili računalniška programa Mathematica in SAP 2000 v12, slednji izvaja računske postopke na osnovi metode končnih elementov. Sledila bo še študija konstrukcijske zasnove modularne enote iz križno lepljenega lesa. Računske analize bomo izvajali z metodo končnih elementov v prej omenjenem programu SAP2000, ki nam med drugim omogoča tudi izračun napetosti po posameznih plasteh laminatov. Na koncu bomo na podlagi rezultatov določili osnovne dimenzije elementov modularne enote.

2 KRIŽNO LEPLJENE PLOŠČE IZ MASIVNEGA LESA

2.1 Tehnične karakteristike

Križno lepljene plošče iz masivnega lesa so izdelane iz desk mehkega lesa, ki so zlepljene na tak način, da skupaj tvorijo masivne lesene ploskovne elemente. Sosednji sloji desk so med seboj razvrščeni pravokotno drug na drugega, prerez plošč pa je simetričen. Odvisno od vrste uporabe in zahtev po nosilnosti so plošče izdelane v lihem številu slojev – 3, 5, 7 ali več. Plošče iz križno lepljenega masivnega lesa se uporabljajo kot konstrukcijski ali nekonstrukcijski elementi v stavbah in lesenih konstrukcijah.



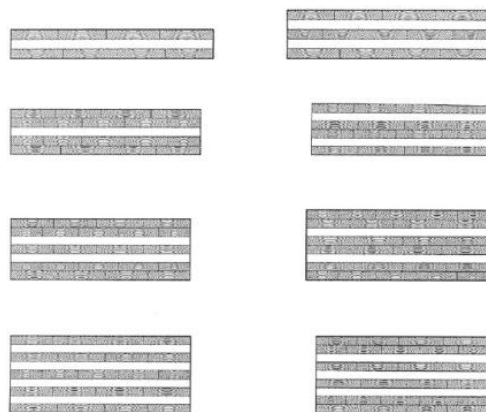
Slika 2.1: Osnovna struktura plošče iz masivnega lesa (ETA-06/0138, 2006)

V isti smeri sta lahko največ dva zaporedna sloja desk, kar ustvari dvojni sloj. V tem primeru je glavna smer plošč iz masivnega lesa v konstrukciji vzporedna s smerjo dvojnih slojev. To pomeni, da se lahko v posebnih primerih za doseganje višjih upogibnih trdnosti izdelajo plošče z dvojnimi zunanji nosilnim slojem, za doseganje višjih strižnih trdnosti pa plošče z dvojnimi osrednjim slojem.

Površine plošč iz masivnega lesa se lahko obdelajo z lesnimi ploščami. Posamezne deske je potrebno v skladu z EN 385 v vzdolžni smeri združiti s pomočjo dolžinskih »zobčastih« spojev (finger joints) za dolžinsko spajanje desk, brez sočelnih spojev. Proizvajalci lesenih križno lepljenih plošč za lepljenje večinoma uporabljajo enokomponentno poliuretansko

lepilo, ki izkorišča naravno vlago v lesu za povezovanje elementov v celoto, brez potrebe po topilih in formaldehidu. Na lesene deske se po celotni površini nanese okoli 200 g lepila na kvadratni meter, popolno zlepljenje pa se doseže v stiskalnicah. Lepilo med posameznimi deskami se mora skladati s standardom EN 301, izpolnjevati pa mora vse pogoje glede konstantne trdnosti, trdnosti na stiku z lesom, strjevanja, požarne odpornosti, odpornosti na anorganske in organske snovi ter odpornosti na kemijske vplive.

Vrsta uporabljenega lesa za izdelavo masivnih križno lepljenih plošč je evropska smreka ali sorodni mehki les, ki mora biti tehnično posušen do 12% ($\pm 2\%$) vlažnosti, s čimer je omogočena naravna zaščita lesa pred škodljivci, kot so gobe, insekti in plesni. Elemente plošč iz masivnega lesa je potrebno med transportom in shranjevanjem zaščititi pred poškodovanjem in negativnimi vplivi vlage, prav tako pa morajo biti elementi, ki so uporabljeni v konstrukcijskih sistemih in ki so neposredno izpostavljeni vremenskim vplivom, ustrezno zaščiteni. Določbe iz Evropskega tehničnega soglasja ETA-06/0138 za KLH plošče temeljijo na predvideni življenjski dobi plošč iz masivnega lesa, ki znaša 50 let.

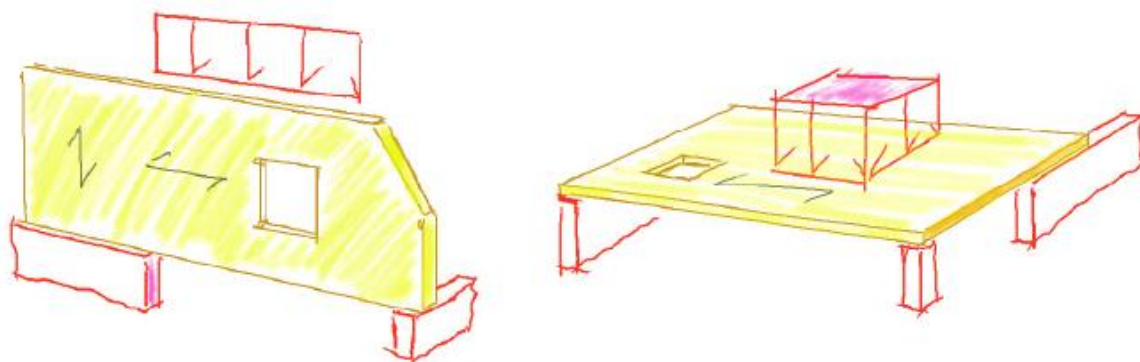


Slika 2.2: Tipični primeri strukture plošče iz masivnega lesa (ETA-06/0138, 2006)

S križnim lepljenjem plošč dosežemo večjo nosilnost plošč, poleg tega pa je zagotovljena tudi dimenzijska stabilnost le-teh, kar pomeni, da je delovanje lesa (krčenje, nabrekanje) zmanjšano na zanemarljivo vrednost. Deformacije v ravnini takšne plošče so na podlagi tega

zanemarljivo majhne, medtem ko pravokotno na ravnino plošče znašajo približno 2,4 mm/m za vsak % spremembe vlažnosti lesa. (KLH statika)

Struktura križno orientiranih lamel omogoča, da elementi lahko prenašajo obtežbo v dveh pravokotnih smereh, kar omogoča njihovo uporabo tako za stenske kot stropne elemente. Primarna smer prenosa obtežbe ustreza orientaciji vlaken zunanjih plasti desk, kar je shematično prikazano na sliki 2.3. Križno lepljeni paneli lahko dosegajo dimenzije, ki so primerne tudi za gradnjo etažnih sten v enem kosu, s predhodno izrezanimi odprtinami in pripravljenimi površinami za stikovanje, v kolikor to seveda dovoljuje transport.



Slika 2.3: Raznos vertikalne obtežbe v ravnini stene (levo) in raznos vertikalne obtežbe v ravnini plošče (desno) (KLH statika)

Z ustrezno povezavo elementov v celotno konstrukcijo lahko dosežemo, da plošče, ki se uporabljajo za stenske elemente, prevzamejo veliko vodoravno obtežbo, tako v ravnini stene, kot pravokotno nanjo. S primerno arhitekturno in statično zasnovo objekta, ustrezno nosilnostjo samih panelov ter primerno izvedbo stikov med stenami in ploščami, lahko torej zagotovimo odlično odpornost konstrukcije iz križno lepljenih plošč tudi na delovanje vodoravnih obtežb kot sta potres in veter.

2.2 Požarna odpornost

Masivne križno lepljene lesene plošče imajo relativno visoko požarno odpornost, saj jih odlikuje kar nekaj pozitivnih lastnosti. Sposobnost lesa za prevajanje toplote je namreč zelo majhna, saj jo prevaja 300 do 400 krat počasneje kot jeklo (toplotna prevodnost lesa po podatkih proizvajalca je $\gamma = 0,13 \text{ W/(mK)}$). Elementi zooglenijo počasi od površine proti notranjosti, ustvarjena zooglenelost pa zmanjšuje prevajanje toplote in onemogoča dostop kisika do lesa.

Križno lepljene plošče iz masivnega lesa je mogoče projektirati glede na požarno odpornost v skladu z EN 1995-1-2. Za projektiranje ob upoštevanju požarnih pogojev je potrebno razlikovati med dvema primeroma:

- (i) do pooglenitve pride samo v skrajnem zunanem sloju ali skrajnem dvojnem zunanem sloju. Takrat uporabimo podatek o hitrosti pooglenitve 0,64 mm/min. Preostala debelina sloja mora biti najmanj 3 mm. Prečni prerez sloja, ki je izpostavljen požaru, zmanjšamo za 10 %, ker se pri spojih razvije višja hitrost pooglenitve.
- (ii) do pooglenitve pride v več slojih, ne samo v skrajnih zunanjih slojih. V tem primeru se uporabi hitrost pooglenitve 0,76 mm/min. Za preverjanje v skladu z EN 1995-1-2 je potrebno uporabiti sistem z zmanjšanimi prerezi. Slojev, ki potekajo pravokotno na glavno nosilno smer konstrukcijske plošče iz masivnega lesa, pri preverjanju konstrukcije ne smemo upoštevati. Prerez plošče iz masivnega lesa lahko zaradi pooglenitve slojev postane asimetričen, to pa je potrebno upoštevati npr. pri stenah zaradi nastale ekscentričnosti. (ETA-06/0138, 2006)

Glede na hitrosti gorenja križno lepljenih plošč znaša običajno požarna odpornost 3-slojne plošče 30 min, s 5-slojnimi ploščami je mogoče doseči požarno odpornost 60 min, pri večjih debelinah in večslojnih stenah pa tudi 90 min. V skladu z zahtevami požarnih predpisov so računsko dokazljive tudi višje vrednosti požarne odpornosti (90 min, 120 min, itd.), ki pa so odvisne predvsem od debeline in slojevitosti plošč ter njihovih oblog.

2.3 Mehanske karakteristike

Za križno lepljen les, ki spada med kompozitna gradiva, velja, da ima bolj enakomerne in boljše mehanske lastnosti kot les sam. Materialne karakteristike križno lepljenih panelov so nekoliko težje določljive, predvsem zaradi lastnosti lesa kot nehomogenega naravnega materiala. Eksperimentalno dobljene zveze med napetostmi in deformacijami se namreč pri lesu zaradi njegove anizotropije zelo razlikujejo glede na način obremenitve (tlak, nateg) in glede na smer delovanja napetosti (vzporedno z vlakni, pravokotno na vlakna ali pod določenim kotom glede na smer vlaken). S križnim lepljenjem lesenih lamel dosežemo, da imajo leseni elementi bolj enakomerne mehanske lastnosti in se pri obremenitvah obnašajo bolj homogeno, zaradi česar se prerezi tudi manj krivijo in ne pokajo. Materialne karakteristike plošč lahko določimo eksperimentalno ali z ustreznimi računskimi metodami, ki bodo predstavljene v nadaljevanju diplomske naloge.

Zaradi medsebojne pravokotne usmerjenosti desk po slojih lahko plošče iz masivnega lesa prenašajo obtežbe v obeh smereh poteka desk. Za plošče iz masivnega lesa, ki so obremenjene pravokotno na ravnino, je potrebno upoštevati različno togost za vsako od smeri poteka desk .

V evropskem tehničnem soglasju ETA-06/0138 za KLH (Kreuzlagenholz) plošče iz masivnega lesa, za katerega je soglasje pridobilo avstrijsko podjetje KLH Massivholz GmbH, z namenom uporabe plošč iz masivnega lesa kot nosilnih elementov v gradbeništvu, so navedene mehanske karakteristike (mehanske karakteristike veljajo za posamezen sloj desk), prikazane v preglednicah 2.1 in 2.2.

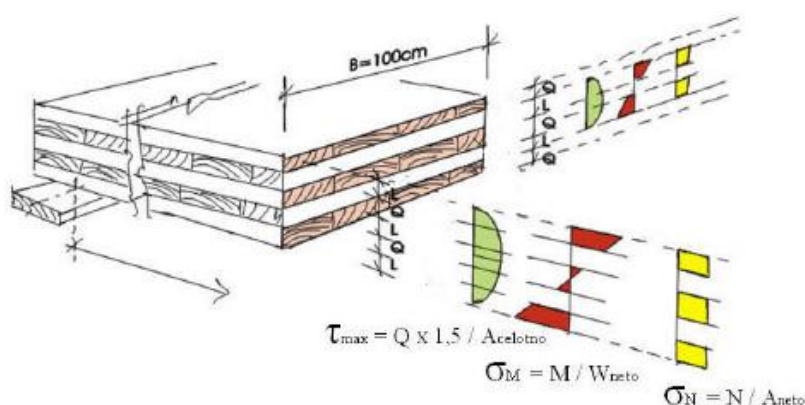
Preglednica 2.1: Mehansko delovanje pravokotno na ploščo iz masivnega lesa (ETA-06/0138, 2006)

ER	Zahteva	Metoda preverjanja	Razred / Kategorija rabe / Številčna vrednost
1	Mehanska odpornost in stabilnost		
	1. Mehansko delovanje pravokotno na ploščo iz masivnega lesa		
	Modul elastičnosti - vzporedno z vlakni desk $E_{0, \text{mean}}$	I_{eff} Dodatek 4 CUAP 03.04/06, 4.1.1.1	12.000 MPa
	- pravokotno na vlakna desk $E_{90, \text{mean}}$	EN 338	370 MPa
	Strižni modul - vzporedno z vlakni desk G_{mean}	EN 338	690 MPa
	- pravokotno na vlakna desk, kotalni strižni modul $G_{R, \text{mean}}$	CUAP 03.04/06, 4.1.1.1	50 MPa
	Upogibna trdnost - vzporedno z vlakni desk $f_{m, k}$	W_{eff} Dodatek 4 CUAP 03.04/06, 4.1.1.1	24 MPa
	Natezna trdnost - pravokotno na vlakna desk $f_{t, 90, k}$	EN 1194, zmanjšano	0,12 MPa
	Tlačna trdnost - pravokotno na vlakna desk $f_{c, 90, k}$	EN 1194	2,7 MPa
	Strižna trdnost - vzporedno z vlakni desk $f_{v, k}$	EN 1194	2,7 MPa
	- pravokotno na vlakna desk (kotalna strižna trdnost) $f_{R, v, k}$	A_{tot} , Dodatek 4 CUAP 03.04/06, 4.1.1.3	1,5 MPa
	2. Mehansko delovanje v ravnini plošče iz masivnega lesa		
	Modul elastičnosti - vzporedno z vlakni desk $E_{0, \text{mean}}$	A_{net} , I_{net} , Dodatek 4 CUAP 03.04/06, 4.1.2.1	12.000 MPa
	Strižni modul - vzporedno z vlakni desk G_{mean}	A_{net} , Dodatek 4 CUAP 03.04/06, 4.1.2.3	250 MPa
	Upogibna trdnost - vzporedno z vlakni desk $f_{m, k}$	W_{net} , Dodatek 4 CUAP 03.04/06, 4.1.2.1	23 MPa

Preglednica 2.2: Mehansko delovanje v ravnini plošče iz masivnega lesa (ETA-06/0138, 2006)

ER	Zahteva	Metoda preverjanja	Razred /Kategorija rabe / Številčna vrednost
1	2. Mehansko delovanje v ravnini plošče iz masivnega lesa		
	Natezna trdnost - vzporedno z vlakni desk $f_{t, 0, k}$	EN 1194	16,5 MPa
	Tlačna trdnost - vzporedno z vlakni desk $f_{c, 0, k}$ - koncentrirano, vzporedno z vlakni desk $f_{c, 0, k}$	EN 1194 CUAP 03.04/06, 4.1.2.2	24 MPa 30 MPa
	Strižna trdnost - vzporedno z vlakni desk $f_{v, k}$	A_{net} , Dodatek 4 CUAP 03.04/06, 4.1.2.3	5,2 MPa
	3. Drugo mehansko delovanje		
	Lezenje in trajanje obtežbe	EN 1995-1-1	
	Dimenzijska stabilnost Vsebnost vlage v življenjski dobi se ne sme spremeniti do te mere, da nastanejo škodljive deformacije.		
	Vezna sredstva, glej Dodatek 5	EN 1995-1-1	

V splošnem lahko pri določitvi mehanskih lastnosti križno lepljenih panelov sloje, ki so obremenjeni pravokotno na vlakna, izločimo iz računa oziroma jih ne upoštevamo. Tako predpostavimo, da sta modul elastičnosti in strižni modul v smeri pravokotno na vlakna enaka nič in da obtežbo prevzemajo le sloji, katerih vlakna potekajo vzporedno s smerjo napetosti. Predpostavljene razporeditve napetosti za takšen primer so predstavljene na sliki 2.4.

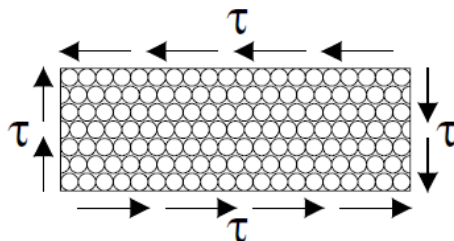


Slika 2.4: Predpostavljena razporeditev napetosti v križno lepljeni leseni plošči (KLH)

Vendar pa ta predpostavka lahko povzroči velike razlike med računskimi in eksperimentalnimi rezultati.

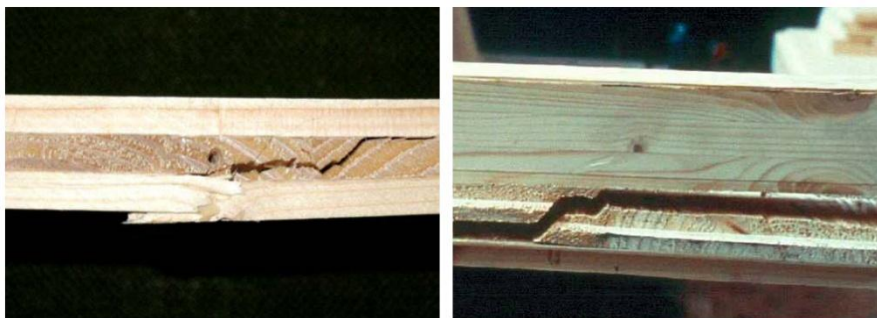
2.3.1 Vpliv strižnega modula pravokotno na vlakna (rolling shear) na trdnost in togost križno lepljenih plošč (Fellmoser et al., 2004)

Strižni modul pravokotno na vlakna $G_{r,\text{mean}}$ oz. kotalni strižni modul (rolling shear) je definiran v ravnini pravokotno na smer vlaken. Zaradi zelo majhne strižne togosti prečnih slojev v lesu lahko pride do omembe vrednih deformacij. Na sliki 2.5 je viden shematski prikaz strižnih napetosti v prečnih slojih.



Slika 2.5: Strižne napetosti τ pravokotno na smer vlaken (Fellmoser et al., 2004)

Na spodnji sliki (slika 2.6) je prikazana porušitev zaradi prekoračitve strižne trdnosti pravokotno na smer vlaken v križno lepljenem lesenem elementu:



Slika 2.6: Porušitev zaradi “rolling shear” (Fellmoser et al., 2004)

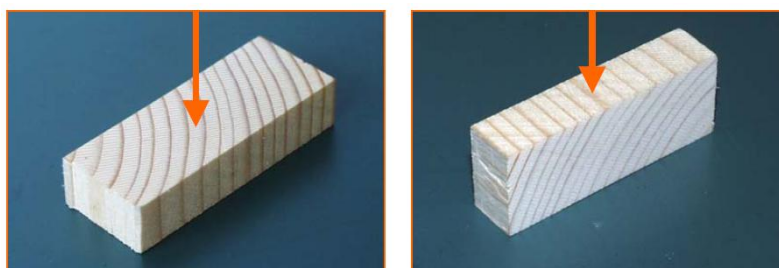
Za določitev strižnega modula $G_{r,mean}$ preizkušancev iz smrekovega lesa sta P: Fellmoser in H.J. Blass uporabila dinamično metodo merjenja frekvenc upogibnih vibracij.

Za preizkušance z velikimi razmerji med dolžino in višino (L/d) ali z majhnim razmerjem med elastičnim in strižnim modulom vzporedno z vlakni ($E_{0,mean}/G_{mean}$) je vpliv strižnega modula pri upogibu majhen. V tem primeru se lahko strižni modul le grobo oceni. Seveda je zato bolj smiselno uporabiti preizkušance z majhnim razmerjem L/d ali velikim razmerjem $E_{0,mean}/G_{mean}$.

Preizkušanci so bili dobljeni iz različnih križno lepljenih panelov z različnimi nominalnimi debelinami. Za namen preizkusa so križno lepljene panele razslojili in uporabili srednji sloj,

katerega debelina je bila zmanjšana na 10 mm. Preizkušanci so bili izpostavljeni konstantni temperaturi 20°C in relativni vlažnosti 65%. Povprečna vlažnost preizkušancev je bila 12,2%. Opravljene so bili tri serije preizkusov.

Izmerjene so bile upogibne vibracije v smeri vlaken in pravokotno na smer vlaken, kot kaže spodnja slika:



Slika 2.7: Preizkušanca obremenjena v smeri vlaken (levo) in pravokotno na smer vlaken (desno) (Fellmoser et al., 2004)

Vrednosti strižnega modula pravokotno na vlakna ($G_{r,mean}$) so bile pri preizkušancih iz smrekovega lesa med 40 N/mm² in 80 N/mm², kar je odvisno od preizkušanca in njegove gostote.

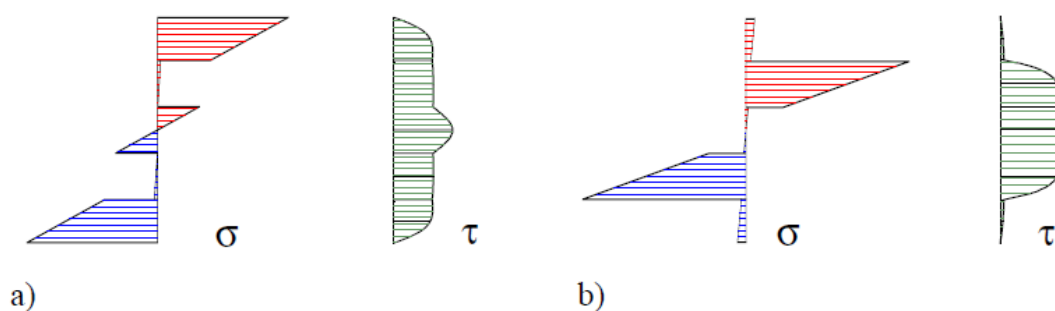
Prvi testi so pokazali, da sta strižni modul pravokotno na vlakna ($G_{r,mean}$) in modul elastičnosti pravokotno na vlakna ($E_{90,mean}$) močno odvisna od orientacije letnic v lesu. Na osnovi teh spoznanj so bili opravljeni nadaljni preizkusi za določitev $G_{r,mean}$ in $E_{90,mean}$.

Vpliv orientacije letnic v lesu na $E_{90,mean}$ in $G_{r,mean}$ so analizirali na osnovi metode končnih elementov. Ugotovili so, da se za majhna odstopanja letnic od 0° in 90° $E_{90,mean}$ drastično zmanjša, $G_{r,mean}$ pa ostane skoraj nespremenjen. Za letnice, ki so orientirane približno pod kotom 45° pa $G_{r,mean}$ drastično naraste, celo do štirikratne začetne vrednosti, $E_{90,mean}$ pa ostane skoraj nespremenjen. Zaradi ukrivljenih letnic v preizkušancih se vpliv orientacije letnic na $G_{r,mean}$ ni dalo določiti. Posledično tudi teoretični rezultati, pridobljeni z metodo končnih

elementov z ravnimi letnicami v prečnem prerezu, niso mogli biti potrjeni z metodo merjenja frekvenc upogibnih vibracij.

Modeliranje masivnih križno lepljenih lesenih panelov

Razporeditev napetosti in deformacij v masivnih križno lepljenih lesenih panelih, ki so obremenjeni pravokotno na svojo ravnino, je odvisna od strižnih deformacij. Zaradi relativno majhnega $G_{r,mean}$ se strižne deformacije zelo povečajo v odvisnosti od debeline strižnega sloja v panelu. Klasična Kirchhoff-ova teorija plošč (glej poglavje 4) v tem primeru ne velja zaradi relativno velikih strižnih deformacij, katerih ne moremo zanemariti. Slika 2.8 prikazuje razporeditev normalnih in strižnih napetosti zaradi upogiba pravokotno na ravnino plošče in sicer v primeru (a) z vzporedno razporeditvijo zunanjih slojev glede na smer prenosa obtežbe, v primeru (b) pa s pravokotno razporeditvijo zunanjih slojev glede na smer prenosa obtežbe v masivnih panelih iz petih križno lepljenih slojev.



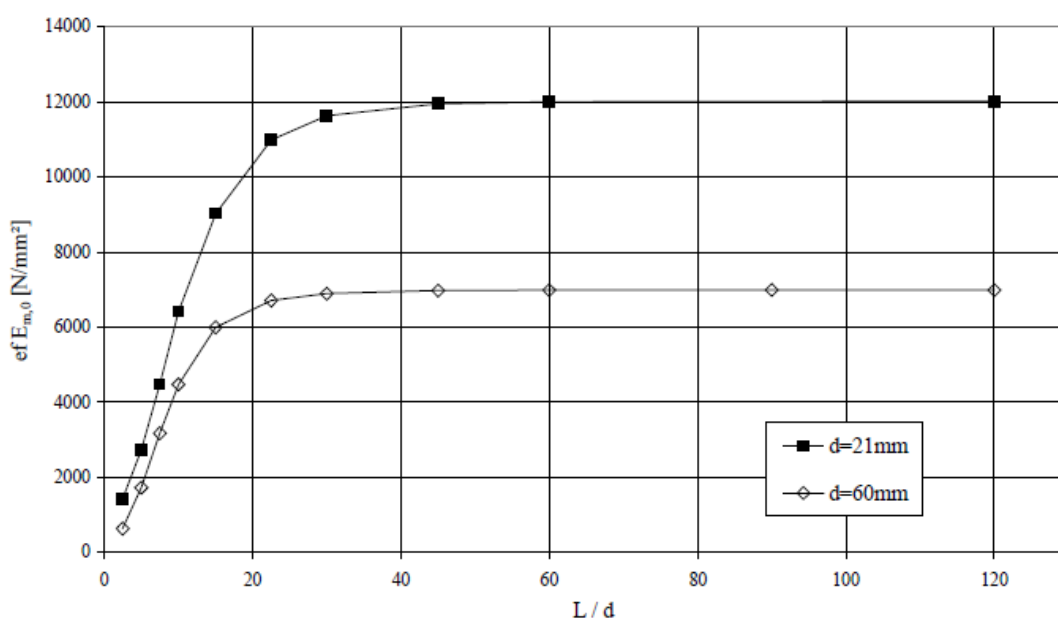
Slika 2.8: Upogibne napetosti in strižne napetosti masivnega lesenega panela iz petih križno lepljenih plošč (Fellmoser et al., 2004)

Pri preiskavah upogibnega obremenjevanja pravokotno na ravnino panelov in z zunanjim slojem desk v smeri vzporedno glede na smer prenosa obtežbe, so spreminjali razpon panelov in ugotavljali vpliv na efektivni modul elastičnosti. Efektivni elastični modul je povezan z efektivno upogibno togostjo. Materialne karakteristike preizkušancev: $E_{0,mean}=12500 \text{ N/mm}^2$, $E_{90,mean}= E_{0,mean}/30$, $G_{mean}= 500\text{N/mm}^2$ in $G_{r,mean}= 50 \text{ N/mm}^2$. Primerjali bomo rezultate za dve troslojni plošči, katerih dimenzije so podane v preglednici 2.3.

Preglednica 2.3: Sestava analiziranih križno lepljenih plošč

Število slojev	Nazivna debelina (mm)	Sestava prereza (mm)
3	21	6,9 / 7,2 / 6,9
3	60	6,9 / 46,2 / 6,9

Vpliv razmerja razpona panela in njegove debeline na efektivni modul elastičnosti je prikazan na sliki 2.9.

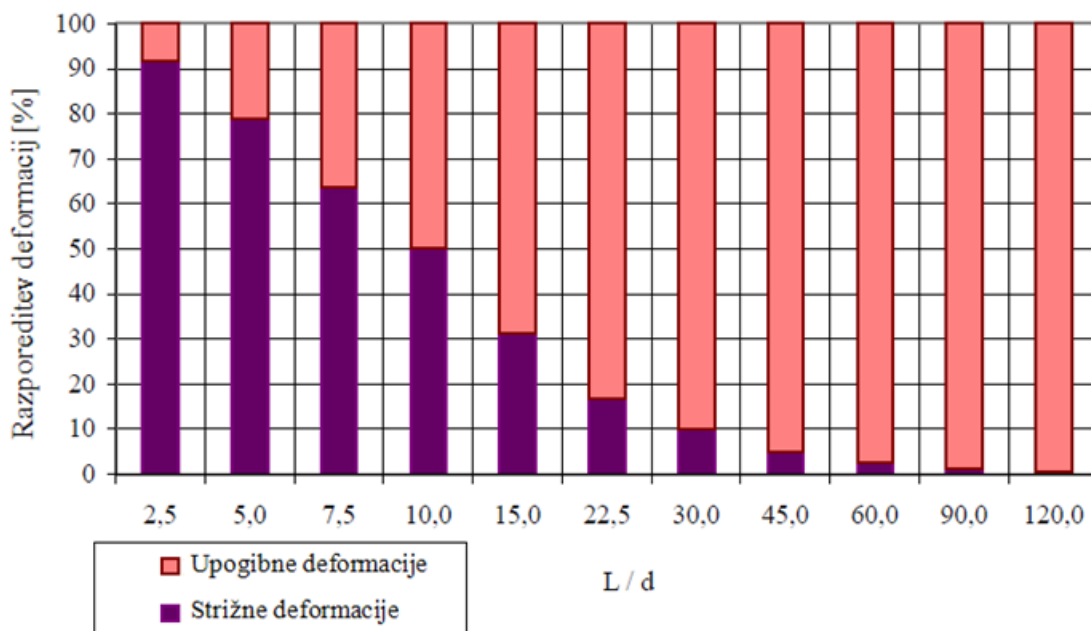


Slika 2.9: Efektivni modul elastičnosti v odvisnosti od razmerja razpona panela in njegove debeline (L/d) (Fellmoser et al., 2004)

Strižni vpliv je bil opažen pri razmerju razpona in debeline panela (L/d), ki je manjši kot 30. Če se to razmerje manjša, se strižni vpliv večja, kot je razvidno iz slike 2.9. Posledično se efektivni modul elastičnosti manjša. Ugotovimo lahko tudi, da je strižni vpliv glede na efektivni elastični modul pri plošči z večjo nazivno debelino (60 mm) večji kot pri tanjši plošči z nazivno debelino 21 mm, to pa zaradi debelejšega srednjega strižnega sloja.

Pri upogibu panela pravokotno glede na njegovo ravnino in z zunanjimi sloji pravokotno glede na smer prenosa obtežbe je bil strižni vpliv znaten pri razmerju $L/d < 20$.

Na sliki 2.10 je prikaz razmerja strižnih in upogibnih deformacij pri masivnem lesenem panelu iz križno lepljenih plošč z nazivno debelino 60 mm pri upogibu pravokotno glede na ravnino panela s smerjo zunanjih slojev vzporedno glede na smer prenosa obtežbe. Zaradi relativno majhnega strižnega modula pravokotno na vlakna ($G_{r,mean}=50 \text{ N/mm}^2$) delež strižnih deformacij opazno narašča z manjšanjem razmerja L/d . Pri majhnem razmerju med razponom panela in njegovo debelino morajo biti torej strižne deformacije upoštevane.



Slika 2.10: Delež strižnih in upogibnih deformacij v odvisnosti od razmerja med razponom in debelino panela z nazivno debelino 60 mm pri upogibu pravokotno glede na ravnino panela s smerjo zunanjih slojev vzporedno glede na smer prenosa obtežbe (Fellmoser et al., 2004)

Zaradi zelo majhnega strižnega modula v smeri pravokotno na vlakna strižne deformacije znatno narastejo v odvisnosti od debeline panela..

2.4 Konstrukcijski sistemi in prednosti križno lepljenega lesa

Konstrukcije iz križno lepljenega lesa se med lesenimi nosilnimi sistemi vse bolj in bolj uveljavljajo. Statistika kaže, da uporaba masivnega križno lepljenega lesa narašča med večnadstropnimi stavbami in objekti večjih dimenzij, prav tako pa pokrivajo vse večji delež med montažnimi stanovanjskimi objekti (sliki 2.11 in 2.12).



Slika 2.11: Primer stanovanjskega objekta iz križno lepljenih masivnih panelov (KLH)

Poleg uporabe v eno- in večetažni stanovanjski gradnji je konstrukcijski sistem iz križno lepljenega lesa v svoji kratki zgodovini že dokazal izredno uporabnost tudi v gradnji poslovnih, industrijskih, servisnih, komunalnih, sakralnih ter inženirskih objektov, kot so na primer mostovi. Sistem ponuja tudi velike možnosti pri dozidavah in nadzidavah obstoječih zgradb.



Slika 2.12: Primer večnadstropnega objekta iz križno lepljenih masivnih panelov (KLH)

Križno lepljene plošče se lahko uporabljajo kot nosilni in nenosilni elementi, dopuščajo pa tudi možnost kombiniranja z jeklom, steklom in vsemi ostalimi tradicionalnimi gradbenimi materiali, s čimer ponujajo največjo možno svobodo v arhitekturi.

Prednosti konstrukcijskega sistema iz križno lepljenega lesa temeljijo na razlogih, kot so:

- visoka stopnja predizdelanosti, saj so konstrukcijski elementi v celoti izdelani v delavnici pod kontroliranimi pogoji
- metoda križnega lepljenja lamel zagotavlja materialu dobre splošne mehanske lastnosti in toplotno izolativnost, poleg tega pa se konstrukcije iz takšnega materiala dobro obnašajo tudi v primeru potresa in požara
- velika duktilnost in dobre splošne lastnosti pri disipaciji energije v odvisnosti od sistema in načina mehanskih povezav
- velika trdnost in togost v ravnini ne glede na kvaliteto lesa, zaradi česar je omogočena tudi uporaba domačega lesa slabše kvalitete
- proces obdelave in gradnje konstrukcij je izjemno hiter, posledično s tem vremenski pogoji pri procesu gradnje nimajo velikega vpliva
- ekonomičnost in prijaznost okolju
- ni potrebna visoko kvalificirana delovna sila

Z različno površinsko obdelavo konstrukcije iz križno lepljenega lesa lahko ustvarimo videz zidane stavbe, pri tem pa ohranimo zdravo bivalno okolje, ki ga ponuja les. Sistem tudi v notranjosti s svojo konstrukcijsko zasnovo ne kvari funkcionalnosti prostora in ima pri statično zahtevnejših konstrukcijah celo določene prednosti pred klasično grajenimi objekti.

3 POTENCIAL MODULARNE GRADNJE IZ KRIŽNO LEPLJENEGA LESA

Križno lepljene lesene plošče so inovativen material in trenutno ena najbolj uporabnih oblik lesa v gradbeništvu. Struktura plošč omogoča poleg velike nosilnosti tudi izjemno racionalno izrabo prostora. Za proizvodnjo materiala je potrebno relativno malo energije. Lesene križno lepljene masivne plošče kot konstrukcijski material v stanovanjskih objektih predstavljajo naravno bivalno okolje, ki vplivajo na prijetno počutje, saj ima les v primerjavi z ostalimi gradbenimi materiali (beton, jeklo) visoko toplotno kapaciteto, dobro toplotno izolativnost in omogoča difuzijsko odprtost prostora. Križno lepljene lesene masivne plošče hkrati omogočajo izredno arhitekturno kreativnost, modularnost ter s tem željeno mobilnost, kar že dokazujejo različni izjemni primeri v gradbeništvu, ki bodo predstavljeni v nadaljevanju tega poglavja.

Za izdelavo čim bolj učinkovitega in tankega sendvičastega konstrukcijskega sklopa je izjemnega pomena tudi učinkovita izolacija, ki bi ob tankosti KLH plošč omogočala izjemno tanke konstrukcijske elemente s čim višjimi mehansko-fizikalnimi lastnostmi. Od vseh izolacijskih materialov ima izolacija iz aerogela ene izmed najboljših karakteristik toplotne prevodnosti, zvočne izolativnosti in požarne odpornosti. Zaradi svoje učinkovitosti, ki je posledica nanostrukture, omogoča izjemno racionalno izrabo prostora. Proizvodnja materiala zahteva manj energije za enako učinkovitost izolacije kot pri konvencionalnih izolacijskih materialih.

3.1 Nanostrukturalna izolacija aerogel

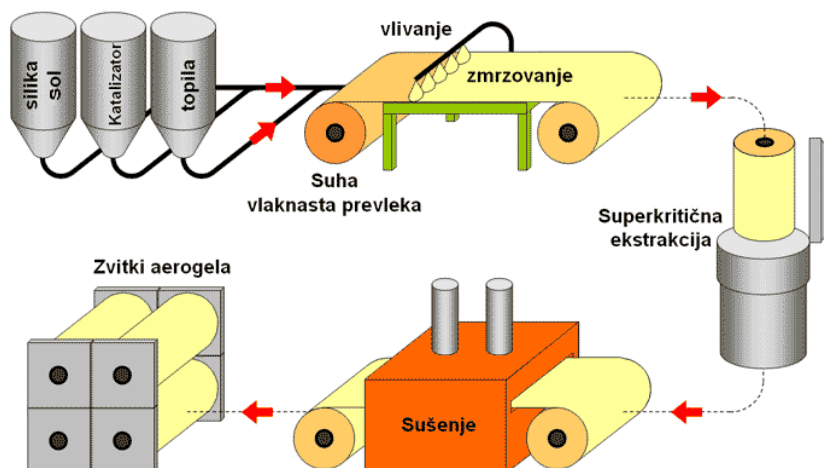
Aerogel je snov podobna gelu, v kateri tekočinsko sestavino zamenja plin. Nastane trdna snov z zelo majhno gostoto, ki ima več izrednih lastnosti, od katerih je najpomembnejša njena učinkovitost kot izolator, saj lahko skoraj izniči tri načine prenosa toplote (konvekcijo, prevajanje ali sevanje). Zaradi njegove polprosojne narave so ga poimenovali tudi »zmrznjeni

dim«, »trdi dim« ali »modri dim«. Z dovolj močnim pritiskom se aerogel zaradi redke in krhke sestave lahko hitro poruši oz. zdrobi. Kljub tej lastnosti ima aerogel veliko relativno nosilnost, saj lahko podpira telesa, ki so več kot 2000-krat težja od njega (slika 3.1). Izjemne nosilne lastnosti so posledica dendritne nanostrukture, ki ima trirazsežno luknjičavo zgradbo.



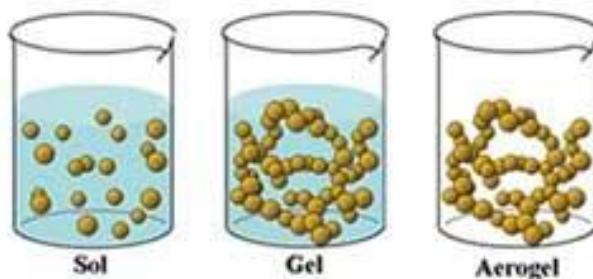
Slika 3.1: Aerogel, ki lahko prenese tudi več kot 2000-kratno lastno težo (Aerogel)

Načini proizvodnje različnih vrst aerogelov se razlikujejo med seboj. V splošnem aerogel nastaja neposredno iz tekočega gela v postopku, ki nadomesti tekočo fazo z zrakom. Predhodnik gela je mešanica kemikalij, ki lahko preko molekularne nukleacije preidejo v majhne koloidne delce. Gel nastane, ko se sproži raztopina teh razbitih nano delcev (disperzija silicijevega dioksida v vodi oz. v t.i. »soli«), ki oblikujejo poltrdo sestavino s kondenzacijo med delci. Ko nastane gel, se tekočina v gelu ne more svobodno razpršiti, ne teče ali spreminja oblike. Če je kemični pristop pravilen, lahko trdno telo v gelu ustvari mrežo por, ki omejuje tekočino. Pore imajo povprečno velikost 10 nm, njihovo velikost pa se lahko nadzira med proizvodnim procesom (slika 3.2).



Slika 3.2: Proizvodni proces aerogela (Aerogel)

Če je gel ustvarjen iz vodne faze, se poltrdna snov imenuje hidrogel, vodo pa je pred sušenjem potrebno zamenjati z organskim raztopilom. Če je gel ustvarjen v alkoholni fazi, se poltrda snov imenuje alkogel, ki se lahko posuši neposredno s povišanjem temperature in pritiskom raztopine znotraj gelne strukture preko njegove kritične točke. Ta superkritična ekstrakcija zmanjša površinsko napetost med tekočino in površinami trdnih por, tako da zmanjšanje zračnega tlaka pri temperaturah nad kritično pusti pore napolnjene s plinom.



Slika 3.3: Proces nastanka aerogela (Aerogel)

Poznamo več vrst aerogelov in sicer na osnovi silicijevega oksida, aluminijevega oksida, kromovega oksida, kositra in ogljika. Silikonski aerogel je dober izolator glede na prevajanje toplote, saj silicijev oksid slabo prevaja toploto. Kovinski aerogeli so na drugi strani boljši toplotni prevodniki. Ogljikov aerogel je dober izolator glede na sevanje, saj ogljik absorbira

infrardeče sevanje, ki prenaša toploto. Najboljši izolator je silikonski aerogel z dodanim ogljikom, kateri se uporablja tudi v izolacijskih odejah.



Slika 3.4: Primeri izolacijskih odej iz aerogela (Aerogel)

Aerogelna izolacija se uporablja v letalski, avtomobilski, naftni, plinski, gradbeni, vesoljski, vojaški, farmacevtski, tekstilni ter mnogih drugih industrijah, ki zahtevajo maksimalno toplotno zaščito znotraj tesnih prostorov, omejitev teže, absorbcijo energije in zaščito pred ognjem. Izolacija se proizvaja v obliki fleksibilne nanoporozne odeje.

Aerogelno izolacijo odlikujejo:

- dva- do osemkrat manjša toplotna prevodnost pri enaki debelini sloja izolacije v primerjavi s konkurenčnimi materiali
- nizka teža ob manjši debelini in profilu izolacijskega sloja
- odpornost na visoke temperature, preprečevanje širjenje plamena in dima
- odlična zvočna izolativnost
- vodoodbojnost (hidrofobnost) in hkratna paropropustnost (omogoča prehajanje plinov)
- preprečevanje in učinkovito odpravljanje procesov korozije
- odpornost na kompresijo
- robustnost, fleksibilnost, preprosto nanašanje, oblikovanje in obdelovanje
- do petkrat nižji stroški prevoza in skladiščenja kot pri tradicionalnih vrstah izolacije

- ne predstavlja nobene nevarnosti za zdravje ali dobro počutje za človeka, ker je narejena iz naravnih materialov in tako prijazna okolju (Aerogel)

Lastnosti aerogelne izolacije so naslednje:

- toplotna prevodnost: 0,014-0,021 W/(mK)
- trajna temperatura uporabe: -273°C do 650°C
- aerogel je sestavljen pretežno iz zraka (90-99%)
- gostota: od 130 kg/m³ do 180 kg/m³
- nazivne površine so med 400 m²/g in 1000 m²/g, odvisno od oblikovanja
- hitrost zvočnega valovanja okoli 100m/s

3.2 Prednosti inovativne modularne gradnje

Križno lepljen les in aerogel imata skupaj izjemen potencial v trajnostnem gradbeništvu. Konstrukcijski sklopi iz obeh materialov so odlično izolativni, zahtevajo majhno količino energije in izpusta CO₂ za proizvodnjo, obenem pa omogočajo nadpovprečno izrabo prostora. Konstrukcijska enota, ki bi jo sestavljali konstrukcijski sklopi izolacije iz aerogela in križno lepljenih KLH panelov, bi bila lahko nadgrajena še z mobilnostjo, razširljivostjo in modularnostjo. Enote bi se lahko prilagajale prostoru in uporabnikom. Nadgradnja enote s fotovoltaike, sprejemniki solarne energije in vodnimi filtri za prečiščevanje vode pa bi omogočala tudi skorajšnjo samozadostnost in neodvisnost stavbe od obstoječe infrastrukture. Ideja je torej zasnovati prototip stavbe v obliki ene modularne enote, ki bo imela zelo majhen okoljski odtis.

Konstrukcija bi predstavljala osnovni gradnik večje trajnostne stavbe, inovativni sistem gradnje z novimi konstrukcijskimi sklopi pa bi omogočal enostavno gradnjo tudi večjih objektov ali samo delov objekta z izjemno kratkim časom postavitve. Sklopi izolacije iz aerogela in nosilnih plošč KLH bi omogočali tudi hitro in učinkovito energetske sanacije objektov z izdelavo montažne fasade, ki bi se lahko priklopila obstoječemu objektu.

Namen naloge je zasnovati modularno enoto iz križno lepljenega lesa, ki bi bila multifunkcionalna, dinamična, nizkoenergijska, v precejšni meri tudi samozadostna in trajnostna. S tem bi bil zagotovljen relativno majhen vpliv na okolje, tako v procesu proizvodnje, kakor tudi v času uporabe objekta. Z razvitimi tehničnimi rešitvami bi bila omogočena skorajšnja neodvisnost od komunalne infrastrukture in geografije terena. S svojo spremenljivo obliko bi se modularna enota lahko prilagodila klimatskim in topografskim razmeram ter trenutnim potrebam uporabnikov po prostoru in svetlobi.

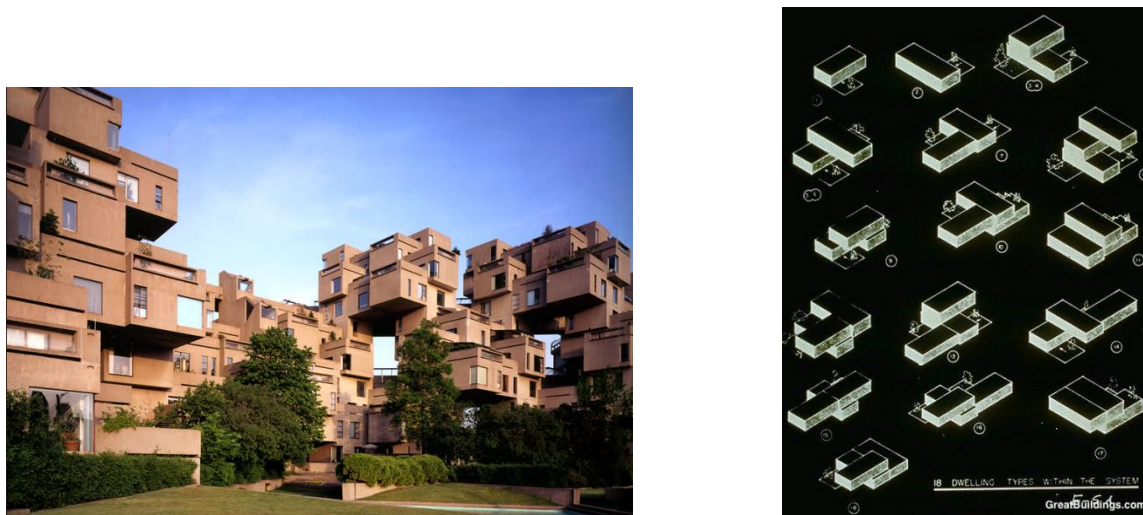
Enota je zasnovana z dimenzijami, katere bi bile še znotraj meja, ki so dovoljene za redni cestni transport. Namen je, da bi se končane enote naložilo na redno cestno transportno vozilo in jih postaviti praktično kamorkoli, saj pri tem ne bi bilo treba uporabiti posebnega avtodvigala ali upoštevati ovir terena. Enote bi se lahko med seboj kombinirale, sestavljale in tako tvorile funkcionalno celoto, izdelano po potrebah in željah uporabnika.

Modulanost

Enote iz križno lepljenega masivnega lesa bi bile zasnovane v modularnem sistemu. To pomeni, da bi se osnovni modularni enoti lahko priključevale dodatne enote in bi skupaj tvorile nov konstrukcijski sistem. Osnovna širina in višina bi bili fiksni, saj bi morala enota v skrčenem sistemu ustrezati dimenzijam regularnega transporta. Dolžina pa bi bila lahko bolj fleksibilna in sicer do 13,5 m (pogojeno z dolžino tovornega vozila in regulaciji o cestnih vozilih). Za dolžino osnovne modularne enote predpostavimo dolžino 4,5 m, širino 2,5 m in višino 2,7 m. Kombinacija različnih dolžin enot ter različnih možnih smeri povečevanja enot bi lahko pripeljala do izjemno zanimive oblike končnega sistema enot, ki bi se tudi kot celota lahko še vedno prilagajal prostoru, v katerega bi bil umeščen. Najbolj ugodna rešitev za združevanje posamezih enot bi bil nek univerzalen sistem, kar pomeni, da bi se lahko vse enote spajale med sabo na enak način, edina omejitev bi bila statična presoja skupnega sistema enot. Enote bi se lahko pritrjevale tudi na obstoječe objekte.

Modularnost sama po sebi omogoča ogromno tlorisnih variant, vodoravno in navpično rast, do neke mere pa celo možnost prilagajanja različnim okoljem. Poleg tega so enote, izdelane v tovarni, zagotovo boljše od tistih, ki bi jih naredili na gradbišču, torej na prostem.

Eden najbolj znanih primerov modularno zasnovane zgradbe iz logično zaključenih prefabriciranih enot je stanovanjski kompleks »Habitat 67« v Montrealu (Kanada), ki je bil zgrajen za potrebe Expa iz leta 1967. Armiranobetonski konstrukcijski sistem je sestavljen iz 354 modulov in sestavlja 148 stanovanjskih enot, visok pa je 12 nadstropij (slika 3.5).



Slika 3.5: Modularni konstrukcijski sistem »Habitat 67«, Montreal (Habitat)

Kot primer modularne gradnje iz masivno križno lepljenih plošč pa lahko predstavimo projekt dogradnje hotela Kornock v Avstriji. V zelo kratkem času so obstoječemu objektu priključili 3-etažni prizidek s kapaciteto 42 prenočišč oziroma 756 m² uporabnih površin. Za priključitev modulov iz križno lepljenega lesa so potrebovali teden in pol, skupen čas gradnje s celotno notranjo opremo modularnih enot pa je bil mesec dni.



Slika 3.6: Modularne enote iz križno lepljenih plošč – Hotel Kornock (Die.modulfabrik)

Enote bi bile opremljene z izvlečnim sistemom, ki bi omogočal povečanje notranjega prostora enote in s tem celotnega volumna enote, bodisi po širini, dolžini ali višini. Na tak način bi se prostornina in uporabna površina enote lahko povečala skoraj za dvakrat. V osnovi to pomeni, da bi bila enota v skrčenem stanju primerna za regularni transport. Možnost povečanja uporabnega prostora bi uporabniku omogočala predvsem, da bi lahko prostor, ki ga zavzema enota, prilagodil prostoru, kjer bo le-ta postavljena in njegovim trenutnim potrebam.

Z izvlečnimi mehanizmi bi omogočili prilagoditev enote trenutnim prostorskim zahtevam uporabnika. Mehanizem bi omogočal enostaven in stabilen premik objekta ali dela objekta, s čimer bi se spremenila zunanja geometrija objekta in pa notranja struktura prostora.

Multifunkcionalnost

Enote bi imele zelo velik potencial, saj bi bile s svojo modularnostjo, prilagodljivostjo, mobilnostjo in primernimi tehnološkimi rešitvami primerne za širok spekter uporabe. Ovoj stavbe bi bil zaradi toplotno izolativnega materiala aerogel izjemno prilagodljiv glede na različne podnebne razmere, tako da bi bila uporaba enot lahko razširjena v globalnem geografskem smislu. Dodano vrednost pa bi predstavljala predvsem samozadostnost in tako rekoč instantna postavitve objekta. Na ta račun bi bile enote zelo primerne za uporabo v primeru potrebnega interventnega posredovanja po naravnih nesrečah, saj bi lahko v zelo kratkem času postavili celotno naselje, ki bi se bilo sposobno samo vzdrževati v zelo veliki meri, saj ne bi potrebovalo komunalne infrastrukture, ki bi bila v primeru naravnih nesreč lahko poškodovana. Za razliko od bivalnih kontejnerjev, ki se uporabljajo v današnjem času, bi bile lesene bivalne enote tudi bolj estetske, primernejše za bivanje in bolj funkcionalne. Na določenem področju naravne nesreče bi lahko ostale tudi dalj časa brez večje zunanje podpore.

Možno področje uporabe enot bi predstavljala tudi stanovanjska gradnja in gradnja poslovnih objektov, saj bi razvite osnovne enote omogočale gradnjo tako enostanovanjskih kot tudi večstanovanjskih objektov ter priključitve obstoječim objektom v obliki prizidkov ali nadzidav. Skupine omenjenih modularnih konstrukcijskih sistemov bi omogočale gradnjo izjemno prilagodljivih spalnih naselij, v večnadstropnih izvedbah pa bi dale poseben pečat

tudi arhitekturi. Enote bi bile lahko izkoriščene tudi v obliki mobilnih otroških vrtcev z možnostjo povečevanja ali manjšanja kapacitet z dodajanjem ali odstranjevanjem osnovnih enot, odvisno od potrebe kapacitet, t.j. števila otrok.

Enote bi se lahko uporabljale tudi za potrebe vojske, na primer za postavitve oporišč na lokacijah izven območij, ki so oskrbljena s komunalno infrastrukturo in z elektriko. V takšnih primerih bi se prav tako v relativno kratkem času lahko postavile bivalne enote za večje število vojakov. Med eno od možnih področij uporabe enot bi sodilo tudi postavitve na gradbiščih ali sejmih.

Zanimiva možnost uporabe bi bila tudi za t.i. parazitne konstrukcije. To so relativno lahke konstrukcije, ki se lahko pritrjujejo na obstoječe objekte. Enote bi se tako lahko v obliki parazitnih konstrukcij vključile tudi v novogradnjo obstoječih objektov iz konvencionalnih materialov (AB, jeklo). Takšne vrste konstrukcij lahko na obstoječih objektih pustijo tudi velik arhitekturni pečat (sliki 3.7 in 3.8). Po potrebi bi se parazitna konstrukcija snela z objekta in bi bila na voljo za uporabo na neki drugi lokaciji, lahko tudi kot samostojna bivalna enota.

Kot primer parazitne gradnje bomo predstavili zanimivo konstrukcijo, ki se imenuje »Las Palmas«, postavljena pa je v Rotterdamu na Nizozemskem. Gre za parazitno konstrukcijo iz križno lepljenega lesa, ki je priključena obstoječemu objektu kar na vrhu dvigalnega jaška. Inštalacije kot so voda, kanalizacija in elektrika so bile priključene napeljavam obstoječega objekta. Omenjena parazitna konstrukcija je bila zgrajena iz prefabriciranih križno lepljenih plošč iz masivnega lesa, za gradnjo pa je bilo potrebnih le nekaj dni.



Slika 3.7: Primer parazitne konstrukcije »Las Palmas«, Nizozemska (Las Palmas)

Mobilnost

Enote bi bile lahko transportirane iz ene lokacije na drugo ob relativno nizkih stroških in težavah. Dimenzije enot v osnovnem neraztegnejnem položaju bi bile prilagojene regularnemu cestnemu transportu in bi se s tem ognili vsem težavam in stroškom izrednih prevozov. Zato bi jih lahko kadarkoli naložili na ustrezno tovorno vozilo in jih prepeljali na poljubno mesto. Ker bi bile enote relativno lahke, za dvigovanje oz. odlaganje enote ne bi potrebovali posebnih dvigal z veliko nosilnostjo, pač pa bi predvidoma zadoščala že enostavna avtodvigala, ki so sestavni del tovrstnih tovornih vozil. Sistem dvižnih hidravličnih nog bi enoti omogočal, da bi se prilagodila geometriji terena in bi jo lahko postavili praktično kamorkoli, tudi na hribovita območja ali v plitko vodo. Uporabnik bi imel lahko enoto tekom leta pripeto na svoj stanovanjski objekt, poleti pa bi bila enota uporabljena kot počitniška hišica na drugi lokaciji.



Slika 3.8: Primer mobilne bivalne enote (Wee house)

Zanimiv primer mobilne konstrukcije, ki je hkrati tudi parazitna, je bila poimenovana kar »Rucksack house«, ki v prevodu pomeni »hiša-nahrbtnik«. Namreč njeno lastnost, da je mobilna oz. prenosljiva, so ustvarjalci primerjali kar s prenosljivostjo nahrbtnika. Namen konstrukcije, katere ogrodje je jekleno, polnila pa so iz križno lepljenega lesa, je bil zagotoviti dodaten prostor v že obstoječem objektu, tako da so bivalno enoto parazitno priključili na obstoječi objekt. Dimenzije bivalne enote so $250 \times 360 \times 250$ cm, na objekt pa je priključena s sidranjem v zunanje stene objekta ter z jeklenimi vrvmi (slika 3.9). Enota se lahko po potrebi prestavi tudi na drugo lokacijo.



Slika 3.9: Primer mobilne parazitne konstrukcije »Rucksack house« na različnih lokacijah (Rucksack house)

Trajnost

Energijski odtis modularne enote bi bil zanemarljiv, saj bi večino energije in vode, potrebnih za normalno življenje uporabnikov, lahko pridobili iz naravnih virov (sonce, dež...). Poraba energije in izpust CO₂ za proizvodnjo materialov, iz katerih bi bila enota sestavljena, se ocenjuje kot neprimerno manjša kot bi bila za proizvodnjo konvencionalnih materialov z enakimi trdnostnimi in izolacijskimi karakteristikami.

S stališča porabe energije in varovanja okolja bi z razvojem takšnih enot lahko dosegli pozitiven vpliv na večih področjih:

- les kot osnovni konstrukcijski material omenjene bivalne enote bi predstavljal celovito zmanjšanje izpusta CO₂ v okolje, saj je les kot naravni material v primerjavi z ostalimi gradbenimi materiali in proizvodnjo le-teh okoljsko malo obremenjujoč
- nosilna konstrukcija objekta bi bila iz križno lepljenega lesa, katerega odlikuje tudi velika nosilnost glede na težo, kar pomeni, da bi bilo za transport materiala potrebnih manj prevozov in s tem manj izpustov škodljivih snovi v okolje
- v času gradnje ne bi bilo veliko odpadnega gradbenega materiala, saj bi bili elementi oz. enote popolnoma prefabricirane in pripeljane na gradbišče, kjer bi potekala montaža
- modularna enota bi bila opremljena tudi z aktivnim integriranim fotovoltaičnim sistemom za pridobivanje električne energije iz solarnih virov, ki bi se aktivno prilagajal položaju sonca in tako lahko imel optimalen izkoristek. Fotovoltaika bi s tem zagotavljala velik delež energijske potrebe v stavbi. Z uporabo sončnih panelov in toplotne črpalke pa bi bilo poskrbljeno tudi za primerno ogrevanje vode in celotnega objekta.

Samozadostnost

Vpliv modularne enote na okolje bi bil minimalen. Oskrba s pitno vodo in energijo je dandanes samoumevna, vendar vse večja poraba povzroča velike težave z nemoteno oskrbo z omenjenimi viri in z zagotavljanjem kvalitete le-teh. Modularne enote bi bile opremljene s fotovoltaičnimi paneli za pretvorbo sončne energije v električno, sistemom sončnih panelov za ogrevanje vode in toplotno črpalko za ogrevanje objekta. Glede na to, da bi imela lesena nosilna konstrukcija relativno veliko toplotno kapaciteto, bi predvideni fazni zamik za enoto trajal tudi do polovice dneva, kar bi omogočalo še toliko bolj racionalno porabo energije.

Teoretično bi bila lahko omenjena modularna enota skoraj samozadostna in ne bi potrebovala priključitve na javno vodovodno in elektro-distribucijsko omrežje. Preučiti bi bilo potrebno možnosti prečiščevanja odpadnih voda in njenega odvajanja v okolje. Ena od možnih rešitev bi bili filtracijski sistemi za gospodinjstva in čiščenje voda pri proizvodnih procesih s sistemi ultrafiltracije. Pri tem bi bilo potrebno s kombinacijami različnih sistemov filtracijo in prečiščevanje pokriti za zelo širok spekter kontaminantov. Za zbiranje in shranjevanje deževnice bi lahko uporabili hranilnike oz. vreče iz ustreznega materiala, ki bi se nahajale pod

modularno enoto. Glede na količino zbrane vode bi se enota prilagajala potrebni višini s pomočjo dvižnega mehanizma v obliki hidravličnih samonivelirnih nog. Deževnica bi se iz hranilnika po trenutnih potrebah prečistila preko nano in ultra filtrov ter ustreznih prečiščevalnih procesov v pitno vodo.

S temi tehnologijami bi enota lahko postala skoraj samozadostna in bi jo bilo možno postaviti tudi tam, kjer ni ustrezne infrastrukture, s čimer bi se zmanjšal celoten negativen vpliv gradbenega objekta na okolje.

Inovativnost in potrebne raziskave

Zavedamo se, da bi bilo za realizacijo vseh idej o potencialu modularne gradnje iz križno lepljenega lesa potrebnih veliko inovativnih rešitev in študij. Ob tem bi morali izvesti tudi veliko število preiskav in eksperimentov, za kar so poleg znanja potrebna tudi finančna sredstva. Terenske raziskave bi služile kot dopolnilo teoretičnemu delu študij.

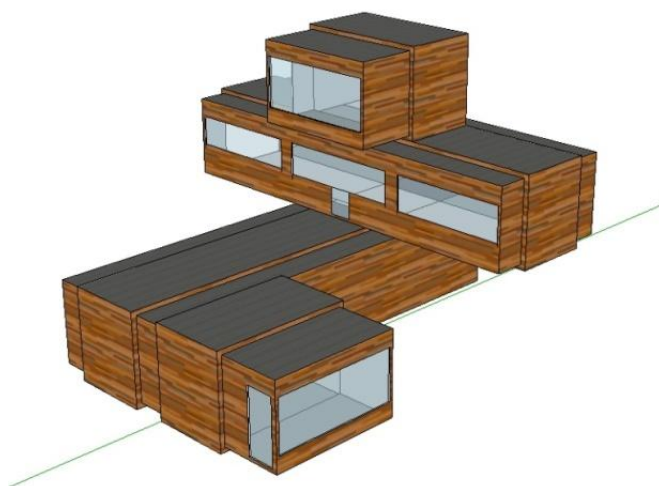
Na spodnjih slikah so prikazane ideje možnih geometrij modularnih enot iz križno lepljenega lesa z različnimi variacijami združevanj enot in možnostmi izvleka notranjega dela modularnih enot.



Slika 3.10: Osnovni moduli različnih geometrij z možnimi variantami izvleka



Slika 3.11: Dva združena osnovna modula z možnimi variantami izvleka

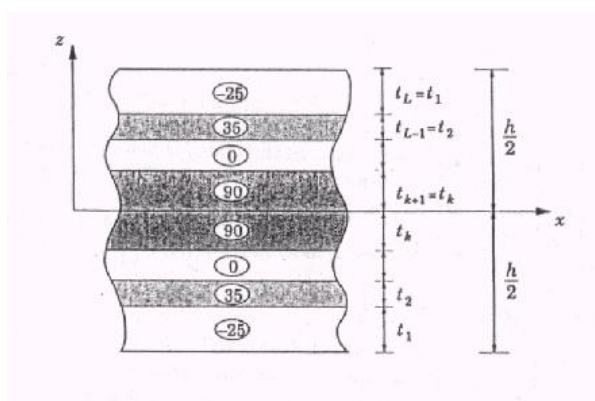


Slika 3.12: Združeni osnovni moduli različnih geometrij z možnimi variantami izvleka

V nadaljevanju diplomske naloge (poglavje 6) se bomo osredotočili na študijo statičnih nosilnosti osnovne modularne enote v večih fazah uporabe le-te. Študija bo obravnavala osnovne obremenitve posameznih enot, stoječih na izvlečnih nogah in obremenjenimi z lastno težo, koristno obtežbo, snegom in vetrom. Na podlagi analize bodo določene odprtine za okna, vrata, potrebne debeline plošč za nosilno konstrukcijo itd.

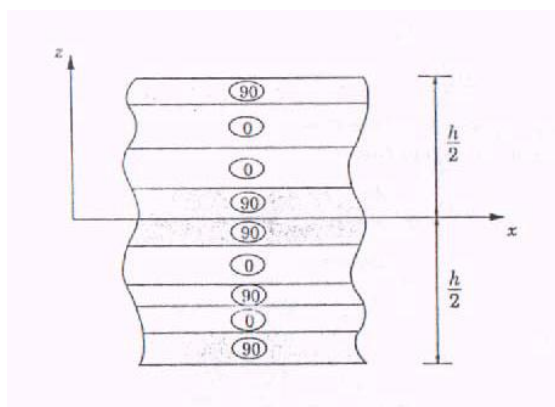
4 RAČUNSKA ANALIZA KOMPOZITNIH LAMINATOV

Kompozitni laminati so zbirka skupaj zloženih lamin oz. slojev iz različnih ali enakega materiala in sestavljajo element z določeno debelino ter nosilnostjo. V to skupino materialov lahko uvrstimo tudi križno lepljene plošče iz masivnega lesa. Laminati so torej sestavljeni iz večih lamel, ki imajo določene orientacije vlaken, debelino in materialne lastnosti. V splošnem ima lahko vsaka lamina oz. sloj laminata poljubno orientacijo vlaken glede na osnovni koordinatni sistem laminata, različno debelino in različne materialne lastnosti. Kadar so debeline, material in orientiranost slojev simetrični glede na središčno ploskev laminata, dobimo simetrični laminat (slika 4.1).



Slika 4.1: Simetrični laminat (Petelin, 2003)

Laminat $(-45/45/45/-45) = (-45/45)_s$ je primer simetričnega orientiranega laminata, $(0/90/90/0) = (0/90)_s$ pa predstavlja simetrični križni laminat. Laminat $(30/-45/0/90/90/0/-45/30) = (30/45/0/90)_s$ je primer splošnega simetričnega laminata. Pri simetričnih laminatih zapišemo le zgornjo polovico plasti in dodamo črko »s«, npr. $(-45,45)_s$.



Slika 4.2: Križni nesimetrični laminat (Petelin, 2003)

Ko obravnavamo vsako lamino oz. sloj laminata posamezno, pri določevanju mehanskih lastnosti prereza in nosilnosti le-tega v splošnem nimamo večjih težav. Za veliko večino materialov imamo namreč na voljo podatke o mehanskih karakteristikah, ki so zbrani v raznih tehničnih priročnikih, dobljeni pa so na osnovi eksperimentalnih preiskav. Pri kompozitnih laminatih pa se mehanske lastnosti prereza spreminjajo v odvisnosti od materialov, iz katerih so posamezne lamine, od njihovih debelin, razporeditve slojev po prerezu, števila slojev in orientacije le-teh glede na geometrijski koordinatni sistem. Na podlagi tega lahko sklepamo, da je z eksperimentalnimi preiskavami skoraj nemogoče določiti obnašanje vseh možnih kombinacij kompozitnih laminatov, saj bi bilo za to potrebno veliko časa in denarja.

Zato se v tem primeru obrnemo na računske analize obnašanja kompozitnih laminatov. Iz znanih mehanskih karakteristik posameznih slojev želimo določiti karakteristike prereza laminata in analizirati njegovo obnašanje pri različnih obremenitvah. V tem poglavju se bomo osredotočili na izpeljavo enačb za določitev togostne matrike za posamezno lamelo, nato pa še na račun togostne matrike za celoten laminat, ki je sestavljen iz poljubnega števila lamel.

4.1 Posplošeni Hook-ov zakon

Pri izpeljavi mehanskih lastnosti posamezne lamine upoštevamo naslednje predpostavke:

- (i) lamina je brez razpok in mehurčkov

(ii) vsaka posamezna lamina se obnaša kot linearno elastičen material

Predpostavka (i) nam omogoča preučevanje makromehanskih lastnosti lamine, predpostavka (ii) pa nam dovoljuje uporabo Hook-ovega zakona, ki govori o linearni zvezi med napetostmi in deformacijami. Če bi obravnavali model na mikromehanskem nivoju, bi lahko obe predpostavki zanemarili.

Komponente tenzorja napetosti in deformacij bomo po dogovoru zapisovali na sledeč način:

Preglednica 4.1: Dogovor o zapisovanju komponent tenzorja napetosti in deformacij (Petelin, 2003)

NAPETOSTI		DEFORMACIJE	
tenzorska notacija	dogovor	tenzorska notacija	dogovor
σ_{11}	σ_1	ε_{11}	ε_1
σ_{22}	σ_2	ε_{22}	ε_2
σ_{33}	σ_3	ε_{33}	ε_3
σ_{23}	σ_4	$2\varepsilon_{23}$	ε_4
σ_{13}	σ_5	$2\varepsilon_{13}$	ε_5
σ_{12}	σ_6	$2\varepsilon_{12}$	ε_6

Posplošeni Hook-ov zakon za anizotropen material pri konstantni temperaturi je podan kot:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (4.1)$$

ali v bolj kompaktnem zapisu (preglednica 4.1) kot:

$$\sigma_{ij} = C_{ij} \varepsilon_j \quad (4.2)$$

kjer so $\sigma_{ij}(\sigma_i)$ komponente tenzorja napetosti, $\varepsilon_{ij}(\varepsilon_i)$ komponente deformacij in C_{ij} materialni koeficienti, ki so izračunani glede na geometrijski kartezijski sistem (x_1, x_2, x_3) .

Enačbe snovi za najbolj splošen primer materiala in njegovih lastnosti lahko zapišemo kot:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} \quad (4.3)$$

in inverz kot

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} \quad (4.4)$$

Iz enačbe enačb (4.3) in (4.4) je razvidno, da imamo za najbolj splošen primer 36 materialnih konstant, med katerimi je 21 med sabo neodvisnih (matriki $[C_{ij}]$ in $[S_{ij}]$ sta simetrični). Kadar material vsebuje kakršnokoli materialno simetrijo, se število neodvisnih materialnih koeficientov temu primerno zmanjša. V primeru izotropnega materiala so mehanske lastnosti neodvisne od smeri. Matriki $[C_{ij}]$ in $[S_{ij}]$ se reducirata tudi pri splošnem ortotropnem materialu, ki ima tri med sabo pravokotne simetrijske osi materiala. Zveze med napetostmi in deformacijmi potem lahko zapišemo kot:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} \quad (4.5)$$

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

4.2 Materialne konstante ortotropnega materiala

Pri materialih, ki so sestavljeni iz vlaken, določimo, da je smer vlaken vzporedna z x osjo materialnega koordinatnega sistema in sovпада z x osjo geometrijskega koordinatnega sistema. V tem primeru se togostni koeficienti C_{ij} lahko izrazijo z elastičnimi moduli, Poisson-ovimi količniki in s strižnimi moduli. Te materialne lastnosti določimo v laboratoriju s testi kot so enoosni nateg in čisti strig.

Za deformacijo ε_{11} pri enoosnem nategu v smeri 1 velja:

$$\varepsilon_{11} = \frac{\sigma_{11}}{E_1} \quad (4.7)$$

kjer je E_1 elastični modul v smeri vlaken. Za smeri 1, 2 in 3 veljajo naslednje enačbe:

$$\varepsilon_{11} = \frac{\sigma_{11}}{E_1} - \frac{\sigma_{22} \nu_{21}}{E_2} - \frac{\sigma_{33} \nu_{31}}{E_3} \quad (4.8)$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{\sigma_{22}}{E_2} - \frac{\sigma_{11} \nu_{12}}{E_1} - \frac{\sigma_{33} \nu_{32}}{E_3} \quad (4.9)$$

$$\varepsilon_{33} = \frac{\sigma_{33}}{E_3} - \frac{\sigma_{11} \nu_{13}}{E_1} - \frac{\sigma_{22} \nu_{23}}{E_2} \quad (4.10)$$

Pri strižnem preizkusu preizkušancev iz ortotropnega materiala se izkaže, da dobimo naslednje zveze:

$$2\varepsilon_{12} = \frac{\sigma_{12}}{G_{12}} \quad 2\varepsilon_{13} = \frac{\sigma_{13}}{G_{13}} \quad 2\varepsilon_{23} = -\frac{\sigma_{23}}{G_{23}} \quad (4.11)$$

Če enačbe uredimo, jih lahko zapišemo v matrični obliki:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} \quad (4.12)$$

Primerjava enačbe (4.12) z enačbo (4.6) nam da naslednje vezne enačbe:

$$\frac{\nu_{21}}{E_2} = \frac{\nu_{12}}{E_1} \quad \frac{\nu_{31}}{E_3} = \frac{\nu_{13}}{E_1} \quad \frac{\nu_{32}}{E_3} = \frac{\nu_{23}}{E_2} \quad (4.13)$$

oz. na kratko $\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j}$ za $i, j = 1, 2, 3$.

Skupno imamo torej 9 neodvisnih materialnih koeficientov $E_1, E_2, E_3, G_{13}, G_{23}, G_{12}, \nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$. Pri ortotropnem materialu se lahko na podlagi zgornje zveze koeficiente $\nu_{21}, \nu_{31},$

ν_{32} izrazi z osnovnimi tremi Poisson-ovimi količniki ν_{12} , ν_{13} , ν_{23} . Elastični in strižni moduli morajo biti vedno pozitivni: $E_1, E_2, E_3, G_{13}, G_{23}, G_{12} > 0$.

Za izotropen material velja $E_1 = E_2 = E_3 = E$, $G_{13} = G_{23} = G_{12} = G$ in $\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23} = \nu$. Od teh treh konstant sta samo dve neodvisni, saj tretjo lahko izrazimo s prvima dvema:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4.14)$$

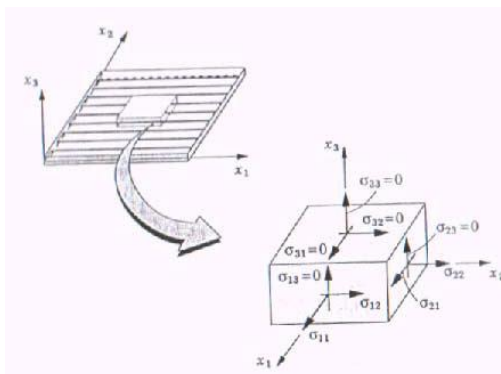
4.3 Ravninsko napetostno stanje

Ortotropno lamelo, ki predstavlja osnovni gradnik laminata, lahko zaradi relativno majhne debeline obravnavamo kot element, ki je obremenjen samo v svoji ravnini. S to predpostavko zanemarimo napetosti po debelini elementa, to pa pomeni, da so vse komponente napetosti v smeri osi z enake nič:

$$\sigma_3 = 0, \sigma_4 = 0, \sigma_5 = 0 \quad (4.15)$$

$$(\sigma_{33} = 0, \sigma_{32} = \sigma_{23} = 0, \sigma_{31} = \sigma_{13} = 0) \quad (4.16)$$

Temu pravimo ravninsko napetostno stanje (slika 4.3).



Slika 4.3: Prikaz ravninskega stanja napetosti (Petelin, 2003)

Ravninskemu napetostnemu stanju pripada naslednje deformacijsko stanje:

$$\varepsilon_3 = S_{13}\sigma_1 + S_{23}\sigma_2 \quad (4.17)$$

$$\varepsilon_4 = 0, \varepsilon_5 = 0 \quad (4.18)$$

Zveze med deformacijami in pomiki so tedaj:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} \quad (4.19)$$

in

$$\varepsilon_3 = S_{13}\sigma_1 + S_{23}\sigma_2 = -\frac{\nu_{13}}{E_1}\sigma_1 - \frac{\nu_{23}}{E_2}\sigma_2 \quad (4.20)$$

Namesto oznake C bomo pisali oznako Q. Enačbo (4.19) lahko preuredimo in zapišemo:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{Bmatrix} \quad (4.21)$$

kjer so Q_{ij} podani kot:

$$Q_{11} = \frac{S_{22}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (4.22)$$

$$Q_{12} = \frac{S_{12}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (4.23)$$

$$Q_{22} = \frac{S_{11}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (4.24)$$

$$Q_{66} = \frac{1}{S_{66}} = G_{12} \quad (4.25)$$

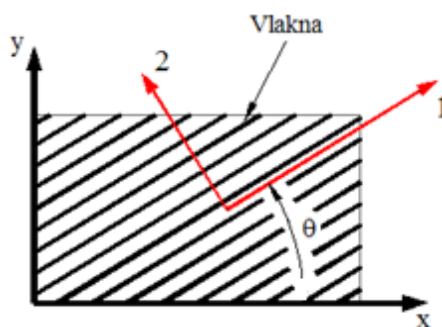
in so odvisni od E_1 , E_2 , G_{12} , ν_{12} .

4.4 Transformacija togostne matrike lamine

Pri obravnavi posamezne lamine je potrebno definirati dva koordinatna sistema:

- geometrijski koordinatni sistem z osmi x, y, z in
- materialni koordinatni sistem z osmi 1, 2, 3.

Geometrijski koordinatni sistem sledi robovom plošče, materialni pa smeri vlaken oz. glavnim materialnim smerem. Na sliki (4.4) sta prikazana oba koordinatna sistema, kjer je materialni koordinatni sistem zarotiran za kot θ glede na os x geometrijskega koordinatnega sistema.



Slika 4.4: Geometrijski in materialni koordinatni sistem ortotropne plošče

Transformacijska matrika $[T]$ nam omogoča transformacijo togostne matrike lamine iz materialnega v geometrijski koordinatni sistem, kar nam omogoča kasnejšo določitev togostnih koeficientov celotnega laminata. Po transformaciji togostna matrika lamele preide v splošno obliko $[\bar{Q}_{ij}]$ in jo lahko zapišemo kot:

$$\{\bar{Q}_{ij}\} = [T_1] \times [Q_{ij}] \times [T_2]^{-1} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{61} & \bar{Q}_{61} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

kjer sta transformacijski matriki $[T_1]$ in $[T_2]$ ob upoštevanju $m = \sin \theta$ in $n = \cos \theta$ enaki:

$$[T_1] = \begin{bmatrix} m^2 & m^2 & -2mn \\ n^2 & m^2 & 2mn \\ mn & -mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

$$[T_2] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & -mn \\ n^2 & m^2 & mn \\ 2mn & -2mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

Transformirane konstitutivne enačbe nato lahko zapišemo v sledeči obliki:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{61} & \bar{Q}_{61} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4.29)$$

Transformacijo togostnih koeficientov iz lokalnega v globalni koordinatni sistem pa zapišemo kot:

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= Q_{11} \cos^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \sin^4 \theta \\ \bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{12} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \\ \bar{Q}_{22} &= Q_{11} \sin^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \cos^4 \theta \\ \bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta \\ \bar{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta \\ \bar{Q}_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{66} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \end{aligned} \quad (4.30)$$

4.5 Teorije kompozitnih plošč

Kompozitne plošče se lahko analizirajo na naslednje načine:

- (1) z ekvivalentno enoplastno teorijo (2D)
 - (a) klasična teorija laminatov (Kirchhoff-ova kinematika)
 - (b) strižna teorija laminatov (Reissner-Mindlin-ova kinematika)
- (2) s tridimenzionalno teorijo elastičnosti
 - (a) tradicionalna 3D formulacija
 - (b) večplastna formulacija
- (3) s kombinacijo gornjih teorij (2D in 3D)

Ekvivalentna enoplastna teorija je izpeljana iz 3D elastične teorije, ob predpostavkah, ki se nanašajo na kinematiko, deformacije in napetosti. Te predpostavke dovoljujejo redukcijo problema iz 3D na 2D. V nadaljevanju je podrobneje prikazana ekvivalentna enoplastna teorija.

4.5.1 Klasična teorija laminatov - CLPT (Classical Laminate Plate Theory)

Najenostavnejša ESL (Equivalent Single Layer) teorija je t.i. CLPT (Classical Laminate Plate Theory), ki je razširjena klasična Kirchhoff-ova teorija plošč. Osnovana je na predpostavkah:

- (1) normale na središčno ploskev ostanejo ravne tudi po deformaciji
- (2) normale na središčno ploskev se ne raztegnejo ali skrčijo (so neraztegljive)
- (3) normale na središčno ploskev se zasučejo tako, da ostanejo pravokotne na središčno ploskev tudi po deformaciji.

Prvi dve predpostavki nam povesta, da je prečni pomik neodvisen od koordinate z in da je prečna deformacija $\varepsilon_{zz} = 0$. Tretja predpostavka pa nam pove, da sta deformaciji $\varepsilon_{xz} = \varepsilon_{yz} = 0$, torej prečne strižne deformacije zanemarimo.

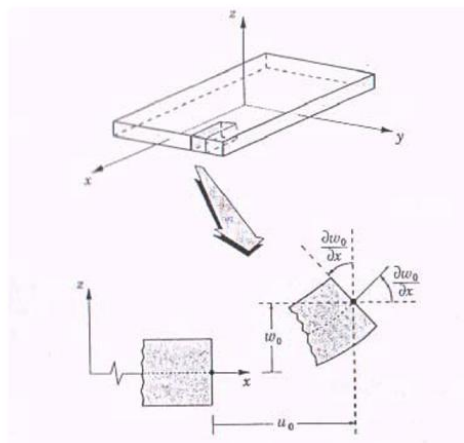
Zapišemo lahko naslednje enačbe:

$$u(x, y, z) = u_0(x, y) - z \frac{\partial w_0}{\partial x} \quad (4.31)$$

$$v(x, y, z) = v_0(x, y) - z \frac{\partial w_0}{\partial y} \quad (4.32)$$

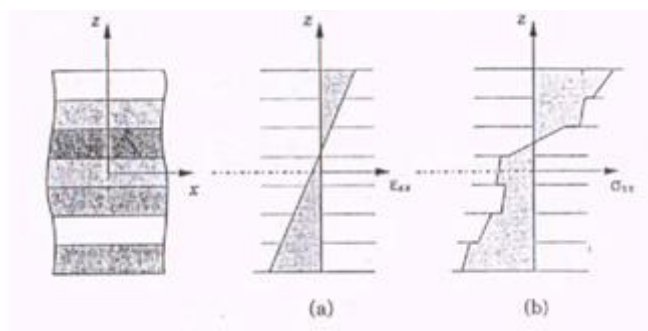
$$w(x, y, z) = w_0(x, y) \quad (4.33)$$

kjer so u_0 , v_0 , w_0 pomiki poljubne točke središčne ravnine laminata vzdolž (x, y, z) osi (slika 4.5).



Slika 4.5: Nedeformiran in deformiran rob plošče v skladu s Kirchoff-ovimi predpostavkami (Petelin, 2003)

Ko poznamo pomike (u_0, v_0, w_0) središčne ploskve, potem poznano tudi deformacije v plošči. Deformacije se spreminjajo linearno po debelini laminata, medtem ko napetosti linearno po posameznem sloju (slika 4.6).



Slika 4.6: Potek deformacij in napetosti po prečnem prerezu: (a) deformacije (b) napetosti (Petelin, 2003)

4.5.2 Strižna teorija prvega reda - FSDT (First Order Shear Deformation Theory)

Naslednja teorija po hierarhiji ESL je strižna teorija prvega reda ali na kratko kar FSDT (First Order Shear Deformation Theory), ki je osnovana na naslednjih predpostavkah o pomikih:

$$u(x, y, z) = u_0(x, y) + z\Phi_x(x, y) \quad (4.34)$$

$$v(x, y, z) = v_0(x, y) + z\Phi_y(x, y) \quad (4.35)$$

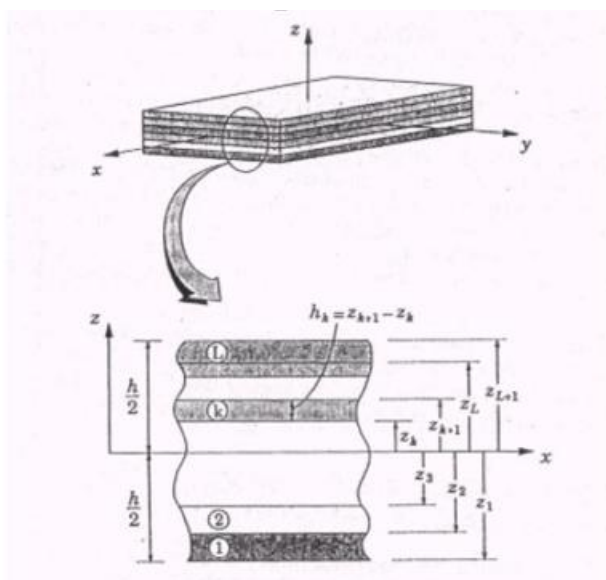
$$w(x, y, z) = w_0(x, y) \quad (4.36)$$

kjer sta Φ_x in Φ_y rotaciji okrog y in x osi. FSDT razširi kinematiko CLP teorije in vključi prečne strižne deformacije, pri čemer so le-te konstantne po slojih. Zato FSDT zahteva t.i. korekcijske faktorje, ki pa jih je relativno težko določiti. Ti faktorji niso odvisni samo od materiala in geometrije, ampak tudi od obtežbe in robnih pogojev.

4.6 Konstitutivne enačbe laminata

Kot smo v uvodu tega poglavja omenili, je naš cilj določiti togostno matriko celotnega laminata, potem ko smo določili togostne matrike posameznih lamin. Predpostavimo, da je vsak sloj plošče ortotropen in linearno elastičen. V obravnavi izločimo tudi vse vplive

termalnih vplivov. Deformacije po debelini laminata so zvezne, napetosti pa so odsekoma zvezne po slojih (slika 4.6). Togost celotnega laminata bomo dobili z izračunom notranjih sil za celoten prerez, to pa bomo izvedli z integracijo napetosti vseh lamel po prerezu laminata. Ta proces je imenovan makromehanika.



Slika 4.7: Koordinatni sistem in potek številčenja plasti za kompozitno ploščo (Petelin, 2003)

S pomočjo integracije napetosti po debelini laminata dobimo notranje sile:

$$\begin{Bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \int_{z_k}^{z_{k+1}} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_k}^{z_{k+1}} \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(0)} + z\varepsilon_{xx}^{(1)} \\ \varepsilon_{yy}^{(0)} + z\varepsilon_{yy}^{(1)} \\ \gamma_{xy}^{(0)} + z\gamma_{xy}^{(1)} \end{Bmatrix} dz \quad (4.37)$$

t.j.:

$$\begin{Bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(0)} \\ \varepsilon_{yy}^{(0)} \\ \gamma_{xy}^{(0)} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(1)} \\ \varepsilon_{yy}^{(1)} \\ \gamma_{xy}^{(1)} \end{Bmatrix} \quad (4.38)$$

$$\begin{Bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \int_{z_k}^{z_{k+1}} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} z dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_k}^{z_{k+1}} \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}^{(k)} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(0)} + z\varepsilon_{xx}^{(1)} \\ \varepsilon_{yy}^{(0)} + z\varepsilon_{yy}^{(1)} \\ \gamma_{xy}^{(0)} + z\gamma_{xy}^{(1)} \end{Bmatrix} z dz \quad (4.39)$$

$$\begin{Bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(0)} \\ \varepsilon_{yy}^{(0)} \\ \gamma_{xy}^{(0)} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(1)} \\ \varepsilon_{yy}^{(1)} \\ \gamma_{xy}^{(1)} \end{Bmatrix} \quad (4.40)$$

kjer so:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{ij}^{(k)} (z_{k+1} - z_k) \quad (4.41)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{ij}^{(k)} (z_{k+1}^2 - z_k^2) \quad (4.42)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{ij}^{(k)} (z_{k+1}^3 - z_k^3) \quad (4.43)$$

Enačbe (4.38) in (4.40) lahko zapišemo v bolj kompaktni obliki:

$$\begin{Bmatrix} \{N\} \\ \{M\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [A] & [B] \\ [B] & [D] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\varepsilon^0\} \\ \{\varepsilon^1\} \end{Bmatrix} \quad (4.44)$$

kjer so $\{\varepsilon^0\}$ in $\{\varepsilon^1\}$ vektorji membranskih in upogibnih deformacij. $[A]$, $[B]$ in $[D]$ so simetrične togostne matrike laminata reda velikosti 3×3 , definirane so v enačbah (4.41-4.43). Zgoraj navedene matrike $[A]$, $[B]$ in $[D]$ imajo tudi svoja imena, ki jih narekuje njihova narava oz. funkcija. Matriko $[A]$ na ta način poimenujemo razteznostna togostna matrika, saj povezuje osne sile N z deformacijami v srednji ravnini ε_0 . Velikost členov A_{ij} je odvisna le od debeline in togosti slojev in je neodvisna od ustroja. Na podoben način poimenujemo matriko $[D]$ upogibna togostna matrika, ker povezuje momente M z ukrivljenostmi. Členi D_{ij}

zavisijo od debeline, togosti slojev in od lege glede na središčno ploskev. Recimo, da primerjamo laminata z enakimi lastnostmi, le orientacija slojev je različna in sicer $(0/90)_s$ pri prvem ter $(90/0)_s$ pri drugem laminatu. Oba laminata bi imela enake osne togosti A_{ij} , vendar bi imel laminat $(0/90)_s$ večje upogibne togosti D_{ij} pravokotno na smer vlaken kot laminat $(90/0)_s$, ker je ravnina 0 bolj oddaljena od središčne ploskve kot pri $(0/90)_s$ laminatu. Togosti A_{ij} in D_{ij} so vedno pozitivne. Matriko $[B]$, ki povezuje momente M z deformacijami ε_0 in osne sile N z ukrivljenostmi pa lahko poimenujemo razteznostno-upogibna togostna matrika. Togost členov B_{ij} je lahko negativna, odvisno od strukture in števila plasti laminata.

Izrazi za togostne matrike kompozitne plošče nam povejo, da so vrednosti le-teh odvisne od materialov, debelin plasti in ustroja laminata. Simetrija ali nesimetrija geometrije in materiala glede na središčno ploskev plošče lahko povzročita, da so nekateri koeficienti togostne matrike enaki nič. Kadar so material, geometrija in ustroj kompozita simetrični glede na središčno ploskev, kompozit imenujemo simetrični laminat. V tem primeru so koeficienti togosti B_{ij} enaki nič. Še več, če na središčno ploskev ne delujejo sile ali pomiki, ki povzročajo ravninske deformacije, lahko analiziramo samo enačbe upogiba.

Pri križnih simetričnih laminatih z orientacijo 0° ali 90° velja, da so členi togostne matrike $\bar{Q}_{16} = \bar{Q}_{26} = 0$, iz česar sledi $A_{16} = A_{26} = D_{16} = D_{26} = 0$.

4.7 Homogenizacija prereza simetričnega križnega laminata

Homogenizacija laminatnega prereza nam omogoča, da dobimo enotne ortotropne mehanske karakteristike v posamezni smeri obravnavanega laminata, kar pa je pripravno za globalno analizo laminatnih konstrukcij s pomočjo računalniških programov, ki ne omogočajo analize z upoštevanjem prereza s posameznimi sloji. Iz členov znane togostne matrike laminata, ki je sestavljen iz posameznih slojev oz. lamin, torej lahko izrazimo primerjalne materialne karakteristike E_1^* , E_2^* , ν_{12}^* in G_{12}^* namišljenega homogenega prereza laminata.

Za enostavne posebno ortotropne plošče (osnovne materialne koordinate sovpadajo s koordinatami plošče) so lahko togostni koeficienti izraženi s Q_{ij} in debelino h . Od nič različne togosti so:

$$A_{11} = Q_{11}h \quad A_{12} = Q_{12}h \quad A_{22} = Q_{22}h \quad A_{66} = Q_{66}h \quad (4.45)$$

$$D_{11} = \frac{Q_{11}h^3}{12} \quad D_{12} = \frac{Q_{12}h^3}{12} \quad D_{22} = \frac{Q_{22}h^3}{12} \quad D_{66} = \frac{Q_{66}h^3}{12} \quad (4.46)$$

kjer so členi Q_{ij} podani z enačbami:

$$Q_{11} = \frac{E_1^*}{1 - \nu_{12}^*\nu_{21}^*} \quad Q_{12} = \frac{\nu_{12}^*E_2^*}{1 - \nu_{12}^*\nu_{21}^*} \quad Q_{22} = \frac{E_2^*}{1 - \nu_{12}^*\nu_{21}^*} \quad Q_{66} = G_{12}^* \quad (4.47)$$

Če na ploščo delujejo le sile v njeni ravnini in če poznamo A_{11} , A_{12} , A_{22} , A_{66} , lahko iz enačb

(4.45) in (4.47) ter ob zvezi $\nu_{21}^* = \frac{\nu_{12}^*E_2^*}{E_1^*}$ izrazimo E_1^* , E_2^* , ν_{12}^* in G_{12}^* :

$$E_1^* = \frac{A_{11}A_{22} - A_{12}^2}{A_{22}h} \quad (4.48)$$

$$E_2^* = \frac{A_{11}A_{22} - A_{12}^2}{A_{11}h} \quad (4.49)$$

$$\nu_{12}^* = \frac{A_{12}}{A_{22}} \quad (4.50)$$

$$G_{12}^* = \frac{A_{66}}{h} \quad (4.51)$$

Ob predpostavki, da na ploščo delujejo le sile pravokotno na njeno ravnino, lahko iz enačb (4.46) in (4.47) dobimo:

$$E_1^* = \frac{12(D_{11}D_{22} - D_{12}^2)}{h^3 D_{22}} \quad (4.52)$$

$$E_2^* = \frac{12(D_{11}D_{22} - D_{12}^2)}{h^3 D_{11}} \quad (4.53)$$

$$V_{12}^* = \frac{D_{12}}{D_{22}} \quad (4.54)$$

$$G_{12}^* = \frac{12D_{66}}{h^3} \quad (4.55)$$

4.8 Reševanje enačb plošč

V tem poglavju smo podali glavne enačbe kompozitnih laminatnih materialov. Te enačbe lahko rešimo analitično ali numerično. Analitične rešitve lahko dobimo za pravokotne plošče z določeno strukturo in z določenimi robnimi pogoji. V naslednjem poglavju bomo primerjali rezultate, dobljene s pomočjo numerične analize v programu SAP2000 v12 in analitične rešitve, dobljene z uporabo sprogramiranega programa v Mathematici (Petelin, 2003) za križno simetrične laminate.

Navier-ovo rešitev lahko uporabimo takrat, kadar imamo pravokotno laminatno ploščo, ki ima vse štiri robove prosto podprte, Levy-evo rešitev pa v primeru, kadar imamo pravokotno laminatno ploščo, ki ima nasprotna robova prosto podprta, ostala dva pa sta poljubno podprta.

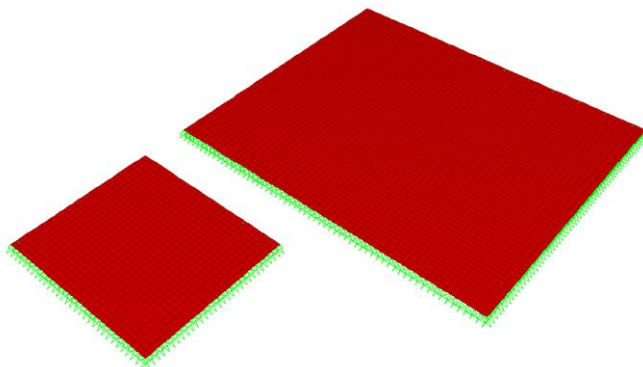
5 PRIMERJALNA ANALIZA LAMINATOV IZ KRIŽNO LEPLJENEGA LESA

Primerjalno analizo laminatov smo izvedli na več različnih ortotropnih simetričnih ploščah iz križno lepljenih slojev in sicer s pomočjo računalniškega programa SAP 2000 v12 in sprogramiranega programa v Mathematici (Petelin, 2003). Križni sloji so pravokotni drug na drugega, po prerezu pa so razporejeni simetrično glede na srednjo ploskev. Obremenitev smo na plošče postavili najprej pravokotno glede na ravnino plošč (upogibno obremenjevanje), nato pa še v ravnino plošč (osno obremenjevanje). Pri tem smo spreminjali geometrijo in način podpiranja plošč. V prvem primeru smo uporabili sestavo iz 5 slojev, kateri se izmenjujejo z debelinami 3,0 cm in 3,4 cm, slednja debelina velja za zunanja sloja in srednji sloj. V drugem primeru smo izbrali sestavo iz 3 slojev z debelino zunanjih slojev 2,0 cm in srednjega sloja 16,0 cm (preglednica 5.1). Zavedamo se, da je v drugem primeru debelina srednjega sloja dokaj nerealistična, saj so ponavadi sloji križno lepljenih plošč bolj tanki, največ do 8 cm. Želimo nareč ugotoviti vpliv strižnega delovanja srednjega sloja in njegov vpliv na togost plošče.

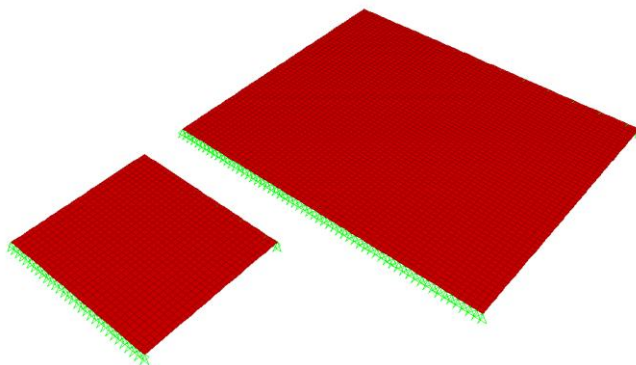
- (i) Pri upogibnem obremenjevanju smo analizirali in primerjali odziv plošč z dimenzijami 3x3 m in 6x6 m. Analizirali smo odziv za prostoležeče podprto pločo na vseh robovih in za prostoležeče podprto ploščo na robovih v smeri osi y in prosto na robovih v smeri osi x (sliki 5.1 in 5.2). Enakomerna površinska obtežba pravokotno na ravnino plošč je $q = 5 \text{ kN/m}^2$.

Prelednica 5.1: Dimenzije in sestava prereza plošč

Ime	Št. slojev	Nazivna debelina (cm)	Sestava prereza (cm)	Orientacija (°)
DL 162	5	16,2	3,4/3,0/3,4/3,0/3,4	0/90/0/90/0
(2/16/2)	3	20	2,0/16,0/2,0	0/90/0/90/0



Slika 5.1: Geometrija prostoležeče podprtih plošč z dimenzijami 3x3 m in 6x6 m

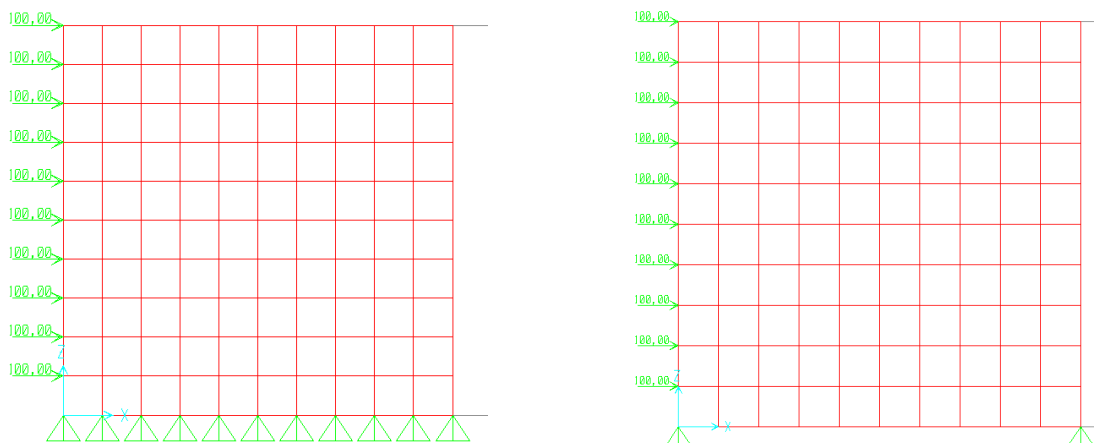


Slika 5.2: Geometrija prostoležeče podprte plošče na robovih v smeri osi y in prosto na robovih v smeri osi x z dimenzijami 3x3 m in 6x6 m

- (ii) Pri obremenjevanju v smeri ravnine ploče smo analizirali in primerjali odziv stene in stenastega nosilca z dimenzijami 3x3 m. Stena je bila podprta prostoležeče po celotnem spodnjem robu, stenasti nosilec pa prostoležeče na skrajnem levem in desnem spodnjem vogalu. Horizontalna obtežba je znašala 100 kN, delovala pa je v vseh vozliščih levega robu po višini obeh konstrukcijskih elementov v smeri pozitivne globalne osi x (slika 5.3).

Preglednica 5.2: Dimenzije in sestava prereza stene in stenastega nosilca

Ime	Št. slojev	Nazivna debelina (cm)	Sestava prereza (cm)	Orientacija (°)
DQ 162	5	16,2	3,4 /3,0 / 3,4 /3,0/3,4	90/0/90/0/90



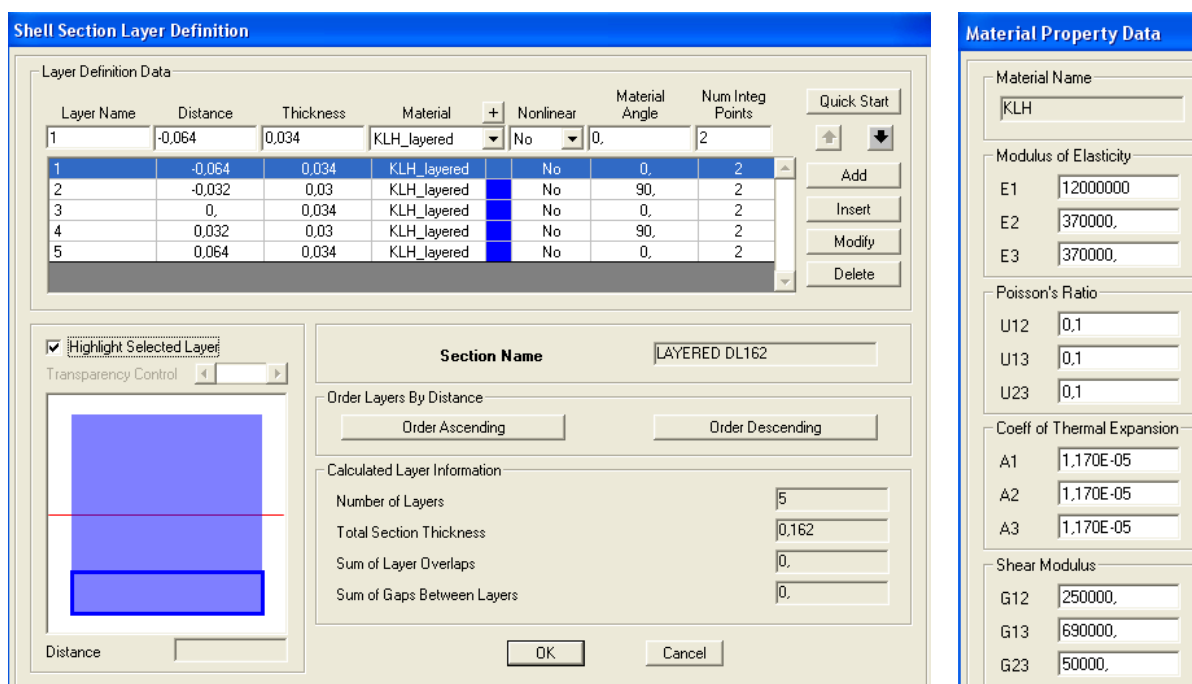
Slika 5.3: Geometrija in obtežba stene (levo) in stenastega nosilca (desno)

Z različnimi pristopi podajanja materialnih karakteristik in karakteristik prečnega prereza smo skušali ugotoviti možne načine analiz in pristopov pri analizi laminatnih konstrukcijskih sistemov. Tovrstno modeliranje je zaradi specifičnega anizotropnega obnašanja lamin oz. slojev laminata v posameznih smereh in po posameznih slojih ter posledično specifičnega obnašanja celotnega laminata dokaj težavno. Za mehanske karakteristike posameznih križno lepljenih slojev smo uporabili podatke iz Evropskega tehničnega soglasja ETA-06/0138 o križno lepljenem masivnem lesu (preglednica 2.1), vnos karakteristik v SAP pa je prikazan na sliki 5.4. Rezultati analiz in njihova primerjava je predstavljena v poglavju 5.6.

5.1 Analiza z večslojnim prerezom (Shell-layered)

Računalniški program SAP 2000 v12 nam omogoča podajanje večslojnih prerezov. Za posamezen sloj laminata podamo vrsto materiala, debelino sloja, oddaljenost sredine sloja od središčne osi laminata in orientacijo sloja glede na lokalni geometrijski koordinatni sistem

elementa (slika 5.4). Pri računski analizi program uporablja FSDT (First Order Shear Deformation Theory) teorijo, ki v analizi upošteva tudi prečne strižne deformacije. Med drugim nam omogoča tudi račun napetosti po posameznih slojih laminata (poglavje 5.6).



Slika 5.4: Podajanje geometrijskih in materialnih karakteristik večslojnega prereza laminata

5.2 Analiza z uporabo analitične rešitve

V poglavju 4 smo prikazali postopek izpeljave togostnih matrik laminatov na osnovi t.i. CLPT (Classical Laminate Plate Theory), za katero velja, da ne upošteva strižnih deformacij prereza.

V enačbah (4.37) – (4.44) smo togostno matriko laminata $[\bar{Q}_{ij}]$ zapisali v obliki s simetričnimi matrikami reda 3×3 $[A]$, $[B]$ in $[D]$. Glede na to, da imamo v našem primeru tri simetrične laminatne prereze, so v vseh primerih členi matrike $[B]$ enaki 0. V nadaljevanju bomo izračunali togostne matrike obravnavanih laminatnih prerezov.

S pomočjo enačb (4.41) in (4.43) lahko izračunamo člene togostnih matrik A_{ij} in D_{ij} :

- Plošča DL 162:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1246584 & 5996 & 0 \\ 5996 & 757974 & 0 \\ 0 & 0 & 111780 \end{bmatrix} \text{ in } \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3486 & 13 & 0 \\ 13 & 898 & 0 \\ 0 & 0 & 244 \end{bmatrix}$$

- Plošča (2/16/2):

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 539366 & 7402 & 0 \\ 7402 & 1935397 & 0 \\ 0 & 0 & 138000 \end{bmatrix} \text{ in}$$

$$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4032 & 25 & 0 \\ 25 & 4218 & 0 \\ 0 & 0 & 460 \end{bmatrix}$$

- Stena DQ 162:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 757974 & 5996 & 0 \\ 5996 & 1246584 & 0 \\ 0 & 0 & 111780 \end{bmatrix} \text{ in } \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 898 & 13 & 0 \\ 13 & 3486 & 0 \\ 0 & 0 & 244 \end{bmatrix}$$

V program, ki je bil sprogramiran v Mathematici (Petelin, 2003), smo podali naslednje podatke: geometrijo plošče in njenega prereza, obtežbo, togostne matrike posameznih slojev plošče, togostno matriko laminata, način podpiranja plošče in število členov Fourier-jeve vrste za izračun pomikov. S pomočjo Navier-jevega in Levy-jevega nastavka lahko izračunamo željene vrednosti notranjih sil, pomikov in napetosti za plošči DL 162 in (2/16/2). Postopek ni izvedljiv za steno in stenasti nosilec, ker obtežba deluje v ravnini laminata.

5.3 Analiza s homogeniziranim enoslojnim ortotropnim prerezom

V poglavju 4.7 smo govorili o homogenizaciji laminatnega prereza v enoslojni prerez, kateri ima enotne ortotropne materialne karakteristike v posamezni smeri obravnavanega laminata.

Namesto podajanja materialnih in geometrijskih lastnosti posameznega sloja laminata lahko s pomočjo primerjalnih vrednosti celotnega prereza E_1^* , E_2^* , ν_{12}^* in G_{12}^* nadomestimo materialne karakteristike E_1 , E_2 , ν_{12} in G_{12} posameznih slojev laminata. S tem lahko naše primere plošč obravnavamo kot enoslojne ortotropne plošče z ekvivalentno togostjo in v SAP-u izračunamo vrednosti notranjih statičnih količin. Potek napetosti, izračunanih v programu, ne velja za slojevit prerez, saj so napetosti računane glede na namišljen enoslojen prerez. Debelina prereza enoslojne ortotropne plošče se glede na debelino laminata ne spreminja.

V primeru plošč DL 162 in (2/16/2), kjer obtežba deluje pravokotno na ravnino plošče, primerjalne materialne vrednosti, E_1^* , E_2^* , ν_{12}^* in G_{12}^* izračunamo s pomočjo enačb (4.52)-(4.55):

- Plošča DL 162:

$$E_1^* = 9837957 \text{ kN/m}^2 = 983,8 \text{ kN/cm}^2$$

$$E_2^* = 2535179 \text{ kN/m}^2 = 253,5 \text{ kN/cm}^2$$

$$\nu_{12}^* = 0,0146$$

$$G_{12}^* = 690000 \text{ kN/m}^2 = 69 \text{ kN/cm}^2$$

- Plošča (2/16/2):

$$E_1^* = 6047088 \text{ kN/m}^2 = 604,7 \text{ kN/cm}^2$$

$$E_2^* = 6326284 \text{ kN/m}^2 = 632,6 \text{ kN/cm}^2$$

$$\nu_{12}^* = 0,0059$$

$$G_{12}^* = 690000 \text{ kN/m}^2 = 69 \text{ kN/cm}^2$$

V primeru stene DQ 162, kjer obtežba deluje v ravnini plošče, primerjalne materialne vrednosti, E_1^* , E_2^* , ν_{12}^* in G_{12}^* izračunamo s pomočjo enačb (4.48)-(4.51):

- Stena DQ 162:

$$E_1^* = 4678672 \text{ kN/m}^2 = 467,9 \text{ kN/cm}^2$$

$$E_2^* = 7694672 \text{ kN/m}^2 = 769,5 \text{ kN/cm}^2$$

$$\nu_{12}^* = 0,0048$$

$$G_{12}^* = 690000 \text{ kN/m}^2 = 69 \text{ kN/cm}^2$$

kjer E_1^* predstavlja elastični modul v smeri vlaken notranjih slojev, E_2^* pa v elastični modul v smeri zunanjih slojev.

5.4 Analiza s homogeniziranim izotropnim prerezom z uporabo redukcijskih faktorjev togosti

Računlaniški program SAP 2000 nam omogoča redukcije togosti prerezov, kot so: redukcija upogibne togosti, redukcija osne togosti in redukcija strižne togosti. V našem primeru bomo poizkusili po teoriji Ugural-a (Ugural, 1981, str. 143) vrednosti materialnih karakteristik homogeniziranega prereza E_1^* , E_2^* , ν_{12}^* in G_{12}^* pretvoriti v materialne karakteristike izotropnega materiala E' , ν' in G' , prerezu pa bomo določili redukcijske faktorje upogibne togosti m_{11} , m_{22} in m_{12} . Nato bomo primerjali rezultate analiz (poglavje 5.6).

Vrednosti E' , ν' in G' bomo dobili tako, da za elastični modul E' privzamemo kar E_1^* , za ν' bo veljalo $\nu' = \sqrt{\nu_{12}^* \nu_{21}^*}$, G' pa je odvisen E' in ν' , kjer velja $G' = \frac{E'}{2(1+\nu')}$. (Ugural, 1981)

Redkcijske faktorje m_{11} , m_{22} in m_{12} dobimo na sledeč način (Ugural, 1981):

$$\begin{aligned}m_{11} &= \frac{E_1^*}{E'} \\m_{22} &= \frac{E_2^*}{E'} \\m_{12} &= \sqrt{m_{11}m_{22}} \left(\frac{G_{12}^*}{G_H} \right)\end{aligned}\tag{5.1}$$

kjer G_H dobimo ob predpostavki

$$H = \sqrt{D_{11}D_{22}}\tag{5.2}$$

in zvezi:

$$H = D_{12} + 2D_{66} = D_{12} + 2 \frac{G_H h^3}{12}\tag{5.3}$$

Z združitvijo enačb (5.2) in (5.3) dobimo izraz za G_H :

$$G_H = \frac{6}{h^3} (\sqrt{D_{11}D_{22}} - D_{12})\tag{5.4}$$

Vrednosti E' , ν' , G' in m_{11} , m_{22} , m_{12} v našem primeru lahko izračunamo za plošči DL 162 in (2/16/2):

- Plošča DL 162:

$$E' = 9837957 \text{ kN/m}^2 = 983,8 \text{ kN/cm}^2$$

$$\nu' = 0,0287$$

$$G' = 4781475 \text{ kN/m}^2 = 47,8 \text{ kN/cm}^2$$

$$m_{11} = 1$$

$$m_{22} = 0,258$$

$$m_{12} = 0,141$$

- Plošča (2/16/2):

$$E' = 6047088 \text{ kN/m}^2 = 604,8 \text{ kN/cm}^2$$

$$\nu' = 0,00572$$

$$G' = 3006349 \text{ kN/m}^2 = 300,6 \text{ kN/cm}^2$$

$$m_{11} = 1$$

$$m_{22} = 1,046$$

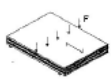
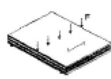
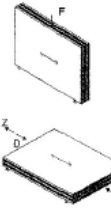
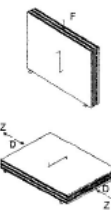
$$m_{12} = 0,230$$

5.5 Analiza z uporabo koeficientov po Blass-u

Postopek za izračun efektivnih modulov elastičnosti in trdnosti križno lepljenih panelov, s katerim zajamemo lastnosti posameznih slojev, je predlagal H.J. Blass. Metoda temelji na sestavnih koeficientih, ki predstavljajo razmerje med trdnostjo oz. modulom elastičnosti obravnavanega križno lepljenega prereza in trdnostjo oz. modulom elastičnosti namišljenega homogenega prereza, ki ima vlakna vseh plasti vzporedna s smerjo napetosti. Obnašanje križno lepljenega panelnega elementa torej opišemo z efektivnimi vrednostmi trdnosti oz. modulov elastičnosti, ki bi ustrezali homogenemu prerezu enake debeline. (Blass, 2004)

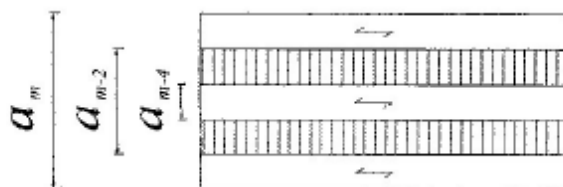
Za različne napetosti se uporabljajo različni sestavni koeficienti. V primeru obremenitve pravokotno na ravnino panela ustreza normalnim napetostim v smeri vzporedno s smerjo vlaken zunanjih plasti sestavni koeficient k_1 , normalnim napetostim v smeri pravokotno na smer vlaken zunanjih plasti pa koeficient k_2 . Podobno je za obremenitev v ravnini panela, kjer normalnim napetostim v smeri vzporedno s smerjo vlaken zunanjih plasti ustreza sestavni koeficient k_3 , normalnim napetostim v smeri pravokotno na smer vlaken zunanjih plasti pa koeficient k_4 . Enačbe za izračun koeficientov prikazuje preglednica 5.3.

Preglednica 5.3: Sestavni koeficienti za lesene križno lepljene plošče (Blass, 2004)

	k_i
	$k_1 = 1 - \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \frac{a_{m-2}^3 - a_{m-4}^3 + \dots \pm a_1^3}{a_m^3}$
	$k_2 = \frac{E_{90}}{E_0} + \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \cdot \frac{a_{m-2}^3 - a_{m-4}^3 + \dots \pm a_1^3}{a_m^3}$
	$k_3 = 1 - \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \frac{a_{m-2} - a_{m-4} + \dots \pm a_1}{a_m}$
	$k_4 = \frac{E_{90}}{E_0} + \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \cdot \frac{a_{m-2} - a_{m-4} + \dots \pm a_1}{a_m}$

kjer pomeni:

- a_1 debelina srednje plasti križno lepljenega panela,
- a_m celotna debelina križno lepljenega panela,
- E_0 modul elastičnosti posamezne plasti križno lepljenega panela v smeri vlaken in
- E_{90} modul elastičnosti posamezne plasti križno lepljenega panela v smeri pravokotno na vlakna.



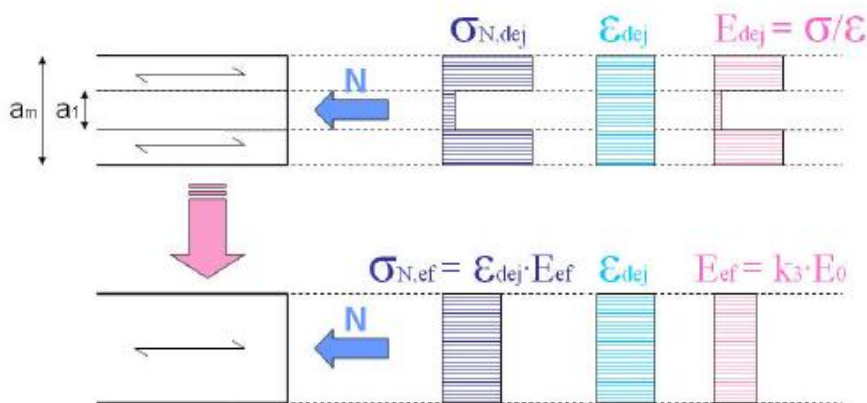
Slika 5.5: Sestava in oznake slojev križno lepljene plošče ($m=5$) (Blass, 2004)

Efektivne trdnosti in togosti lesenih masivnih križno lepljenih panelov za različne vrste napetosti določimo v skladu s preglednico 5.4.

Preglednica 5.4: Efektivne trdnosti in togosti lesenih križno lepljenih plošč (Blass, 2004)

Obtežba	Glede na smer vlaken zunanjih plasti	Efektivna trdnost	Efektivna togost
Obtežba pravokotno na ravnino plošče			
Upogib	Vzporedno	$f_{m,0,ef} = f_{m,0} \cdot k_1$	$E_{m,0,ef} = E_0 \cdot k_1$
	Pravokotno	$f_{m,90,ef} = f_{m,0} \cdot k_2 \cdot a_m/a_{m-2}$	$E_{m,90,ef} = E_0 \cdot k_2$
Obtežba v ravnini plošče			
Upogib	Vzporedno	$f_{m,0,ef} = f_{m,0} \cdot k_3$	$E_{m,0,ef} = E_0 \cdot k_3$
	Pravokotno	$f_{m,90,ef} = f_{m,0} \cdot k_4$	$E_{m,90,ef} = E_0 \cdot k_4$
Nateg	Vzporedno	$f_{t,0,ef} = f_{t,0} \cdot k_3$	$E_{t,0,ef} = E_0 \cdot k_3$
	Pravokotno	$f_{t,90,ef} = f_{t,0} \cdot k_4$	$E_{t,90,ef} = E_0 \cdot k_4$
Tlak	Vzporedno	$f_{c,0,ef} = f_{c,0} \cdot k_3$	$E_{c,0,ef} = E_0 \cdot k_3$
	Pravokotno	$F_{c,90,ef} = f_{c,0} \cdot k_4$	$E_{c,90,ef} = E_0 \cdot k_4$

Na ta način križno lepljeni prerez panelnega elementa nadomestimo z namišljenim oz. homogenim prerezom, ki ima vlakna vseh plasti vzporedna, in mu določimo efektivna elastična modula v smeri vzporedno in pravokotno glede na namišljeno smer vlaken (slika 5.6).



Slika 5.6: Shema dejanskega modula elastičnosti posamezne plasti ter efektivnega modula elastičnosti namišljenega prereza (Blass, 2004)

S pomočjo koeficientov k_1 in k_2 lahko izračunamo efektivne elastične module za plošči DL 162 in (2/16/2), koeficienta k_3 in k_4 pa uporabimo pri efektivnem modulu za steno DQ 162.

- Plošča DL 162:

$$k_1 = 0,820$$

$$k_2 = 0,211$$

$$E_{eff,1} = E_1 k_1 = 12000000 \text{ kN/m}^2 \times 0,820 = 9835464 \text{ kN/m}^2 = 983,5 \text{ kN/cm}^2$$

$$E_{eff,2} = E_1 k_2 = 12000000 \text{ kN/m}^2 \times 0,211 = 2534536 \text{ kN/m}^2 = 253,5 \text{ kN/cm}^2$$

- Plošča (2/16/2):

$$k_1 = 0,504$$

$$k_2 = 0,527$$

$$E_{eff,1} = E_1 k_1 = 12000000 \text{ kN/m}^2 \times 0,504 = 6045440 \text{ kN/m}^2 = 604,5 \text{ kN/cm}^2$$

$$E_{eff,2} = E_1 k_2 = 12000000 \text{ kN/m}^2 \times 0,527 = 6324560 \text{ kN/m}^2 = 632,5 \text{ kN/cm}^2$$

- Stena DQ 162:

$$k_3 = 0,641$$

$$k_4 = 0,390$$

$$E_{eff,1} = E_1 k_3 = 12000000 \text{ kN/m}^2 \times 0,641 = 7692592 \text{ kN/m}^2 = 769,3 \text{ kN/cm}^2$$

$$E_{eff,2} = E_1 k_4 = 12000000 \text{ kN/m}^2 \times 0,390 = 4677407 \text{ kN/m}^2 = 467,7 \text{ kN/cm}^2$$

Vrednosti za ν_{12}^* in G_{12}^* ostanejo glede na prvotne materialne karakteristike nespremenjene v vseh treh primerih.

5.6 Primerjava analiz

Na podlagi podatkov o materialnih karakteristikah, izračunanih v poglavjih 5.1-5.5, smo izvedli analize v programih SAP 2000 v12 in Mathematica. Rezultati pomikov, notranjih sil in

napetosti so prikazani v grafični obliki za prereze plošč, ki potekajo po sredini plošč v smeri globalne koordinatne osi x. Pri steni in stenastem nosilcu smo primerjali pomike desnega robu in napetosti v desnem spodnjem desnem vogalu ter zgornjem levem vogalu.

V preglednici 5.5 smo primerjali materialne karakteristike obeh obravnavanih pristopov s podajanjem ortotropnih karakteristik za enoslojen prerez laminata.

Preglednica 5.5: Primerjava ortotropnih materialnih karakteristik enoslojnih prerezov laminata

Ime	Materialna karakteristika	Homogenizacija prereza	Blass
DL 162	E_1^* [kN/cm ²]	983,8	983,5
	E_2^* [kN/cm ²]	253,5	253,5
	ν_{12}^* []	0,0146	0,1
	G_{12}^* [kN/cm ²]	69	69
(2/16/2)	E_1^* [kN/cm ²]	604,7	604,5
	E_2^* [kN/cm ²]	632,6	632,5
	ν_{12}^* []	0,0059	0,1
	G_{12}^* [kN/cm ²]	69	69
DQ 162	E_1^* [kN/cm ²]	467,9	769,3
	E_2^* [kN/cm ²]	769,5	467,7
	ν_{12}^* []	0,0048	0,1
	G_{12}^* [kN/cm ²]	69	69

Opazimo lahko, da se vrednosti E_1^* in E_2^* skoraj popolnoma ujemajo, razen pri steni DQ 162, kjer sta vrednosti ravno obrnjeni. E_1^* pri homogenizaciji prereza predstavlja elastični modul v smeri vlaken notranjih slojev, E_2^* pa elastični modul v smeri zunanjih slojev, medtem ko je

pri Blass-ovi metodi ravno obratno. Torej gre v realnosti za enaka elastična modula v obeh primerih. Razlika je tudi pri Poisson-ovem kolčniku ν_{12}^* , katerega vpliv bomo analizirali pri rezultatih v nadaljevanju. Ostale vrednosti materialnih karakteristik so nespremenjene glede na osnovne materialne karakteristike, prikazane na sliki 5.4.

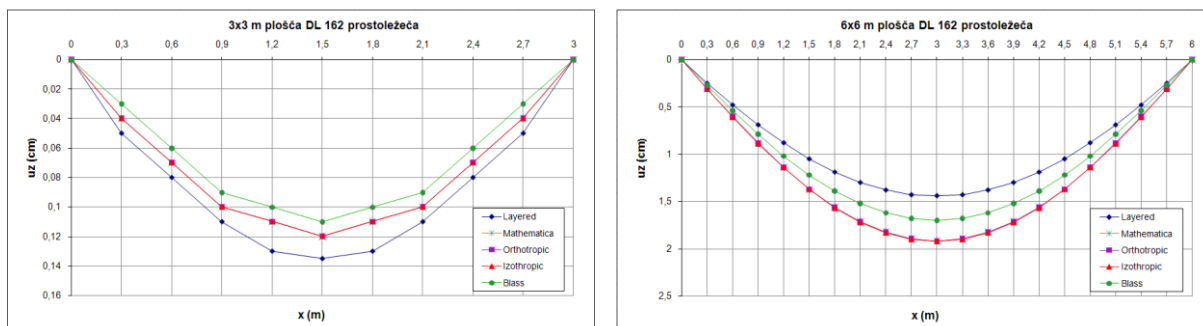
Potrebno je spregovoriti tudi nekaj besed o samem načinu reševanja problemov s pomočjo programa SAP2000. Ko za vrsto ploskovnih elementov v računskem modelu izberemo »Shell-Thin« elemente, program izvede analize na podlagi Kirchhoff-ovih predpostavk, to pomeni, da pri analizi zanemari prečne strižne deformacije (glej poglavje 4). Za obravnavo enoslojnih homogenih prerezov smo pri analizah izbrali prej omenjene »Shell-Thin« ploskovne elemente. Pri analiziranju s podajanjem večslojnega prereza uporabimo t.i. »Shell-Layered« ploskovne elemente. V tem primeru program določi osne deformacije znotraj vsakega sloja po isti formulaciji kot pri homogenih ploščah. Za upogib pa uporabi Reissner-Mindlin-ovo formulacijo. To pomeni, da pri računu upošteva tudi prečne strižne deformacije.

Za lažje razumevanje pri primerjavi rezultatov bomo plošče z različnimi pristopi podajanja materialnih karakteristik in načinom izračuna številsko poimenovali (preglednica 5.6).

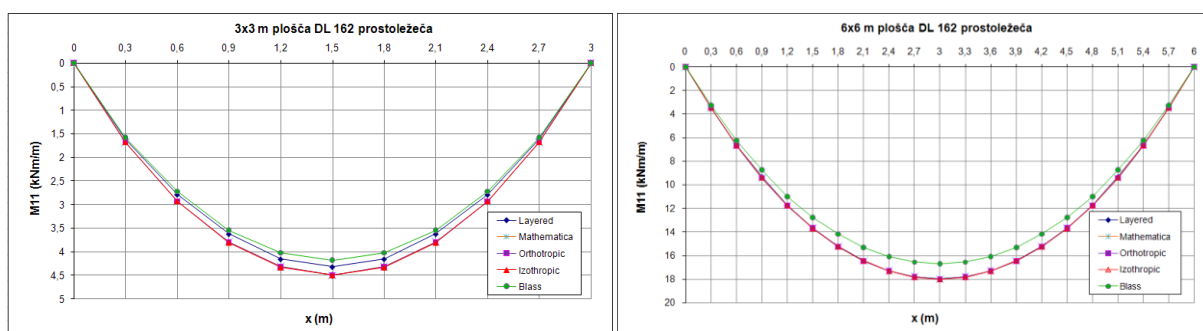
Preglednica 5.6: Številsko poimenovanje različnih pristopov podajanja materialnih karakteristik in načinov izračuna plošč

Št.	Opis vrste obravnave	Oznaka na grafih
1	Analiza z večslojnim prerezom (Shell-layered)	»Layered«
2	Analiza z uporabo analitične rešitve	»Mathematica«
3	Analiza s homogeniziranim enoslojnim ortotropnim prerezom	»Orthotropic«
4	Analiza s homogeniziranim izotropnim prerezom z uporabo redukcijskih faktorjev togosti	»Izothropic«
5	Analiza z uporabo koeficientov po Blass-u	»Blass«

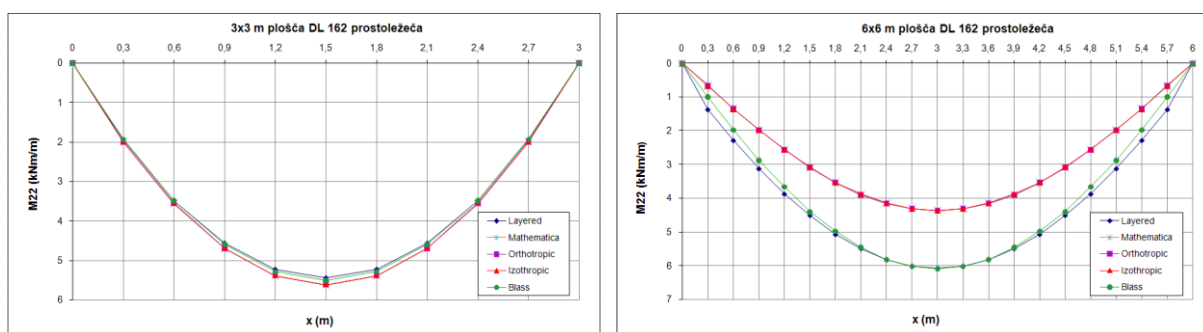
- Plošča DL 162 – prostoležeča (3x3 m in 6x6 m):



Slika 5.7: Pomiki prostoležečih plošč DL 162 (3x3 m in 6x6 m)



Slika 5.8: Momenti M_{11} prostoležečih plošč DL 162 (3x3 m in 6x6 m)



Slika 5.9: Momenti M_{22} prostoležečih plošč DL 162 (3x3 m in 6x6 m)

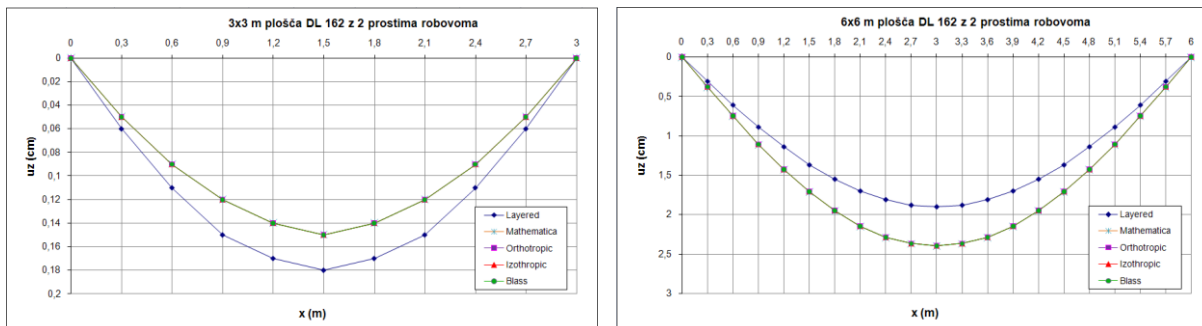
Na podlagi primerjave zgornjih grafov smo prišli do ugotovitve, da v primerih podajanja materialnih karakteristik nadomestnega homogenega ortotropnega prečnega prereza in v obliki izotropnega materiala z redukcijskimi faktorji togosti plošč v programu SAP, dobimo za vse notranje statične količine in pomike enake vrednosti kot pri analitični analizi v programu, sprogramiranjem v Mathematici (Petelin, 2003). To je logična posledica dejstva, da je pri obeh analizah privzeta Kirchhoff-ova formulacija problema. Togostne matrike, katere smo izračunali s pomočjo teorije o laminatih, so se ujemale z nadomestnimi karakteristikami ortotropnega homogenega prereza in tudi z nadomestnimi karakteristikami izotropno podanega enoslojnega prereza, ob upoštevanju redukcijskih faktorjev togosti.

V primerjavi rezultatov prej omenjenih pristopov (2,3 in 4) z Blass-ovim in »Shell-Layered« pa vidimo, da prihaja do razlik pri pomikih u_z in momentih M_{22} . Iz tega lahko sklepamo, da imajo plošče 2,3 in 4 v primerjavi z 1 in 5 manjšo togost v smeri osi y. Ta ugotovitev je najbolj izražena v primeru plošče 6x6 m, kjer so pomiki na sredini plošče največji, momenti M_{22} pa najmanjši od vseh plošč. V tem primeru mora namreč znaten delež obtežbe prevzeti tudi manj nosilna smer plošče (v smeri y), to pa se odraža na večjih pomikih, saj je plošča v tej smeri bolj podajna kot plošči 1 in 5. Napetosti σ_{11} so v vseh primerih približno enako velike, napetosti σ_{22} pa so pri ploščah 2, 3 in 4 dvakrat večje kot pri plošči 1, to pa pri enakih momentih pomeni manjšo upogibno togost v smeri y v primerjavi s ploščo 1.

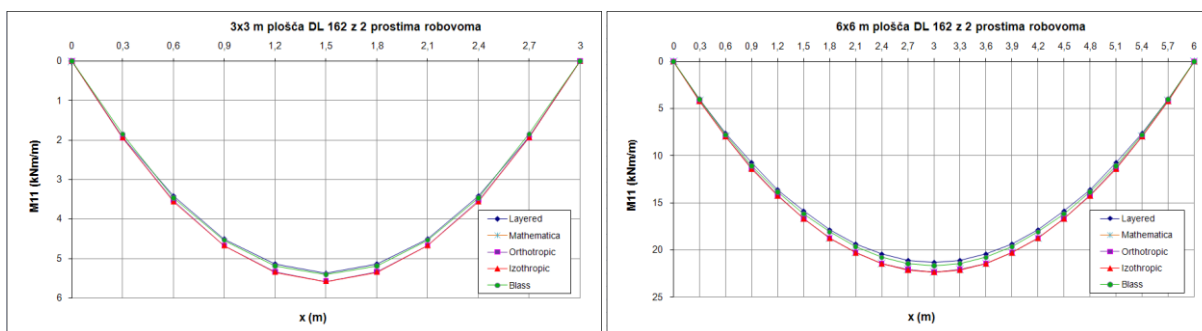
Pri plošči 3x3 m je razmerje med razponom L in debelino prereza d enako $L/d = 300 \text{ cm} / 16,2 \text{ cm} = 18,51$, zato je vpliv prečnih strižnih deformacij še znaten, kar se lahko opazi v obliki večjih pomikov plošče 1 v primerjavi z ostalimi ploščami, čeprav imajo te manjšo upogibno togost v smeri osi y.

Plošče 2, 3 in 4 imajo skoraj enake materialne karakteristike kot plošča 5 (preglednica 5.5), razen Poisson-ovega količnika ν_{12}^* , ki je večji pri plošči 5. Sklepamo, da ravno ν_{12}^* vpliva na povečanje podajnosti plošč 2, 3 in 4 v primerjavi s ploščo 5.

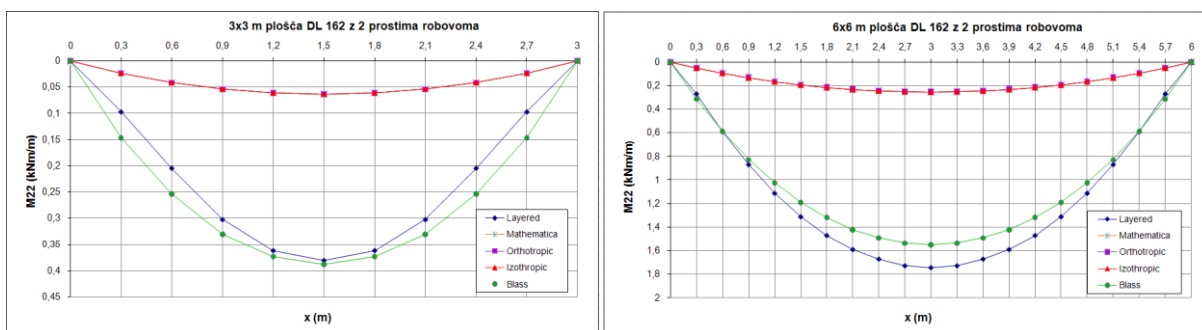
- Plošča DL 162 – prosta robova v smeri x in prostoležeča v smeri y (3x3 m in 6x6 m):



Slika 5.10: Pomiki plošč DL 162 z dvema prostima robovoma (3x3 m in 6x6 m)



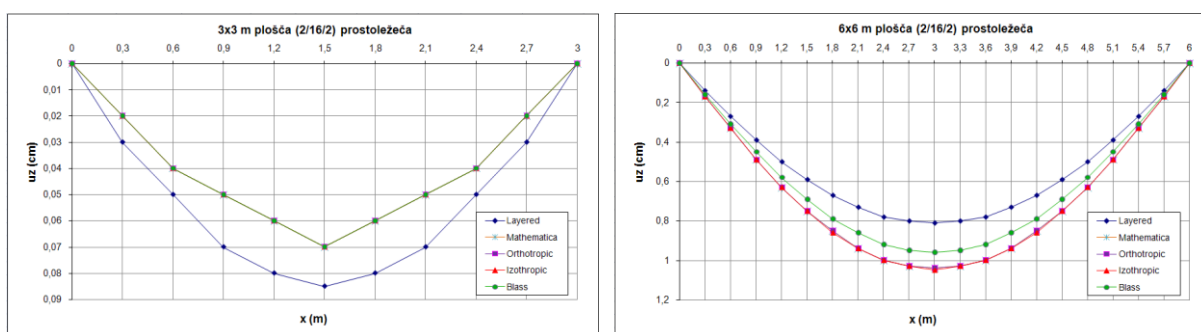
Slika 5.11: Momenti M_{11} plošč DL 162 z dvema prostima robovoma (3x3 m in 6x6 m)



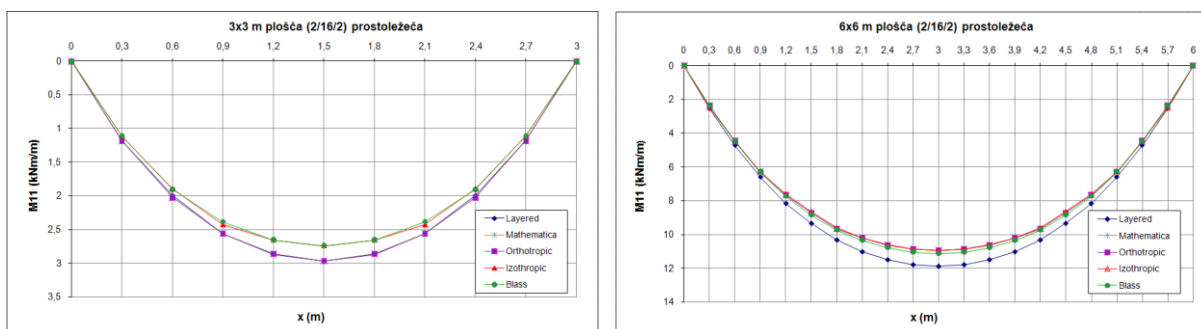
Slika 5.12: Momenti M_{22} plošč DL 162 z dvema prostima robovoma (3x3 m in 6x6 m)

V tem primeru smo ugotovili, da se se plošči 1 in 5 približno enako odzivata na zunanjo obtežbo. Pri ploščah 2, 3 in 4 je vpliv manjšega Poisson-ovega količnika ν_{12}^* izražen z manjšimi momenti M_{22} , kot so pri plošči 5. Prav tako smo opazili, da je obnašanje plošč 2, 3 in 4 analogno obnašanju prostoležega nosilca, obremenjenega z prečno linijsko obtežbo. To pomeni, da celotno obtežbo plošče prevzame nosilna smer x. Podoben odziv je tudi pri plošči 5, kjer so napetosti σ_{22} , tako kot pri ploščah 2, 3 in 4, skoraj neznatne. Pri plošči 1 pa opazimo, da se del obtežbe prenaša tudi v smeri osi y. Prednost podajanja prečnega prereza v obliki posameznih slojev je med drugim še v tem, da lahko dobimo vrednosti napetosti po posameznih slojih. Večino upogibnih napetosti prevzame zunanja nosilna sloja, manjši delež pa srednji sloj v nosilni smeri. Le majhen delež prevzamejo tudi sloji, katerih vlakna potekajo pravokotno glede na smer prevzema obtežbe.

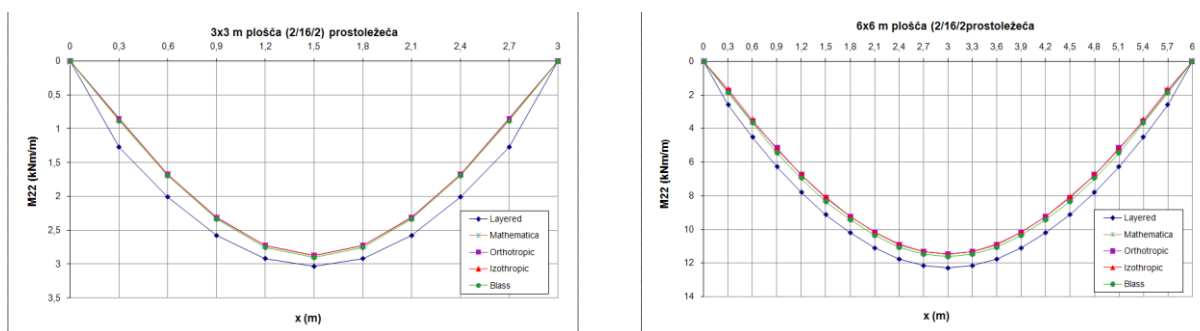
- Plošča (2/16/2) – prostoležeča (3x3 m in 6x6 m):



Slika 5.13: Pomiki prostoležečih plošč (2/16/2), (3x3 m in 6x6 m)



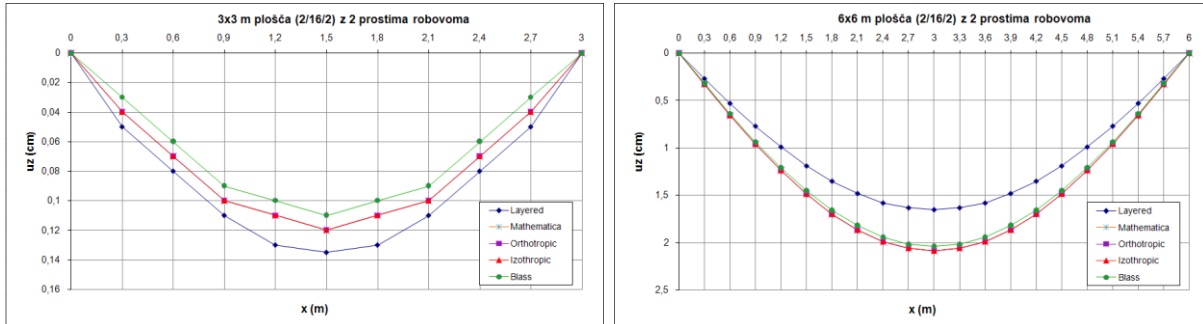
Slika 5.14: Momenti M_{11} prostoležečih plošč (2/16/2), (3x3 m in 6x6 m)

Slika 5.15: Momenti M_{22} prostoležečih plošč (2/16/2), (3x3 m in 6x6 m)

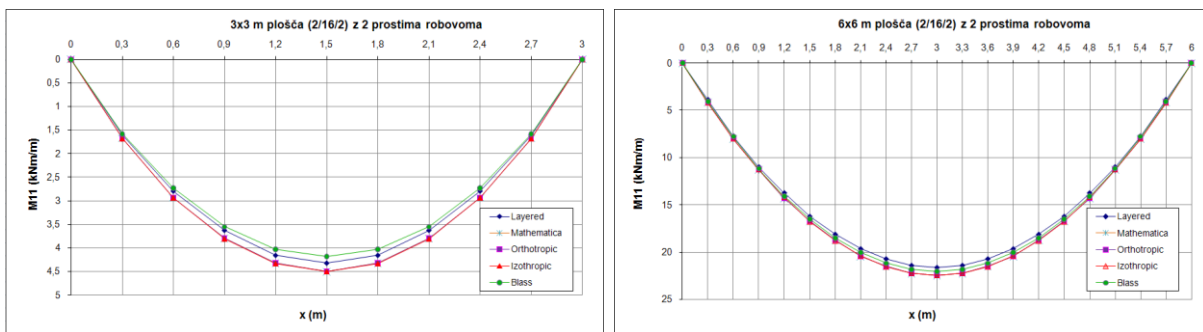
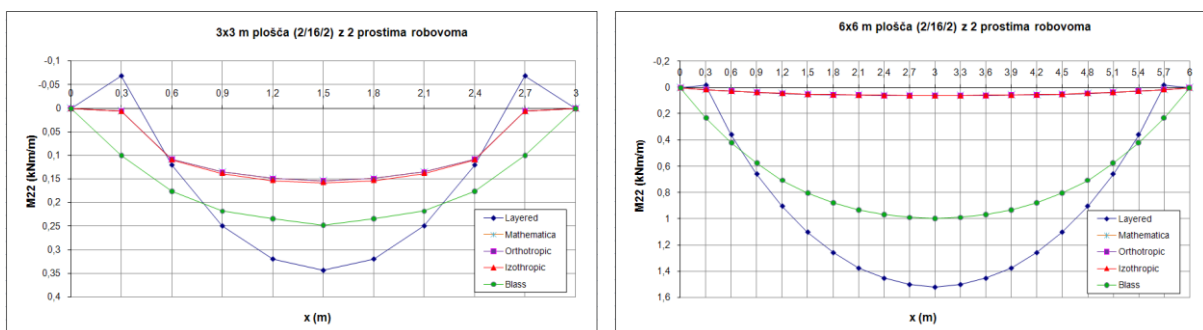
V tem primeru smo obravnavali ploščo z zelo tankima zunanjsima slojema (2 cm) v primerjavi z notranjim slojem (16 cm). Notranje sile M_{11} in M_{22} so v vseh petih pristopih skoraj enake. Pri analizi napetosti σ_{11} in σ_{22} pa vidimo, da te niso enake pri vseh primerih plošč. Pri plošči 1 srednji sloj z debelino 16 cm predstavlja glavno nosilno smer pri prenosu obtežbe, namreč togost v smeri y je izrazito večja kot v smeri osi x. Zato so tudi napetosti σ_{11} mnogo večje kot σ_{22} . Pri plošči 1 dimenzij 6x6 m so napetosti na sredini plošče $\sigma_{11} = 0,038 \text{ kN/cm}^2$ in $\sigma_{22} = 0,32 \text{ kN/cm}^2$, torej skoraj 10-krat večja vrednost na strani σ_{22} . Pri skoraj enakih vrednostih notranjih sil M_{11} in M_{22} to pomeni, da je upogibna togost v smeri osi y mnogo večja.

Če ploščo 1 primerjamo z vsemi ostalimi, opazimo, da so napetosti v ostalih ploščah mnogo bolj enakomerno razporejene. Razlog za to je, da smo pri homogenizaciji prereza oz. določitvi materialnih karakteristik s pomočjo Blass-ovih koeficientov dobili primerjalna elastična modula, katerih vrednosti so skoraj enake v smereh 1 in 2 (preglednica 5.5). To pa pomeni, da se tudi plošče pod površinsko obremenitvijo obnašajo enakomerno v obeh smereh. V tem primeru so pri ploščah 2-5 znašale upogibne napetosti na sredini plošče $\sigma_{11} = 0,16 \text{ kN/cm}^2$ in $\sigma_{22} = 0,17 \text{ kN/cm}^2$. Ugotovili smo, da moramo pri poenostavljenih pristopih s homogenimi prerezi napetosti v prerezu izračunati ločeno od računske analize z računalniškimi programi. Pomiki se pri obeh ploščah (3x3 m in 6x6 m) razlikujejo pri posameznih pristopih obravnave zaradi enakih razlogov, kot smo jih navedli pri prejšnjih dveh primerih plošč.

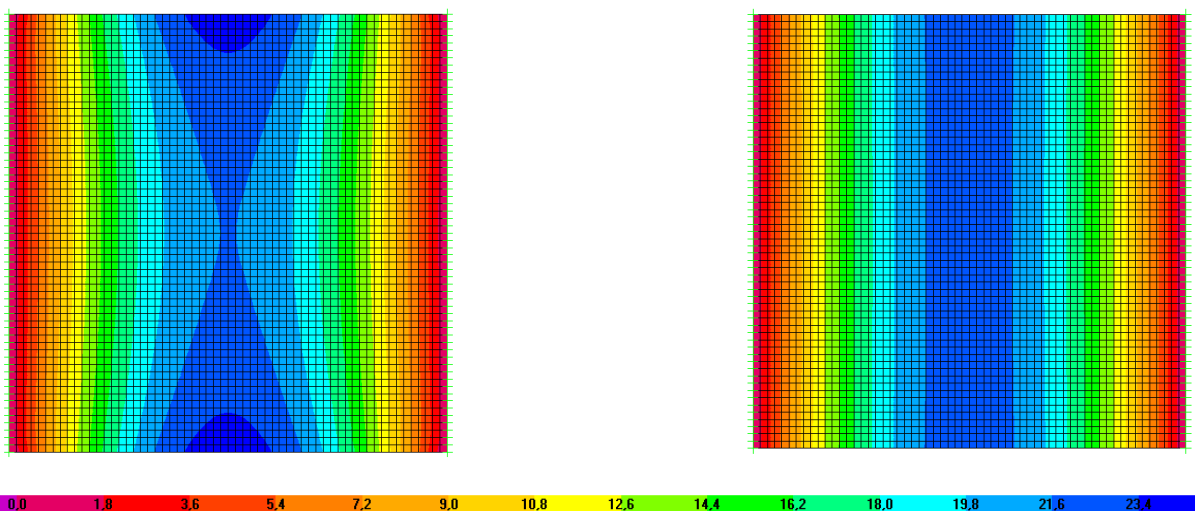
- Plošča (2/16/2) – prosta robova v smeri osi x in prostoležeča v smeri y (3x3 m in 6x6 m):



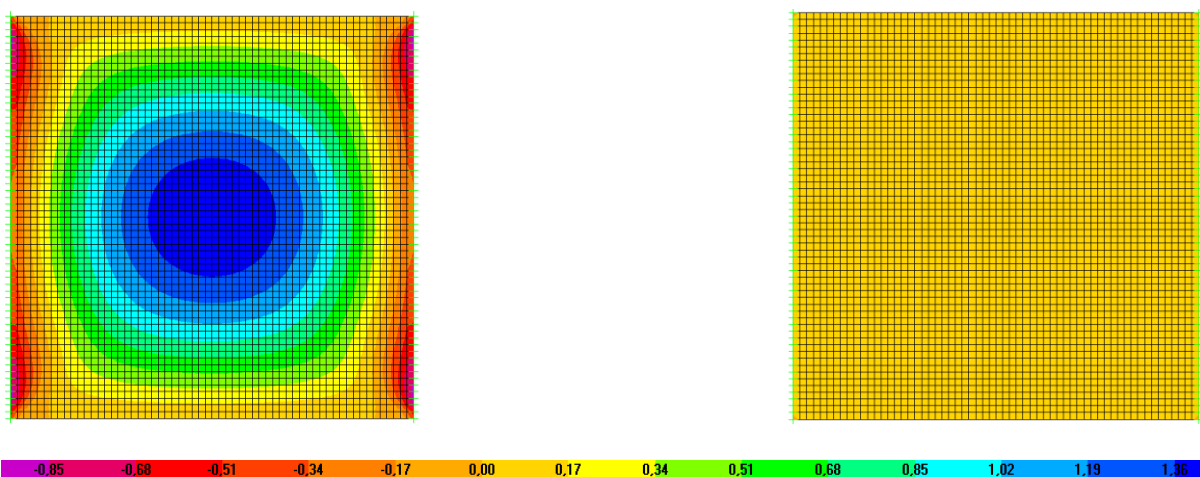
Slika 5.16: Pomiki plošč (2/16/2) z dvema prostima robovima (3x3 m in 6x6 m)

Slika 5.17: Momenti M_{11} plošč (2/16/2) z dvema prostima robovima (3x3 m in 6x6 m)Slika 5.18: Momenti M_{22} plošč (2/16/2) z dvema prostima robovima (3x3 m in 6x6 m)

V obravnavanem primeru pri analizi pridemo do ugotovitve, da se celotna obtežba pri ploščah 2-5 prenaša samo v smeri osi x, čeprav je upogibna togost plošče v smeri y mnogo večja. Pri momentih M_{22} plošče 1 opazimo nekoliko nenavaden potek momentne linije, saj je v določenih točkah blizu robov vrednost momentov negativna. Na podlagi deformirane oblike plošče in potekov momentnih linij M_{11} (slika 5.19) ter M_{22} (slika 5.20) lahko pridemo do ugotovitve, da plošča prenaša del obtežbe tudi v smeri y.



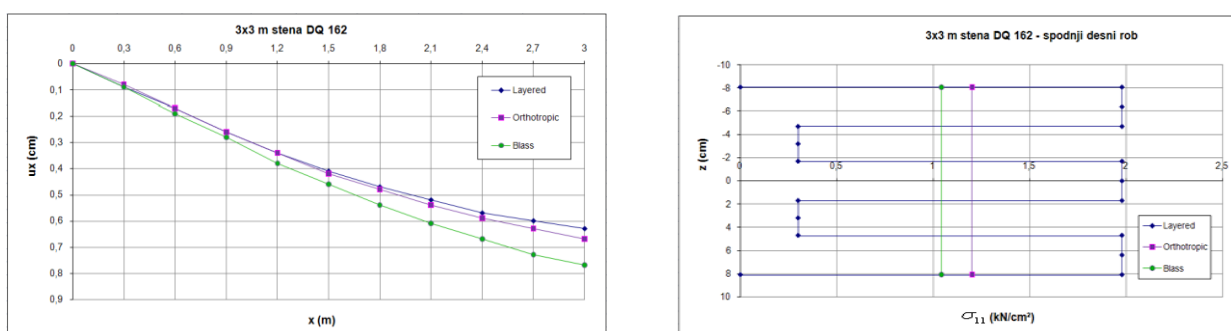
Slika 5.19: Potek momentov M_{11} v ploščah 1 (levo) in 2 (desno), (2/16/2) 6x6 m z dvema prostima robovoma



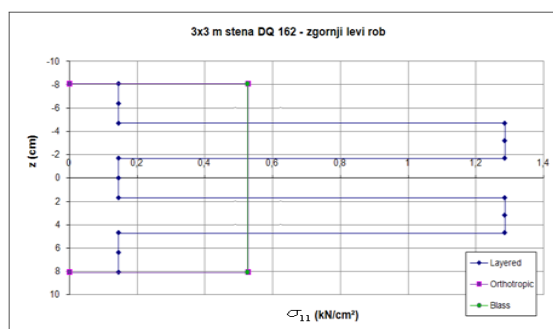
Slika 5.20: Potek momentov M_{22} v ploščah 1 (levo) in 2 (desno), (2/16/2) 6x6 m z dvema prostima robovoma

Za razliko od plošče 2, katera prenaša obtežbo le v smeri osi x, pri plošči 1 opazimo povečano ukrivljenost tudi v smeri osi y, kar pomeni, da se del obtežbe prenaša v tej smeri. Ukrivljenost prostih robov plošče 1 privede do negativnih momentov M_{22} ob prostoležeče podprtih robovih plošče. Vpliv ukrivljenosti prostih robov je na zunanjih delih prostoležeče podprtih robov največji, proti sredini pa se vpliv manjša.

- Stena DQ 162 – prostoležeče podprta (3x3 m):

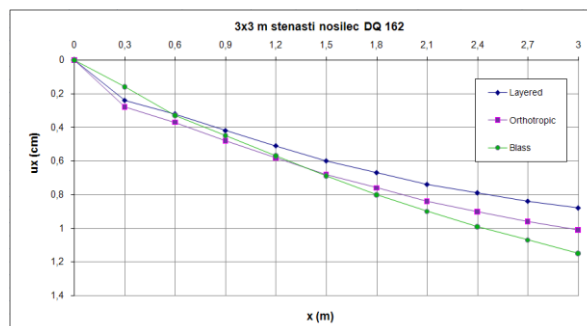


Slika 5.21: Pomiki u_z (levo) desnega robu in napetosti σ_{11} (desno) spodnjega desnega vogala po prerezu stene DQ 162



Slika 5.22: Napetosti σ_{11} zgornjega levega vogala po prerezu stene DQ 162

- Stenasti nosilec DQ 162 - prostoležeče podprt (3x3 m):



Slika 5.23: Pomiki u_x (levo) desnega robu stenastega nosilca DQ 162

Pri obravnavi stene in stenastega nosilca vidimo, da je oblika poteka pomikov desnega robu v obeh primerih za vse obravnavane pristope podajanja materialnih karakteristik podobna, vrednosti pa se nekoliko razlikujejo. Zanimiva je primerjava napetosti po slojih v primeru zgornjega levega in spodnjega desnega vogala stene. Potek vlaken zunanjih slojev desk je pravokoten glede na globalno os x , notranji sloji pa potekajo vzporedno z globalno osjo x . Temu primerno se tudi prenaša obtežba – v zgornjem levem vogalu prevladujejo vodoravne sile (smer x), katere prevzamejo notranji sloji desk (slika 5.22). V spodnjem desnem vogalu pa pride do tlačnih obremenitev, katero prevzamejo sloji, ki potekajo v smeri tlačnih napetosti, to sta zunanja sloja in srednji sloj (slika 5.21).

6 NUMERIČNA ANALIZA MODULARNE ENOTE

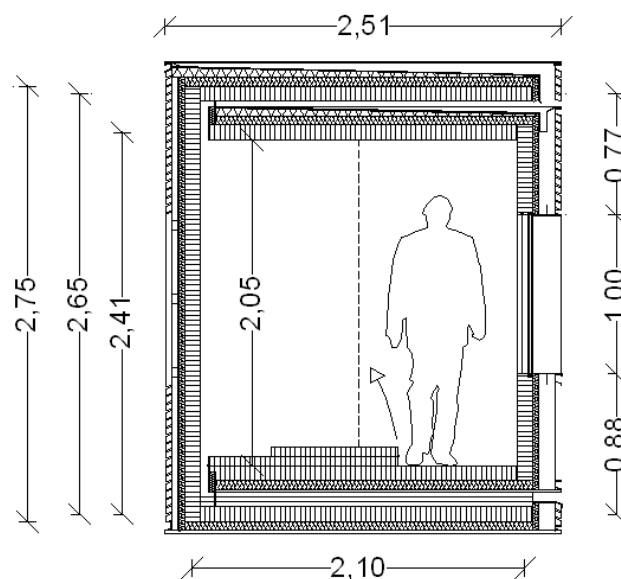
6.1 Geometrija in zgradba modularne enote

Modularna enota je sestavljena iz križno lepljenih lesenih panelov KLH v kombinaciji s toplotno izolacijo aerogel. Za plošče in stenske elemente tako zunanega dela konstrukcije, kot tudi notranjega izvlečnega dela, predpostavimo troslojne plošče z debelinami 9,5 cm. Zunanja sloja imata debelino 3,4 cm, notranji pa 2,7 cm. Smer zunanjih slojev pri ploščah je usmerjen v smeri prenosa obtežbe, t.j. v smeri globalne osi x. Smer zunanjih slojev pri stenah pa je v smeri globalne osi z.

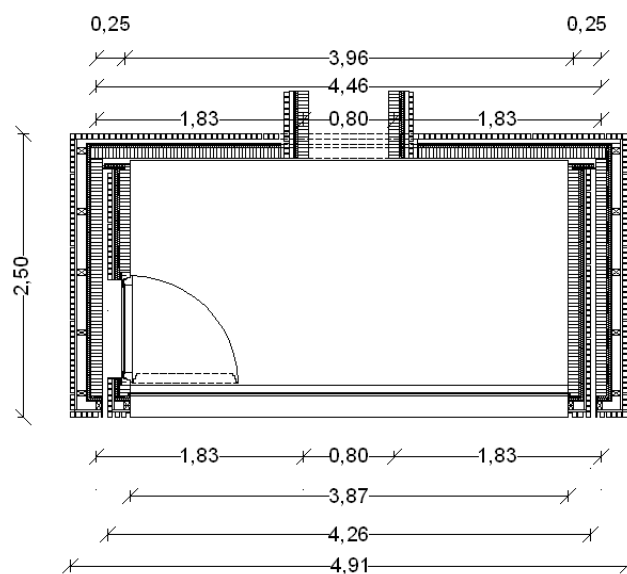
Posebnost modularne enote je izvlečni mehanizem, ki omogoča notranjemu delu konstrukcije, da se po vodilih izvleče in s tem poveča volumen objekta. Mehanizem sem zasnoval v obliki mehanskih vodil, ki bi bila pritrjena na spodnjo in zgornjo ploščo modularne enote. S pomočjo elektronskega krmiljenja bi se enota preko valjčkov, ki bi bili znotraj vodil, z minimalnim trenjem lahko premikala v horizontalni smeri. Glede na to, da bi v izvlečenem položaju notranji del konstrukcije zaradi lastne in koristne obtežbe povzročal velike momentne obremenitve na zunanjo konstrukcijo, sem si zamislil naslednjo rešitev. Izvlečni del konstrukcije bi bil na vseh štirih notranjih vogalih povezan s steno zunanjega dela konstrukcije s pomočjo hidravličnih samonivelirnih batov ustreznih dimenzij (slike 6.3-6.6). Pri izvleku notranjega dela bi v spodnjem predelu prihajalo do tlačnih obremenitev, katere bi prevzela bata v spodnjih vogalih. V nasprotju pa bi bil zgornji del izvlečnega dela konstrukcije natezno obremenjen. Hidravlična bata bi bila v zgornjem delu postavljena in pritrjena v nasprotni smeri kot spodnja bata, tako da bi bila tlačno obremenjena.

Modularna enota bi bila postavljena na hidravličnih nogah v vogalih zunanjega dela konstrukcije. V primeru izvlečnih sil zaradi možne prevrnitve modularne enote bi se hidravlične noge ustrezno sidrale v temelje.

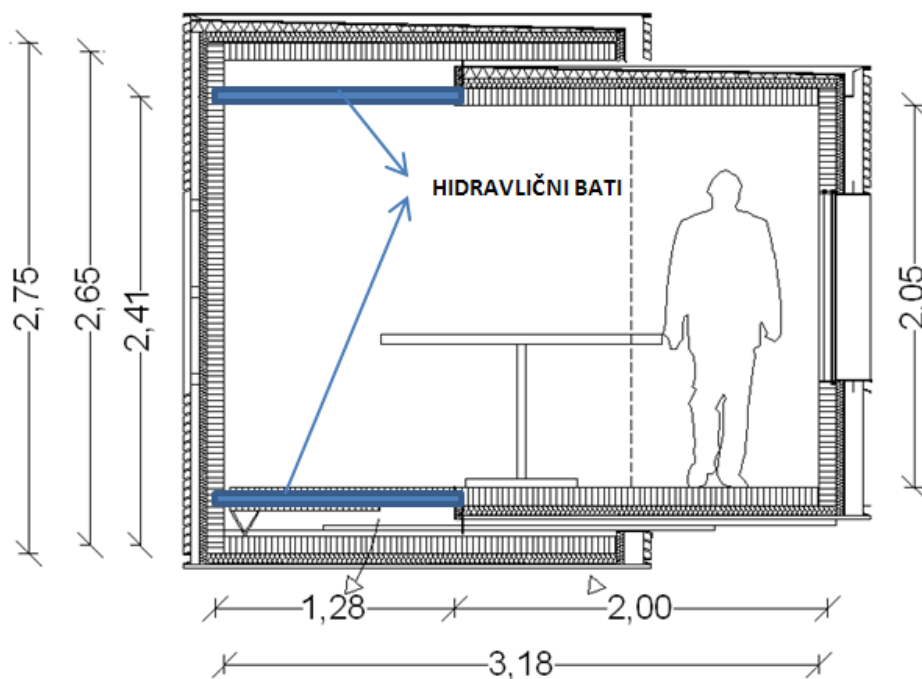
Dimenzije modularne enote v osnovnem položaju, v fazi izvleka in v končni izvlečeni fazi so prikazane na slikah 6.1-6.6.



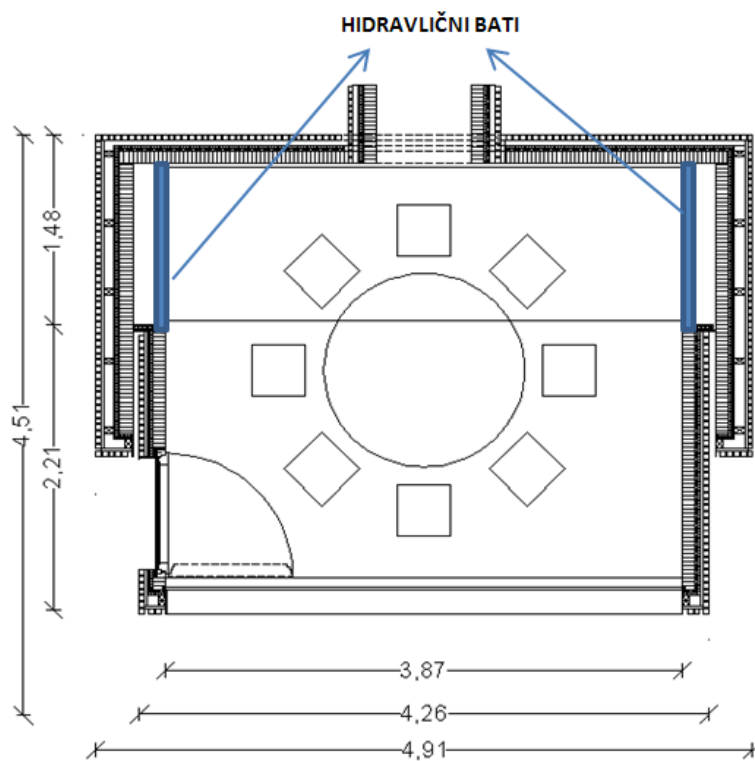
Slika 6.1: Prečni prerez modularne enote v osnovnem položaju



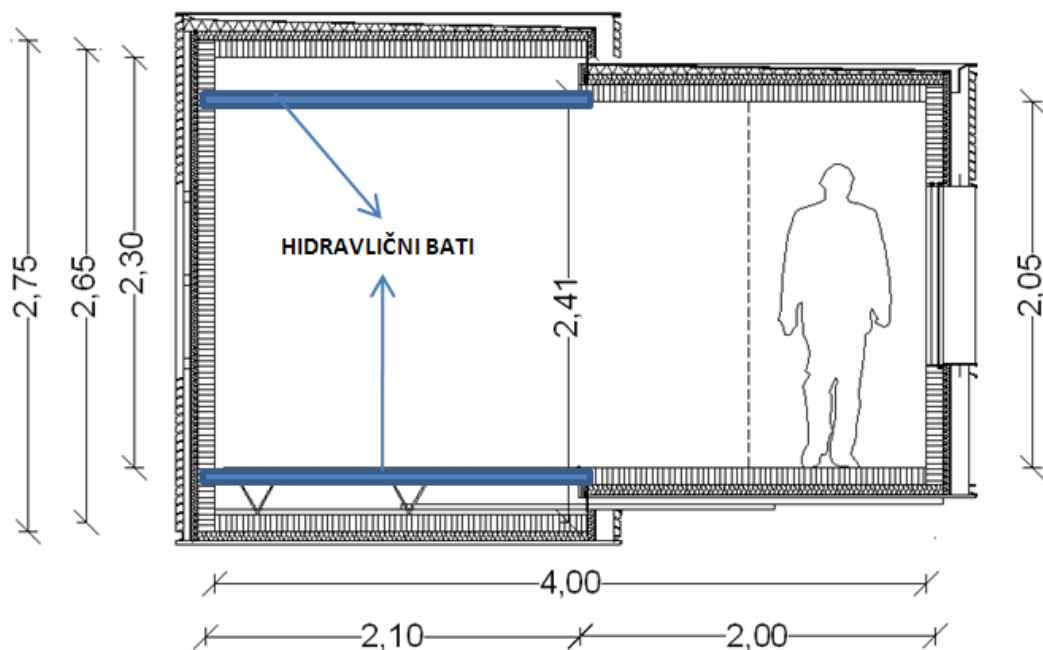
Slika 6.2: Tloris modularne enote v osnovnem položaju



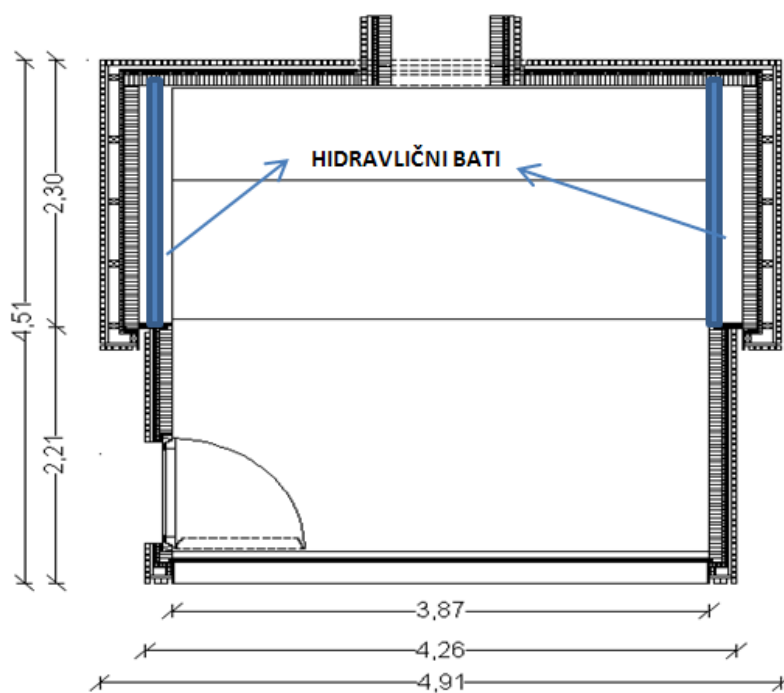
Slika 6.3: Prečni prerez modularne enote v polovično raztegnjenem položaju



Slika 6.4: Tloris modularne enote v polovično raztegnjenem položaju



Slika 6.5: Prečni prerez modularne enote v raztegnjenem položaju



Slika 6.6: Tloris modularne enote v raztegnjenem položaju

6.2 Obtežbe na konstrukcijo

- Lastna in stalna obtežba strehe:

○ Hidroizolacija:	$g_{st.} = 0,05 \text{ kN/m}^2$
○ Letve:	$g_{st.} = 0,10 \text{ kN/m}^2$
○ Pravokotne letve:	$g_{st.} = 0,10 \text{ kN/m}^2$
○ Naklonska toplotna izolacija:	$g_{st.} = 0,15 \text{ kN/m}^2$
○ Plošča nosilne konstrukcije DL95:	$g_{st.} = 0,50 \text{ kN/m}^2$
○ Finalizacija:	$g_{st.} = 0,20 \text{ kN/m}^2$
<hr/>	
	$g_{st.} = 1,10 \text{ kN/m}^2$

- Lastna in stalna obtežba zunanjih sten:

○ Lesena fasadna obloga:	$g_{st.} = 0,10 \text{ kN/m}^2$
○ Lesena podkonstrukcija:	$g_{st.} = 0,20 \text{ kN/m}^2$
○ Toplotna izolacija:	$g_{st.} = 0,10 \text{ kN/m}^2$
○ Panel nosilne konstrukcije DL95:	$g_{st.} = 0,50 \text{ kN/m}^2$
○ Finalizacija:	$g_{st.} = 0,20 \text{ kN/m}^2$
<hr/>	
	$g_{st.} = 1,10 \text{ kN/m}^2$

- Lastna in stalna obtežba tal na terenu:

○ Finalni tlak:	$g_{st.} = 0,15 \text{ kN/m}^2$
○ OSB plošče:	$g_{st.} = 0,15 \text{ kN/m}^2$
○ Plošča nosilne konstrukcije DL95:	$g_{st.} = 0,50 \text{ kN/m}^2$
○ Toplotna izolacija:	$g_{st.} = 0,10 \text{ kN/m}^2$
○ Zaključni sloj:	$g_{st.} = 0,20 \text{ kN/m}^2$
<hr/>	
	$g_{st.} = 1,10 \text{ kN/m}^2$

- Spremenljiva obtežba strehe - obtežba snega:

Po EC1 za območje Ljubljane: cona A2, 300 m nadmorske višine

$$s_k = 1,293[1 + (A/728)^2] = 1,293[1 + (300/728)^2] = 1,51 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{s, \text{strehe}} = \mu_i C_e C_t s_k = 0,8 \times 1,0 \times 1,0 \times 1,51 \text{ kN/m}^2 = 1,21 \text{ kN/m}^2$$

- Koristna obtežba notranjega in izvlečnega dela modularne enote:

$$q_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$$

- Obtežba vetra:

Po EC 1-1-4 za območje Ljubljane: cona 1, $v_{b,0} = 20 \text{ m/s}$; kategorija terena III ($z_0 = 0,3 \text{ m}$, $z_{\min} = 5 \text{ m}$)

$$q_b = \frac{\rho^* v_b^2}{2} = \frac{1,25 \times 20^2}{2} = 250 \text{ N/m}^2 = 0,25 \text{ kN/m}^2$$

$c_e(z) = 1,3$ – faktor izpostavljenosti, katerega odčitam v EC 1-1-4, str.23

$$q_p(z) = q_b c_e(z) = 0,25 \text{ kN/m}^2 \times 1,3 = 0,33 \text{ kN/m}^2$$

$q_w = c_{pe} q_p$ - zaradi poenostavitve koeficiente za zunanji tlak c_{pe} predpostavim na vrednost 1,0 - $q_w = 0,33 \text{ kN/m}^2$

Kombinacije obtežb

Preglednica 6.1: Kombinacijski faktorji obtežb

Vrsta obtežbe	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
q_k (stanovanja, pisarne)	0,7	0,5	0,3
q_s	0,5	0,2	0
q_w	0,6	0,2	0

(i) MSN – Mejno stanje nosilnosti:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (6.1)$$

- 1.) $1,35 g_{st} + 1,5 q_s + 1,5 \times 0,7 q_k + 1,5 \times 0,6 q_w$
- 2.) $1,35 g_{st} + 1,5 q_k + 1,5 \times 0,5 q_s + 1,5 \times 0,6 q_w$
- 3.) $1,35 g_{st} + 1,5 q_w + 1,5 \times 0,7 q_k + 1,5 \times 0,5 q_s$

(ii) MSU – Mejno stanje uporabnosti:

a) MSU_{inst} – začetni pomiki

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (6.2)$$

$$w_{inst} = \sum_{j \geq 1} w_{inst}(G_{k,j}) + w_{inst}(Q_{k,1}) + \sum_{i \geq 1} w_{inst}(\Psi_{0,i} Q_{k,i}) \quad (6.3)$$

- 1.) $1,0 g_{st} + 1,0 q_s + 0,7 q_k + 0,6 q_w$
- 2.) $1,0 g_{st} + 1,0 q_k + 0,5 q_s + 0,6 q_w$
- 3.) $1,0 g_{st} + 1,0 q_w + 0,7 q_k + 0,5 q_s$

b) MSU_{fin} – končni pomiki

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (6.4)$$

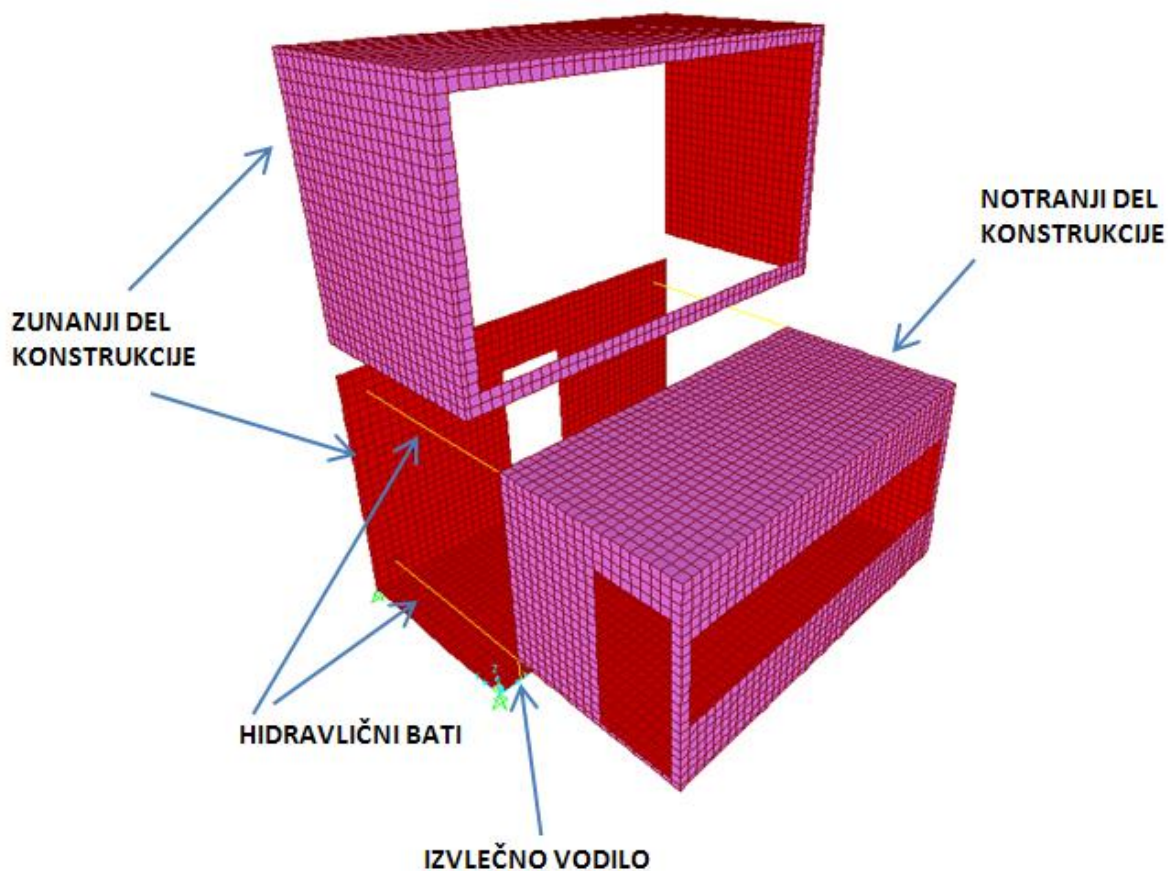
$$w_{fin} = \sum_{j \geq 1} (1 + k_{def}) w_{inst}(G_{k,j}) + \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} (1 + k_{def}) w_{inst}(Q_{k,i}) \quad (6.5)$$

- 1.) $(1,0 + 0,8) g_{st} + (1 + 0 \times 0,8) q_s + (0,7 + 0,3 \times 0,8) q_k + (0,6 + 0 \times 0,8) q_w$
- 2.) $(1,0 + 0,8) g_{st} + (1 + 0,3 \times 0,8) q_k + (0,6 + 0 \times 0,8) q_w + (0,5 + 0 \times 0,8) q_s$
- 3.) $(1,0 + 0,8) g_{st} + (1 + 0 \times 0,8) q_w + (0,5 + 0 \times 0,8) q_s + (0,7 + 0,3 \times 0,8) q_k$

6.3 Računski model konstrukcije

Modularno enoto smo modelirali s pomočjo ploskovnih elementov, velikost končnega elementa je bila 10 x10 cm. Enota je bila podprta odvisno od njene funkcije oz. stanja. V primeru, ko smo enoto obravnavali kot samostojno, je bila podprta prostoležeče v spodnjih vogalih zunanega dela konstrukcije. V primeru, ko je bila enota obravnavana kot parazitna konstrukcija, smo jo podprli v štirih točkah, v katerih se je stikala z obstoječim objektom. Ko smo obravnavali fazo dviganja modularne enote, je bila enota podprta v zgornjih štirih vogalih zunanega dela. V teh točkah namreč avtidvigalo lahko pričvrsti vrvi, s katerimi enoto dvigne in jo položi na ustrezno mesto.

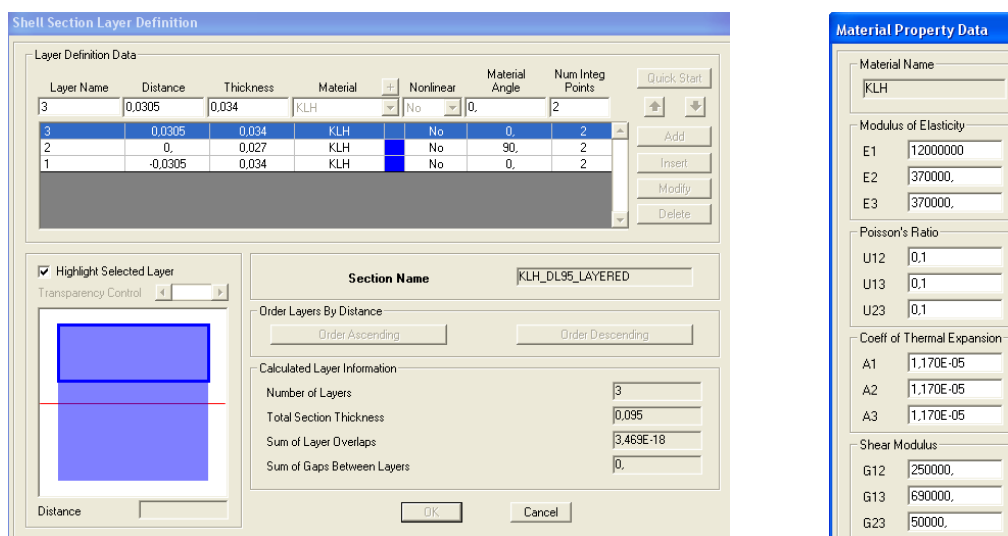
Za izvlečni mehanizem smo uporabili linijske elemente in sicer jeklene votle palice premera 10 cm in debeline 4 mm, katere imajo samo osno nosilnost. S tem smo se izognili morebitnim pojavom momentov v hidravličnih batih in se s tem približali realnemu obnašanju batov, ker bati prenašajo samo tlačne obremenitve. Za izvlečna vodila smo prav tako uporabili palične linijske elemente, s katerimi smo notranji del konstrukcije (izvlečni del) z zunanjo konstrukcijo povezovali tako, da med njima delujejo samo osne sile. Palice smo modelirali kot zelo toge, s tem smo dosegli podobno obnašanje kot ga imajo izvlečna vodila v realnosti, ki so prav zelo toga glede na konstrukcijo iz križno lepljenega lesa. Palice so razporejene v ravni liniji na vsakih 10 cm, tako da smo s tem dosegli togo linijsko povezavo med notranjim in zunanjim delom konstrukcije, med katerima delujejo samo tlačne osne sile (preko togih palic). Na ta način smo upoštevali zamisel o mehanizmu vodila, da bi se notranji del konstrukcije lahko premikal navzven preko valjčkov, na katere bi delovala le tlačna osna sila, t.j. teža notranjega dela konstrukcije. Na sliki 6.7 so prikazani glavni elementi računskega modela konstrukcije.



Slika 6.7: Elementi računskega modela modularne enote

6.4 Materialne karakteristike prečnih prerezov

Panele modularne enote smo podali s troslojnimi ploščami z debelino 9,5 cm. Orientacija in debelina posameznega sloja ter materialne karakteristike slojev laminata so vidne na spodnji sliki. (slika 6.8).

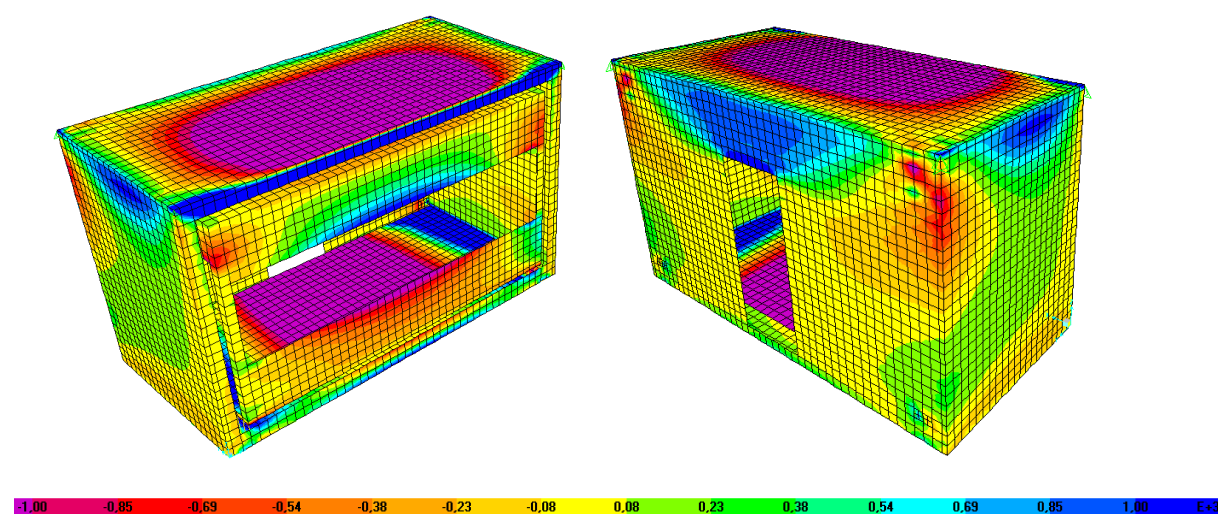


Slika 6.8: Sestava plošč in sten ter materialne karakteristike

6.5 Analize in rezultati

6.5.1 Modularna enota v fazi dviganja

Na spodnji sliki je prikaz napetosti S_{11} v modularni enoti za mejno stanje nosilnosti (slika 6.9), ko je enota podprta na zgornjih štirih robovih zunanega dela konstrukcije.



Slika 6.9: Potek napetosti S_{11} – enota v fazi dviganja

Največje normalne napetosti S_{11} so bile na spodnji notranji plošči: $S_{11,max} = 0,227 \text{ kN/cm}^2$

Pri mejnem stanju uporabnosti kontroliramo začetne in končne pomike. Največji pomiki so bili na zgornji zunanji plošči:

$$u_{inst,max} = 0,49 \text{ cm}$$

$$u_{fin,max} = 0,71 \text{ cm}$$

Opazovali smo tudi, kakšen vpliv na konstrukcijo imajo linijski elementi, ki predstavljajo hidravlične bate in izvlečna vodila, ki se nahajajo pod izvlečnim delom konstrukcije.

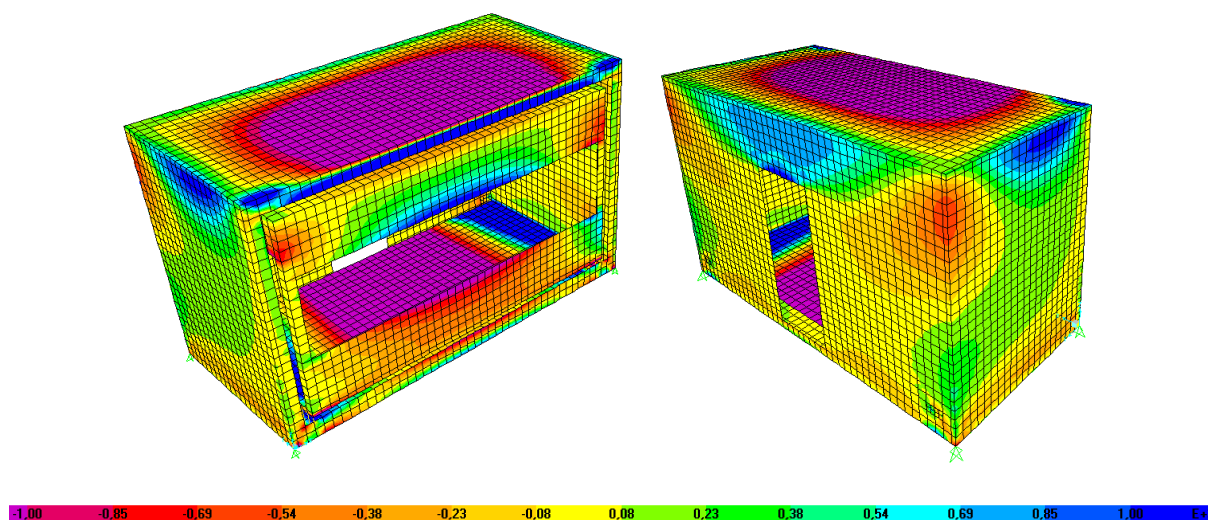
Preglednica 6.2: Osne sile v hidravličnih batih in izvlečnih vodilih – faza dviganja

Linijski elementi	Osne sile [kN]
Zgornji hidravlični bat	2,042
Spodnji hidravlični bat	-0,431
Izвлеčna vodila (na 10 cm)	6,27

Hidravlični bati še niso prišli do izraza, saj je notranji del konstrukcije v celoti podprt z izvlečnimi vodili. Tlačne osne sile v vodilih so največje ob robovih notranjega dela konstrukcije in sicer je dolžini 10 cm linijski element moral prevzeti 6,27 kN, kar znaša 62,7 kN/m.

6.5.2 Modularna enota v osnovnem položaju

Konstrukcija v osnovnem položaju je podprta v spodnjih štirih vogalnih točkah zunanjega dela konstrukcije. Na sliki 6.10 je prikaz napetosti S_{11} v modularni enoti za mejno stanje nosilnosti.



Slika 6.10: Potek napetosti S_{11} – enota v osnovnem položaju

Največje normalne napetosti S_{11} so bile na spodnji notranji plošči: $S_{11,max} = 0,237 \text{ kN/cm}^2$

Največji pomiki so bili na zgornji zunanji plošči:

$$u_{inst,max} = 0,45 \text{ cm}$$

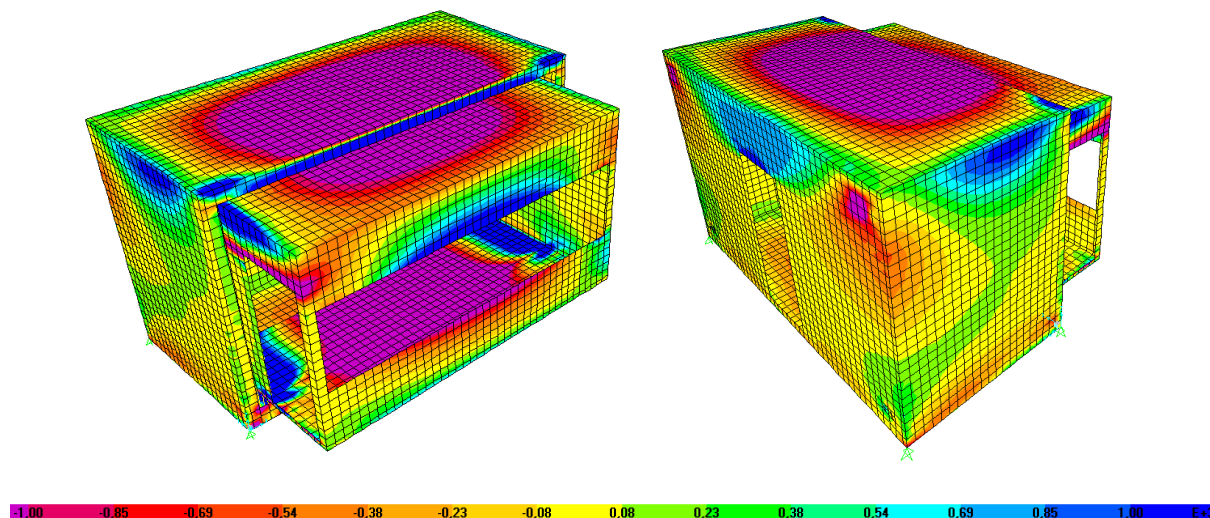
$$u_{fin,max} = 0,65 \text{ cm}$$

Preglednica 6.3: Osne sile v hidravličnih batih in izvlečnih vodilih – enota v osnovnem položaju

Linijski elementi	Osne sile [kN]
Zgornji hidravlični bat	0,732
Spodnji hidravlični bat	-0,328
Izvlečna vodila (na 10 cm)	8,151

6.5.3 Modularna enota v polovično raztegnjenem položaju

Na spodnji sliki je prikaz napetosti S_{11} v modularni enoti za mejno stanje nosilnosti (slika 6.11).



Slika 6.11: Potek napetosti S_{11} – enota v polovično raztegnjenem položaju

Tokrat so bile največje napetosti $S_{11,max} = 0,205 \text{ kN/cm}^2$, zopet na zgornji plošči zunanje konstrukcije.

Začetni in končni pomiki so prav tako največji na zgornji zunanji plošči in sicer na nepodprtem robu, kjer je možen izvlek konstrukcije:

$$u_{inst,max} = 0,45 \text{ cm}$$

$$u_{fin,max} = 0,78 \text{ cm}$$

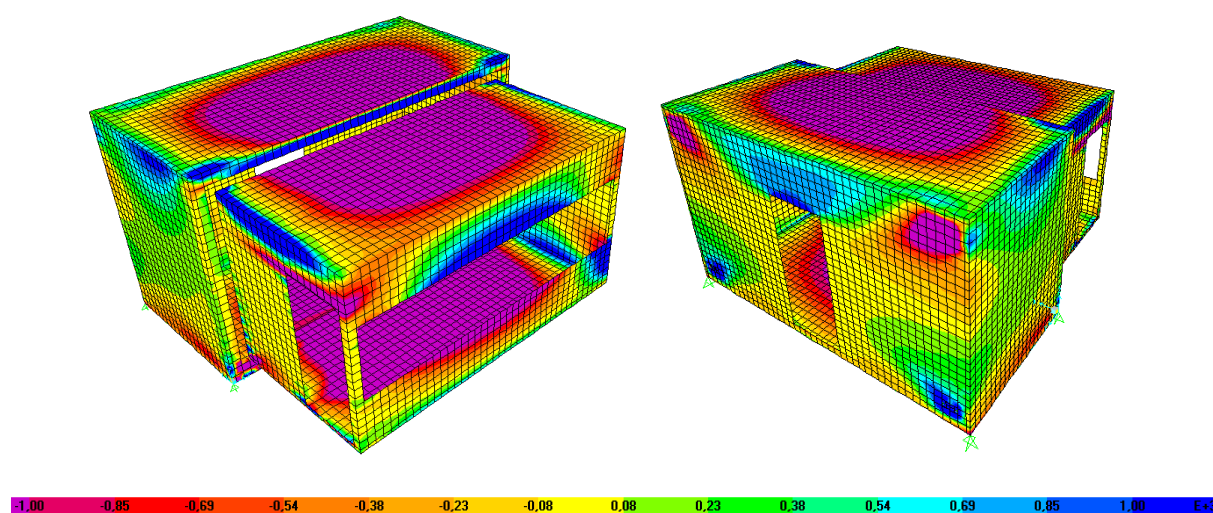
Preglednica 6.4: Osne sile v hidravličnih batih in izvlečnih vodilih – enota v napol raztegnjenem položaju

Linijki elementi	Osne sile [kN]
Zgornji hidravlični bat	4,85
Spodnji hidravlični bat	-0,309
Izvlačna vodila (na 10 cm)	12,99

V tem primeru že opazimo delovanje linijskega elementa, ki predstavlja hidravlični bat in sicer pride v zgornjem delu do nateznega obremenjevanja elementa. Če bat pritdimo v primerni točki in nasprotni smeri, lahko obremenitev prevzame kot tlačno silo.

6.5.4 Modularna enota v raztegnjenem položaju

Na spodnji sliki je prikaz napetosti S_{11} v modularni enoti za mejno stanje nosilnosti (slika 6.12).



Slika 6.12: Potek napetosti S_{11} – enota v raztegnjenem položaju

Največje napetosti S_{11} se pojavijo na zgornji plošči izvlečnega dela konstrukcije: $S_{11,max} = 0,228 \text{ kN/cm}^2$.

V tem primeru so tudi pomiki največji pri zgornji plošči izvlečnega dela konstrukcije in sicer na nepodprtem robu:

$$u_{inst,max} = 0,85 \text{ cm}$$

$$u_{fin,max} = 1,26 \text{ cm}$$

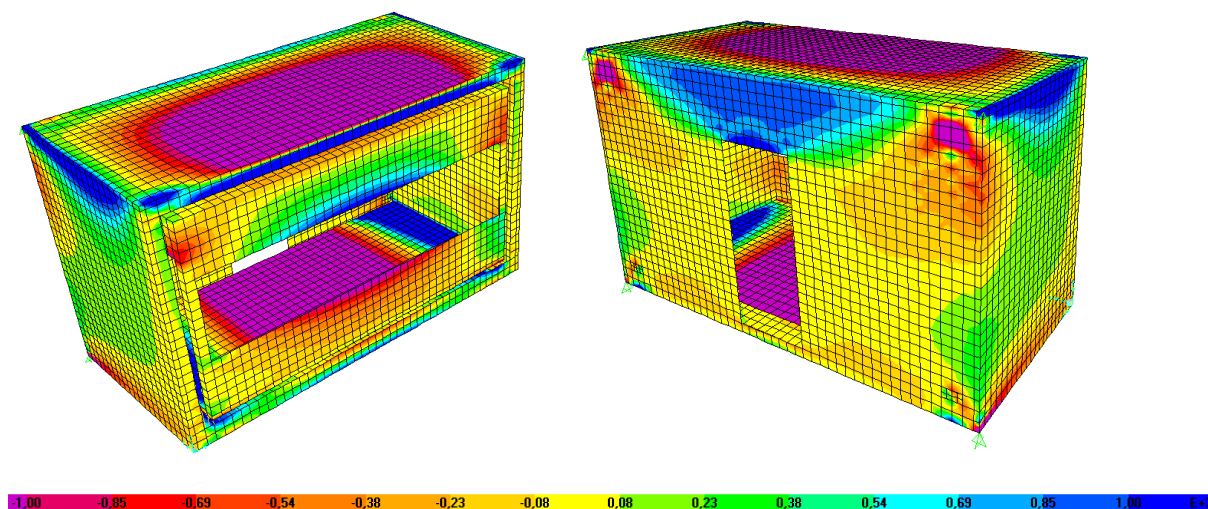
Preglednica 6.5: Osne sile v hidravličnih batih in izvlečnih vodilih – enota raztegnjenem položaju

Linijski elementi	Osne sile [kN]
Zgornji hidravlični bat	16,07
Spodnji hidravlični bat	-7,21
Izvlačna vodila (na 10 cm)	-31,75

Tokrat pa pride v hidravličnih batih že do relativno velikih obremenitev, saj je skoraj celotni notranji del konstrukcije izvlečen in ni podprt v nobeni drugi točki, razen z bati in krajnim delom izvlečnega vodila.

6.5.5 Modularna enota kot parazitna konstrukcija

Tokrat je konstrukcija podprta v štirih točkah stene, tako da je konzolno priključena na obstoječ objekt. Na spodnji sliki je prikaz napetosti S_{11} v modularni enoti za mejno stanje nosilnosti (slika 6.13). Največja vrednost $S_{11,max} = 0,271 \text{ kN/cm}^2$ je na nepodprtem robu zgornje plošče zunanje konstrukcije.



Slika 6.13: Potek napetosti S_{11} – enota kot parazitna konstrukcija

Tudi pomiki so največji na istem mestu:

$$u_{\text{inst,max}} = 0,52 \text{ cm}$$

$$u_{\text{fin,max}} = 0,76 \text{ cm}$$

Preglednica 6.6: Osne sile v hidravličnih batih in izvlečnih vodilih – enota kot parazitna konstrukcija

Linijski elementi	Osne sile [kN]
Zgornji hidravlični bat	6,68
Spodnji hidravlični bat	0,428
Izvlečna vodila (na 10 cm)	-5,09

6.5.6 Kontrole napetosti in pomikov

$$\text{Kontrola napetosti: } S_{11,\text{max}} = 0,237 \text{ kN/cm}^2 < f_{m,d} = \frac{k_{\text{mod}} f_{m,k}}{\gamma_m} = \frac{0,8 \times 2,3 \text{ kN/cm}^2}{1,25} = 1,472 \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{Kontrola začetnih pomikov: } u_{\text{inst,max}} = 0,85 \text{ cm} < L/300 = 450 \text{ cm}/300 = 1,5 \text{ cm}$$

$$\text{Kontrola končnih pomikov: } u_{\text{fin,max}} = 1,26 \text{ cm} < L/250 = 450 \text{ cm}/250 = 1,8 \text{ cm}$$

7 ZAKLJUČKI

V diplomski nalogi sem obravnaval modularne enote iz križno lepljenega lesa. Na začetku sem predstavil križno lepljen les kot gradbeni material in njegovo sestavo (križno orientirane sloje iz desk), da smo spoznali mehanske lastnosti tega materiala ter možnosti njegove uporabe v gradbeništvu. Konstrukcije iz križno lepljenega lesa se med lesenimi nosilnimi sistemi namreč vse bolj in bolj uveljavljajo. Statistika kaže, da uporaba masivnega križno lepljenega lesa narašča med večnadstropnimi stavbami in objekti večjih dimenzij, prav tako pa pokrivajo vse večji delež med montažnimi stanovanjskimi objekti.

V nadaljevanju smo se ozrli na potenciale inovativne modularne gradnje v prihodnosti in predstavili nekatere konkretne primere konstrukcij. Namen naloge je bil zasnovati modularno enoto iz križno lepljenega lesa, ki bi bila multifunkcionalna, dinamična, nizkoenergijska, v precejšni meri tudi samozadostna in trajnostna. S tem bi bil zagotovljen relativno majhen vpliv na okolje, tako v procesu proizvodnje, kakor tudi v času uporabe objekta. Z razvitimi tehničnimi rešitvami bi bila omogočena skorajšnja neodvisnost od komunalne infrastrukture in geografije terena. S svojo spremenljivo obliko bi se modularna enota lahko prilagodila klimatskim in topografskim razmeram ter trenutnim potrebam uporabnikov po prostoru in svetlobi. Bolj podrobno sem se lotil obravnave statične analize računskega modela osnovne modularne enote.

Enoto sem zasnoval z dimenzijami, katere bi bile še znotraj meja, ki so dovoljene za redni cestni transport (4,5x2,5x2,7 m). S tem bi se končane enote lahko naložilo na redno cestno transportno vozilo in se jih postavilo praktično kamorkoli, saj pri tem ne bi bilo treba uporabiti posebnega avtodvigala ali upoštevati ovir terena. Enote bi se lahko med seboj kombinirale, sestavljale in tako tvorile funkcionalno celoto, izdelano po potrebah in željah uporabnika.

Pred samo analizo modularne enote sem se osredotočil še na različne metode modeliranja laminatov. Za boljše razumevanje obnašanja laminatov iz križno lepljenega lesa in rezultatov analiz je bila predstavljena teorija kompozitnih laminatov. Na primerih plošč in sten sem

obravnaval različne pristope podajanja materialnih karakteristik laminatov in analiziral rezultate. Za račun notranjih sil in pomikov lahko ob ustreznih predpostavkah poleg t.i. večslojnih prerezov uporabimo tudi poenostavljene metode s homogenizacijo v namišljen enoslojni prerez. Račun napetosti v ploščah pa je potrebno izvesti ločeno, saj vrednosti, dobljene v programu za enoslojne plošče, ne ustrezajo dejanskim napetostim večslojnega prereza. Sicer pa je najboljša in najbolj natančna računsko analiza tista s podajanjem večslojnega prereza in materialnih karakteristik posameznih slojev križno lepljenega laminata.

Analizo modularne enote smo izvedli s programom SAP 2000 v12. Konstrukcija je bila modelirana z večslojnimi ploskovnimi elementi, ki nam omogočajo račun napetosti po plasteh. Analizirali smo pet različnih položajev modularne enote ter pri kontroli mejnega stanja nosilnosti in uporabnosti skušali izpolniti vse kriterije.

Glede na to, da se nahajamo v času, ko je računalniško modeliranje konstrukcij in projektiranje na osnovi računalniških modelov in analiz v razcvetu, se moramo še vedno zavedati dejstva, da brez eksperimentalnih analiz ne moremo biti prepričani o zanesljivosti in natančnosti rezultatov študij. V računalniških modelih namreč konstrukcije modeliramo na osnovi nekih predpostavk in poenostavitev, ki naj bi čim bolj natančno opisale obnašanje konstrukcij v naravi, katerih verodostojnost lahko preverimo le na osnovi eksperimentalnih analiz.

Zavedam se, da bi bilo za realizacijo vseh idej o potencialu modularne gradnje iz križno lepljenega lesa potrebnih veliko inovativnih rešitev in študij. Ob tem bi morali izvesti tudi veliko število preiskav in eksperimentov, za kar so poleg znanja potrebna tudi finančna sredstva. Terenske raziskave bi služile kot dopolnilo teoretičnemu delu študij.

VIRI

Barbero, E.J. 1999. Introduction to composite materials design. Philadelphia, Taylor & Francis 336 str.

Blass, H.J. 2007. Gutachtliche Stellungnahme zum Tragverhalten von Idefix Verbindern als Verbindungsmittel in Holzkonstruktionen. Karlsruhe, Universität Karlsruhe (TH), Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen: 11 str.

Blass, H. J., Fellmoser, P. 2004. Design of Solid Wood Panels with Cross Layers. V: Proceedings of the 8th World Conference on Timber Engineering, WCTE 2004, June 14-17, 2004, Lahti, Finland; str. 543-548.

Brank, B., Carrera, E. 2000. Multilayered shell finite element with interlaminar continuous shear stresses: a refinement of the Reissner-Mindlin formulation. International journal for numerical methods in engineering, 48, 6, str. 843-874

Brank, B., Petelin, M. 2006. Napetosti v pravokotnih kompozitno laminatnih ploščah = Stresses in rectangular composite plates. V: Korelc, J. in Zupan, D. (ur.). Kuhljevi dnevi 2006 – Zbornik del. Lipica, 21. – 22. september 2006. Ljubljana, Slovensko društvo za mehaniko: str. 33-40.

Koponen, S. 2005. The consequences of wood cellular structure and rolling-shear in crossbanded veneer composite. Helsinki University of technology, Laboratory of structural engineering and building physics : 23 str.

Korn, D. 2008. Einsatz von Robinienrundholz für Stäbe und Knotenpunkte eines Fachwerkträgers. Diplomaufgabe. Karlsruhe, Universität Karlsruhe (TH), Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen: 110 str.

KLH Massivholz GmbH, Statika, slovenska verzija

KLH Massivholz GmbH, European Tehnical Approval-06/0138

Petelin, M. 2003. Program za analizo nosilnosti in trdnosti kompozitno laminatnih plošč. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Univerzitetni študij, Konstrukcijska smer: 112 f.

Pogačnik, A. (ur.), Beg, D. (ur.). 2009. Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po Evrokod standardih. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije: 1077 str.

Purbond, Adhesives for modern timber construction. Predstavitvena brošura.

Sap2000 Analysis Reference, Volume I. Berkely, Computer and Structures Inc., 2000.

Štrus, K. 2008. Analiza dinamičnega odziva 7-etažne lesene masivne konstrukcije na potresni mizi. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Univerzitetni študij, Konstrukcijska smer: 76 str.

Ugural, A.C. 1981. Stresses in Plates and Shells. NewYotrk, McGraw-Hill Book: 317 str.

Spletne strani:

Aerogel

<http://www.aerogel.si/> (12.10.2009)

Die.modulfabrik GmbH, Kornock hotel

www.diemodulfabrik.com (16.09.2009)

Habitat 67

<http://www.habitat67.com> (16.09.2009)

Fellmoser, P., Blass, H.J. 2004. Influence of rolling shear modulus on strength and stiffness of structural bonded timber elements. International council for research and innovation in building and construction, Working commission W18 – Timber: 8 str.

<http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/documents/685567> (14.10.2009)

KLH Massivholz GmbH

<http://www.klh.at/> (12.09.2009)

KLH Massivholz GmbH, Cross-laminated solid timber

http://www.klh.m2online.at/fileadmin/klh/bilder/2007/Prospekte/PDF/071018_KLH_engl_A4.pdf (12.09.2009)

Korteknie Stuhlmacher Architekten, Parasite Las Palmas

<http://www.kortekniestuhlmacher.nl/laspalmas.html> (16.09.2009)

Moosbrugger, T. (ur.), Schickhofer, G. (ur.), Unterwieser, H. (ur.) in Krenn, H. (ur.). 5. Grazer Holzbau-Fachtagung – Tagungsband. Graz, 29. september 2006. Graz, TU Graz – Institut für Holzbau und Holztechnologie.

http://www.holzbauforschung.at/uploads/tx_sbdownloader/5GraHFT06_Tagungsband.pdf
(14.10.2009)

Rucksack house

<http://www.convertiblecity.de> (16.09.2009)

SIHGA Handels GmbH

<http://www.sihga.com> (12.09.2009)

Wee house

<http://www.weehouse.com> (16.09.2009)