

UNIVERZA V LJUBLJANI  
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA  
ODDELEK ZA LESARSTVO

Blaž SOK

**IZDELAVA LAHKEGA PLOŠČNEGA KOMPOZITA  
S 3D OBLIKOVANO SREDICO**

DIPLOMSKI PROJEKT

Univerzitetni študij - 1. stopnja

Ljubljana, 2013

UNIVERZA V LJUBLJANI  
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA  
ODDELEK ZA LESARSTVO

Blaž SOK

**IZDELAVA LAHKEGA PLOŠČNEGA KOPOZITA  
S 3D OBLIKOVANO SREDICO**

DIPLOMSKI PROJEKT  
Univerzitetni študij – 1. stopnja

**FABRICATION OF LIGHTWEIGHT WOOD COMPOSITE  
WITH 3D FORMED CORE**

B. Sc. THESIS  
Academic Study Programmes

Ljubljana, 2013

Diplomski projekt je zaključek Univerzitetnega študija lesarstva. Opravljen je bil na Katedri za lepljenje, lesne kompozite in obdelavo površin Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo BF je dne 10.1.2013 sprejel temo in za mentorja diplomskega projekta imenoval doc. dr. Sergeja Medveda, za recenzenta pa prof. dr. Milana Šerneka.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

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

Blaž Sok

## KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

|    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ŠD | Du1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| DK | UDK 630*862                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| KG | lahki ploščni kompoziti/ satovje/furnirno satovje/MDF satovje                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| AV | SOK, Blaž                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| SA | MEDVED, Sergej (mentor)/ŠERNEK, Milan (recenzent)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| KZ | SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| ZA | Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| LI | 2013                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| IN | IZDELAVA LAHKEGA PLOŠČNEGA KOMPOZITA<br>S 3D OBLIKOVANO SREDICO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| TD | Diplomski projekt (univerzitetni študij – 1. stopnja)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| OP | VIII, 42 str., 7 pregl., 41 sl., 10 vir.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| IJ | sl                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| JJ | sl/en                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| AI | <p>V zadnjem času se na tržišču vse bolj pojavljajo lahki ploščni kompoziti, s sredico iz aluminija ali sintetičnih polimernih materialov. Ti materiali so za izdelavo večinoma energetsko potratni zato iščemo rešitve, v katerih bi satovja vsebovala komponente masivnega lesa ter drugih lesnih materialov. Nova satovja bi predstavljala alternativne možnosti obstoječim papirnatim sredicam. Satovja smo skonstruirali v programu SolidWorks, izdelali kompozite in ugotavljali njihove lastnosti. Preizkušali smo tlačno in upogibno trdnost plošč. Rezultati testiranj so pokazali boljše mehanske trdnosti naših plošč v primerjavi s ploščami iz papirnatih satovij. Ugotovili smo, da bi lahki ploščni kompoziti s sredico iz masivnega lesa in MDF plošče ustrezali zahtevam uporabe v pohištveni industriji.</p> |

## KEY WORDS DOCUMENTATION

|    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| DN | Du1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| DC | UDC 630*862                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| CX | light wood composites/ honeycomb/veneer honeycomb core/MDF<br>honeycomb core                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| AU | SOK, Blaž                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| AA | MEDVED, Sergej (supervisor)/ŠERNEK, Milan (co-advisor)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| PP | SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| PB | University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science<br>and Technology                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| PY | 2013                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| TI | FABRICATION OF LIGHTWEIGHT WOOD COMPOSITE<br>WITH 3D FORMED CORE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| DT | B. Sc. Thesis (Academic Study Programmes)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| NO | VIII, 42 p., 7 tab., 41 fig., 10 ref.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| LA | sl                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| AL | sl/en                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| AB | In recent years there has been increase of interest on market of lightweight<br>wood composites with cores made of metal and synthetic materials. To make<br>these materials is energy inefficient; therefore, we decided to incorporate hard<br>wood and MDF in fabrication of cores, as an alternative to paper honeycomb<br>and other non-wood materials. Different cores were designed using computer<br>engineering program SolidWorks; then boards were fabricated and physically<br>tested for bending and compressing strength. The results of the tests were<br>compared to industrially made lightweight wood panels and have shown that<br>our core could withstand greater loads than paper honeycomb panels. Based<br>on the results the sandwich boards could be used in furniture industry. |

## KAZALO

|                                                                                                     |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA .....                                                           | III       |
| KEY WORDS DOCUMENTATION .....                                                                       | IV        |
| KAZALO .....                                                                                        | V         |
| KAZALO PREGLEDNIC .....                                                                             | VI        |
| KAZALO SLIK .....                                                                                   | VII       |
| <b>1 UVOD .....</b>                                                                                 | <b>1</b>  |
| 1.1 PREDSTAVITEV PROBLEMA .....                                                                     | 2         |
| 1.2 DELOVNE HIPOTEZE .....                                                                          | 2         |
| 1.3 CILJI NALOGE .....                                                                              | 2         |
| <b>2 SPLOŠNI DEL IN PREGLED OBJAV .....</b>                                                         | <b>2</b>  |
| 2.1 LAHKI PLOŠČNI KOMPOZITI .....                                                                   | 3         |
| 2.2 Razvoj sendvič plošč .....                                                                      | 7         |
| 2.3 Matematična ponazoritev mehanskega modela satovja .....                                         | 9         |
| 2.4 Vpliv debeline sendvič plošče na mehanske lastnosti .....                                       | 11        |
| <b>3 MATERIALI IN METODE .....</b>                                                                  | <b>12</b> |
| 3.1 MATERIALI .....                                                                                 | 16        |
| 3.1.1 Zunanji sloj .....                                                                            | 16        |
| 3.1.2 Notranji sloj .....                                                                           | 16        |
| 3.2 METODE DELA .....                                                                               | 17        |
| 3.2.1 Ukrivljanje furnirnih trakov .....                                                            | 17        |
| 3.2.2 Krojenje furnirnih trakov .....                                                               | 18        |
| 3.2.3 Spajanje zunanjega sloja in satovja .....                                                     | 20        |
| 3.3 METODE PREIZKUŠANJA .....                                                                       | 21        |
| 3.3.1 Določanje gostote .....                                                                       | 21        |
| 3.3.2 Preizkus odpornosti proti delovanju tlaka .....                                               | 22        |
| 3.3.3 Preizkus upogibne trdnosti .....                                                              | 23        |
| <b>4 REZULTATI .....</b>                                                                            | <b>24</b> |
| 4.1 GOSTOTA IN TLAČNA TRDNOST PLOŠČ .....                                                           | 24        |
| 4.2 UPOGIBNA OBREMENITEV .....                                                                      | 29        |
| 4.3 PRIMERJAVA REZULTATOV UPOGIBNE TRDNOSTI Z LAHKIMI<br>PLOŠČNIMI KOMPOZITI DRUGIH PROJEKTOV ..... | 33        |
| <b>5 RAZPRAVA .....</b>                                                                             | <b>35</b> |
| <b>6 SKLEP .....</b>                                                                                | <b>39</b> |
| <b>7 POVZETEK .....</b>                                                                             | <b>40</b> |
| <b>8 VIRI .....</b>                                                                                 | <b>42</b> |

## KAZALO PREGLEDNIC

|                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Preglednica 1: Primerjava mehanskih lastnosti iverne plošče in lahkega ploščnega kompozita oz. LPK iz papirnatega satovja (vir: Barbouits in Vassiliou, 2013) ..... | 11 |
| Preglednica 2: Predstavitev kratic satovij.....                                                                                                                     | 13 |
| Preglednica 3: Rezultati tlačne obremenitve plošč.....                                                                                                              | 25 |
| Preglednica 4: Prikaz rezultatov upogibne trdnosti plošč .....                                                                                                      | 29 |
| Preglednica 5: Rezultati testa zunanjega projekta (vir: Hudnik, 2010).....                                                                                          | 33 |
| Preglednica 6: Rezultati testa projekta COST E49 (vir: Medved, 2008) .....                                                                                          | 33 |
| Preglednica 7: Rezultati testiranja izdelanih lahkih ploščnih kompozitov .....                                                                                      | 35 |

## KAZALO SLIK

|                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1: Primerjava gostot različnih lesnih materialov (Povzeto po Thoemen, 2008) .....                                                      | 3  |
| Slika 2: Prikaz primerov lahkih ploščnih kompozitov v lesarstvu (Thoemen, 2008) .....                                                        | 4  |
| Slika 3: Prikaz urejenosti celic v satovju (Bitzer, 1997) .....                                                                              | 4  |
| Slika 4: Prva uporaba lahke konstrukcije (Železniški most v Wales-u, 2013).....                                                              | 5  |
| Slika 5: Prikaz sestave sendvič plošče (Povzeto po Bitzer, 1997) .....                                                                       | 5  |
| Slika 6: Sprememba teže pohištvenih materialov v 20. st (Povzeto po Thoemen 2008) .....                                                      | 6  |
| Slika 7: Letalo z lesenim skeletom imenovano: Mosquito bommbber (bombno letalo iz<br>druge svetovne vojne: Mosquito, 2013) .....             | 8  |
| Slika 8: Rezultati utrujanja materiala sendvič struktur in starejših votlih načinov gradnje<br>letalskih kril (Povzeto po Bitzer, 1997)..... | 8  |
| Slika 9: Obremenitve kril brez satovja in z satovjem (Bitzer, 1997) .....                                                                    | 9  |
| Slika 10: Valovita struktura vlaken bukovega lesa v tangencialnem pogledu (Anatomija<br>bukovega lesa, 2006) .....                           | 12 |
| Slika 11: Legenda satovij .....                                                                                                              | 13 |
| Slika 12: Sestavni element ukrivljenega navpično usmerjenega satovja oz. UNO satovja.                                                        | 13 |
| Slika 13: Prikaz satovja v obliki mreže št. 1 in 2 .....                                                                                     | 14 |
| Slika 14: Prikaz 3D načrtovane lamele sredice ukrivljenega vodoravno usmerjenega<br>furnirnega satovja oz. UVO F satovja .....               | 14 |
| Slika 15: Sestava lamel v 3D oblikovano sredico UVO F .....                                                                                  | 15 |
| Slika 16: Prikaz notranjih napetosti pri obremenjevanju kompozita z mrežasto sredico ....                                                    | 15 |
| Slika 17: Porazdelitev napetosti (modro) v satovju.....                                                                                      | 16 |
| Slika 18: Prikaz ukrivljenih furnirnih trakov.....                                                                                           | 17 |
| Slika 19: Modelarska namizna krožna žaga .....                                                                                               | 18 |
| Slika 20: Mrežasto satovje z razmikom celic 10 cm (levo) in satovje razmikom celic 5 cm<br>(desno) .....                                     | 18 |
| Slika 21: Izdelano satovje UVO F .....                                                                                                       | 19 |
| Slika 22: Obteževanje sestavljenih elementov med lepljenjem.....                                                                             | 20 |
| Slika 23: Prikaz zapolnjevanja neravnin pri lepilnih površinah .....                                                                         | 20 |
| Slika 24: Vzorec velikosti 75 × 75 mm .....                                                                                                  | 21 |
| Slika 25: Postavitev vzorca v tlačno orodje .....                                                                                            | 22 |
| Slika 26: Prikaz upogibnega testa.....                                                                                                       | 23 |



|                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 27: Gostota izdelanih lahkih ploščnih kompozitov .....                                                      | 24 |
| Slika 28: Primerjava tlačnih trdnosti plošč.....                                                                  | 26 |
| Slika 29: Prikaz maksimalne sile pri tlačni obremenitvi .....                                                     | 26 |
| Slika 30: Primerjava vzorcev po končani tlačni obremenitvi: UNO MDF satovje (levo),<br>UNO F satovje (desno)..... | 27 |
| Slika 31: Primerjava karakterističnih krivulj tlačne obremenitve satovij serije 1 .....                           | 28 |
| Slika 32: Ponazoritev orientacije satovja.....                                                                    | 29 |
| Slika 33: Porušitev vzorca s prečno orientiranim satovjem .....                                                   | 30 |
| Slika 34: Neenakomeren lom satovja prečno orientiranega satovja.....                                              | 30 |
| Slika 35: Upogibna trdnosti plošč .....                                                                           | 31 |
| Slika 36: Modul elastičnosti plošč.....                                                                           | 31 |
| Slika 37: Podajnost plošče med obremenjevanjem .....                                                              | 32 |
| Slika 38: Primerjava loma MDF (levo) in furnirnega satovja (desno).....                                           | 36 |
| Slika 39: Uklon in lom stanjšane traku UNO MDF satovja .....                                                      | 36 |
| Slika 40: Primerjava realnih testov in simulacijskih testov obremenjevanja .....                                  | 38 |
| Slika 41: Prikaz koncentracije napetosti na mestu križanja trakov .....                                           | 38 |

## 1 UVOD

Lahki ploščni kompoziti na trgu niso novost, so pa v konstantnem razvoju, saj je njihovo osnovno načelo zniževanje mase pohištvenih in konstrukcijskih elementov ob zagotavljanju dobrih, uporabi primernih mehanskih lastnosti in trdnosti. Teža pohištva igra ključno vlogo pri transportu, saj omogoča lažjo manipulacijo in poslovanje v načinu samopostrežnega nakupovanja pohištva, hkrati pa znižuje porabo energije pri transportu.

V pohištveni industriji in mizarski obrti se za izdelavo sendvič plošče s satovjem uporablja predvsem papirnato satovje. Papirnato satovje nudi zadostno podporo v sendvič plošči za izdelavo pohištvenih elementov v okoliščinah, kjer je obremenitev in obraba elementov nizka. Vgraditve sendvič plošč s papirnatim satovjem v elemente javne uporabe je manj priporočljiva, saj je zaradi njene nizke trdnosti pogosto tarča nenamernim poškodbam in vandalizmu. Za doseganje visoke trdnosti sendvič plošč proizvajalci iščejo rešitve v uporabi sintetičnih materialov in kovin za izdelavo sredic. Z uporabo teh energijsko potratnih materialov za izdelavo, se dodatno zaplete postopek reciklaže teh ploščnih kompozitov.

Ker imajo plošče s papirnatim satovjem nizke trdnosti, smo želeli naše lahke ploščne kompozite, izdelati na način, pri katerem bi presegali ali vsaj dosegali mehanske trdnosti in karakteristike lahkega ploščnega kompozita s papirnatim satovjem ter satovjem iz kovin in plastike. V sredice ploščnih kompozitov želimo vključiti furnirne trakove naravnega lesa in trakove iz recikliranega lesa oz. vlaknene plošče. S tem je povečana kakovost reciklaže ploščnega kompozita.

### 1.1 PREDSTAVITEV PROBLEMA

Za izdelavo lahkih ploščnih kompozitov se v večini uporabljajo tanke plošče ivernih in vlaknenih kompozitov debeline 3 do 8 mm, kot nosilne plošče oziroma zunanji sloji ter lahki materiali v obliki satovja kot sredica. Same mehanske lastnosti teh kompozitov so odvisne od kakovosti satovja, spoja satovja z zunanjsima slojema ter oblike in materiala satovja. V pohištveni industriji se za izdelavo sendvič plošč največ uporabljajo papirnata satovja, ki dosegajo nizke upogibne trdnosti.

### 1.2 DELOVNE HIPOTEZE

Predvidevamo, da bomo z različno oblikovanim satovjem dosegali različne karakteristike lahkega ploščnega kompozita, ki bodo dosegali vsaj enake mehanske rezultate kot plošče s papirnatim satovjem.

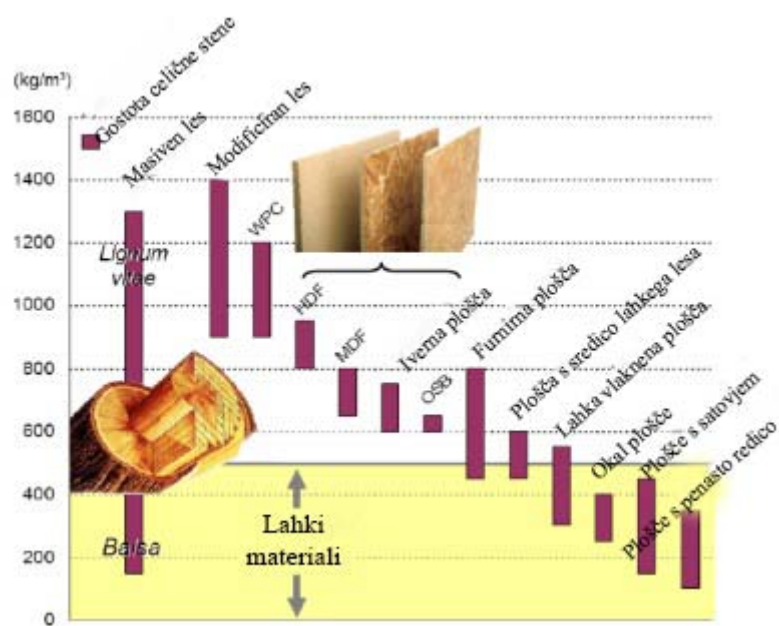
### 1.3 CILJI NALOGE

Cilj naloge je izdelati lahke ploščne kompozite, ki imajo različno oblikovano sredico iz furnirnih in MDF trakov in bi bila alternativa običajnim heksagonalnim oblikam satovij ter ugotoviti vpliv oblike sredice na trdnostne lastnosti.

## 2 SPLOŠNI DEL IN PREGLED OBJAV

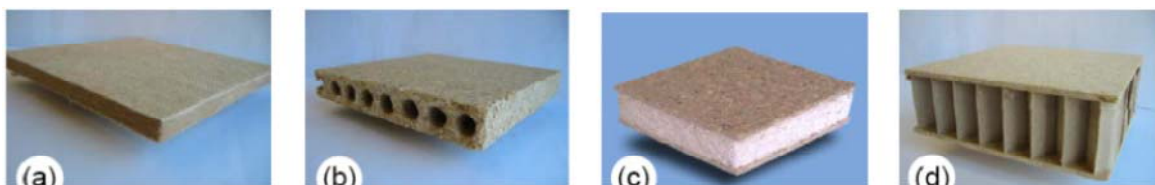
## 2.1 LAHKI PLOŠČNI KOMPOZITI

Že nekaj stoletij se za gradnjo tehnično zahtevnih objektov uporabljajo lahke konstrukcije in konstrukcijski materiali. Pod lahke konstrukcije in lahke konstrukcijske materiale uvrščamo materiale, ki imajo osnovno gostoto pod  $500 \text{ kg/m}^3$ . Pod to definicijo spadajo nekateri industrijsko uveljavljeni materiali, kot so npr. plošče z votlimi ali drugimi sredicami, lahke furnirne plošče, lahke vlaknene plošče ter t.i. okal plošče. V praksi so lahko vsi ploščni kompoziti iz dezintegriranega lesa ustvarjeni kot lahek ploščni kompozit. Njihova gostota temelji na količini, zgostitvi materiala v procesu stiskanja plošče ter izbiri vhodnega materiala, kar vpliva na mehanske lastnosti končnega produkta – plošče oz. elementa. Na spodnjem grafu (Slika 1) je z rumeno barvo označeno območje materialov z nizko gostoto oz. lahkih ploščnih kompozitov. V tem razponu gostote je mogoče zaslediti nekatere vrste masivnega lesa: balza, topol, smreka z nizko gostoto itd. (Thoemen, 2008).



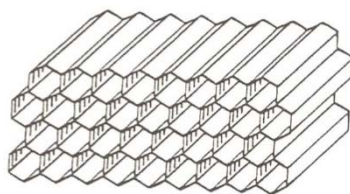
Slika 1: Primerjava gostot različnih lesnih materialov (Povzeto po Thoemen, 2008)

V lesarstvu so lahki ploščni kompoziti v večini primerov izdelani iz: iverne plošče (a), penastih sredic (c), papirnatega satovja (d), plastičnega ter kovinskega satovja, poznana pa je tudi ekstrudirana iverna plošča z odprtinami – okal plošča (b) (slika 2).



Slika 2: Prikaz primerov lahkih ploščnih kompozitov v lesarstvu (Thoemen, 2008)

Satovje je dobilo ime po naravni strukturi v čebeljih panjih, kjer so čebele odkrile formo pregradnih celic, pri kateri je dosežena najboljša postavitev pregradnih sten, oz. so celice čim bolj podobne cilindrom. S tem je doseženo idealno razmerje med urejenostjo in prečno površino celic (Slika 3).



Slika 3: Prikaz urejenosti celic v satovju (Bitzer, 1997)

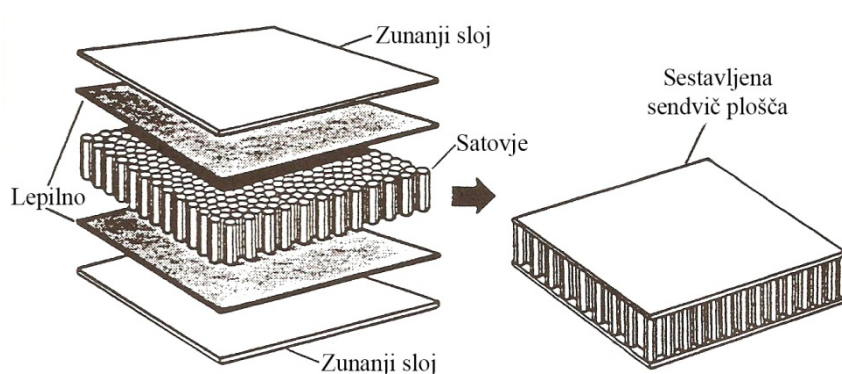
V preteklosti je bilo odkritih več kot 500 različnih vrst satovij. Papirnata satovja so se najprej pojavila na Kitajskem pred več kot 2000 leti in so imela zgolj dekorativni namen za okrase in ornamente. Kot prvi patentiran proces izdelave papirnatega satovja iz Kraft papirja je verjetno bil Budwig-ov patent izdan v Nemčiji leta 1905. Prva najstarejša izdelana sendvič struktura pa je bila izdelana leta 1845 in sicer železniški most v Wales-u. Na sliki 4 je prikazan izsek strukture, na kateri se na vrhu in spodnjem delu vidi celična struktura iz jeklenih nosilcev, s katero so zmanjšali težo konstrukcije v primerjavi s takratno običajno gradnjo ter ohranili konstrukcijsko nosilnost (Bitzer, 1997).



Slika 4: Prva uporaba lahke konstrukcije (Železniški most v Wales-u, 2013)

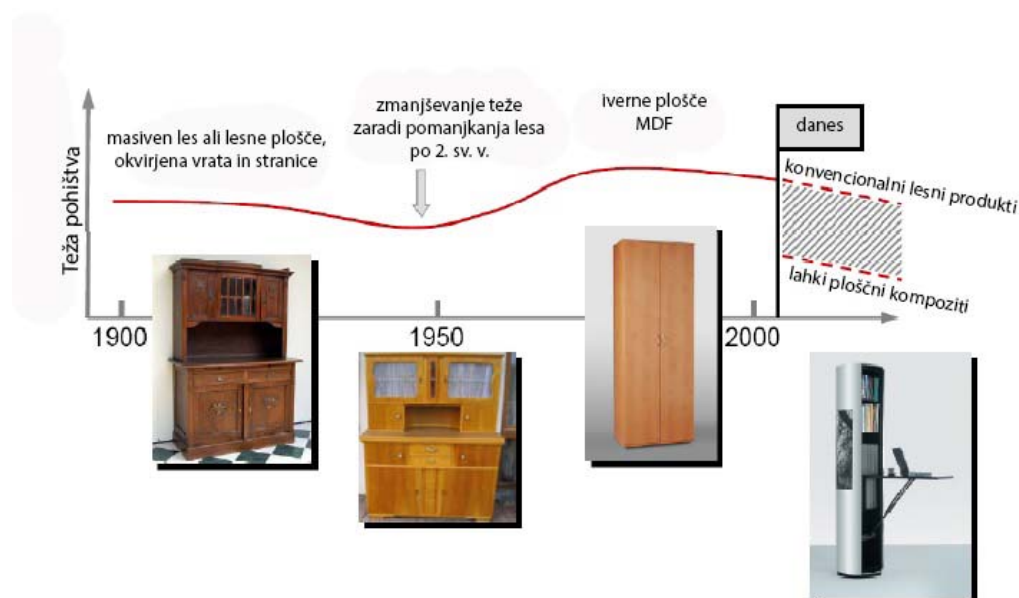
Obstajajo trije osnovni cilji pri načrtovanju novega lahkega ploščnega kompozita:

- izboljšanje funkcionalnosti, za katero je mišljeno zniževanje mase surovine npr. v letalski industriji;
- zniževanje cene materiala z zniževanjem mase materiala npr. lahke konstrukcije;
- zmanjševanje vpliva na okolje z zmanjševanjem mase materiala npr. lažji transport, boljši izkoristek materiala in manj vgrajenega materiala (Bitzer, 1997).



Slika 5: Prikaz sestave sendvič plošče (Povzeto po Bitzer, 1997)

Lahki ploščni kompoziti v pohištveni industriji predstavljajo rešitve v zvezi s težo grajenih elementov. Pri primerjavi podatkov o teži pohištva v 20. stoletju (Slika 6) je mogoče opaziti nihanja v sami teži pohištva, ki je v zadnjih desetletjih usmerjena k izdelavi lažjega pohištva. Prvo obdobje trenda lahkih materialov se pojavi med leti 1950 in 1960, z začetkom uporabe papirnatega satovja. V nadaljnjih letih so na pohištvenem trgu dominirali lesni kompozitni materiali – iverne plošče in MDF, zaradi katerih se je celotna teža pohištva povečevala. Svoj vrh je dosegla med leti 1970 in 1980, na kar se je začel trend zmanjševanja debeline materialov iz 19 mm na 16 mm ali celo 15 mm (Thoemen, 2008).



Slika 6: Sprememba teže pohištvenih materialov v 20. st (Povzeto po Thoemen 2008)

## 2.2 RAZVOJ SENDVIČ PLOŠČ

Potrebe po razvoju lahkih in nosilnih materialih so predvsem narekovale letalske industrije in navtika, pri katerih sta teža in mehanske lastnosti materiala ključnega pomena za karakteristične lastnosti njihovega končnega izdelka. Kot prva industrijsko izdelana sendvič plošča je bila narejena leta 1919 za potrebe v aeronavtični industriji. Izdelana je bila iz tankih mahagonijevih zunanjih slojev, kot jedro pa je bila uporabljena balza. Material je bil primarno uporabljen za izdelavo konstrukcije plavajočih delov vodnih letal (Bitzer, 1997).

Industrijska izdelava modernih satovij se je začela okrog 1930, ko je J. D. Lincoln izdelal papirnato satovje iz Kraft papirja, za potrebe v pohištveni industriji v Virginiji v ZDA. Sendvič plošča je bila spojena s tankima slojema lesa listavcev na relativno debelo papirnato satovje (Bitzer, 1997).

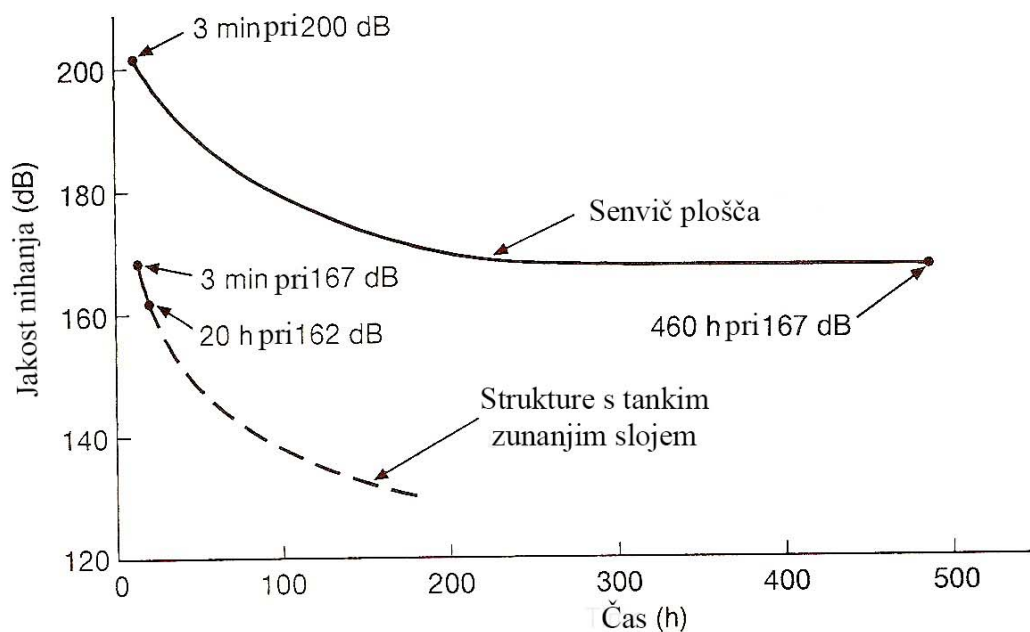
Proti koncu druge svetovne vojne je podjetje Glen L. Martin Company papirnato satovje uporabilo za izdelavo začetnih radarskih anten, katere so bile uspešne, vendar je njihova pomanjkljivost bila v vezavi vlage na papir, zato so nadaljevali z razvojem satovja iz drugih materialov: bombažna vlakna, steklena vlakna in aluminijeva folija (Bitzer, 1997).

V tem času je letalsko podjetje Havilland Airplane Company začelo izdelovati bombna letala Mosquito (slika 7), katerim so skelet naredili iz sendvič plošč. Rezultati so se kazali v visokih zmogljivostih letal, kar je sprožilo dodaten napredek v letalski industriji po svetu. Leta 1945 so se v letalski industriji prvič pojavile sendvič plošče z aluminijastim satjem, ob katerih so razvili ustrezna lepilna sredstva z ustrezno reologijo za spajanje teh materialov. Plošče z aluminijastim satjem so imele veliko boljše odpornosti proti utrujanju materiala (slika 8), kar se je v letalski industriji odražalo v večji zanesljivosti in varnosti letal (Bitzer, 1997).





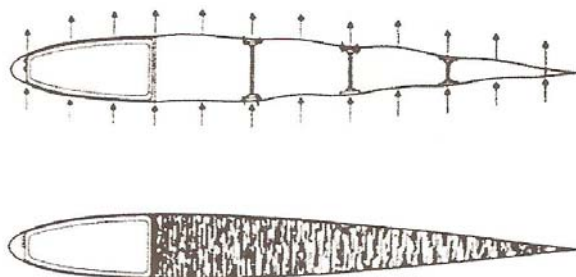
Slika 7: Letalo z lesenim skeletom imenovano: Mosquito bommbler (bombno letalo iz druge svetovne vojne: Mosquito, 2013)



Slika 8: Rezultati utrujanja materiala sendvič struktur in starejših votlih načinov gradnje letalskih kril (Povzeto po Bitzer, 1997)

Z izdelavo letal iz aluminijastega satovja so se s primerjavo, takrat običajno izdelanih letal, lastnosti izboljšale. Z uporabo novih materialov se je povišala hitrost, ekonomičnost in nosilnost letal, kar je predstavljalo prednost pred konkurenco. Slika 9 prikazuje presek

dveh kril izdelane brez satovja in s satovjem pod obremenitvijo. Na krilu brez satovja je jasno prikazana deformacija krovnega dela krila, kar predstavlja dodaten upor zraka med letenjem.



Slika 9: Obremenitve kril brez satovja in z satovjem (Bitzer, 1997)

### 2.3 MATEMATIČNA PONAŽORITEV MEHANSKEGA MODELA SATOVJA

Kot izhodišče za izračun modela sendvič plošče s satovjem iz papirja je uporabljena osnovna teorija za izračun mehanskega modela nosilca. Nomenklatura je predstavljena spodaj:

$b$  = širina plošče (mm)

$c$  = debelina satovja (mm)

$d$  = debelina sendvič plošče (mm)

$E_f$  = modul elastičnosti (MOE) nosilnih plošč ( $\text{N/mm}^2$ )

$E_c$  = modul elastičnosti (MOE) satovja ( $\text{N/mm}^2$ )

$G$  = strižni modul satovja ( $\text{N/mm}^2$ )

$P$  = obremenitev (N)

$L$  = dolžina obremenitvenega orodja (mm)

$M$  = moment ( $\text{N}\times\text{m}$ )

$k_b$  = relativna deformacija upogiba v odvisnosti od obremenitve

$k_s$  = relativna strižna deformacija v odvisnosti od obremenitve

Upogibna trdnost plošče je definirana kot zmožnost upora aplicirani obremenitvi, ki povzroča rotacijo in notranje momente. V splošnem se vpliv satovja na upogibno trdnost ne upošteva, ker je satovje upogljivo, zato:  $E_c = 0$ . Napetosti na nosilnih ploščah so neenakomerno razporejene. Enačba upošteva t. i. lastnosti križnih površin sendvič plošče oz. sekundarne momente območja ( $I = bd^3/12$ ), kar pomaga predvidevati karakteristike ploščnega kompozita glede upiranja upogibnim silam in deformaciji. Upogibno trdnost,  $D$  ( $N \times mm^2$ ) sendvič plošče z nosilnima ploščama enake debeline je mogoče zapisati v enačbi (1) (Sam-Brew in sod., 2010):

$$D = \frac{Ef(d^3 - c^3)b}{12} \quad \dots(1)$$

V večini primerov je upoštevana konstantna strižna trdnost in napetost v sendvič plošči,  $U$  (N). Enačba je sledeča:

$$U = \frac{G(d-c)^2b}{4c} \quad \dots(2)$$

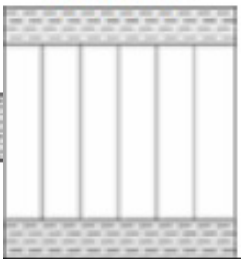
V enačbi povesa pri štiri točkovnem upogibu (3) je seštevek upogibne deformacije in strižne deformacije.

$$y = \frac{k_b PL^3}{D} + \frac{k_s PL}{U} \quad \dots(3)$$

## 2.4 VPLIV DEBELINE SENDVIČ PLOŠČE NA MEHANSKE LASTNOSTI

Glavni razlog za uporabo sendvič plošč z votlim jedrom je visoko razmerje med trdnostjo in težo ter trdnostjo in debelino materiala. V preglednici 1 so primerjane mehanske lastnosti različnih debelin iverne plošče v primerjavi s sendvič ploščo iz papirnatega satovja.

Preglednica 1: Primerjava mehanskih lastnosti iverne plošče in lahkega ploščnega kompozita oz. LPK iz papirnatega satovja (vir: Barbouits in Vassiliou, 2013)

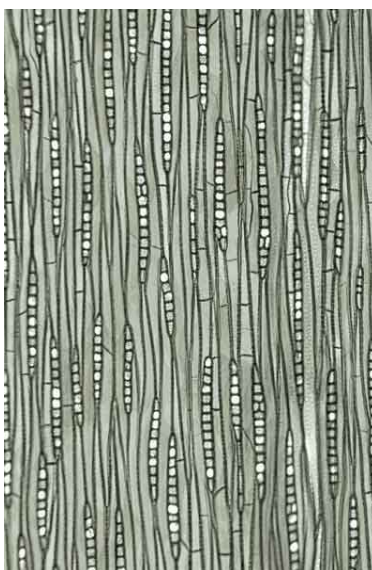
| Mehanske lastnosti           | IP 7,8 mm                                                                         | IP 2 × 7,8 mm                                                                     | IP 16,1 mm                                                                         | LPK papirnato satovje 51,7 mm                                                        |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|                              |  |  |  |  |
| Relativna debelina           | 0,5                                                                               | 1*                                                                                | 1,03                                                                               | 3,31                                                                                 |
| Gostota (g/cm <sup>3</sup> ) | 0,766                                                                             | 0,766                                                                             | 0,658                                                                              | 0,321                                                                                |
| Relativna gostota            | 1                                                                                 | 1                                                                                 | 0,859                                                                              | 0,419                                                                                |
| Relativna upogibna trdnost   | 1,07                                                                              | 1                                                                                 | 1,02                                                                               | 0,06                                                                                 |
| Relativni modul elastičnosti | 1,02                                                                              | 1                                                                                 | 1,02                                                                               | 0,19                                                                                 |

\*osnova, iz katere so preračunane ostale relativne vrednosti

Iz preglednice je razvidna nizka upogibna trdnost in modul elastičnosti (6 % in 19 % izhodiščne vrednosti \*) sendvič plošče v primerjavi z dvojno iverno ploščo (IP 2 × 7,8 mm). Prednosti LPK s papirnatim satovjem so v nizki gostoti. Gostota je bila zmanjšana na 41,9 % gostote dvojne iverne plošče (Barbouits in Vassiliou, 2013).

### 3 MATERIALI IN METODE

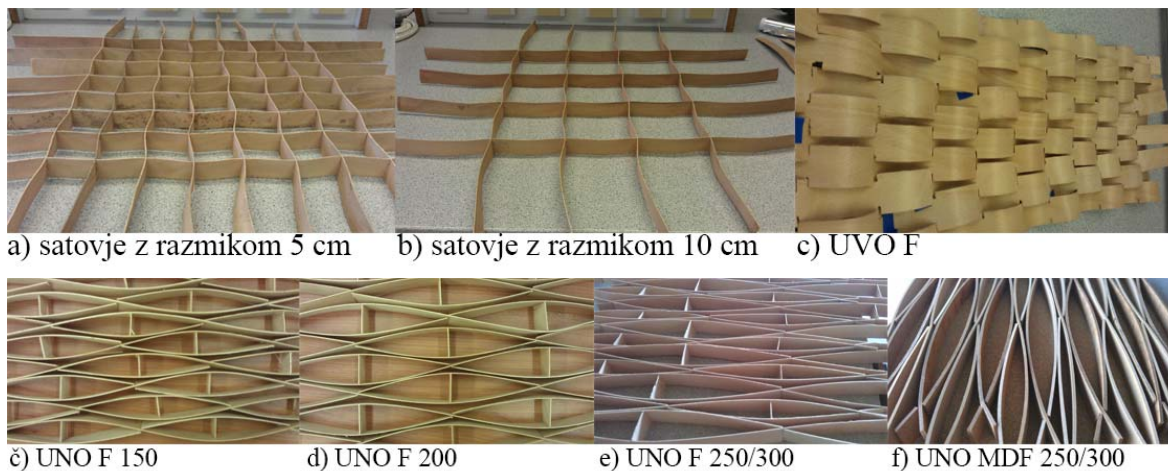
Potek dela se je začel z načrtovanjem satovja v programu SolidWorks, kjer se je načrtovalo in oblikovalo satovje za lahek ploščni kompozit. Za projekt so se načrtovale tri bistvene oblike satovij, ki so bile izdelane iz bukovih furnirnih trakov in trakov vlaknene plošče srednje gostote oziroma MDF. Osnovno vodilo za oblikovanje je bila struktura vlaken v lesu (slika 10).



Slika 10: Valovita struktura vlaken bukovega lesa v tangencialnem pogledu (Anatomija bukovega lesa, 2006)

Takšna oblika nam je predstavljala stabilnost sten satovja zaradi krivin, relativno dobro zapolnjevanje praznih prostorov ter sestave in vezave furnirnih trakov v celoto. Z načinom zamikanja elementov je bila dosežena ojačitev šibke točke elementa v spoju furnirnih trakov (slika 12).

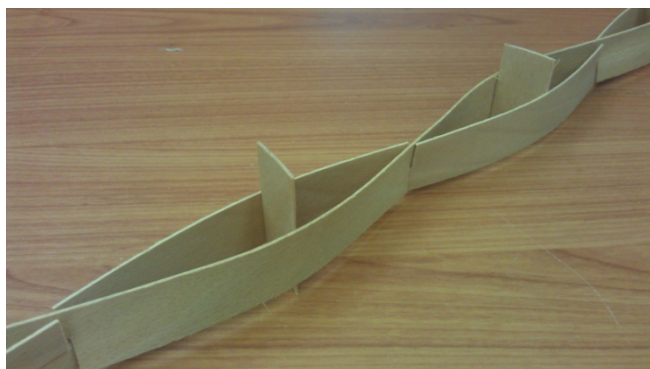
V diplomskem prijektu smo načrtovali in izdelali več vrst satovij. Predstavljena so na sliki 11. Pomeni kratic so predstavljeni v preglednici 2.



Slika 11: Legenda satovij

Preglednica 2: Predstavitev kratic satovij

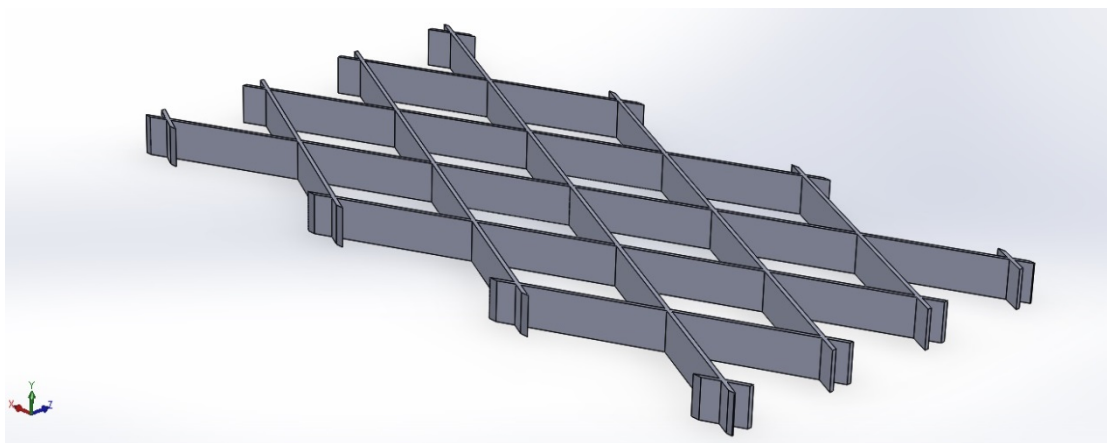
| Kratika satovja | Pomen kratice                                                                                           |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| UVO F           | Ukrivljeno vodoravno orientirano furnirno satovje                                                       |
| UNO F 150       | Ukrivljeno navpično orientirano furnirno satovje, dolžina loka krivinskega radija celice: 150 mm        |
| UNO F 200       | Ukrivljeno navpično orientirano furnirno satovje, dolžina loka krivinskega radija celice: 200 mm        |
| UNO F 250/300   | Ukrivljeno navpično orientirano furnirno satovje, dolžina loka krivinskega radija celice: 250 in 300 mm |
| UNO MDF 250/300 | Ukrivljeno navpično orientirano vlakneno-MDF, dolžina loka krivinskega radija celice: 250 in 300 mm     |



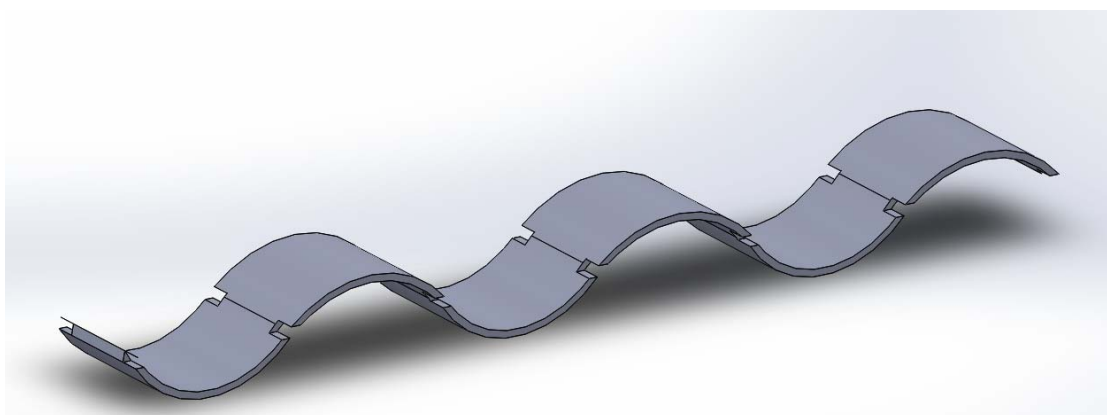
Slika 12: Sestavni element ukrivljenega navpično usmerjenega satovja oz. UNO satovja

Za primerjavo mehanskih lastnosti je bilo izdelano satovje v obliki mreže, pri kateri je bil opazovan vpliv gostote mreže na upogibno in tlačno trdnost sendvič plošče.

S pomočjo vtičnika Simulatoins v programu SolidWorks so se simulirale mehanske obremenitve na oblikovanem lahko-ploščnem kompozitu. Test je pokazal šibke točke v formi sredice pri statični obremenitvi, kar je omogočalo naknadno optimiziranje oblike sredice in ojačitve območij z visoko koncentracijo napetosti. Elementi so predstavljeni na spodnjih slikah.

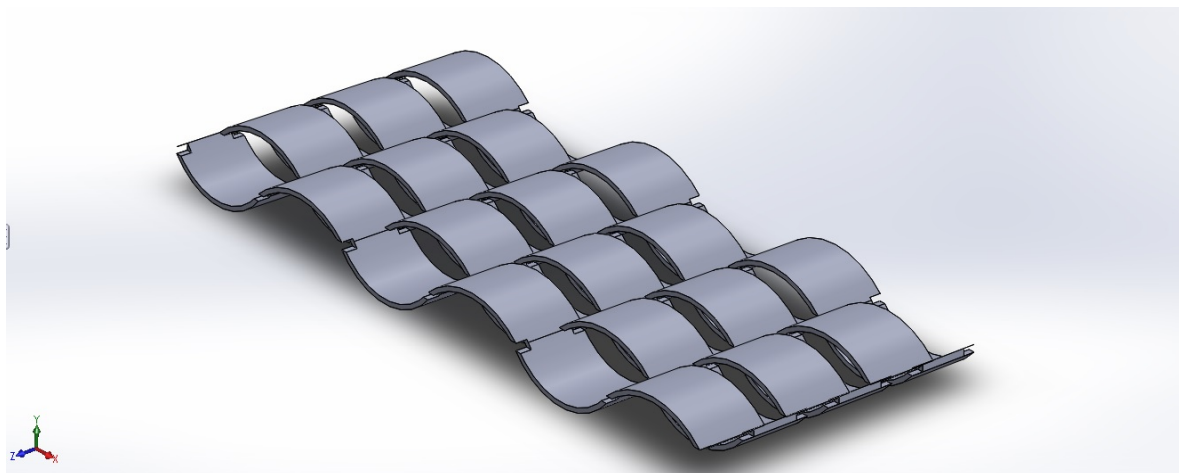


Slika 13: Prikaz satovja v obliki mreže št. 1 in 2



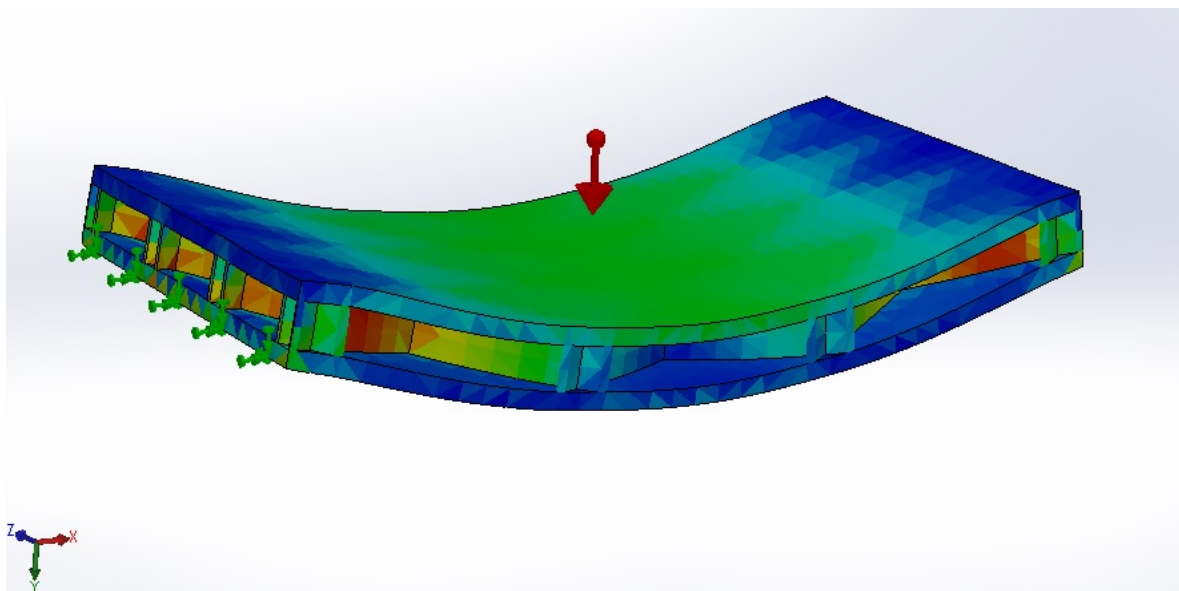
Slika 14: Prikaz 3D načrtovane lamele sredice ukrivljenega vodoravno usmerjenega furnirnega satovja oz. UVO F satovja





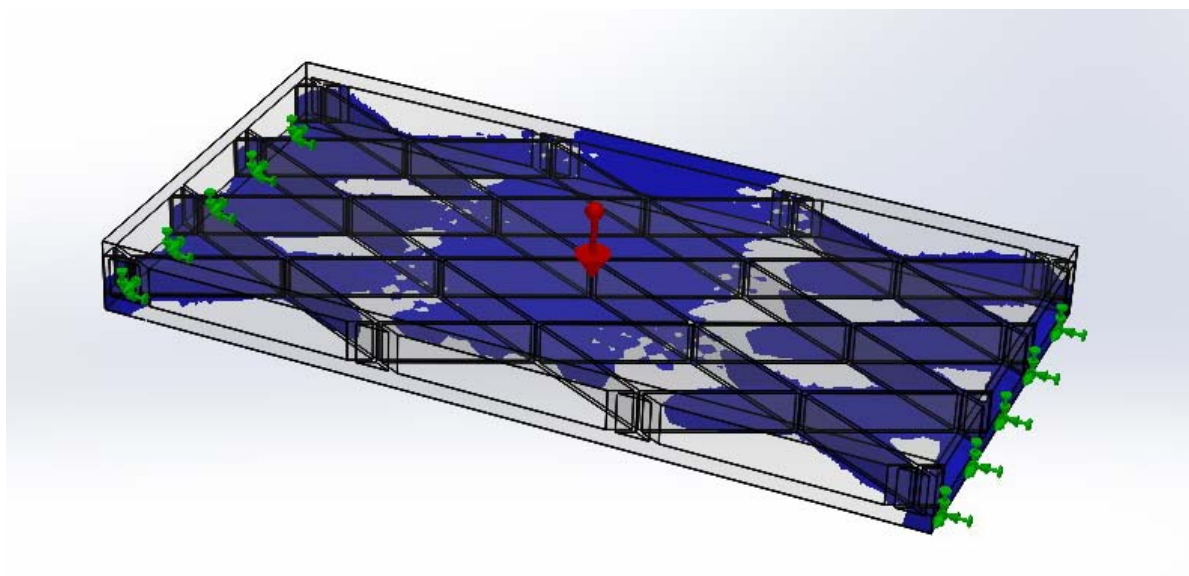
Slika 15: Sestava lamel v 3D oblikovano sredico UVO F

Namen uporabe vtičnika Simulations je bil simulirati statično mehansko obremenitev ter ugotoviti kritična področja v kompozitu, kjer bi se koncentrirale napetosti pri obremenitvi. Na podlagi teh podatkov je bilo mogoče opravljati izboljšave na formi sredice. Simuliranje pojava notranjih napetosti pri obremenitvi je prikazano na spodnjih primerih, pri katerih modri odtenki pomenijo manjše napetosti, rdeči odtenki pa visoke napetosti.



Slika 16: Prikaz notranjih napetosti pri obremenjevanju kompozita z mrežasto sredico





Slika 17: Porazdelitev napetosti (modro) v satovju

### 3.1 MATERIALI

#### 3.1.1 Zunanji sloj

Za zunanji sloj pri izdelavi lahkega ploščnega kompozita oz. LPK je bila uporabljena industrijsko izdelana iverna plošča debeline 8 mm in 3 mm, razžagana na format  $50 \times 50$  cm. Razlog za izbiro dveh debelin je bil v ugotavljanju reakcij satovja na mehanske obremenitve. Namreč s tanjšim zunanjim slojem so se šibke točke očitneje opazile med obremenjevanjem testirancev. Z debelejšo ploščo je bila dosežena višja togost plošče in posledično boljše razporejene tlačne in strižne sile med upogibnim testom.

#### 3.1.2 Notranji sloj

Za izdelavo notranjega sloja oz. satovja so bili uporabljeni materiali:

- bukovi furnirni trakovi debeline 1 mm in širine 2,5 cm
- industrijsko izdelana vlaknena plošča debeline 3 mm

Satovje je bilo lepljeno s poliuretanskim lepilom Mitopur E45.

## 3.2 METODE DELA

### 3.2.1 Ukrivljanje furnirnih trakov

Za ukrivljanje furnirnih trakov je bil uporabljen kalup, kamor smo z vpenjali vpeli trakove, ki so bili predhodno 24 ur namočeni v vodi. Z namakanjem v vodi se je material zmehčal in povečala se mu je zmožnost krivljenja. Kalup je bil postavljen v sušilnik pri temperaturi 100°C za 24 ur. Sušenje trakov je omogočilo plastifikacijo lesa in zadržanje oblike kalupa.



Slika 18: Prikaz ukrivljenih furnirnih trakov

### 3.2.2 Krojenje furnirnih trakov

Za krojenje furnirnih trakov na širino in zarezovanje utorov je bila uporabljena modelarska namizna krožna žaga (Slika 19). Na podlagi zarezanih utorov so bile sestavljene mreže oziroma satovja. Pri medsebojni spojitvi trakov ni bilo uporabljenega lepila. Prikaz spojitve trakov mreže prikazuje slika 20.



Slika 19: Modelarska namizna krožna žaga



Slika 20: Mrežasto satovje z razmikom celic 10 cm (levo) in satovje razmikom celic 5 cm (desno)



Slika 21: Izdelano satovje UVO F

### 3.2.3 Spajanje zunanjega sloja in satovja

Za spajanje je bilo uporabljeno 75g poliuretanskega lepila na lepilno ploskev oziroma nanos  $300\text{g/m}^2$ . Nekoliko višji nanos lepila je imel vlogo zapolnjevanja praznih prostorov na lepilnih površinah in povečevanja lepilne površine med ploščo zunanjega sloja in sredice. Sestavljeni elementi so bili postavljeni na ravno površino in obteženi z utežjo, kot je prikazano na sliki 22. Po preteklih nekaj dneh smo plošče razžagali na ustrezne dimenzije za pripravo na izvedbo mehanskih testov. Vzorci so bili izžagani naključno ali v povezavi z orientacijo satovja.



Slika 22: Obteževanje sestavljenih elementov med lepljenjem



Slika 23: Prikaz zapolnjevanja neravnin pri lepilnih površinah



### 3.3 METODE PREIZKUŠANJA

#### 3.3.1 Določanje gostote

Gostota je bila določena po standardu SIST EN 323:1993 na podlagi vzorcev za tlačno obremenitev, ki so bili velikosti  $75 \times 75$  mm (Slika 24). Debelina vzorcev je bila izmerjena na štirih mestih – 20 mm od roba vzorca s mikrometrom. Vzorci so bili tehtani s tehtnico na 0,01g natančno.



Slika 24: Vzorec velikosti  $75 \times 75$  mm

S pridobljenimi podatki je bilo možno izračunati po formuli (4)

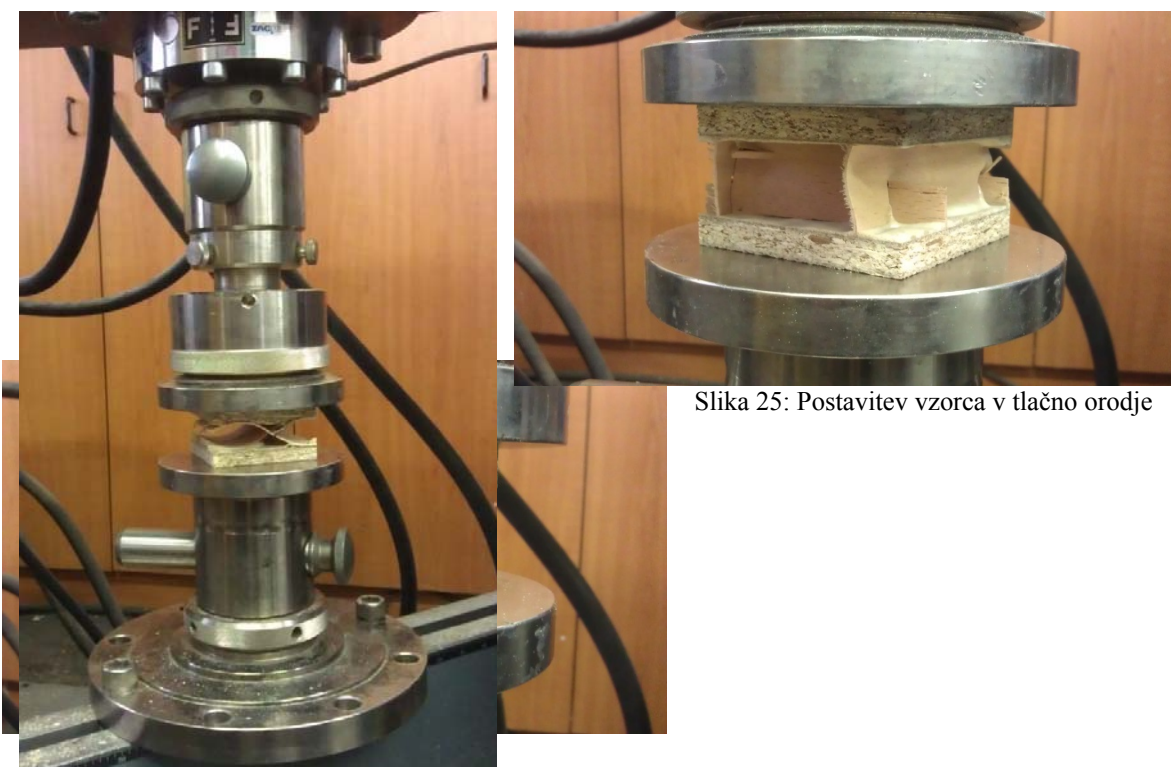
$$\rho = \frac{m}{(l \times b \times t)} \left[ \frac{g}{cm^3} \right] \quad \dots(4)$$

Pomen oznak:

m..... masa vzorca [g]  
l.....dolžina [cm]  
b.....širina [cm]  
t.....debelina [cm]  
 $\rho$ .....gostota [ $g/cm^3$ ]

### 3.3.2 Preizkus odpornosti proti delovanju tlaka

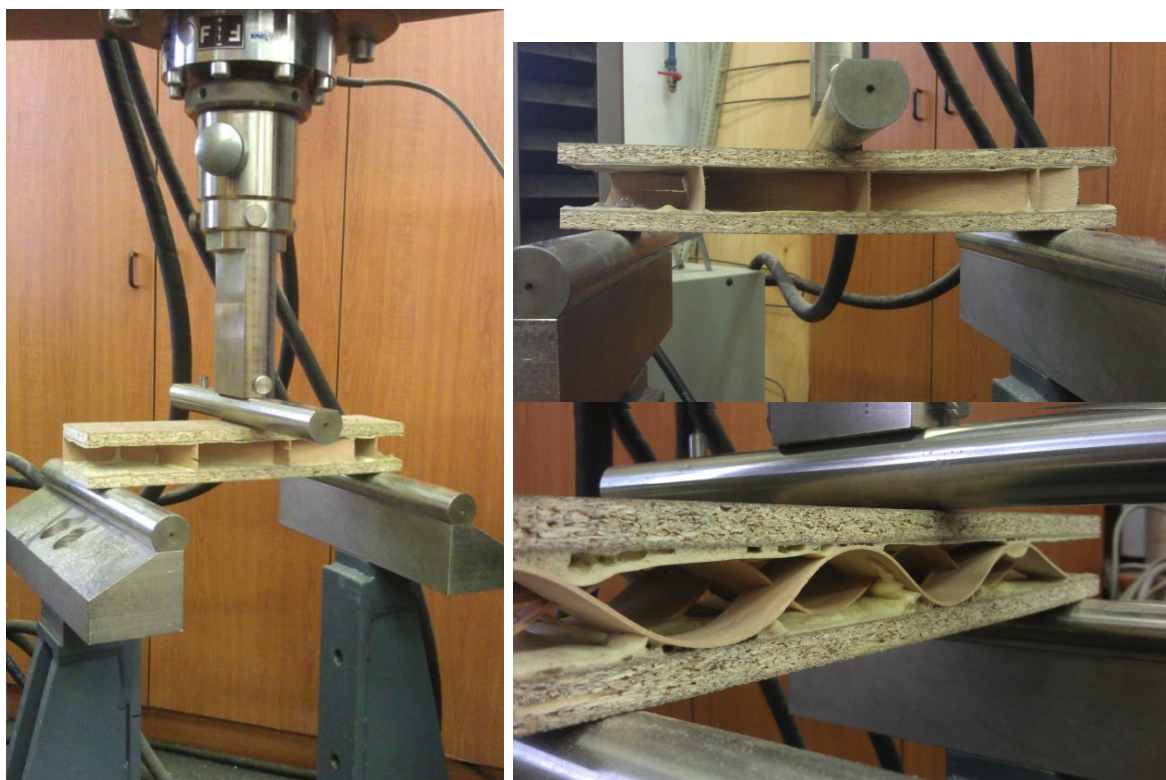
Za izvedbo preizkusa je bil uporabljen testirni stroj Zwick Z 100, ki je imel pripravljeno tlačno orodje. Pri testiranju smo se sklicevali na standard prCEN/TS 00112189:2011.2, kateremu smo dimenzije spremenili s predpisanih  $(l \times b)$   $100 \times 100$  mm na  $75 \times 75$  mm. Razlog za zmanjšanje dimenzij je bil v ekonomični porabi materiala. Pomik je bil 4mm/min.



Slika 25: Postavitev vzorca v tlačno orodje

### 3.3.3 Preizkus upogibne trdnosti

Upogibno trdnost preizkušancev smo testirali na osnovi standarda prCEN/TS 00112189:2011.2. Velikost vzorcev smo prilagodili iz ( $l \times w$ )  $400 \times 100$  mm na  $300 \times 75$  mm, krajše in ožje kot je po standardu. Zmanjšanje dimenzij je omogočalo ujemanje dimenzij s testiranci tlačnega testa, kar je predstavljalo lažji in ekonomičen razrez. Test je bil izvajan na testirnem stroju Zwick Z 100, pri katerem je bila razdalja vpetja nastavljena na dolžino 250 mm, hitrost pomika pa 4 mm/min.



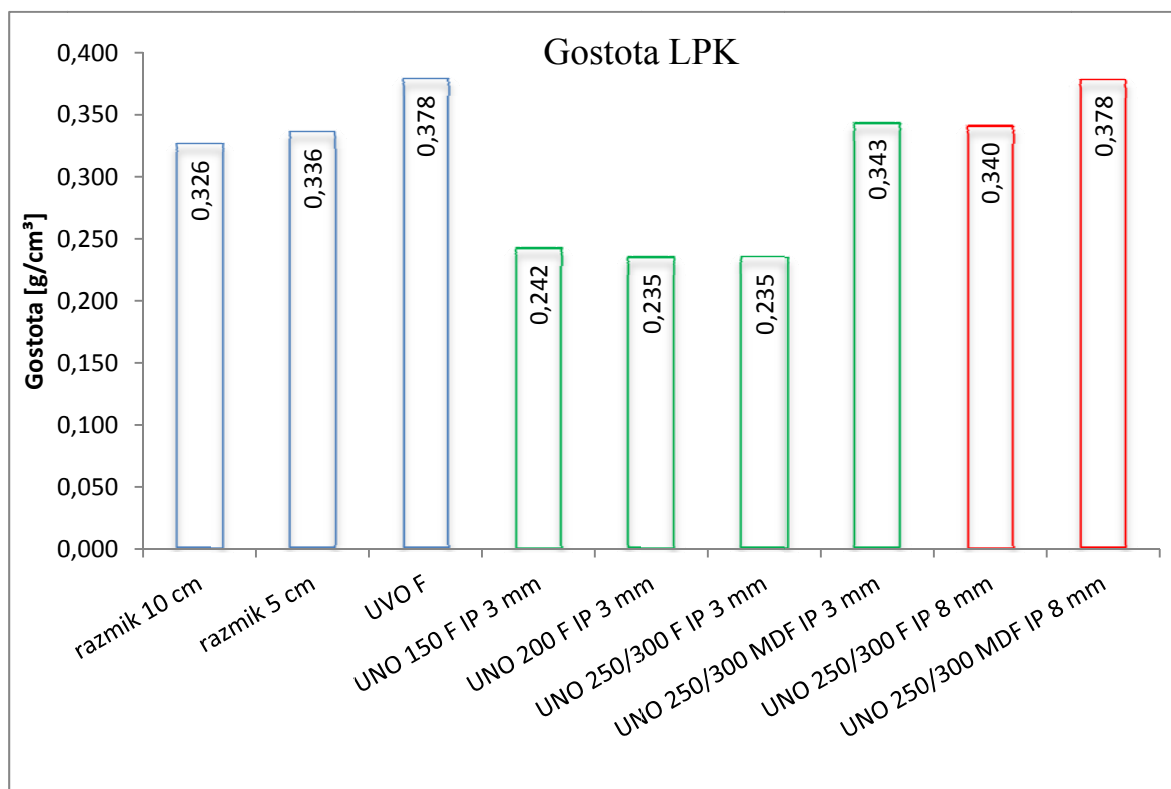
Slika 26: Prikaz upogibnega testa



## 4 REZULTATI

### 4.1 GOSTOTA IN TLAČNA TRDNOST PLOŠČ

Na sliki 27 so predstavljeni podatki o gostotah izdelanih plošč. Gostota je bila merjena na preizkušancih velikosti  $75 \times 75$  mm, ki so bili namenjeni za preizkus tlačne trdnosti.



Slika 27: Gostota izdelanih lahkih ploščnih kompozitov

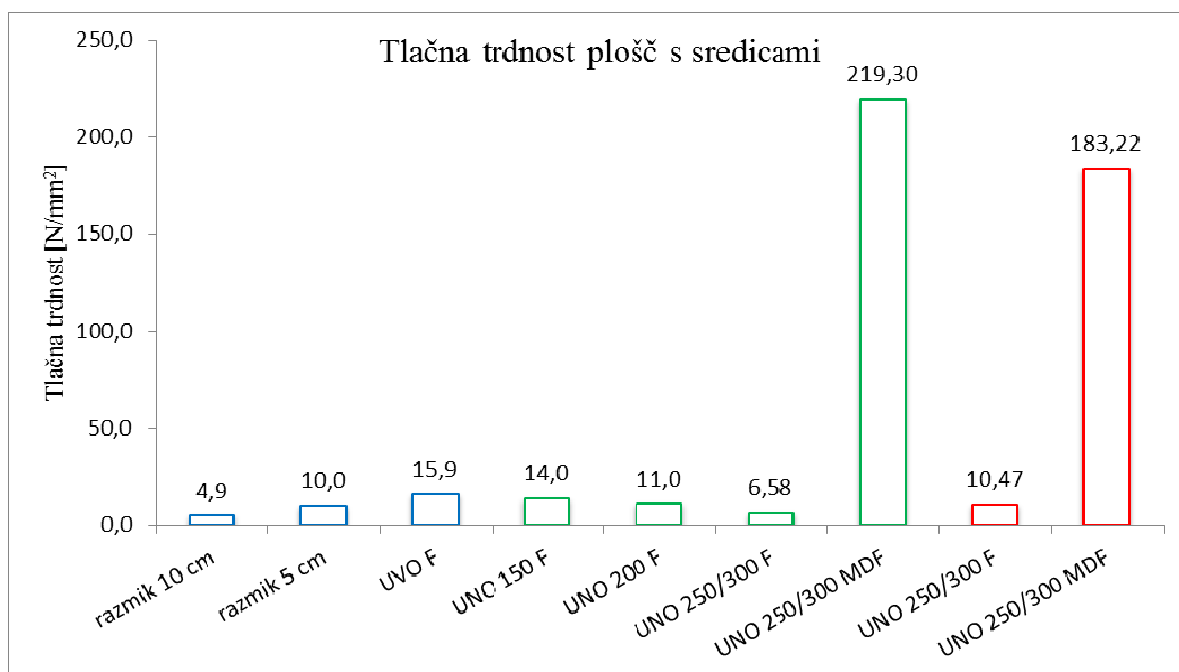
Kot prikazuje slika 27, lahko na osnovi gostote vse izdelane sendvič plošče uvrščamo med lahke materiale. Očitne razlike v gostoti so opazne pri uporabi različne debeline nosilnih plošč ter materiala satovij. Kljub različni količini uporabe furnirnih trakov za izdelavo furnirnih satovij so odstopanja v gostoti celotnega kompozita minimalna. Z zgoščevanjem mreže satovja iz razmika 10 cm na razmik 5 cm se je gostota povišala za 3 %. UNO 150 F satovje je ukrivljeno v manjšem radiju, s tem pa je pridobljeno več praznih celic in več celičnih sten satovja kot v UNO 200 F in UNO 250/300 F, zato se višek materiala odraža v 3 % višje gostote. V primerjavi gostote plošč UNO 250/300 F in UNO 250/300 MDF

ima satovje iz MDF trakov 11 % višjo gostoto zaradi trikratne debeline MDF trakov v primerjavi z bukovimi furnirnimi trakovi.

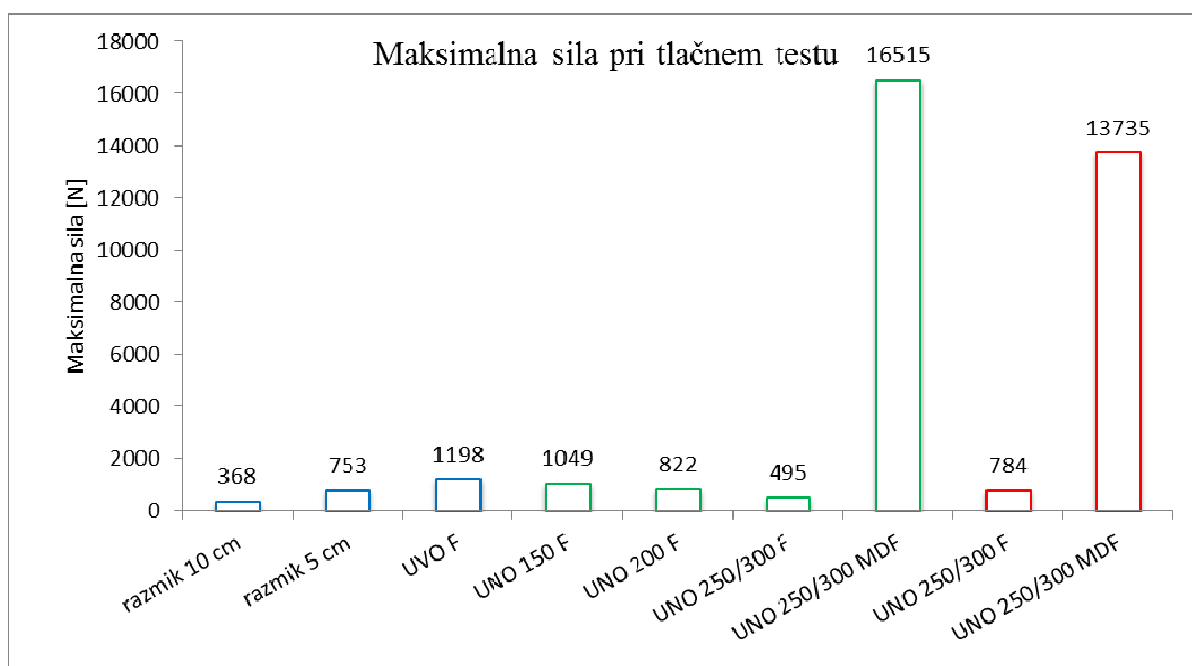
Iz podatkov v preglednici 3 je razvidno, da je imelo mrežasto satovje z razmikom 5 cm relativno majhno razliko v gostoti s primerjavo z mrežastim satovjem z razmikom 10 cm, preneslo pa je bistveno višje obremenitve. Enake razlike v tlačni trdnosti so prikazane tudi med ostalimi ploščami.

Preglednica 3: Rezultati tlačne obremenitve plošč

| Vrsta satovja        | Zunanja sloja plošče | $F_{\max}$<br>[N] | Tlačna trdnost<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\Delta L$ at $F_{\max}$<br>[mm] | Gostota<br>[g/cm <sup>3</sup> ] |
|----------------------|----------------------|-------------------|----------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| Razmik celic - 5 cm  | IP 8 mm              | 753,1             | 10,0                                   | 0,9                              | 0,336                           |
| Razmik celic - 10 cm |                      | 368,3             | 4,9                                    | 0,6                              | 0,326                           |
| UVO F                |                      | 1198,2            | 15,9                                   | 12,2                             | 0,378                           |
| UNO 150 F            | IP 3 mm              | 1049,4            | 14,0                                   | 1,1                              | 0,242                           |
| UNO 200 F            |                      | 822,1             | 11,0                                   | 1,1                              | 0,235                           |
| UNO 250/300 F        |                      | 495,25            | 6,58                                   | 0,65                             | 0,235                           |
| UNO 250/300 MDF      |                      | 16515,38          | 219,30                                 | 2,25                             | 0,343                           |
| UNO 250/300 F        | IP 8 mm              | 784,25            | 10,47                                  | 0,96                             | 0,340                           |
| UNO 250/300 MDF      |                      | 13735             | 183,22                                 | 2,59                             | 0,378                           |



Slika 28: Primerjava tlačnih trdnosti plošč



Slika 29: Prikaz maksimalne sile pri tlačni obremenitvi

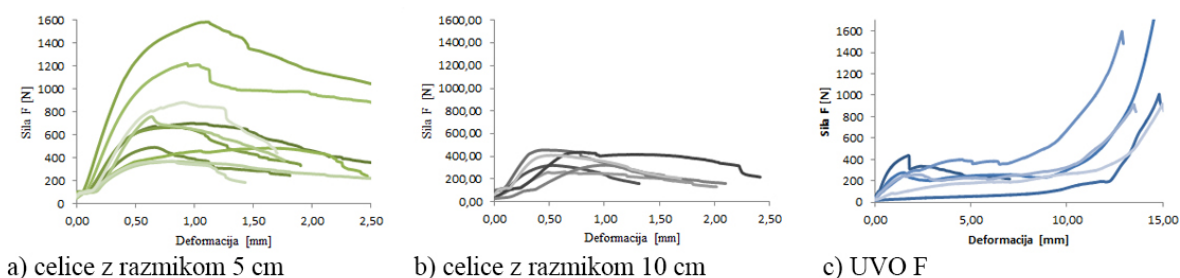
Najvišjo trdnost smo dosegli s satovjem UNO 250/300 MDF, ki je doseglo 15,7 krat višjo tlačno trdnost kot UNO 150 F. Visoke sile je prenašalo zaradi velike širine trakov satovja, zato so bile stene stabilnejše z manj možnosti uklona. Edina deformacija, ki je nastala, je bilo gnetenje vlaken materiala (slika 30).



Slika 30: Primerjava vzorcev po končani tlačni obremenitvi: UNO MDF satovje (levo), UNO F satovje (desno)

Slika 30 prikazuje lom satovja po tlačni obremenitvi. Ker so MDF trakovi širši od furnirnih trakov, se med tlačno obremenitvijo niso uklonili. Zato so prenesli višje sile in oblikoval se je drugačen lom kot pri furnirnih trakovih. Poleg debeline na tlačno trdnost vpliva mikroskopska zgradba materiala, ki je pri MDF v primerjavi s furnirjem bolj homogena in kompaktnjša. Furnirno satovje se zaradi tangencialne/radialne usmeritve ter majhne debeline ob obremenitvi na točkah, kjer se trakovi ne križajo, ukrivlja, zato se konstrukcija podaja in dosega nižje trdnosti v primerjavi z MDF satovjem.

Deformacija preskušancev glede na naraščanje sile obremenitve je prikazano na sliki 31.



Slika 31: Primerjava karakterističnih krivulj tlačne obremenitve satovij serije 1

Krivulje prikazujejo, da imata satovji a) in b) podobno odzivnost. Razliki sta v velikosti prenašanja sil, kar pojasnjujemo z gostejšo mrežo satovja a); ter višji variabilnosti meritev satovja a), kar je posledica naključne orientacije satovja pri razžagovanju vzorcev, oz. med razžagovanjem količina efektivnega satovja ni bila optimalno porazdeljena. V primerjavi rezultatov mrežastega satovja in ukrivljenega vodoravno usmerjenega satovja je moč opaziti, da je možno oblikovati mehanske karakteristike sendvič plošč na osnovi spreminjanja oblike satovja. Ukrivljeni furnirni trakovi v UVO satovju so bili vgrajeni na način, da so krivine trakov vzporedno usmerjene z nosilnima ploščama. Tako delujejo kot vzmetenje, ob enem pa so trakovi medsebojno spojeni, da je zmanjšan uklon trakov ob obremenitvi in povišana togost plošče.

## 4.2 UPOGIBNA OBREMENITEV

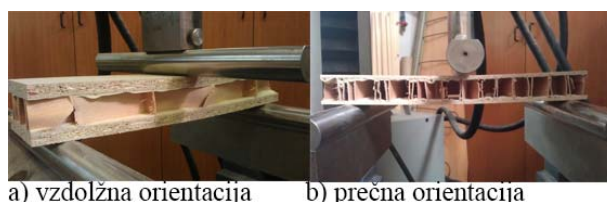
V preglednici 4 so prikazani rezultati upogibne obremenitve plošč.

Preglednica 4: Prikaz rezultatov upogibne trdnosti plošč

| Vrsta satovja        | F <sub>max</sub><br>[N] | Upogibna trdnost<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | E-Modul<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | Zunanji sloj | Orientacija<br>satovja |
|----------------------|-------------------------|------------------------------------------|---------------------------------|--------------|------------------------|
| Razmik celic - 5 cm  | 686,50                  | 1,61                                     | 147,25                          | IP 8 mm      | naključno              |
| Razmik celic - 10 cm | 588,00                  | 1,42                                     | 143,25                          |              |                        |
| UVO F                | 931,67                  | 2,59                                     | 196,33                          |              | vzdolžno               |
| UVO F 2*             | 674,67                  | 1,88                                     | 131,67                          |              |                        |
| UNO 150 F            | 157,33                  | 0,73                                     | 28,33                           | IP 3 mm      | prečno                 |
| UNO 200 F            | 148,33                  | 0,64                                     | 38,33                           |              |                        |
| UNO 250/300 F        | 949,00                  | 4,20                                     | 558                             |              | vzdolžno               |
| UNO 250/300 MDF      | 1506,00                 | 6,12                                     | 600                             |              |                        |
| UNO 250/300 F        | 1748,75                 | 4,13                                     | 385,25                          | IP 8 mm      |                        |
| UNO 250/300 MDF      | 2443,5                  | 5,78                                     | 534,75                          |              |                        |

\* UVO F 2 – ponovno testirana UVO F iz obratne smeri

Izdelani lahki ploščni kompoziti se razlikujejo po oblikah satovja, debelini zunanega sloja plošče oziroma iverne plošče in orientacije usmerjenosti satovja testiranih vzorcev. Na sliki 32 je ponazorjena usmerjenost satovja.



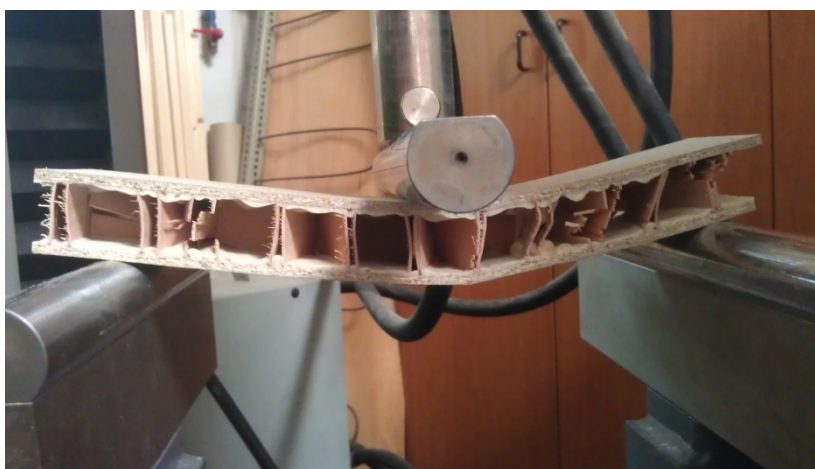
Slika 32: Ponazoritev orientacije satovja

Upogibne trdnosti mrežastih satovij z razmikom 5 in 10 cm so nizke. Razlogi za nizko upogibno trdnost je majhna količina materiala v satovju vzorca. Trakovi ter zunanja sloja so bili podvrženi tlačnim in strižnim obremenitvam in so imeli tendenco upogibanja in loma predvsem na križnih mestih, saj je spojna zarez predstavljal šibko točko. Zato so plošče z mrežastim satovjem imele manjšo upogibno trdnost v primerjavi s ploščami pri vzdolžni orientaciji satovja.

V preglednici 4 opazimo razliko rezultatov upogibne trdnosti v odvisnosti od usmerjenosti satovja. Primerjamo lahko testirance satovij UNO 200 F in UNO 250/300 F. Kljub nižji gostoti satovja UNO250/300 F je vzdolžna orientacija trakov prenesla višje napetosti. Rdeča oznaka na sliki 33 prikazuje lom obeh slojev ivernih plošč debeline 3 mm na mestu poteka furnirnega traku. Celice satovja v tej usmeritvi niso medsebojno povezane s trakom, ki bi preprečeval uklon sten satovja. Posledica tega je nizka upogibna trdnosti in modul elastičnosti ter lom preizkušanca, ki se ni pojavil na osi upogibnega orodja. Slika 34 prikazuje neenakomeren lom satovja, ki so ga povzročile neenakomerno razporejene strižne in tlačne sile med obremenitvijo. Celice satovja, kjer smo predvidevali, da so največje obremenitve, so ostale nepolomljene.

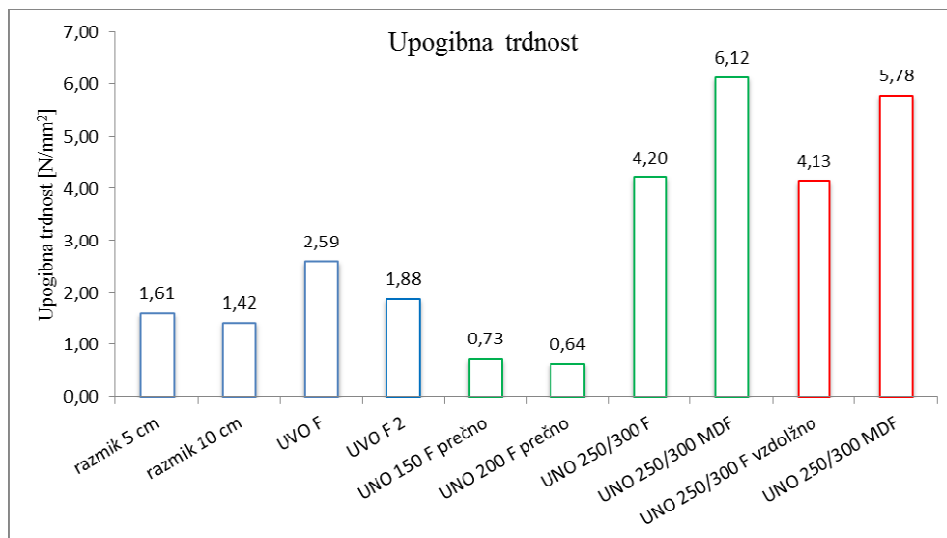


Slika 33: Porušitev vzorca s prečno orientiranim satovjem

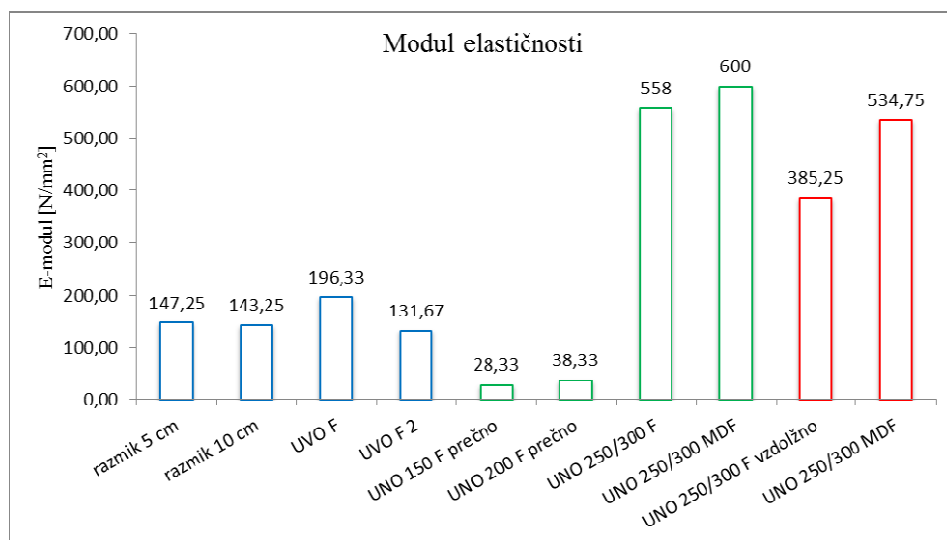


Slika 34: Neenakomeren lom satovja prečno orientiranega satovja

Tudi upogibna trdnost in modul elastičnosti sta odvisna od sestave sredice (slika 35 in 36)



Slika 35: Upogibna trdnosti plošč

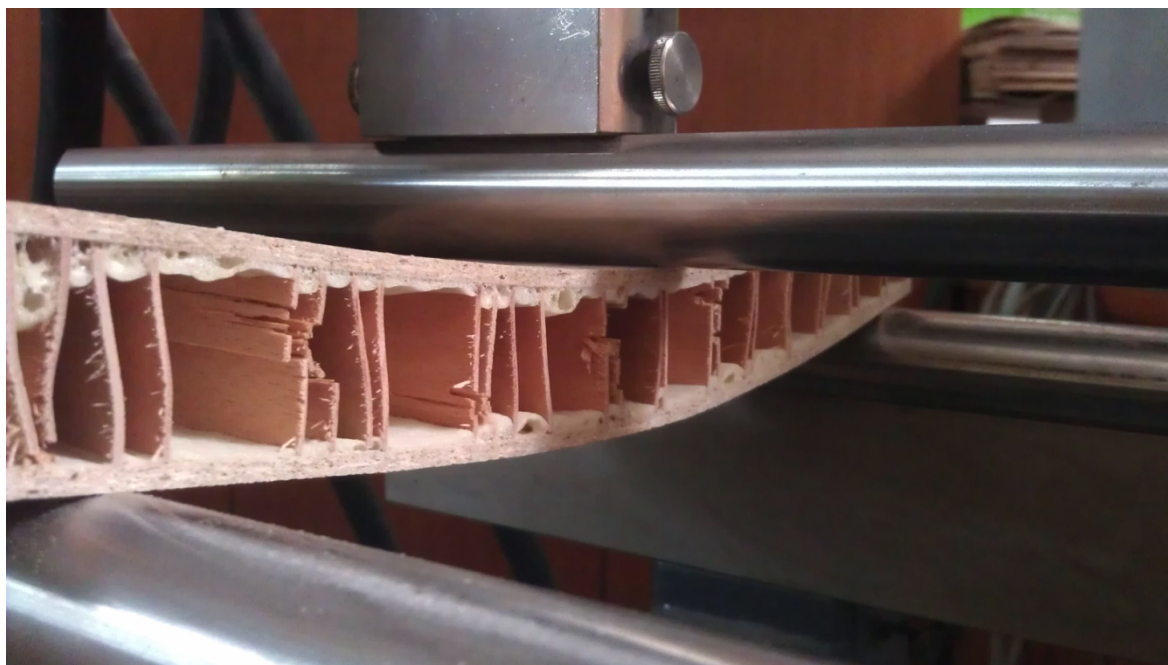


Slika 36: Modul elastičnosti plošč

Opazimo, da je najboljše rezultate dosegalo satovje iz MDF trakov. Razlog za to je v debelini trakov, saj omogočajo stabilno konstrukcijo pri upogibu ter tlačno-nateznih in strižnih silah med obremenjevanjem. MDF trakovi imajo homogeno in kompaktnejšo mikrostrukturo materiala ter boljše lepilne spoje med satovjem in nosilnima ploščama, zaradi večje lepilne površine v primerjavi s furnirnim satovjem.



Vzrok za nižje upogibne trdnosti in modul elastičnosti UNO satovja v prečni orientaciji je visoka podajnost plošče in večja deformabilnost, ki je prikazana na sliki 37.



Slika 37: Podajnost plošče med obremenjevanjem

Relativno dobre rezultate pa je doseglo tudi satovje UVO. Zaradi prečne postavitve trakov v satovju je plošča po obremenitvi ostala na videz v enakem stanju kot pred obremenitvijo. Zato smo se odločili, da preizkušance, na katerih smo že opravili upogibni test, opravimo še upogib nasprotne strani – UVO F 2. Ponovno testirani preizkušanci so v povprečju dosegli 73 % upogibne trdnosti in 78 % modula elastičnosti prvotnega testiranja.

#### 4.3 PRIMERJAVA REZULTATOV UPOGIBNE TRDNOSTI Z LAHKIMI PLOŠČNIMI KOMPOZITI DRUGIH PROJEKTOV

V preglednicah 5 in 6 so predstavljeni rezultati lahkih ploščnih kompozitov drugih projektov za primerjavo doseženih rezultatov in plošč naše izdelave. Primerljivi podatki so označeni z enako barvo v preglednicah.

Preglednica 5: Rezultati testa zunanje projekta (vir: Hudnik, 2010)

| Zunanji sloj ploščnega kompozita | Sredica | Upogibna trdnost [N/mm <sup>2</sup> ] |
|----------------------------------|---------|---------------------------------------|
| Lab. iverna pl. 4 mm             | AL      | 7,18                                  |
| Lab. iverna pl. 4 mm             | PE      | 3,68                                  |
| Lab. iverna pl. 4 mm             | PP      | 6,93                                  |
| Lab. iverna pl. 4 mm             | PU pena | 2,1                                   |
| Ind. MDF pl. 3 mm                | PUL     | 0,59                                  |

Preglednica 6: Rezultati testa projekta COST E49 (vir: Medved, 2008)

| Zunanji sloj ploščnega kompozita | Vrsta satovja     | Upogibna trdnost |
|----------------------------------|-------------------|------------------|
| Iverna plošča 4 mm               | PC                | 4,26             |
| Iverna plošča 4mm                | PP                | 3,88             |
| Iverna plošča 4 mm               | Aluminijasto      | 6,28             |
| Iverna plošča 4 mm               | Okal plošča       | 2,96             |
| MDF 4 mm                         | Papirnato satovje | 1,34             |
|                                  | Iverna plošča     | 10,56            |

|                         |                 |      |
|-------------------------|-----------------|------|
| * Ind . iverna pl. 8 mm | UNO 250/300 F   | 4,13 |
| * Ind . iverna pl. 8 mm | UNO 250/300 MDF | 5,78 |
| * Ind . iverna pl. 3 mm | UNO 250/300 F   | 4,20 |
| * Ind . iverna pl. 3 mm | UNO 250/300 MDF | 6,12 |

\* rezultati lastnih testiranj

Legenda:

- AL...aluminijasto satovje
- PE...polietilensko satovje
- PP...polipropilensko satovje
- PU pena...sredica iz poliuretanske pene
- PUL...sredica i laboratorijske poliuretanske pene
- PC...polikarbonatno satovje

Ob primerjavi rezultatov opazimo, da so vrednosti upogibne trdnosti naših satovij presegale upogibne trdnosti papirnatega satovja. Na osnovi podatkov iz preglednic je satovje UNO 250/300 MDF primerljivo s polipropilenskim in aluminijastim satovjem. Satovje UNO 150 F pa s polietilenskim in polikarbonatnim satovjem.

## 5 RAZPRAVA

Karakteristike lahkih ploščnih kompozitov niso odvisne samo od zunanje sloja ampak so odvisne predvsem od strukture sredice (preglednica 7).

Preglednica 7: Rezultati testiranja izdelanih lahkih ploščnih kompozitov

| Vrsta satovja        | Upogibna trdnost     | E-Modul              | Tlačna trdnost       | Gostota              | Orientacija satovja | Zunanji sloj |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|--------------|
|                      | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [g/cm <sup>3</sup> ] |                     |              |
| Razmik celic - 5 cm  | 1,61                 | 147,25               | 10                   | 0,336                | naključno           | IP 8 mm      |
| Razmik celic - 10 cm | 1,42                 | 143,25               | 4,9                  | 0,326                |                     |              |
| UVO F                | 2,59                 | 196,33               | 15,9                 | 0,378                | vzdolžno            |              |
| UVO F 2*             | 1,88                 | 131,67               | 15,9                 | 0,378                |                     |              |
| UNO 150 F            | 0,73                 | 28,33                | 14                   | 0,242                | prečno              | IP 3 mm      |
| UNO 200 F            | 0,64                 | 38,33                | 11                   | 0,235                |                     |              |
| UNO 250/300 F        | 4,2                  | 558                  | 6,58                 | 0,235                | vzdolžno            |              |
| UNO 250/300 MDF      | 6,12                 | 600                  | 219,3                | 0,343                |                     |              |
| UNO 250/300 F        | 4,13                 | 385,25               | 10,47                | 0,340                |                     |              |
| UNO 250/300 MDF      | 5,78                 | 534,75               | 183,22               | 0,378                |                     |              |

V splošnem je moč opaziti velike prednosti v rezultatih sredic iz MDF trakov. Vzroki za višje vrednosti so debelina posameznega traku, tlačna trdnost same sredice oz. materiala, uporabljenega za izdelavo sredice, površina naleganja oz. kontakta sredice in zunanje sloja.

Debelina posameznega traku je pomemben dejavnik za način prenosa sil, ki jih lahko prenaša trak v svoji navpični orientiranosti. Če opazujemo posamezni trak v navpični orientaciji ob delovanju sil, opazimo da ta element deluje manj stabilno, kot če bi trak orientirali vodoravno. Trak v navpični orientaciji ima šibko točko v obliki uklona ob delovanju sile na njegovo naležno ploskev. Zaradi majhne debeline in velike višine opazovani element slabše prenaša strižne sile, ki povzročajo uklon. Ta pojav se z večanjem debeline manjša, saj se zvišuje upogibna trdnost traku v smeri uklona in posledično upogibna in tlačna trdnost ploščnega kompozita. Razlike v tlačni trdnosti v odvisnosti od debeline si lahko pojasnimo s sliko 38.



Slika 38: Primerjava loma MDF (levo) in furnirnega satovja (desno)

Ob primerjavi loma MDF in furnirnega satovja na sliki 38 je opazna razlika v lomu satovja. Opazovane razlike so v tem primeru nastale zaradi debeline trakov. Kot je vidno, se MDF trakovi niso uklonili, zato je satovje preneslo višje obremenitve in nastal je poševen lom zaradi zdrsa vlaken. Tanke stene furnirnega satovja so se zaradi uklona prelomile. Podoben uklon in lom se je pojavil na nekaterih trakovih MDF satovja, pri katerih so bile stene stanjšane, zaradi razžagovanja (slika 39).



Slika 39: Uklon in lom stanjšane traku UNO MDF satovja

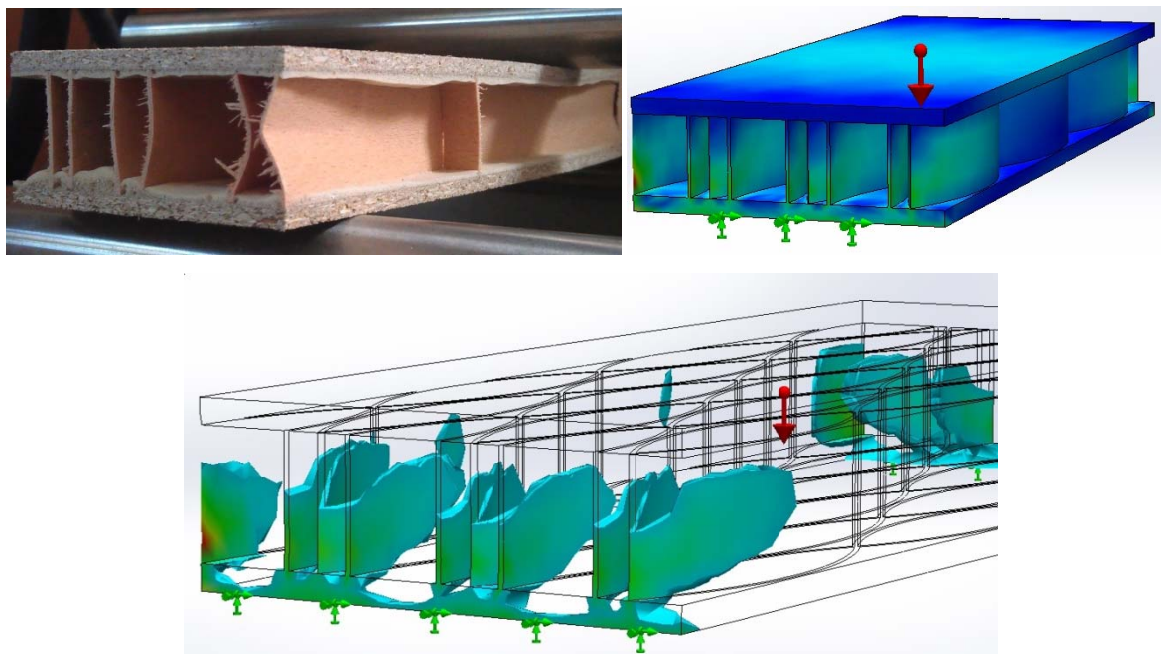
Tlačna trdnost trakov satovja je odvisna od lastnosti materiala. MDF in naravni les sta si v zgradbi različna. V MDF materialu so za razliko od lesa izključeni prazni celični prostori in vsebuje vlakna masivnega lesa, ki so medsebojno prepletena. Rezultat tega je homogenejša struktura materiala in boljše trdnosti.

Stična površina satovja z zunanjim slojem je odvisna od števila ter debeline sten v sredici in ima vpliv na upogibno ter tlačno trdnost. Vzorci s furnirnim satovjem so v večini vsebovali večje število trakov, vendar kljub temu, zaradi tankih sten, to ni bistveno prispevalo k skupni stični površini. Ob primerjavi rezultatov satovja po količini materiala vgrajenega v sredici je značilen upad tlačne in upogibne trdnosti z zniževanjem števila trakov ter posledično zmanjševanje stične površine satovja z zunanjim slojem. Z večanjem

stične površine omogočimo večjo lepilno površino in boljše sidranje satovja na nosilne plošče ter enakomerno porazdelitev strižnih napetosti po površini. Če primerjamo rezultate preglednice 6 npr. mrežastega satovja z razmikom 5 cm in 10 cm, smo s povečanjem števila sten zvišali tlačno trdnost plošče za 104 % in upogibno trdnost 13 % ob 3 % višji gostoti. Nizka razlika v upogibni trdnosti, kljub dodanemu materialu, se kaže v nizkemu uporu uklona furnirnih trakov med obremenjevanjem.

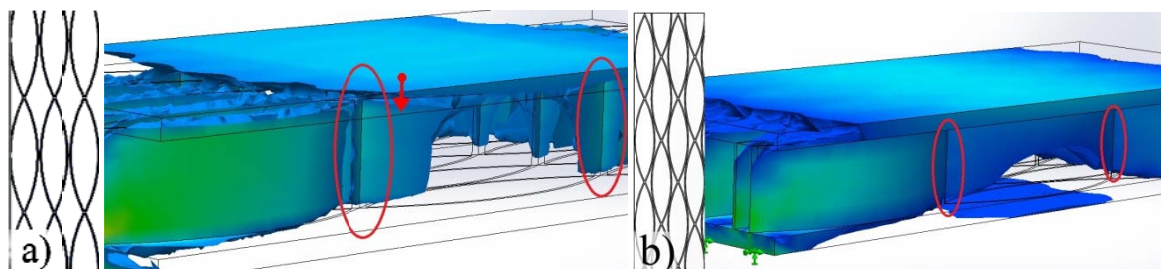
Pri primerjavi mehanskih lastnosti LPK papirnatega satovja in iverne plošče (preglednica 1, str. 11) opazimo, da z dodajanjem papirnatega satovja med iverne plošče zmanjšamo upogibno trdnost na 6 % upogibne trdnosti dveh ivernih plošč debeline 8 mm. Če primerjamo rezultate upogibne trdnosti plošč s satovjem UNO 250/300 MDF, je plošča dosegla višjo upogibno trdnost ( $5,78 \text{ N/mm}^2$ ) kot dve iverni plošči ( $\approx 5,25 \text{ N/mm}^2$  oz.  $\approx 10,56/2 \text{ N/mm}^2$ ). MDF satovje je v primerjavi s papirnatim debelejšje in poteka v trakovih, zato je manj upogljivo in prenaša večje strižne napetosti. Razlog, da je celotna plošča imela izboljšane upogibne trdnosti zunanjih slojev oz. ivernih plošč, je v veliki stični površini satovja z zunanjima ploščama. Tako je satovje delovalo kot armatura in izboljšalo natezne in tlačne lastnosti zunanjih slojev.

Na spodnji sliki 40 je primerjava napetosti v satovju pri simulacijskih testih in realnih testih na osnovi vizualnih sprememb satovja med obremenjevanjem.



Slika 40: Primerjava realnih testov in simulacijskih testov obremenjevanja

Trakovi na preizkušancu so se uklonili na območju, kjer so na simulacijskem modelu bile prikazane visoke napetosti. Svetlejšje barve v simulaciji prikazujejo višje napetosti. V simulacijah so bile prikazane koncentracije napetosti na območju križanja trakov satovja a) na sliki 41, kar predstavlja potencialno šibko točko na realnem preizkušancu. Šibke točke v križanju trakov so bile odpravljene z zamikanjem ovalnih celic v satovju b) na sliki 41. Križna polja so tako bila enakomerno porazdeljena po površini in utrjena s trakovi nasprotnih celic. Na podlagi spremembe satovja smo izboljšali lastnosti kompozita.



Slika 41: Prikaz koncentracije napetosti na mestu križanja trakov

## 6 SKLEP

V diplomskem projektu smo izdelali več vrst satovij za lahke ploščne kompozite. Predvidevamo, da smo z uporabo naravnega lesa in recikliranega lesa povečali možnost ugodnejše predelave odsluženih sendvič plošč v nove izdelke, saj izdelki ne vsebujejo kovinskih ali drugih nezaželenih delcev.

Ugotovili smo, da smo z zmanjševanjem razmika mrežastega satovja iz 10 cm na 5 cm vplivali le na upogibno trdnost, medtem ko pri tlačnih trdnostih ni bilo bistvenih razlik. Sklepamo, da do razlik v tlačni trdnosti ni prišlo zaradi majhne količine dodanega materiala, ki je bil dodan z zmanjševanjem razmika.

Na osnovi rezultatov testiranj UVO satovij, bi te vrste plošč, zaradi njihovih lastnosti, predlagali za uporabo v izdelavi športnih podov, vendar z nadaljnjimi raziskavami v prožnosti, lezenja in dimenzijski stabilnosti plošče.

Za izdelavo plošč z UNO sredico smo za primerjavo uporabili 3 mm in 8 mm debelo iverno ploščo, ker smo predvidevali, da bodo lastnosti sredica boje izpostavljene s tanjšo iverno ploščo. Plošče s tanjšima zunanjsima slojema so po predvidevanju prenesle manjše tlačne sile v primerjavi s ploščami z debelejšimi zunanjsimi sloji.

Ker gre za satovje, sestavljeno iz posameznih elementov, pri sestavljanju plošč ni potrebe po izdelavi okvirja, v katerega bi se vstavilo in fiksiralo satovje, kot npr. papirnato satovje. Vendar je, kot pri vseh sendvič ploščah, potrebna robna obdelava, ki ugodno vpliva na trdnost elementa.

Na podlagi dobljenih rezultatov bi lahko sklepali, da bi ploščne kompozite z UVO in UNO satovji lahko uporabili za izdelavo zahtevnejših izdelkov. Primerni bi bili za izdelavo vratnih kril javne in zasebne uporabe, kjer je velika tlačna trdnost še posebej zaželeno.



## 7 POVZETEK

Zaradi porasta izdelave in uporabe lahkih konstrukcijskih elementov, so želje po razvoju lahkih materialov vse večje. V zadnjem času se na tržišču veliko pojavljajo lahki ploščni kompoziti, ki imajo satovje narejeno iz kovinskih materialov, najbolj razširjena so aluminijasta satovja, ter satovjih narejenih iz umetnih mas naftnih derivatov. Zato smo se odločili, da v diplomskem projektu iščemo rešitve, ki bi vsebovale komponente masivnega lesa ter drugih lesnih materialov in bi predstavljale alternativne možnosti umetnim sredicam.

V diplomskem projektu smo konstruirali in izdelali različne oblike satovij in jih vgradili v lahke ploščne kompozite. Za načrtovanje sredic smo si pomagali z računalniškim programom SolidWorks, v katerem smo sredice 3D modelirali in na njih simulirali obremenitve, podobne realnim mehanskim testom. Ob simulaciji programa smo lahko pridobili vizualizacijo notranjih napetosti materiala in potencialne šibke točke, na podlagi katerih smo predvidevali lastnosti končnega ploščnega kompozita.

Mrežasta satovja z razmikom celic 5 in 10 cm ter UVO F satovja smo izdelali na osnovi krivljenja furnirnih trakov. Surovino smo segrevali in namakali v vroči vodi, da se je primerno zmehčala za formiranje v novo obliko v kalupih. Kalup s trakovi smo sušili v sušilniku na temperaturi 100° C za 24 ur. Sledilo je kondicioniranje in ohlajanje kalupov preden smo začeli z zarezovanjem utorov za spajanje. Trakove smo spojili v dve vrsti enostavne mreže ter vodoravno usmerjene trakove za sredico UVO F. Po prvih testiranjih smo prišli do ugotovitve, da je delo z oblikovanjem in sestavljanjem satovja težavno in zamudno, kar bi predstavljalo velike stroške pri realizaciji tehnološkega procesa. Testiranja niso doprinesla zadovoljivih rezultatov mrežastih satovij, medtem ko je sredica UVO F prikazala zadovoljive vrednosti in za nas zanimive karakteristike. Plošče iz UVO F sredic bi bile primerne za izdelavo športnih podov, saj imajo vzmetne lastnosti.

Pri izdelavi UNO satovij smo za razliko od UVO satovij čas izdelave skrajšali z izboljšano obliko. Zaradi večjih krivinskih radijev celic satovja, ni bilo potrebno plastično deformirati furnirnih in MDF trakov. Med izdelavo je bilo potrebno ugotoviti ustrezeni krivinski radij

obeh materialov, da se med ukrivljanjem nista lomili. Med izdelavo je prišlo do manjših sprememb pri konceptu furnirnega satovja, saj zaradi majhne debeline trakov krivina traku ni bila ohranjena. Problem je bil rešen z dodajanjem podpornih elementov iz ostankov dolžinskega krojenja trakov. Dodana teža s podpornimi elementi k ploščnemu kompozitu je bila zanemarljiva. Zaradi uporabe različnih debelin iverne plošče v zunanjem sloju so testiranja pokazala razlike v tlačni in upogibni trdnosti v povezavi z usmeritvijo satovja. Rezultati testiranj so po pričakovanjih bili boljši od mrežastih in UVO satovij, saj je bila forma sredice načrtovana tako, da so bila območja križanja trakov podprta s trakom sosednje celice satovja.

Ob koncu je sledila še primerjava rezultatov med ostalimi projekti razvoja satovij iz sintetičnih polimernih mas in kovin, pri kateri je bilo ugotovljeno, da so naši lahki ploščni kompoziti bili primerljivi z industrijsko izdelanimi komercialnimi LPK in dosegajo boljše mehanske trdnosti kot papirnato satovje. Na podlagi naših mnenj je uporaba izdelanih lahkih ploščnih kompozitov sprejemljiva v pohištveni industriji.

## 8 VIRI

- Anatomija bukovega lesa (03.05.2006)  
<http://www.woodanatomy.ch/species.php?code=FASY> (2013)
- Barboutis I., Vassilios V., 2013. Strength properties of lightweight paper honeycomb panels for the future.  
<http://users.auth.gr/jbarb/Publications/lightweight%20honeycomb%20furniture.pdf> (2013)
- Bitzer T. 1997. Honeycomb technology: materials, design, manufacturing, applications and testing. London. Chapman & Hall: 233 str.
- Bombno letalo iz druge svetovne vojne: Mosquito, 2013  
<http://worldwar2headquarters.com/HTML/aircraft/britishAircraft/mosquito.html>
- Hudnik T. 2010. Razvoj lahkih ploščnih kompozitov s sredico iz utekočinjenega lesa. Dipl. delo. Ljubljana, Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 44 str.
- Medved S. 2008. Impact of core on the compression, modulus of elasticity and modulus of rupture of lightweight particleboard composite. V: Cost Action E49 International Workshop in Slovenia on Lightweight Wood-Based Composites-Production, Properties and Usage: 108-115
- prCEN/TS 00112189:2011.2 Determination of performance characteristics for specification of sandwich boards for furniture (SWB-F) 2011
- Sam-Brew S., Samlpe K., Smith D. G. 2011, Preliminary Experiments on the Manufacture of Hollow Core Composite Panels, Forest Products Journal, Vol. 61, No. 5: 381-389

- Thoemen H. 2008. Lightweigt panels for the European furniture industry: Some recent developments. V: Cost Action E49 International Workshop in Slovenia on Lightweight Wood-Based Composites-Production, Properties and Usage: 1-14
  
- Železniški most v Wales-u, (2.10.2010)  
<http://geotopoi.wordpress.com/2010/10/02/britannia-bridge/> (2013)

## **ZAHVALA**

Najprej bi se rad zahvalil mentorju doc. dr. Sergeju Medvedu za pomoč, svetovanje in realizacijo materiala pri izvedbi diplomske naloge ter recenzentu prof. dr. Milanu Šerneku za recenzijo.

Zahvalil bi se tudi staršem, bratu, sestri in puncu za podporo v času študija.