

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
АРХИТЕКТОНСКИ ФАКУЛТЕТ

Милица Д. Петровић

**ЛАМЕЛНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ ОД ДРВЕТА СА
ТЕКСТИЛНОМ МЕМБРАНОМ**

докторска дисертација

Београд, 2023.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF ARCHITECTURE

Milica D. Petrović

**TIMBER LAMELLA STRUCTURES WITH
TEXTILE MEMBRANE**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2023.

Ментор:

др Ненад Шекуларац, редовни професор
Универзитет у Београду, Архитектонски факултет

Чланови комисије:

др Бранислав Жегарац, редовни професор у пензији
Универзитет у Београду, Архитектонски факултет

др Ана Никезић, редовни професор
Универзитет у Београду, Архитектонски факултет

др Јефто Терзовић, доцент
Универзитет у Београду, Архитектонски факултет

др Часлав Митровић, редовни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

др Светислав Мијатовић, доцент
Универзитет у Београду, Физички факултет

Датум одбране:

ЛАМЕЛНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ ОД ДРВЕТА СА ТЕКСТИЛНОМ МЕМБРАНОМ

Сажетак

Ламелне конструкције су просторне конструкције у дијагоналној мрежи паралелограма коју формирају линијски носачи - ламеле. Изучавају се као део веће области просторних конструкција, а у докторској дисертацији приказана је њихова анализа и систематизација. Најчешће се примењују за хале, те је одабрана геометрија омотача кружног правога цилиндра за истраживање кроз пројекат. Графичка и нумеричка анализа геометрије криве којом се крећу ламеле по омотачу кружног правога цилиндра, у случају да се осе свих ламела секу у чвору, показала је да је идеална геометрија осе ламеле хеликс - просторна спирала. За извођење прототипа конструкције, којим ће се проверити геометрија ламела и предности историјских ламелних конструкција од дрвета, просторна крива је симплификована у равански лук, наводећи на производњу лучних ламела од лепљеног ламелираног дрвета. Испитивањем деформација прототипа конструкције под гравитационим оптерећењем, доказано је да текстилна мембрана има утицаја на промену деформација ламелне конструкције иако је пројектована као покривач. Експериментом у аеротунелу испитан је утицај ветра на кров постојећег објекта услед постављања пројектоване конструкције за наткривање атријума. Закључено је да пројектована интервенција утиче на промене у вредностима коефицијената притиска ветра на постојећи објекат, као и да се постављањем аеродинамичне надстрешнице смањује утицај ветра на кровове који је окружују.

Кључне речи: *геометријска анализа, систематизација веза, експериментално испитивање, прототип конструкције, аеротунел*

Научна област: Архитектура и урбанизам

УДК број: 692.4:674:677.4(043.3)

TIMBER LAMELLA STRUCTURES WITH TEXTILE MEMBRANE

Abstract

Lamella structures are spatial structures in diamond pattern formed by ribs - lamellae. Since they are usually classified as a part of a larger structural field, there is a need for their systematisation and analysis, as presented in doctoral dissertation. They are mostly applied as roof structures for halls, so the chosen geometry for research by design is a circular straight cylinder. Graphical and numerical analysis of the geometry of the curve by which the lamellae move along the envelope of a circular straight cylinder, in the event that the axes of all the lamellas intersect at a node, showed that the ideal geometry of the lamellae axes is a helix - a spatial spiral. For the construction of the prototype, which aims to verify the geometry of the lamellae and the advantages of the historical timber lamella structures, the spatial curve was simplified into a planar arch, leading to the production of arched lamellae from glued laminated timber. Experimental analysis of the prototype structure deformations under gravity load, showed that the textile membrane has an influence on the deformations of the lamella structure, even though it was designed as a cover. The wind tunnel experiment aimed to prove the wind effect on the roof of the existing building after the installation of the designed structure to cover the atrium. It was concluded that the designed intervention affects the changes in the values of wind pressure on the existing building. The designed aerodynamical canopy reduces the wind coefficients on the surrounding roofs.

Keywords: *geometric analysis, systematisation of joints, experimental research, structure prototype, wind tunnel testing*

Scientific field: Architecture and Urbanism

САДРЖАЈ

1. Увод

- 1.1 Уводне напомене о истраживању
- 1.2 Повод за истраживање
- 1.3 Претходна анализа информација о предмету истраживања
- 1.4 Предмет и проблем истраживања
- 1.5 Циљеви истраживања
- 1.6 Задаци истраживања
- 1.7 Хипотезе истраживања
- 1.8 Научне методе истраживања
- 1.9 Очекивани резултати истраживања и научни допринос

I ПОЈМОВИ И ТЕОРИЈА

2. Ламелне конструкције

- 2.1 Опште информације
- 2.2 Историјски развој ламелних конструкција
- 2.3 Систематизација ламелних конструкција

3. Дрво - конструктивни материјал

- 3.1 Опште информације
- 3.2 Линијски конструктивни елементи од дрвета

4. Текстилне мембране

- 4.1 Опште информације
- 4.2 Карактеристике текстилних мембрана
- 4.3 Примена текстилних мембрана у архитектури

II ИСТРАЖИВАЊЕ КРОЗ ПРОЈЕКАТ ЛАМЕЛНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ ОД ДРВЕТА СА ТЕКСТИЛНОМ МЕМБРАНОМ

5. Анализа истраживања ламелних конструкција од дрвета и закључци за пројектовање прототипа

6. Анализа геометрије конструкције

- 6.1 Истраживање геометрије графичком методом
 - 6.1.1 Надовезивање лучних ламела
 - 6.1.2 Пројекција мреже на цилиндар
 - 6.1.3 Подела цилиндра на једнаке сегменте
- 6.2 Нумеричка дефиниција геометрије модела

7. Анализа елемената конструкције

- 7.1 Геометрија и карактеристике ламела
- 7.2 Везе између ламела
 - 7.2.1 Типови веза дрвених ламела

7.2.2 Систематизација постојећих веза ламела у ламелним конструкцијама од дрвета

7.2.3 Предлог чворне везе ламела за прототип

7.3 Текстилна мембрана и њена веза са ламелама

8. Прототип конструкције

8.1 Пројектовање прототипа

8.2 Монтажа прототипа

8.3 Експериментално испитивање прототипа

8.3.1 План мерења деформација конструкције

8.3.2 Мерење деформација конструкције и резултати испитивања

8.3.3 Закључци мерења деформација конструкције

9. Однос геометрије и елемената конструкције проверен путем прототипа - дискусија са закључцима

III ПРИМЕНА ИСТРАЖИВАЊА У АРХИТЕКТУРИ

10. Предлози примене ламелне конструкције од дрвета са текстилном мембраном

10.1 Економичност извођења ламелне конструкције са текстилном мембраном

10.2 Примена конструкције за наткривање атријума

10.3 Испитивање утицаја ветра на објекат чији се атријум наткрива

10.3.1 Експериментално испитивање у аеротунелу

10.3.2 Софтверска симулација (CFD simulation)

10.3.3 Резултати испитивања - дискусија и закључци

11. Закључна разматрања

ПРИЛОЗИ

ИЗВОРИ И ЛИТЕРАТУРА

СПИСАК ИЛУСТРАЦИЈА И ТАБЕЛА

БИОГРАФИЈА АУТОРА

1. Увод

1.1 Уводне напомене о истраживању

Тема докторске дисертације су ламелне конструкције од дрвета са текстилном мембраном, а у оквиру истраживања биће приказане ламелне конструкције, њихов историјски развој и систематизација, својства дрвета које се користи за линијске конструктивне елементе, затим тип и подела текстилних мембрана, као и њихова примена у архитектури, и истраживање кроз пројекат ламелне конструкције које обухвата анализу геометрије, анализу елемената конструкције и пројектовање прототипа конструкције.

Кроз историју, ламелна конструкција користила се као кровна конструкција малих распона за стамбене објекте, и великих распона за спортске хале. Основна намена ламелне конструкције је наткривање, због чега је потребно пројектовати конструкцију са покривачем. Прва пројектована ламелна конструкција за стамбене објекте је подашчавана, а покривач је био цреп. Конструкције од дрвета имају изражену естетику коју је могуће истаћи пажљивим одабиром покривача и начином третирања елемената конструкције. У докторској дисертацији претпоставка је да је ламелне конструкције могуће применити на било коју закривљену форму, а као покривач одабрана је текстилна мембрана. Текстилна мембрана и њена боја, истичу геометрију ламелне конструкције наглашавајући мрежу ламела која се може сагледати и са унутрашње, и са спољашње стране, посебно у ноћним часовима. Текстилна мембрана се користи као конструктивни елемент у мембранским конструкцијама. Форму добија преднапрезањем, те је најчешће двоструко закривљена. Због својих конструктивних карактеристика, и начина монтаже, може утицати и на ламелну конструкцију након постављања, чак иако је пројектована као покривач.

Услед функције наткривања произашла је идеја о испитивању пројектоване конструкције путем два експеримента:

1) Први експеримент има за циљ да покаже да ли текстилна мембрана утиче на деформације ламелне конструкције услед вертикалних оптерећења, посебно асиметричног оптерећења од снега, које је издвојено као једно од оптерећења која негативно утичу на деформације ламелне конструкције.

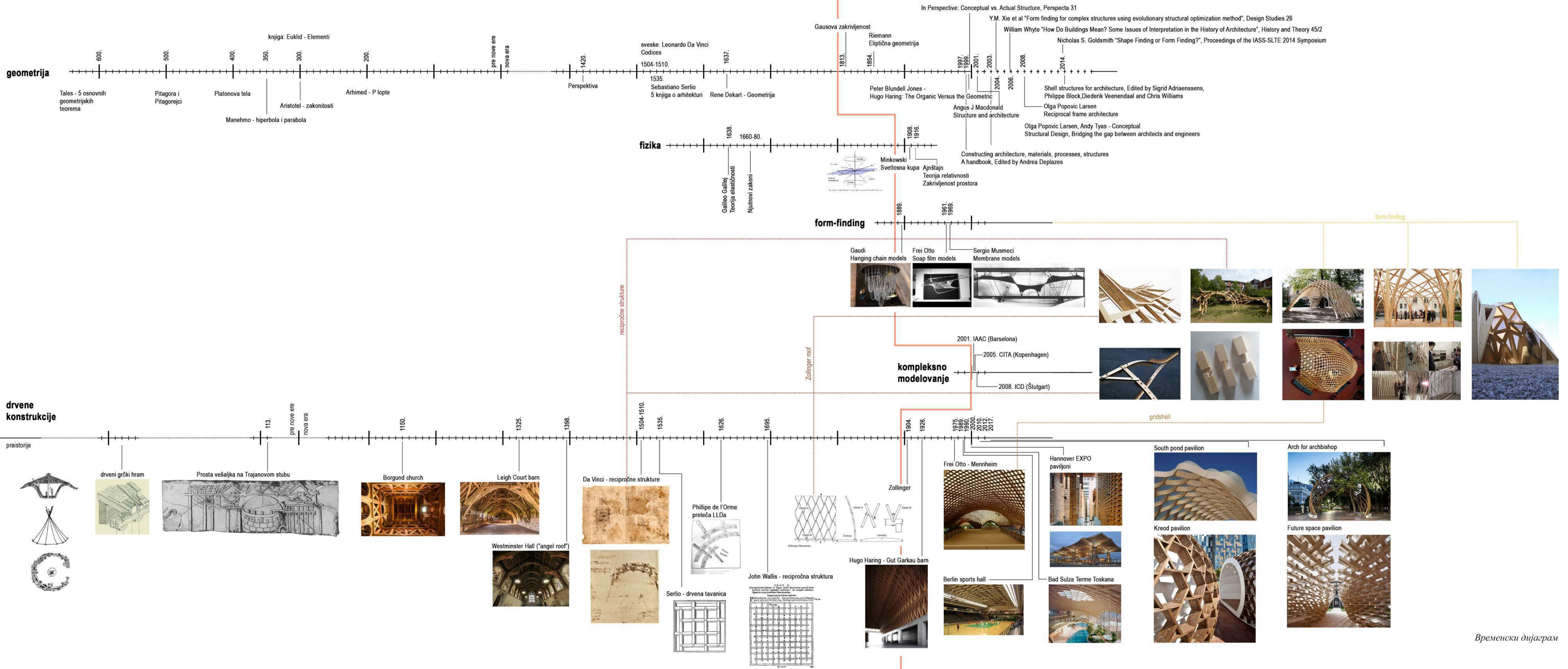
2) Други експеримент бави се утицајем ветра на постојећи објекат након постављања надстрешнице типа ламелне конструкције од дрвета са текстилном мембраном. Ламелна конструкција састоји се из елемената малих дужина, због чега је погодна за наткривање атријума постојећих објеката, јер се може на једноставан начин транспортовати и монтирати. Из тог разлога, фокус истраживања је функција наткривања атријума. Постављањем нове надстрешнице на атријум, утиче се на промене дејства ветра, због чега је потребно проверити утицаје ветра на постојећи објекат.

Први експеримент везује се за пројектовани прототип, док је други експеримент повезан са самом применом конструкције и одабраном локацијом за студију случаја. Закључак докторске дисертације представља основне поставке за ламелне конструкције од дрвета са текстилном мембраном и отвара ново поље истраживања.

1.2 Повод за истраживање

Истраживањем типова просторних конструкција од дрвета кроз историју издвајају се три типа конструкције које се испитују у савременим оквирима: реципрочне конструкције, ламелне конструкције и љуске од штапова (ен. *gridshell*). (Слика 1-1)

Слика 1-1. Временски дијаграм, извор: аутор



Временски дијаграм

Реципрочне конструкције су просторне конструкције од линијских конструктивних елемената малих дужина у односу на распон, који су узајамно-носећи, од чега потиче и њихов назив (Porović-Larsen, 2008). Кружне реципрочне конструкције коришћене су још у праисторијским шаторима, а основни модул сачињавају три штапа везана у један чвор ослањајући се један преко другог. У 16. веку могу се видети различити типови реципрочних конструкција приказани у скицама Леонарда да Винчија (Leonardo da Vinci), од мостовских конструкција до таваница. Архитекта Џон Волис (John Wallis), у 17. веку, предлаже реципрочну конструкцију за премошћавање великих распона чији основи модул сачињавају четири штапа која формирају квадрат у равни.

Ламелне конструкције су просторне конструкције од линијских конструктивних елемената малих дужина у односу на распон, као и код реципрочних конструкција. Разлика између реципрочних и ламелних конструкција је у положају штапова. Код реципрочних конструкција, штапови су позиционирани један на другом, док су код ламелних штапови у равни. Постоји и разлика у геометријској конфигурацији штапова. Линијски конструктивни елементи - ламеле у ламелној конструкцији формирају искључиво мрежу паралелограма. Почетком 20. века патентирана је прва ламелна конструкција која се користила за кровове стамбених објеката. Један од значајних објеката за развој ламелних конструкција је пољопривредни објекат, штала, која се налази у склопу комплекса који је пројектовао архитекта периода модернизма Хуго Харинг (Hugo Haring) у Немачкој 1926. године. Током времена ламелне конструкције доживеле су бројне модификације, у материјалу и форми, а на примеру крова терми *Bad Sulza* у Немачкој са краја 20. века, види се модификација првих ламелних конструкција, форме конструкције, веза ламела и пропорција попречног пресека елемената у односу на распон.

Претече љуски од дрвених штапова могу се сагледати на примерима кровова сакралних објеката који су грађени у периоду од 12. до 14. века, паралелно са каменим романичким и готичким крововима (Toussaint, 2007). Савремени примери љуски од дрвених штапова су различитих геометрија и примењују се на објекте великих распона јавне намене због својих конструктивних могућности и естетских карактеристика. Специфичност љуски од штапова је да су сви елементи конструкције континуални, а да се форма добија процесом проналажења форме (en. *form-finding*) (Adriassens et al, 2014).

Паралелно са развојем дрвених конструкција од штапова, на временском дијаграму се може пратити и развој геометрије, као и развој физике као науке која омогућава анализу конструкција. Деветнаести век представља прекретницу у развоју просторних дрвених конструкција од штапова. Промена перцепције простора произашла је из елиптичне геометрије и Гаусове дефиниције закривљености, заједно са новим постулатима у физици, теоријом релативитета и закривљености простора. (Timoshenko, 1983) На пољу конструкција се у том периоду може приметити развој различитих типова експерименталних анализа конструкције које се користе за испитивање њених граница - форме, димензија елемената и нових материјала. Појава рачунара омогућила је извођење комплексних једначина, а њихов развој подстакла је нова истраживања граница конструкција. У периоду од 2001. - 2010. године отворени су центри за испитивање конструкције путем комплексног моделовања, *IAAC* у Барселони, *CITA* у Копенхагену и *ICD* у Штутгарту. Комплексно моделовање је процес константне размене информација добијених нумеричким моделовањем и испитивањем прототипа у циљу проналажења нових конструктивних решења (Tamke, 2013). Савремене тенденције у складу са одрживим развојем, навеле су архитекте да размишљају о повратку природних материјала и смањењу загађења којима доприноси грађевинска индустрија, те се испитују могућности система дрвених конструкција који су се користили у прошлости и њихови потенцијали за примену у савременој архитектонској пракси.

Ламелне конструкције су одабране за истраживање због:

- 1) мреже ламела које формирају *дијамантски патерн*¹ тако стварајући јединствен визуелни утисак конструкције,
- 2) малих димензија конструктивних елемената у односу на распон конструкције, које доприносе једноставном транспорту и монтажи,
- 3) економичности конструкције, односно малог утрошка материјала у односу на волумен који покривају.

У савременим архитектонским оквирима посебно је интересантно испитати геометрију из које произилази геометријска конфигурација ламела у ламелној конструкцији, са циљем да се правилност грађења конструкције може *генерисати*² у различитим програмима и даље истражити могућности њене примене. Мале димензије ламела у односу на распон конструкције, па самим тим њихова мала дужина, омогућавају прилагођавање било којој закривљеној геометрији. Анализа геометрије и дефинисање параметарских једначина за грађење ламелне конструкције у овој дисертацији има за циљ да задржи униформне елементе као на првим ламелним конструкцијама, јер је то једна од основних предности овог типа конструкције која доприноси и њеној економичности. Велики број униформисаних елемената може да допринесе серијској производњи и додатно умањи цену конструкције. Актуелност теме огледа се у могућности дигиталне фабрикације конструкције - коришћењем алата као што су *CNC* машине и роботске руке које се програмирају путем рачунара, за које је дефинисана параметарска једначина геометрије ламелне конструкције. Са друге стране, актуелност теме огледа се и у одабиру дрвене конструкције као предмета истраживања, у складу са одрживим развојем конструкције. Сви елементи конструкције могу се рециклирати или демонтирати и затим монтирати на некој другој локацији.

1.3 Претходна анализа информација о предмету истраживања

Архитектама изузетно привлачна мрежа паралелограма од линијских носача - ламела од дрвета, поново се примењује пратећи савремене тенденције повратка природним материјалима у архитектури. Истраживачки центри широм света испитују могућности и ограничења ламелних конструкција са различитих аспеката, а у овом истраживању фокус је на истраживању ламелне конструкције од дрвета са текстилном мембраном.

Просторне конструкције од наизменично постављених ламела које формирају дијагоналну мрежу називају се ламелне конструкције. Ламелну конструкцију сачињавају ламеле истих дужина повезане типским везама. (Lan, 1997) Прва ламелна конструкција је Золингеров кров (нем. *Zollbau-Lamellen-Dach*) формиран из дрвених ламела дужине до 2,5 m променљивог попречног пресека, фабрички обрађених према шаблону тако да горња ивица прати кривину крова (Peulić, 2002). Предност ламелних конструкција огледа се у истоветним елементима конструкције - ламелама истих дужина и типским везама, које доприносе једноставности израде, монтажи и брзини извођења, а самим тим и економичности. Атрактивност ламелне конструкције и њен експресивна ритмична мрежа ламела допринели су томе да се користе за објекте великих распона у којима конструкција остаје видна. Кроз историју, ламелна конструкција грађена је од дрвета, челика и армираног бетона. Основна форма конструкције је свод, јер се првенствено примењивала за кровове хала, али је развој науке и технологије омогућио пројектовање и комплексних форми. Развој ламелних

¹ ен. *diamond pattern* - мисли се на геометријске конфигурације од паралелограма. У овом контексту остављен је директан превод са енглеског да би се нагласила естетичност конструкције.

² Дефинисати путем математичких једначина које служе за моделовање конструкције и истраживање могућих форми.

конструкција може се пратити кроз решавање детаља веза и премошћавања све већих распона, као и кроз употребу различитих материјала и примену на различитим формама. Од прве патентиране ламелне конструкције примећује се повећање распона ламелних конструкција од дрвета и њихова примена на слободну форму објекта, као и унапређивање веза ламела, првенствено код ламелних конструкција од челика. “Увођење... ламелне конструкције представља врхунац у развоју конструктивних могућности у грађењу сводова. ...сводови се изводе од дијагоналних армиранобетонских ребара који се укрштају и дају крутост и стабилност конструкцији као целини.” (Nestorović, 2000) Током година, просторне решеткасте конструкције узеле су примат у грађевинској индустрији, али ламелне конструкције и даље инспиришу архитекте и инжењере.

У савременом добу, истражују се конструктивне и обликовне карактеристике ламелних конструкција. Испитивања носивости чвора, као и истраживања могућности оптимизације ове конструкције рађена су на Универзитету примењених наука (Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur) у Лајпцигу, из којих су извучени закључци о типовима веза и дужинама ламела (Franke, 2017; Dijoux, 2017). Аутори предлажу тесарску везу, којом би се смањио ексцентрицитет у вези у односу на чворну везу Золингер крова, као и смањење броја ламела, односно повећање њихове дужине за распоне до 20 m. Поред ових испитивања, Золингер кров био је инспирација и за параметарско моделовање конструкције у Центру за информационе технологије и архитектуру (CITA - Centre for Information Technology and Architecture) Данске краљевске академије лепих уметности (Royal Danish Academy of Fine Arts) (Tamke et al, 2010). Почевши од једног модула - четири везане ламеле и четири начина његовог везивања за суседне модуле, аутори су пројектовали двоструко закривљену ламелну конструкцију. На факултету ЕТХ у Цириху (Eidgenössische Technische Hochschule Zürich), у оквиру *Gramazio Kohler Research* института успешно је тестирано формирање сегмента Золингер крова коришћењем дигиталне фабрикације (Аполinarsка, 2018). Користећи савремене алате као што су *CNC* машине и роботске руке, који се програмирају путем рачунара, отварају се могућности другачијег обликовања ламелне конструкције, водећи рачуна да се задрже њене предности.

У савременим истраживањима просторних дрвених конструкција од штапова прототипи се изводе као павиљони најразличитијих размера и геометрија, који приказују резултате спроведених истраживања. Релевантни павиљони за тему истраживања су павиљони покривени мембраном, у којима се може читати веза између конструкције и мембране. Мембрана је погодна за постављање преко различитих геометрија павиљона због једноставног обликовања, а њена предност је и лака монтажа, односно демонтажа. Павиљон Креод (Kreod) из 2012. године је конструисан као љуска од дрвених штапова (Furuto, 2012). Покривач павиљона је текстилна мембрана, везана за конструкцију носачима постављеним у чворовима са унутрашње стране. Текстилна мембрана и њена боја, у потпуном контрасту са бојом дрвета, наглашава конструкцију и формира посебан однос конструкције и покривача који се на различите начине сагледава током дана. За конструкцију *Wind Eaves Pavilion-a* архитекте Кенга Куме (Kengo Kuma) из 2015. године, примењена је реципрочна конструкција моста Леонарда Да Винчија (Leonardo Da Vinci). Двопојасна конструкција од дрвених греда је свод настао из половине кружног правог цилиндра, који се спушта ка земљи од места на коме се улази у павиљон (смањује се висина стреле). Жеља архитекте била је да у складу са јапанском традицијом направи једну лагану структуру, и у смислу тежине материјала, и у визуелном смислу, због чега је прекривена транспарентном *ETFE* мембраном. (Kuma, 2006; Stevens, 2015) Покривач павиљона ни у ком случају не нарушава његов изглед, већ заједно са структуром ствара осећај *лакоће*. Он је постављен са горње стране конструкције и ојачан је на местима на којима је носачима причвршћен за конструкцију, на крајевима дрвених

штапова. Када се сагледава током дана, покривач делимично прикрива конструкцију, док ноћу изгледа као изузетно танка завеса која подсећа на преграде у јапанским традиционалним кућама. Осим што одабир покривача доприноси естетском доживљају павиљона, он истовремено штити дрвене елементе од атмосферских утицаја. Технолошки, на примеру овог павиљона може се сагледати управо начин формирања конструкције од дрвених греда са малим бројем челичних веза и једноставним остваривањем везе конструкције и покривача.

У докторској дисертацији спроведено је истраживање кроз пројекат. Пројектован је прототип сводне ламелне конструкције од дрвета покривене текстилном мембраном. У оквиру истраживања кроз пројекат испитана је геометријска правилност грађења ламелне конструкције, анализирани су везе ламела у дрвеним ламелним конструкцијама и спроведен је експеримент на прототипу пројектоване конструкције у размери 1:1. Истраживање кроз пројекат одабрано је као основни метод у докторској дисертацији јер компарација закључака истраживања графичким путем, кроз макете и моделе за експериментална тестирања доводи до закључака који нису могући уколико се одабере само један начин истраживања. Аутор пројектује конструкцију на основу закључака претходних истраживања са циљем да се докажу предности ламелних конструкција, да се потврди закључак геометријске анализе и да се испита да ли текстилна мембрана може да утиче на ламелну конструкцију у конструктивном смислу.

1.4 Предмет и проблем истраживања

Испитивање могућности просторних конструкција од дрвета у контексту примене у савременој архитектонској пракси доводи до дефинисања предмета истраживања - **ламелних конструкција од дрвета**. У оквиру дисертације овај тип конструкције биће посматран кроз историјски развој, обликовање, геометрију и конструктивни систем конструкције, са фокусом на истраживање кроз пројекат сводне ламелне конструкције од дрвета са текстилном мембраном. Текстилна мембрана се у оквиру истраживања посматра као покривач ламелне конструкције.

Истраживањем литературе издвојила су се три основна проблема истраживања, од којих је први проблем **систематизација и анализа ламелних конструкција**. Уочено је да не постоји много података везаних за дрвене ламелне конструкције, већ се оне углавном испитују као део неке веће области. Информације о ламелној конструкцији претежно се налазе у оквиру истраживања сводних конструкција, али систематизација и развој овог типа конструкције нису до сада документовани. У домаћој литератури наводи се Золингер кров са пратећим детаљима конструкције, али без даљег развоја ламелних конструкција.

Други проблем истраживања је **анализа и дефинисање геометрије ламела у оквиру ламелне конструкције форме свода** настале из сегмента кружног правог цилиндра. На једноставном примеру сводне форме ламелне конструкције могу се извући закључци о правилности грађења ламелне конструкције из њених појединачних елемената. Дефинисањем параметарске једначине геометрије ламелне конструкције, отвара се могућност примене дате правилности грађења и на друге закривљене геометрије. Овај проблем истраживања произашао је из идеје да се задржи униформност елемената конструкције, а да се омогући примена ламелне конструкције на различите форме.

Мале димензије ламела у односу на распон конструкције омогућавају транспорт мањим доставним возилом и монтажу без тешке механизације. Из тог разлога, у докторској дисертацији испитиваће се примена за наткривање атријума постојећих објеката, чиме се издваја трећи проблем истраживања - **утицај ветра на постојећи објекат након постављања надстрешнице**. Атријумске зграде нису обрађене као посебан тип у важећим правилницима за ветар, а постављањем новог крова долази до промене утицаја ветра.

1.5 Циљеви истраживања

Анализа информација о предмету истраживања показала је актуелност теме и скренула пажњу на питања која се јављају у савременом контексту истраживања ламелних конструкција. На основу анализе, постављени су научни циљеви истраживања, у складу и на нивоу научног сазнања, и то:

- проширивање сазнања о обликовним и конструктивним могућностима и ограничењима ламелних конструкција од дрвета,
- афирмација ламелне конструкције од дрвета са текстилном мембраном у савременим оквирима.

1.6 Задаци истраживања

На основу постављених циљева научног истраживања, у првом делу рада задаци истраживања су усмерени на теоријски оквир истраживања и успостављање одговарајуће терминологије везане за овај тип конструкција, и то:

- дефинисање и анализу ламелних конструкција,
- дефинисање и анализу дрвета као конструктивног материјала,
- дефинисање и анализу текстилних мембрана.

У другом делу рада задаци су усмерени ка истраживању кроз пројекат и они обухватају:

- анализу геометрије цилиндричних ламелних конструкција,
- анализу елемената конструкције: ламела, веза ламела и текстилне мембране,
- пројектовање прототипа ламелне конструкције од дрвета са текстилном мембраном,
- извођење прототипа,
- експериментално испитивање деформација прототипа под вертикалним оптерећењем,
- анализу прототипа конструкције,
- доношење закључака о експерименталном испитивању.

Први и други део рада произашли су из првог циља истраживања.

Трећи део рада одговара другом циљу истраживања, афирмацији ламелне конструкције од дрвета са текстилном мембраном, на основу које произилазе следећи задаци:

- анализа могућности примене ламелне конструкције у архитектури,
- приказ једне од могућих примена ламелне конструкције од дрвета са текстилном мембраном - надстрешнице за покривање атријума,
- пројектовање модела за испитивање у аеро-тунелу,
- извођење модела,
- експериментална анализа утицаја ветра у аеро-тунелу,
- CFD анализа утицаја ветра,
- анализа и евалуација резултата испитивања,
- доношење закључака о експерименталном испитивању и
- дефинисање смерница за будуће истраживање ламелних конструкција од дрвета са текстилном мембраном.

1.7 Хипотезе истраживања

Основна претпоставка овог истраживања је да ће се у будућности архитекте све више враћати употреби дрвених конструкција у својим објектима, вођени развојем нових технологија и примени дигиталне фабрикације који омогућавају једноставнију израду елемената, бржу изградњу и економичност, а све у складу са савременим тенденцијама одрживог развоја.

Хипотезе истраживања изведене су на основу циљева истраживања, са идејом да се докажу предности ламелних конструкција наведене у литератури: униформисаност елемената, једноставност извођења и економичност конструкције.

Хипотеза 1: Параметарска једначина која дефинише правилност кретања ламела по омотачу кружног правог цилиндра отвара могућност примене ламелне конструкције на било којој закривљеној површи.

Хипотеза 2: Пројектовањем прототипа конструкције доказаће се да се под појмом униформисаност елемената односи на геометрију ламела, али да се типови ламела разликују од позиције у оквиру конструкције.

Хипотеза 3: Постављањем аеродинамичне надстрешнице изнад атријума смањују се апсолутне вредности коефицијената притиска ветра на околне кровове атријума.

Истраживањем литературе и истраживањем кроз пројекат провериће се прва и друга постављена хипотеза, док ће се провера треће хипотезе спровести експерименталним истраживањем утицаја ветра у аеротунелу и путем софтверске симулације. Претпоставка је да ће се доказивањем формулисаних хипотеза остварити циљеви истраживања, што доприноси научној оправданости овог рада.

1.8 Научне методе истраживања

Одабрана тема докторске дисертације биће истражена укрштањем више научних метода заснованих на анализи теоријских знања и примера из праксе, са посебним освртом на методу испитивања модела конструкције. Методе истраживања одабране су на основу задатака истраживања да би се остварила кохерентност у раду.

Први део истраживања заснован је на теоријској анализи података из литературе, а односи се на дефинисање појмова ламелних конструкција и текстилних мембрана, њихову анализу, систематизацију грађе и интерпретацију података са циљем да се постави теоријски оквир који ће бити коришћен у другом делу рада.

Други део приказује методу истраживања кроз пројекат, која комбинује неколико различитих метода:

- графичку и нумеричку анализу, примењене за анализу геометрије ламелне конструкције,
- затим теоријску анализу и интерпретацију података, уз систематизацију и класификацију типова веза између дрвених ламела
- експерименталну анализу прототипа конструкције и
- методу индукције за извођење закључака експеримента.

У оквиру другог дела докторске дисертације налази се и дискусија која доводи у везу анализу геометрије, њену везу са одабраним елементима конструкције прототипа и самог прототипа ламелне конструкције од дрвета са текстилном мембраном.

У трећем делу фокус је на експерименталној анализи утицаја ветра на постојећи објекат након постављања надстрешнице изнад атријума, у два положаја, као једне од могућих примена ламелне конструкције од дрвета са текстилном мембраном. Циљ трећег дела истраживања је да афирмише ламелну конструкцију за примену у архитектонској пракси.

Завршни део рада везан је за методу индукције којом се доносе закључци о ламелној конструкцији од дрвета из појединачних примера испитаних и анализираних у овом раду. У оквиру закључних разматрања и препорука користиће се метода синтезе резултата

истраживања и метода евалуације постављених циљева и задатака истраживања. У овом делу ће бити формулисани правци за даље истраживање.

1.9 Очекивани резултати истраживања и научни допринос

Први научни допринос истраживања огледа се у систематизацији ламелних конструкција и уређењу појма ламелне конструкције у домаћој литератури. Очекивано је да се истраживањем дође до дефиниције геометријске правилности грађења ламелне конструкције која би се приказала параметарском једначином. Уколико се дефинише параметарска једначина, могућа је њена примена и на друге закривљене геометрије, чиме се долази до другог научног доприноса истраживања. Трећи научни допринос је анализа и класификација веза између ламела у дрвеним ламелним конструкцијама. Испитивањем прототипа конструкције очекује се да се добију резултати промена деформација ламелне конструкције услед симетричног и асиметричног вертикалног оптерећења, са и без текстилне мембране. Резултати и закључци испитивања представљају четврти научни допринос. Експериментално добијени подаци о утицају ветра у зависности од различитих ситуација и положаја конструкције представљају пети научни допринос. Резултати испитивања ветра доводе у везу однос постојећих објеката и новопројектоване структуре, као једне од честих ситуација у архитектонској пракси. Коначни резултати представљају допуну постојећих знања о утицају ветра и нове резултате за атријумске зграде.

I ПОЈМОВИ И ТЕОРИЈА

2. Ламелне конструкције

2.1 Опште информације

Просторне конструкције од наизменично постављених *ламела* које формирају мрежу паралелограма називају се ламелне конструкције. Ламела је линијски конструктивни елемент који гради ламелну конструкцију. Прва ламелна конструкција био је Золингер кров (нем. *Zollbau-Lamellen-Dach*), ламелна конструкција од дрвета, са почетка 20. века. Кров је формиран од дрвених ламела дужине до 2,5 m променљивог попречног пресека, фабрички обрађених према шаблону тако да горња ивица прати кривину крова (Peulić, 2002). Кров модернизма - симболичан назив ове кровне конструкције, коју је осмислио и патентирао архитекта Фридрих Золингер (Friedrich Zollinger), нашао је своје место и у оквиру манифестације 100 година Баухауса, тиме потврђујући значај ламелне конструкције у архитектури и грађевинарству (Programme © Bauhaus Kooperation 2020).

Ламелну конструкцију сачињавају ламеле истих дужина повезане типским везама. Униформисаност елемената доприноси једноставном извођењу конструкције и омогућава префабрикацију. (Lan, 1997) Прве ламелне конструкције су биле од дрвета и примењиване су за кровове стамбених објеката, распона до 12 m. Интересантна мрежа ламела убрзо је нашла примену и за објекте хала распона до 40 m и друге типологије објеката у којима кровна конструкција остаје видна. Предности ламелне конструкције - униформисаност елемената, једноставност извођења и економичност - допринели су пројектовању ових конструкција и од челика и армираног бетона. Инжењер Хуго Јункерс (Hugo Junkers) пројектовао је типске хале са кровом у ламелној конструкцији од челика. Серијска производња ових хала омогућила је Јункерсу да их дистрибуира по целом свету. Ламелне конструкције од дрвета и челика које су се градиле у Немачкој биле су инспирација инжењеру Пјер Луиџи Нервију (Pier Luigi Nervi) који је пројектовао хале од префабрикованих ламела од армираног бетона.

Форма највећег броја изведених хала са ламелном кровном конструкцијом је сводна, настала као сегмент омотача кружног правога цилиндра. Напредак технологије омогућио је пројектовање различитих форми ламелне конструкције, те се данас могу пронаћи и примери слободних форми кровне ламелне конструкције.

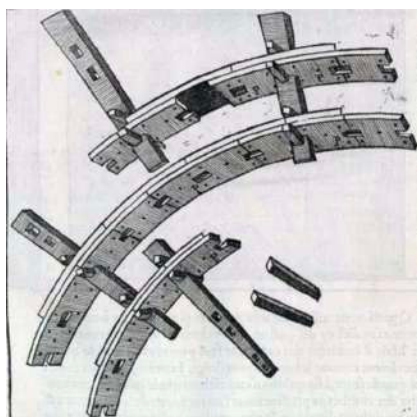
Конструктивни систем ламелних конструкција зависи од више фактора, због чега се оне изучавају као део веће сродне области. Први проблем истраживања у докторској дисертацији је систематизација и анализа ламелних конструкција, које имају за циљ да се ближе одреди конструктивни систем ламелних конструкција и обједине дефиниције различитих аутора. Различити аутори класификују ламелне конструкције на основу материјала, форме, веза између елемената. Као последица униформних елемената конструкције, па самим тим и једнаких поља између ламела, заједничко за све ламелне конструкције је равномерно преношење оптерећења, униформно преко свих елемената (Mullord, 1985).

Савремена истраживања ламелних конструкција баве се дрвеним ламелним конструкцијама у складу са тенденцијама одрживог развоја. Једна линија истраживања испитује и анализира конструктивне карактеристике ламелних конструкција. Испитују се елементи веза, као и могућности оптимизације конструкције (Franke, 2017; Dijoux, 2017). Друга линија истраживања фокусира се на обликовање и истраживање различитих форми ламелних конструкција, као и на испитивање могућности извођења употребом CNC машина и роботских руку (Tamke et al, 2010; Apolinarska, 2018).

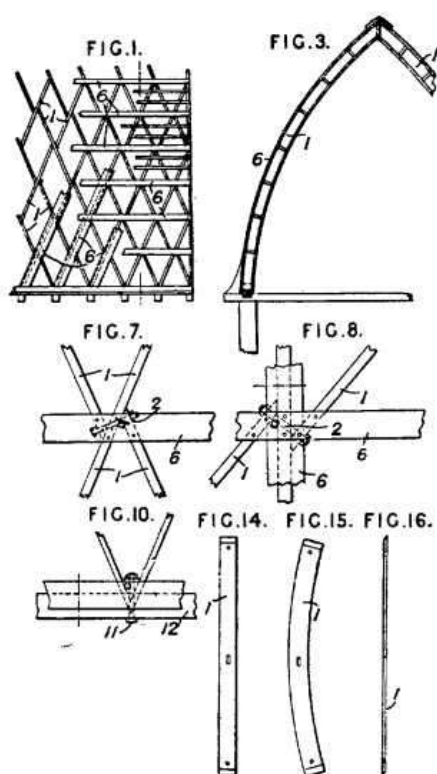
У оквиру овог поглавља одговориће се на први проблем истраживања. Представљен је историјски развој ламелних конструкција, њихова систематизација и ближе одређење самог појма ламелних конструкција.

2.2 Историјски развој ламелних конструкција

Прве ламелне конструкције пројектовао је архитекта **Фридрих Золингер**. Крајем 1918. године, Золингер је био позван на састанак градског већа града Мерсбурга када му је саопштено да постоји потреба за изградњом великог броја нових стамбених јединица у процесу обнове града након Првог светског рата (Winter and Rug, 1992). Золингер је направио једноставан модел изградње стамбених објеката са циљем да постигне брзу и једноставну изградњу објеката са што мањим утрошком материјала. Носећи елементи куће били су од армираног бетона, а конструкција крова је била од дрвета. Претпоставља се да је дрвени кров пројектован као ламелна конструкција настао модификацијом лука Филбера де л'Орма (Philibert de l'Orme) из 1561. године који је формиран из радијално исечених штапова надовезаних један на други (Слика 2-1). Золингер је елементе који формирају лук отворио и на тај начин претворио равански лук у тродимензионалну закривљену дијагоналну мрежу ламела. (Müller, 2000, 14) Може се приметити да је Золингер увидео предност конструисања лукова од елемената мале дужине код л'Орма, као и да је њиховим размицањем покушао да смањи број потребних елемената конструкције за исте распоне крова. Приликом конструисања сводова из лукова постављених на одређеним растојањима, потребно је поставити секундарне елементе конструкције као укрупњење, подужне штапове и спрегове. Код Золингеровог крова ламеле се укрупњују подашчавањем крова, чиме се смањује број конструктивних елемената (Winter and Rug, 1992, 193). Остваривање стабилности крова подашчавањем једно је од конструктивних решења која имају двојаку улогу. Уз остваривање стабилности, подашчавањем крова ствара се континуална површина која је подлога за кровни покривач. Анализом утрошка материјала за Золингер кров и за класичне кровове исте волуметрије, уочено је да је потребан утрошак грађе према квадрату основе чак два пута мањи него за традиционални кров (Winter and Rug, 1992, 193). Облик крова је добијен из два сегмента омотача правога кружног цилиндра који се сустичу у слемени. Одабрана форма служила је за смештање две стамбене јединице у волумен крова. (Слика 2-3)

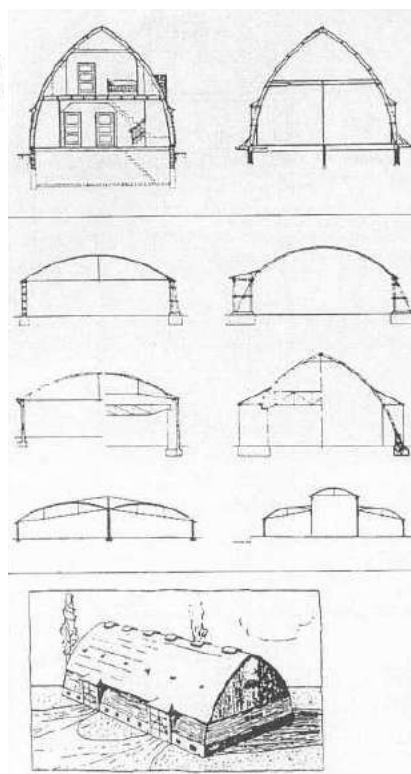


Слика 2-1. Лук Филбера де л'Орма, извор: Tutsch, 2020, 24.



Слика 2-2. Елементи Золингер крова, извор: патент DE387469C

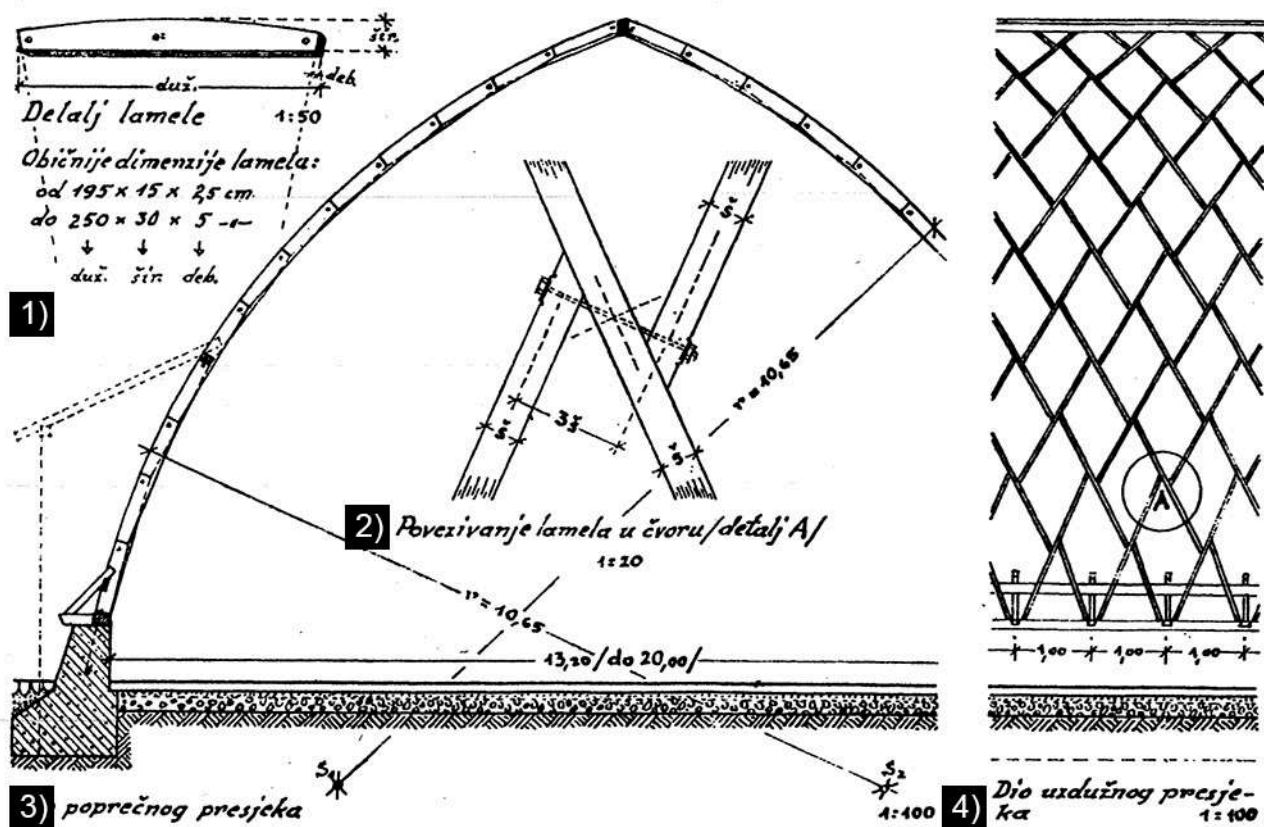
Слика 2-3. Типови објеката са Золингер кровом, извор: Winter and Rug, 1992, 194.



Дрвена ламелна конструкција Золингер кров, патентирана је 1921. године, а у опису патента, аутор наводи да ламеле могу бити изведене у било ком материјалу, да је могуће остварити стабилност конструкције подашчавањем у правцу паралелном слемени, као и повећати крутост елемената повећањем момента инерције попречног пресека ламела додавањем дасака и формирањем I- пресека (патент DE387469C).

Золингер кров је формиран из дрвених ламела, променљивог попречног пресека, радионички обрађених према шаблону тако да горња ивица прати кривину крова. Ламеле су прављене за различите лукове кровних равни, а њихове димензије су се кретале од ширина/висина/дужина, $b/h/L = 2.5/15/190$ cm до $b/h/L = 5/30/150$ cm (Peulić, 2002, 635). Конструкција је форме преломљеног лука добијеног из два сегмента кружних правих цилиндара, велике стреле у односу на распон конструкције. (Слика 2-4)

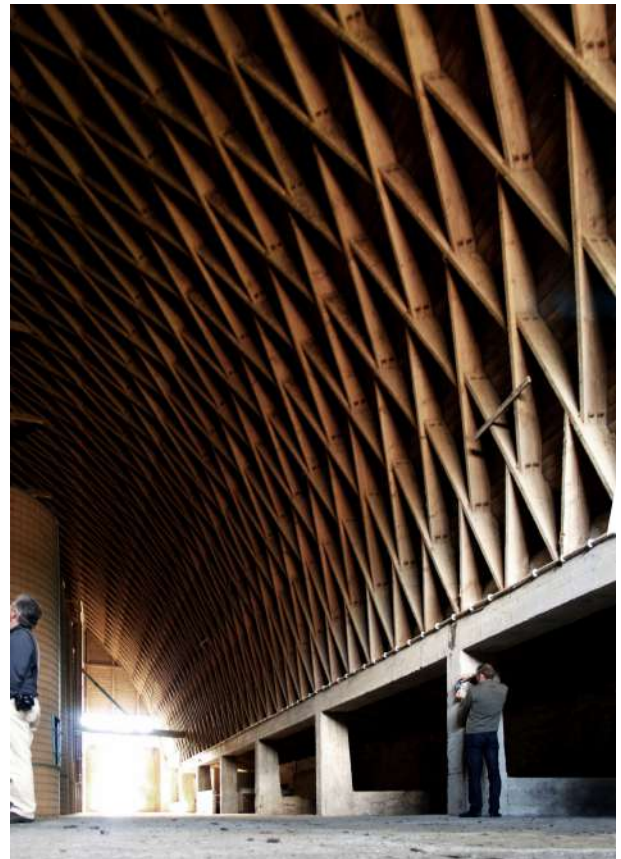
Све ламеле су исте дужине, али су њихови крајеви засечени под различитим угловима у зависности од положаја у оквиру конструктивног склопа, те можемо разликовати три типа: средишње ламеле, ламеле на венцима и слемене ламеле. Међусобне везе ламела су остварене вијцима који пролазе кроз три ламеле, једну постављену централно у односу на коју су прикључне ламеле заротиране и размакнуте за троструку ширину ламеле (Müller, 2000, 14). Једноставне типске везе вијком, омогућиле су једноставну монтажу и смањиле цену материјала. (Слика 2-2) Ламеле се у Золингер крову монтирају наизменично, једна на средину следеће, тако да је димензија једног поља мреже ламела једнака дужини половине ламеле. Крајеви две прикључне ламеле се на средини равнају са горњом ивицом средишње ламеле кроз коју се везују (Peulić, 2002, 635). Након постављања ламела, кров се подашчава у подужном правцу конструкције, тиме формирајући љуску са ребрима. (Слика 2-5, Слика 2-6) Испитана је носивост седам изведених кровова 1922. године, а коришћене су



Слика 2-4. Елементи Золингер крова: 1) детаљ ламеле, 2) елемент везе, 3) попречни пресек крова, 4) подужни пресек крова, извор: Peulić, 2002, 635.



Слика 2-5. Унутрашњост амбара, Gut Garkau 1923-1926, архитекта: Хуго Харинг (Hugo Häring), конструкција: Фридрих Золингер, извор: [designcouncil.tumblr](https://www.designcouncil.tumblr.com/)

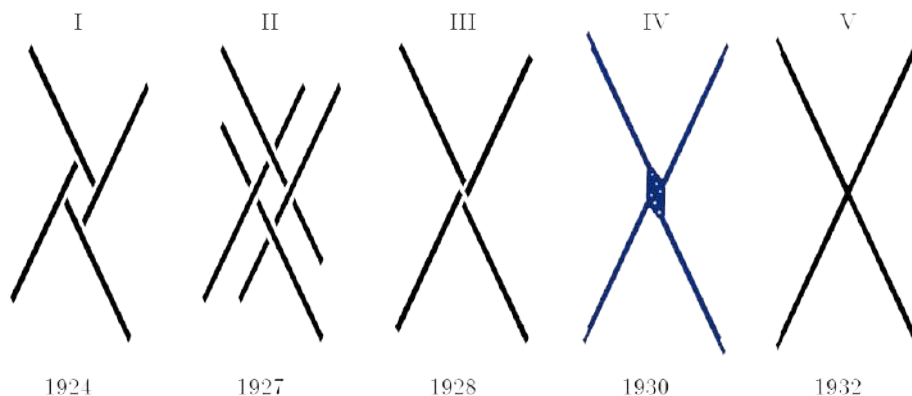


Слика 2-6. Унутрашњост амбара, Gut Garkau, извор: SEIER+SEIER

поједностављене методе прорачуна, којима је доказано да су ови кровови стабилни и да могу да носе предвиђена оптерећења.

Успешност Золингеровог крова за стамбене јединице, ускоро је резултовала њиховом употребом и за изложбене, индустријске и продајне хале, распона до 40 m, геометрије кружног правог цилиндра, као и за штале распона до 30 m, код којих је задржана форма преломљеног лука. (Слика 2-3) (Winter and Rug, 1992)

Са повећањем распона ламелне конструкције, а самим тим и повећањем попречних пресека ламела, након извођења конструкције, јавиле би се велике деформације конструкције (Wolf, 2020, 118). Инжењер који се бавио овим проблемом био је **Емил М. Хунебек** (Emil M. Hünnebeck) који је сматрао да се проблем може решити променом остваривања везе између



Слика 2-7. Везе ламела Емила Хунебека, извор: Tutsch, 2020, 49.

ламела. Он се бавио истраживањем варијантних решења за везе између ламела и позицијом ламела у чвору. У периоду од осам година (од 1924. - 1932.) Хунебек је патентирао пет различитих решења чворне везе (Слика 2-7).

Прве две модификације чвора ламелне конструкције (Слике 2-7I и 2-7II) имале су за циљ повећање крутости чвора, чиме би омогућио примену ламелне конструкције за веће распоне од 30 m. Ове модификације биле су намењене за извођење конструкције и од дрвета и од челика. На слици 2-7I приказано је удвајање средишње ламеле, а прикључне ламеле су постављене на веће растојање, чиме се добија чвор који подсећа на реципрочне конструкције. Следећа слика (2-7II) приказује удвајање и прикључних штапова, односно додавање четири половине ламеле. Остали типови веза пројектовани су за челичне ламелне конструкције. Чвор из 1928., намењен челичној конструкцији, исти је као Золингеров, док су следећем додати челични лимови са доње и горње стране чвора, на исту диспозицију ламела. Последњи тип је са завареним ламелама. На примеру изведене индустријске хале приказане на слици 2-8, примењен је чвор ојачан челичним лимовима. Може се видети да су додати штапови у подужном правцу, али се у литератури не наводи да ли је разлог њиховог постављања остваривање стабилности конструкције.

Предност униформних елемената - ламела и веза у ламелним конструкцијама увидео је и **Хуго Јункерс**, инжењер који је развијао и правио авионе. Идеја којом се водио приликом пројектовања челичне ламелне конструкције била је да хале буду од префабрикованих истоветних елемената и да могу да се једноставно монтирају и демонтирају. Свој патент из 1924. године успео је да дистрибуира по целом свету. (Detail 10/2015) Челична сводна ламелна конструкција геометрије кружног правог цилиндра прорачуната је као лук на два зглоба. Успостављена је серијска производња елемената конструкције за кровове хала распона од 20, 25, 30, 35 и 40 m, а период припреме елемената трајао је од 4 до 6 недеља. (Weller et al, 2009, 1615) Ламеле су дужине једне странице паралелограма и надовезују се једна на другу, а не једна на средину следеће из другог правца као у Золингер крову. Ламеле су обликоване од савијеног челичног лима са посебно пројектованим крајевима да би се остварила једноставна веза челичним лимовима и вијцима који пролазе кроз ламеле. Дужине ламела су од 1,5 m до 2 m. Стабилност крова остварује се секундарним елементима конструкције у виду штапова (ен. *purlins*) који се пружају паралелно изводницама цилиндра од којег је формирана сводна конструкција. Штапови се постављају са обе стране везе ламела и добија се тријангулисана мрежу штапова у конструкцији. (Слика 2-9)



Слика 2-8. Дено за рафинерију шећера, конструкција Хунебек (сегмент фотографије), извор: Wolf, 2020, 126.



Слика 2-9. Конструкција железничке станице, Хуго Јункерс (сегмент фотографије), извор: Detail 10/2015

Ламелне конструкције од армираног бетона геометрије цилиндра пројектовао је инжењер **Пјер Луиђи Нерви** за хангаре Војног ваздухопловства (Aeronautica Militare). Италија је била у тешкој ситуацији након рата, те су се од инжењера тражила решења која су економична и са малим утрошком челика, који се користио првенствено за потребе војске. Први Нервијеви хангари били су изграђени 1935. године од бетона ливеног на лицу места, као љуске са ребрима у два ортогонална правца заротирана за 45° у односу на правац пружања кровне конструкције. Велики утрошак дрвене оплате захтевао је унапређење решења. Кровне конструкције за хангаре у Орбетелу (Orbetello) само пет година касније, формиране су од префабрикованих решеткастих раванских ламела од армираног бетона (Слика 2-10).

Диспозиција ламела иста је као на хангарима ливеним на лицу места. Нерви је тако постигао једноставнију монтажу, бржи начин изградње и мањи утрошак материјала, што је и био циљ пројекта. (Leslie, 2003; 2018) Претпоставка је да је инспирацију нашао у хангарима и индустријским халама тих година грађеним у Немачкој, од дрвета и од челика (Chiorino, 2012, 34). Статички систем љуске са ребрима постиже се и конструисањем из префабрикованих ламела, тако што се након њихове монтаже, преко изводи бетонска љуска и монолитизују се чворови (Nervi, 1965, 99). На тај начин омогућава се крута веза између ламела, што је предност у односу на ламелне конструкције од дрвета и челика, где се испоставило да постоји проблем везе. На основу сагледавања конструкције, може се уочити да је на местима ослонаца додат лук ливен на лицу места, који је служио као укрупњење конструкције. На тај начин је код ламелне конструкције постигнут однос растојања између лукова и распона 1:1. Током година, Нерви је развијао и унапређивао префабрикацију елемената за своје конструкције, а модуле од фероцемента (ит. *ferrocemento*) који формирају ребра користио је као заробљену оплату за љуске, добијајући љуске са дијагоналном мрежом ребара. Пример који најбоље осликава ову праксу је купола Мале спортске дворане (Palazzetto dello Sport) која се састоји из 1620 префабрикованих елемената (али 8 типова модула), а изграђена је за само 40 дана. (Iori and Poretti, 2005, 609) На примерима објеката из префабрикованих модула види се значајан напредак у брзини извођења конструкције, као и смањењу утрошка материјала у односу на класичне конструкције.

У Сједињеним америчким државама, ламелне конструкције коришћене су за кровове спортских хала и стадиона, а истакнути примери су Арена у Сент Луису (The St. Louis Arena) и Астродом у Хјустону (Houston Astrodome). Архитекта и инжењер **Густел Кивит** (Gustel Kiewitt) пројектовао је кров Арене од дрвених ламела дужине преко 2 m и распона 50 m.



Слика 2-10. Хангар у Орбетелу, Пјер Луиђи Нерви, извор: Nervi, 1965, 111.

Конструкција је била геометрије цилиндра и ослањала се на конзолне решеткасте челичне носаче. (roofstructures.tumblr.com) Патентирао је дизајн за ламелне куполе 1959. године (патент US2908236A), а овај патент коришћен је за куполу Астродома у Хјустону, у том тренутку највећег наткривеног стадиона (roofstructures.tumblr.com). (Слика 2-11) Ламелна конструкција од челика премошћавала је распон од 195 m, а за остваривање стабилности додати су секундарни елементи конструкције - челични прстенови који су формирали

тријангулисану мрежу кровне конструкције (roofstructures.tumblr.com). Ламелна конструкција крова за овај пројекат изабрана је због економичности конструкције, мале тежине и једноставности извођења. Кров је прорачунат коришћењем неколико до тада познатих нумеричких метода: аналогија са љускама, анализа решеткасте конструкције (зглобне везе) и еластична анализа (узет је у обзир моменат савијања који се јавља у штаповима). Да би се добили резултати великог броја једначина у еластичној анализи био је потребан рачунар. Резултати су проверени и на умањеном моделу конструкције заједно са консултантима Маковским (Makowski) и Мезмером (Mesmer) (Hosseinzadeh, 1967, 27).



Слика 2-11. Астродом у Хјустону, Густел Кивит,
извор: Hosseinzadeh, 1967, 28.



Слика 2-12. Тоскана Терме, извор: toskanaworldconsulting.de

Савремене тенденције одрживог развоја подстакле су на истраживање историјских дрвених конструкција, па тако и ламелних конструкција од дрвета. Сводне ламелне конструкције од дрвета и даље се примењују за наткривање, што се види на примерима склоништа за животиње у Алабама (Rural Studio, 2005) и отвореног клизалишта у Торонту (blogTO, 2019). Остали **савремени примери ламелних конструкција**, који су приказани у даљем тексту, су разноврсних форми, а неретко су део експеримената који се спроводе у истраживачким центрима при факултетима.

Кров објекта Тоскана терме (Toskana Therme) у Немачкој изведен је 1999. године у слободној форми (Слика 2-12), насталом процесом проналажења форме (ен. *form-finding*). Поља која формирају ламеле су квадратна, димензија 160/160 cm, а попречни пресек ламела је променљив. Стабилност крова остварена је подашчањем, те ова конструкција припада конструктивном систему љуске са ребрима (Herzog et al, 2004, 247). Због начина конструисања крова и његове форме, у овој конструкцији доминантно је мембранско стање притиска.

Осматрачница за птице Тај (Tij – Bird Observatory) изграђена је 2019. године у Холандији (Слика 2.13). Цео пројекат изведен је коришћењем дигиталне фабрикације. Дигитална фабрикација подразумева да су геометрија објекта, облик и димензије елемената добијени процесом параметарског моделовања, а елементи су сечени на CNC машини према спецификацијама из тродимензионалног модела конструкције (Geometria, 2019). Форма јајета испраћена је до краја - форма није засечена и постављена на равну површину, већ је објекат положен у песак. Доњи део ламелне конструкције је од дрвета отпорног на воду због честог плављења, а горњи део је од четинара. Конструкција је укрупњена подом од плоча унакрсно ламелираног дрвета (ен. *CLT-cross laminated timber*), а све везе су такве да конструкција може

потпуно да се демонтира и поново користи, чиме се доприноси одрживом развоју (Pintos, 2019). Везе ламела су остварене са два или три вијка према прорачунима, у зависности од напона у конструкцији. Угао који заклапају две ламеле прати форму објекта, као и угао засека сваке ламеле. Ламеле су конструисане као прави штапови, попречног пресека $\sim 5/25$ cm, чије дужине варирају од 1.5 m до 2.5 m, у зависности од положаја у конструкцији. Свака ламела је у правцу тангенте на закривљену површину.

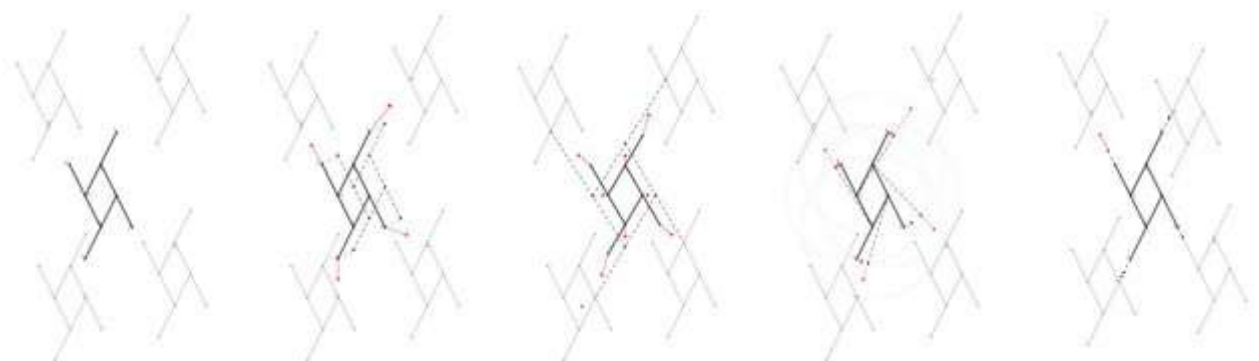
Золингер конструкција била је инспирација архитектама професорима Центра за информационе технологије и архитектуру (CITA - Centre for Information Technology and



Слика 2-13. Осматрачница за птице Тај, извор: аутор

Architecture) Данске краљевске академије лепих уметности (Royal Danish Academy of Fine Arts). У оквиру радионице назване Јато ламела (ен. *Lamella flock*) истраживали су могућности обликовања и конструисања ламелне конструкције путем параметарског моделовања заснованог на принципу самоорганизације. Модул је једно поље које обухвата четири штапа, а организација је дефинисана његовом повезаности са околна четири модула. Уколико се не дефинише сет тачака или путања која усмерава кретање модула у процесу самоорганизације, постоји опасност да се добије слободна форма коју није могуће користити у архитектури. Да би се добила форма коју је могуће применити у архитектонским објектима, постављена су четири стања у којима модули ламела теже

да се повежу један са другим: (1) да се увек крећу ка своја четири суседна модула; (2) да је у границама дозвољена промена угла, (3) да могу да постоје издужења штапова и (4) да могу да буду скалиране ламеле, а да пропорције остану исте. (Tamke et al, 2010) (Слика 2-14)



Слика 2-14. Повезивање модула са околним модулима - принцип самоорганизације, извор: Tamke et al., 2010.

Овакве модификације у оквиру ламелне конструкције, чија је једна од предности униформисаност елемената, имају смисла искључиво у систему дигиталне фабрикације елемената. Финална конструкција одабрана за прототип изведена је тако што су елементи означени у софтверу и пуштени на сечење на CNC машини, а прототип је склопљен у року од два дана. Као укрупњена коришћене су траке од дрвених фурнира које прате закривљеност добијене геометрије. (Слика 2-15) Носивост конструкције испитана је коришћењем софтвера на бази методе коначних елемената и доказано је да постоји могућност обликовања



Слика 2-15. Прототип конструкције, СИТА, извор: Tamke et al., 2010.



Слика 2-16. Сегмент лам. конструкције монтиране роботском руком, извор: Apolinarska, 2018.



Слика 2-17. Сегмент двоструко закривљене ламелне конструкције, извор: FLEX, 2015.

слободних форми ламелних конструкција од дрвета. (Tamke et al, 2010, 346) Континуална површина коју формира ова ламелна конструкција погодна је за постављање покривача са унутрашње или спољашње стране, што доприноси функционалности и модификује њене естетске карактеристике у зависности од жеља пројектанта. Предности приступа пројектовању приказаном у овом истраживању су многобројне. Процес извођења је контролисан путем софтвера и машина, што умањује проценат грешака које се дешавају у класичном процесу извођења објеката.

Дигитална фабрикација дрвених конструкција доприноси лакшој изради елемената и њиховој монтажи. Уз коришћење софтвера који поједностављују моделовање конструкције и припрему потребне документације за извођење, употреба роботских руку тестира се за све већи број конструкција. На факултету ЕТХ у Цириху (Eidgenössische Technische Hochschule Zürich), у оквиру *Gramazio Kohler Research* института успешно је тестирано формирање сегмента Золингер конструкције коришћењем дигиталне фабрикације (Apolinarska, 2018, 18). Ламеле су малих дужина, од правих штапова који прате тангенте на закривљену површину, а сегмент спаја једна роботска рука. (Слика 2-16)

Користећи савремене алате као што су *CNC* машине и роботске руке који се програмирају путем рачунара, отварају се могућности другачијег обликовања ламелне конструкције, водећи рачуна да се задрже њене предности. Монтажа елемената употребом роботских руку захтева темељну припрему, прецизност израде елемената и једноставност везе. (Beorkrem, 2013; Beorkrem, 2017) Наведени примери истраживања ламелне конструкције од дрвета фокусирају се на обликовање и извођење конструкције, скрећући пажњу на атрактивност овог типа конструкције у савременом свету. Тако је на конференцији

Интернационалне асоцијације за љуске и просторне структуре (International Association for Shells and Spatial Structures) у Амстердаму ламелна конструкција од дрвета постављена у виду инсталације, са циљем да се прикаже да овај тип конструкције може бити примењен и на геометрију хиперболичног параболоида (FLEX, 2015). У случају двоструко закривљених површи, штапови нису истих дужина ни облика (Слика 2-17).

Посматрајући приказана истраживања може се приметити да је ламелна конструкција и даље у пољу интересовања архитеката, инжењера и истраживача. У овом истраживању испитаће се конструктивни потенцијал ламелних конструкција од дрвета, надовезујући се на приказана истраживања, усвајајући изведене закључке и примењујући их приликом истраживања.

2.3 Систематизација ламелних конструкција

Предмет истраживања у докторској дисертацији су ламелне конструкције. У овом поглављу дефинисаће се појам ламелних конструкција, и приказати њихова систематизација и анализа, јер се у овом тренутку оне дефинишу само у оквиру шире области конструктивних система. Различити аутори класификују ламелне конструкције у зависности од форме, материјала и начина конструисања.

Аутори Атласа дрвених конструкција класификују ламелне конструкције у решеткасте конструкције (ен. *lattice*), али у опису самих примера ламелних конструкција наводе да су у питању љуске са дрвеним ребрима која формирају дијагоналну мрежу (Herzog et al, 2004). Ови аутори приказују само два типа ламелне конструкције, дефинисане према форми и начину конструисања - ламелну конструкцију у форми свода са подашћањем и слободну форму изведену са подашчањем, док остале типове не узимају у обзир.

Ламелне конструкције од дрвета без покривача припадају решеткастим конструкцијама у случају да су везе између ламела зглобне. Ламелне конструкције у којима су ламеле зглобно везане су нестабилне, због своје геометријске конфигурације паралелограма. За остваривање стабилности конструкције потребни су им секундарни конструктивни елементи. У сводним конструкцијама секундарни елементи су подужни штапови који се постављају пратећи правац изводница цилиндра у чворовима ламела. У куполама се секундарни елементи постављају као прстенови на местима чворова ламела. Када је ламелна конструкција пројектована на овај начин, она се прорачунава као просторна решетка - у сваком чвору дефинишу се три једначине равнотеже (ен. *space truss*) (Mullord, 1985).

Када је ламелна конструкција пројектована тако да је њена стабилност остварена крутим везама између ламела (Parke, 1985), прорачунава се као просторна рамовска конструкција - у сваком чвору дефинише се шест једначина равнотеже (ен. *space frame*) (Mullord, 1985).

Удружење грађевинских инжењера Америке (American society of civil engineers ASCE) дефинише решеткасте конструкције (ен. *lattice structures*) као све конструкције у којима се јавља просторно преношење сила и не узима у обзир раванске решетке (према Lan, 1985).

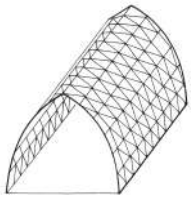
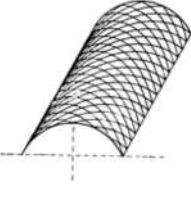

У докторској дисертацији биће усвојена ова дефиниција решеткастих конструкција, те ће се ламелне конструкције пројектоване као конструкције од линијских конструктивних елемената, без спрезања са подашчањем или плочом, дефинисати као **једнопојасна решеткаста конструкција са зглобним везама или са крутим везама**.


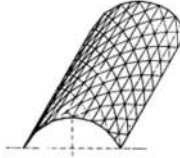


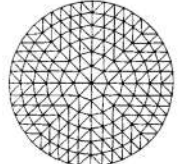
Посебан тип ламелних конструкција су оне у којима је остварена веза ламела са плочом, односно покривачем. Ламелне конструкције од дрвета са подашчањем припадају конструктивном систему **љуска са ребрима** (Herzog et al, 2004), јер су ламеле спрегнуте са






подашчањем. Као љуске са ребрима класификују се и ламелне конструкције од армираног бетона у којима ламеле раде заједно са армирано бетонском плочом (Nervi, 1965).

Да би се формулисала општа дефиниција свих ламелних конструкција, у Табели 1 је приказана систематизација ламелних конструкција на основу истраживања литературе и релевантних примера. С обзиром да је за дефинисање ламелних конструкција нераскидива веза форме, материјала и начина конструисања, у табели су оне систематизоване на следећи начин. Прва подела заснива се на форми, а идвојена су три кључна типа: свод, купола и слободна форма. Свака форма је додатно описана геометријом целог конструктивног склопа / крова, као и геометријом самих ламела. Последњи критеријум систематизације је конструктивни систем. Описан је сваки тип конструктивног система, као и начин ослањања ламелне конструкције.

Табела 1. Систематизација ламелних конструкција

ФОРМА		ГЕОМЕТРИЈА		МАТЕРИЈАЛ	КОНСТРУКТИВНИ СИСТЕМ				
	ПРИМЕР	КРОВА / СКЛОПА	ЛАМЕЛА		ТИП	ОПИС	НАЧИН ОСЛАЊАЊА		
		Кров се састоји из два сегмента омотача кружног правог цилиндра , тако да у попречном пресеку формира преломљени лук .	Све ламеле су пуни равни штапови променљивог попречног пресека, дужине ивице два поља (две дужине странице паралелограма) и вертикални су у односу на тло. Ламеле су постављене дијагонално у односу на правац пружања крова и прате полигоналну линију по омотачу цилиндра из којег је формиран кров. Угао између оса ламела је приближно 60°.	дрво	љуска на ребрима (ен. <i>ribbed shell</i>)	Дијагонална мрежа зглобно везаних ламела је подашчана, чиме је остварена стабилност конструкције. Ламеле су у спречи са подашчањем (плочом).	Кров се ослања на зидове својом дужом страном и на ивичне лукове у забатним равнинама.		
		Ламеле су лучни пуни штапови , константног попречног пресека, вертикални у односу на тло и прате закривљеност цилиндра. Ламеле нису истих дужина и прате дијагонале у односу на пружање крова. Угао између оса ламела је приближно 60°.	једнопојасна просторна решеткаста конструкција са крутим везама (ен. <i>single-layer lattice structure</i> -					Ламеле су везане еластичним везама (ен. <i>semi-rigid</i>). Није потребно укрућење подашчањем.	Кров се ослања на греде својом дужом страном и на ивичне лукове у забатним равнинама.
									

СВОД		Кров је конструисан из сегмента омотача кружног правог цилиндра . Попречни пресек крова је лук .	Ламеле су пуни равни штапови дужине ивице једног поља, константног попречног пресека. Вертикалне су у односу на тло и прате полигоналну линију по омотачу цилиндра. Угао између оса ламела је приближно 60°.	челик	space frame)	Ламеле су везане челичним лимовима са горње и доње стране ламеле и на тај начин је остварена крута веза између ламела. Није потребно укрућење.	
						Ламеле су зглобно везане , а стабилност је постигнута додавањем штапова у подужном правцу са горње и доње стране чворова ламела.	
						Ламеле су решеткасти равни штапови дужине ивице једног поља, константног попречног пресека. Пружају се у два дијагонална правца у односу на правац пружања конструкције и прате завојницу по омотачу цилиндра (нису вертикалне у односу на тло). Угао између оса ламела је приближно 90°.	
КУПОЛА		Кров је конструисан из сегмента омотача сфере . Пресек крова је лук .	Ламеле су пуни равни штапови константног попречног пресека и дужине ивице једног поља. Пружају се између лукова који деле кров на једнаке делове (по меридијанима) у два дијагонална правца под међусобним угловима до 60° (најмањи угао је у темену а повећавају се до ослонаца). Вертикалне су у односу на тло.	челик	једнопојасна просторна решеткаста конструкција	Кров се дели на једнаке делове који су међусобно одвојени луковима. Између њих налазе се ламеле у дијагоналној мрежи везане зглобним везама . Конструкција је укрућена прстеновима полигоналног облика у нивоу чворова ламела.	Кров се ослања по ободу куполе на прстен полигоналног облика.
							

			Ламеле прате завојницу по омогачу сфере (нису вертикалне у односу на тло).	арм. бетон	љуска са ребрима	Једно конструктивно поље формирано је као оплата ребра и плоче од фероцемента (ит. <i>ferrocemento</i>) у које се поставља арматура. Преко се излива бетонска љуска.	Кров се ослања по ободу куполе на Y носаче, чиме је елиминисана потреба за ободним прстеном.	
СЛОБОД НА ФОРМА		Геометрија крова је генерисана у софтверу према принципима проналажења форме (ен. <i>form-finding</i>).	Ламеле су пуни равни штапови променљивог попречног пресека. Простиру се у два правца, а угао између оса ламела је 90°.	дрво	љуска са ребрима	Зглобно везане ламеле у квадратној мрежи су подашчане. Подашчање заједно са ламелама понаша се као љуска са ребрима.	Кров се ослања на лучне носаче по ободу конструкције.	
		Геометрија објекта је настала ротацијом овала око ротационе осе (ен. <i>ovoid</i>).	Ламеле су пуни равни штапови константног попречног пресека, дужине две ивице конструктивног поља.		једнопојасна просторна решеткаста конструкција са зглобним везама (ен. <i>single-layer lattice structure - space truss</i>)	Ламеле су зглобно везане , а конструкција је укрупњена плочом од унакрсно ламинираног дрвета (ен. <i>cross laminated timber CLT</i>).	Ламеле непрекинуто прате двоструко-закривљену геометрију и само су ” спуштене” на тло - не постоје елементи ослонаца.	
		Геометрија склопа је генерисана у софтверу тако да прати правилност грађења веза између ламела. Приказани сегмент подсећа на хиперболични параболоид.	Углони између оса ламела су оштри и променљиви у зависности од геометрије склопа.		Ламеле су пуни равни штапови променљивог попречног пресека, тако да прате геометрију склопа.	-	Ламеле су зглобно везане , а стабилност конструкције остварена је додавањем фурнирских трака на једнаким растојањима које прате закривљеност конструкције.	Изведени сегмент конструкције ослања се на греде управно на правац ослањања.
		Склоп је геометрије хиперболични ог параболоида .						

На основу табеле може се извести дефиниција:

Ламелне конструкције су просторне конструкције од линијских конструктивних елемената - ламела које су постављене дијагонално у два правца у односу на правац простирања конструкције, и у којима је свако поље које формирају ламеле паралелограм.

Када се сагледају примери кроз историју и систематизација ламелних конструкција, може се приметити да су ламелне конструкције од дрвета у пољу интересовања архитеката и инжењера и у савременом добу. Употреба армираног бетона за извођење ламелних конструкција није више економична, јер је начин конструисања био осмишљен за економску ситуацију у којој је потребна уштеда у челику за армирање, а за малу цену рада. Челичне ламелне конструкције су у савременом добу замениле једнопојасне и двопојасне просторне решеткасте конструкције са типским елементима - штаповима и везама, као што је МЕРО конструкција (MERO-TSK International GmbH & Co.). Савремене тенденције, у складу са одрживим развојем, указују на враћање природним материјалима и све учесталију употребу конструкција од дрвета у архитектонској пракси. Као што се може видети на примеру опсерваторије за птице (Pintos, 2019), дрвени елементи ламелних конструкција могу се демонтирати и применити поново, чиме се доприноси заштити животне средине и одрживости. У складу са тенденцијама одрживог развоја, ламелне конструкције од дрвета су одабране за даљу анализу у докторској дисертацији, што чини тему докторске дисертације релевантном у савременим оквирима истраживања.

Ламелне конструкције се примењују најчешће као кровне конструкције, почевши од наткривања стамбених објеката па све до објеката великих распона као што су спортске хале. Најзаступљенији облик основе архитектонских објеката је правоугаоник, због чега је свод најзаступљенија форма ламелне конструкције. Анализом сводне форме ламелних конструкција и прецизним дефинисањем геометрије ламела, поставља се основа за примену и на другим формама. Са једне стране, конструисањем из продора више цилиндара могу се дефинисати различите форме, као што су крстасти и манастирски свод (Krašić, 2012), док се са друге стране, параметарска дефиниција кретања ламела по омотачу цилиндра може применити и на остале површи који су настале генерисањем једне криве по другој.

Покривач ламелних конструкција од дрвета зависи од намене објекта над којим се налази. За стамбене објекте, користе се стандардни кровни покривачи, као што је цреп на подконструкцији и тада се ламелна конструкција подашчава, чиме се постиже конструктивни систем љуске са ребрима. За објекте јавног и индустријског карактера, покривачи су обично монтажни панели или лагане облоге. У том случају, због стабилности ламелна конструкција се пројектује са крутим чворовима између ламела или са зглобовима и секундарним елементима конструкције. За анализу у докторској дисертацији одабран је овај тип ламелних конструкција који припада једнопојасним решеткастим конструкцијама, јер има ширу примену у архитектури и грађевинарству. Такође, када је ламелна конструкција пројектована на овај начин, могуће је изабрати било који покривач.

Сагледавањем савремених примера, може се закључити да ламелна конструкција може бити било које форме. Покривач који се лако прилагођава различитим формама је текстилна мембрана. Покривање ламелне конструкције текстилном мембраном доприноси целокупном изгледу конструкције јер се тада мрежа ламела сагледава и из спољашњег простора, док у унутрашњем ствара посебну атмосферу пропуштањем светлости и креирањем сенки кроз мрежу ламела. Осветљавањем ламелне конструкције изнутра у ноћним часовима, ствара се светлосни ефекат тако да се наглашава мрежа ламела на мембрани, чиме се ова конструкција уочава и са великих удаљености од објекта.

На основу свега наведеног, донета је одлука да се у докторској дисертацији анализирају **сводне ламелне конструкције од дрвета конструктивног система једнопојасне решеткасте конструкције, које су покривене текстилном мембраном.**

3. Дрво - конструктивни материјал

3.1 Опште информације

Дрво је дрвенаста биљка која се састоји из неразгранатог дела, дебла и крошње. Улога дебла је да спаја основне органе исхране дрвета - корен и лишће (Мала енциклопедија Просвета, 1978). Користи се као сировина захваљујући свом хемијском саставу и анатомској грађи, а обрађује се применом хемијских, физичко-хемијских и механичких поступака. Примену налази у бројним производима, а за истраживање у докторској дисертацији значајна су својства дрвета које се примењује у конструкцијама. Дрво се користило за конструкцију првих праисторијских склоништа (Роровић-Larsen, 2016; Deplazes, 2004), а сматра се и да је каменом добу претходило дрвено доба (Ивановић-Шекуларац, 2017). Стари, традиционални материјал за конструкције, доживео је промене у савременом добу у складу са тенденцијама одрживог развоја. Један је од обновљивих грађевинских материјала зато што може бесконачно да расте, али је потребно пажљиво опхођење према светским ресурсима, јер су квалитет дрвета и брзина раста обрнуто пропорционални (Ивановић-Шекуларац, 2017, 17).

Категоризација дрвета може се извести у односу на особине дрвета и то према:

1. естетским особинама,
2. физичким особинама и
3. механичким особинама.

У естетске особине дрвета спадају боја, текстура, сјај, мирис и финоћа дрвета. Физичке особине су запреминска маса, влажност, порозност, промена димензије, запремине и облика дрвета, док су механичке особине оне које долазе до изражаја при деловању спољних сила које изазивају. Механичке особине су: чврстоћа на затезање, притисак, савијање, смицање и торзију, течење дрвета, тврдоћа, динамичка чврстоћа, трајност. (Ивановић-Шекуларац, 2017)

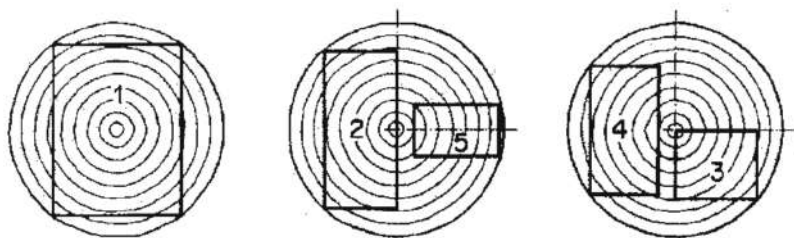
У грађевинарству, елементи дрвених конструкција се добијају механичком прерадом дрвета, те дрво не мења свој хемијски састав, већ се мењају његов облик и димензије. Основна подела дрвета, за потребе пројектовања и прорачуна конструкција, је према врстама дрвета, на листаре и четинаре. Карактеристике дебла дрвета, брзина раста, густина ткива и слично, утичу на механичке особине дрвета.

Приликом пројектовања конструкције, значајно је одабрати одговарајући конструктивни материјал, који одговара пројектованој форми и распонима конструкције. Одабиром дрвета као конструктивног материјала потребно је обратити пажњу на обликовање елемената и њихових веза. За линијске конструктивне елементе, обликовање елемената зависи од типа дрвене грађе. Монолитно дрво, које се добија резањем дебла на одговарајућу димензију, има другачије механичке особине од лепљеног ламелираног дрвета, које се добија лепљењем танких дрвених дасака једне за другу, а затим обликовањем конструктивног елемента. У савременим конструкцијама, широку примену нашли су и плочасти материјали од дрвета - унакрсно ламинирано дрво (ен. cross laminated timber CLT), фурнирске плоче, сендвич панели и слично (Deplazes, 2004), и они неће бити предмет овог истраживања.

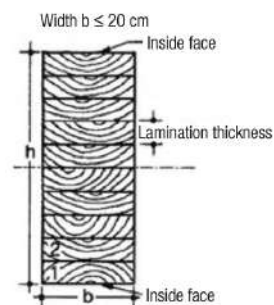
Приликом примене дрвета, потребно га је заштитити од разних гљива и инсеката којима је подложно. Поступци заштите конструктивних елемената од дрвета су природно конзервирање - уклањање влаге и вештачко конзервирање - уношење отрова. Заштита дрвета може се спровести и угљенисањем површинског слоја дрвета (Мала енциклопедија Просвета, 1978). Начин заштите дрвета може променити и његове естетске карактеристике. На примеру павиљона Креод (Furuto, 2012) у којем је дрвена конструкција видна и налази се са спољне стране, коришћено је термотретирано дрво које даје посебан изглед павиљону.

3.2 Линијски конструктивни елементи од дрвета

Традиционалан начин обраде дрвета је резање дебла на типске елементе - резану грађу, у коју спадају даске и елементи правоугаоних попречних пресека који се користе као линијски конструктивни елементи дрвених конструкција (Deplazes, 2004). Ограничења у дужини резане грађе, навела су на формирање лепљеног ламелираног дрвета за линијске конструктивне елементе лучних форми и великих распона. (Слика 3-1) Лепљено ламелирано дрво добија се од дасака максималне дебљине 4 cm и максималне ширине 20 cm које се слажу једна на другу и лепе целом својом ширином (Deplazes, 2004). Користи се за линијске конструктивне елементе и може да премости било који распон. (Слика 3-2)



Слика 3-1. Прикази начина добијања резане грађе од дебла дрвета, извор: Deplazes, 2004, 83.



Слика 3-2. Елемент од лепљеног ламелираног дрвета, извор: Deplazes, 2004, 85.

Дрво је хетероген материјал, због чега његове механичке особине зависе од правца влакана у дрвеном конструктивном елементу. Разлике између монолитног дрвета и лепљеног ламелираног дрвета могу се видети на сликама 3-3 и 3-4.

Модул еластичности управно на влакна лепљеног ламелираног дрвета је 10% већи него код монолитног дрвета, док су модул еластичности паралелно влакнима и модул смицања једнаки за оба типа. Лепљено ламелирано дрво прави се од дасака монолитног дрвета, тако да се повећава само модул еластичности управно на влакна, док остале карактеристике дрвета остају исте. Вредности допуштених напона затезања и притиска - паралелно са влакнима, као и за смицање једнаке су за елементе од четинара, док су за листаре, веће вредности допуштених напона. Чврстоћа на савијање лепљеног ламелираног дрвета од листара је 15% већа од чврстоће на савијање монолитног дрвета.

Остале разлике механичких особина дрвета зависе од врсте дрвета - листара или четинара и од класе дрвене грађе. Вредности могу варирати и за различите влажности дрвета, а у табелама су вредности за монолитно дрво влажности 18% и за лепљено ламелирано дрво влажности 15%.

Према наведеним карактеристима монолитног дрвета и лепљеног ламелираног дрвета, може се закључити да лепљено ламелирано дрво има боље механичке особине, због чега се отвара могућност његовог обликовања на другачији начин од монолитног дрвета за иста оптерећења. Лепљено ламелирано дрво се првенствено користи за гредне елементе конструкција у којима је доминантно напрезање савијање проузроковано гравитационим оптерећењем. Из тог разлога, елементи од лепљеног ламелираног дрвета су најчешће велике висине попречног пресека у односу на своју ширину и делују витко, што није случај код гредних елемената од монолитног дрвета. Обликовање елемената конструкције утиче на целокупни изглед конструкције, што је посебно важно за објекте у којима конструкција остаје видна.

Савремене технологије омогућавају широку примену дрвене грађе на различите начине. Традиционалну резану грађу све чешће мењају линијски конструктивни елементи од лепљеног ламелираног дрвета - ”засеци су све финији, а попречни пресеци све мањи” (Deplazes, 2004, 77). Применом нових технологија којима се комбинује пројектовање у софтверима, а затим њихова координација са *CNC* машинама за сечење и обликовање, омогућава да се за кратко време направе конструктивни елементи од дрвета и најкомплекснијих форми.

		četinari i topola									Tvrdo drvo					
		C14	C16	C18	C22	C24	C27	C30	C35	C40	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Karakteristične čvrstoće [N/mm ²]																
Savijanje	$f_{m,k}$	14	16	18	22	24	27	30	35	40	30	35	40	50	60	70
Zatezanje paralelno vlaknima	$f_{t,0,k}$	8	10	11	13	14	16	18	21	24	18	21	24	30	36	42
Zatezanje upravno vlaknima	$f_{t,90,k}$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,9
Pritisak paralelno vlaknima	$f_{c,0,k}$	16	17	18	20	21	22	23	25	26	23	25	26	29	32	34
Pritisak upravno vlaknima	$f_{c,90,k}$	4,3	4,6	4,8	5,1	5,3	5,6	5,7	6,0	6,3	8,0	8,4	8,8	9,7	10,5	13,5
Smicanje	$f_{v,k}$	1,7	1,8	2,0	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8	3,0	3,4	3,8	4,6	5,3	6,0
Karakteristične krutosti [kN/mm ²]																
Srednja vrednost modula E paralelno vlaknima	$E_{0,mean}$	7	8	9	10	11	12	12	13	14	10	10	11	14	17	20
5% - Fraktil modula E paralelno vlaknima	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,7	7,4	8,0	8,0	8,7	9,4	8,0	8,7	9,4	11,8	14,3	16,8
Srednja vrednost modula E upravno na vlakna	$E_{90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,33	0,37	0,40	0,40	0,43	0,47	0,64	0,69	0,75	0,93	1,13	1,33
Srednja vrednost modula smicanja G	G_{mean}	0,44	0,50	0,56	0,63	0,69	0,75	0,75	0,81	0,88	0,60	0,65	0,70	0,88	1,06	1,25
Zapreminska masa ρ_k [kg/m ³]																
Zapreminska masa	ρ_k	290	310	320	340	350	370	380	400	420	530	560	590	650	700	900
Srednja vrednost zapreminske mase	ρ_{mean}	350	370	380	410	420	450	460	480	500	640	670	700	780	840	1080

Слика 3-3. Класе чврстоће и карактеристичне вредности за монолитно дрво, извор: Gojković et al, 2001.

		Klasa čvrstoće				
		GL 20	GL 24	GL 28	GL 32	GL 36
Savijanje	$f_{m,sk}$ (N/mm ²)	20	24	28	32	36
Zatezanje paralelno vlaknima	$f_{t,0,sk}$ (N/mm ²)	15	18	21	24	27
Zatezanje upravno vlaknima	$f_{t,90,sk}$ (N/mm ²)	0,35	0,35	0,45	0,45	0,45
Pritisak paralelno vlaknima	$f_{c,0,sk}$ (N/mm ²)	21	24	27	29	31
Pritisak upravno vlaknima	$f_{c,90,sk}$ (N/mm ²)	5,0	5,5	6,0	6,0	6,3
Smicanje	$f_{v,sk}$ (N/mm ²)	2,8	2,8	3,0	3,5	3,5
Srednja vrednost modula E paralelno vlaknima	$E_{0,mean,sk}$ (N/mm ²)	10 000	11 000	12 000	13 500	14 500
5% - Fraktil modula E paralelno vlaknima	$E_{0,05,sk}$ (N/mm ²)	8 000	8 800	9 600	10 800	11 600
Zapreminska masa	ρ_{sk} (kg/m ³)	360	380	410	440	480

Слика 3-4. Класе чврстоће за лепљено ламелирано дрво, извор: Gojković et al, 2001.

4. Текстилне мембране

4.1 Опште информације

Назив мембрана потиче од латинске речи *membrana*, која означава опну - танак материјал чија је дебљина знатно мања од површине коју покрива (Knippers et al, 2011, 100). У архитектонским конструкцијама под мембранама се подразумевају различити видови опни, које служе као покривачи и фасадне облоге, као и мембранске конструкције код којих мембрана има конструктивну улогу. Мембранске конструкције класификују се као висеће конструкције (Nestorović, 2000), заједно са кабловским, јер се у њима првенствено јављају напони затезања. Фрај Ото (Frei Otto) истиче да је седласти кров Дортон арене (Dorton Arena) са кабловима у два правца, архитекте Метју Новицког (Mathew Nowitzki) и инжењера Фред Северуда (Fred Severud) био инспирација за његове прве мембранске конструкције (Huntington, 2013, 6). Специфичност мембранских конструкција огледа се и у томе што су оне конструкције чија форма зависи од оптерећења (ен. *form-active*, према Engel, 2007). Енгел их дефинише као флексибилни конструктивни систем у коме се оптерећење преноси посредством форме која је стабилизована на карактеристичан начин (Engel, 2007). Мембранске конструкције су површинске конструкције које се најчешће комбинују са челичним кабловима који служе за добијање форме и стабилизацију целог система (Seidel, 2009). У зависности од распона, притиснути елементи у мембранским конструкцијама, као што су лукови, стубови и разупирачи, могу се конструисати од различитих материјала - дрвета, челика и армираног бетона (Engel, 2007).

Основна подела мембрана, према материјалу од кога је направљена, је на текстиле и фолије (Seidel, 2009; Knippers et al, 2011). Фолије су базиране на полимерима, а у архитектури се најчешће користе као заштитни слојеви. ETFE (*ethylene-tetrafluoroethylene*) фолија се користи као кровна конструкција, у виду ваздушних јастука добијених пнеуматским напрезањем, када су конструктивна поља мањих распона, услед њене мале носивости. Привлачна је архитектама због своје транспарентности, међутим, потребно ју је унапредити да би могла да се користи за веће распоне. (Knippers et al, 2011) У докторској дисертацији изучавају се текстилне мембране, типови текстила и њихове конструктивне карактеристике, као и естетска својства мембрана.

Текстилне мембране воде порекло још од праисторијских шатора, коришћених као заклон од временских непогода. Конструкција, коју је лако демонтирати и пренети на друго место, подржавала је номадски начин живота. Савремене текстилне мембране, као и шатори, пружају заштиту од временских непогода, малих су тежина и једноставне су за монтажу. (Huntington, 2013) Текстилна мембрана на првој мембранској конструкцији из 1955. године архитекте Фрај Ота била је од памучног платна и распона 18 m. Изложена је на сајму хортикултуре у Немачкој и означила је почетак употребе мембранских конструкција. Још тада је Ото уочио да памучна тканина није довољно чврст материјал да би издржао напоне у конструкцији, као ни временске утицаје на платно и за следећи сајам је почео да експериментише са вештачким тканинама, полиестерима. (Knippers et al, 2011, 16)

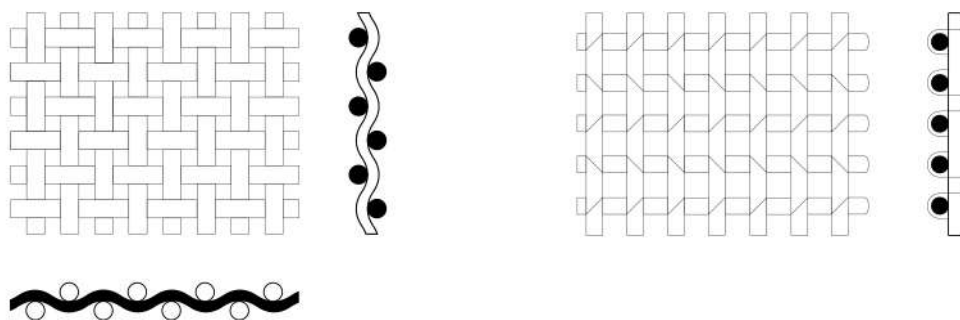
Специфичности мембранских конструкција захтевале су темељно изучавање и усавршавање током година, те је до данас унапређен начин њиховог конструисања - постоје софтвери који се користе за прорачун утицаја у свим мембранама, затим софтвери који омогућавају анализе у тродимензионалним моделима за проналажење адекватне форме мембранске конструкције за различита оптерећења, који се базирају на принципима проналажења оптималне форме (ен. *form-finding*) и усавршене су технике производње текстила за мембране, а напредовала је и технологија извођења.

4.2 Карактеристике текстилних мембрана

Тканине за текстилне мембране карактерише разноврсност природних и вештачких влакана од којих се формирају, различитим техникама ткања које им дају чврстоћу и отпорност на затезање. Типично за текстилне мембране је да су од ортотропних материјала, односно да имају различита својства у ортогоналним правцима (Milošević, 2017, 24), што се огледа у њиховим спецификацијама у којима се приказују максимални напони затезања за сваки правац. (Knippers et al, 2011, 105) У зависности од типа ткања, које резултује разликом у вредностима допуштених напона у ортогоналним правцима, потребно је поставити текстилну мембрану на одговарајући начин при њеном конструисању и извођењу, тако да може да прихвати и пренесе сва оптерећења.

Сваки корак у производњи текстила за мембране утиче на финални производ, самим тим и на њену отпорност. Нити од којих се праве текстили могу формирати влакна на два начина: постављањем једне до друге нити или њиховим увијањем. Начин формирања влакана ће утицати на отпорност на издуживање материјала, утичући тако на модул еластичности мембране. Са друге стране, начини ткања утицаће на отпорност на затезање и цепање мембране. Најчешћи тип тканине је онај у коме је основа чврсто затегнута (ен. *warp yarns*), а потка (ен. *weft yarns*) се провлачи у ортогоналном правцу испод и изнад влакана основе (ен. *tightly woven plain weave*) (Слика 4-1а). Други тип тканине који се користи за мембране је тканина (ен. *laid cloth*) у којој се влакна постављају једна преко других у два ортогонална правца, а затим се повезују ушивањем (Слика 4-1б). Разлике у карактеристикама ових тканина огледају се у отпорности на затезање и цепање, као и у начинима аплицирања премаза. Предности обичне тканине (ен. *plain weave*) огледају се у великој отпорности на затезање и једноставности апликације течних заштитних премаза, али је отпорност на цепање мала, док се у положеним платнима (ен. *laid cloth*), упркос малој интеракцији између влакана основе и потке, може уочити баланс између отпорности на затезање и цепање. (Huntington, 2013) Положена платна могу се направити од више слојева влакана, која не морају бити постављена у ортогоналним правцима, већ могу да прате линије напона у мембрани (Knippers et al, 2011, 71). Овакав тип тканине користи се у производњи мембрана у Сједињеним Америчким Државама (Seidel, 2009, 30), али неки аутори их не узимају у обзир као основу за мембранске конструкције (Knippers et al, 2011, 71).

Начин ткања обичних тканина резултује различитом отпорности на затезање у два ортогонална правца у којима се постављају влакна. Могућност изједначења напона у оба правца јавља се у процесу производње тканина - преднапрезањем влакана (Knippers et al, 2011, 71). Преднапрезање влакана резултује гушћим ткањем, влакнима чврсто постављеним једно уз друго, чиме се постиже скоро изједначење отпорности на затезање у оба правца. Чврстоћа на затезање зависи и од начина и јачине увртања нити у влакна, а заједничким



Слика 4-1. Приказ ткања: а) густо ткана обична тканина, б) положено платно, извор: Knippers et al, 2011, 70-71

деловањем влакана постижу се добре карактеристике тканина за мембранске конструкције. Да би се одредио начин затезања текстилне мембране приликом постављања, препоручљиво је да се уради тестирање тканине на напоне затезања у оба правца (Huntington, 2013, 34).

У мембранским конструкцијама, ретко се користе само текстили (осим у изузетним случајевима, када је потребна трансформабилна конструкција, према Knippers et al, 2011, 100), већ се тканине премазују различитим премазима који поспешују карактеристике материјала и уједно га штите од временских услова. Током година, издвојила су се два типа текстилних мембрана које се користе у архитектури: (1) полиестерска влакна са премазима од поливинил-хлорида (ен. *PVC - Polyvinyl chloride*) и (2) стаклена влакна са тефлонским премазима (ен. *PTFE - Polytetrafluoroethylene*). Однос цене и трајности материјала поставила је ове мембране као најзаступљеније на тржишту (João et al, 2016, 230).

Први тип текстилних мембрана користи се како за сталне конструкције, тако и за мобилне системе, јер поседује велику отпорност на затезање, док уједно има велику флексибилност (Knippers et al, 2011, 100). Полиестерске тканине се користе за мембране још од шездесетих година прошлог века. Иако се сматра да у просеку трају око 15 година, има примера који без икаквих оштећења стоје преко 23 године (Huntington, 2013, 25). У савременом добу, значајна је и чињеница да их је могуће рециклирати (Huntington, 2013, 25), што подржава њихову употребу у складу са одрживим развојем. Премаз од поливинил-хлорида користи се као механичка заштита (од извлачења влакана), затим као заштита од сунца (да се не би смањила отпорност материјала) и као заштита од различитих микроорганизама који се могу појавити на површини тканине. (Seidel, 2009) Други тип текстилних мембрана сматра се једним од најтрајнијих на тржишту, првенствено због добрих карактеристика тефлонског премаза (PTFE) који је отпоран на нечистоћу и микроорганизме, а добро одбија и влагу и воду (Knippers et al, 2011, 104; Huntington, 2013, 39). Са друге стране, стаклена влакна имају висок модул еластичности, као и велику отпорност на затезање, али су крта по својој природи и праве се од нити малих пречника, због чега их је потребно пажљиво монтирати, поготово у случају малих радијуса кривине, да се не би појавиле микропукотине (Huntington, 2013, 36).

Експерименталном анализом ова два типа текстилних мембрана, аутори са Универзитета Мињо (University of Minho) у Португалу, извели су закључке који се односе на њихову трајност и последице током година. Аутори су текстилне мембране подвргли убрзаном старењу да би посматрали деградацију материјала у лабораторијским условима, изложивши их ултраљубичастом зрачењу, топлоти и влажности у периоду од 2160 сати. Истовремено су посматрали деградацију материјала у природним условима. Резултати анализа показали су да се код мембрана од полиестерских тканина са премазом од поливинил-хлорида, тканина понаша исто пре и након убрзаног старења, али да премаз испуца и губи своја својства. Текстилна мембрана од стаклених влакана са тефлонским премазом показала је смањење отпорности на затезање након излагања убрзаном старењу. У закључцима, аутори наводе да су обе текстилне мембране задржале своје термалне способности и да су механичке карактеристике мембране од полиестера са премазом од поливинил-хлорида остале непромењене, док су се другој смањиле перформансе мембране. Промена својстава мембране од полиестера види се због деградације премаза од поливинил-хлорида, док се промене на мембрани од стаклених влакана виде због карактеристика самих влакана, јер процес убрзаног старења није утицао на премаз од тефлона. (João et al, 2016) Експериментална анализа која је имала за циљ да провери својства текстилних мембрана услед деградације материјала, приказала је њихове различите карактеристике и указала на проблеме који се јављају на самом премазу, као и на тканини. Анализа је показала издржљивост полиестерских тканина, као и тефлонских премаза, што доводи у питање

примену другачијих премаза на полиестерску тканину, чиме би могло да се утиче на њену трајност.

Конструктивне карактеристике мембранских конструкција огледају се већ у самој класификацији у глобалној подели конструктивних система. Мембранске конструкције спадају у висеће конструкције, заједно са кабловским конструкцијама, тиме имплицирајући на њихово стање напона, односно да се у текстилним мембранама јављају искључиво напони затезања. Сваки тип притиснутог конструктивног елемента има одговарајући затегнути елемент. У површинским конструкцијама љускама одговарају мембранске конструкције. У једнима се јављају мембранска стања притиска, а у другима мембранска стања затезања. Аналогија се може повући између текстилних мембрана и кабловске мреже у којој су каблови постављени у два ортогонална правца, тако да су једни носећи, а други стабилизујући. Код текстилних мембрана влакна су постављена у два ортогонална правца, због чега се оне сматрају ортотропним материјалима.

Као површински носач, текстилне мембране могу да приме и пренесу велика оптерећења, посебно када се пореде са њиховом малом висином попречног пресека. Изузетно су танке, приближно 1 mm, а самим тим имају и малу сопствену тежину, која се креће око 1 kg/m² [0.01 kN/m²] у зависности од типа тканине и премаза који се користи за мембранску конструкцију. Мала сопствена тежина текстилне мембране доприноси смањењу укупног оптерећења објекта, тиме смањујући тежину конструкције, односно утрошак материјала.

Специфичност мембранских конструкција је њихова форма којом заузимају минималну површину над неким задатим габаритом. Архитекта Фрај Ото је проучавао форме минималних површина користећи се моделима од сапунице (ен. *soap-film models*). Постављао је оквире од челичних жица које је провлачио кроз сапуницу и тако добијао различите, најчешће двоструко закривљене, форме минималних површина које су у мембранском стању затезања. Испитивао је вредности напона у добијеној структури, а затим је изведену форму из модела примењивао у својим пројектима. (Nerdinger, 2005, 22) Форма мембранске конструкције зависи и од оптерећења која треба да прими и пренесе, због чега се од самог почетка пројектовања оваквог типа конструкција инжењери служе процесима проналажења форме (ен. *form-finding*) израдом модела, а данас и кроз рачунске софтвере.

Мембранске конструкције се састоје од мембране - текстила са премазима, каблова који служе за стабилизацију и носећих елемената који могу бити преднапрегнути или притиснути (као што су стубови). Текстилна мембрана монтира се механичким напрезањем, након чега може да прихвати и пренесе оптерећење. Њена стабилизација мембране и довођење у стање равнотеже постиже се механичким затезањем по једној кривој, а затим у ортогоналном правцу по другој. Приликом прихватања оптерећења, текстилна мембрана се у одређеној мери прилагођава оптерећењу и деформише док не дође у ново стање равнотеже. Носећа улога текстилне мембране директно је повезана са њеном формом, затим са унетом силом преднапрезања која је одржава затегнутом, као и јачином материјала од кога је направљена. Повезаност силе преднапрезања и геометрије сагледава се у повезаности силе преднапрезања и радијуса кривине - уколико је мали радијус кривине, потребна је већа сила преднапрезања да одржи текстилну мембрану у стању затезања и обрнуто. (Knippers et al, 2011, 146) Када се повуче паралела са кабловским висећим конструкцијама, из формуле коју даје инжењер Едмунд Балгач за силу - S преднапрезања која се уноси у кабл

$$S = q \frac{l^2 \sqrt{l + \frac{4f}{l^2}}}{8f}$$

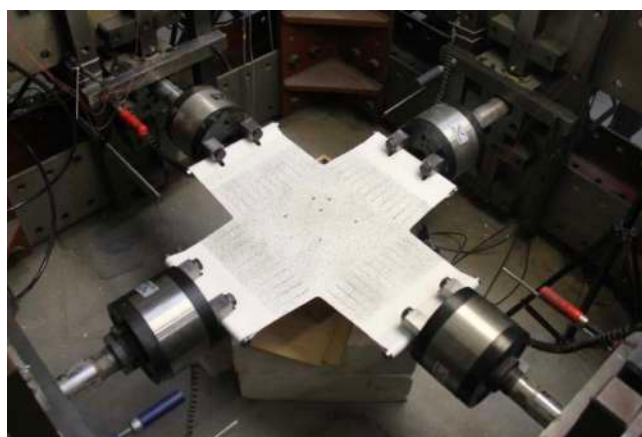
може се видети да се повећањем стреле - f смањује потребна сила преднапрезања, тиме потврђујући поменути однос. Приликом пројектовања конструкције изузетно је важно

постићи равнотежу између свих постављених параметара - одабраног материјала, закривљености конструкције и силе преднапрезања. Једно од решења љуске са дрвеним ребрима на овим просторима је предлог решења спортске хале инжењера Едмунда Балгача. Он предлаже viseћи кров од каблова у попречном правцу пружања конструкције који би се провлачили кроз дрвена ребра и преднапрезали. Преко њих би се у ортогоналном правцу конструкција подашчавала и на тај начин формирала љуску са ребрима. Предложено решење кровне конструкције било је економично и одговарало је естетским захтевима архитекте, као и акустичним карактеристикама потребним за спортску дворану. (Petrović, Skansi, 2018) У дисертацији се испитује текстилна мембрана која се поставља преко ламелне конструкције од дрвета геометрије цилиндра, и претпоставља се да ће имати конструктивну улогу, због чега ју је потребно преднапрегнути у оба правца конструкције, као и изабрати материјал који одговара оптерећењима дате конструкције.

Допуштени напони у текстилним мембранама исказују се као сила за траку ширине 5 cm у оба ортогонална правца влакана од којих је формирана тканина, а разликују се у правцу основних влакана (ен. *warp*) и у правцу потке (ен. *weft*). Вредности допуштених напона у правцу основних влакана обично су јаче него у другом правцу, што се може видети у спецификацијама материјала. Могу се поделити на више типова на основу допуштених напона који се крећу од 3000 до 9000 N/5cm [60 до 180 kN/m]. (Knippers et al, 2011, 105)

Посебна карактеристика текстилних мембрана је њихов модул еластичности који се експериментално добија за сваку текстилну мембрану према типу коришћеног материјала. Тестови којима се испитује модул еластичности називају се биаксијални тестови којима се експериментално добијају његове вредности за оба ортогонална правца влакана у тканини. Испитивање се спроводи машином за биаксијално тестирање која се састоји од четири хидрауличне кидалице којима је могуће унети силу од 100 kN у текстилну мембрану истовремено у оба ортогонална правца. Да би се добила прецизна мерења, најмања сила којом се испитује мембрана износи 0.4 kN. Током теста прате се вредности дилатација у односу на унету силу. Узорак је крстоликог облика, а величина узорка у централном делу је 300/300 mm са продужецима у оба ортогонална правца од 15 mm ширине и 100 mm дужине (Слика 4-2). Узорци се тестирају на различита оптерећења у ортогоналним правцима у различитим односима, да би се добила отпорност текстилне мембране у правцу основе и потке. Испитивањем се добијају вредности модула еластичности у два ортогонална правца (E_x , E_y) и Поасонов коефицијент за сваки од праваца (ν_x , ν_y). (Van Craenenbroeck et al., 2015)

Сеизмичка оптерећења на мембранске конструкције су занемарљива, док је потребно обратити пажњу на оптерећења ветром. Услед дејства ветра, може доћи до лепршања текстилне мембране (ен. *flutter*), тиме дестабилизујући конструкцију, због чега је потребно да она буде константно затегнута. Прорачун силе преднапрезања која одговара дејству ветра рачуна се у складу са прописима за дату локацију на којој се пројектује. У прописима се не



Слика 4-2. Биаксијални тест мембране на хидрауличној кидалици. Извор: Van Craenenbroeck et al., 2015, н.п.

могу наћи обрасци за оптерећења специфичних, двоструко закривљених форми које текстилне мембране најчешће заузимају. Када постоји могућност, препорука је да се спроведу експериментална мерења у аеротунелу која би утврдила утицај ветра на текстилну мембрану (Huntington, 2013, 53). Оптерећење снегом може направити асиметрична оптерећења, у случајевима када дође до нагомилавања снега у појединим зонама текстилне мембране. Пројектовањем одговарајуће форме могуће је избећи овакве ситуације, а досадашњи објекти изведени у оштрим климама показали су да мембранске конструкције добро подносе оптерећења снегом. (Huntington, 2013, 54)

Конструктивне могућности текстилних мембрана испитују се у савременим истраживањима за различите типове конструкција, од којих се издвајају испитивања утицаја текстилних мембрана на стабилизацију конструкција од челичних лукова геометрије сегмента кружнице. Аутори са Грађевинског факултета, Технички универзитет у Прагу (Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague) и из фирме која се бави извођењем конструкција *Metrostav a.s.* испитивали су 2020. године утицај текстилне мембране на стабилизацију средњих лукова у челичним конструкцијама путем нумеричких метода и извођењем прототипа једног сегмента конструкције. За прототип су користили лукове од челичних цеви кружног попречног пресека и мембрану од полиестера са *PVC* и *PVDF* премазима. Нанели су оптерећење прво на средишњи лук без мембране, а затим са мембраном. Модели су показали да лук са мембраном може да прими веће оптерећење, а да се деформације смање за више од 50% (са 41.3 mm на 18.5 mm за асиметрично оптерећење). Нумеричком анализом у софтверу *SOFiSTiK* испитивали су конструкцију са више конструктивних поља варирајући распон и дужину, а закључак је да је највећи утицај мембране на смањење извијања унутрашњег лука за однос стреле и распона $f/L = 0.4$. Аутори су овим анализама потврдили стабилизујући ефекат који мембрана има на унутрашње лукове челичних конструкција и става су да се оне све чешће користе не само због своје атрактивности, већ и због изузетних конструктивних могућности. (Machacek and Svoboda, 2021)

Аутор са Универзитета за технологије и економију у Будимпешти, Департман за механику, материјале и структуре (BME Dept. Mechanics, Materials and Structures) испитивао је конструкцију од челичних лучних раванских решетки покривену текстилном мембраном и њихово садејство користећи се нумеричком анализом. У оваквој структури текстилна мембрана спречава бочно извијање решеткастог лука (ен. *out-of-plane buckling*). Она не утиче на извијање доњег појаса решетки, што значи да је за бочно извијање референтна крутост саме решетки као и број решетки у целој конструкцији. Уколико конструкција има велики број конструктивних поља смањује се отпорност на бочно извијање конструкције. (Negyi, 2021) Приказана истраживања износе хипотезу да текстилна мембрана може да смањи деформације у конструкцији, што ће бити проверено у докторској дисертацији приликом експеримента на прототипу ламелне конструкције од дрвета са текстилном мембраном.

4.3 Примена текстилних мембрана у архитектури

Мембранске конструкције најчешће се користе као надстрешнице за просторе који не захтевају висок термални комфор. Због своје мале дебљине текстилне мембране су лоших термоизолационих способности, а њене карактеристике могу се побољшати додавањем још једног слоја мембране између којих би се формирао слој ваздуха (Milošević, 2017, 30). Осим за наткривање, текстилне мембране се користе и као фасаде у савременој архитектури, али то није тема овог истраживања.

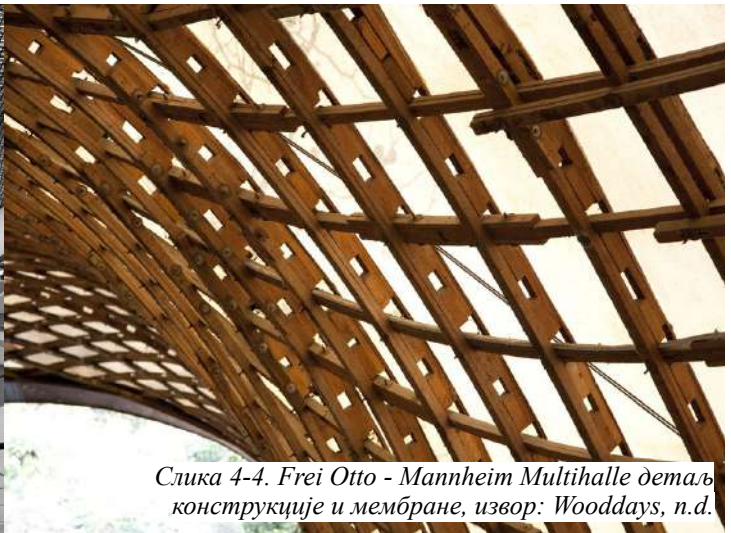
Специфична визуелна карактеристика текстилних мембрана је могућност да пропуштају дневну светлост. На тај начин постиже се дифузно осветљење унутар објекта. Уколико је транспарентност један од примарних критеријума које мембрана треба да испуни, користе се тканине од стаклених влакана премазане силиконом. Највећи проценат мембрана у архитектури су полиестерске тканине са *PVC* премазима и тканине од стаклених влакана са *PTFE* премазима. Негативна страна тканине од стаклених влакана премазане силиконом је што се прља лакше и брже него остале. (Leopoldo Fúza, 2016, 3) Текстилне мембране које се најчешће примењују пропуштају од 30-40% светлости (Knippers et al, 2011), што је довољно за обављање већине послова и облачним данима, без потребе за додатним вештачким осветљењем (Milošević, 2017, 32). Осим што транспарентност текстилне мембране доприноси визуелном карактеру објекта, она смањује утрошак електричне енергије за осветљење. У ноћним часовима, вештачко осветљење се најчешће усмерава ка текстилној мембрани да би се поново добило дифузно осветљење унутар објекта, док са спољне стране ствара утисак да објекат светли, доприносећи његовој атрактивности (Milošević, 2017, 32).

Текстилна мембрана се примењује као покривач за немали број типова објеката, од павиљона, преко хала, па све до музеја и репрезентативних објеката различитих функција. У овом раду биће поменути само неки, по избору аутора, а у складу са темом докторске дисертације. Један од несвакидашњих примера светске архитектуре, и један од првих у којима је текстилна мембрана примењена као покривач дрвене конструкције је *Mannheim Multihalle* архитекте Фрај Ота. Штапаста љуска квадратне геометријске конфигурације са континуалним штаповима постављеним у два слоја, ојачана челичним сајлама и покривена мембраном од полиестера са *PVC* премазом изведена је 1975. године за Националну изложбу цвећа (Liddell, 2015, 40). Фрај Ото је сарађивао на пројекту са архитектама Мучлером (Mutschler) и Лангнером (Langner), а за пројекат конструкције била је ангажована фирма Ове Аруп и партнери (Ove Arup & Partners) који су уз прорачун конструкције спровели и испитивања висећих модела конструкције и тестирања дрвених штапова на различита напрезања (Divisare, 2017; Liddell, 2015). Контраст између беле текстилне мембране и боје дрвета даје посебан утисак приликом посматрања ове конструкције, док истовремено пружа довољно осветљења у целом простору хале, што се може приметити чак и на црно белим фотографијама. (Слика 4-3, Слика 4-4) Комбиновање дрвених штапова и текстилне мембране данас се може видети у пројектима архитекте Шигеру Бана (Shigeru Ban), а посебно се истиче на пројекту *Centre Pompidou-Metz* за који је инспирацију пронашао у традиционалним јапанским сламнатим шеширима. Ова штапаста љуска слободне форме од континуалних штапова у три правца је у геометријској конфигурацији шестоугао-троугао, а на ободима је ојачана дрвеном просторном решетком (韩爽 - Han Shuang, 2014). Покривена је мембраном од стаклених влакана са *PTFE* премазом (Meinhold, 2010). Визуелни ефекат који ствара ноћно осветљење шешира овог објекта је изузетан, јер се дрвена љуска види са спољне стране објекта кроз мембрану, док цео објекат сија. (Слика 4-5, Слика 4-6)

Текстилна мембрана се данас често користи као покривач различитих павиљона у којима је могуће приказати достигнућа дрвених структура. Она је први избор покривача за овај тип објеката јер је једноставна за монтажу (и демонтажу), а може се поставити преко различитих слободних форми. Павиљон Креод (Kreod) из 2012. године је конструисан као љуска од дрвених штапова термо-третираног дрвета Кебони (Kebony, 2021) које је отпорно на спољашње утицаје. Павиљон је изведен путем дигиталне фабрикации (Furuto, 2012). Покривач павиљона је текстилна мембрана, везана за конструкцију са унутрашње стране носачима постављеним у чворовима које формирају дрвени штапови. Геометријска конфигурација дрвене љуске је шестоугао-троугао, који заједно са текстилном мембраном ствара другачији утисак у односу на објекте који су уобичајно покривени са спољашње



Слика 4-3. Frei Otto - Mannheim Multihalle унутрашњост објекта, извор: Divisare, 2017



Слика 4-4. Frei Otto - Mannheim Multihalle детаљ конструкције и мембране, извор: Wooddays, n.d.



Слика 4-5. Centre Pompidou-Metz, дневна фотографија објекта, извор: 韩爽 - Han Shuang, 2014



Слика 4-6. Centre Pompidou-Metz, ноћна фотографија објекта, извор: Han Shuang, 2014



Слика 4-7. Kreod, ноћна фотографија павиљона, извор: Furuto, 2012



Слика 4-8. Wind Eaves Pavilion, фотографија објекта, извор: Stevens, 2015.



Слика 4-9. Wind Eaves Pavilion, детаљ конструкције и мембране, извор: Stevens, 2015.



Слика 4-10. Медијана, унутрашњост заштитне конструкције, извор: PiramidaSM, n.d.

стране. (Слика 4-7) Интересантан пример конструкције од дрвених штапова је Wind Eaves Pavilion, архитекте Кенга Куме (Kengo Kuma) из 2015. године. Конструкција која се спушта до тла, прекривена је ЕФТЕ фолијом која је транспарентна. Реципрочна конструкција инспирисана пројектом моста Леонарда да Винчија (Leonardo da Vinci) са препуштеним штаповима који подсећају на гране дрвета у потпуности одговара природном окружењу у којем се налази, док транспарентна мембрана одаје утисак вела који је лагано пребачен преко конструкције. (Stevens, 2015) Покривач павиљона ни у ком случају не нарушава његов изглед, већ заједно са структуром ствара осећај лакоће. Он је постављен са горње стране конструкције и ојачан на местима на којима је остварена веза са дрвеном конструкцијом, на крајевима дрвених штапова. Када се сагледава током дана, покривач делимично прикрива структуру, док ноћу изгледа као изузетно танка завеса која подсећа на преграде у јапанским традиционалним кућама. (Слика 4-8, Слика 4-9) Осим што одабир покривача доприноси естетском доживљају павиљона, он истовремено штити дрвене елементе од атмосферских утицаја. Технолошки, на примеру овог павиљона може се сагледати управо начин формирања конструкције од дрвених греда са малим бројем челичних окова и једноставним остваривањем везе конструкције и покривача. Архитекта Кенго Кума предлаже посматрање материјала као супстанце и отклон од постојећих мисаоних схема у архитектури. Треба да трагамо за формом супстанце, независно од тога како ћемо је назвати. На тај начин, „материјал неће бити затворен у димензији завршног слоја, али ће непосредно разорити дистинкцију између структуре и завршног слоја, која је створена као погодност модерног доба“. (Kengo Kuma у Kuma, 2006, 14) У оба павиљона дрвена конструкција и мембране различитих материјала постављене су у посебне просторне односе, тиме преиспитујући примену мембрана у архитектонским конструкцијама.

Текстилна мембрана се може користити и као покривач заштитних конструкција архитектонског наслеђа, а овакав пример изведеног објекта налази се и у Србији, изнад Виле са перистилом на археолошком налазишту Медијана у Нишу. (Слика 4-10) Дрвену конструкцију чине трозглобни лукови од лепљеног ламелираног дрвета са рожњачама и спреговима у виду укрштених дијагонала за остваривање стабилности конструкције, а прекривена је мембраном од полиестера са PVC премазима. Дрвену конструкцију изводила је фирма Пирамида из Сремске Митровице, а покривач фирма *ArTech* из Београда. Форма је геометрије цилиндра који је у забатним равнима са сваке стране затворен четвртином сфере, највећег распона 72 m, а дужине 140 m. (Сонић, 2013) Овакав тип конструкције одговара заштитним конструкцијама, јер је сопствена тежина конструкције у односу на распоне мала, због чега су и темељи самци на које се ослања мањих димензија од стандардних, па самим тим не угрожавају археолошко налазиште.

На приказаним примерима може се видети широка примена текстилних мембрана као покривача дрвених конструкција за објекте различитих размера и намена, а оно што их све карактерише је специфичан однос мембрана и дрвета: боје у контрасту, осветљење које наглашава конструкцију и визуелни израз који мембране дају овим архитектонским објектима. Текстилна мембрана на приказаним примерима штити објекат и конструкцију од атмосферских утицаја.

**II ИСТРАЖИВАЊЕ КРОЗ ПРОЈЕКАТ ЛАМЕЛНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ ОД
ДРВЕТА СА ТЕКСТИЛНОМ МЕМБРАНОМ**

5. Анализа истраживања ламелних конструкција од дрвета и закључци за пројектовање прототипа

Предмет истраживања у докторској дисертацији су ламелне конструкције од дрвета. На основу систематизације ламелних конструкција издвојиле су се сводне ламелне конструкције конструктивног система једнопојасне решеткасте конструкције са крутим везама. Круте везе између ламела, које формирају мрежу паралелограма по омотачу цилиндра, омогућавају да мрежа задржи првобитни облик. Остали конструктивни системи ламелних конструкција имају линијске елементе за остваривање стабилности конструкције, чинећи мрежу ламела троугаоном. Још једна могућност је да се стабилност оствари подашчавањем, као код Золингер крова, али се тиме елиминише могућност сагледавања конструкције из екстеријера.

Један од циљева истраживања је афирмација ламелне конструкције у савременим оквирима. Задаци истраживања усмерени ка датом циљу су анализа могућег обликовања конструкције и дефинисање геометријске правилности по којима се ламеле *крећу* приликом изградње целог склопа. Доказивање правилности грађења слопа - кретања ламела по површини - омогућава примену параметарских једначина за различите геометрије које су настале кретањем једне криве по другој (једноструко и двоструко закривљене површи, правоизводне површи). Тиме се отвара могућност примене ламелне конструкције на велики број геометрија доводећи у питање одабир покривача.

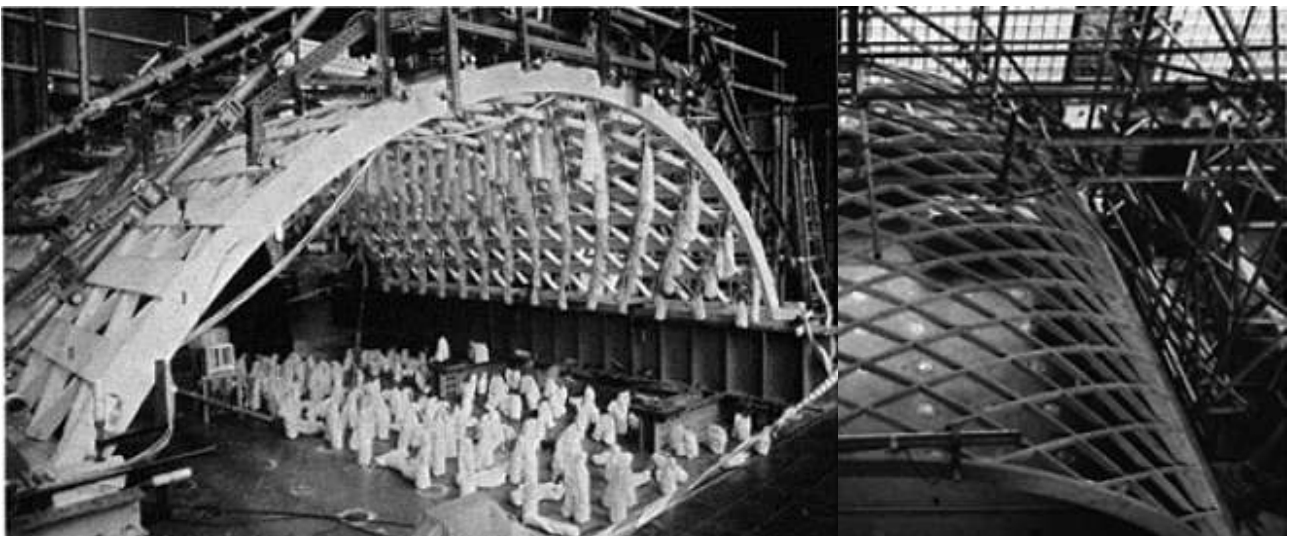
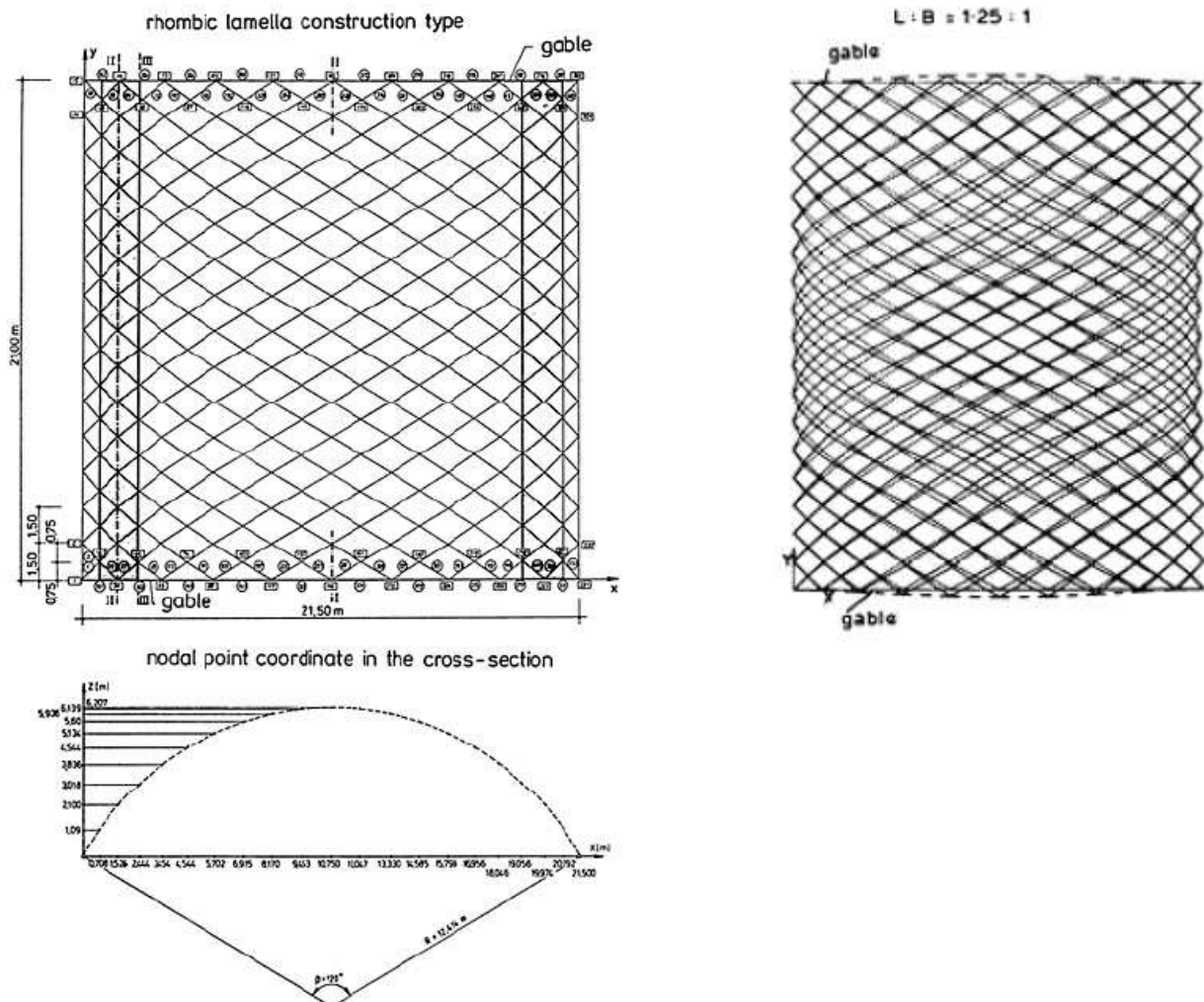
Покривач ламелне конструкције у докторској дисертацији је текстилна мембрана која се лако прилагођава различитим формама, а захваљујући боји и транспарентности истиче мрежу ламела у ламелној конструкцији од дрвета.

У претходном поглављу приказана је анализа појмова и теорије о теми истраживања - ламелне конструкције и текстилне мембране, уз додатно поглавље посвећено анализи дрвета као конструктивног материјала. Циљ приказане анализе је упознавање са темом истраживања и дефинисање поставки за истраживање ламелне конструкције од дрвета са текстилном мембраном. У складу са тим, други део докторске дисертације фокусира се на истраживање кроз пројекат, а у овом поглављу представљена су одабрана истраживања ламелних конструкција и текстилних мембрана чији ће се закључци имплементирати у пројектовање прототипа конструкције.

Испитивања ламелне конструкције која су спровели Шер и Пурномо (Scheer and Purmono, 1985) дају опште информације и смернице ка пројектовању ламелне конструкције од дрвета. У свом истраживању испитивали су ламелну конструкцију геометрије сегмента омотача кружног правог цилиндра распона 21.5 m са ламелама дужине 3 m, променљивог попречног пресека 10/22(27) cm, које образују углове од 60° и 120°. Пројектовали су зглобне везе између ламела, као у Золингер крову, а испитивања су рађена у варијантама са и без подашчања. Закључили су да је, у случају конструкције без подашчања, потребно обратити пажњу на напоне савијања који се јављају око вертикалне осе ламеле, као и на велике деформације уз ивичне лукове конструкције. Инжењери Шер и Пурномо препоручују увођење штапова од лука до лука у циљу смањења напона и деформација.

Уз моделе на рачунару, спровели су експерименте на моделу ламелне конструкције са подужно постављеним штаповима за укрућење и са луковима у забатним равнима. Модел је оптерећен у чворовима вертикалним оптерећењем, симулираним врећицама песка са циљем да измере деформације целе конструкције. Приликом експерименталних испитивања показано је да су разлике у односу на рачунски прорачун конструкције занемарљиве. Још један од закључака које износе инжењери везан је за пропорције крова - однос дужине и распона конструкције и **препорукa је да се поставе лукови на растојање које одговара распону крова**, а посебно у случају када се праве кровови великих дужина. За кровове без

подашчања препоручују постављање штапова за укрућење у подужном правцу. (Scheer and Purnomo, 1985) Закључци и препоруке из њиховог испитивања служе као почетне смернице за даље истраживање ламелне конструкције у докторској дисертацији (Слика 5-1). На Нервијевим хангарима види се да је коришћено правило да однос распона и растојања између лукова буде 1:1, док су на хангарима Хуго Јункерса неизоставни подужни штапови (рожњаче) који формирају тријангулисану мрежу.



Слика 5-1. Истраживање које су спровели инжењери Шер и Пурномо, извор: Scheer and Purnomo, 1985, 411-415.

Могућност оптимизације Золингер крова у контексту носивости и стабилности конструкције су испитивали аутори са Универзитета примењених наука (Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur) у Лајпцигу. Повод за истраживање овог типа конструкције био је савремени контекст растућих еколошких проблема који захтевају преиспитивање принципа лаких монтажних конструкција које би могле да задовоље потребе за изградњом објеката у будућности. Испитивања су спроведена у софтверима за статичку оптимизацију и статички прорачун. На основу случајева оптерећења прописаних Еурокодом, и чињенице да је за овај тип конструкције најнеповољније асиметрично оптерећење, **аутори истраживања су закључили да је најнеповољније оптерећење за ламелну конструкцију асиметрично оптерећење снегом (Dijoux, 2017).**

Модел за статичку анализу конструкције је симплификован у односу на реалне ламеле и везе у Золингер крову. Веза вијцима у којој се прикључне ламеле налазе на растојању једнаком трострукој ширини ламеле је елиминисана, те се **ламеле секу у чвору**. У софтверу за статичку оптимизацију проверене су ламелне конструкције распона од 12 m до 40 m, према истраживању које су презентовали Винтер и Раг (Winter and Rug, 1992). У истраживањима су варирали неколико основних параметара који дефинишу ову конструкцију - распон и висину сегмента омотача кружног правога цилиндра, димензије мреже коју формирају ламеле у X и Y правцу, и висину самих ламела. Закључак испитивања је да је могуће додатно оптимизовати Золингер конструкцију у погледу утрошка материјала, као и да је мало вероватно да је оптимизација могућа за распоне преко 20 m.

Аутори предлажу **повећање дужине ламела**, водећи рачуна да се у дужим ламелама јављају већи моменти савијања, чиме се повећава потребан попречни пресек и отежава извођење конструкције (Dijoux, 2017, 8). Повећањем дужине ламела може се смањити већ мали утрошак материјала у односу на волумен који обухвата цилиндрична ламелна конструкција. Смањењем броја чворова у правцу ослањања конструкције повећава се крутост конструкције, али само за распоне до 20 m, док је за веће распоне потребно увести или круте везе или материјал веће крутости или дрвене ламеле већих попречних пресека (Dijoux, 2017).

Почетком 20. века Золингер кров представљао је иновацију у конструкцијама подстакнуту потребама друштва, а прилагођену технологији изградње тог периода. Основни прорачуни конструкције спроведени у тренутку изградње, показали су да су ови кровови стабилни и да могу да прихвате предвиђена оптерећења (Winter and Rug, 1992). Током година, променили су се услови изградње, а са њима и захтеви конструкција. Појавом рачунара омогућено је извођење прорачуна и анализа које су могле прецизније да испитају понашање конструктивног система. Нестабилна четвороугаона конфигурација зглобно везаних ламела, у случају ламелне конструкције без подашчања, захтевала је круте везе или додавање конструктивних елемената којима би се остварила тријангулисана мрежа.

У докторској дисертацији, у оквиру истраживања кроз пројекат, за пројектовање прототипа ламелне конструкције од дрвета са текстилном мембраном, усвојене су следеће **препоруче из приказаних истраживања:**

1. прототип конструкције у докторској дисертацији је пројектован са распонем мањим од 20 m, а са ламелама већих дужина у односу на распон него у истраживању које су спровели инжењери Шер и Пурномо (Scheer and Purnomo, 1985), на основу закључака испитивања аутора са Универзитета примењених наука у Лајпцигу (Dijoux, 2017),

2. однос распона и дужине конструкције биће 1:1, према препорукама из испитивања прототипа аутора Шер и Пурнома (Scheer and Purnomo, 1985).

На основу препорука истраживања, у оквиру овог поглавља биће анализирани:

1. геометрија ламелне конструкције,
2. елементи ламелне конструкције - ламеле и везе и
3. текстилна мембрана као покривач конструкције,

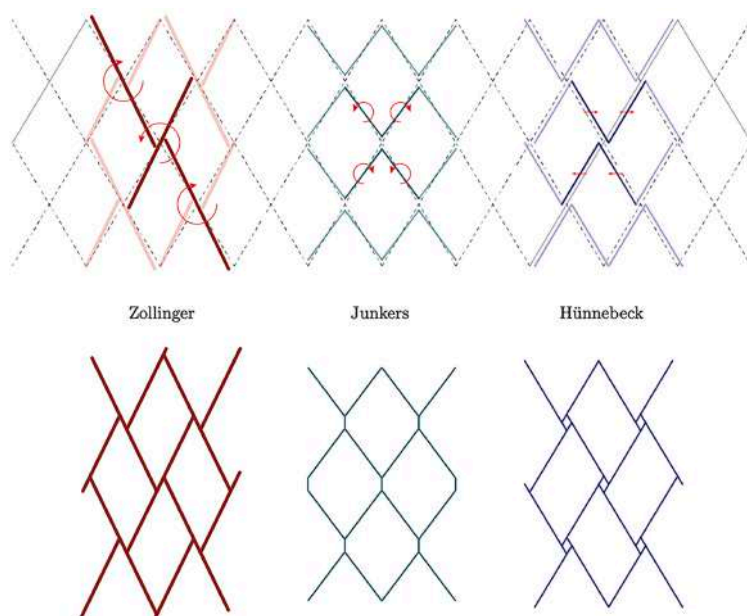
са циљем да се испројектује прототип ламелне конструкције од дрвета са текстилном мембраном.

Текстилне мембране користе се у архитектури павиљона, хала и јавних објеката великих распона примарном улогом као покривача. При димензионисању елемената конструкције, не узимају се у обзир конструктивне могућности текстилних мембрана. У мембранским конструкцијама текстилна мембрана је у стању затезања које је унето силом преднапрезања, због чега утиче на понашање целокупног конструктивног система. На основу нових истраживања утицаја текстилне мембране на челичне носаче (Machacek and Svoboda, 2021; Негуи, 2021) доказано је да она игра велику улогу у конструкцији хала са раванским лучним пуним и решеткастим челичним носачима. У истраживањима је доказано да она смањује бочна извијања примарних носача. У контексту ламелних конструкција, потребно је проверити да ли постављање текстилне мембране утиче на бочна извијања ламела и на који начин утиче на деформације конструкције.

У истраживању са Универзитета у Лајпцигу закључено је да је најнеповољније оптерећење за ламелну конструкцију асиметрично оптерећење снегом. На прототипу ће се испитати деформације конструкције под асиметричним вертикалним оптерећењем за случај са и без мембране, чиме је могуће извести закључке о утицају мембране на деформације ламелне конструкције, иако је постављена само као покривач. Закључци испитивања прототипа представљају једно од научних доприноса докторске дисертације и постављају основ за даље испитивање утицаја текстилне мембране на конструкције.

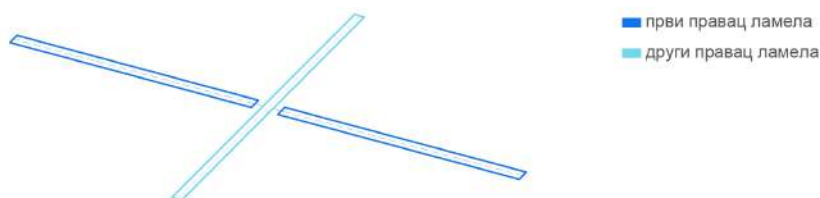
6. Анализа геометрије конструкције

Естетика и експресивност мреже ламела у ламелним конструкцијама допринели су томе да се ове конструкције користе за објекте великих распона у којима конструкција остаје видна. Предност ламелних конструкција је униформност елемената, једноставна монтажа и економичност конструкције у односу на волумен који затвара. Предмет истраживања докторске дисертације су ламелне конструкције од дрвета у форми свода. Сводна форма добијена је из геометрије омотача кружног правог цилиндра. Да би се сачувале предности ламелних конструкције потребно је пронаћи геометријске правилности којима се крећу осе ламела по омотачу цилиндра. Примери кроз историју приказују различите начине решавања грађења склопа, независно од конструктивног материјала. Прва ламелна конструкција, Золингер кров, била је од дрвених дасака постављених вертикално у односу на тло које формирају мрежу паралелограма, а свака ламела је дужине две странеце паралелограма. Веза ламела остваривана је тако што се крај једне ламеле ослања на средину ламеле из другог правца (Peulić, 2002) Ламеле су повезиване једноставним везама са вијком пројектованим тако да је размак између ламела једнак трострукој ширини ламеле. Оваква конструкција везе омогућила је лакшу монтажу вијака, али и вертикално постављање ламела у односу на тло. Ламеле у челичним ламелним конструкцијама инжењера Емила Хунебека и Хуго Јункерса су дужине једне странеце паралелограма, вертикалне су, ближе су постављене и прате цилиндричну површину (Wolf, 2020; Tutsch, 2017; Weller, 2009). На примерима сводних ламелних конструкција кроз историју, ламеле су заротиране или транслиране у хоризонталној равни да би се одржала униформисаност елемената и пратио омотач цилиндра (Слика 6-1).



Слика 6-1 Дијаграмски приказ три типа ламелних сводова и ротација/транслација ламела (горе) са типовима веза (доле), извор: Tutsch, 2020, 106.

На тај начин, ствара се ексцентрицитет у чвору који производи моменат савијања око вертикалне осе ламела за доминантне нормалне силе у конструкцији (Petrović et. al, 2022). Фокус овог истраживања је ламелна конструкција у којој се све осе ламела секу у чвору да би се избегао ексцентрицитет (Слика 6-2). Ламелне конструкције су кроз историју примењиване на геометрију кружног правог цилиндра, док су друге геометрије биле исувише комплексне за прорачун без рачунара. Уколико је геометрија симетрична по две осе, мањи је број



Слика 6-2. Позиција ламела када се оса централне ламеле сече са осом прикључних ламела у једној тачки, извор: аутор

једначина и прорачун је једноставнији (Hoseinzadeh, 1960). Нове ламелне конструкције слободних форми изведене су уз употребу рачунарских софтвера. У савременим истраживањима, напредак у извођењу ламелних конструкција сагледава се на изведеним прототипима (Flex, 2015; Adieste, 2022; Tamke et. al, 2010), али и објектима као што је опсерваторија Тај (Pintos, 2019). Развој ламелних конструкција указао је на могућност примене мреже паралелограма на бројне форме коришћењем савремених алата. Истражују се законитости у различитим геометријама са циљем проналажења најбоље геометријске конфигурације за изградњу дрвених конструкција (Petrović i Пић, 2021; Löschke et al, 2021)

За анализу геометрије користе се графичка метода и нумеричка метода. Представљена графичка метода је ауторска и не може се наћи у литератури. За потребе презентовања геометрије графичком методом коришћени су различити софтвери за изналажење најбољег решења за постављање ламела у ламелној конструкцији. Са циљем да се употпуни анализа геометрије и да се прецизно дефинише геометрија оса ламела, примењена је нумеричка метода и формулисане су параметарске једначине по којима се гради ламелна конструкција на кружном правом цилиндру у којој се осе ламела секу у једној тачки. Дате једначине су упоређене са нумеричком методом приказаном у докторској дисертацији са Техничког универзитета у Минхену (Tutsch, 2020).

Одлука да се и у дисертацији испитује ламелна конструкција добијена из сегмента цилиндра произашла је из циља истраживања да се прошири поље практичне примене овог типа конструкције у складу са примерима конструкције кроз историју и његове најчешће употребе за објекте типа хале. Циљ овог поглавља је да се разумеју правилности грађења ламелне конструкције на цилиндричном омотачу како би могле да се интерпретирају и на другим геометријским закривљеним површима.

6.1 Истраживање геометрије графичком методом

За истраживање у докторској дисертацији основна геометрија којој припада ламелна конструкција од дрвета је цилиндар. Тип цилиндра који дефинише ламелну конструкцију је кружни прав цилиндар, односно геометријско тело које има два иста и паралелна базиса, у овом случају две кружнице у равни. Омотач цилиндра је правоизводна површ са свим истим и паралелним изводницама једнаким висини цилиндра, која је управно растојање између два базиса. (Krašić, 2012)

6.1.1 Надовезивање лучних ламела

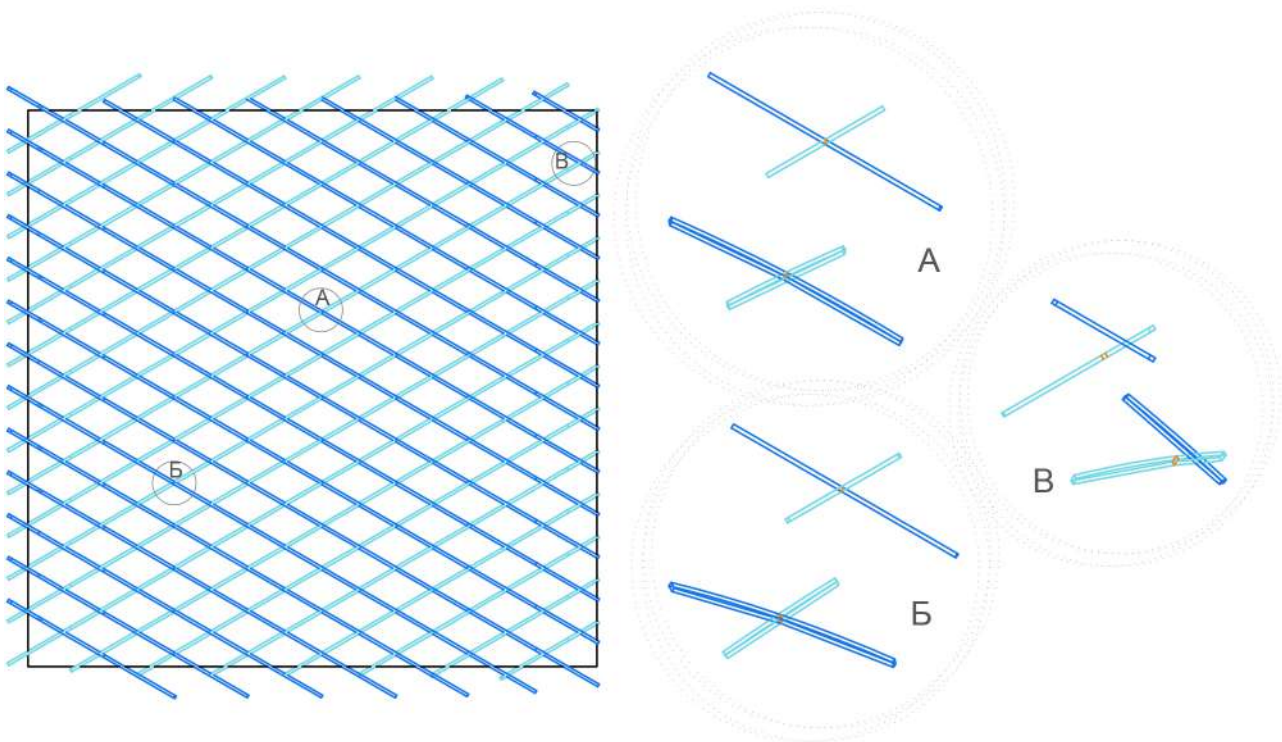
Прва итерација у пројектовању геометрије ламелне конструкције графичком методом произашла је из анализе цртежа чвора у Золингер крову, модификованог тако да прикључне ламеле леже у истој оси (Müller, 2000). Осе ламела се секу у једној тачки, чиме се максимално смањује ексцентрицитет у чвору. Веза три ламеле у чвору остварена је челичним оковом који вијцима остварује везу са ламелама.

На основу улазних података из истраживања које су спровели Шер и Пурномо (Scheer and Purnomo, 1985), и информацијама о димензијама стреле ламелне конструкције и

растајањима између ламела, конструисан је лук једне ламеле. Распон приказане конструкције у њиховом истраживању је 21.5 m, дужина конструкције је 21 m, и стрела лука 6.2 m за сегмент кружнице од 120°. Ламеле су повезане тако да належу једна до друге да би формирале лук у једном правцу и да се ротацијом за 120° добије други правац ламела. Идеја је била да све ламеле стоје вертикално, односно да се лукови ламела само транслаторно померају и тако формирају конструкцију, а вођена је претпоставком да ће се на тај начин са горње стране крова добити раван преко које је једноставно поставити текстилну мембрану. Касније се испоставило да је почетна претпоставка, да ламеле стоје вертикално, била погрешна. Када се постави већи број лукова, уочава се проблем јер се чворови више не налазе на половини средишње ламеле. (Слика 6-3)

На слици 35 приказани су детаљи А, Б и В који су извучени са различитих позиција у оквиру конструкције. Детаљ А приказује једину позицију на којој је могуће поставити ламеле вертикално, а то је слеме конструкције. Детаљ Б налази се за два поља удаљен од детаља А, на 1/4 лука, те није могуће приметити одступање од средине ламеле. Уз ослонац ламелне конструкције, приказан на детаљу В, види се значајно одступање од средине ламеле.

Испоставило се да овај начин конструисања склопа, од појединачног елемента ка целом склопу, не одговара ламелним конструкцијама. Изведен је закључак да је потребно кренути од целине, јер вертикални пресеци кроз цилиндар дају елипсу у пресеку, а из елипсе није могуће добити истоветне ламеле.



Слика 6-3. Основа ламелне конструкције настале графичком методом са издвојеним детаљима, извор: аутор

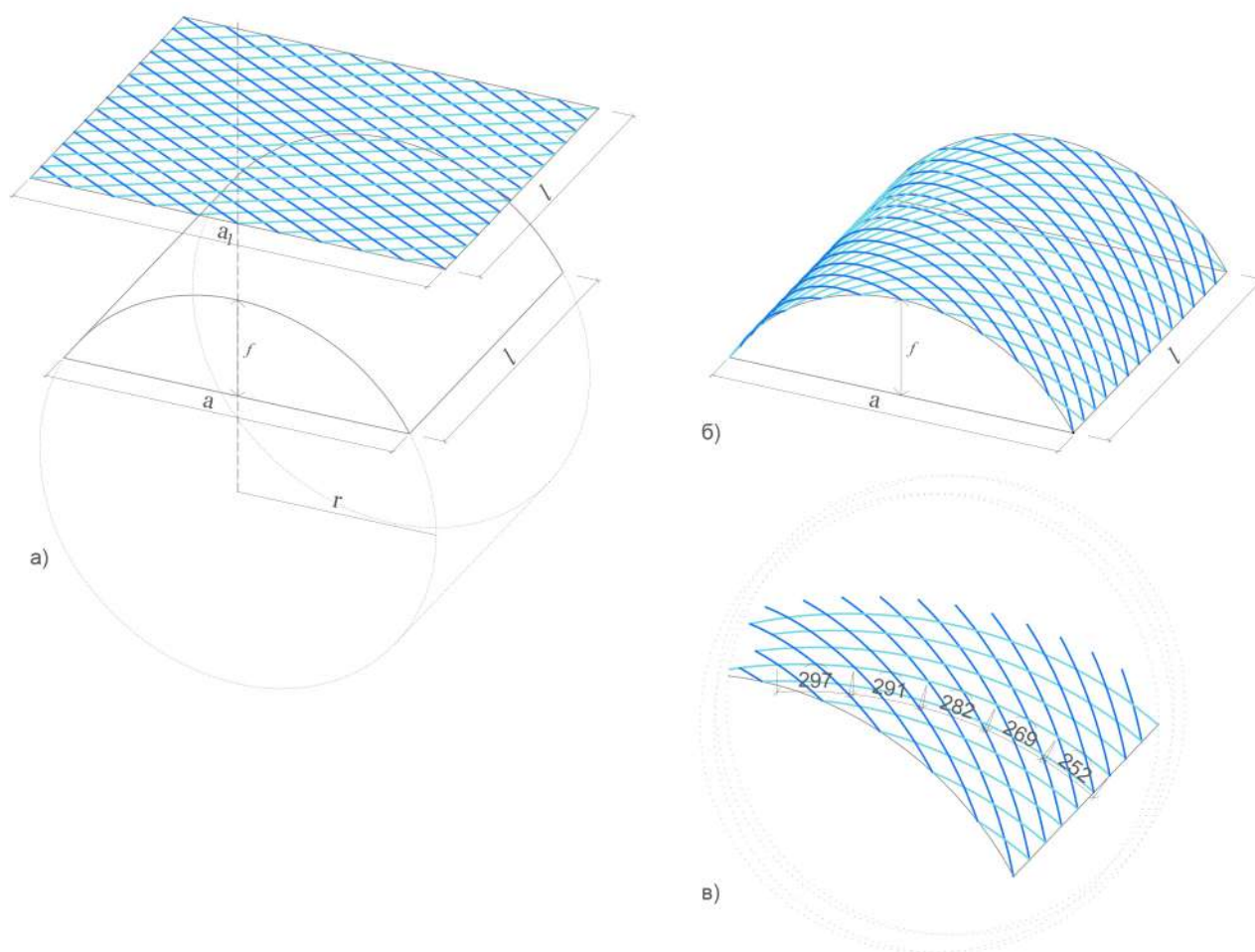
6.1.2 Пројекција мреже на цилиндар

Друга итерација за пројектовање геометрије вођена је идејом да је најједноставнији начин добијања ламела у софтверима за моделовање тродимензионалних модела као што је Rhino (Rhino Software, н.д.). Почетне информације о форми ламелне конструкције преузете су из истраживања која су спровели Шер и Пурномо (Scheer and Purnomo, 1985). Полупречник цилиндра на који се пројектује мрежа је $r = 12.4$ m и дужине $l = 21$ m, док су ивице равни у

којој се налази мрежа дефинисане дужином лука $a_1 = 26$ m, који припада датом цилиндру, распона $a = 21.5$ m и стреле $f = 6.2$ m. Када се дата мрежа пројектује на сегмент цилиндра који ће бити форма конструкције, добије се диспозиција ламела на цилиндру и њихова дужина. Процес је приказан на слици 6-4, уз детаљ конструкције на којем се види да су дужине ламела различите од слемена до ослонца конструкције.

Овај процес добијања геометријске мреже ламела има многе предности. Геометрија је разумљива, због чега ју је једноставно реинтерпретирати и на другим површима. Поступак добијања мреже није дуготрајан, нити је потребно увек употребити исте углове између ламела, чиме је могуће тестирати већи број различитих геометријских конфигурација на тродимензионалним моделима. Ламеле су вертикалне и секу се у чвору креирајући континуалну површину на коју се може поставити велики број различитих покривача.

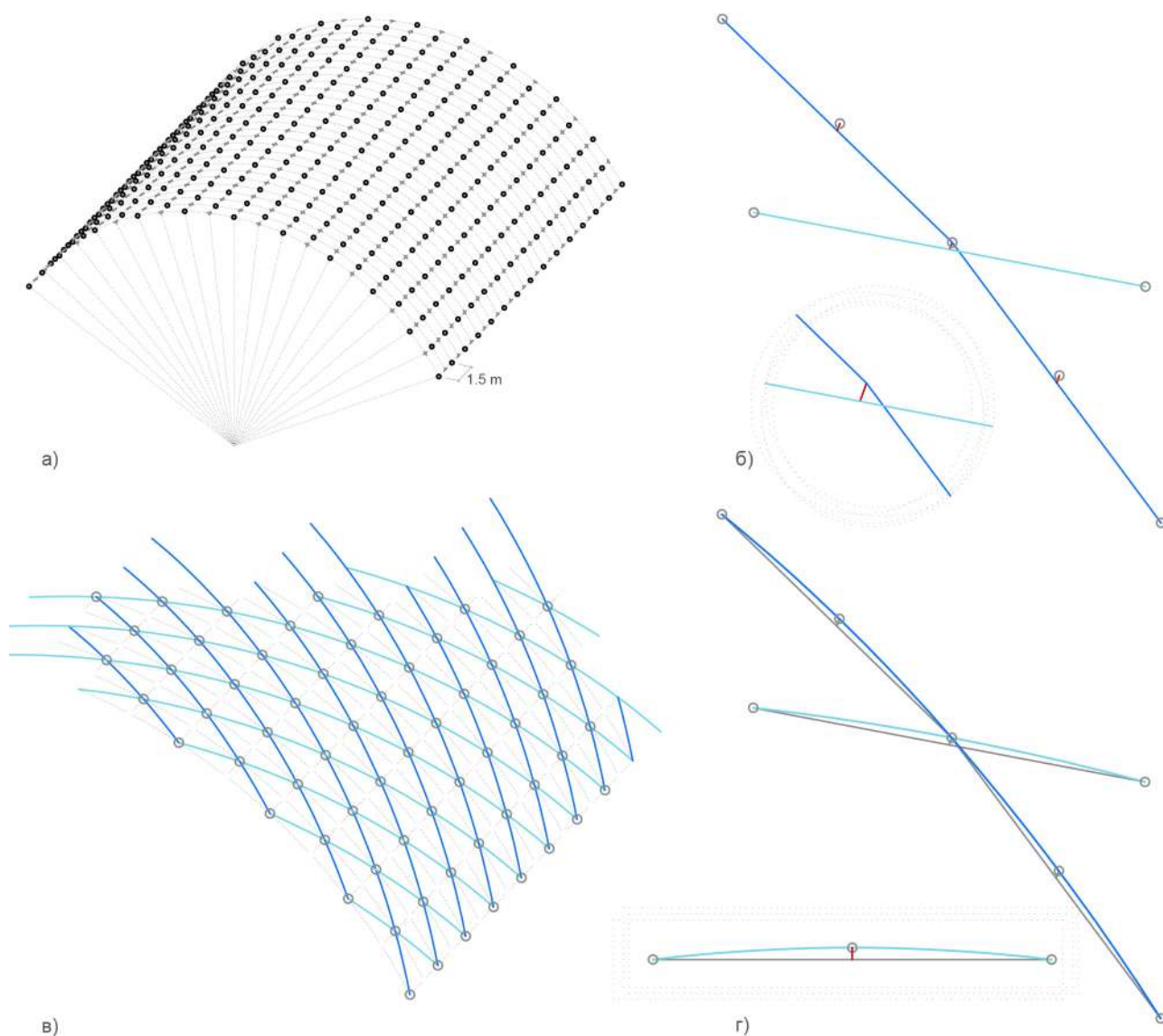
Проблем овог начина пројектовања геометрије ламелне конструкције је што не испуњава критеријум униформности елемената, како ламела, тако ни веза. Од слемена ка венцу смањује се дужина ламела, а угао засека се повећава, тиме стварајући неколико типова ламела и њихових одговарајућих веза. Ова конструкција могла би се једноставно извести ако су ламеле сечене на CNC машинама, смањујући потребно време за њихово обликовање. Употреба великог броја различитих окова од савијених челичних лимова била би нееконична за извођење, али постоји изведени пример у Торонту у Канади. Кровна конструкција за клизалиште је изведена од лучних ламела добијених пројектовањем мреже на цилиндар, а везе су од челичних окова Т-облика. Изведена је 2019. године (BlogTO, н.д.).



Слика 6-4. Пројекција мреже као поступак добијања ламелне конструкције: раван са мрежом која се пројектује на сегмент цилиндра (а), осе ламела у равни омотача цилиндра (б) и детаљ (в), извор: аутор

6.1.3 Подела цилиндра на једнаке сегменте

Трећа итерација водила је од целине ка елементима, са циљем да се добију ламеле истих геометријских карактеристика, чиме ће се постићи униформност елемената и испунити постављени критеријуми. Улазни подаци димензија ламелне конструкције су преузети из експеримента који су спровели Шер и Пурномо (Scheer and Purnomo, 1985). Сегмент цилиндра, који даје форму ламелној конструкцији, подељен је на једнаке делове, радијално по луку на 20 делова и по дужини цилиндра на сваких 0.75 m, да би се добиле тачке у којима се налазе чворови у којима се остварује веза ламела. Ламеле се на тло ослањају на сваких 1.5 m, а чворови су постављени наизменично дуж цилиндра, због чега је било потребно извршити поделу на овако ситне сегменте, који су дали и велики број тачака. (Слика 6-5а) Повезивањем тачака линијама које представљају осе ламела у једном и у другом правцу, добија се мрежа ламела у ламелној конструкцији. Могу се уочити два типа ламела дужине 3 m, као и позиције и укупан број ламела које се налазе по ободу конструкције, а дужине су 1.5 m. Када су осе ламела праве, ламеле се не секу у чворовима. Веза ламела симулирана је кратком линијом која повезује крај ламела једног правца, са средином ламеле из другог правца (Слика 6-5б). Ламеле правих оса формирају структуру сличну наборастим



Слика 6-5. Процес поделе цилиндра на једнаке делове: (а) аксонометрија ламелне конструкције са местима чворова конструкције удаљеним 1.5 m, (б) детаљ осе сваке ламеле и везе ламела, (в) сегмент конструкције са лучним ламелама које се секу у чвору и (г) детаљ лучне ламеле дефинисане распонем и стрелом лука, извор: аутор

конструкцијама, што није била идеја овог истраживања. Закључак је да осе ламела треба да буду лучне и да припадају омотачу кружног правог цилиндра да би све ламеле и везе биле униформне и да би се добила континуална површина за постављање покривача - текстилне мембране.

Лучна оса ламела добијена је из равни коју дефинишу оса праве ламеле и кратка линија која симулира везу ламела. Стрела лука је кратка линија која симулира везу, а распон је права оса ламела (Слика 6-5г). Најпрецизнија геометрија добија се на овај начин, а геометријски модел испуњава основни критеријум - униформност елемената. Све ламеле су исте геометрије и све везе су униформне, омогућавајући масовну производњу елемената.

Закључци изведени графичком методом добијања геометрије ламелне конструкције представљају један од научних доприноса докторске дисертације.

6.2 Нумеричка дефиниција геометрије модела

Графичка анализа геометрије модела показала је да осе ламела прате геометрију завојнице око кружног правог цилиндра. Математичка дефиниција ове просторне криве је хеликс - спирала.

Према Тушу (Tutsch, 2020, слика 6-6), уколико се почне од параметарске једначине кружнице

$$x_k = \begin{pmatrix} y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R \cos \varphi \\ R \sin \varphi \end{pmatrix}$$

из које се добија параметарска једначина за кружни цилиндар

$$x_{kz} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ R \cos \varphi \\ R \sin \varphi \end{pmatrix},$$

може се извести параметарска једначина хеликса са нагибом од $h_s = 2\pi R \tan \beta_s$:

$$x_s = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} (\varphi - \varphi_0) \tan \beta_s \\ \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{pmatrix}.$$

Угао који образују ламеле је константан и може се извести из односа дужине крова - L , дужине лука - B , броја подела цилиндра у X -правцу - m и броја подела цилиндра у Y -правцу - n , (Слика 40) те његова једначина гласи:

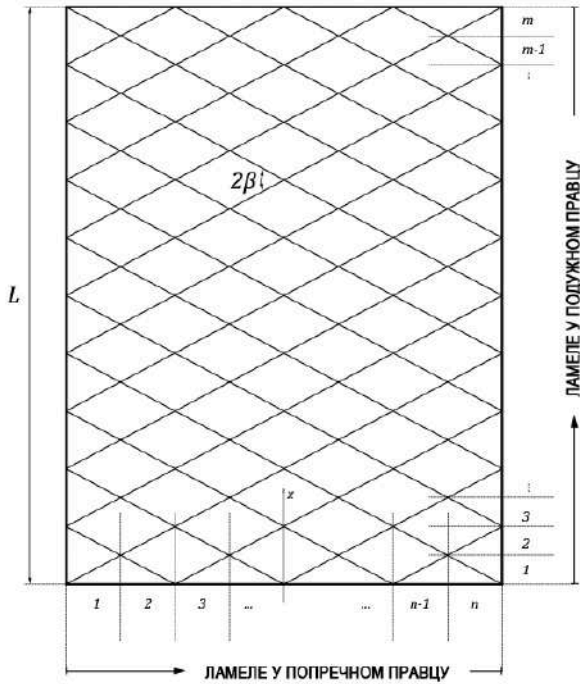
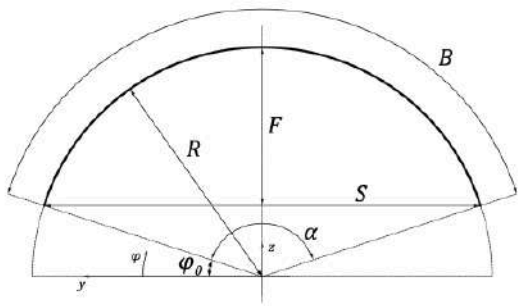
$$\tan \beta_s = \frac{n \cdot L}{m \cdot B},$$

односно

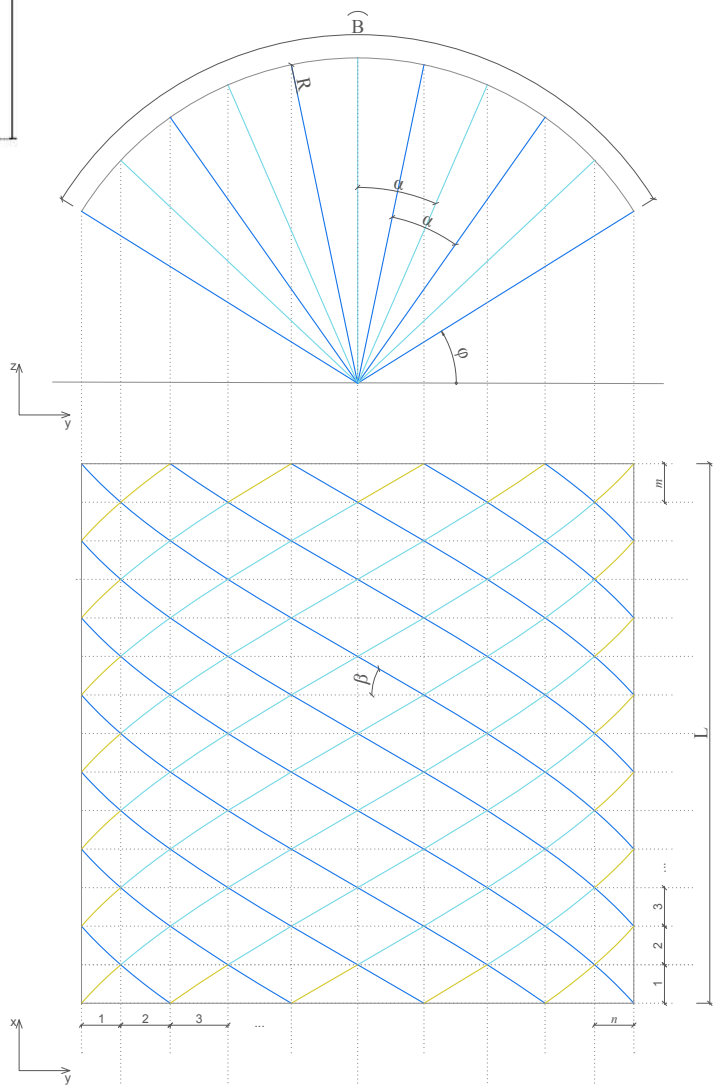
$$\beta_s = \arctan \frac{n \cdot L}{m \cdot B}.$$

Полупречник кривине спирале је

$$R_s = \frac{R}{\cos^2 \beta_s},$$



Слика 6-6. Геометрија ламелне конструкције, извор: Tutsch, 2020, 88.



Слика 6-7. Геометрија ламелне конструкције, извор: аутор

дужина лука спирале,

$$B_s = \frac{B}{\cos\beta_s},$$

а апстрактни угао отварања спирале, који представља интеграл нормалне кривине од почетне до крајње тачке спиралног пресека

$$\alpha_s = \frac{B_s}{R_s} = \frac{B \cdot \cos\beta_s}{R} = \alpha \cdot \cos\beta_s.$$

На основу елемената ламелног крова приказаних на слици 6-7, аутор изводи параметарску једначину две спирале које чине основну геометрију ламелног крова:

$$x_{s1} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{h}{\alpha} \cdot \varphi \\ R \cos \left(\varphi + \frac{k_1}{2} \cdot \alpha \right) \\ R \sin \left(\varphi + \frac{k_1}{2} \cdot \alpha \right) \end{pmatrix} \text{ и}$$

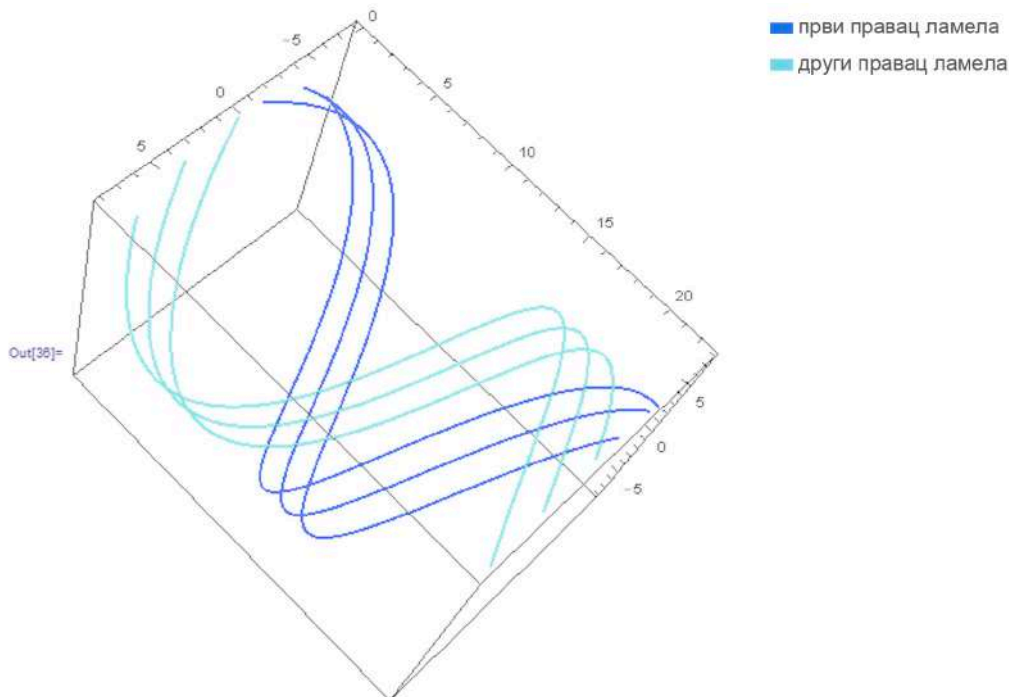
$$x_{s2} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{h}{\alpha} \cdot \varphi \\ R \cos \left(\varphi + \frac{k_2}{2} \cdot \alpha \right) \\ -R \sin \left(\varphi + \frac{k_2}{2} \cdot \alpha \right) \end{pmatrix}$$

у којима су:

h - дужина коју пређе завојница да би формирала једну ламелу и износи $h = L/m$,

α - угао који пређе завојница да формира једну ламелу и износи $\alpha = B/n$,

φ - променљива која дефинише сегмент завојнице (у случају ламелне конструкције прототипа сегмент од 30° - 150°),



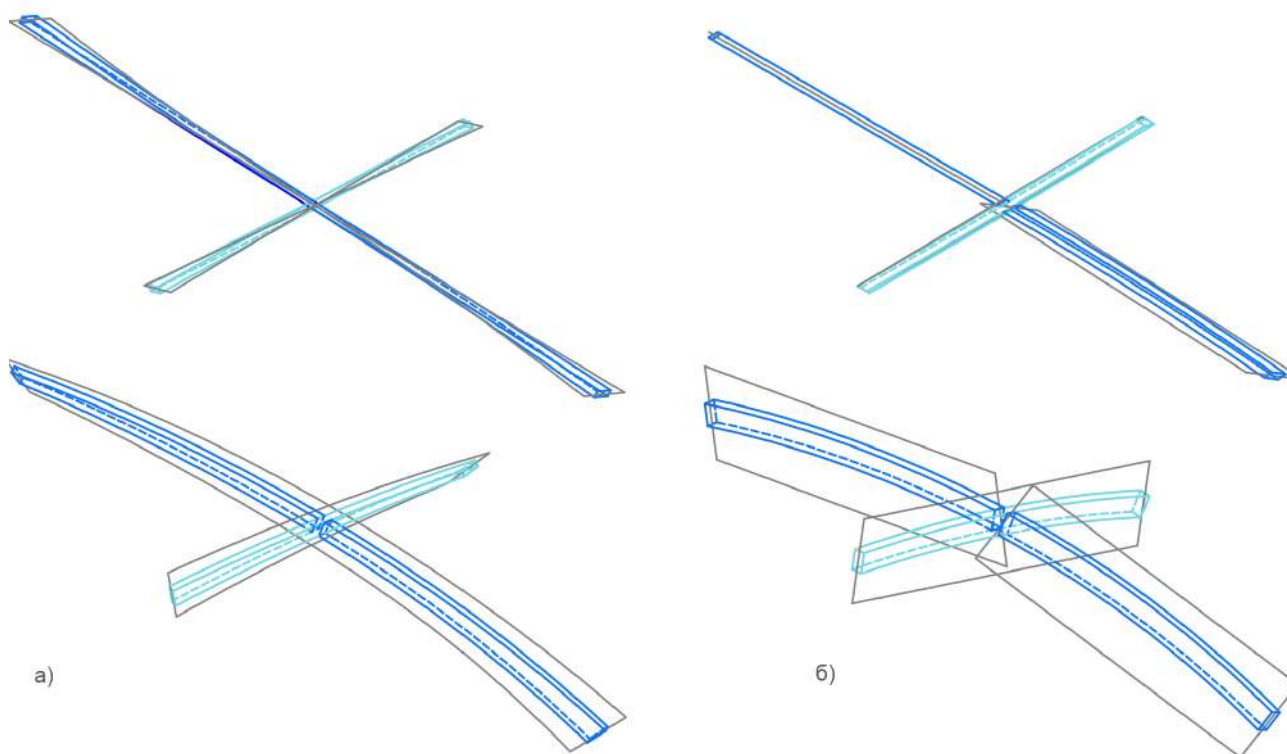
Слика 6-8. Графичка презентација параметарских једначина завојница из програма Wolfram Mathematica.

k_1 - коефицијент који је цео паран број,
 k_2 - коефицијент који је цео непаран број.

Коефицијенти k_1 и k_2 дефинишу померање спирале једног правца у односу на други за половину дужине ламеле да би се добила геометрија у којој се свака ламела надовезује на средину следеће.

Једначина спирале према Тушу (2020) дефинише само сегмент спирале који одговара сегменту омотача цилиндра, не узимајући у обзир правац спирале из другог правца који треба да буде транслиран за половину дужине ламеле. За разлику од параметарске једначине спирале које дефинише Туш (2020), параметарске једначине аутора дефинишу осу сваке ламеле и међусобни однос ламела у оквиру ламелне конструкције. Аутор дефинише дужину ламеле као сегмент спирале користећи променљиву φ , док коефицијенти k_1 и k_2 омогућавају да се ламеле надовезују једна на средину ламеле из супротног правца. На тај начин, ауторске параметарске једначине могуће је применити и на друге закривљене површи мењајући параметре цилиндричне површи, а да се оствари пројектована правилност грађења ламела. Нумеричка дефиниција сводне ламелне конструкције геометрије кружног правог цилиндра један је од најзначајнијих научних доприноса докторске дисертације.

Када се примењује математичка дефиниција спирале, чак и њен бескрајно мали сегмент није раванска крива. Да би се применила геометрија за производњу ламела, потребно је извршити симплификацију сваког сегмента спирале у равански лук који представља једну осу ламеле. Овај поступак симплификације је најрационалнији, јер тако три тачке осе сваке ламеле припадају омотачу цилиндра и дефинишу раван ламеле. Сама ламела је апроксимирана као раванска, уместо да буде тордирана око своје осе. Из тог разлога, када се свакој лучној оси ламеле дода димензија попречног пресека, може се видети одступање, односно блага ротација у чвору (Слика 6-9).



Слика 6-9. Аксиометријски приказ ламела које се секу у чвору: (а) када ламеле прате завојницу, према нумеричком методу и (б) вертикалне равни у којима се налазе ламеле служе да прикажу ротацију у чвору која се јавља као последица геометрије добијене графичком методом, извор: аутор

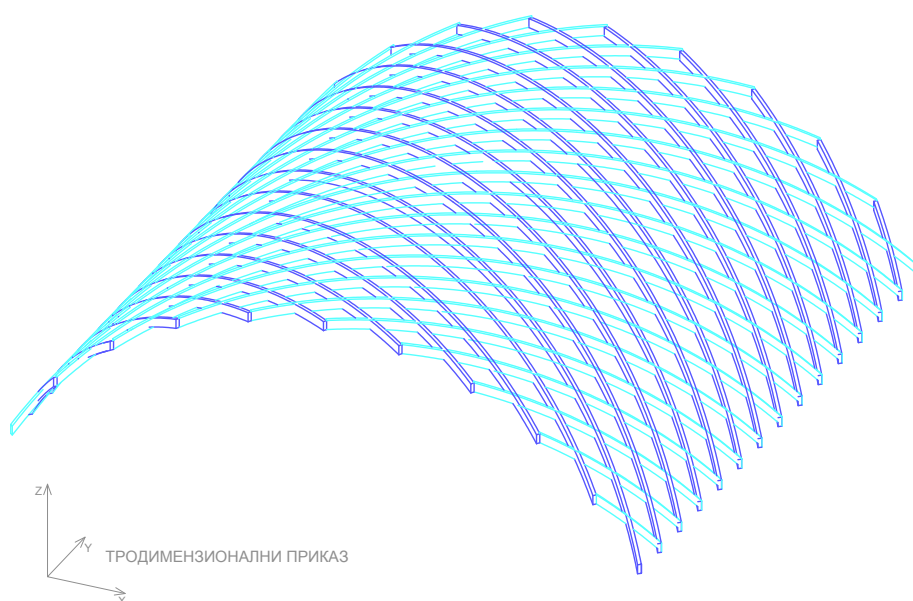
7. Анализа елемената конструкције

7.1 Геометрија и карактеристике ламела

Ламела је линијски, основни градивни елемент ламелне конструкције. Мале је дужине у односу на распон конструкције и формира мрежасту структуру паралелограма. У Золингер крову ламеле су прави штапови са залученом горњом ивицом и монтирају се тако што се крај једне ламеле ослања на средину ламеле из другог правца. Све ламеле су вертикалне, а њихов облик даје крову форму преломљеног лука из два сегмента кружног правог цилиндра. Дужине оса ламела су једнаке, осим по ободу конструкције, где је дужина осе ламела половина дужине оса типских ламела. Крајеви ламела обликовани су у односу на позицију ламела у конструкцији - средишње ламеле, ламеле на венцима и слемене ламеле.

Прва ламелна конструкција - Золингер кров формирана је ламелама од **монолитног дрвета** ширине попречног пресека 2.5 cm или 5 cm, у зависности од распона крова и дужине самих ламела (Peulić, 2002). У чвору се сустичу три ламеле - једна централна ламела и две прикључне, које су размакнуте за троструку ширину ламеле. Када се изврши подела цилиндра на једнаке сегменте и тачке по омотачу цилиндра се повежу правим линијама, крај ламеле из једног правца се мимоилази са средином ламеле из другог правца (поглавље 6.1.3). У Золингер крову, овај проблем је решен обликовањем горње ивице ламеле као лука, чиме се постиже већа висина попречног пресека на средини ламела, на месту где се остварује веза (Слика 2-4). Веза ламела у Золингер крову је остварена вијцима.

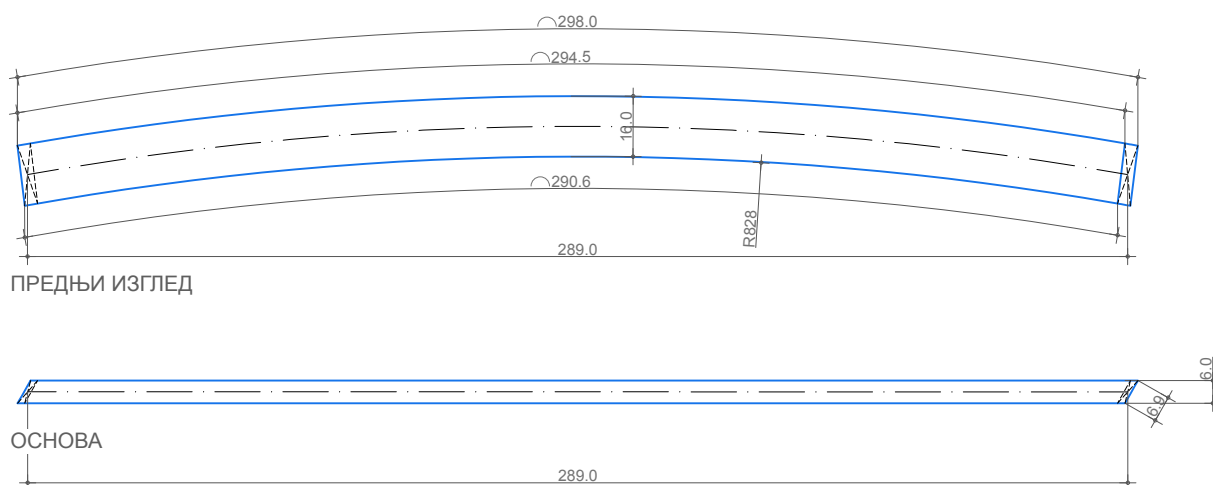
Анализом геометрије по којој се крећу ламеле по омотачу цилиндра, када се осе секу у чвору, изведени су закључци да су могућа два решења ламелне конструкције и обликовања ламела. **Пројектовањем мреже на цилиндар** добијају се различити сетови дужина оса ламела, али ламеле остају вертикалне, као у Золингер крову. Осе ламела су лукови који припадају омотачу цилиндра, а свака ламела је обликована као **лук од лепљеног ламелираног дрвета**. На основу геометријског модела (поглавље 6.1.2) закључено је да дужине оса ламела расту од слемена ка венцу, док им се истовремено повећава угао засека. Слемене ламеле су вертикалне и постављене су паралелно са тлом, док ламеле уз венац имају



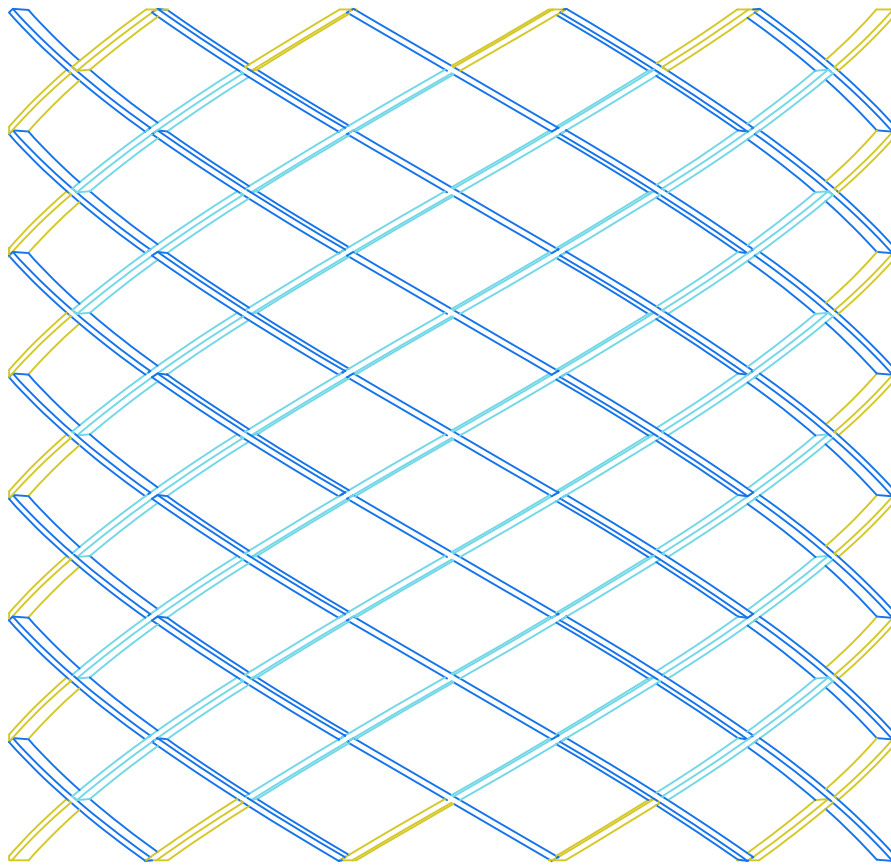
Слика 7.1-1. Модел са вертикалним ламелама добијен пројекцијом мреже на цилиндар, извор: аутор

нагиб од 30-60°, зависно од сегмента омотача кружног правог цилиндра на који се пројектује мрежа. (Слика 7.1-1) Нагиб ламеле условљава угао засецања крајева ламела, као и обликовање веза ламела. На примеру кровне конструкције за клизалиште у Торонту (BlogTO, н.д.) може се видети да је за везу примењена веза са челичним оковима Т-облика, у којој облик челичног лима прати нагиб засека ламеле.

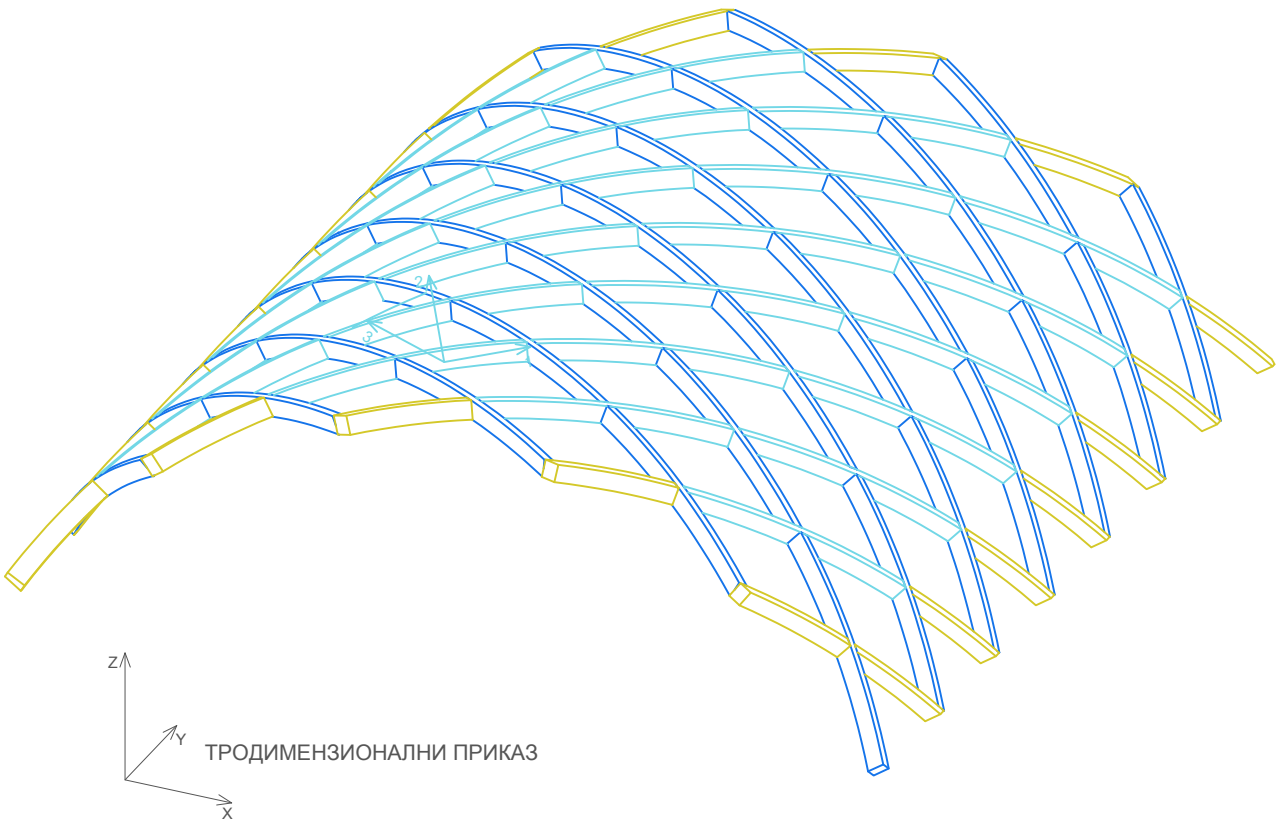
Поделом цилиндра на једнаке сегменте добијају се осе ламела истих дужина, те је овај тип ламела усвојен за пројектовање прототипа, јер задржава предности оригиналне ламелне конструкције - Золингер крова. Идеална крива по којој ламеле треба да се крећу да им се осе секу у чвору и да креирају континуалну површину крова за постављање покривача је просторна крива - спирала. Уколико би се изводила ламелена конструкција у којој су просторне криве осе ламела, свака појединачна ламела би била иста, и тордирана око своје подужне осе (Слика 6-9). Симплификација просторне спирале у равански лук доприноси једноставнијем извођењу ламела, које остају униформне. За прототип конструкције пројектоване су ламеле попречног пресека 6/16 cm, које се изводе као **лукови од лепљеног ламелираног дрвета** чије се осе секу у чвору. На слици 7.1-2 приказана је једна издвојена раванска лучна типска ламела, којих има у највећем броју у оквиру конструкције. Крајеви ламела засечени су под углом тако да целом површином засека налажу једна на другу на месту где се остварује веза. Везу ламела је потребно пројектовати тако да одговара ротацији у чвору која се јавља као последица симплификације осе ламеле. Разлике у ламелама јављају се на основу њихове позиције у конструкцији, те се према дужини разликују ламеле по ободу конструкције (половина дужине оса осталих ламела), док се по засеку на крајевима ламела разликују од места на коме остварују везу са другим конструктивним елементима. (Слика 7.1-3)



Слика 7.1-2. Приказ димензија једне типске ламеле за прототип ламелне конструкције у основи и изгледу, извор: аутор



ОСНОВА

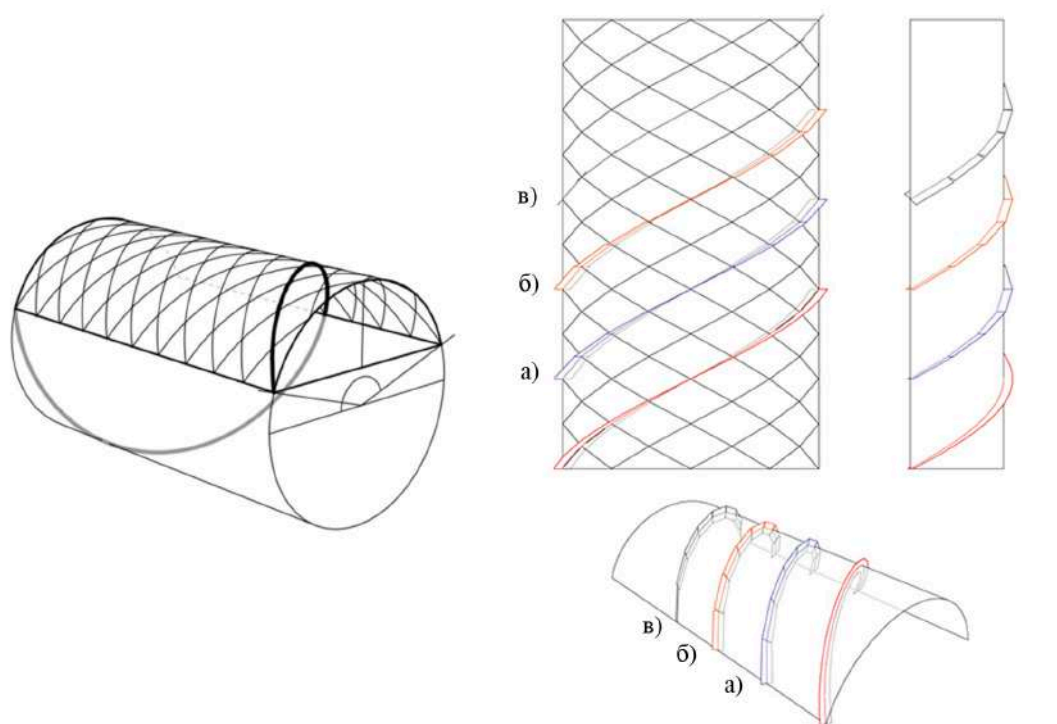


Слика 7.1-3. Модел за прототип са заротираним ламелама добијен поделом цилиндра на једнаке сегменте, извор: аутор

7.2 Везе између ламела

У оквиру овог поглавља презентовани типови веза између ламела са циљем да се постојеће пројектоване везе ламела у дрвеним ламелним конструкцијама анализирају, систематизују и да се на основу добијених закључака предложи ауторска веза која ће се користити за извођење прототипа ламелне конструкције од дрвета са текстилном мембраном.

Веза ламела зависи првенствено од геометрије конструкције и облика ламела. Ламеле у оквиру ламелне конструкције могу да прате спиралу по омотачу цилиндра и да буду тордиране (Слика 7.2-1а), појединачне ламеле у равни али прате спиралу (Слика 7.2-1б) или вертикалне (Слика 7.2-1в). Анализом геометрије презентованој у поглављу 5, тражена је правилност по којој се ламеле крећу по цилиндричној површи формирајући ламелну конструкцију. На основу анализе је закључено да осе ламела треба да прате спиралу да би биле униформне и да би им се осе секле у чвору. Такође је закључено да је потребна симплификација оса ламела због извођења ламелне конструкције, тако да свака ламела буде у својој равни. Симплификацијом криве добија се ротација у чвору у којем се остварује веза између ламела (Слика 6-9).



Слика 7.2-1. Геометрија криве за једнаке удаљености чворова између ламела је спирала око омотача кружног правог цилиндра (лево). Три могућности постављања ламела тако да прате криву по омотачу цилиндра. Тип а) приказује торзију ламела, тип б) су раванске ламеле које прате спиралу и тип в) су вертикалне ламеле. На овом цртежу ламеле су дужине једне стране паралелограма (десно), извор: Tutsch, 2020, 95,102.

За ламелну конструкцију сводне форме, настале из омотача кружног правог цилиндра, у којој ламеле формирају мрежу паралелограма, пројектовање веза је захтевно. Постојеће везе између ламела у дрвеним конструкцијама су у овом поглављу анализирани и систематизовани на основу следећих параметара:

- (1) ексцентрицитета у вези,
- (2) носивости везе у односу на унутрашње силе у ламелама,
- (3) броја елемената који формирају везу,

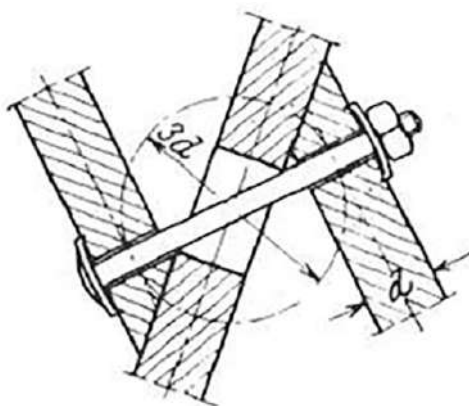
- (4) једноставности извођења везе у односу на ламелну конструкцију и
- (5) адаптабилности на цилиндричну површ.

Савремени аутори који се баве истраживањем веза у ламелним конструкцијама од дрвета, наводе као закључак да је потребно смањити ексцентрицитет у вези који се појављује у вези ламела у Золингер крову, као и да осе ламела треба да се секу у чвору (Franke et al, 2017; Herzog et al, 2004). Анализом и систематизацијом постојећих веза између ламела, могу се сагледати њихове предности и недостаци из којих су изведени закључци за пројектовање ауторске везе реализоване у оквиру прототипа у докторској дисертацији.

7.2.1 Типови веза дрвених ламела

Геометрија Золингер крова је из сегмената омотача кружног правог цилиндра. Да би ламеле биле постављене вертикално, потребна је ротација вертикалне равни ламела, тако да прате спиралу (Слика 7.2-1в). Ламеле у Золингер крову су од монолитног дрвета, ширине до 5 cm и променљиве висине попречног пресека (Peulić, 2002). Веза дрвених елемената кровних конструкција била остварена вијцима, Золингер је требао да превазиђе два проблема: спиралну криву која прати омотач цилиндра и потребна растојања за постављање вијака.

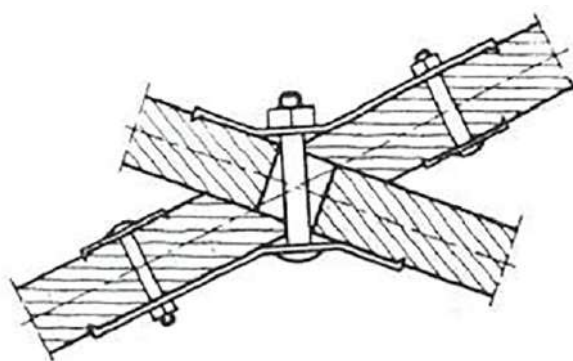
Золингер веза је пројектована са два вијка који пролазе кроз три ламеле. Једна ламела је централна, а прикључне ламеле прате правац под оштрим углом у односу на централну ламелу и налазе се на растојању једнаком трострукој ширини ламеле, као што је приказано на слици 7.2-2 (Müller, 2000). Растојање између прикључних ламела у чвору се користи за постављање вијака (Franke et al, 2017), истовремено решавајући проблем геометрије. Све ламеле су вертикалне, а њихово међусобно растојање дозвољава да прате спиралу око омотача цилиндра, остајући истих дужина у оквиру ламелне конструкције (Tutsch, 2002). У зони у којој се засечена ивица прикључне ламеле ослања на средишњу ламелу јављају се трансверзалне силе у ламели и моменти савијања око вертикалне осе ламеле. Нормална сила се из прикључне ламеле преноси на средишњу посредством вијака. Предност ове везе је њена једноставна монтажа и могућност појединачне замене ламела по потреби (Franke et al, 2017). Ексцентрицитет у чвору узрокује моменат савијања у зони у којој је ослабљен попречни пресек. Ово је превазиђено повећањем висине попречног пресека која у исто време надомешта разлику у висинама на којима се налазе чворови, као последица геометрије крова (погледати Слика 6-5б).



Слика 7.2-2. Золингер веза у којој су ламеле одвојене за троструку ширину ламела (3d), извор: Müller, 2000, 14.

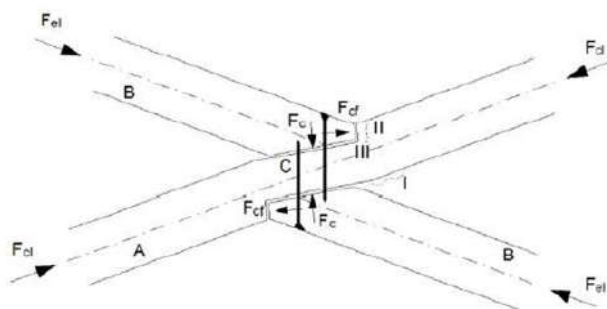
Веза у Золингер крову је пројектована у складу са технолошким достигнућима тог доба, али је омогућила једноставност извођења конструкције, униформне елементе веза и естетичну конструкцију.

Модификација Золингер везе коју приказује Милер (Müller, 2000) првенствено се фокусира на смањење ексцентрицитета у вези. Осе свих ламела се у овој вези секу у једној тачки, а веза је остварена челичним оковом и вијцима. Овај тип везе није приказан у осталој литератури која се бави ламелним конструкцијама, а у Милеровој књизи није описана, иако је дата илустрација. Као што се сагледава на слици 7.2-3, може се извести закључак да не постоји ексцентрицитет у вези, чиме је унапређена Золингер веза. Са друге стране, овај чвор је потребно додатно прилагодити да би могао да се примени на ламелни свод геометрије омотача кружног правог цилиндра. Сlike 7.2-1а и 7.2-1б приказују могуће решење торзије ламела, док слика 6-9 приказује ротацију у чвору која се јавља као последица симплификације спирале за потребе пројектовања раванских ламела.



Слика 7.2-3. Модификација Золингер везе, извор: Müller, 2000, 14.

Савремена истраживања ламелних конструкција од дрвета која је спровео *FLEX* тим са Универзитета примењених наука из Лајпцига (Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur) водила су ка пројектовању **тесарске везе** за ламелну конструкцију названу *micro step joint* (Слика 7.2-4.). Растојање оса између прикључних ламела је мање него у Золингер вези и користи се цела површина попречног пресека ламела да би се пренела оптерећења. Смањењем растојања оса прикључних ламела, смањен је и ексцентрицитет у вези. За осигурање везе користе се вијци за дрво који се прорачунавају према вредности трансверзалне силе која се јавља у чвору. Попречни пресек ламеле је ослабљен засецима на средини сваке ламеле, у зони где се јавља затезање као последица момента савијања око вертикалне осе ламеле (Franke et al, 2017).



Слика 7.2-4., *Micro step* веза са приказаном критичном зоном III у којој може да дође до лома, извор: Franke et al, 2017, 3.

FLEX тим је тестирао Золингер везу и *micro step joint* на напоне притиска који су доминантни у ламелној конструкцији. Носивост *micro step* везе је 80% већа него Золингер везе. Такође је показала и равномернију дистрибуцију напона у попречном пресеку. Типичан механизам лома Золингер везе је у зони спојних средстава у којој се јављају пукотине дуж влакана дрвета. Веза *micro step* је изазвала лом ламеле на месту ослабљења попречног пресека. Због компарације веза, истраживање је спроведено за прикључне ламеле на растојању једнаком трострукој ширини ламеле. Истраживачи су извели закључак да је могуће побољшати перформансе *micro step* везе тако што би ламеле биле ближе, чиме би се смањило ексцентрицитет и повећала носивост (Franke et al, 2017). За потребе ове везе, ламеле би требало обликовати на *CNC* машини.

Тесарска веза из Велике Британије још је један у низу решавања веза ламела у дрвеним ламелним конструкцијама. Мрежа ламела примењена је на једноставни двоводни кров, а веза ламела решена је као тесарска веза на чеп. Средина сваке ламеле је исечена у



Слика 7.2-5. Тесарска веза примењена за двоводни кров. Лева слика приказује остварену везу ламела, а на десној се налази детаљ средишње ламеле са постављеном једном прикључном ламелом, извор: Bath Bespoke.

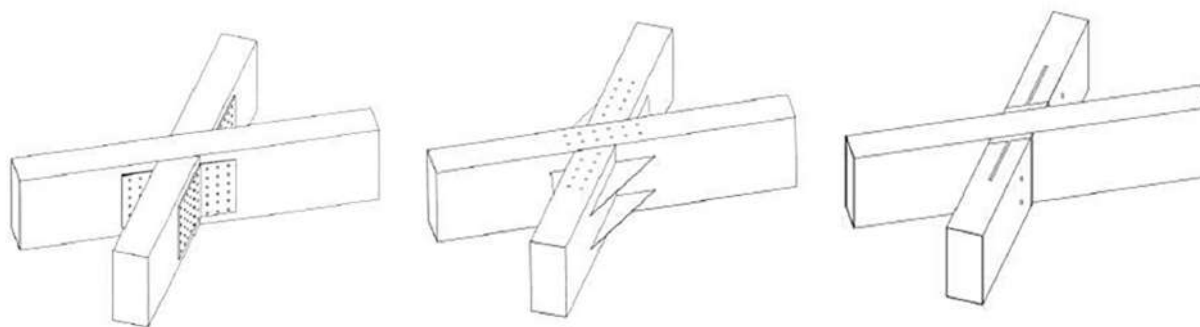
облику правоугаоника са заобљеним угловима у коју се обострано постављају крајеви прикључних ламела (Слика 7.2-5). Овај тип везе је једноставан и ефикасан, али само за равне површи. Уколико би се оваква веза применила на цилиндричну површ, углови под којима би се постављале ламеле били би сувише компликовани за извођење. Аутори ове везе наглашавају да је било потребно прецизно извести сваку појединачну везу, због чега су сегменти крова монтирани у радионици, а затим пренети на градилиште (Bath Bespoke, н.д.). Не сме да постоји зазор између елемената зато што се сва оптерећења преносе по обиму рупе. Представљена тесарска веза из 2019. године прати савремене тенденције ка зеленој градњи, без емисије угљен диоксида, али су потребне додатне модификације да би се комерцијално користила.

У Атласу дрвених конструкција (Herzog et al, 2004) представљене су три везе са челичним лимовима у којима се осе свих ламела секу у чвору.

Веза са оковом од савијених челичних лимова остварена ексерима (Слика 7.2-6а) најсличнија је модификацији Золингер везе која је представљена у Милеровој књизи (Müller, 2000). Конструисан је оков од савијених челичних лимова који прате углове ламела и који су везани за ламеле ексерима. Материјали елемената везе су јасно одвојени. Челични оков је префабрикован на основу пројектованог угла између ламела и није потребно додатно обликовање ламела да би се остварила веза. Са друге стране, није могуће остварити везу ексерима када је угао мањи од 90°, због чега је потребна модификација везе. Једно од могућих решења је позиционирање окова од савијених челичних лимова само са тупих углова који образују ламеле, као у модификацији Золингер везе (Müller, 2000).

Веза са хоризонталним челичним лимовима остварена ексерима (Слика 7.2-6б) конструисана је од хоризонталних лимова који су провучени кроз отворе у ламелама, а затим су повезани ексерима закуцаним са горње стране ламела. Предност овог типа везе је у томе што је остварена крута веза. За мрежу ламела геометрије паралелограма (четвороугао није стабилна форма у равни), крута веза значи да није потребно додавати елементе за остваривање стабилности конструкције као што су затеге или спрегови.

Веза са челичним оковом Т-облика (Слика 7.2-6в) једна је од најприменљивијих веза за дрвене конструкције. Оваква веза конструише се од два челична лима, заварена тако да формирају Т-облик. Пројектована веза приказана у Атласу дрвених конструкција се поставља на крајеве ламела тако да је лим у средишту попречног пресека ламеле и не види се са спољне стране. На тај начин се штити лим од агресивних утицаја средине док се истовремено не нарушава изглед конструкције. Челични оков остварује везу са ламелама челичним трновима. Овако пројектована веза лако се модификује и прилагођава било којем углу између ламела. Експериментална испитивања овог типа везе показују да је она еластично укљештење (ен. *semi-rigid connection*) и тако би требала да се анализира (Johanides et al, 2022a; 2022b). Носивост везе лако се може модификовати променом дебљине челичних лимова у вези, као и бројем вијака или трнова. Везе са челичним лимовима имају већу носивост од веза само са спојним средствима. Експеримент за аксијално напрегнуте елементе везане оковом од челичних лимова у којима је веза остварена трновима потврдио је њихову велику носивост и универзалност примене (Šmak, 2016).



а)

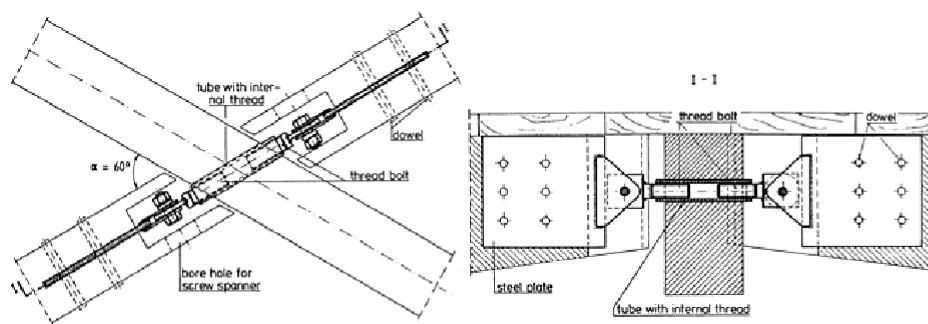
б)

в)

Слика 7.2-6. Аксонометријски прикази веза са челичним лимовима: а) веза са оковом од савијених челичних лимова остварена ексерима, б) веза са хоризонталним челичним лимовима остварена ексерима и в) веза са челичним оковом Т-облика, извор: Herzog et al, 2004, 246.

Предлози веза са челичним лимовима, аутора Атласа дрвених конструкција, елиминишу ексцентрицитет који се јавља у чвору, али је за примену на цилиндричне ламелне конструкције потребно модификовати везе да би се прилагодиле једностраној закривљености цилиндричног омотача. Одабир одговарајуће везе зависи од пројектоване конструкције, потребне носивости везе и доминантних сила у чворовима конструкције. У поређењу са Золингер везом, ове везе је теже формирати, али оне имају боље перформансе. Везе са хоризонталним челичним лимовима и са оковом Т-облика захтевају додатно засецање ламела за постављање везних лимова због чега је потребно више времена за припрему елемената за извођење ламелне конструкције.

Инжењери Шер и Пурномо са Техничког универзитета у Берлину истраживали су ламелне сводове од дрвета геометрије кружног правог цилиндра (Scheer and Purnomo, 1985). Резултати спроведених испитивања на прототипу конструкције, заједно са закључцима изведеним из нумеричких модела навели су их да пројектују другачију везу ламела у складу



Слика 7.2-7. Основа (лево) и пресек (десно) комплексне веза ламела са челичним лимовима у којој се веза ламела остварује вијцима са навојем, извор: Scheer and Purnomo, 1985, 418.

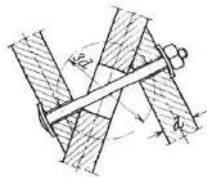
са тадашњим прописима за везе у дрвеним конструкцијама. Предлажу везу која је подесива и која се може демонтирати, као што је приказано на основи и пресеку на Слици 7.2-7 (Scheer and Purnomo, 1985). **Веза са челичним лимовима и вијком са навојем** конструисана је из великог броја елемената. Крај сваке ламеле засечен је тако да омогући постављање челичних лимова правоугаоног облика везаних челичним трновима за ламеле. За ту челичну плочицу заварен је челични лим троугаоног облика који је зглобно везан једним вијком за вијак са навојем. Прикључне ламеле остварују везу са централном ламелом преко вијка са навојем који се монтира у цев са навојем у средини централне ламеле. Пројектована веза је зглобна.

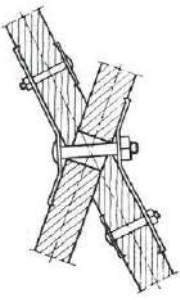
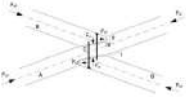

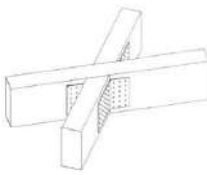
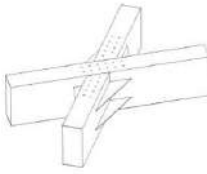
Предности предложене везе аутора Шер и Пурнома су једноставна монтажа и могућност демонтаже. Спољашњи изглед везе не утиче на целокупни изглед ламелне конструкције од дрвета, јер се сагледавају само челични трнови, као и код везе са челичним лимовима Т-облика. Недостатак ове везе је сложеност израде елемената и формирања окова за везу, посебно сечења и обликовања ламела за чију је израду потребно више времена него за остале везе које су претходно представљене.

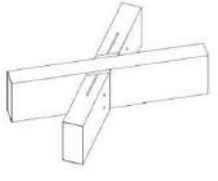
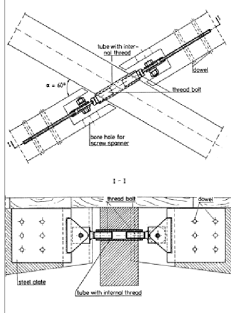
7.2.2 Систематизација постојећих веза ламела у ламелним конструкцијама од дрвета

Табела која се налази у оквиру овог поглавља представља постојеће везе ламела, пројектованих и изведених, према следећим критеријумима: ексцентрицитету у вези, типу везе, елементима везе, предностима и недостацима. Циљ табеле је систематизација постојећих веза да би се извукли закључци за пројектовање нове везе за прототип ламелне конструкције од дрвета са текстилном мембраном. Ексцентрицитет у везама је посматран на основу доминантних, нормалних сила у конструкцији. Моменат ексцентрицитета јавља се око вертикалне осе ламела.

Табела 2. Систематизација веза ламела у дрвеним ламелним конструкцијама

	Графички приказ везе	Ексцентрицитет ¹	Тип везе	Елементи везе	Предности	Недостаци
Золингер веза		$e = 3d$, веза може да прихвати $M_e = F \cdot e$	зглобна	вијци	Једноставна монтажа, једноставни елементи везе, крајеви ламела су косо засечени и пробушене су рупе за вијке - није потребно додатно обликовање.	Ексцентрицитет, велика померања у чвору, мала носивост.

	Графички приказ везе	Ексцентрицитет ¹	Тип везе	Елементи везе	Предности	Недостаци
Модификација Золингер везе		$e = 0$	зглобна	вијци, оков од савијених челичних лимова	Нема ексцентрицитета, једноставни елементи везе, симетрична, постављање вијака са стране тупих углова између ламела олакшава монтажу, ламеле су засечене на крајевима и пробушене су рупе за вијке - није потребно додатно обликовање.	Припрема савијених лимова.
Micro step joint		$e = 1d$, веза може да прихвати $M_e = F \cdot e$	зглобна	вијци за дрво	Мали број елемената везе.	Ексцентрицитет, смањење површине попречног пресека ламела, потребно додатно обликовање ламела, дуга припрема за монтажу.
Тесарска веза на чеп		$e = 1d$, веза може да прихвати $M_e = F \cdot e$	еластично укљештење	дрвени трнови	Естетика везе.	Ексцентрицитет, смањење површине попречног пресека ламела, ламеле морају бити прецизно обликоване да се не би јавили зазори у вези, потребни су дрвени трнови за обезбеђење везе.
Веза са оковом од савијених челичних лимова		$e = 0$	еластично укљештење	вијци, оков од савијених челичних лимова	Нема ексцентрицитета, нема смањења површине попречног пресека, ламеле су засечене на крајевима и пробушене су рупе за вијке - није потребно додатно обликовање.	Није могуће остварити везу ексерима са стране оштрих углова између ламела, осим ако се не повећа челични лим.
Веза са хоризонталним челичним лимовима		$e = 0$	крута	вијци, челични лимови	Нема ексцентрицитета, позиција челичних лимова одређује позицију прикључних ламела, чинећи монтажу једноставнијом и брзом.	Потребно је додатно обликовање ламела за позиционирање хоризонталних плочица.

	Графички приказ везе	Ексцентрицитет ¹	Тип везе	Елементи везе	Предности	Недостаци
Веза са челичним оковом Т-облика		$e = 0$	еластично укљештење	вијци, оков од заварених челичних лимова	Нема ексцентрицитета, позиција челичног окова одређује позицију прикључних ламела, чинећи монтажу једноставнијом и брзом.	Потребни су додатни елементи везе да би се монтирала на централну ламелу.
Веза челичним лимовима и вијком са навојем		$e = 0$	зглобна	навојна шипка, цев са навојем, вијци, челичне плоче	Нема ексцентрицитета.	Велики број елемената, потреба за додатним обликовањем ламела, мала контактна површина између прикључних и централне ламеле, компликована монтажа везе.

¹ d - ширина ламела
F - нормална сила у ламелама

Табела систематизације веза је показала да нова веза треба да буде пројектована тако да се осе ламела секу у чвору да би се елиминисао ексцентрицитет. У табели је јасно назначено да нема ексцентрицитета у везама са челичним лимовима, а да постоји у Золингер вези и тесарским везама. Ако се пројектује сакривена веза, основни елементи везе треба да се налазе у оквиру ламеле, а да је веза остварена вијцима или трновима. Такође је потребно задржати предности да су елементи везе јасно раздвојени и да је једноставна префабрикација елемената везе.

Анализом веза приказаних у табели систематизације могу се извести закључци за пројектовање везе за прототип ламелне конструкције од дрвета са текстилном мембраном геометрије сегмента омотача кружног правог цилиндра. Везе су анализирани према следећим параметрима:

1. ексцентрицитет везе,
2. носивост везе,
3. број елемената - комплексност извођења везе,
4. једноставност формирања везе и
5. адаптабилности на цилиндрични омотач.

Већина представљених веза претпоставља позицију ламела у којој се њихове осе секу у чвору са намером да се елиминише ексцентрицитет који се јавља у ламелама у првој ламелној конструкцији - Золингер крову. Доминантне силе у ламелама су аксијалне силе, чија је последица појава момента савијања око вертикалне осе ламела када су прикључне ламеле удаљене. Највећи ексцентрицитет од приказаних веза има веза у Золингер крову. Следе тесарске везе где је растојање између ламела смањено са троструке на ширину једне ламеле. Веза *micro step* је испитана и доказана је већа носивост везе него у Золингер крову, која је последица смањења ексцентрицитета (Dijoux, 2017). Ексцентрицитет у вези се елиминише постављањем оса ламела тако да се секу у чвору, као што је приказано у осталим анализираним везама.

Савремене везе, приказане у Атласу дрвених конструкција (Herzog et al, 2004), веће су носивости од веза у Золингер крову због челичних лимова који формирају везу. Везу са

оковом од савијених челичних лимова везану ексерима за ламеле није могуће направити према датом аксонометријском приказу у књизи, јер ексере није могуће закивати са стране оштрог угла између ламела. Овој вези је потребна модификација, али је треба размотрити као могућност приликом пројектовања везе за прототип јер ју је једноставно модификовати да се прилагоди омотачу цилиндра. Везу са челичним оковом Т-облика такође је једноставно адаптирати за потребне углове између ламела који се формирају кретањем ламела по омотачу цилиндра (приказано на слици 6-9). Аксонометријски приказ везе са челичним оковом Т-облика не узима у обзир везу лимова за централну ламелу, што је потребно унапредити приликом примене ове везе. Ове две везу су еластична укљештења (Johanides, 2022; Šmak, 2016), док је веза са хоризонталним челичним лимовима крута веза.

Посматрајући и анализирајући приказане везе, може се закључити да је веза вијцима у Золингер крову најједноставнија за монтажу. Елементи који формирају везу су јасно раздвојени - ламеле од дрвета и стандардизовани вијци којима се остварује веза. Приликом пројектовања кровне конструкције, идеја инжењера Золингера је била да радници могу једноставно да монтирају ламеле, чиме би се скратила дужина извођења (Winter and Rug, 1992). Припрема ламела за Золингер кров се ради у радионици где се према шаблону обликују од елемената од монолитног дрвета ширине до 5 cm, а вијци су стандардизовани, те није потребна дуга израда елемената веза. Остале везе је потребно претходно направити у радионици, а затим пребацити на градилиште, што је у складу са савременим стандардима. Челични лимови за оков се претходно секу, савијају и/или варе у радионици, а затим се на лицу места остварује веза ексерима или вијцима за ламеле од дрвета. Везе са хоризонталним челичним лимовима и са оковом Т-облика је потребно прво монтирати на средину ламеле, а затим поставити на одговарајућу позицију у оквиру конструкције, чиме се олакшава процес монтаже јер веза диктира позицију прикључних ламела. Веза челичним лимовима и вијком са навојем је најкомплекснија зато што има највећи број елемената и припрема елемената везе захтева време. Ламеле је потребно засећи, бушити и обликовати, а челичне елементе је потребно припремити у радионици, исећи, пробушити и заварити, а затим све монтирати на градилишту. Тесарска веза на чеп (Bath Bespoke, н.д.) од елемената има само дрвене трнове за ојачање везе, али је обликовање ламела комплексно. Припрема модула за конструкцију обавља се у радионици и захтева велики утрошак времена у односу на остале предлоге веза. Тесарска *micro step* веза има мали број елемената, као и веза у Золингер крову, али је потребно више времена за обликовање ламела (Dijoux, 2017). Прецизност засецања ламела је могуће постићи исецањем и обликовањем ламела на *CNC* машинама, што би такође утицало и на смањење времена за производњу елемената конструкције.

У односу на критеријум адаптабилности на цилиндричну површину, већину приказаних веза би требало модификовати. Веза у Золингер крову је пројектована са растојањем између прикључних ламела једнаком трострукој ширини ламеле, које је омогућило вертикално постављање ламела и решило геометрију крова. У овој вези јавља се ексцентрични моменат око вертикалне осе ламела, који је модификацијом приказаном у Милеровој књизи елиминисан постављањем ламела тако да им се осе секу у чвору (Müller, 2000). Као што је закључено у анализи геометрије, осе ламела треба да прате спиралу око омотача цилиндра да би све биле униформне, а да им се осе секу у чвору. Симплификацијом просторне криве - спирале, у раванску криву - лук, добија се ротација у чвору (Слика 6-9). Веза ламела која се пројектује за прототип - сводну ламелну конструкцију од дрвета са текстилном мембраном, потребно је да прати ротацију ламела у чвору, што захтева да се било која од презентованих веза препројектује или да се испројектује нова веза ламела. У приказаним везама, челични лимови треба да буду заротирани тако да прате ротацију ламела, а равни засецања у

тесарским везама би морали да се прилагоде равнима које дефинише геометрија ламелне конструкције.

Најједноставнија модификација је ротација челичног лима који формира Т-облик. Челични лимови у окуву су постављени скоро независно од позиције ламела. Ротацијом једног челичног лима према ротацији ламела не мења се концепт пројектоване везе, као ни њен изглед у оквиру ламелне конструкције. Исто важи и за везу челичним лимовима и вијком са навојем, зато што је челичним лим постављен у вертикалној оси прикључне ламеле, а цев са навојем се налази у средини централне ламеле. Проблем ове везе је засецање крајева ламела да се прилагоде ротацији у чвору, додатно компликујући већ комплексну везу. Време извођења би се скратило ако се дужина ламеле смањи, засецањем крајева под правим углом, чиме би веза постала видна. Челични лимови у вези са хоризонталним челичним лимовима пролазе истовремено кроз све три ламеле у чвору, тако да не може да се модификује сама веза. Ову везу је могуће применити ако се ламеле засецају под углом тако да у њих могу да се поставе челични лимови. За тесарске везе, потребно је прецизно испројектовати равни сечења ламела да би се уклопиле у чвору. Сечење и обликовање ламела за везу са хоризонталним челичним лимовима је комплексно и захтева велику прецизност, тиме повећавајући време потребно за израду елемената конструкције. Производњом ламела на *CNC* машинама постоји могућност да се овај проблем превазиђе.

Анализом и систематизацијом веза закључено је да су везе са оковом од челичних лимова најповољније зато што нема ексцентрицитета, не редукује се површина попречног пресека, једноставне су за адаптацију и монтажу.

7.2.3 Предлог чворне везе ламела за прототип

На основу закључка анализе геометрије за прототип конструкције, да се ламелна конструкција састоји из раванских лучних ламела које прате омотач кружног правог цилиндра, новопроектвана веза треба да прати ротацију ламела у чвору (Слика 6-9). Предлог нове везе базира се на везама са челичним оковом Т-облика и са оковом од савијених челичних лимова (Herzog et al, 2004). Нова веза је пројектована тако што се један челични лим монтира на средину ламеле, док су друга два постављена са спољњих страна прикључних ламела и заварена за монтирани лим. Лимови са спољних страна прикључних ламела прате ротацију која се јавља у чвору (Слика 7.2-8). Позиција вијака дефинисана је Еурокодима 3 и 5 (EN 1993-1-1:2005; EN 1995-1-1:2012). Нова веза ламела биће примењена за прототип конструкције.

Веза ламела је прорачуната према Еурокоду 5 (EN 1995-1-1:2012). Веза је пројектована као двосечна веза челик-дрво са танким челичним лимовима, $t = 3 \text{ mm}$, постављеним бочно у односу на дрво и вијцима М12, класе 5.6.

Карактеристична носивост вијака у спојној равни по спојном средству треба да се узме као најмања вредност добијена из следећих израза, за танке челичне плоче као бочни елемент двосечне везе, према типовима лома J и K:

$$F_{v,Rk} = 0.5 \cdot f_{h,a,k} \cdot t \cdot d$$

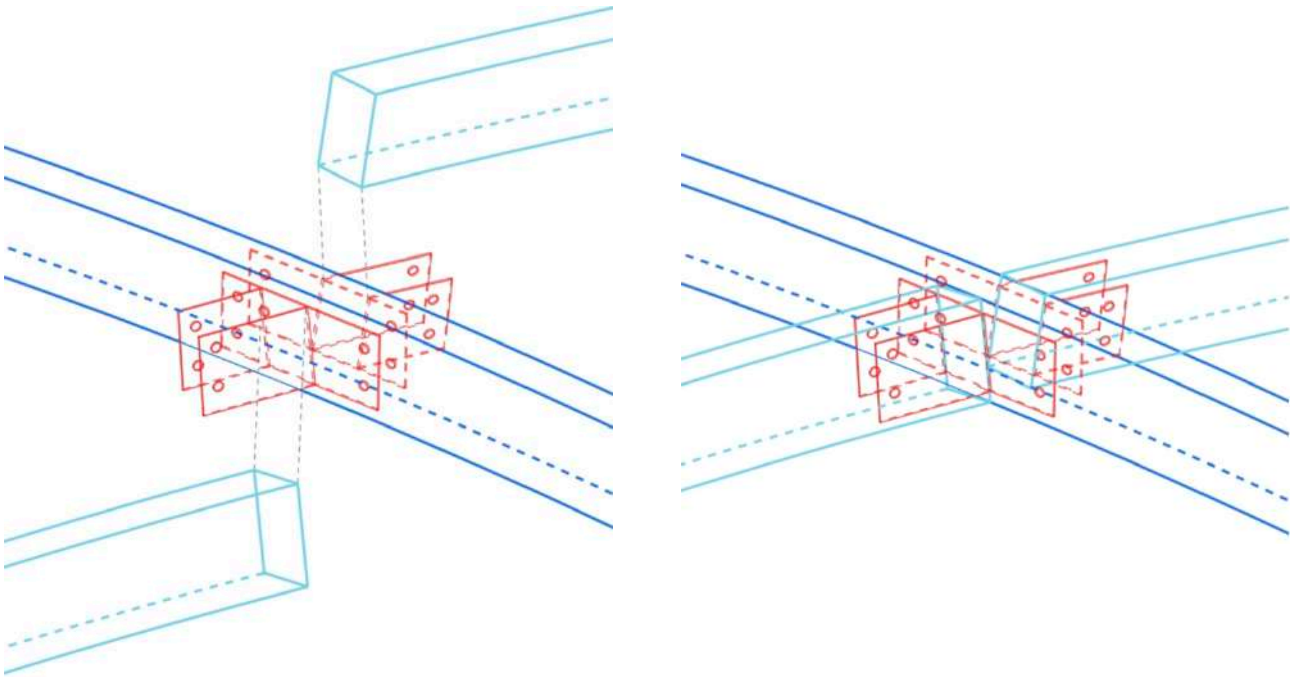
$$F_{v,Rk} = 1.15 \cdot (2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,a,k} \cdot d)^{0.5}$$

у којима су:

$f_{h,a,k}$ - карактеристична вредност чврстоће при притиску по омотачу рупе,

$M_{y,Rk}$ - карактеристична вредност момента течења спојног средства,

d - пречник спојног средства.



Слика 7.2-8. Аксонометријски приказ новопројектоване везе: експлодирана аксонометрија (лево) и повезане ламеле (десно), извор: аутор

Карактеристична вредност чврстоће при притиску по омотачу рупе рачуна се према следећем изразу:

$$f_{h,\alpha,k} = f_{h,0,k} / (k_{90} \cdot \sin^2\alpha + \cos^2\alpha),$$

где су:

$f_{h,0,k}$ - карактеристична вредност чврстоће при притиску по омотачу рупе паралелно влакнима према формули

$f_{h,0,k} = 0.082 \cdot (1 - 0.01 \cdot d) \cdot \rho_k$, у којој је карактеристична вредност запреминске масе дрвета $\rho_k = 450 \text{ kg/m}^3$, и износи 32.472 N/mm^2 ,

кофицијент $k_{90} = 1.35 + 0.015 \times d$ за меко дрво који износи 1.53 ,

α - угао између резултујуће силе и правца влакана за ову конструкцију износи 5.84° ,

и на основу којих се добија вредност

$$f_{h,\alpha,k} = 32.295 \text{ N/mm}^2.$$

Карактеристична вредност момента течења спојног средства зависи од пречника вијка $d = 12 \text{ mm}$ и вредности чврстоће на затезање $f_{u,k} = 560 \text{ N/mm}^2$, рачуна се према изразу:

$$M_{y,Rk} = 0.30 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2.6}$$

и износи

$$M_{y,Rk} = 107443.6 \text{ N/mm}^2.$$

На основу карактеристичних вредности чврстоће при притиску по омотачу рупе и момента течења спојног средства добија се минимална вредност носивости вијка у спојној равни по спојном средству

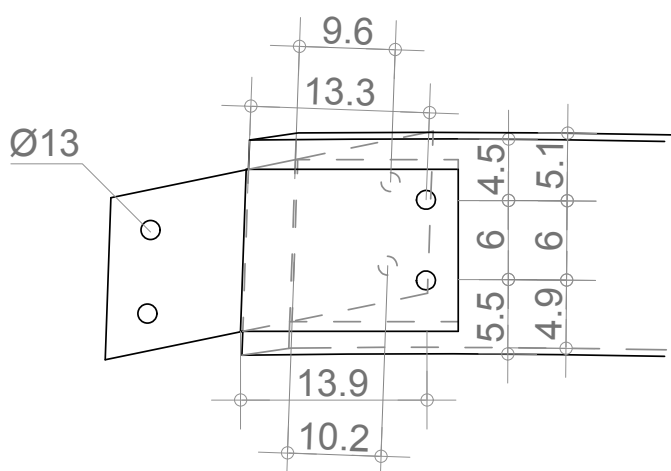
$$F_{v,Rk} = 1.15 \cdot (2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d)^{0.5} = 10494.45 \text{ N.}$$

Укупна сила коју прихвата вијак у једној смичућој равни рачуна се према изразу:

$$N = 0.80 \cdot F_{v,Rk} / 1.30 = 12916.25 \text{ N,}$$

а за двосечну везу, у две смичуће равни, вредност те силе износи

$$N = 25832.5 \text{ N.}$$



Слика 7.2-9. Позиција рупа за вијак на челичном окуву,
извор: аутор

број вијака у реду у правцу влакана (n)	1
просечно растојање (a ₁) од оптерећене ивице (10+14)/2	12
број редова	2
број ефективних вијака у правцу влакана (n _{ef})	$n^{0.9} \cdot (a_1/13d)^{1/4} = 0.9365$
ефективна носивост у правцу влакана	$N \cdot n_{ef} / n = 12096.25 \text{ N}$
укупна носивост у правцу влакана	$2 \cdot n_{ef} \cdot N = 24192.5 \text{ N}$
	24.19 kN

Доминантне силе у ламелним конструкцијама од дрвета су аксијалне силе. Прорачуном сила у прототипу конструкције провериће се носивост пројектоване везе. На слици 6.2-9 приказана је веза у аксонометрији са позицијом рупа за вијак и њиховим међусобним растојањима, као и растојањима од ивица ламеле.

7.3 Текстилна мембрана и њена веза са ламелном конструкцијом за прототип

Мембранама се у архитектури подразумевају различити видови опни - покривачи и фасадне облоге, као и конструктивни елементи мембранских конструкција. Мембране могу бити од различитих материјала и деле се на две групе - текстили и фолије (Seidel, 2009).

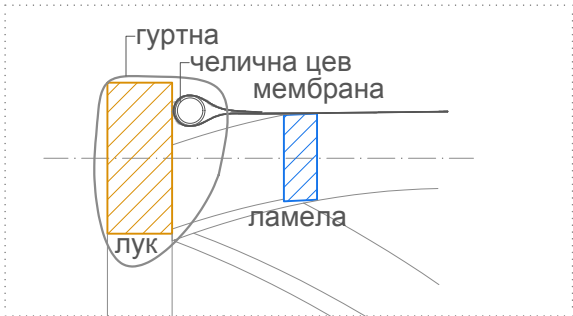
У докторској дисертацији било је потребно одабрати одговарајући покривач ламелне конструкције, а истраживањем литературе и изведених објеката, истакла се текстилна мембрана, својом белом бојом и транспарентношћу, као и због могућности постављања на различите форме. Идеја у овом истраживању је да покривач ламелне конструкције додатно истакне и нагласи мрежу ламела, што се постиже текстилном мембраном.

Тип мембране која ће се поставити као покривач прототипа је **текстилна мембрана од полиестерских влакана са PVC премазима**. Површина мембране треба да обухвати површину између ослонаца конструкције и између лукова. Због својстава текстилне мембране и великог издужења након уношења силе преднапрезања, потребно је предвидети да пројектована површина мембране буде мања од површине која се покрива. Издужење мембране пројектује се према модулу еластичности мембране, који се добија биаксијалним тестовима посебно за сваку текстилну мембрану.

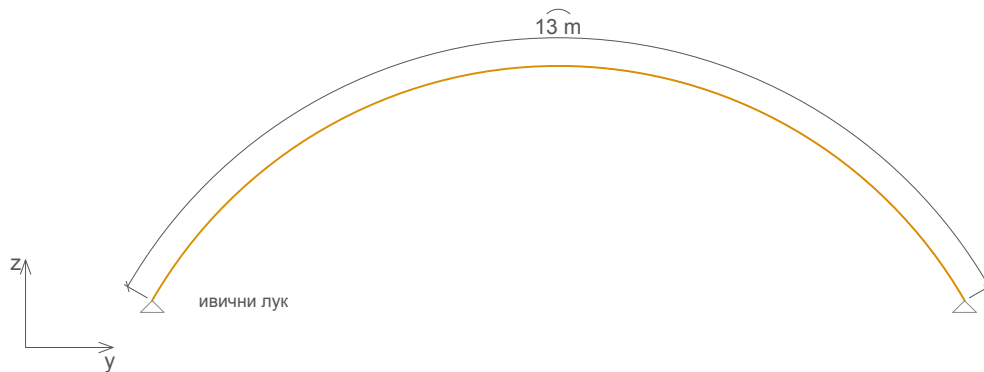
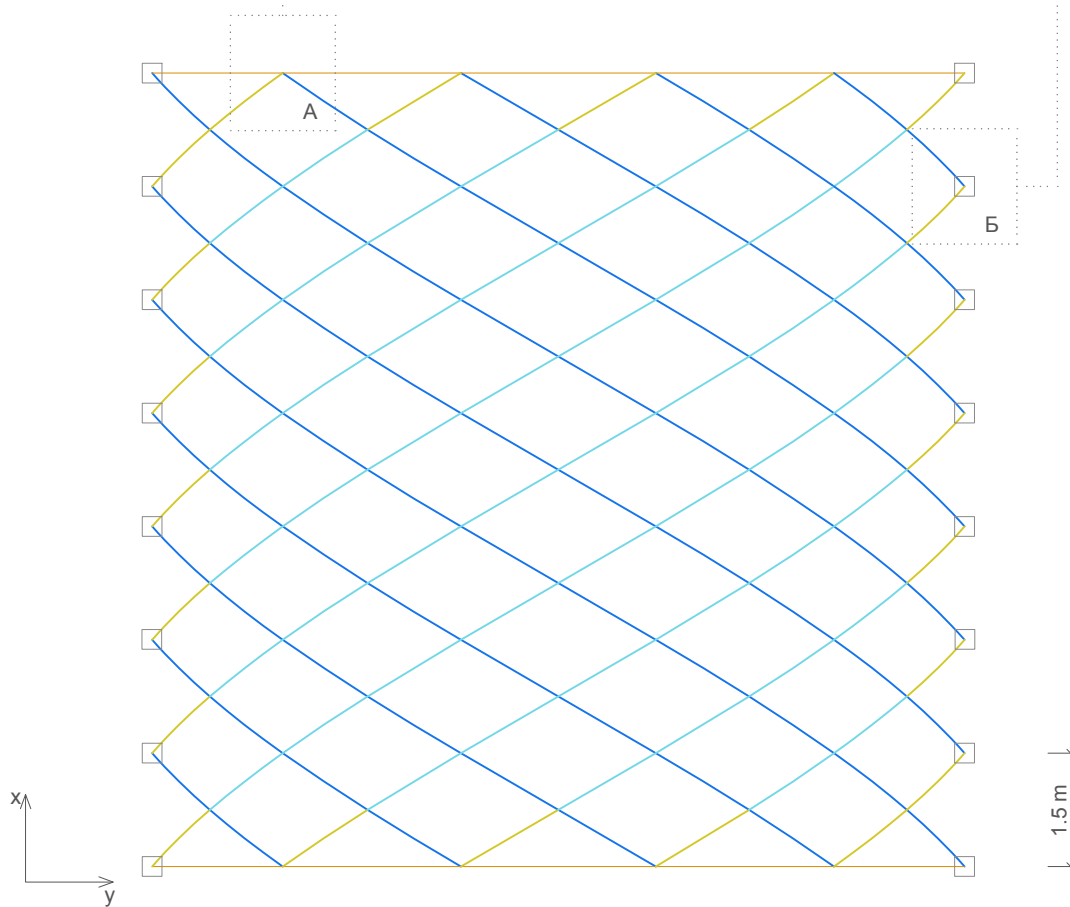
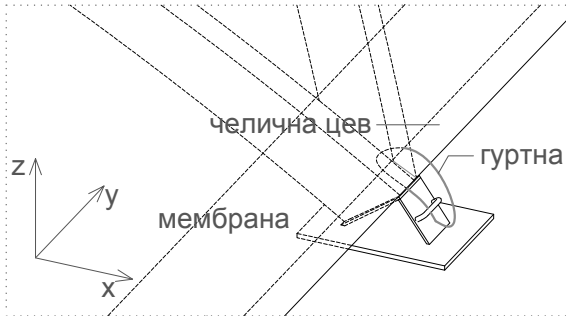
Као последица пројектовања ламелне конструкције да се све осе ламела секу у чвору, и да се оса ивичних лукова сече са осом ламела, формирано је место са унутрашње стране ивичног лука где може да се оствари веза мембране са ламелном конструкцијом (погледати Детаљ А, слика 7.3-1). Овај детаљ је конструкцији дао и другачији визуелни идентитет, јер ивични лукови остају видни, те се сагледава цела дрвена конструкција испод покривача.

За потребе прототипа, текстилна мембрана је пројектована са једноставним везама. Предвиђени су цепови за челичне цеви, чија би функција била да позиционирају текстилну мембрану на предвиђену позицију. Цепови се формирају савијањем мембране по ободу, а затим варењем (Seidel, 2009; Knippers et al, 2011). Сила преднапрезања се у мембрану уноси гуртнама, а преноси се на ивичне лукове, односно директно у ослонце конструкције, као што је приказано у детаљима на слици 7.3-1. На прототипу конструкције, гуртне су остављене као елементи везе текстилне мембране и ламелне конструкције.

Детаљ А - позиција мембране уз лук и ламеле



Детаљ Б - веза мембране са ослонцем



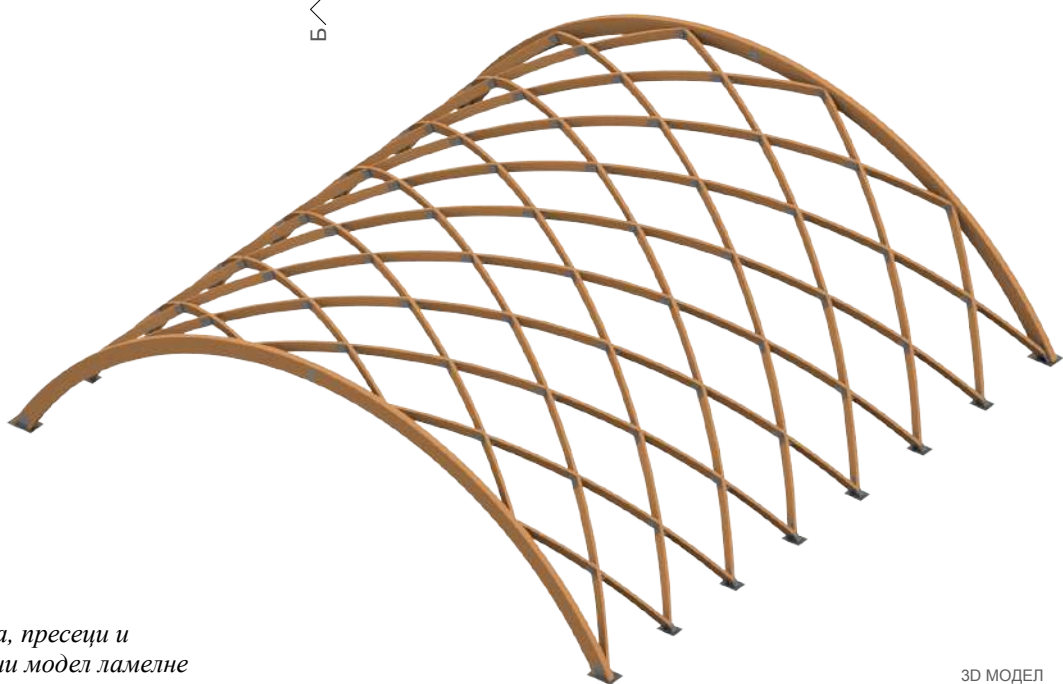
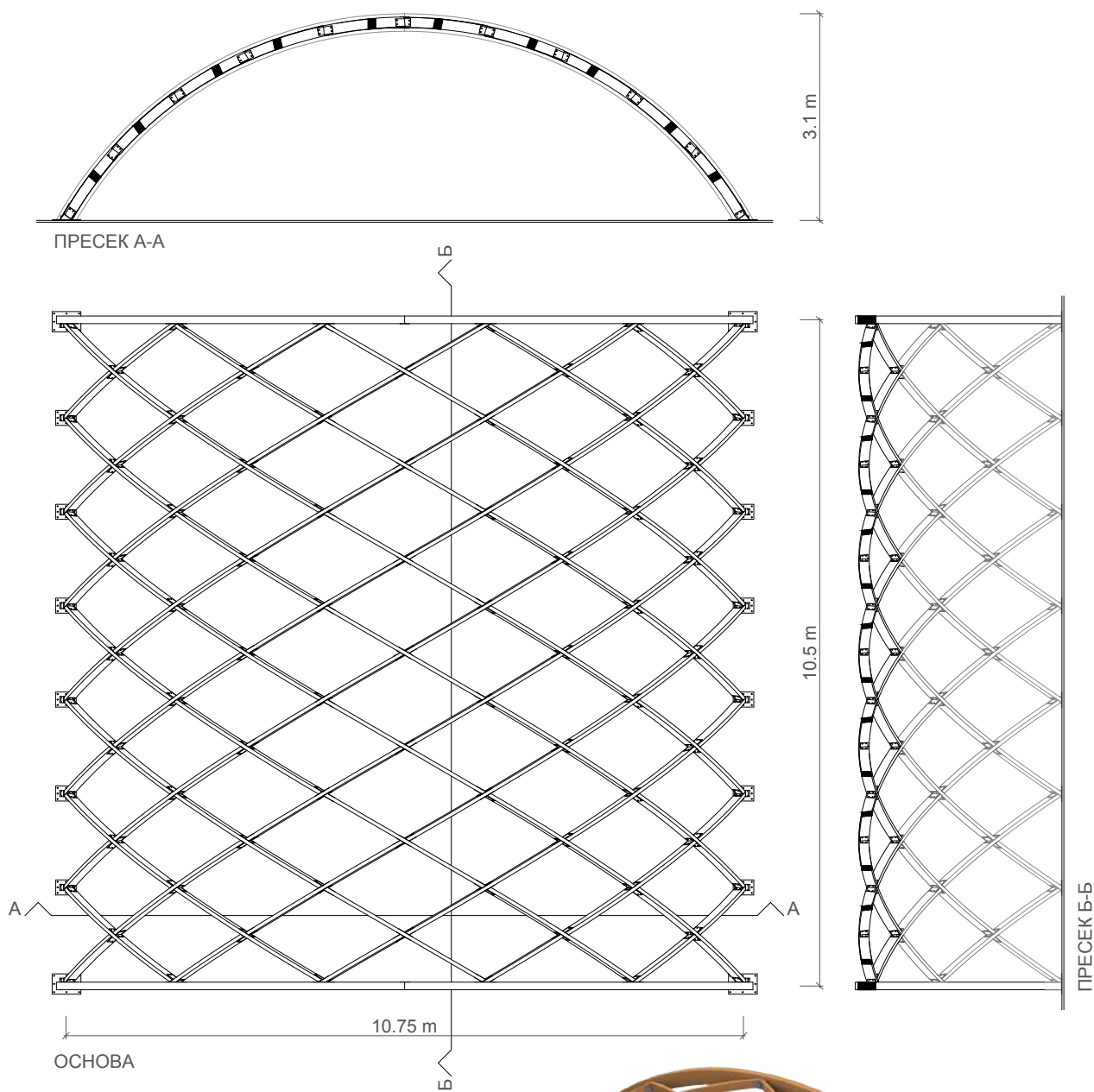
Слика 7.3-1. Основа оса елемената конструкције и детаљи на местима везе текстилне мембране са ивичним луком и ослонцима, извор: аутор

8. Прототип конструкције

Истраживање кроз пројекат (ен. *research through design*) обухвата процес пројектовања и истраживања истовремено, са фокусом на моделска испитивања која су документована и анализирана да би се формулисали закључци који служе за даље научно истраживање (Cross, 2001; Roggema, 2016). Прототип конструкције један је од кључних елемената истраживања кроз пројекат. Извођење прототипа у архитектури помаже у решавању проблема који су се јавили приликом пројектовања, а које је могуће решити тако што се паралелно пројектује коришћењем цртежа и 3D модела и извођења грађевинским материјалима који одговарају пројектованој конструкцији. (Стојановић, 2013) Током овог процеса могу се уочити и унапредити различити делови пројекта јер се мењају размере у којима се пројекат сагледава, а употребљавају се и различити алати. Решавање проблема пројектовања могуће је спровести од нивоа конструисања чвора, па до форме и целокупног изгледа конструкције. Оваква пракса била је уобичајна за изградњу објеката, када су се знања стицала израдом модела и њиховом анализом, док се у савременом добу овај процес константних итерација и релација између пројектовања на рачунару и израде прототипа зове процес комплексног моделовања (ен. *complex modelling* према Тамке, 2013), а претпоставка је да помаже у бољем сагледавању проблема и учењу током процеса пројектовања.

Пројектовање прототипа обухвата различите поступке истраживања: теоријску анализу, нумеричку анализу, графичку анализу и слично, у зависности од теме истраживања. У другом делу докторске дисертације приказана су претходна истраживања теме, анализа геометрије и анализа елемената конструкције која се пројектује. Извођењу прототипа конструкције претходило је и пројектовање тродимензионалног модела конструкције извођачког нивоа детаљности, који би се користио као подлога за спецификације ламела и веза, као и за преглед будућег прототипа. Овакав модел састоји се од лучних ламела, њихових веза и ослонаца конструкције у димензијама и одговарајућем материјалу у којем ће се изводити. (Слика 8-1) Да би се сагледала диспозиција свих ламела и сви типови ламела у оквиру конструкције, било је потребно испројектовати конструкцију пратећи геометрију цилиндра, као што је закључено у претходним анализама. Основни тродимензионални модел пројектован је на основу закључака анализе геометрије и састоји се из раванских лучних оса ламела које прате омотач цилиндра. Димензије попречног пресека додељене су прво ламели која стоји хоризонтално, у слемени, и њеном пару, прикључној ламели са којом остварује везу на средини дужине. Пар ламела засечен је на својим крајевима под углом, тако да належу једна на другу, односно под угловима које образује ламелна конструкција, а затим је радијално копиран из центра цилиндра по целој равни омотача. На тај начин, све ламеле су исте и све су дефинисане равни омотача цилиндра. За проверу геометрије служиле су осе ламела које су биле подлога за пројектовање тродимензионалног модела са свим димензијама, као и цилиндар који је коришћен у циљу провере да ли све ламеле припадају његовом омотачу. Лукови у забатним равнима пројектовани су из два истоветна дела, тиме формирајући лук на три зглоба. Ламеле које се непосредно ослањају на лук, засечене су тако да својом бочном страницом належу на раван лука. Ламеле уз ослонце засечене су према равни коју формирају ивице типских ламела.

Након пројектовања ламела, уследило је пројектовање веза. Веза ламела приказана је у претходном поглављу, а инспирисана је везом са челичним оковом Т-облика из Атласа дрвених конструкција (Herzog et al, 2004). Веза Т-облика често се користи у дрвеним конструкцијама, али захтева додатну припрему ламела за уградњу. Уместо једног челичног лима за који се везује ламела, испројектована је веза са два челична лима са спољних страна ламеле, чиме се смањило време за обликовање ламела.



Слика 8-1. Основа, пресеци и тродимензионални модел ламелне конструкције за прототип, извор: аутор

3D МОДЕЛ

8.1 Пројектовање прототипа

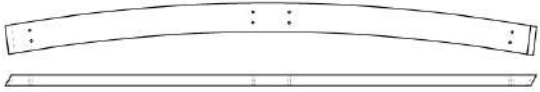





У истраживању на Техничком универзитету у Берлину које су спровели инжењери Шер и Пурномо (Scheer and Purnomo, 1985), ламелне конструкција је распона 21.5 m, дужине 21 m, са ламелама дужине 3 m и по ободу дужине 1.5 m. Према закључцима које су извели на Универзитету у Лајпцигу (Dijoux, 2017), постоји могућност оптимизације ламелне конструкције, повећањем дужине ламела, али само за распоне до 20 m. Прихватањем препорука из претходних истраживања ламелних конструкција од дрвета, испројектован је прототип распона 10.75 m, дужине 10 m, висине 3.1 m, за који је потребна 81 ламела. Анализом геометрије закључено је да су осе ламела равански лукови, те су ламеле од лепљеног ламелираног дрвета којим се једноставно обликују лучни конструктивни елементи. Димензије попречних пресека дрвених елемената претпостављене су на основу анализе примера из литературе, а биле су условљене и самом производњом ламела, где је висина сваког засебног елемента 4 cm, па је усвојена висина ламеле 16 cm. Идеја је да утрошак материјала буде мали, да би се доказала економичност конструкције. Претпостављен је попречни пресек ламела 6/16 cm, а ивичних лукова 12/28 cm. (Прилог 1)

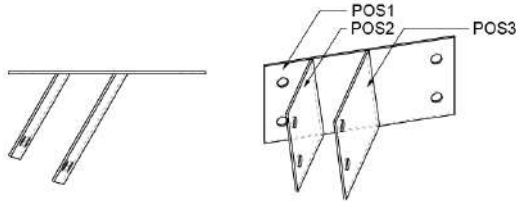
У зависности од положаја ламеле у оквиру конструкције разликује се 6 типова ламела. Све ламеле су истих радијуса кривине, зато што све осе ламела припадају равни омотача цилиндра. Осе типских ламела су дужине 3 m, а део оса ламела по контури конструкције прототипа је дужине 1.5 m (Табела 3). Разлике у типовима ламела, осим дужине, условљавају и углови под којима им се секу крајеви. Ламеле се надовезују увек једна на средину ламеле из другог правца и због тога није могуће смањити број типова већ униформисаних ламела.

У оквиру конструкције постоји шест типова веза, а разликују се у односу на положај у конструкцији, па тако постоје: две типске везе, везе уз лук, везе уз ослонце и два типа веза ламела уз лук и ослонац истовремено (Табела 4). Типске везе ламела формиране су из чвора у коме се прикључна ламела везује за средину следеће ламеле, а састоје се из три челична лима, једног који се поставља на средину ламеле, док се друга два везе за њега под углом под којим належе прикључна ламела. Димензије челичног лима добијене су из геометрије чвора и углова под којима належу прикључне ламеле на средишњу (Слика 6-9). Позиције рупа за вијак рачунате су према дозвољеним удаљеностима између вијака у дрвету, као и удаљеностима од ивица челичног лима према правилнику за челичне конструкције (EN 1993-3-1:2012, EN 1995-1-1:2012).

Највећи број ламела припада типовима 1 и 2 (Табела 3), чији углови засецања говоре да су ове ламеле у огледалу, па су самим тим и њихове типске везе, које се постављају на средину типских ламела, такође у огледалу (Табела 4). Остале везе добијене су тако што је цела типска веза ротирана у односу на централну осу цилиндра до ослонаца, као што су биле и ламеле, односно копирана је до лукова у забатним равнима, а затим су сечене равнима у којима се налазе ослонци конструкције. На тај начин, највећи број елемената веза остаје исти, задржана је висина елемената и позиција рупа.

Ослонци конструкције су тачкасти, па тако на анкер плоче од 10 mm, са две челичне плоче од 5 mm постављене као L-профил, належу ламеле и ослоначка веза. Везе ламела остварују се са два вијка M12, а челични лимови од којих је формиран оков су 3 mm. Прорачун везе рађен је на основу носивости вијака M12 и претпостављене нормалне и трансверзалне силе које се јављају у вези (поглавље 7.2.3).

Тип		Дужина [cm]	Број комада	Запремина [m ³]
1		289	33	1.007
2		289	24	0.732
3		149.5	12	0.189
4		153	8	0.129
5		292	2	0.062
6		148	2	0.031
укупно:				2.15

Тип		Број комада	Запремина [m ³]	Маса [kg]
1		70	0.0132	103.620

Табела 4. Спецификација челичних веза

Тип		Број комада	Запремина [m³]	Маса [kg]
2		48	0.00904	70.964
3		8	0.00249	19.547
4		12	0.00391	30.694
5		2	0.000855	6.712
6		2	0.000855	6.712
укупно:				238.25

8.2 Монтажа прототипа

Монтажи ламелне конструкције претходила је израда ламела и челичних веза. Ламеле су изведене од лепљеног ламелираног дрвета, четинара друге класе, модула еластичности $E = 11\,000 \text{ MPa}$. Основна ламела има радијус спољног лука 844 cm и дужину лука 630 cm . Да би се искројила 81 ламела према спецификацијама, било је потребно направити 35 основних ламела. Сегменти лукова на три зглоба од лепљеног ламелираног дрвета, изведени су радијуса спољног лука 635 cm и дужине лука 680 cm . Челични лимови у оковима којима се остварује веза дебљине су 3 mm и 5 mm . Анкер плоче су од челичних лимова дебљине 10 mm .

Монтажа ламелне конструкције рађена је на асфалтираном платоу, а започета је постављањем и нивелисањем анкер плоча. Ослоначке везе (Тип 4, Табела 4) заварене су на анкер плоче на одговарајуће позиције, према тродимензионалном моделу конструкције, да би обезбедиле добру почетну позицију за постављање ламела. Обликовање и постављање ивичних лукова на три зглоба био је следећи корак. Лукови су размерени на тлу, а затим подигнути и постављени уз помоћ виљушкарa који је подизао средишњу тачку лука, да би се правилно поставили у ослоначке везе. На луковима су обележене позиције веза ламела и лука, а затим су монтиране. Како би се успоставила стабилност лука у подужном правцу, било је потребно прво да се поставе ламеле уз ослонце лукова, према плану монтаже (Слика 8-2). План монтаже је диктирао редослед монтаже ламела, почевши од лука, ка следећем луку, из разлога што је неопходно поставити једно цело конструктивно поље да би се провериле све димензије ламела и веза, као и њихово уклапање. Смернице о начину монтаже прототипа преузете су из литературе где се наводи да је најбољи начин монтаже постављање једног по једног конструктивног поља (ен. *bay-by-bay*) (Hosseinzadeh, 1967, 36).

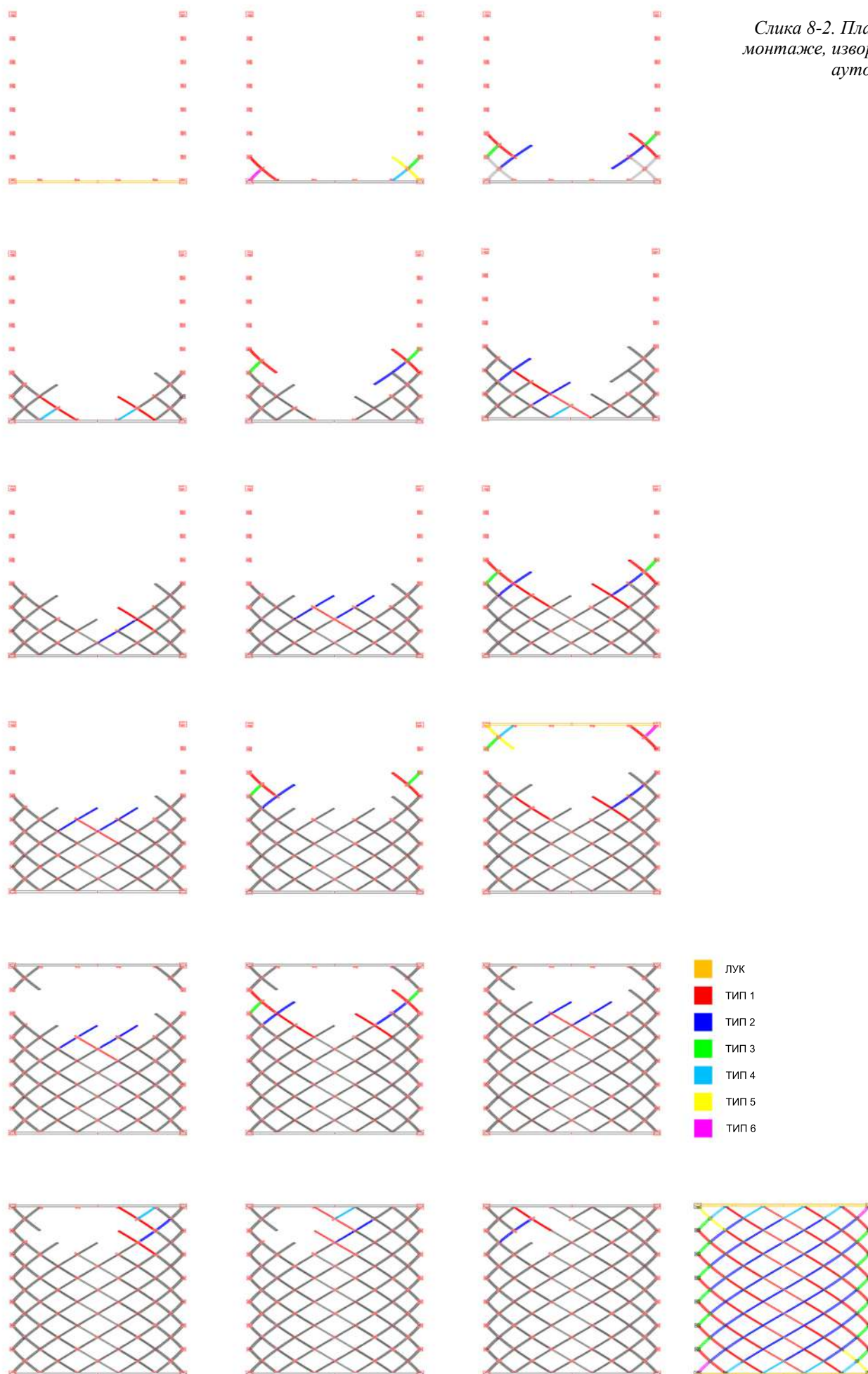
Основне ламеле дужине 680 cm су достављене на градилиште, а на лицу места су кројене и монтиране ламеле према спецификацијама. Током монтаже закључено је да основне ламеле теже да се исправе, због чега долази до промене радијуса лука услед великих температура на градилишту (јул месец), због чега није било могуће током целог процеса монтаже пратити цртеже спецификација ламела са позицијом веза и вијака, пројектованих према радијусу, за који је сматрано да је непроменљив. Позиције су затим размераване према троугловима које формирају средишња веза и бочне, уцртане су позиције вијака, и монтирана је свака средишња веза на тлу. Након постављања ламеле у конструкцију, контролисана је њена позиција и уцртаном позицијом вијака. Оне се затим обезбеђују вијцима за дрво док се не склопи конструктивно поље. Када се све ламеле у једном конструктивном пољу поставе на одговарајуће позиције, и уклопе са суседним, бушиле би се рупе и монтирале вијци у везама. Током монтаже првог конструктивног поља било је потребно користити подупираче, јер позиција ламела није фиксирана. Како се постављао све већи број ламела, тако је конструкција почињала да функционише као систем у којем свака ламела укрупљује ону следећу и фиксира њену позицију у оквиру конструкције. Ово се могло приметити као сукцесивно олакшање у току процеса монтаже након постављања првог конструктивног поља, а потврђено је када је монтирана половина конструкције.

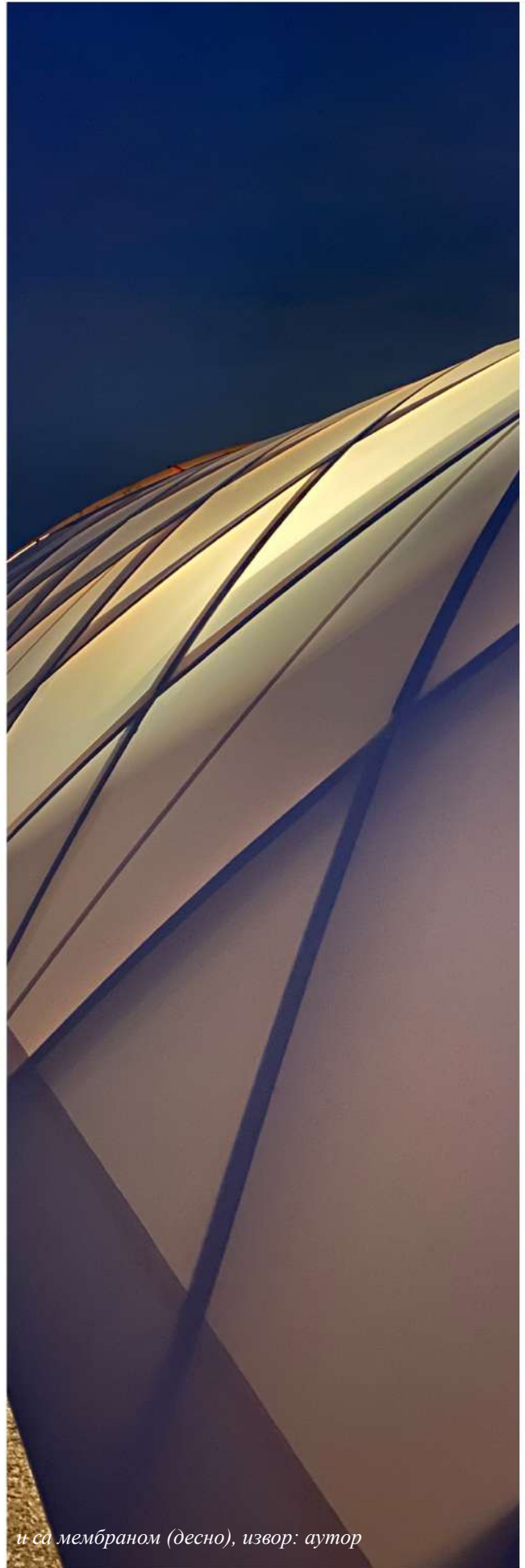
Текстилна мембрана за прототип, пројектована као покривач ламелне конструкције, искројена је у фирми *ArTech*, а димензије мембране узете су на лицу места након монтаже ламелне конструкције. Одабран је тип мембране од полиестерских влакана са *PVC* премазима, беле боје и процента транспарентности 30% . (Прилог 2) Сопствена тежина мембране износи 900 g/m^2 , а модули еластичности мембране добијени биаксијалним тестовима су $E_x = 61.82 \text{ kN/cm}^2$, $E_y = 60.99 \text{ kN/cm}^2$. Димензије мембране смањене су по 15 cm у односу на укупну дужину ламелне конструкције између ивичних лукова и у односу на

укупну ширину у односу на ослонце конструкције. Након уношења силе затезања у мембрану, дошло је до издужења материјала. По ободу мембране направљени су фалцеви за цеви савијањем мембране и њеним варењем, преко којих се остварује њена веза са ламелном конструкцијом. Мембрана је монтирана без механизације. Монтажа мембране започета је постављањем цеви пречника 32 mm у џепове у подужном Y-правцу конструкције, а затим је уз помоћ канапа пребачена преко ламелне конструкције у попречном X-правцу. Након позиционирања мембране на одговарајућу позицију, додате су и цеви у попречном правцу. Оне су савијене у форму лука, а постављене су са унутрашње стране ивичних лукова ламелне конструкције. Гуртне којима се уноси сила у мембрану и које су остављене као елемент везе на прототипу постављене су на предвиђена места веза мембране и ослонаца и на места чворова на луку. Силе су у гуртне уношене симултано, са обе стране ламелне конструкције, прво у подужном правцу, а затим у попречном правцу пружања конструкције, уз константну проверу издужења мембране, до максималне вредности затезања.

Искуства са монтаже допринела су бољем разумевању ламелне конструкције од дрвета са текстилном мембраном, изведени су закључци везани за начин монтаже и припрему елемената конструкције, а отворила су се и питања везана за модификацију конструкције.

Слика 8-2. План
монтаже, извор:
аутор





Слика 8-3. Прототип конструкције без мембране (лево) и са мембраном (десно), извор: аутор

8.3 Експериментално испитивање прототипа

8.3.1 План мерења деформација конструкције

Према Еурокоду, дејство сопствене тежине конструкцијских и неконструкцијских елемената подразумева се као стално оптерећење на конструкцију и узима се у обзир у прорачунским комбинацијама као посебно дејство (EN 1991-1-1:2002). У прототипу ламелне конструкције, запреминска тежина хомогене лепљене ламелиране грађе GL28h износи $\gamma = 5.0 \text{ kN/m}^3$, а укупна сопствена тежина ламелне конструкције за прототип износи 0.14 kN/m^2 (на основу прорачунатих тежина ламела и веза приказаним у табелама 3 и 4). Тежина текстилне мембране од $\sim 1 \text{ kg/m}^2$ [0.01 kN/m^2] (ArTech, n.d.) није узета у обзир, јер је њено оптерећење на конструкцију занемарљиво у односу дејства снега и ветра.

Дејство снега (EN 1991-1-3:2003) се рачуна према следећим изразима:

(1) за сталне и пролазне прорачунске ситуације

$$s = \mu_i \cdot c_e \cdot c_t \cdot s_k$$

(2) за нагомилавање снега

$$s = \mu_i \cdot s_k,$$

где су:

s_k - карактеристична вредност дејства снега на тло (у Београду: $s_k = 1 \text{ kN/m}^2$)

c_e - термички коефицијент (за овај модел $c_e = 1$)

c_t - коефицијент изложености (за овај модел $c_t = 1$)

μ_i - коефицијент облика (за цилиндричне кровове $\mu_3 = 0$ за $\beta > 60^\circ$ и

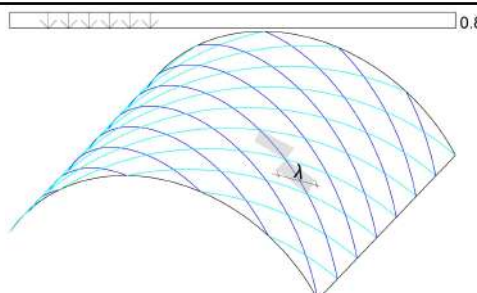
$\mu_3 = 0.2 + 10h/b$ за $\beta < 60^\circ$, $\max \mu_3 = 2$)

h - висина лука ($h = 3.1 \text{ m}$)


b - распон конструкције ($b = 10.75 \text{ m}$).

У табелама 5 и 6 налазе се вредности оптерећења од снега на ламеле [kN/m], у зависности од угла под којим стоји ламела у односу на раван основе - β и припадајуће ширине оптерећења на ламелу - λ за једнакоподељено оптерећење по основи крова и за асиметрично оптерећење снегом.

Табела 5. Оптерећење од снега, случај I - без нагомилавања снега

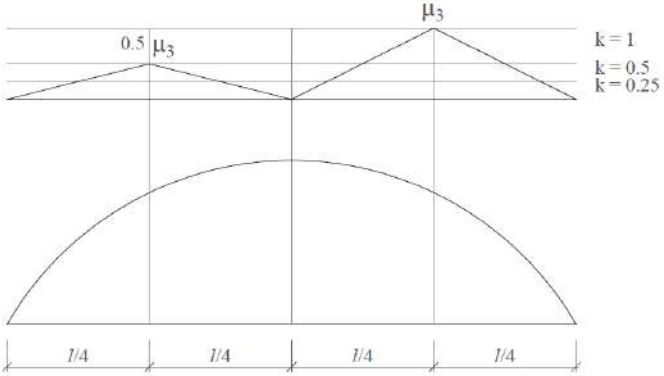
β [°]	$\cos\beta$	$s = \mu_1 \cdot s_k \cdot \lambda \cdot \cos\beta$ [kN/m]	$\mu_1 = 0.8$	$\lambda = 1.5$ [m]
50	0.64	0.77		
32	0.85	1.02		
10.4	0.98	1.18		
43.8	0.72	0.87		
21	0.93	1.12		
0	1.00	1.20		

Табела 6. Оптерећење од снега, случај II - са нагомилавањем снега

β [°]	$\cos\beta$	$k \cdot \mu_3$	$s = \mu_3 \cdot s_k \cdot \lambda \cdot \cos\beta$ [kN/m]	$\mu_3 = 2.0$	$\lambda = 1.5$ [m]
50	0.64	0.5	0.48		

Табела 6. Оптерећење од снега, случај II - са нагомилавањем снега

β [°]	$\cos\beta$	$k \cdot \mu_3$	$s = \mu_3 \cdot s_k \cdot \lambda \cdot \cos\beta$ [kN/m]	$\mu_3 = 2.0$	$\lambda = 1.5$ [m]
43.8	0.72	0.5	0.54		
32	0.85	1.0	1.27		
21	0.93	1.0	1.40		
10.4	0.98	0.5	0.74		
0	1.00	0.5	0.75		
32	0.85	2.0	2.54		
21	0.93	2.0	2.80		
50	0.64	1.0	0.96		
43.8	0.72	1.0	1.08		



Дејство ветра (EN 1991-1-4:2005) на површине рачуна се према следећем изразу:

$$W_e = q_p \cdot c_{pe}$$

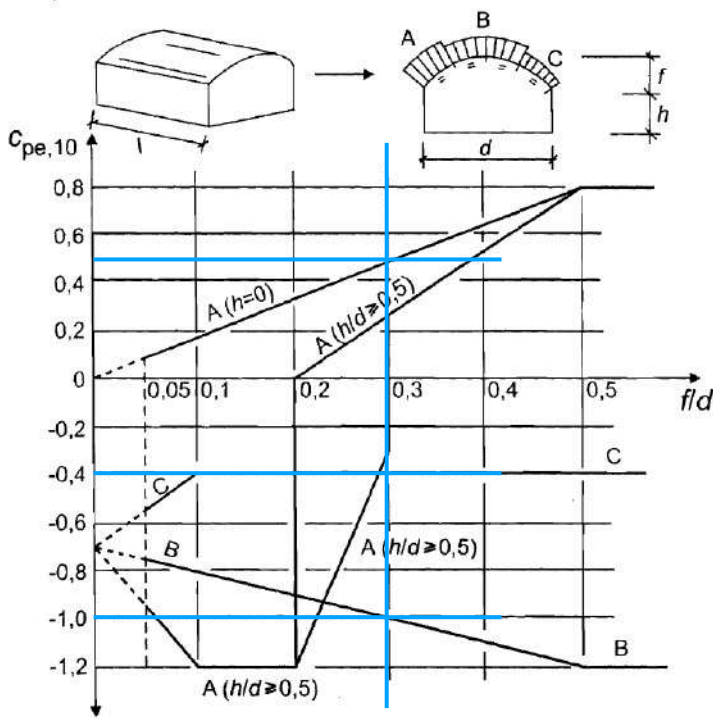
где су:

q_p - ударни притисак ветра који се рачуна према изразу $q_p = c_e \cdot q_b$

у којем је:

c_e - коефицијент изложености (за овај модел $c_e = 1$)

q_b - основни притисак ветра, према изразу $q_b = 1/2 \cdot \rho \cdot v_b^2$ где су:



Слика 8-4. Дијаграм за одређивање коефицијента спољашњег притиска за конструкције форме цилиндра, извор: Еурокод EN 1991-1-4:2005 и аутор

ρ - густина ваздуха (препоручена вредност $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$)

v_b - основна брзина ветра (у Београду: $v_b = 21 \text{ m/s}$)

c_{pe} - коефицијент спољашњег притиска.

За цилиндричне кровове важи дијаграм приказан на слици 8-4.

Подаци о моделу су:

стрела лука - $f = 3.1 \text{ m}$,

висина на којој се налази конструкција - $h = 0$,

распон конструкције - $d = 10.75 \text{ m}$ и

$f/d = 3.1/10.75 = 0.288 \approx 0.3$.

Оптерећење ветром које делује управно на ламеле (притискајуће/сишуће дејство ветра) налази се у табели 7.

Табела 7. Оптерећење од ветра, дејство управно на цилиндричну површину

	c_{pe}		$w = q_p \cdot c_{pe} \cdot \lambda \text{ [kN/m]}$
$q_p = 0.28 \text{ [kN/m}^2\text{]}$	A	0.5	0.21
$\lambda = 1.5 \text{ [m]}$	B	-1.0	-0.42
	C	-0.4	-0.17

Оптерећење које делује дуж цилиндра, прорачунава се према изразу:

$$F_{tr} = c_{fr} \cdot q_p \cdot A_{fr}$$

као сила трења по површини, у којем је:

c_{fr} - коефицијент трења (за глатку површину $c_{fr} = 0.01$)

A_{fr} - површина на коју делује.

Оптерећење које делује дуж цилиндра рачунато је према изразу:

$$w_{tr} = c_{fr} \cdot q_p \cdot \lambda$$

са циљем да се оптерећење прорачуна оптерећење на сваку ламелу. Вредност овог оптерећења износи $w_{tr} = 0.0042 \text{ kN/m}$, тако да је ово дејство ветра занемарено.

Оптерећење ветром на забатне равни је једнако подељено оптерећење на лук. Вредност овог оптерећења рачуната је са коефицијентима притиска на вертикалне зидове зграда према изразу:

$$w_z = c_{pe,1} \cdot q_p \cdot \lambda$$

у којем је:

$c_{pe,1}$ - коефицијент спољашњег притиска за површине мање од 10 m^2 .

Према датом изразу, за $c_{pe,1} = +1.0$, притискајуће дејство ветра на лук износи $w_{z(p)} = 0.078 \text{ kN/m}$, а за $c_{pe,1} = -0.3$, сишуће дејство износи $w_{z(s)} = -0.023 \text{ kN/m}$. Вредности коефицијената важе за однос распона - d и висине зида - h који је за овај модел мањи од 0.25 .

На основу приказаних оптерећења конструкције, закључено је да је **доминантно оптерећење пројектоване конструкције прототипа оптерећење снегом**. У истраживању ламелних конструкција са Универзитета примењених наука у Лајпцигу (Dijoux, 2017), наглашено је да је **најнеповољније оптерећење на ламелну конструкцију асиметрично**

оптерећење снегом. Сишуће дејство ветра утиче на одизање покривача - текстилне мембране, чија је веза остварена са ламелном конструкцијом на ивичним луковима и на ослонцима. Преднапрезање текстилне мембране, приликом постављања као покривача, спречава њено одизање од ламелне конструкције.

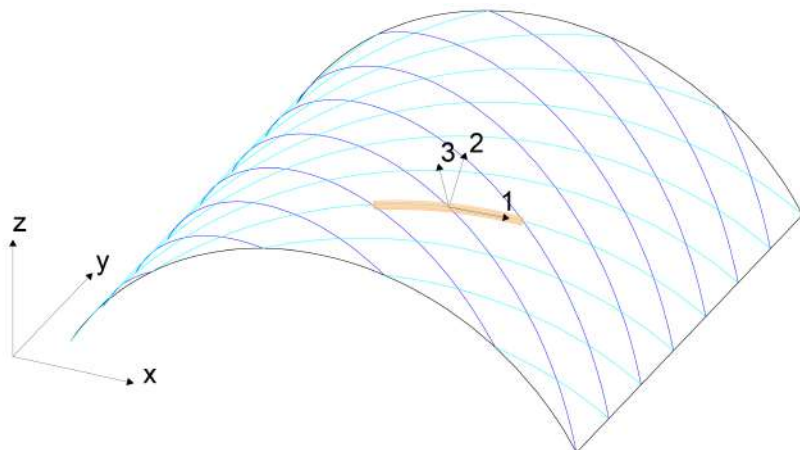
Мерење деформација конструкције планирано је за оптерећење снегом, за симетрично и асиметрично оптерећење, са циљем да се сагледа одговор конструкције и под пуним оптерећењем, за који се очекује симетричан дијаграм деформација.

Прва мерења се изводе на оптерећеној ламелној конструкцији без мембране. Свођењем линијског оптерећења од снега, на тачкасто оптерећење, преко припадајуће површине која пада на један чвор, добијене су силе од 1 kN до 1.5 kN. Оптерећење се наноси на прототип конструкције као концентрисана сила у сваком чвору. Укупан број чворова који је потребно оптеретити је 67, што значи да ће укупно оптерећење прототипа бити преко 70 kN. Оптерећење у чворовима симулирали су цакови испуњени водом ($1L=1kg=0.01kN$). За потребе мерења направљено је 67 цакова од мембране запремине по 150 L (1.5 kN) који се пуне по потреби према плану наношења оптерећења. Да би се упоредили резултати испитивања, ламелну конструкцију је потребно оптеретити истим оптерећењем била она са или без мембране. (Прилог 3)

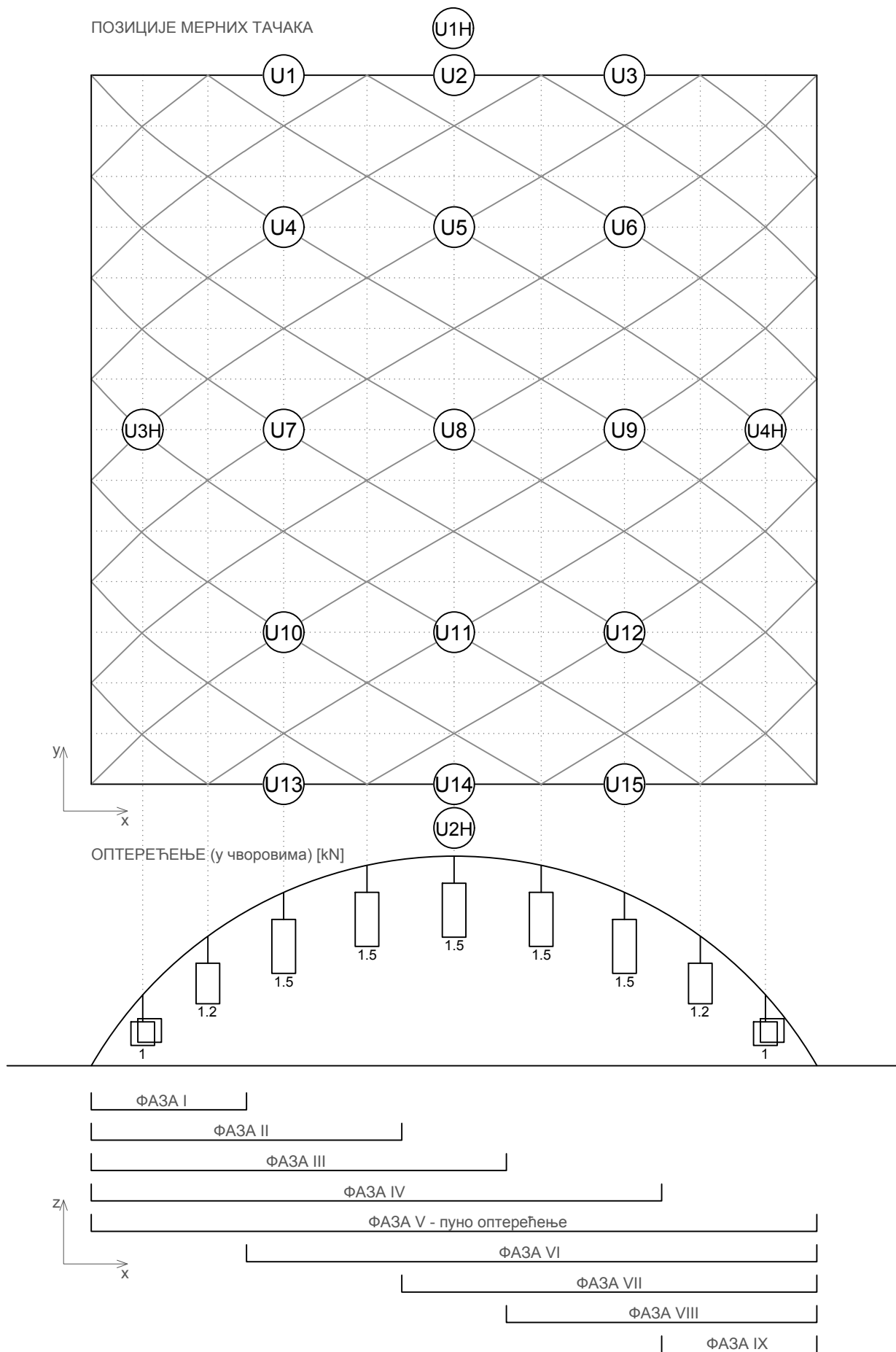
Мерна места у којима се мере деформације чворова прототипа потребно је поставити у оба ортогонална правца конструкције, попречном - X и подужном - Y, кроз средиште, као основним осама које дефинишу конструкцију (Слика 8-5). Уз то су постављена и два правца на бочним странама, лево и десно од средишње подужне осе, у којима ће се сагледати одговор конструкције под асиметричним оптерећењем. Укупан број мерних места је 19, са тим да се на средини ивичних лукова мере и вертикална и хоризонтална деформација (Слика 59).

Конструкција се оптерећује по фазама, од ослонаца са једне стране ка слемени, а затим од слемена до ослонаца са друге стране, доводећи до симетричног оптерећења. Након мерења симетричног оптерећења, конструкција се растерећује од ослонаца једне стране ка слемени, до ослонаца друге стране, да би се сагледала сва асиметрична оптерећења и добила потпуна слика рада конструкције. Оптерећење конструкције врши се у девет фаза, од којих је фаза V под пуним оптерећењем конструкције од које се очекује да ће дати симетричну слику деформација прототипа. (Слика 8-6)

По завршетку мерења деформација релевантних чворова ламелне конструкције без мембране, потребно је поставити мембрану, остварити њену везу са ивичним луковима конструкције и са ослонцима. Мерење деформација ламелне конструкције са мембраном изводи се на исти начин као и за ламелну конструкцију без мембране.



Слика 8-5. Глобални координатни систем ламелне конструкције и локални координатни систем ламела, извор: аутор



Слика 8-6. Позиције мерних места и план оптерећења за испитивање конструкције прототипа, извор: аутор



Слика 8-7. Мерење деформација конструкције прототипа, извор: аутор



Слика 8-8. Мерење деформација конструкције прототипа, извор: аутор

8.3.2 Мерење деформација конструкције и резултати испитивања

Испитивање конструкције рађено је у сарадњи са ванредним професором др Зораном Мишковићем из Института за материјале и конструкције при Грађевинском факултету Универзитета у Београду. Деформације су мерене електронским угибомерима (ен. *LVDT - linear variable differential transformer*) и механичким угибомерима, према плану мерења, на 19 мерних места, за вертикалне и хоризонталне деформације. Механички угибомери постављени су на мерна места U3H и U4H, док су за остала мерна места постављени електронски угибомери, повезани на два рачунара на којима је праћено померање чворова конструкције током целог трајања мерења. Хоризонталне деформације на луковима мерене су преносом хоризонталне деформације помоћу жице са тегом и одговарајућег механизма, а затим мерене на исти начин као и вертикалне деформације електронским угибомером (Слика 8-7). Након постављања угибомера измерен је нулти положај конструкције, као референтна вредност за мерење деформација. Оптерећење је наношено по фазама (Слика 8-8), а након сваке фазе прављена је пауза да би се конструкција стабилизовала и омогућила читавање резултата мерења те фазе. Завршетком фазе V, симетричног оптерећења конструкције, унети су резултати мерења, након чега је конструкција остављена под пуним оптерећењем пола сата. Деформације су поново измерене и настављен је експеримент. Последње мерење деформација извршено је након растерећења конструкције да би се видело да ли се конструкција вратила у свој првобитни положај или су остале трајне деформације. **Резултати мерења деформација ламелне конструкције без текстилне мембране по фазама су приказани у табелама (Табела 8а и б).**

Табела 8а. Вредности деформација ламелне конструкције од дрвета без текстилне мембране за вертикално оптерећење, извор: в.проф. др Зоран Мишковић

Објекат	ИМК				ГРАЂЕВИНСКИ ФАКУЛТЕТ		Лабораторија за конструкције						Записник мерења MGC+ 1								
	Елемент	Пресек	М. М.		Фазе оптерећења, разлике, утицаји																
					0	I		I'	II			III	IV	V-1	V-2	V-3	VI	VII			
A	B	C	D	12:28	13:24				14:20	15:00					15:40	17:10	18:05	18:25	18:35	19:05	19:55
			U1	0	2.273				5.561	6.637					6.857	3.76	1.331	1.313	1.297	-1.022	-5.099
		START U VLAC. SEG.	U3	0	2.221				5.06	6.121					6.037	2.923	-0.947	-0.98	-0.98	-3.326	-6.858
		START U VLAC. SEG.	U4	0	-3.04	-9.49	-6	-7.637	-9.627	-9.753	-5.63	-5.815	-2.513	-0.071	-0.046	-0.045				3.1	10.56
		3.49	U4'/U4''	0	-3.04	-3.04	-3.04	-3.04	-13.117	-13.243	-9.753	-13.428	-10.126	-7.684	-7.659	-7.658	-4.513	2.947			
		4.123	U4''																		
				0	2.5				8.426	9.626					9.763	1.18	-3.317	3.317	3.318	-6.271	-12.381
			U2	0	-0.386				0.95	1.184					2.585	4.919	4.577	4.563	4.543	4.734	3.432
			U5	0	-1.206				2.643	3.883					9.442	13.566	11.831	11.82	11.76	13.177	9.156
			U8	0	-2.563				1.374	2.123					7.995	9.974	6.495	6.462	6.404	9.014	5.242
			U11	0	-1.281				-0.141	3.862					9.909	13.438	11.626	11.642	11.632	13.435	9.418
			SD1	0	-0.5				0.1	-3.6					-5.568	-6.06	-6.9	-7.39	-7.5	-8.14	-10.3
			SD2	0	-47.48				-29.4	17.7					30.3	66	92.4	102.8	108.5	169.2	183.4
			SD3	0	-24.14				-33.28	5.6					6.29	20.7	34.1	40.3	43.1	66.8	92.5
			SD4	0	-65.5				-44.29	13					43.7	90.5	113.6	121.2	124.2	143.8	174.8
Место:				Мерио:								Обрадио:				Контролисао:					
Датум:																					

Табела 8б. Вредности деформација ламелне конструкције од дрвета без текстилне мембране за вертикално оптерећење, извор: в.проф. др Зоран Мишковић

Објекат	ИМК				ГРАЂЕВИНСКИ ФАКУЛТЕТ		Лабораторија за конструкције						Записник мерења MGC+ 2										
	Елемент	Пресек	М. М.		Фазе оптерећења, разлике, утицаји																		
					VIII	IX	0'	0'-1															
A	B	C	D	20:10	21:05	21:35	21:50																
			U1	-5.187	-2.394	-0.09	-0.091																
			U3	-6.735	-2.168	0.15	0.156																
			U4	11.109	8.598	5.891	5.891																
		3.49	U4'	3.496	0.985	-1.722	-1.722																
		4.123	U4''																				
			U6	-12.856	-5.776	-1.884	-1.843																
			U2	2.202	-0.388	0.1	0.099																
			U5	4.449	0.638	2.158	2.1																
			U8	0.148	-1.748	1.217	1.215																
			U11	4.309	1.656	2.945	2.942																
			SD1	-12.17	-7.9	-8.97	-8.86																
			SD2	196.5	271.7	219.9	218.1																
			SD3	97.6	118.5	129.4	129.4																
			SD4	184.3	216.8	220.1	218.4																
Место:				Мерио:								Обрадио:				Контролисао:							
Датум:																							

Извршено је и мерење деформација прототипа ламелне конструкције са текстилном мембраном са истим оптерећењима и истим фазним поступком као и што је рађено без мембране да би могли да се упореде резултати испитивања. (Табела 9а и б)

Табела 9а. Вредности деформација ламелне конструкције од дрвета са текстилном мембраном за вертикално оптерећење, извор: в.проф. др Зоран Мишковић

Објекат	ИМК			институт за материјале и конструкције		ГРАЂЕВИНСКИ ФАКУЛТЕТ		УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ		Лабораторија за конструкције					Записник мерења Q 1				
	Елемент	Пресек	М. М.	Фазе оптерећења, разлике, утицаји															
				0	I	I'	II	III	IV	V-1	V-2	V-3	VI	VII	VIII	VIII'	IX		
A	B	C	D	12:35	13:35	14:27		15:03	15:45	17:10	18:15	18:30	18:45	19:10	19:55	20:20	20:44	21:10	
			U10	0	3.42	7.78		13.32	13.32	9.18	6.59	6.57	6.57	1.38	-6.31	-6.4	-4.98	-2.81	
			U12	0	-2.34	-6.81		-8.27	-8.34	0.1	4.56	4.64	4.67	7.67	13.4	13.73	12.15	6.92	
			U14	0	-0.13	-0.21	-0.43	0.816	2.74	4.88	4.87	4.87	4.87	4.77	3.06	1.47	1.46	-0.01	
			U14'																
			U7	0	3.03	10.24		12.1	11.62	5.34	2.05	2.06	2.06	-0.88	-8.57	-8.37	-6.2	-3.24	
			U9	0	-2.88	-8.59		-11.43	-12.57	-5.89	-2.15	-2.07	-2.04	0.92	8.3	9.56	6.86	4.68	
			U13	0	2.41	4.07		6.88	7.19	4.3	1.8	1.78	1.78	-0.73	-4.88	-4.96	-4.01	-2.12	
			U15	0	-1.96	-3.88		-5.28	-5.15	-1.19	1.44	1.47	1.47	3.75	6.99	6.85	5.83	3.53	
			U1H	29.65	29.05	26.9		27	27	25.65	24.6	24.6	24.6	25.5	25.75	25.15		27	
			U2H	23.1	21.7	22.95		20.25	20.3	18.95	17.6	17.6	17.6	18.4	18.7	18.85		19.5	
			U3H	12.36	9.09	9.21		9.21	11.28	15.18	16.11	16.12	16.12	19.56	19.54	17.57		13.98	
			U4H	10.98	11.59	14.68		16.61	19.31	20.78	17.98	16.88	16.84	16.09	12.12	9.9		8.23	
Место:								Мерио:				Обрадио:				Контролисао:			
Датум:																			

Табела 9б. Вредности деформација ламелне конструкције од дрвета са текстилном мембраном за вертикално оптерећење, извор: в.проф. др Зоран Мишковић

Објекат	ИМК			институт за материјале и конструкције		ГРАЂЕВИНСКИ ФАКУЛТЕТ		УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ		Лабораторија за конструкције					Записник мерења Q 2				
	Елемент	Пресек	М. М.	Фазе оптерећења, разлике, утицаји															
				0'	0'-1														
A	B	C	D	21:45	21:55														
			U10	-0.2	-0.17														
			U12	2.59	2.48														
			U14	-0.14	-0.13														
			U7	0.2	0.2														
			U9	1.07	1.03														
			U13	0.28	0.28														
			U15	0.82	0.82														
			U1H	27.75	27.7														
			U2H	21.3	21.35														
			U3H	12.88	12.86														
			U4H	11.15	11.16														
Место:								Мерио:				Обрадио:				Контролисао:			
Датум:																			

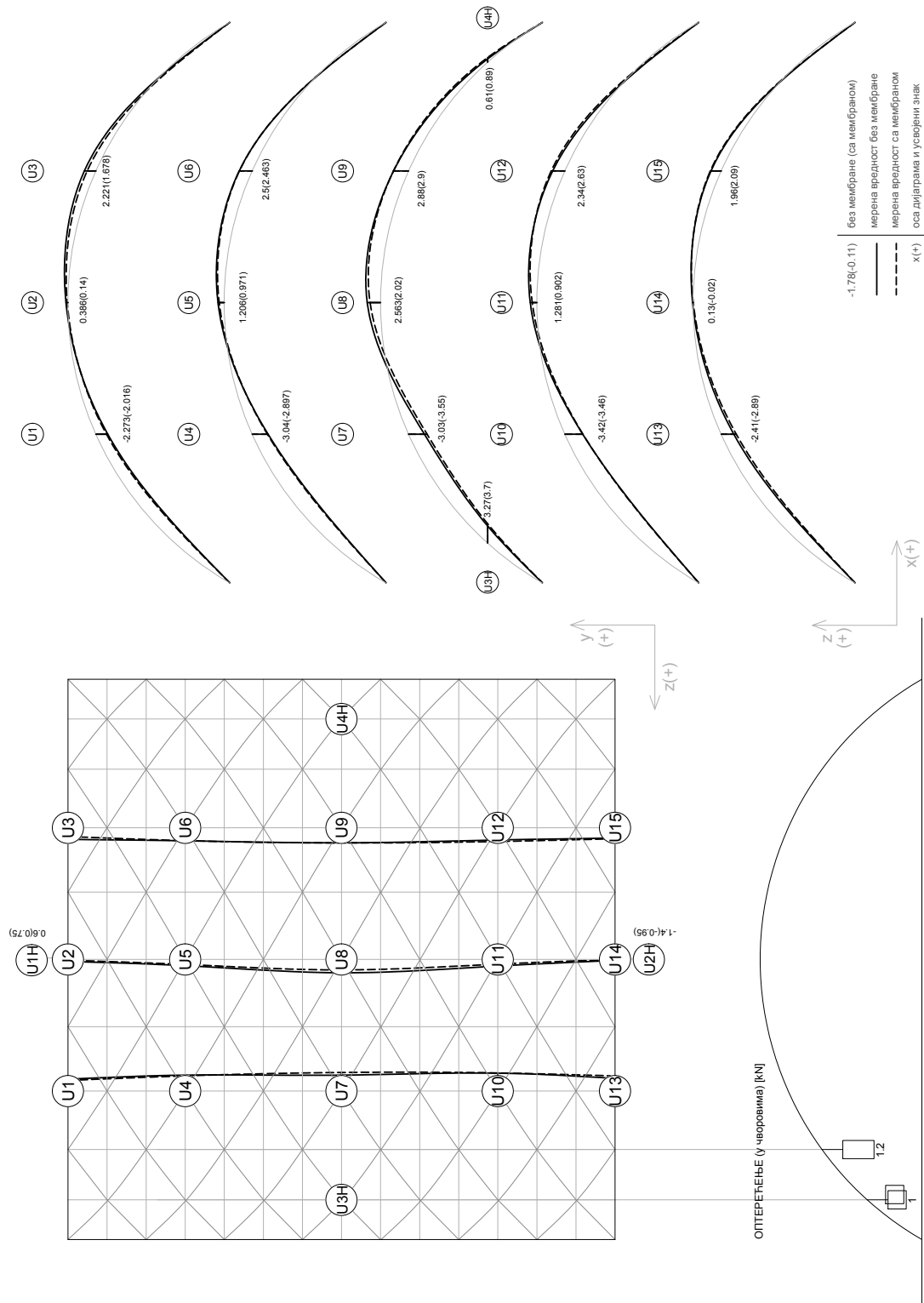
8.3.3 Закључци мерења деформација конструкције

На основу резултата мерења, конструисани су дијаграми (Слике 8-9 до 8-18) који се налазе на следећим странама. Дијаграми приказују деформације ламелне конструкције од дрвета без и са текстилном мембраном истовремено, да би могао да се упореди одговор конструкције на оптерећење.

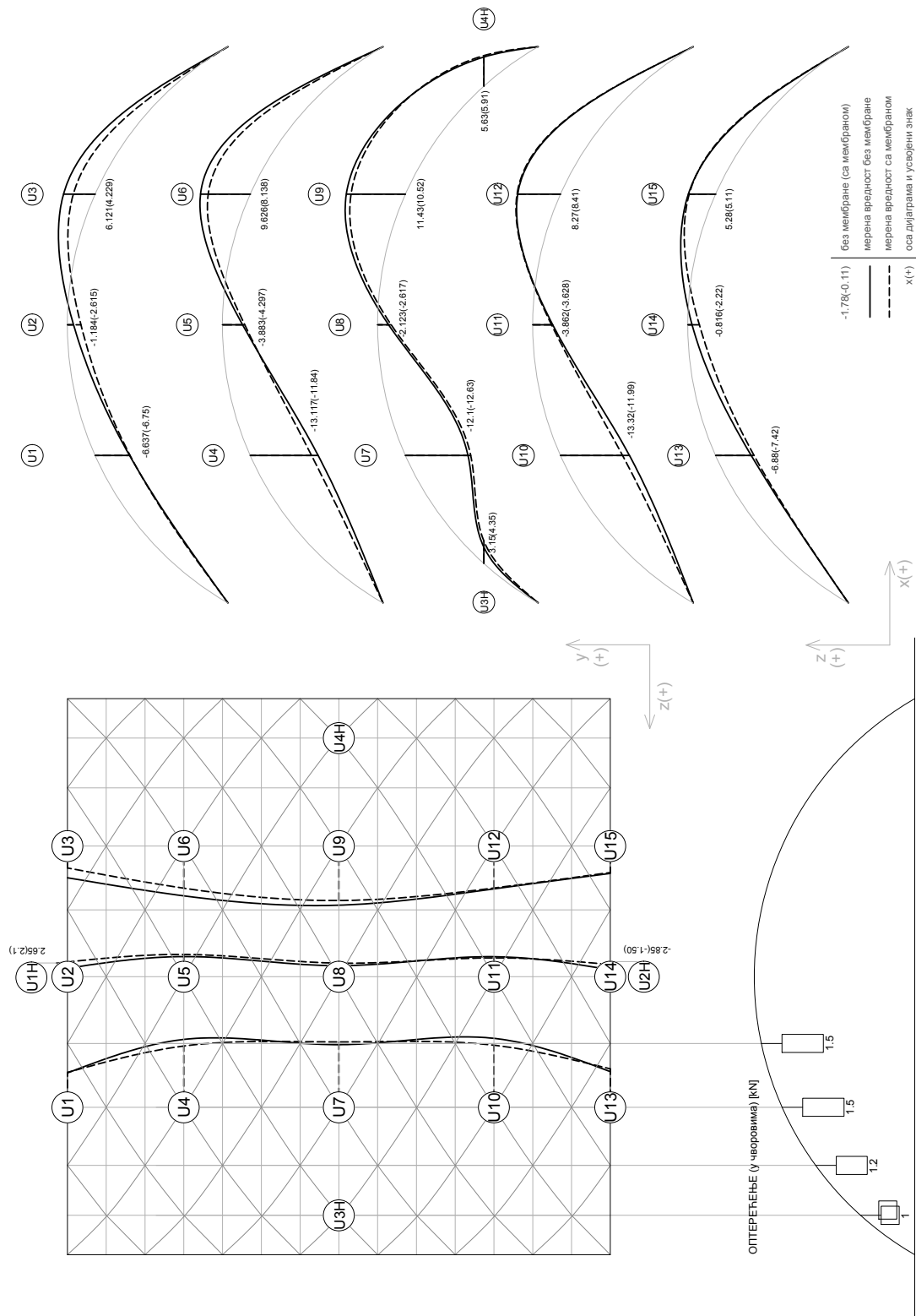
Одговор ламелне конструкције од дрвета без мембране на задато вертикално оптерећење приказан на дијаграмима је очекиван. Ламелна конструкција је сводна, геометрије кружног правог цилиндра, а деформације су аналогне деформацији лука. Током испитивања крива на дијаграму се мењала из позитивне у негативну, како је фазно наношено оптерећење. Одговор конструкције под асиметричним оптерећењем одговара очекиваном одговору конструкције. Под пуним оптерећењем, у фази V, очекиван је симетричан дијаграм деформација, међутим, због проблема током мерења изазваног пуцањем цакова којима је наношено оптерећење у чворовима, појавио се проблем на мерном месту U7, што се види и на дијаграму деформација.

Текстилна мембрана, постављена као покривач ламелне конструкције, незнатно утиче на промену деформација ламелне конструкције од дрвета. Приметно је да текстилна мембрана смањује хоризонталне деформације конструкције, мерене у Y-правцу конструкције, јер је постављена између ивичних лукова ламелне конструкције. Не постоје промене деформација у хоризонталном X-правцу простирања конструкције. Примећује се повећање вертикалних деформација, по Z-оси ламелне конструкције, на самој средини свода. Текстилна мембрана понаша се као затега између ивичних лукова, тиме онемогућавајући ламелној конструкцији да се деформише у Y-правцу. Као последица, јавља се већа вертикална деформација у средишту ламелне конструкције, на мерном месту U8, као што се може видети на дијаграмима. Вертикалне деформације ивичног лука такође су веће када се постави текстилна мембрана.

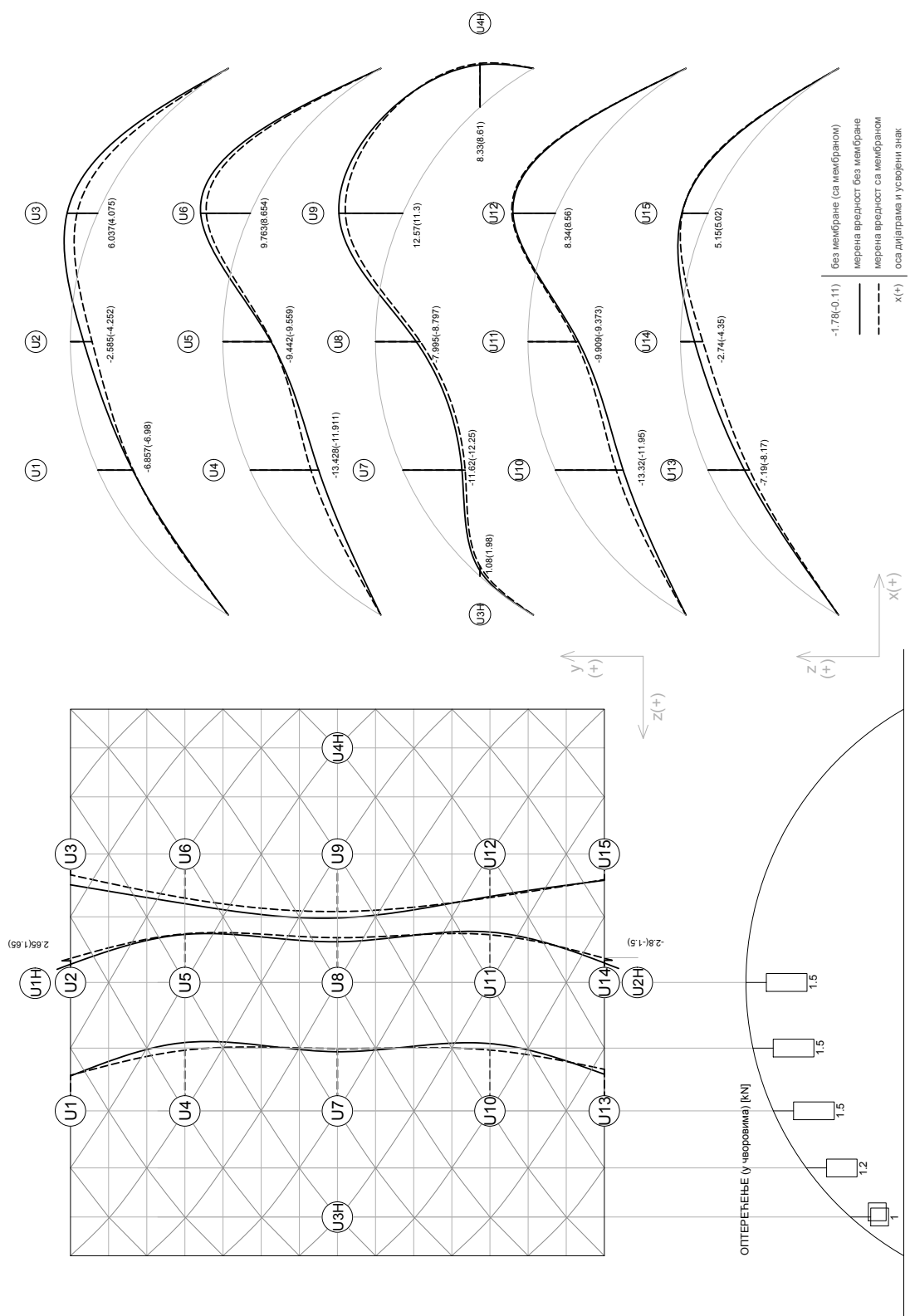
Резултати мерења показују да ламелна конструкција и без и са текстилном мембраном има трајне деформације након растерећења конструкције. Највећа трајна деформација је -2.942 mm. Деформација од -2.942 mm је очекивана пластична деформација до које долази у конструкцијама од дрвета. Допуштена разлика између заостале деформације и максималне вредности деформације под оптерећењем је 30%. Разлика између заостале деформације и максималне вредности мерене деформације у прототипу износи 21.89%, што је мање од допуштене.



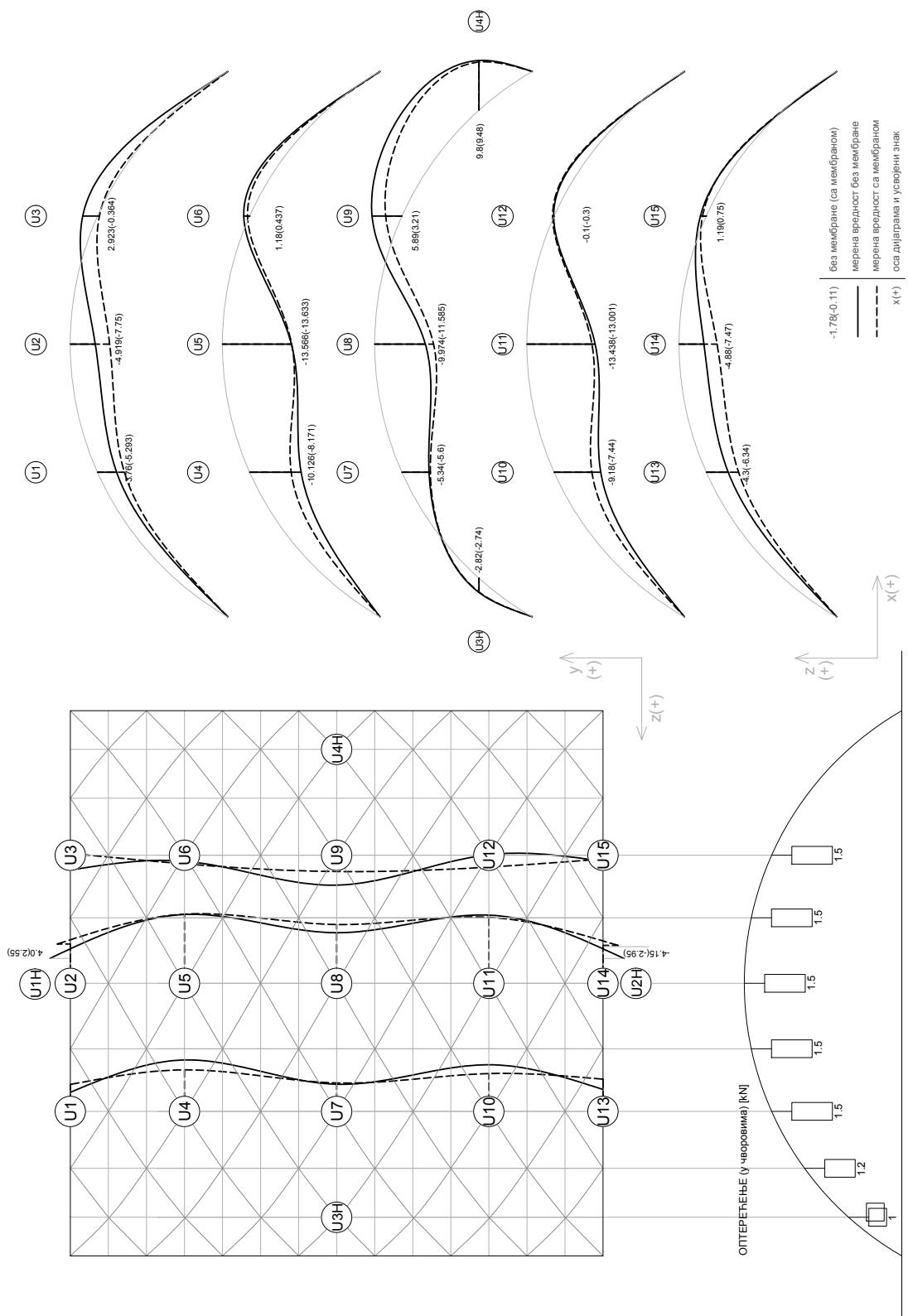
Слика 8-9. Вредности деформација ФАЗА I, извор: аутор



Слика 8-10. Вредности деформација ФАЗА II, извор: аутор

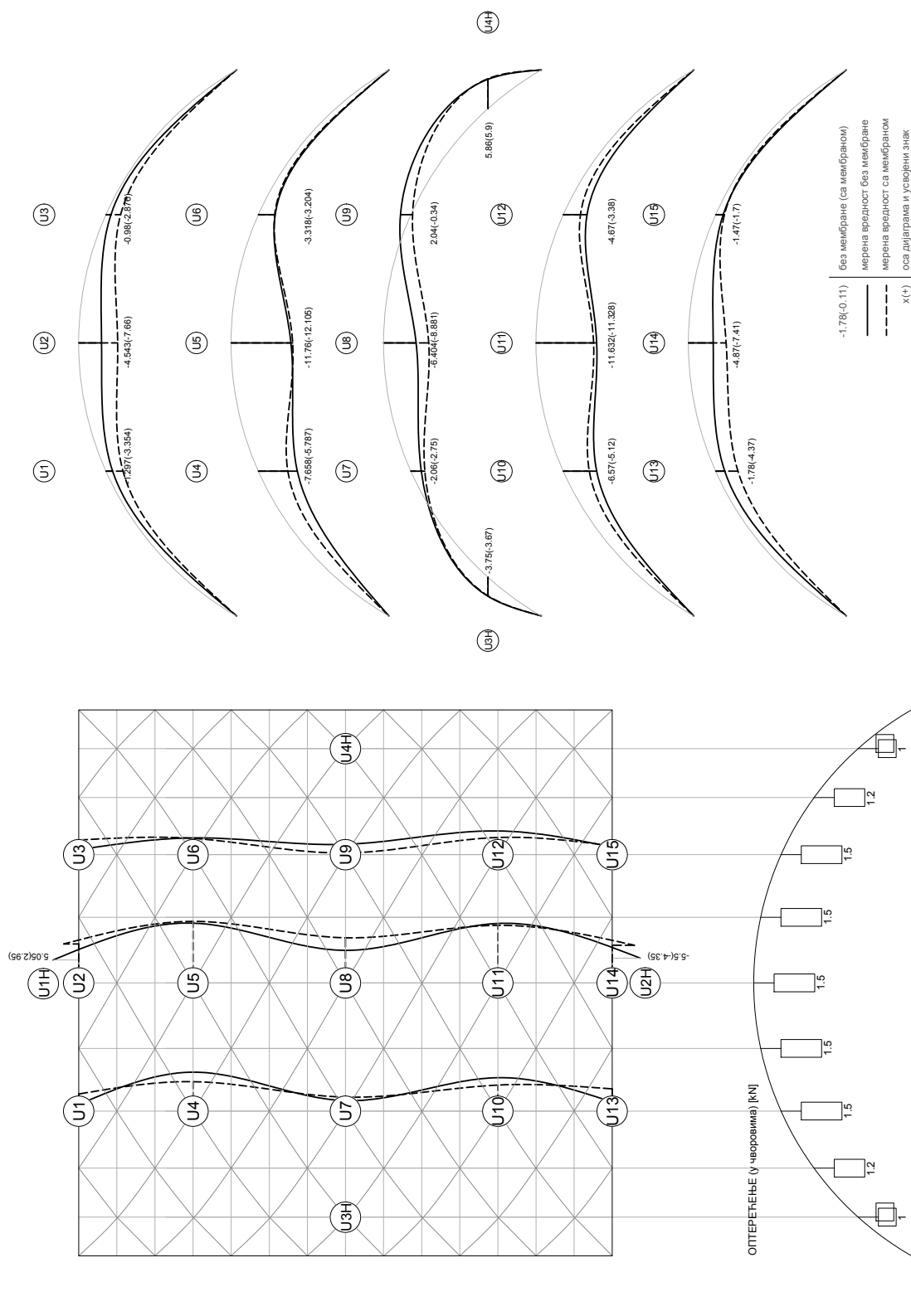


Слика 8-11. Вредности деформација ФАЗА III, извор: аутор



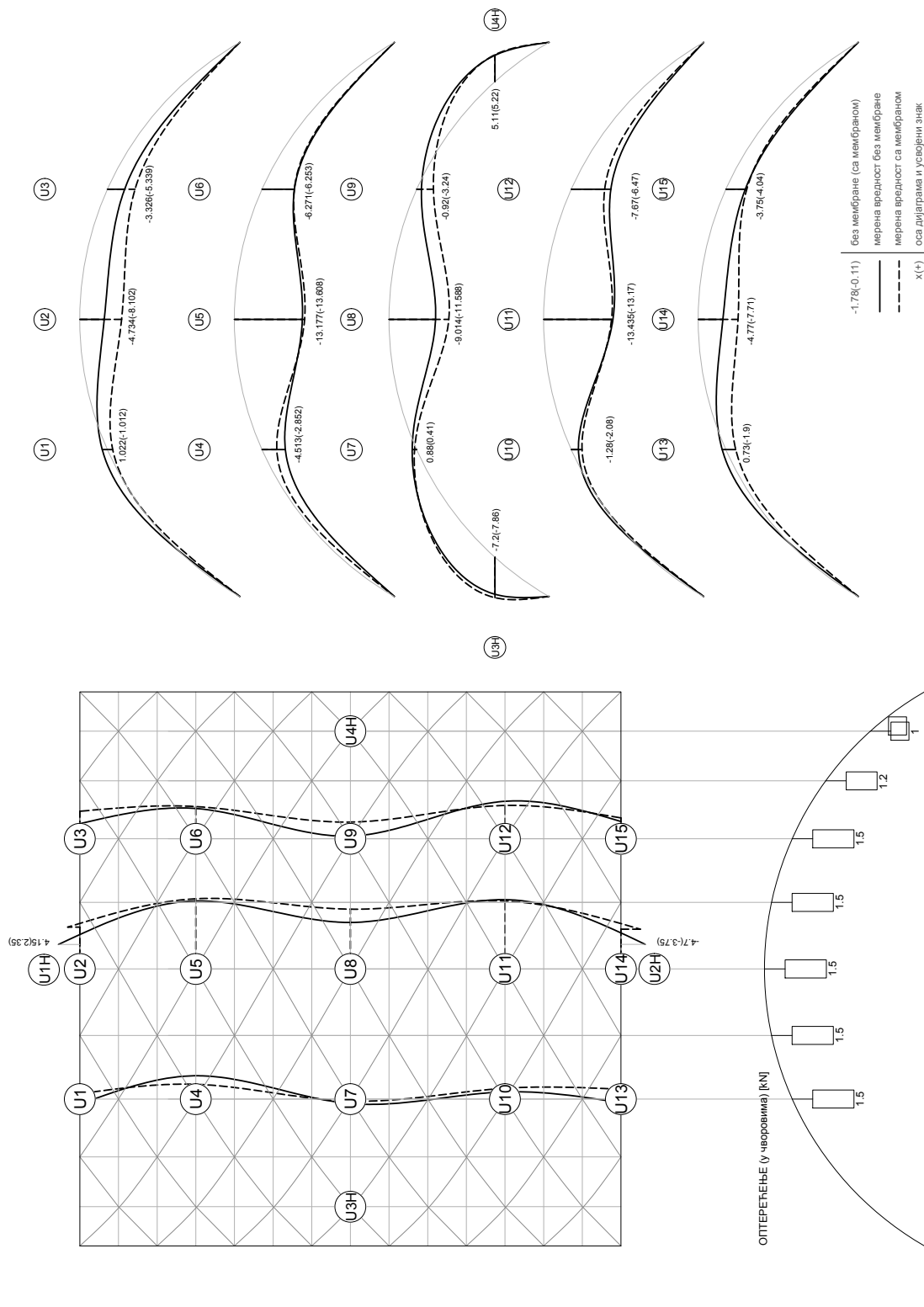
ФАЗА IV

Слика 8-12. Вредности деформација ФАЗА IV, извор: аутор

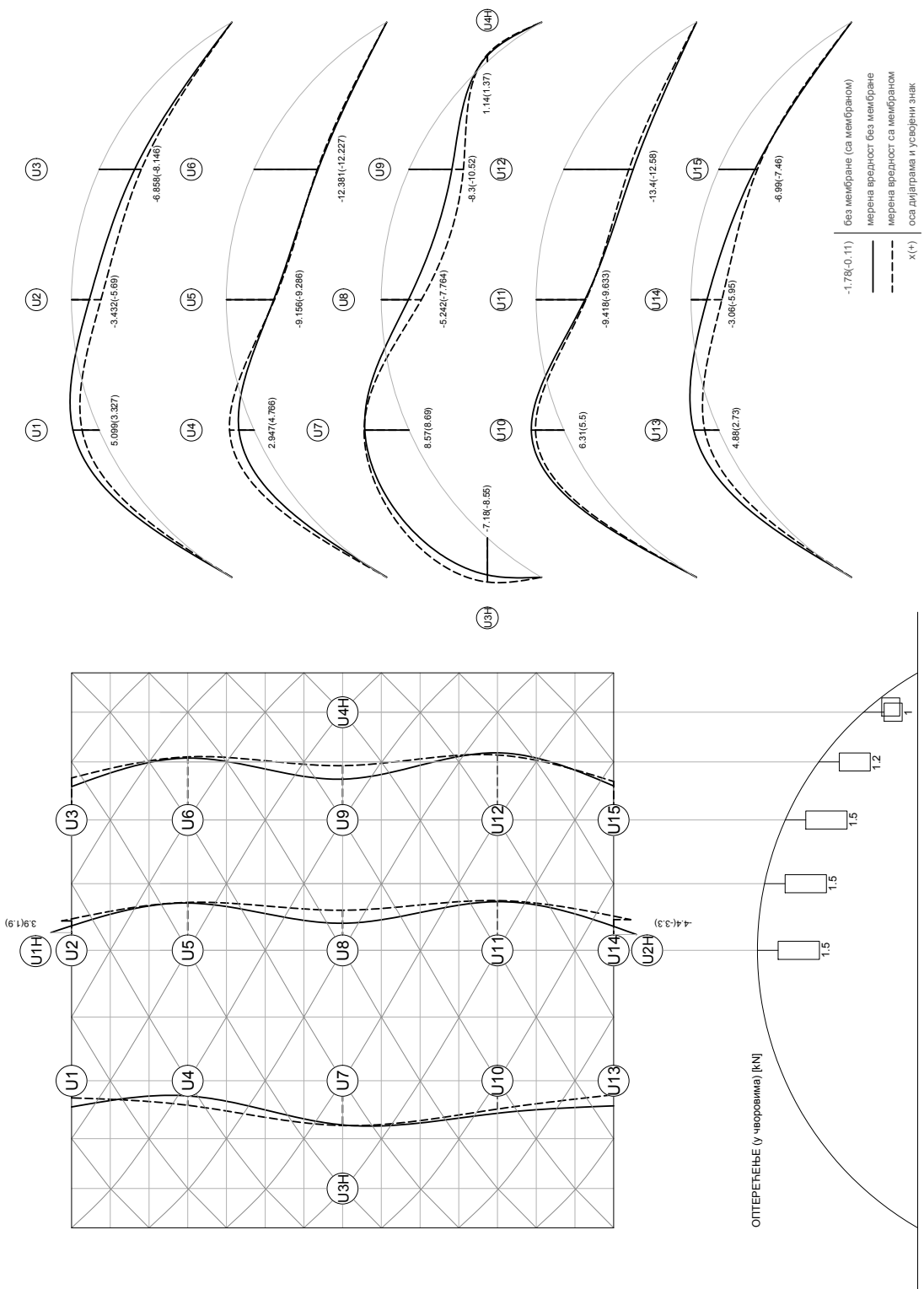


ФАЗА V - пуно оптерећење

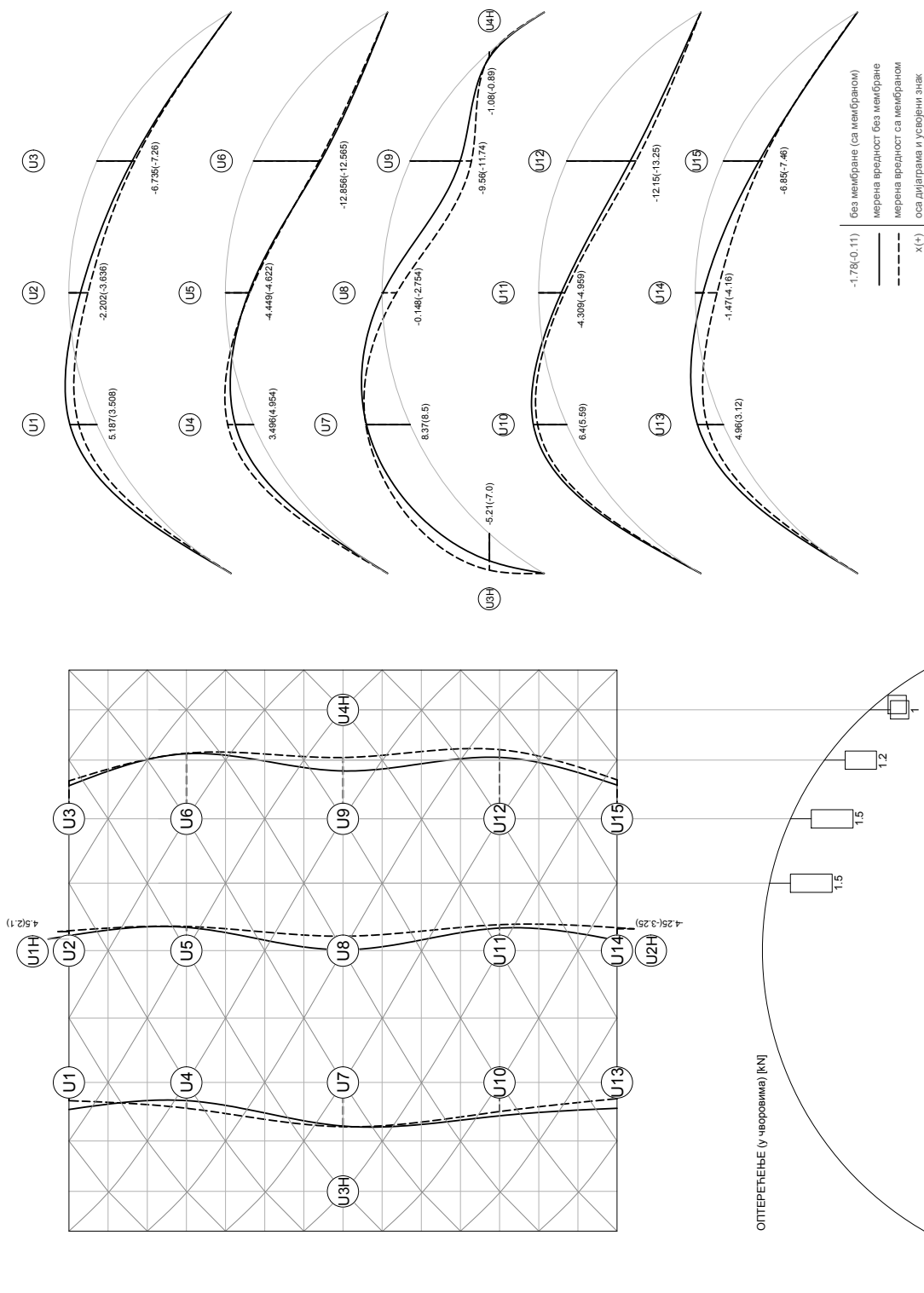
Слика 8-13. Вредности деформација ФАЗА V, извор: аутор



Слика 8-14. Вредности деформација ФАЗА VI, извор: аутор

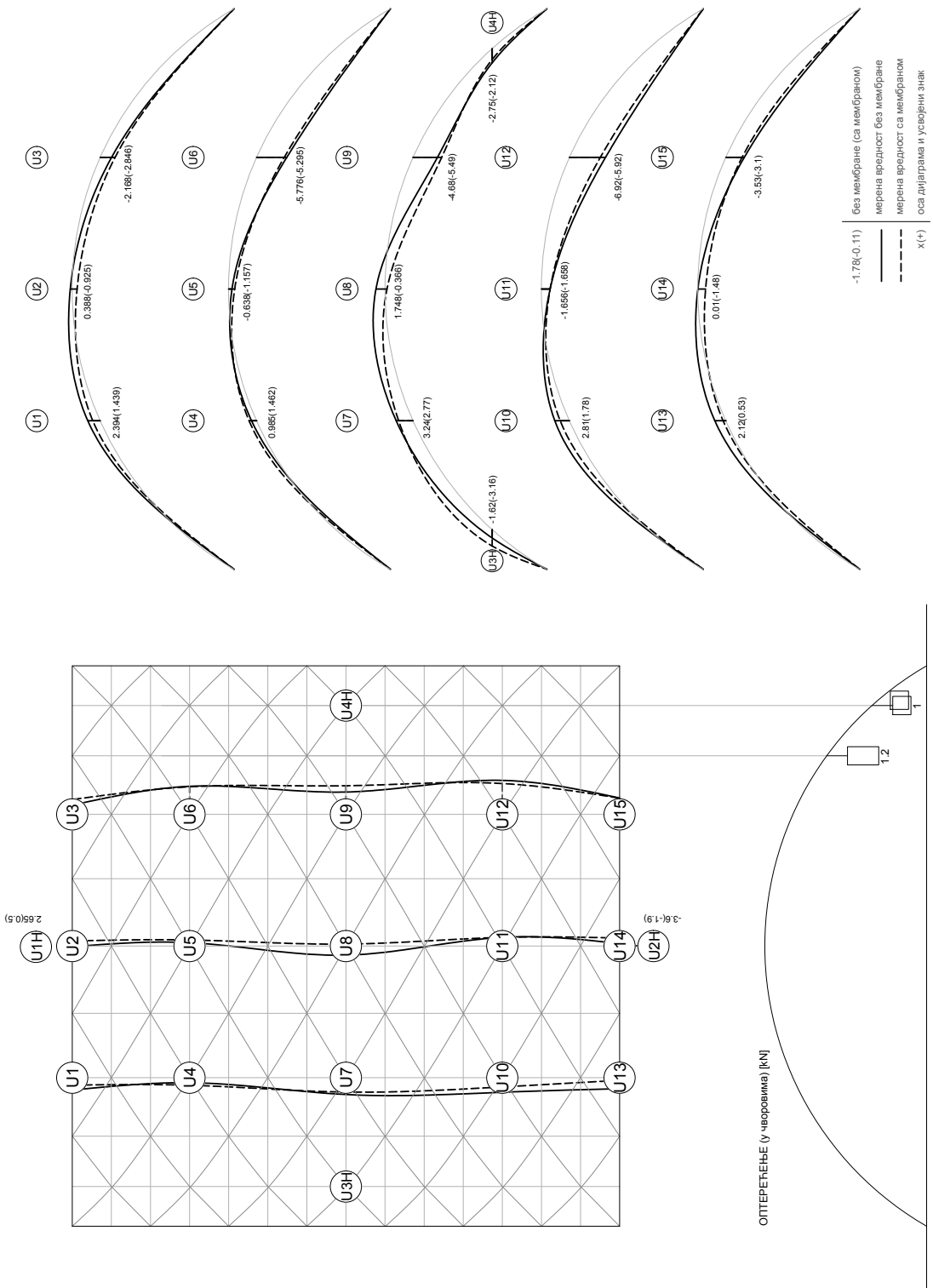


Слика 8-15. Вредности деформација ФАЗА VII, извор: аутор

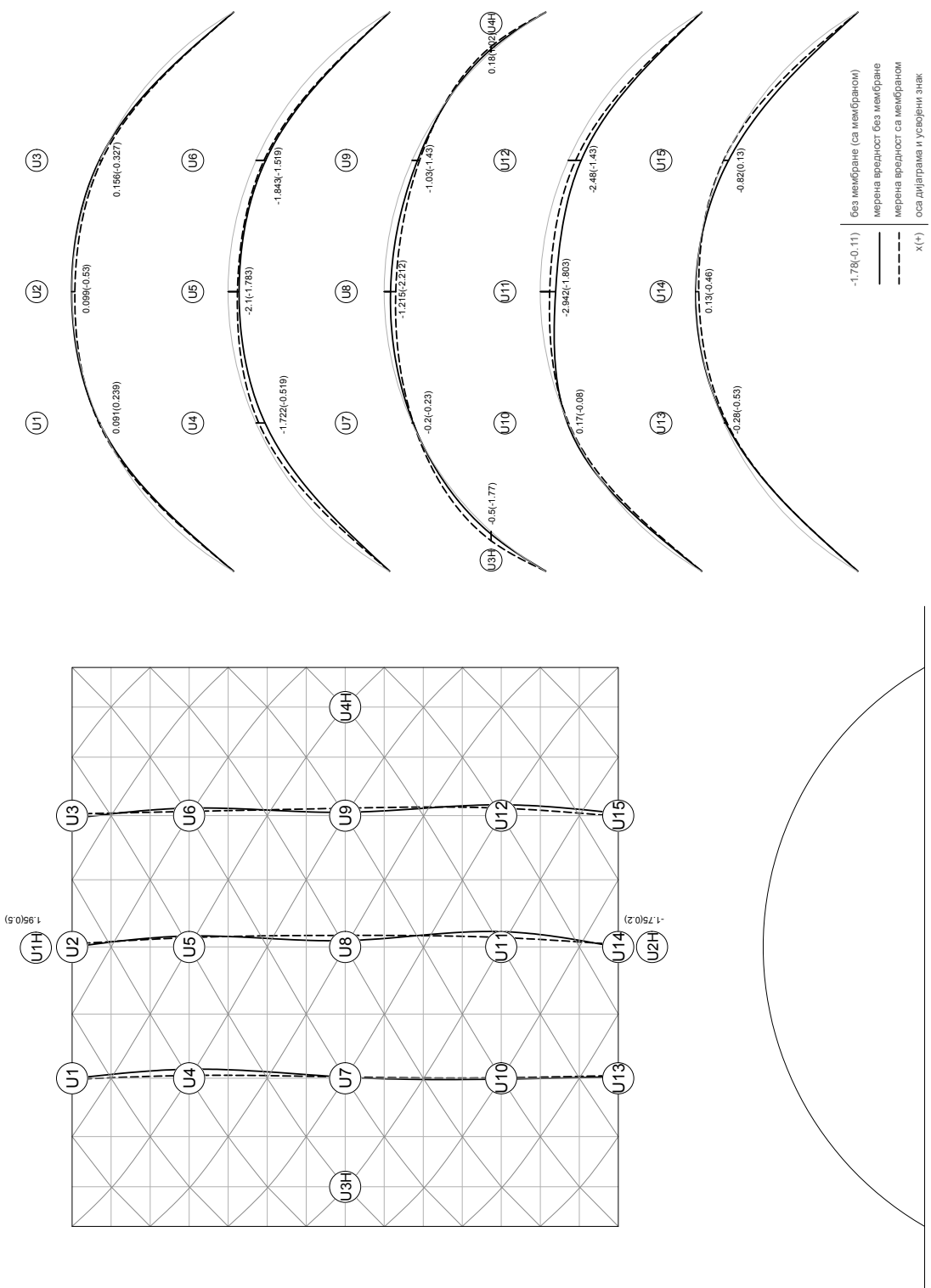


ФАЗА VIII

Слика 8-16. Вредности деформација ФАЗА VIII, извор: аутор



Слика 8-17. Вредности деформација ФАЗА IX, извор: аутор



РАСТЕРЕЋЕНА КОНСТРУКЦИЈА

Слика 8-18. Вредности деформација након растерећења конструкције, извор: аутор

9. Однос геометрије и елемената конструкције проверен путем прототипа - дискусија са закључцима³

Ламелне конструкције су просторне конструкције од линијских конструктивних елемената - ламела које су постављене дијагонално у два правца у односу на правац простирања конструкције, и у којима је свако поље које формирају ламеле паралелограм. Најчешће се изводе у форми свода или куполе, а већина изведених ламелних конструкција су сводне форме геометрије кружног правог цилиндра. Код Хуго Јункерса ламеле су прави штапови од савијеног челичног лима дужине једне стране паралелограма, тако да су све димензије ламела исте и све су везе исте. На овај начин добија се полигонална равна крова, а геометрија оса је мрежа ромбова. У Золингер крову, као и у крововима Емила Хунебека, позиција везе ламела и дужина оса ламела, која обухвата две стране паралелограма, не дају у потпуности исте елементе већ њихове сетове, а геометрија оса је мрежа паралелограма. Од свих историјских примера, једино је код Золингер крова површина крова континуална, а произашла је из облика саме ламеле која има залучену горњу ивицу.

Жељена форма конструкције условљава геометријску конфигурацију мреже ламела и утиче на пројектовање везе елемената. Свака ламела надовезује се на средину ламеле из другог правца, тако да се у чвору налазе три ламеле - једна централна и две прикључне. Предност ламелних конструкција је униформност елемената. Да би се задржала униформност елемената потребно је паралелно пројектовати везу ламела и геометрију целине, јер су оне међусобно зависне. Постављањем оса ламела тако да се секу у чвору, добија се континуална просторна крива - спирала по омотачу кружног правог цилиндра коју ламеле требе да прате да би се задржала униформност елемената. Анализом геометрије закључено је да је за извођење ламелне конструкције потребно симплификовати просторну криву у раванску, а да припада омотачу цилиндра. У овом случају мрежа оса ламела није прави паралелограм, већ су штапови лучни, а свака оса припада својој равни, за разлику од историјских примера ламелних конструкција. Процесом симплификације геометрије, добија се ротација у чвору која утиче на пројектовање везе ламела.

Дијагонална мрежа оса ламела није стабилна уколико се не додају конструктивни елементи. Један од начина решавања овог проблема је пројектовање крутих веза ламела. Золингер кров је пројектован са зглобним везама вијцима, а прикључне ламеле су у чвору раздвојене за троструку ширину ламеле (Müller, 2000). Као последица се у вези јавља ексцентрицитет, односно моменат савијања око вертикалне осе у централној ламели у чвору (Dijoux, 2017). Током година, инжењери су предлагали различите типове веза за ламелну конструкцију, а све су биле усмерене ка смањењу или елиминацији ексцентрицитета у чвору. Везе са челичним лимовима из Атласа дрвених конструкција (Herzog et al, 2004) пројектоване су као еластична укљештења или круте везе, решавајући стабилност мреже паралелограма и повећавајући носивост везе.

Нова веза ламела, примењена у прототипу конструкције, пројектована је тако да прати ротацију ламела у чвору. Модификацијом везе са челичним оковом Т-облика и удвајањем челичног лима тако да се поставља са спољних страна ламеле, смањено је потребно време за обликовање ламела. Са друге стране, повећан је утрошак челика, али је повећана и носивост везе. Веза је пројектована као еластично укљештење постижући тако стабилност ламелне конструкције, као и велику носивост везе са малим бројем вијака (Jirka and Mikes, 2010). Новопроектвана веза задржала је све предности које имају везе са челичним лимовима приказане у поглављу 7.2.

³ Анализа геометрије и извођење прототипа ламелне конструкције објављено је у научном раду *Petrović et al, 2022* који се налази у Прилогу докторске дисертације.

Са циљем да се задрже све предности ламелних конструкција: униформност елемената, једноставна монтажа и економичност конструкције, у оквиру истраживања кроз пројекат, приказаног у другом делу доктората, анализирана је геометрија ламела за сводне ламелне конструкције примењене на омотач кружног правог цилиндра. Улазни параметар за анализу геометрије био је да се осе свих ламела секу у чвору, тиме елиминишући ексцентрицитет који се јавља у вези у Золингер крову. На основу закључака анализе геометрије пројектовани су елементи конструкције прототипа: ламеле, везе и текстилна мембрана.

У овом поглављу, дискусија је вођена критеријумима очувања предности ламелних конструкција:

1. Елементи конструкције треба да буду максимално униформисани,
2. Осе ламела морају да се секу у чвору да би се елиминисао ексцентрицитет,
3. Монтажа мора бити једноставна и изведена у кратком временском року.

Анализи геометрије приступљено је коришћењем две методе: графичке методе и нумеричке методе анализе. Нумеричка метода омогућава једноставнију модификацију улазних параметара, као што је замена параметара површи на коју се аплицира ламелна конструкција. Нумеричка метода приказана у докторској дисертацији, насупрот методи коју је приказао Туш (Tutsch, 2020), омогућава сагледавање правилности по којима се гради ламелна конструкција - надовезивање краја једне ламеле на средину ламеле из другог правца, тиме задржавајући геометријску конфигурацију наизменично постављених ламела у првој ламелној конструкцији, Золингер крову. Представљене параметарске једначине могу се користити и у различитим софтверима за моделовање, као што је *Rhino*, да би се испројектовао прецизни геометријски модел ламелне конструкције (Löschke et al, 2021; Jin et al, 2019; Pintos, 2019). За израду прототипа конструкције, потребно је извршити симплификацију криве у равански лук. Графичка метода поделе омотача кружног правог цилиндра на једнаке делове (као што је дефинисано и параметарском једначином у нумеричкој методи) приказала је начин добијања раванских лукова као оса ламела, које припадају омотачу цилиндра. Свака лучна оса ламела добијена је из тачака које се налазе на омотачу цилиндра, где су праве које спајају тачке дефинисале распон лука, а праве које везује средину правих са крајем правих из другог правца дефинисале стрелу лука.

Коришћењем методе пројекције мреже на цилиндар добија се геометријска конфигурација ламела са свим вертикалним ламелама које се секу у чвору. Мрежа ламела добијена овом методом не одговара првом критеријуму, јер нису све ламеле униформне, већ постоје сетови различитих ламела (погледати слику 6-4в). Различитости у ламелама могле би да се превазиђу коришћењем *CNC* машина за израду ламела, чиме би се смањила дужина производње. Уколико би се оваква конструкција масовно производила, допринела би и економичности. Још једна предност овако пројектоване геометрије је континуална површина на коју се поставља покривач, што одговара планираном покривачу прототипа - текстилној мембрани. Све ламеле би биле лучне, радијуса кривине као и сегмент омотача кружног правог цилиндра, а крајеви би им се засецали под све већим углом како се приближавају ослонцима конструкције. Разлике у ламелама пренеле би се и на везе између ламела, те би постојао униформни сет веза ламела у зависности од њихове позиције у оквиру конструкције.

Метода поделе цилиндра на једнаке делове користила се и као графичка метода и као нумеричка метода, а примењена је и за пројекат прототипа конструкције. Коришћењем ове методе добија се униформна конструкција са шест типова ламела и њима одговарајућих веза, независно од густине геометријске мреже оса ламела зато што број типова дефинише позиција ламеле у оквиру конструкције. Иако у геометријском моделу делује да су све ламеле исте, јер су им осе ламела исте геометрије и дужине, током пројектовања прототипа уочене су разлике између типова ламела. Број типова ламела зависи од њихове позиције у

конструкцији, јер им се крајеви засецају под различитим угловима. Типови 1 и 2 су ламеле чији се крајеви засецају као у огледалу (погледати Табелу 3), и јављају се као последица углова од 60° и 120° у геометријској мрежи ламела. Ово се пресликава и на везе ламела, у којима су типови 1 и 2 (погледати Табелу 4), везе које се налазе у огледалу. Посматрањем и анализом искључиво геометријског тродимензионалног модела, не би био могуће уочити ове разлике, јер осе ламела јесу исте, осим по ободу конструкције где су једнаке половини дужине јер се ламеле постављају наизменично. Број типова могао би се смањити пројектовањем мреже у којој су сви углови од 90° , али само за један тип. Анализом геометрије и прототипа конструкције доказано је да конструкција испуњава кротеријум да су елементи конструкције униформни и да се све осе ламела секу у чвору. Пројектовањем конструкције методом поделе цилиндра на једнаке сегменте, такође се добијају раванске лучне ламеле, али су заротиране око своје осе (нису вертикалне у односу на тло, осим у слемени). Једини проблем овако пројектоване конструкције је што је потребна додатна обрада ламела након извођења ламелне конструкције да би се добила континуална површина за постављање покривача - текстилне мембране. Услед ротације ламела у чвору (погледати слику 6-9), ивица сваке ламеле излази ван равни и потребно ју је додатно обрадити пре постављања текстилне мембране.

Монтажа прототипа конструкције распона 10.75 m и дужине 10 m трајала је седам дана са само три радника. Претпоставка је да би се повећањем броја радника смањило и трајање монтаже, тиме испуњавајући и трећи критеријум - да је монтажа једноставна и да може да се изведе у кратком временском року. Број радника и време изградње утичу на економичност извођења конструкције (Шекуларац, 2010), односно, цена конструкције смањује се ако се смањује и број радника и број дана монтаже.

Приликом пројектовања прототипа, оса ивичних лукова пројектована је тако да се сече са осом ламела које долазе до њих. Разлика у димензијама ивичних лукова и ламела омогућила је место за постављање покривача - текстилне мембране, тако да се налази уз ламеле, а да не прелази преко лукова (погледати слику 7.3-1). Када се фронтално сагледава прототип конструкције, види се само ивични лук од лепљеног ламелираног дрвета и унутрашњост конструкције са мрежом ламела. Пројектовањем прототипа на овај начин, да се све осе конструктивних елемената секу у чворовима, а да се текстилна мембрана поставља тик уз ламеле, ексцентрицитет који се јавља постављањем покривача смањен је на минимум.

На основу дискусије, могу се извести следећи закључци:

- Графичка метода анализе геометрије треба да прати процес од целине ка елементима да би се добила геометријска мрежа ламела са што већим бројем униформних елемената.
- Употреба графичке метода која прати процес пројекције мреже на цилиндар доводи до униформних сетова ламела и њима одговарајућим везама. Све ламеле су вертикалне. Овај поступак је једноставно поновити и прилагодити мрежу ламела жељама пројектанта.
- Метода поделе цилиндра на једнаке делове резултује највећим бројем униформних елемената, што је доказано графичким и нумеричким путем. Нумеричким путем добијају се параметарске једначине спирале које је потребно симплификовати у раванске криве - лукове, да би се конструкција извела са раванским елементима. Ламеле су заротиране око своје подужне осе (нису вертикалне).
- Параметарске једначине дефинисане у приказаној нумеричкој методи је могуће применити у софтверима за моделовање конструкције. Такође, параметри површи по којој се крећу ламеле могу се модификовати према жељама пројектанта.
- Најмањи могући број униформних типова елемената за сводну ламелну конструкцију геометрије кружног правог цилиндра у којој се осе ламела секу у чвору је шест. Променом

мреже из паралелограма у правоугаонике, односно променом углова из 60° у 90° , могуће је смањити број типова на пет, али се онда у потпуности мења изглед ламелне конструкције.

- Пројектовањем свих елемената конструкције тако да им се осе секу у чворовима, и након постављања текстилне мембране, ексцентрицитет у вези смањен је на минимум.

- Текстилна мембрана, ослоњена између ивичних лукова, као покривач ламелне конструкције, смањује деформације у Y-правцу конструкције, а повећава вертикалне деформације, услед вертикалног оптерећења конструкције, које остају у нивоу допуштених.

Истраживање кроз пројекат, приказано у другом делу докторске дисертације, указује на могућности ламелних конструкција и на њихов потенцијал за употребу у савременим архитектонским пројектима.

III ПРИМЕНА ИСТРАЖИВАЊА У АРХИТЕКТУРИ

10. Предлози примене ламелне конструкције од дрвета са текстилном мембраном

Кроз историју се показало да је ламелна конструкција увек коришћена за објекте у којима конструкција остаје видна, као и за објекте различитих намена - од стамбених, индустријских до комерцијалних, због чега се види и велика варијација у распонима. Претпоставка је да би пројектована ламелна конструкција од дрвета са текстилном мембраном могла да се користи за објекте различитих намена, видне конструкције, али за просторе који се не греју, јер су термоизолационе карактеристике текстилне мембране ниске. Примарна функција ове конструкције је функција надстрешнице, а може се користити и за објекте павиљонског типа.

Павиљони су одувек били један од начина презентовања нових достигнућа и испитивања граница форме и конструкције. Још у 19. веку када је оформљена прва Светска изложба (ен. ЕХРО), павиљони су унапређивали и приказивали најновија достигнућа конструкције у пуном сјају, а симболизовали су нове тенденције друштва (Трактенберг, 1997, 127). Они су привремени објекти, али неретко постају трајни и морају да се димензионишу на сва оптерећења конструкције. Такве структуре је потребно пројектовати да се лако монтирају и демонтирају, као и да буду једноставне за транспорт. Одабиром дрвета као конструктивног материјала павиљона наглашава се значај ликовне вредности материјала, која има велик утицај на перцепцију објекта. Боја и текстура дрвета утичу на изглед објекта и стварају посебан осећај пријатности и тоpline простора, а начин његове примене утиче на визуелни карактер и ликовни израз објекта. „Дрво,..., спада у материјале који могу да нагласе и изразе специфичне одлике градитељског дела на коме су примењени, почев од основне структуре па до детаља“ (Ивановић-Шекуларац, 2017, 105). Однос конструкције и покривача утиче на ликовност павиљона и уклапање у контекст, док са друге стране омогућава његово неометано функционисање у различитим временским условима.

Предности примене ламелне конструкције од дрвета са текстилном мембраном за изградњу павиљона огледају се првенствено у једноставности монтаже, односно демонтаже елемената конструкције. Темељи самци омогућавају једноставну монтажу, на темељне стопе или монтажне темеље самце, док веза ламела која се остварује вијцима дозвољава једноставну монтажу, односно демонтажу свих елемената конструкције. Карактеристично за павиљоне је да су најчешће малих распона и да се користе као помоћни објекти током одржавања различитих манифестација, као што је на пример Креод (Furuto, 2012), или као привремени објекти за окупљања, налик на Serpentine Gallery павиљоне у Хајд парку (Hyde Park) у Лондону (Serpentine Galleries, 2021). У овом раду је приказан прототип распона 10.75 m, који наткрива површину од 106 m², а конструиран је из ламела од лепљеног ламелираног дрвета дужине оса 3 m у пољу и 1.5 m по ободу конструкције. Претпоставка је да би се за павиљонске конструкције мањег распона могле користити ламеле мањих дужина, чиме би се омогућио једноставан транспорт елемената на задату локацију. Начин сагледавања павиљона пројектованог као ламелна конструкција са текстилном мембраном мењао би се током дана, што представља један од квалитета ове конструкције. Током дана дијагонална мрежа ламела назирала би се испод мембране, а ноћу би се нагласила светлом унутар павиљона, што доприноси сагледавању конструкције већ у тренутку приласка објекту.

Пројектована конструкција може наћи примену и за **заштитне конструкције** који су сличног карактера као павиљони. Приликом истраживања локалитета, потребно је одређене делове наткрити и сачувати док се не заврши истраживање. Заштитне конструкције треба да буду монтажне, на монтажним темељима, мале тежине конструкције која не би оптерећивала археолошке остатке и да ју је могуће демонтirati и поставити поново на другом делу

локалитета. (Nikolić, 2018) Ламелна конструкција са текстилном мембраном испуњава све наведене критеријуме, док истовремено пружа заштиту од временских непогода.

Могућа примена конструкције је за надстрешнице башта угоститељских објеката, као засена у већим парковима, за предворја хотела, планинских одмаралишта и слично.

Атријуми које формирају стамбени и пословни објекти у старим градским језгрима, као и атријуми у склопу великих објеката, представљају места града чији се простор може активирати, формирајући микроамбијенте који диктирају ритам града. Овакви простори преовлађују у старим градским језгрима, развијеним пре Индустијске револуције, туристички атрактивним локацијама, местима од којих је град почео да се шири, често претворена у пешачке зоне, са забраном тешког саобраћаја у ближој околини, густо насељена, а која се неретко воде и као заштићена подручја. (Madanipour, 1996) Специфична типологија старих градских језгара даје својеврстан шарм и доприноси амбијенталности ових градских зона што их чини и туристичком атракцијом градова. Зона око Кнез Михајлове улице, на општини Стари град, је старо градско језгро Београда. У овој зони града постоји велики број атријума у оквиру стамбених и пословних блокова. Атријуми који су део јавног градског простора су они повезани пасажима, а један је постао препознатљиво место града - Спасићев пасаж. Атријуми на местима пасажа који су продужени улица Лазе Пачуа и Марка Лека, а спајају Кнез Михајлову улицу са Чика Љубином, једни су од потенцијала ове градске зоне. Наткривањем ових атријума оформили би се нови градски амбијенти, простори за нове активности, различите функције, који би представљали нову градску атракцију. Овакви простори који се истичу својим карактером представљају нова места која могу да буду туристичка атракција и да допринесу економском развоју града.



Слика 10-1. Атријуми у Милану/Риму/Валенсији, извор: prof. dr N. Šekularac / Affaritaliani, 2017 / Silvia J, 2020

Примери активације унутрашњих дворишта, пасажа и атријумских простора у оквиру градске структуре најчешће се могу видети у Италији и Шпанији, а налазе се у оквиру ужег центра града или у самом градском језгру. Приказани простори Галерије Виторио Еменуеле у Милану (Galleria Vittorio Emanuele), Галерије Алберто Сорди у Риму (Galleria Alberto Sordi) и Трга Редонда (Plaza Redonda) у Валенсији (Слика 10-1) су различитих волумена, али представљају инспирацију за развој комерцијалних садржаја који би привукли кориснике да активно користе ове просторе. На основу примера из света, може се претпоставити пренамена поменутих пролаза у Београду, као и њихово наткривање. Ограничен простор улаза и прилаза пасажима, омеђеност пешачком зоном, представљају потешкоће у извођењу надстрешнице за које треба наћи погодна решења како у естетском, тако и у економском смислу. Примена ламелних конструкција од дрвета са текстилном мембраном погодује оваквим просторима из разлога што је целу конструкцију лако допремити мањим доставним возилом, а конструктивни елементи малих дужина и начин њихове монтаже не захтевају тешку механизацију на самој локацији. Ниво транспарентности мембране одговара атријумским просторима јер пропушта довољно светлости да не смета околним објектима око атријума, а ипак пружа један ниво заштите од сунчевог зрачења. Конструкције сачињене из мреже греда малих дужина и димензија попречних пресека, које формирају просторне конструкције великих распона, као што су и ламелне конструкције, су човекомерније и пријатније људском оку, за разлику од конвенционалних конструкција великих распона сачињених од греда великих димензија попречних пресека. Претпоставка је да и естетика пројектоване конструкције у докторској дисертацији одговара овој намени.

10.1 Економичност извођења ламелне конструкције са текстилном мембраном

Ламелна конструкција од дрвета настала је почетком 20. века за потребе становања, са идејом да буде једноставна за монтажу, да може да се изведе у кратком року и да могу да је монтирају необучени радници (Winter and Rug, 1992). Основна ламела била је од монолитног дрвета мале ширине попречног пресека, 2.5 cm или 5 cm, само са спољном ивицом лучном, а везе су биле са типским вијцима (Peulić, 2002, 635). За то време и услове у грађевинарству, ламелна конструкција је била економична. Напретком технологије и развојем грађевинарства у претходних 100 година, пројектован је велики тип конструкција цилиндричне форме које су економичније и једноставније за извођење од ламелне конструкције.

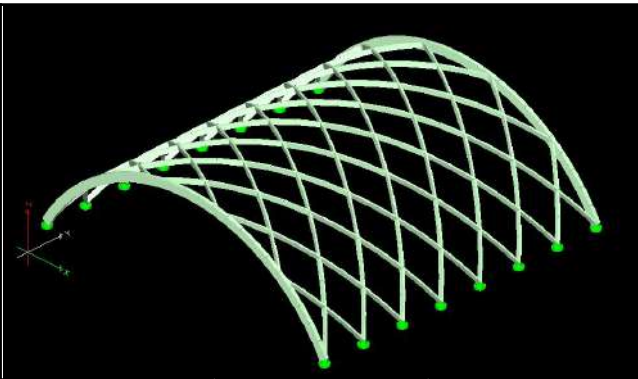
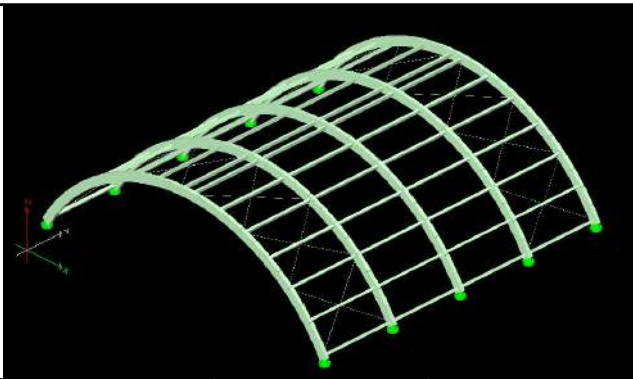
У овом раду биће приказана упоредна анализа утрошка материјала за прототип ламелне конструкције од дрвета и једне типске хале чији су примарни носачи лукови на три зглоба од лепљеног ламелираног дрвета. У табели 10 наведени су елементи који су потребни за конструисање хале, али су изостављени темељи и текстилна мембрана јер остају непромењени у оба случаја. Мембрана којом се покрива конструкција исте је квадратуре и монтира се на ивичне лукове, као и код конструкције прототипа, те утрошак материјала за мембрану и њене носаче није урачунат. Највеће разлике виде се у великом броју елемената који су специјално прављени за конструкцију прототипа, док би се за конструкцију хале користили већински типски елементи који се серијски производе на тржишту.

Типска хала пројектована је за исти распон, висину и дужину као и конструкција прототипа. Лукови на три зглоба су примарни носачи конструкције, распона 10.75 m, док су секундарни елементи роњаче распона 2.6 m постављене на узајамном растојању од 130 cm. Спрегови су дијагонале од челичних сајли и они прихватају утицаје латералних сила и остварују стабилност конструкције. Спрегови су постављени у првом и последњем конструктивном пољу и обухватају по два поља између роњача.

Ламеле у конструкцији прототипа формиране су као лучни линијски носачи од лепљеног ламелираног дрвета. Елементи су израђени у радионици према спецификацијама,

за разлику од рожњача за типске хале стандардизованих димензија. Цена конструкције знатно се смањује када се користе елементи који се налазе у серијској производњи. Лукови од лепљеног ламелираног дрвета се праве у радионици према спецификацијама за обе конструкције. У укупном збиру утрошене грађе, лепљеног ламелираног дрвета за типску халу је и даље знатно мање него за ламелну конструкцију прототипа. Мали распон рожњача даје и мале статичке утицаје у рожњачама због чега је могуће користити типске окове за дрвене конструкције који се такође серијски производе, што смањује цену конструкције хале у поређењу са челичним оковима пројектованим за ламелну конструкцију. Челични окови којима се остварује веза ламела у прототипу формирани су од лимова, сечених, а затим варених према радионичкој документацији, чиме се повећава и број дана за извођење конструкције у односу на типске хале. Утрошак челичног лима за анкер плоче је приближно исти, док је број анкер вијака већи за 24 комада који су потребни за монтажу конструкције прототипа. Број вијака и пратећих елемената везе за конструкцију прототипа приближно је исти као и за конструкцију типске хале. Остали елементи конструкције праве занемарљиву разлику у утрошка материјала.

Табела 10. Упоредна анализа утрошка материјала прототипа и типске хале

					
елемент	материјал	количина	елемент	материјал	количина
ламеле	LLD четинари 6/16 cm	2.15 m ³	рожњаче	монолитно дрво четинари 8/12 cm	1.4 m ³
лучни носачи	LLD четинари 12/28 cm	0.90 m ³	лучни носачи	LLD четинари 12/28 cm	2.2 m ³
-	-	-	спрегови	челик Ø10 mm	80 m
-	-	-	шпанери		24 ком
окови ламела и окови лукова	челични лим t = 3 mm	196.25 kg	оков за рожњаче и оков за лукове	челични лим t = 3 mm	218 ком [~120 kg]
ослоначки оков	челични лим t = 3 mm и 5 mm	44.20 kg	ослоначки оков	челични лим t = 3 mm	10 ком [~20 kg]
анкер плоче	челични лим t = 10 mm	116.80 kg	анкер плоче	челични лим t = 10 mm	115.71 kg
вијци	M12, L = 80 mm	560 ком	вијци	M12, L = 100 mm	224 ком
матице	M12	608 ком	матице	M12	744 ком
подлошке	M12	608 ком	подлошке	M12	744 ком
брзони	M12, L=150 mm	24 ком	брзони	M12, L=150 mm	260 ком
анкер вијци за бетон	M16	64 ком	анкер вијци за бетон	M16	40 ком

Релевантни фактори за анализу исплативости конструкције су и достављање елемената конструкције на градилиште, број радника који монтира конструкцију, број дана потребан за монтажу и потреба за механизацијом на градилишту. (Шекуларац, 2010, 130) Сви елементи конструкције за прототип могу се доставити на градилиште у једном лакој доставном возилу, смањујући временски и финансијски утрошак транспорта. Конструкцију је могуће монтирати са три радника за седам дана, а претпоставка је да би на монтажи радило барем пет радника, што би смањило број радних дана. За монтажу прототипа коришћења је једна монтажна скела. Сви ови фактори знатно смањују цену извођења конструкције. При изради хала од дрвене конструкције са текстилном мембраном важно је узети у обзир и доступну технологију произвођача елемената конструкције (Шекуларац, 2010, 130), као и доступне елементе везе на тржишту.

Када се погледа упоредна анализа утрошка материјала и начина извођења конструкције, закључак је да цена ламелне конструкције од дрвета са текстилном мембраном може да се смањи оптимизацијом челичних веза и кориговањем дужина ламела, као што је предложено у истраживању спроведеном на Универзитету у Лајпцигу (Dijoux, 2017). Мању цену конструкције омогућила би и серијска производња елемената, уколико би се хале масовно примењивале, као што је био случај са халама инжењера Јункерса (Detail 10/2015).

10.2 Примена конструкције за наткривање атријума

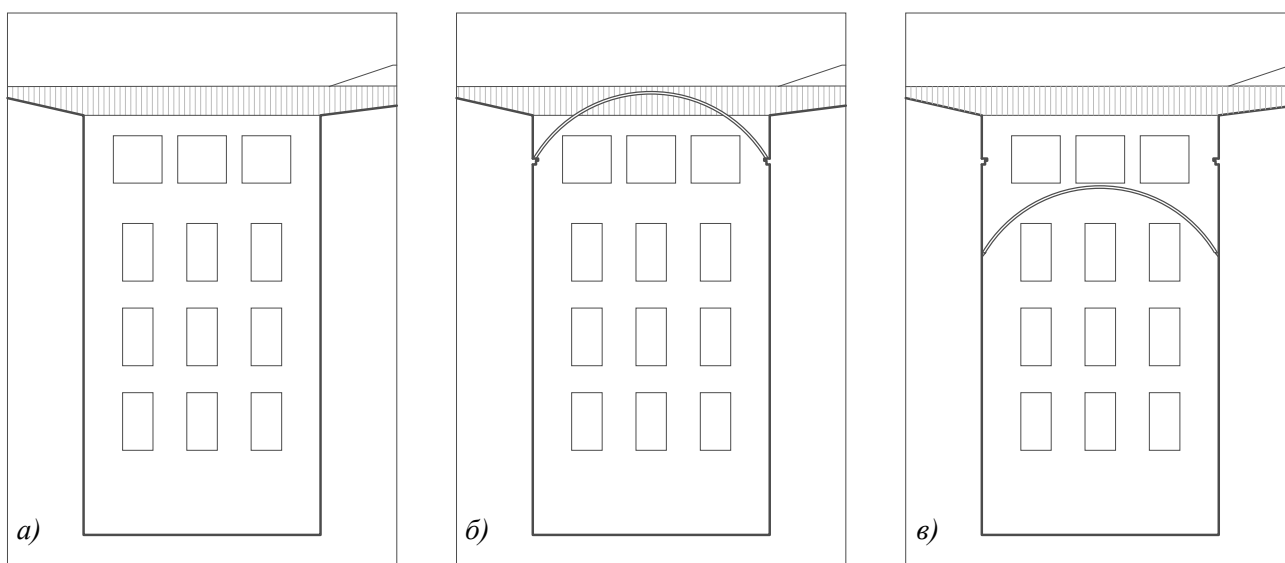
Идеја о пројектовању надстрешнице за један од атријума зграде Техничких факултета, Универзитета у Београду, јавила се из жеље да се испита могућност примене ламелне конструкције са текстилном мембраном за наткривање атријума на конкретном примеру. У згради Техничких факултета налазе се три факултета: Електротехнички факултет, Грађевински факултет и Архитектонски факултет. Објекат се пружа у дужини од приближно 150 m у правцу улице Булевар краља Александра, улази 66 m у блок, висине је око 23 m, спратности П+3+Пк, централно постављену аулу факултета и са бочних страна по два атријума. Један од атријума није искоришћен, док се у осталима налазе лабораторија Електротехничког факултета, летња башта КСТ-а (Клуба студената технике) и старо дрво дивљег кестена. Наткривањем атријума добио би се простор који је могуће користити током целе године. Надстрешница која одговара оваквој интервенцији треба да дозволи упад светлости у атријум, а да истовремено штити од неповољних атмосферских утицаја. Ламелна конструкција од дрвета са текстилном мембраном испуњава дате критеријуме (Polomova, 2019), истовремено стварајући карактеристичан амбијент због упада светлости кроз дијагоналну мрежу ламела.

Димензије атријума су 13.6/22.4 m у основи, а висине је 24.4 m. Конструкција надстрешнице је геометрије сегмента цилиндра и премостила би распон од 13.6 m, што дозвољава да предлог интервенције буде пројектован као и прототип, са лучним ламелама од лепљеног ламелираног дрвета, дужине 3 m, чија је веза остварена челичним оковима са по два вијка. У забатним равнима налазили би се лукови на три зглоба од лепљеног ламелираног дрвета, а на половини дужине, на 11.2 m, био би постављен још један лук на три зглоба, према препорукама инжењера Шер и Пурнома, да однос распона и дужине увек буде 1:1, односно да се у случају конструкција великих дужина поставе додатни лукови који би формирали овај однос (Scheeg and Purnomo, 1985, 409).

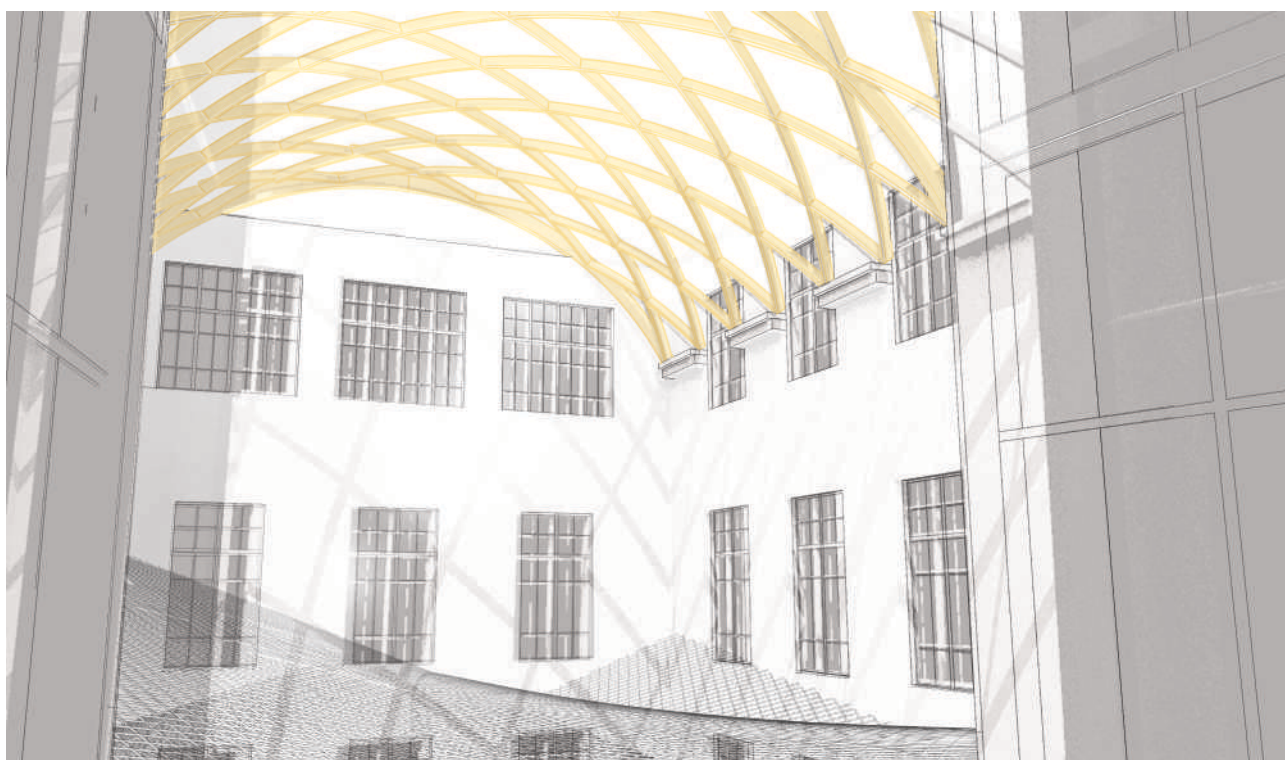
Постављање надстрешнице изнад атријума потенцијално може да изазове проблеме уколико се не обрати пажња на позицију надстрешнице у оквиру атријума, као и на проветреност. Свака врста интервенције на постојећем објекту утиче на сам објекат, а у докторској дисертацији биће анализиран утицај сводне надстрешнице, ламелне конструкције

од дрвета са текстилно мембраном, на кров објекта око атријума и на околне зидове атријума, испод надстрешнице, услед дејства ветра.

Вредности коефицијената притисака на надстрешницу изнад атријума и на део објекта Техничког факултета на који утиче интервенција добијене су експерименталном анализом спроведеном у аеротунелу Машинског факултета, Универзитета у Београду, за три случаја: (1) без надстрешнице, (2) са надстрешницом ослоњеном на венац атријума и (3) када је надстрешница унутар атријума. На објекту Техничких факултета ламелна конструкција од дрвета са текстилном мембраном се ослања на оригинални венац, пре надоградње објекта. (Слика 10-2) Контрола експеримента изведена је у софтверу за анализу утицаја ветра на објекте *Ansys Fluent* у сарадњи са професором др Александром Бенгином са Машинског факултета Универзитета у Београду.



Слика 10-2. Позиција надстрешнице у атријуму зграде Техничких факултета: а) без надстрешнице, б) са надстрешницом ослоњеном на венац атријума и в) са надстрешницом унутар атријума, извор: аутор



Слика 10-3. Приказ надстрешнице у атријуму зграде Техничких факултета, извор: аутор

10.3 Испитивање утицаја ветра на објекат чији се атријум наткрива

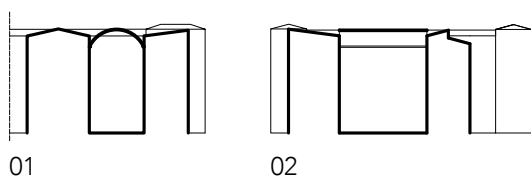
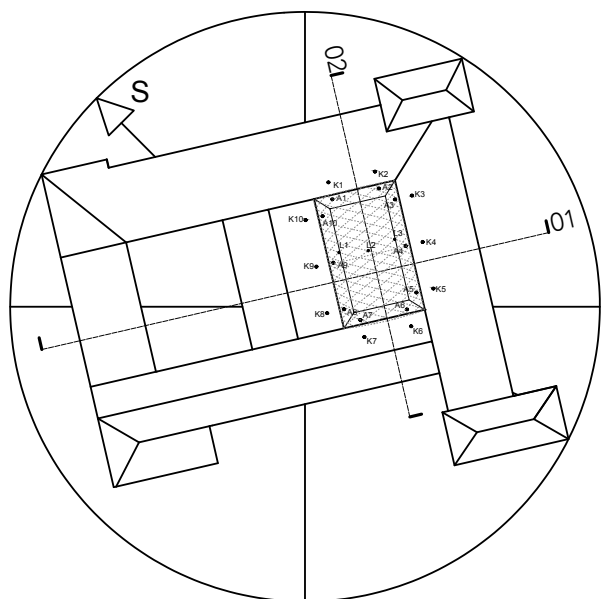
Правилници који дефинишу дејства ветра на објекте углавном дефинишу опште случајеве оптерећења који не узимају у потпуности у обзир контекст у коме се гради. Прорачунске вредности коефицијената који дефинишу правац ветра, храпавост терена, висину објекта и слично не дају довољно информација о стварној слици утицаја на локацији. (Boggs and Lerage, 2006) Коефицијенти спољашњег притиска на објекат дефинисани су у Еурокоду (EN 1991-1-4:2005) према површини на коју делују, а разликују се и за облике кровова: равне кровове, двоводне кровове, четвороводне кровове, куполе и кровове сводне форме. Оптерећења ветром на цилиндричну форму, као што је предложена надстрешница атријума, према конструкцији прототипа пројектованог у докторској дисертацији, обухваћена су табелом која приказује вредности коефицијента притиска за три подужне зоне, који зависе од три параметра: висине на којој се налази конструкција, односа висине и распона конструкције и односа стреле и распона конструкције. Еурокод дефинише вредности коефицијената притисака на двоводне и четвороводе кровове у односу на форму и нагиб крова, док су за зидове дефинисани према дименизијама зида по обиму објекта. Зидови у атријуму могли би да се посматрају као зидови између низа објеката, јер Еурокод не дефинише коефицијенте притисака за зидове атријума. Слична метода приказана је у научним радовима који се баве анализом утицаја ветра на кровове кућа у низу (Gavanski and Nishimura, 2022) и на кровове објеката на малој удаљености (Chen et al, 2019).

Током година, различити аутори су се бавили истраживањима утицаја ветра на објекте и експериментима за добијање коефицијената притисака који нису дефинисани у правилницима за дејства ветра на објекте. Касперски (Kasperski, 2003) презентује истраживање у којем даје кораке за анализу утицаја ветра које је потребно да би се дефинисао правилник за дејства ветра. Уемацу (Uematsu et al, 2008a; 2008b) се бави истраживањем коефицијената притисака за различите форме надстрешница, а у свом најскоријем истраживању (Ding and Uematsu, 2022) приказује дискусију на тему сводних надстрешница. У том истраживању наведени су коефицијенти притисака добијени експерименталним путем за углове од 0°, 45°, 60° и 90°. У закључцима су наведени максимални и минимални коефицијенти притисака који нису дефинисани правилницима за дејства ветра, а који су значајни за одабир типа покривача надстрешница. Колиерс (Colliers et al, 2019) скреће пажњу да форме мембрана и љуски нису обухваћене правилницима за дејства ветра и да је потребно спровести експериментална испитивања са циљем да се дефинишу коефицијенти притисака за правилнике. У свом истраживању приказује мембранску конструкцију геометрије хиперболичног параболоида и предлаже методологију за њихову анализу у аеротунелу.

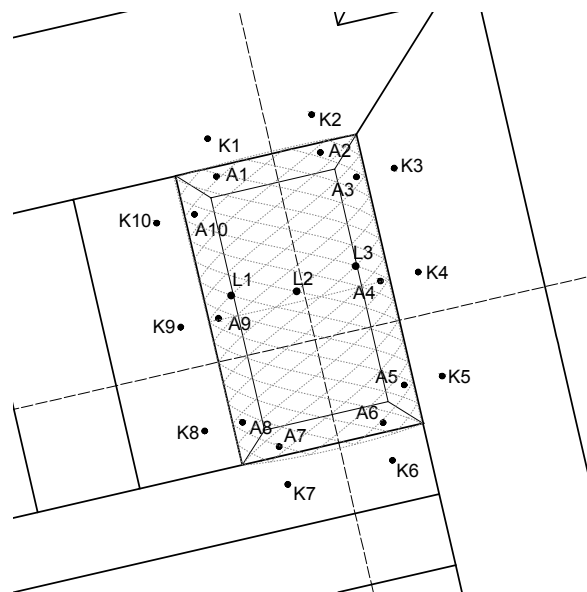
У циљу побољшања енергетске ефикасности објеката, на кровове се постављају соларни панели и колектори, због чега се многи аутори у савременом добу баве испитивањима коефицијената притисака на постојеће објекте након овог типа интервенција (Dai et al, 2022; Zhelykh et al, 2022). У докторској дисертацији испитује се утицај постављања надстрешнице на околне кровове атријума, са циљем да се установи потреба за ојачањем или заменом постојећег покривача. Ово је једна од актуелних тема савремених истраживања (Sarma et al, 2023).

Надстрешнице изнад атријума су уобичајне архитектонске интервенције, а у докторској дисертацији биће испитана сводна ламелна конструкција од дрвета са текстилном мембраном која има улогу надстрешнице изнад атријума зграде Техничких факултета у Београду. С обзиром на то да типологија атријума није укључена у Еурокод, правилник за дејства ветра, циљ истраживања утицаја ветра је да прошири постојећа знања о утицају ветра на зидове и

кровове око атријума. Резултати експерименталног испитивања у аеротунелу контролисани су у нумеричком моделу, а затим је извршена упоредна анализа и изведени су закључци испитивања.



Слика 10-4. Основа и пресеци макете за аеротунел, извор: аутор



Слика 10-5. Позиција мерних тачака на крововима и зидовима атријума и на надстрешници, извор: аутор

10.3.1 Експериментално испитивање у аеротунелу

За испитивање утицаја ветра на кров објекта Техничких факултета и унутрашњу фасаду у атријуму, било је потребно направити макету сегмента објекта на коме ће се испитати утицаји. Платформа на коју се фиксира макета у аеротунелу пречника је 1.5 m што је условило њене димензије. Макета објекта Техничких факултета, у размери 1:100, обухватала је половину објекта, само у волуменима, без отвора, али са прецизно дефинисаним кровним равнима, јер њихови нагиби могу да утичу на резултате испитивања. Макета надстрешнице ламелне конструкције, димензија је 13.6/22.4 cm, а димензија попречних пресека ламела коригована је како би било могуће адекватно поставити мерне инструменте, што није утицало на резултате испитивања. Мембрана је у макети направљена од провидне фолије и залепљена је за ламеле. (Слика 10-4 - север је обележен словом S)

У радни простор у коме се налази аеротунел пренете су макета објекта и макета ламелне конструкције, где је настављен рад на припреми за испитивање. Уз помоћ професора са Катедре за ваздухопловство Машинског факултета, одређена је позиција тачака на којима ће се мерити притисци ветра на кров објекта, новопројектовану надстрешницу и на унутрашњу фасаду. На свакој од кровних равни које окружују атријум постављене су по три мерне тачке, а на истим правцима и мерне тачке унутар атријума. На надстрешници су постављене три мерне тачке, две уз венац и једна у слемenu, на половини дужине. (Слика 10-5) Свака мерна тачка је пробушена, а у њу су постављени мерни инструменти - бакарне

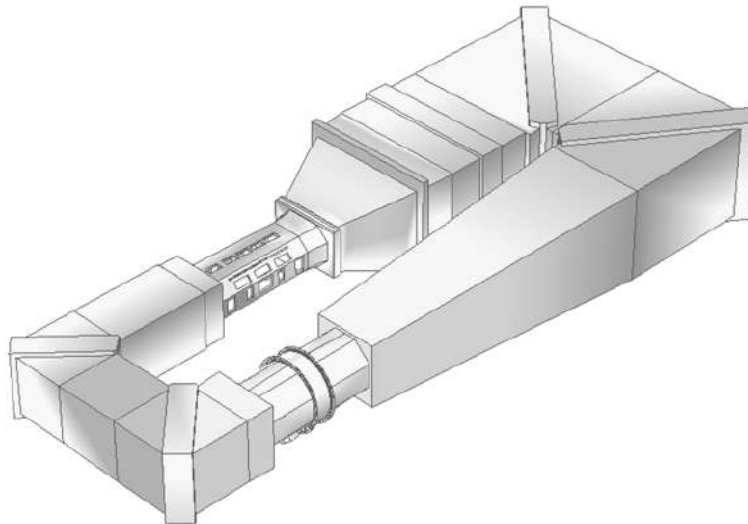
цеви Ø3 mm са проширењем на крајевима на које се везују силиконске цеви који долазе до уређаја који мери притиске на објекат - манометар.

Да би се пратили резултати експеримента било је потребно да се сви елементи именују у оквиру макете, као и на манометру. Мерне тачке у кровним равнима називане су словом К и бројевима од 1-10, а оне које се налазе унутар атријума, на истом правцу, називане су словом А и бројевима од 1-10 (мерна тачка А1 налази се испод мерне тачке К1, да би резултати могли једноставније да се прате). Мерне тачке на ламелној конструкцији називане су словом L и бројевима од 1-3. Пратећи ове позиције, обележена су и силиконска црева, која су додатно повезана пластичним везицама у зависности од тога којој равни припадају (К1 и К2 припадају једној кровној равни и она су повезана у један свежањ). Након тога, макета је фиксирана за ротирајућу платформу, која се налази у аеротунелу, у зони за испитивање. На платформи је формиран отвор како би се на адекватан начин поставиле мерне цевчице које се повезују на манометар, а тако да платформа може несметано мењати свој положај из итерације у итерацију мерења утицаја ветра. Дужина сваког црева прелазила је 5.5 m, да дозволи несметану ротацију макете на платформи у аеротунелу. Манометар мери притиске на мерне тачке преко 24 водена стуба. Сваки водени стуб на коме се читавају притисци био је обележен именом цеви која се за њега везивала, а један водени стуб је остављен као контролни и мерио је атмосферски притисак у аеротунелу.

Прва испитивања рађена су за случај фактичког стања утицаја ветра на објекат зграде Техничких факултета без интервенције у атријуму. На тај начин су добијени притисци у атријуму и на кровне равни, који су служили као улазни подаци за испитивање, односно да би се добила слика промена које се десе постављањем надстрешнице. За следећи део испитивања додата је макета надстрешнице која се ослања на венац атријума, провучене су преостале цеви кроз макету, платформу и под аеротунела и повезане на манометар. Трећи случај испитивања захтевао је само померање макете надстрешнице, тако да буде унутар атријума објекта, а затим је испитивање настављено.

Експериментално испитивање спроведено је у подзвучном аеротунелу ”Мирослав Ненадовић” Катедре за ваздухопловство Машинског факултета Универзитета у Београду. Аеротунел је изграђен у периоду од 1952. до 1957. године, а реновиран је 2013. године. Радни део аеротунела дугачак је 6 m, са октагоналним попречним пресеком ширине 2.9 m и висине 2.1 m. Аеротунел је опремљен електронском мерном опремом и намењен је испитивањима до брзина од 60 m/s. Брзина ветра мери се дигиталним анемометром РСМ-РФМ 2 који је повезан на стационарну *Pitot* цев инсталирану у радном делу аеротунела (Mitrović and Vorotović, 2017).

Испитивање у аеротунелу рађено је при брзини ветра од 21 m/s, што одговара максималној брзини ветра Кошаве који се може измерити у центру Београда, према Еурокод Националном анексу (SRPS EN 1991-1-4 / NA, 2017). Макета је позиционирана тако да могу да се измере притисци на сваких 45° у кругу, према странама света (Слика 10-8). Брзина ветра се читава инструментом за мерење брзине, а када се брзина стабилизује, читавају се резултати са манометра. Испитивање је започето макетом сегмента објекта Техничких факултета, без надстрешнице, за ветар који дува са севера у односу на објекат, а затим је платформа ротирана за 45° за свако следеће мерење. Поступак је поновљен за још два случаја - када се надстрешница ослања на венац атријума и када се конструкција постави у атријум на нивоу другог спрата објекта Техничких факултета. Резултати су приликом сваког мерења читани са манометра.



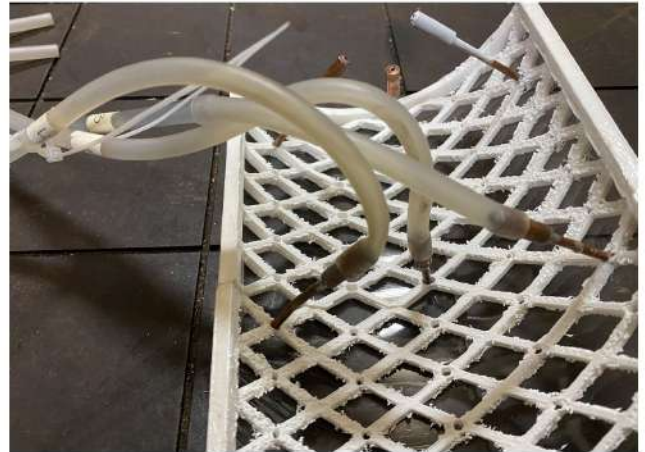
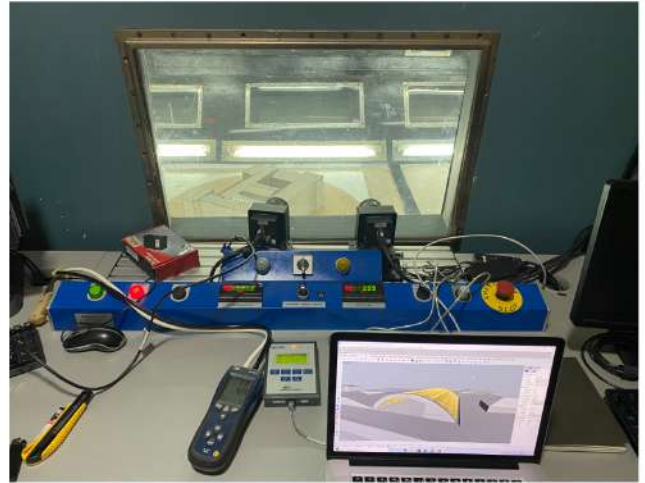
Слика 10-6. Тродимензионални модел аеротунела "Мирослав Ненадовић", извор: Катедра за ваздухопловство

10.3.2 Софтверска симулација (*CFD simulation*)

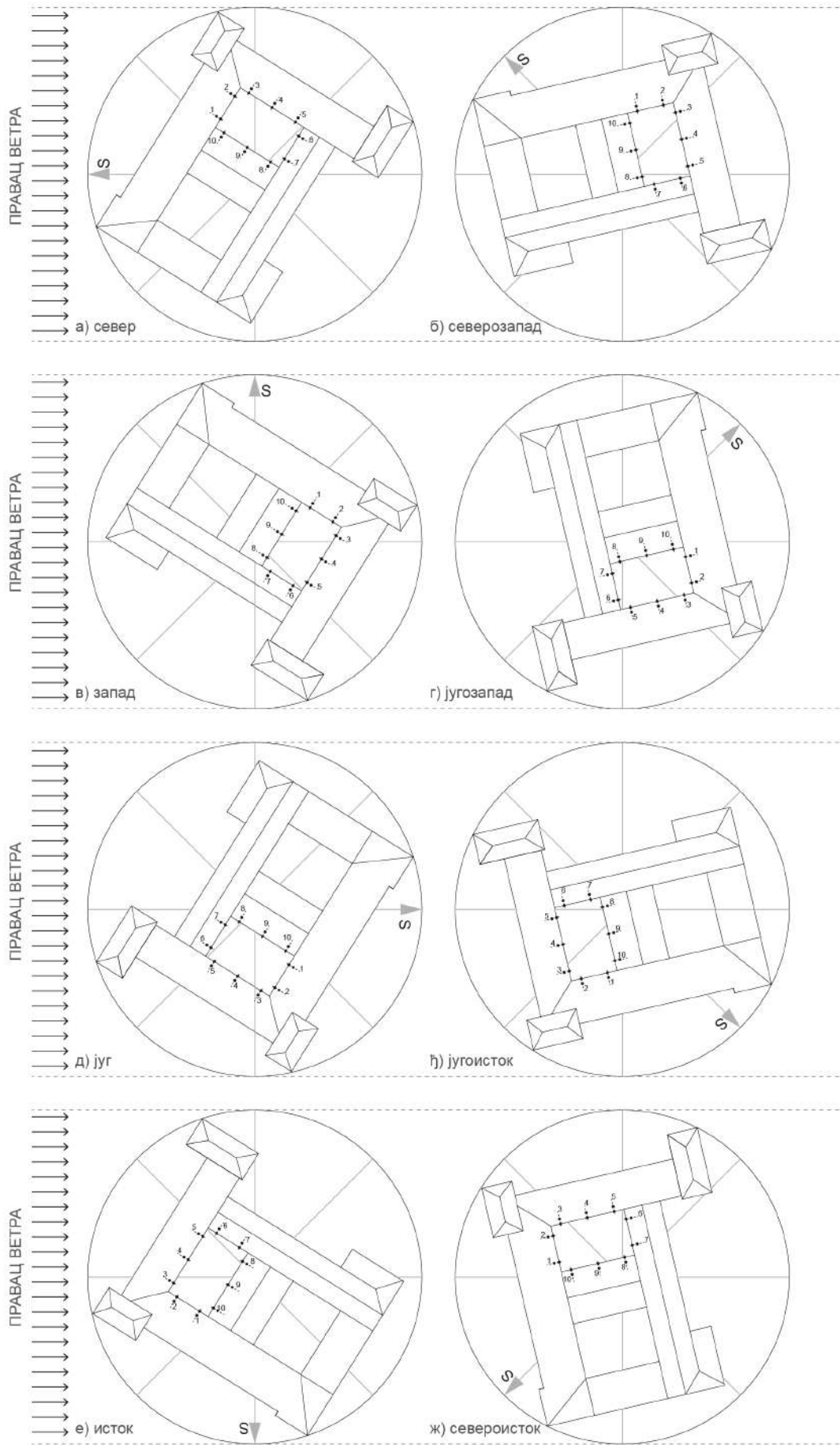
Софтверска симулација се изводи на моделу зграде Техничких факултета користећи софтвер Ansys Fluent. За софтверску симулацију изабрана су четири случаја за правац ветра (СЗ, ЈЗ, СИ и ЈИ), који одговарају позицијама од 45° , 135° , 225° и 315° , као у експерименту у аеротунелу. Геометрија, генерисање мреже и извођење прорачуна урађени су коришћењем истих подешавања за све предвиђене правце ветра.

Величина домена је подешена према смерницама из научних истраживања (Franke et al, 2007; Tominaga et al, 2008). Препоручени однос модела објекта који се испитује и модела аеротунела треба да буде испод 3%, а да би се он испунио, растојање од објекта до позиције одакле ветар улази у радни простор аеротунела, растојање од бочних страна и од горње страна модела радног дела аеротунела је најмање пет пута веће од висине објекта, а растојање од излаза је најмање једнако петнаест висина објекта. Да би се предвидело поље струјања око објекта, хемисферични домен је дефинисан у близини модела објекта са пречником осам пута већим од висине модела. Домен је дискретизован коришћењем неструктуриране мреже и за рачунски домен и за поддомен, са максималном величином елемента од 0,1 m и минималном величином елемента од 0,005 m, при чему је коришћена величина елемента од 0,005 m за лица зграде која представља кров који окружује атријум (и надстрешницу). За остала лица објекта коришћен је елемент величине 0,01 m. Укупан број елемената за рачунски домен за сваки од четири случаја незнатно варира и износи око 1,6 милиона, при чему се скоро половина налази унутар хемисферног поддомена. На улазу је дефинисан гранични услов „брзине“. Примењени профил брзине ветра добијен је из претходно извршених мерења у истом аеротунелу (Abubaker et al, 2018). Услови симетрије су предвиђени за горњу и бочну страну модела објекта. На излазу, гранични услов „притиска“ је постављен као нулти манометарски притисак. Вредности величина турбуленције су униформно распоређене. Тачни профили ових количина су непознати, па су односи интензитета турбулентности и вискозитета постављени од 1% на улазу до 10% на излазу.

Софтверске симулације су урађене у *Ansys Fluent*-у коришћењем тродимензионалног стабилног система базираног на притиску. Решење је иницијализовано хибридном иницијализацијом са подразумеваним подешавањима. Конвергенција решења је постигнута када је проток постао стабилан, користећи критеријум степена 10^{-5} .



Слика 10-7. Експеримент у аеротунелу: манометар (горе лево), контролна табла (горе десно) цевчице на макети ламелне конструкције (средина), макета у аеротунелу (доле), извор: аутор



Слика 10-8. Позиција мерних тачака у односу на правац ветра, извор: аутор

10.3.3 Резултати испитивања - дискусија и закључци

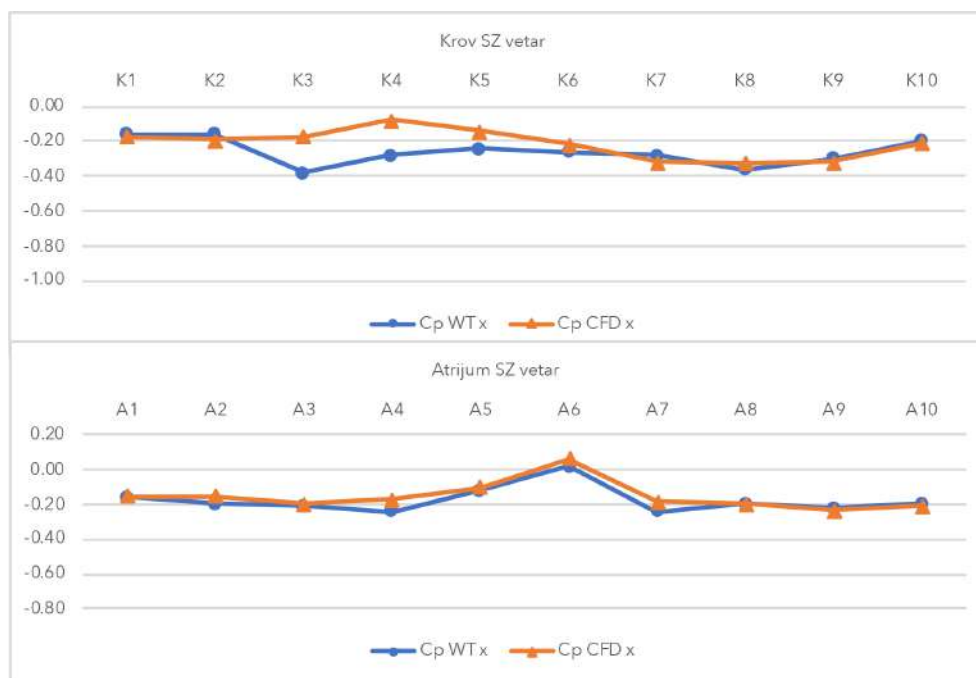
Подаци са манометра изражени су у милиметрима [mm] воде (Прилог 5), а затим су вредности милиметара воде у воденом стубу преведене у мегапаскале [MPa] (Прилог 6), на основу односа да је $1 \text{ mmH}_2\text{O} = 9.80665 \text{ Pa}$. Ови подаци су потребни да би се израчунали коефицијенти притисака за сваку мерну тачку. За рачунање коефицијента притиска било је потребно израчунати разлику измерених притисака у односу на атмосферски, а затим то поделити са динамичким притиском (Прилог 7), према формули:

$$c_p = \frac{p - p_\infty}{0.5 \cdot \rho_\infty \cdot V_\infty^2}$$

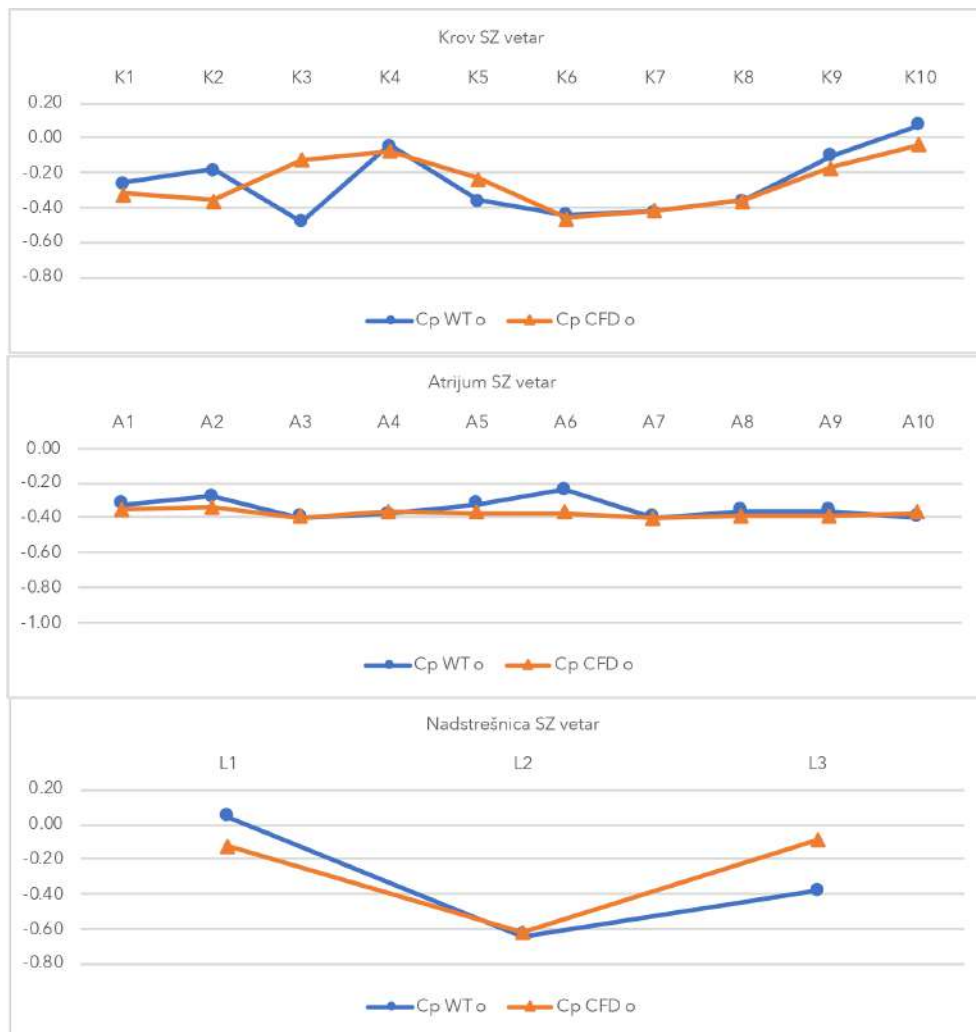
Резултати су класификовани према равнима којима припадају мерне тачке и према правцу ветра. Ради поређења резултата добијених испитивањем утицаја ветра са вредностима коефицијената притисака у правилнику за дејства ветра, Еурокоду, резултати су класификовани према правцима ветра управног на равни (угао од 90°).

Испитивање случаја када се надстрешница налази унутар атријума (Слика 10-2в) није контролисано софтверском симулацијом, јер је анализом резултата експерименталног испитивања утицаја ветра у аеротунелу закључено да се на зидовима атријума не дешавају промене, док су промене на околним крововима атријума незнатне у односу на случај без надстрешнице (Прилог 7).

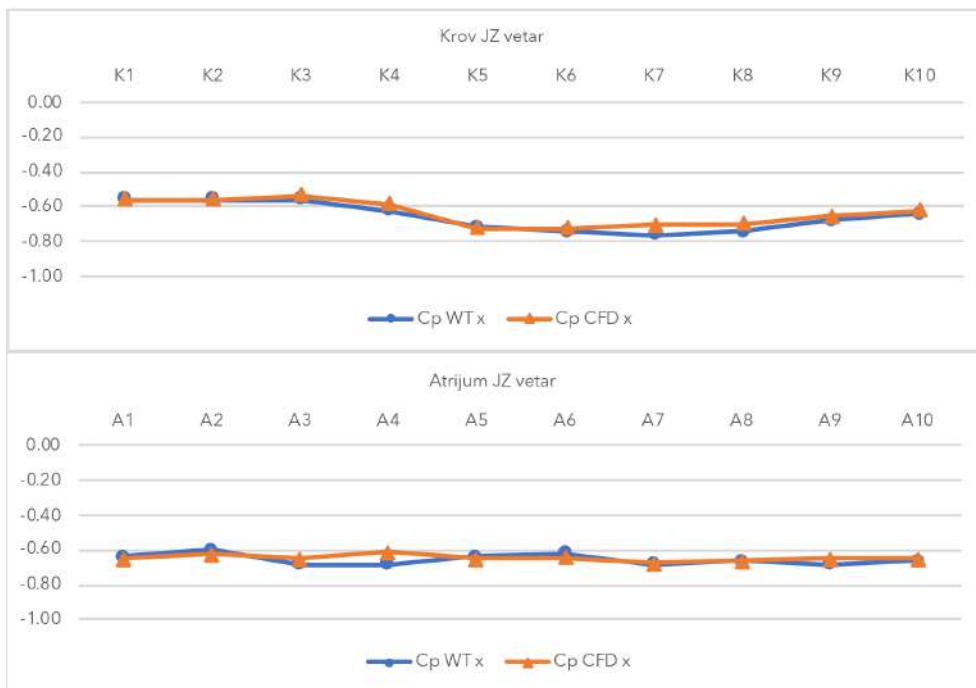
Дијаграми који следе истовремено приказују вредности коефицијената притисака добијене софтверском симулацијом и експерименталним испитивањем, са циљем компарације резултата. Резултати су приказани за све кровне равни, све зидове атријума и за надстрешницу. Да би се разликовали резултати коефицијената притисака, уз резултате испитивања макете без надстрешнице стављено је 'x', док је уз резултате са надстрешницом стављено 'o', на пример c_p WT x су коефицијенти притисака добијени у аеротунелу (ен. *wind tunnel*) без надстрешнице.



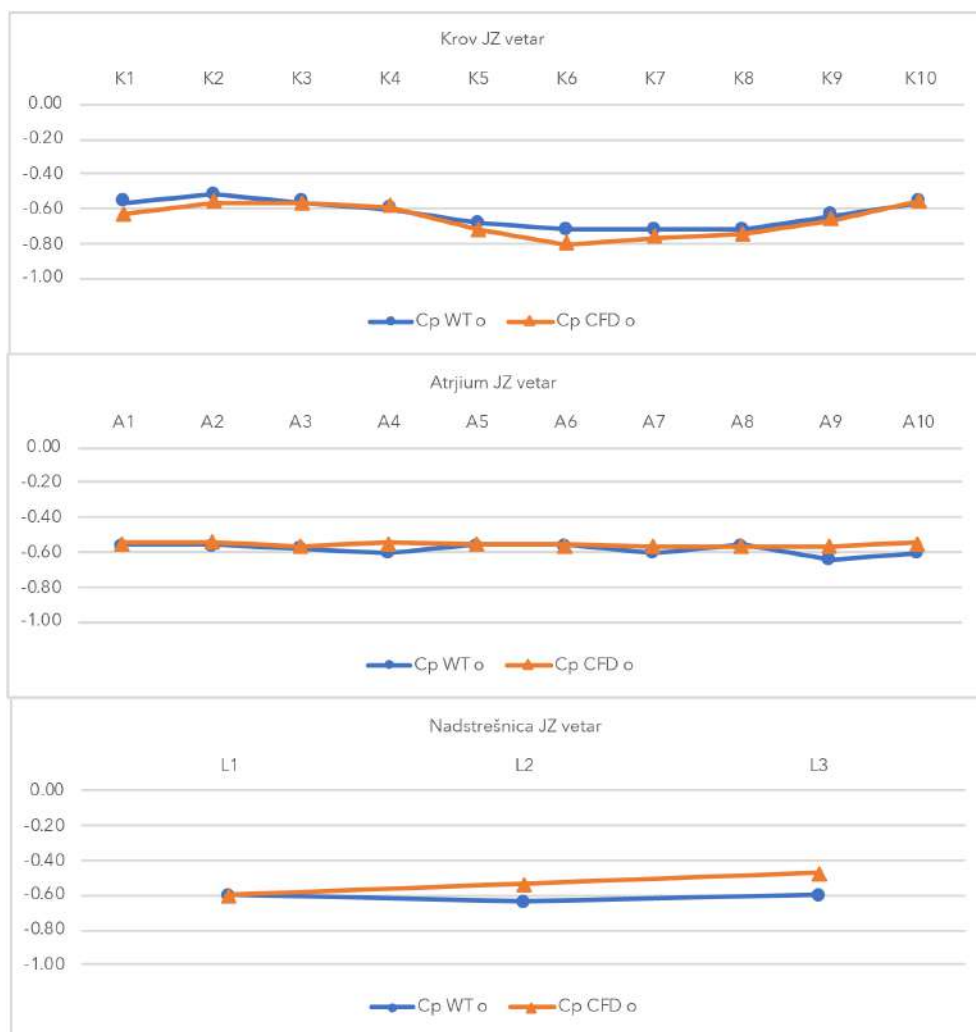
Слика 10-9. Коефицијенти притисака без надстрешнице за северозападни ветар (слика 10-8б), извор: проф. др А.Бенгин и аутор



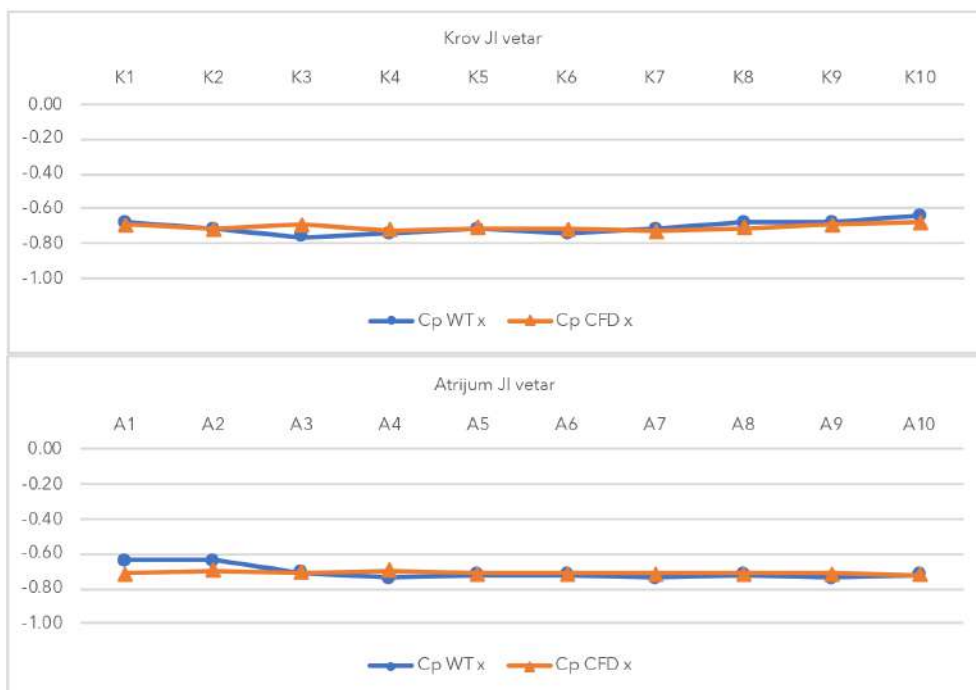
Слика 10-10. Коэффициенти притисака са надстреициом за северозападни ветар (слика 10-8б), извор: проф. др А.Бенгин и аутор



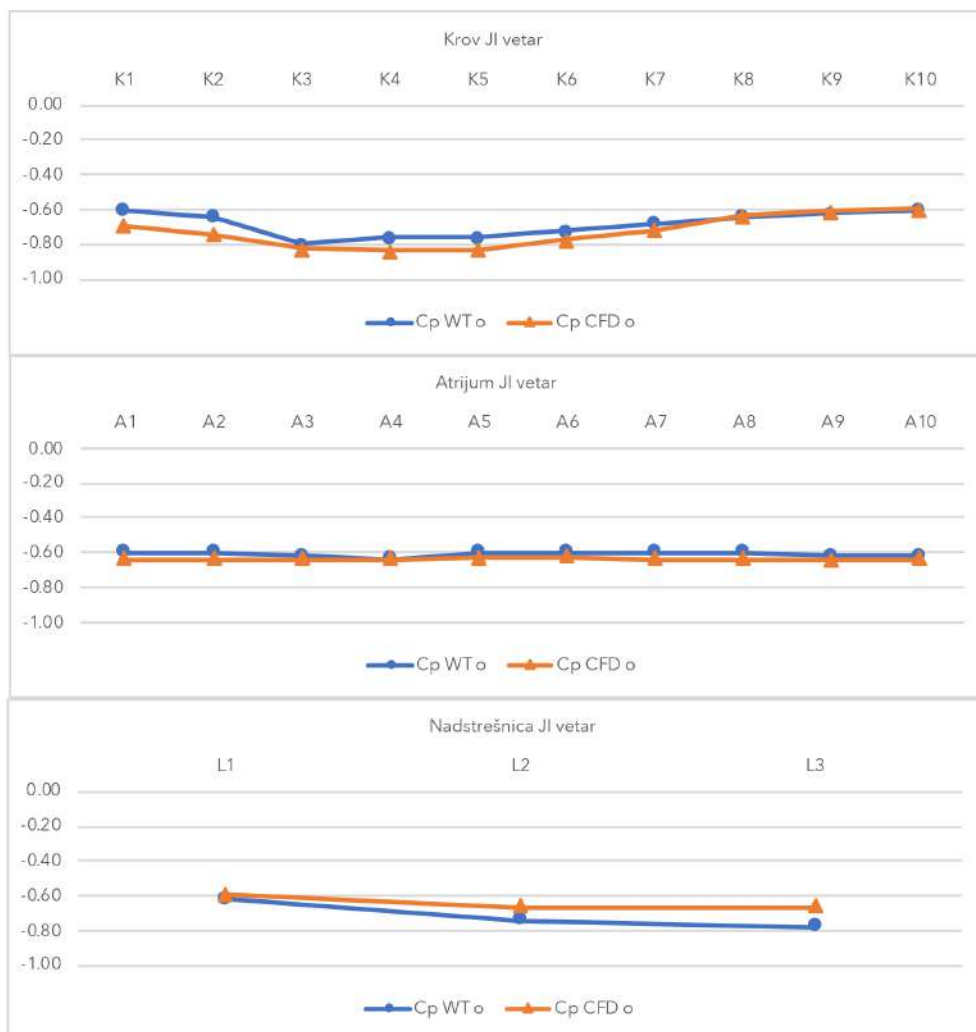
Слика 10-11. Коэффициенти притисака без надстреинице за југозападни ветар (слика 10-8г), извор: проф. др А.Бенгин и аутор



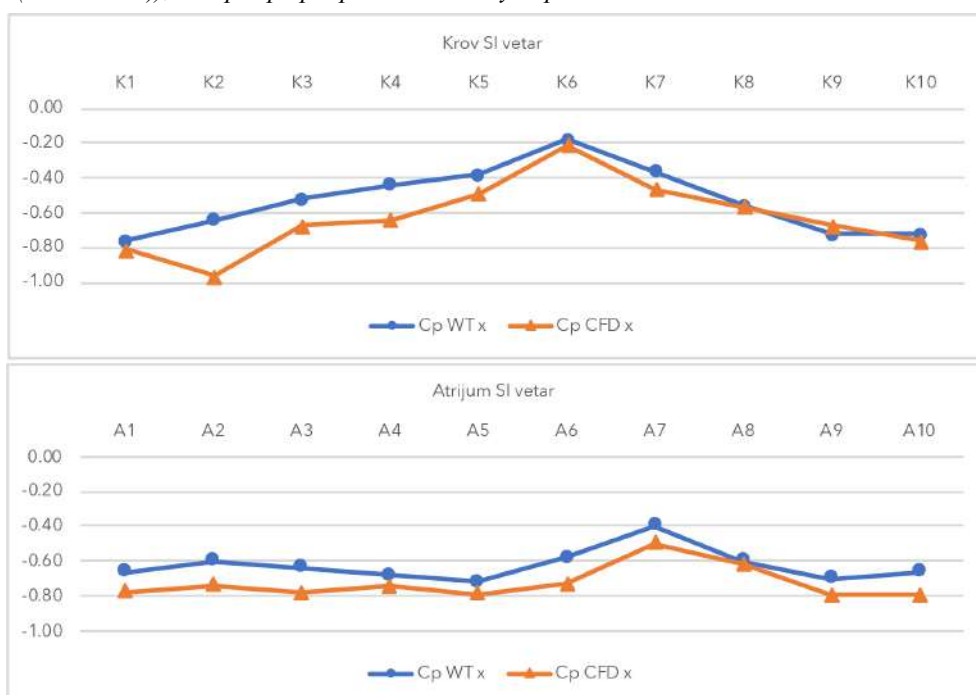
Слика 10-12. Коефицијенти притисака са надстреиномом за југозападни ветар (слика 10-8г), извор: проф. др А.Бенгин и аутор



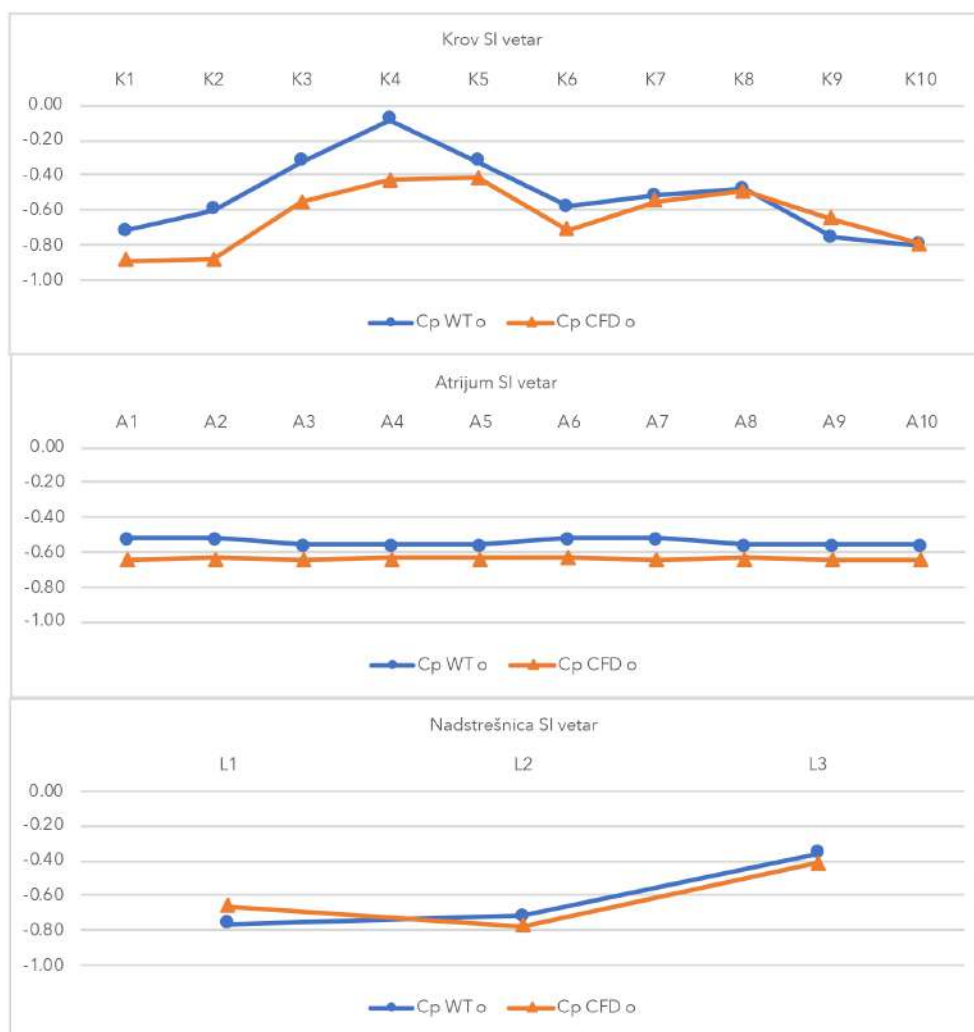
Слика 10-13. Коефицијенти притисака без надстреинице за југоисточни ветар (слика 10-8ђ), извор: проф. др А.Бенгин и аутор



Слика 10-14. Коэффициенти притисака са надstreшницом за југоисточни ветар (слика 10-8ђ), извор: проф. др А.Бенгин и аутор



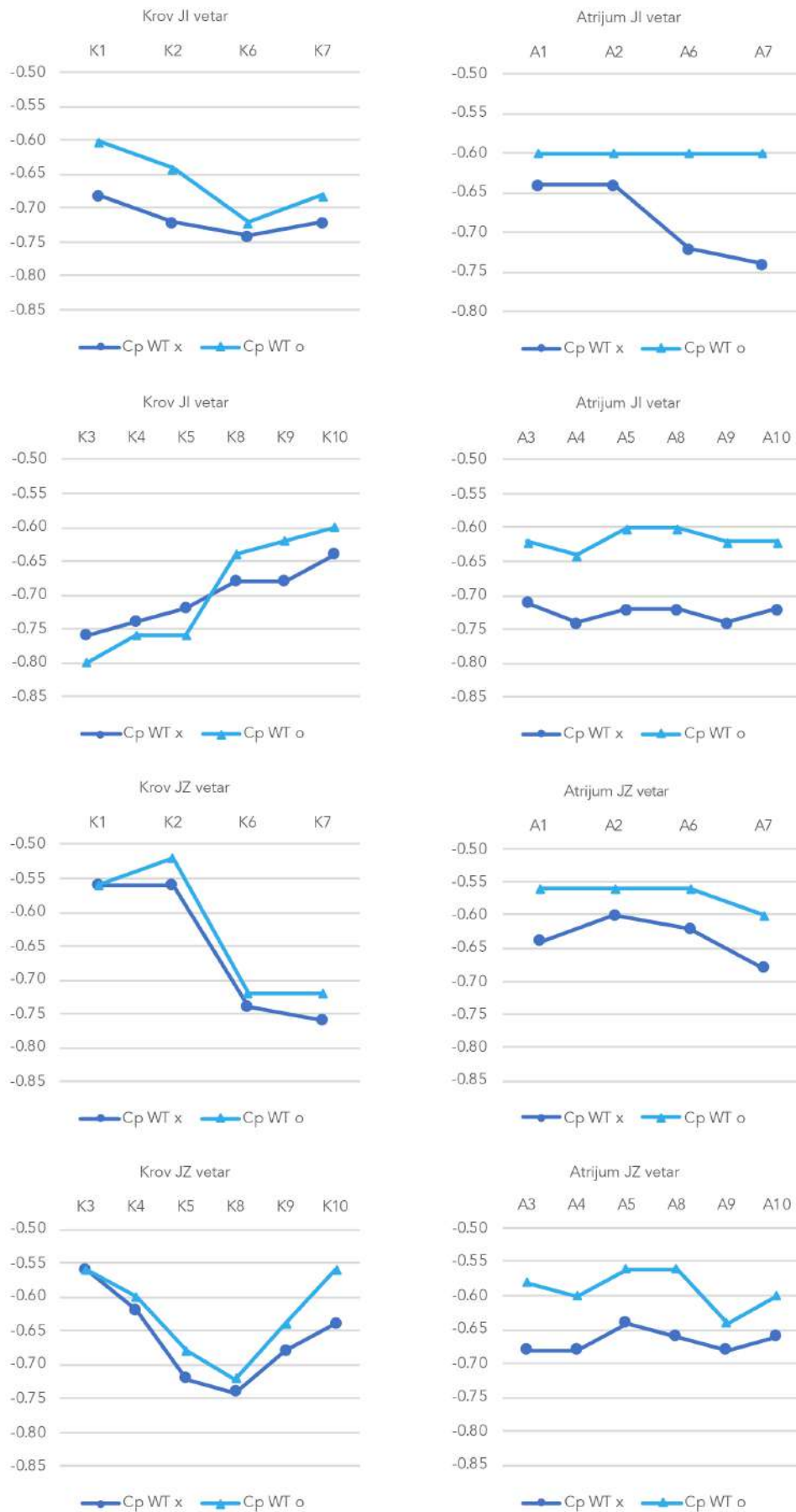
Слика 10-15. Коэффициенти притисака без надstreшнице за североисточни ветар (слика 10-8ж), извор: проф. др А.Бенгин и аутор



Слика 10-16. Коefицијенти притисака са надстрешницом за североисточни ветар (слика 10-8ж), извор: проф. др А.Бенгин и аутор

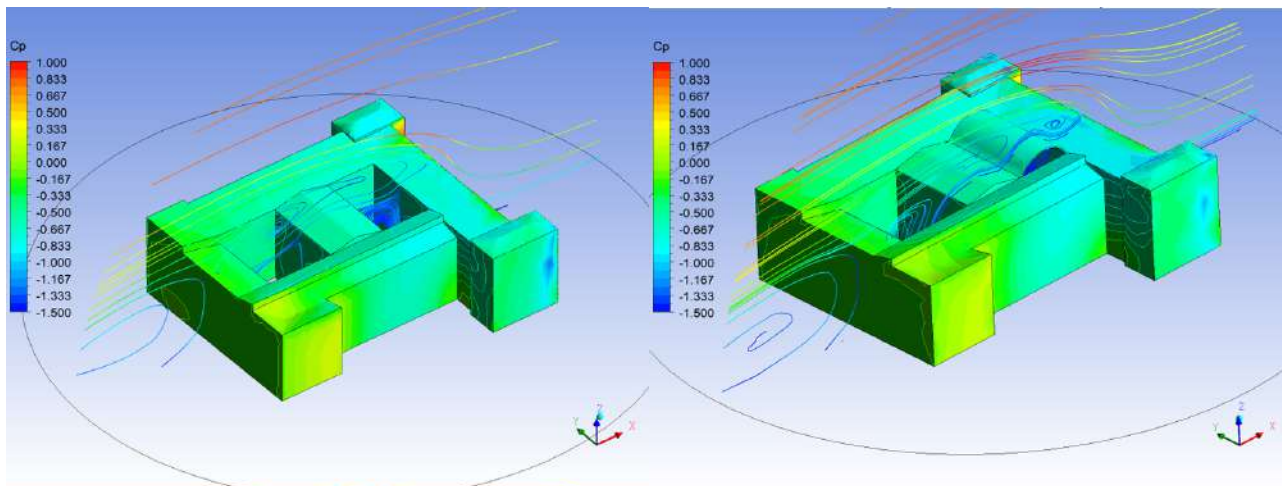
Резултати су показали да су криве дијаграма коefицијената притисака подударне и да се вредности незнатно разликују за југозападни и југоисточни ветар, за случај са и без надстрешнице изнад атријума. Максимална разлика између вредности резултата притисака добијених експериментом и софтверском симулацијом је 1.25 пута. Резултати за северозападни ветар без надстрешнице изнад атријума показују различиту криву између мерних тачака K3 и K5, што је случај и са надстрешницом. Разлика је 2.25 пута између мерених вредности у аеротунелу и вредности добијених симулацијом. Вредност c_p WT даје резултате ближе 0 у односу на резултате c_p CFD. Све вредности коefицијената притисака су негативне, осим у мерној тачки K10 за северозападни ветар, где је WT c_p (K10) = +0.08, а CFD c_p (K10) = -0.036.

Ефекат сводне надстрешнице на околне кровове и зидове атријума може да се посматра упоређивањем вредности коefицијената притисака c_p за случај без надстрешнице (x) и са надстрешницом (o). Дијаграми који следе (Слика 10-17) приказују вредности коefицијената притисака за југозападни и југоисточни ветар. Ова два правца ветра су изабрана јер се резултати испитивања у аеротунелу и софтверске симулације поклапају, док истовремено представљају и две варијанте правца ветра релевантних за упоређивање са правилником за дејства ветра Еурокодом. Коefицијенти притисака се према Еурокоду дефинишу само за ветар управан на раван (угао од 90°) и паралелан са равни која се посматра (угао од 0°).



Слика 10-17. Компарација коефицијента притисака за различите равни без надстрешнице изнад атријума (x) и са надстрешницом (o), извор: Исидора Илић и аутор

Постављањем надстрешнице на атријум углавном се смањује сишуће дејство ветра на кровне равни и на зидове атријума, као што се може видети на дијаграмима. Струјање ветра преко околних кровова и зидова атријума је слично, и у случају без надстрешнице и са надстрешницом, осим за раван којој припадају мерне тачке К3-5 за југоисточни ветар који дува управно на раван. Слика 10-18 приказује тродимензионални модел из софтвера за симулацију *Ansys Fluent* за југоисточни ветар.

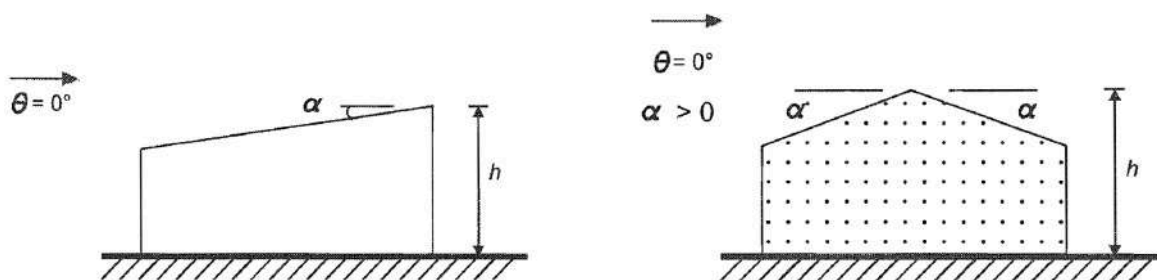


Слика 10-18. Софтверска симулација утицаја југоисточног ветра на објекат са атријумом без надстрешнице (лево) и са надстрешницом (десно), извор: проф. др Бенгин

На основу графичког приказа може се приметити да југоисточни ветар изазива ковитлац ветра у равни у којој се налазе мерне тачке К3-5, на тај начин повећавајући сишуће дејство за посматрану раван. Вредности коефицијената притисака крећу се у распону од -0.52 до -0.80 . Највећа разлика у вредностима без и са надстрешницом је 1.235 за југоисточни ветар, у мерној тачки А7.

На основу свега приказаног и анализираниог може се закључити да се **додавањем надстрешнице аеродинамичне форме, умањује сишуће дејство ветра на постојећи објекат**, тј. на околне кровове и зидове атријума.

С обзиром на то да типологија објеката са атријумом није обухваћена правилником за дејства ветра Еурокодом, вредности коефицијената притисака добијених испитивањем могу да се упореде са вредностима коефицијената притисака за једноводне, двоводне и сводне кровове. Мерне тачке од К1-5 налазе се на једноводном крову, мерне тачке К8-10 су на двоводном крову, а мерне тачке К6-7 су на двоводном крову са надвишењем у средини (није обухваћен Еурокодом и биће посматран као једноводни са стране атријума). Нагиб кровова је приближно 5° (Слика 10-4).



Слика 10-19. Једноводни (лево) и двоводни кров (десно) са назанченим правцем ветра, извор: EN 1991-1-4:2005

Табеле 7.3а и 7.3б из Еурокода (EN 1991-1-4:2005) приказују препоручене вредности коефицијената притисака за једноводне кровове, док су табеле 7.4а и 7.4б за двоводне кровове. Спољашњи коефицијенти притисака, мерени у испитивању у докторској дисертацији, дефинисани су у Еурокоду као коефицијенти притисака за неконструктивне елементе $c_{pe,1}$ и за конструктивне елементе $c_{pe,10}$.

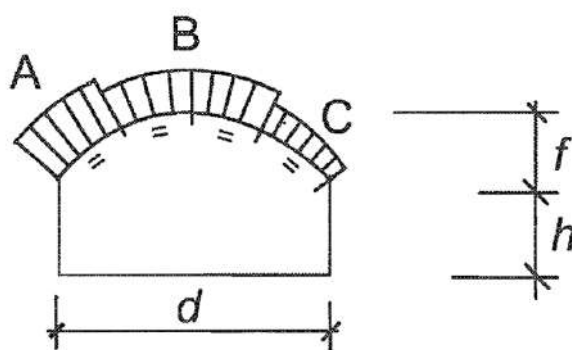
Правац југоисточног ветра је (Слика 10-19):

- $\theta = 0^\circ$ за кровну раван са мерним тачкама К8-10, а највећи коефицијенти притиска су $c_p(K8x) = -0.68$ и $c_p(K8o) = -0.64$. Еурокод препоручује вредности за овај случај $c_{pe,1} = -1.2$ и $c_{pe,10} = -2.0$, што је скоро два пута већа вредност него вредност добијена испитивањем.
- $\theta = 180^\circ$ за кровну раван са мерним тачкама К3-5, а највећи коефицијенти притиска су $c_p(K3x) = -0.76$ и $c_p(K3o) = -0.8$. Еурокод препоручује вредности за овај случај $c_{pe,1} = -0.8$ и $c_{pe,10} = -1.2$.
- $\theta = 90^\circ$ за кровну раван са мерним тачкама К1-2 и К6-7, а највећи коефицијенти притиска су $c_p(K6x) = -0.74$ и $c_p(K6o) = -0.72$. Еурокод препоручује вредности за овај случај $c_{pe,1} = -0.6$ и $c_{pe,10} = -1.2$.

Правац југозападног ветра је:

- $\theta = 0^\circ$ за кровну раван са мерним тачкама К1-2, а највећи коефицијенти притиска су $c_p(K1x) = -0.56$ и $c_p(K1o) = -0.56$. Еурокод препоручује вредности за овај случај $c_{pe,1} = -0.6$ и $c_{pe,10} = -1.2$, што је скоро два пута већа вредност него вредност добијена испитивањем.
- $\theta = 180^\circ$ за кровну раван са мерним тачкама К6-7, а највећи коефицијенти притиска су $c_p(K7x) = -0.76$ и $c_p(K7o) = -0.72$. Еурокод препоручује вредности за овај случај $c_{pe,1} = -0.8$ и $c_{pe,10} = -1.2$.
- $\theta = 90^\circ$ за кровну раван са мерним тачкама К3-5, а највећи коефицијенти притиска су $c_p(K5x) = -0.72$ и $c_p(K5o) = -0.68$. Еурокод препоручује вредности за овај случај на једноводном крову $c_{pe,1} = -0.6$ и $c_{pe,10} = -1.2$.
- $\theta = 90^\circ$ за кровну раван са мерним тачкама К8-10, а највећи коефицијенти притиска су $c_p(K8x) = -0.74$ и $c_p(K8o) = -0.72$. Еурокод препоручује вредности за овај случај на двоводном крову $c_{pe,1} = -0.6$ и $c_{pe,10} = -1.2$.

Највећа вредност коефицијента притиска на сводну надстрешницу је $c_p(L3) = -0.78$ за југоисточни ветар. Еурокод приказује препоручене вредности коефицијената притисака само за конструктивне елементе $c_{pe,10}$. За конструкције чији је однос стреле f и распона d између 0.2 и 0.3, према Еурокоду, неопходно је узети у обзир и притискајуће дејство ветра у првој трећини конструкције (зона А, слика 10-20) за ветар који је под углом од 90° на конструкцију. Однос димензија надстрешнице атријума Техничких факултета је $f/d = 0.288$, а однос висине на којој се налази надстрешница и њеног распона $h/d = 24.4/13.6 = 1.8$. Према правилнику, коефицијенти притиска за позиције мерних места на надстрешници износе $c_p(L1) = \pm 0.30$,



Слика 10-20. Сводни кров, извор: EN 1991-1-4:2005

$c_p(L2) = -1.00$ и $c_p(L3) = -0.40$ за ветар под углом од 90° на свод. Вредности коефицијената притисака добијене експериментом у аеротунелу и софтверском симулацијом не дају позитивне вредности ни у првој трећини конструкције, као што је препорука у правилнику Еурокод.

Измерена највећа вредност коефицијента притиска на зидове атријума пре постављања надстрешнице износи $c_p(A4) = -0.74$ за југоисточни ветар, а након постављања надстрешнице вредности се смањују 1.15 пута. У Еурокоду, у табели 7.1 (EN 1991-1-4:2005) предложене вредности коефицијената притисака на изложене зидове износе од -0.8 до -1.4.

Закључак је да правилник за дејства ветра Еурокод претпоставља веће апсолутне вредности коефицијената притисака него што су измерене у аеротунелу.

Испитивањем утицаја изградње сводне надстрешнице изнад атријума доказано је да аеродинамична форма надстрешнице побољшава струјање ваздуха у зони атријума и смањује сишуће дејство ветра на околне кровове и зидове висине објекта до три спрата. За разлику од слободностојећих објеката са косим крововима, кровови атријума стварају униформно струјање ваздуха, резултујући повољнијим коефицијентима притисака него у Еурокоду. Сводна надстрешница постављена на стари венац објекта је такође заштићена околним крововима, због чега су вредности коефицијената притисака другачије од оних предложених у правилнику, посебно у зони првог удара ветра.

Експеримент у аеротунелу је доказао да је најјачи ветар који делује на објекат ветар из правца североистока (производи најјаче сишуће дејство), што је уједно и правац најјачег ветра који дува у Београду (meteoblue, н.д.). Софтверска симулација потврдила је вредности коефицијената притисака добијених експериментом у аеротунелу. За специфичне типологије објеката, које нису обухваћене правилником за дејства ветра, препорука је да се испитају у аеротунелу.

11. Закључна разматрања

Потребан је другачији приступ у мишљењу да би дошло до промена (Građevinarstvo, 2011). Архитекта Кенго Кума (Kengo Kuma) један је од светских архитеката који се бави одрживим развојем, а посебно локално заснованим развојем. У својим пројектима подсећа нас да је могуће стварати без тешке механизације, *играјући* се кратким дрвеним штаповима, везу по везу, стварајући сопственим рукама (Arch Daily, 2012). За Кенга Куму историја је нешто што може да се узме из прошлости и интерпретира у савременом добу (Design Boom, 2005). Његови пројекти и филозофија архитектуре били су инспирација за докторску дисертацију.

Топлота дрвета, која ствара осећај повезаности са природом, утицала је на одабир ламелне конструкције од дрвета за предмет истраживања. Враћање природи и обновљивим материјалима у складу је са тенденцијама одрживог развоја, а тип конструкције одговара и постулатима цикличне економије, чинећи тему истраживања релевантном у савременим оквирима. Истраживање приказано у докторској дисертацији фокусира се на примену ламелних конструкција као кровова објеката, надстрешница или павиљона, распона до 15 m, са елементима малих дужина у односу на распон. Овако пројектована конструкција има широку примену. Униформисани елементи конструкције од ламела малих дужина, са типским везама, једноставни су за монтажу и могу се извести на било којој локацији. Транслуцентни покривач, текстилна мембрана, истиче дрвену ламелну конструкцију, доприносећи природном изгледу целог склопа. Лепота ламелне конструкције огледа се у мрежи ламела, које заједно са текстилном мембраном, одају утисак *лакоће*. Посматрајући и анализирајући пројектовану конструкцију, може се закључити да је једноставна за извођење, да ју је могуће демонтirati и затим поново монтирати на другу локацију, да су елементи униформисани и да је њима једноставно руковати. Овим су доказане све предности историјских ламелних конструкција, а новопроектвана конструкција афирмисана је у савременим оквирима. Жеља аутора била је да предмет истраживања буде конструкција коју је могуће извести у Србији, са локалним материјалима и радном снагом, а да се истовремено докаже њена актуелност у светским оквирима.

Научни доприноси овог научноистраживачког рада су вишеструки, а посебно се истичу закључци систематизације ламелних конструкција, анализе геометрије ламелне конструкције, анализе веза дрвених ламела, и експериментална испитивања. Анализом геометрије потврђена је прва хипотеза истраживања. Извођењем параметарске једначине криве по којој се ламеле крећу по омотачу цилиндра, доказано је да је могуће применити исту правилност и на друге закривљене геометрије, променом параметра површине по којој се креће крива. Први експеримент, који се бави мерењем деформација прототипа ламелне конструкције од дрвета под дејством гравитационог оптерећења без и са покривачем - текстилном мембраном, показао је да текстилна мембрана повећава вертикалне деформације у средишту пројектоване конструкције распона 10.75 m, али у границама допуштених, док са друге стране, смањује хоризонталне деформације између ивичних лукова конструкције. Пројектовањем и извођењем прототипа конструкције доказано је да је минимални број типова униформисаних елемената шест, када је мрежа ламела са угловима од 60°. Овим је потврђена друга хипотеза истраживања. Закључци анализе геометрије и елемената конструкције, заједно са изведеним закључцима приликом извођења прототипа испунили су први циљ истраживања - проширивање сазнања о обликовним и конструктивним могућностима и ограничењима ламелних конструкција од дрвета.

Овим научноистраживачким радом потврђена је потреба да се и у савременом добу изводе прототипи конструкције у размери 1:1 на којима се могу сагледати проблеми

пројектовања, нових или модификованих конструктивних склопова, као и проблеми који се јављају у процесу извођења конструкције и припреми радионичке документације за извођење. Испитивањем прототипа и анализом резултата постиже се унапређење конструктивног решења и омогућава се његово даље усавршавање.

Пројектовањем ламелне конструкције од дрвета која се састоји од великог броја униформисаних елемената - ламела и веза, отвара се могућност серијске производње. Мале димензије ламела поједностављују процес транспорта и монтаже овог типа конструкција. Анализом ламелних конструкција са текстилном мембраном доказано је да је утрошак материјала по квадрату основе приближно једнак утрошку материјала за типске хале геометрије цилиндра исте волуметрије, али се предност ламелне конструкције са текстилном мембраном у односу на типске хале огледа у естетици дијагоналне мреже ламела од дрвета. Текстилна мембрана, у контрасту са конструкцијом од дрвета, доприноси различитом визуелном изразу објекта током дана, посебно истичући мрежу ламела у ноћним часовима.

Други експеримент, спроведен у аеротунелу, бавио се анализом утицаја ветра, којим су добијене реалне вредности коефицијената притисака на конструкцију и указано је на разлику у односу на вредности прописане правилником за дејства ветра. Један од значајних доказа експеримента, који потврђује трећу хипотезу истраживања је да долази до смањења апсолутних вредности коефицијената притисака, односно до смањења утицаја ветра на кровове око атријума, уколико се постави аеродинамична надстрешница. Измерене реалне вредности се могу користити и за друге конструкције сводне форме, геометрије кружног правог цилиндра.

Истраживање кроз пројекат и анализа примене ламелне конструкције, проверени кроз експерименте, допринели су испуњавању другог циља истраживања - афирмацији ламелне конструкције од дрвета са текстилном мембраном у савременим оквирима.

Приказано истраживање и резултати добијени у докторској дисертацији могу се користити за будућа истраживања ламелне конструкције од дрвета и њену даљу оптимизацију, као и за развој ламелне конструкције од дрвета са текстилном мембраном. Један од праваца будућих истраживања је примена ламелне конструкције на различите геометрије и испитивање њеног статичког понашања у случају када је конструкција двоструко закривљена. Применом ламелне конструкције на геометрију хиперболичног параболоида, чија двострука закривљеност одговара и конструктивним карактеристикама текстилних мембрана, очекује се да ће дати боље резултате у погледу утицаја мембране на деформације ламелне конструкције. Други правац будућих истраживања био би испитивање варијантних решења за пројектовање веза између ламела и њихово унапређење. При пројектовању веза ламела потребно је размотрити могућност интегрисања и везе са текстилном мембраном, са посебним освртом на могућност постављања мембране са унутрашње стране конструкције. Мембрана у ламелној конструкцији од дрвета са текстилном мембраном утиче на естетику конструктивног склопа, а њена позиција на различите начине истиче дијагоналну мрежу ламела. Трећи правац истраживања односио би се на испитивање могућности пројектовања спрегнуте конструкције, у којој би текстилна мембрана имала конструктивну улогу, тиме подржавајући идеју о "разарању дистинкције" између конструкције и завршног слоја, која је настала као погодност модерног доба (Kengo Kuma у Kuma, 2006). Подела архитектуре на стручне области у савременом свету довела је до удвајања *структуре* - конструкција објекта и опна су два одвојена ентитета. Интегрални приступ пројектовању, већ у првој фази пројекта, отворио би архитектама многе могућности (Dutton, 2000). Сви будући правци истраживања усмерени су ка интердисциплинарном истраживању са циљем да се унапреде ламелне конструкције од дрвета са текстилном мембраном.

ПРИЛОЗИ

Прилог 1: Извештај из програма Tower 8, извор: аутор

Osnovni podaci o modelu

Datoteka: Semirigid EC.twp
Datum proračuna: 1.3.2023

Način proračuna: 3D model

- Teorija I-og reda Modalna analiza Stabilnost
 Teorija II-og reda Seizmički proračun Faze građenja
 Nelinearan proračun

Veličina modela

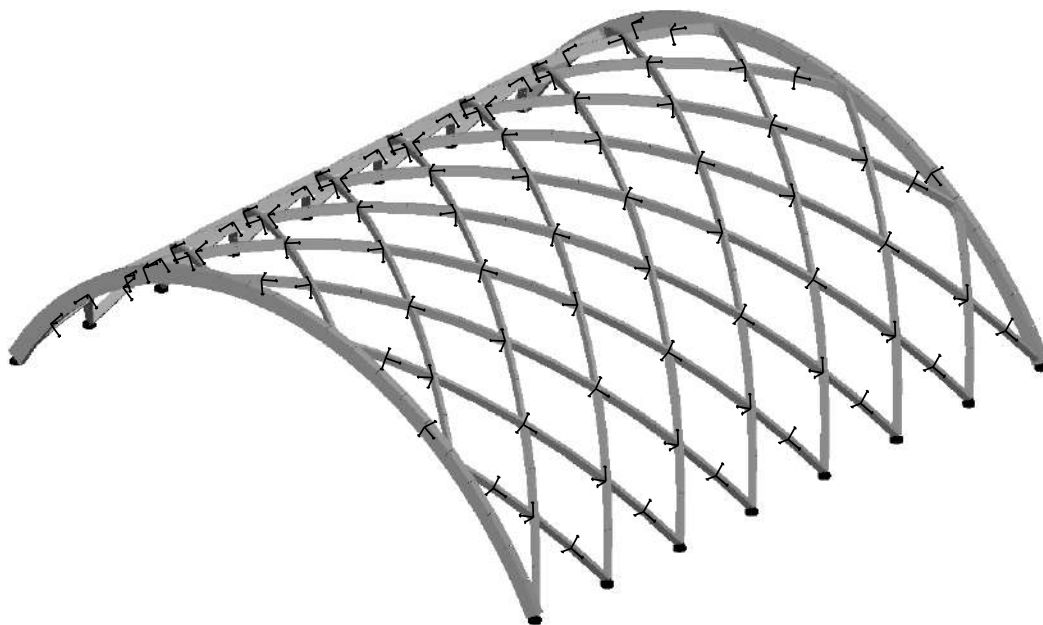
Broj čvorova: 431
Broj pločastih elemenata: 0
Broj grečnih elemenata: 328
Broj graničnih elemenata: 48
Broj osnovnih slučajeva opterećenja: 5
Broj kombinacija opterećenja: 16

Jedinice mera

Dužina: m [cm, mm]

Sila: kN

Temperatura: Celsius



Izometrija (Front)

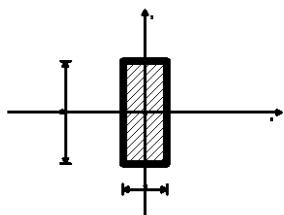
Ulazni podaci - Konstrukcija

Tabela materijala

No	Naziv materijala	E[kN/m ²]	μ	γ[kN/m ³]	αt[1/C]	Em[kN/m ²]	μm
1	Drvo - cetinari - lamelirano	1.100e+7	0.20	5.00	1.000e-5	1.100e+7	0.20

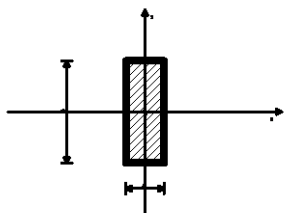
Setovi greda

Set: 1 Presek: b/d=12/28, Fiktivna ekscentričnost



Mat.	A1	A2	A3	I1	I2	I3
1 - Drvo - cetina...	3.360e-2	2.800e-2	2.800e-2	1.179e-4	4.032e-5	2.195e-4

Set: 3 Presek: b/d=6/16, Fiktivna ekscentričnost



Mat.	A1	A2	A3	I1	I2	I3
1 - Drvo - cetina...	9.600e-3	8.000e-3	8.000e-3	8.803e-6	2.880e-6	2.048e-5

Setovi tačkastih oslonaca

Set	K,R1	K,R2	K,R3	K,M1	K,M2	K,M3
1	1.000e+10	1.000e+10	1.000e+10			

Konture greda Set 1. b/d=12/28

No	Čvor I	Čvor J	Oslobađanje uticaja												M	Ozn. pozicije
			Čvor I						Čvor J							
			M1	M2	M3	P1	P2	P3	M1	M2	M3	P1	P2	P3		
1	1	30~88	%	%	%				%	%	%					
2	88	152~149	%	%	%				%	%	%					
3	138	282~384	%	%	%				%	%	%					
4	384	424~421	%	%	%				%	%	%					

Podaci nelinearnosti oslobađanja uticaja u gredama Set 1. b/d=12/28

No	Oslobađanje uticaja						
	M1	M2	M3	P1	P2	P3	
1 - Cvor I	(50%)	(50%)	(50%)				
1 - Cvor J	(50%)	(50%)	(50%)				
2 - Cvor I	(50%)	(50%)	(50%)				
2 - Cvor J	(50%)	(50%)	(50%)				
3 - Cvor I	(50%)	(50%)	(50%)				
3 - Cvor J	(50%)	(50%)	(50%)				
4 - Cvor I	(50%)	(50%)	(50%)				
4 - Cvor J	(50%)	(50%)	(50%)				

Konture greda Set 3. b/d=6/16

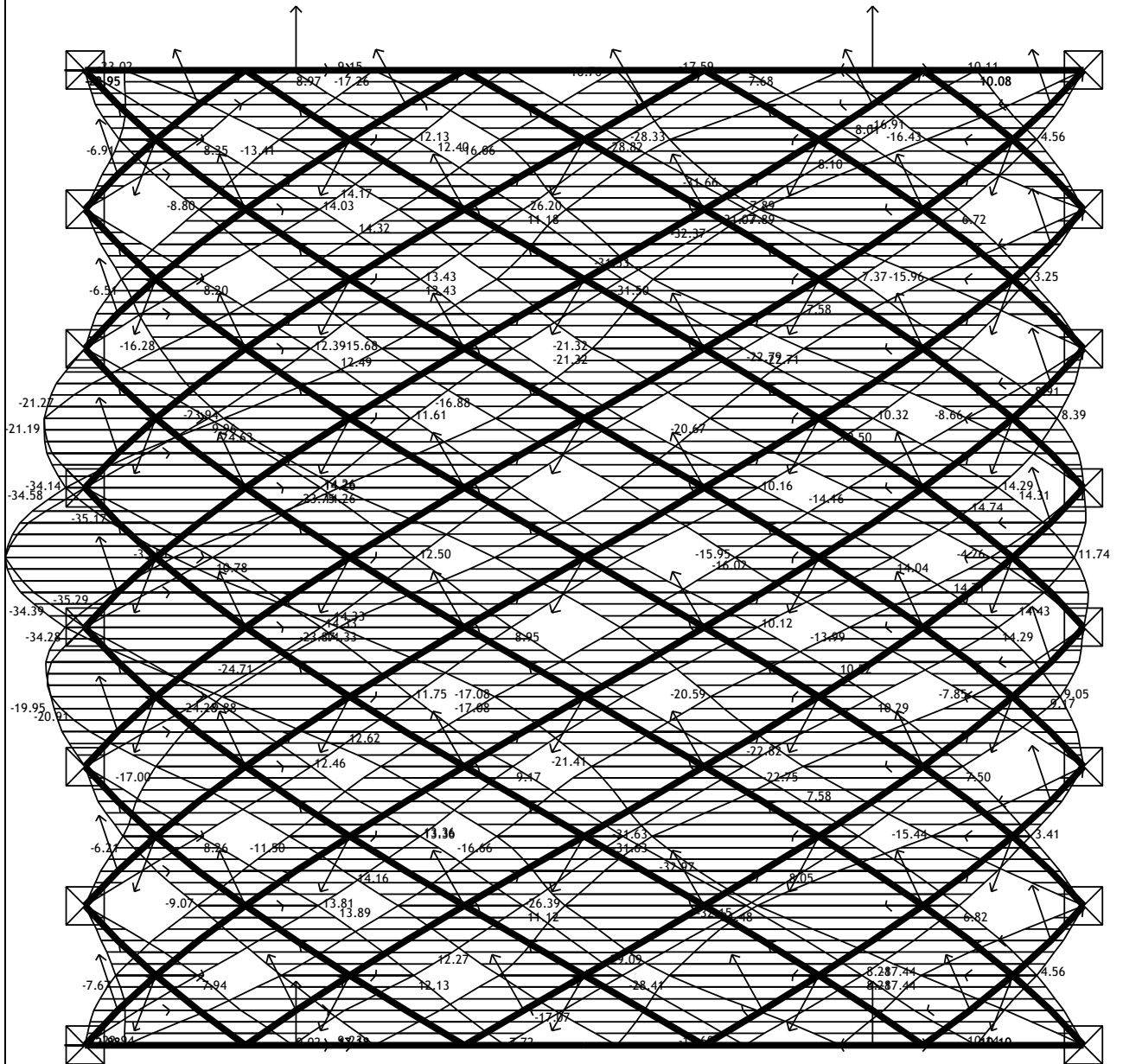
No	Čvor I	Čvor J	Oslobađanje uticaja												M	Ozn. pozicije
			Čvor I						Čvor J							
			M1	M2	M3	P1	P2	P3	M1	M2	M3	P1	P2	P3		
1	1	5~12	%	%	%				%	%	%					
...																
81	413	418~421	%	%	%				%	%	%					

Podaci nelinearnosti oslobađanja uticaja u gredama Set 3. b/d=6/16

No	Oslobađanje uticaja						
	M1	M2	M3	P1	P2	P3	
1 - Cvor I	(50%)	(50%)	(50%)				
1 - Cvor J	(50%)	(50%)	(50%)				
...							
81 - Cvor I	(50%)	(50%)	(50%)				
81 - Cvor J	(50%)	(50%)	(50%)				

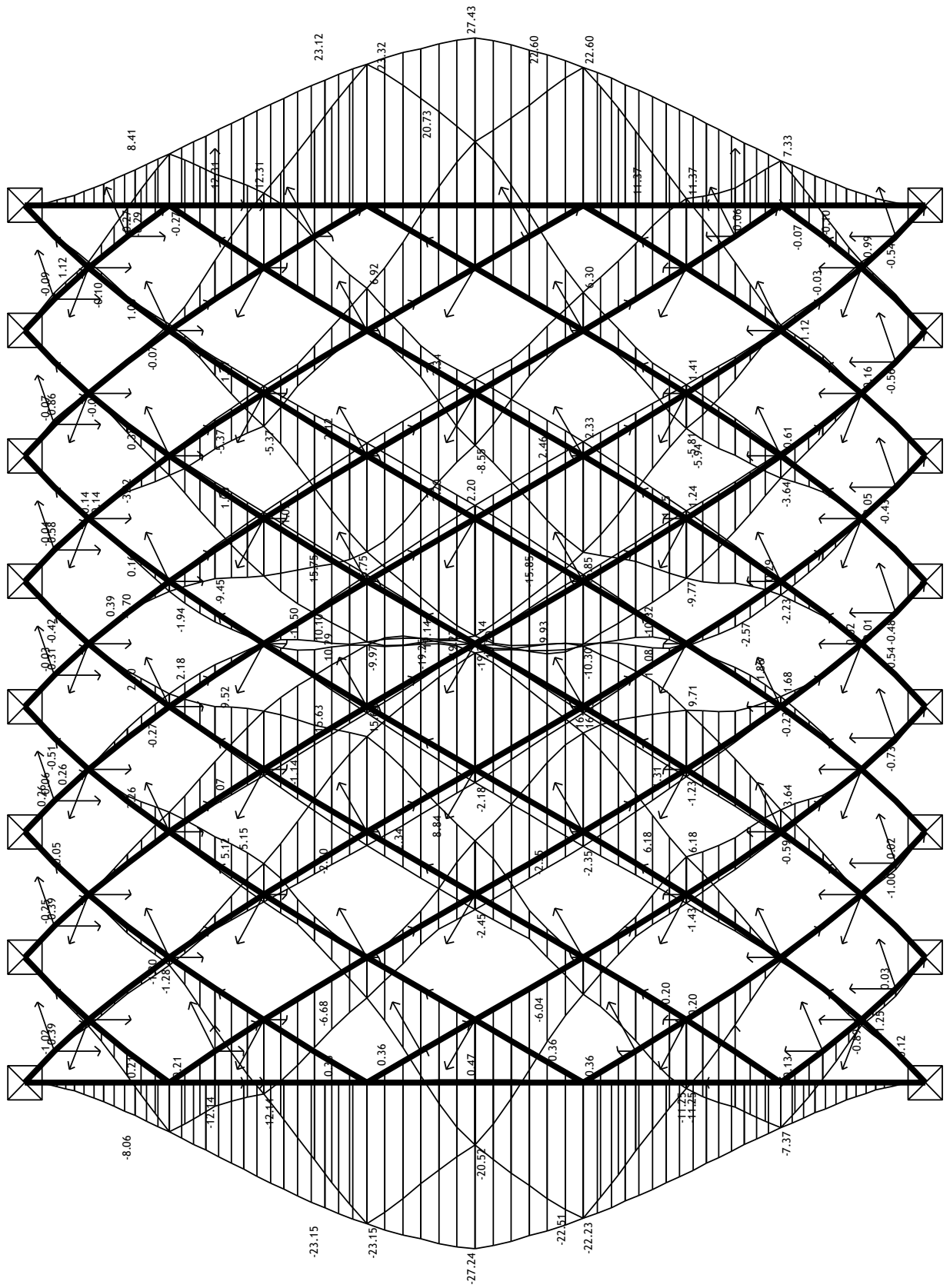
Ulazni podaci - Opterećenje

1	sopstvena težina (g)
2	opterećenje snegom
3	opterećenje snegom asimetrično
4	opterećenje od vetra po svodu
5	opterećenje od vetra po luku
6	Komb.: I
7	Komb.: I+II
8	Komb.: I+III
9	Komb.: I+II+III
10	Komb.: I+IV
11	Komb.: I+II+IV
12	Komb.: I+III+IV
13	Komb.: I+II+III+IV
14	Komb.: I+V
15	Komb.: I+II+V
16	Komb.: I+III+V
17	Komb.: I+II+III+V
18	Komb.: I+IV+V
19	Komb.: I+II+IV+V
20	Komb.: I+III+IV+V
21	Komb.: I+II+III+IV+V

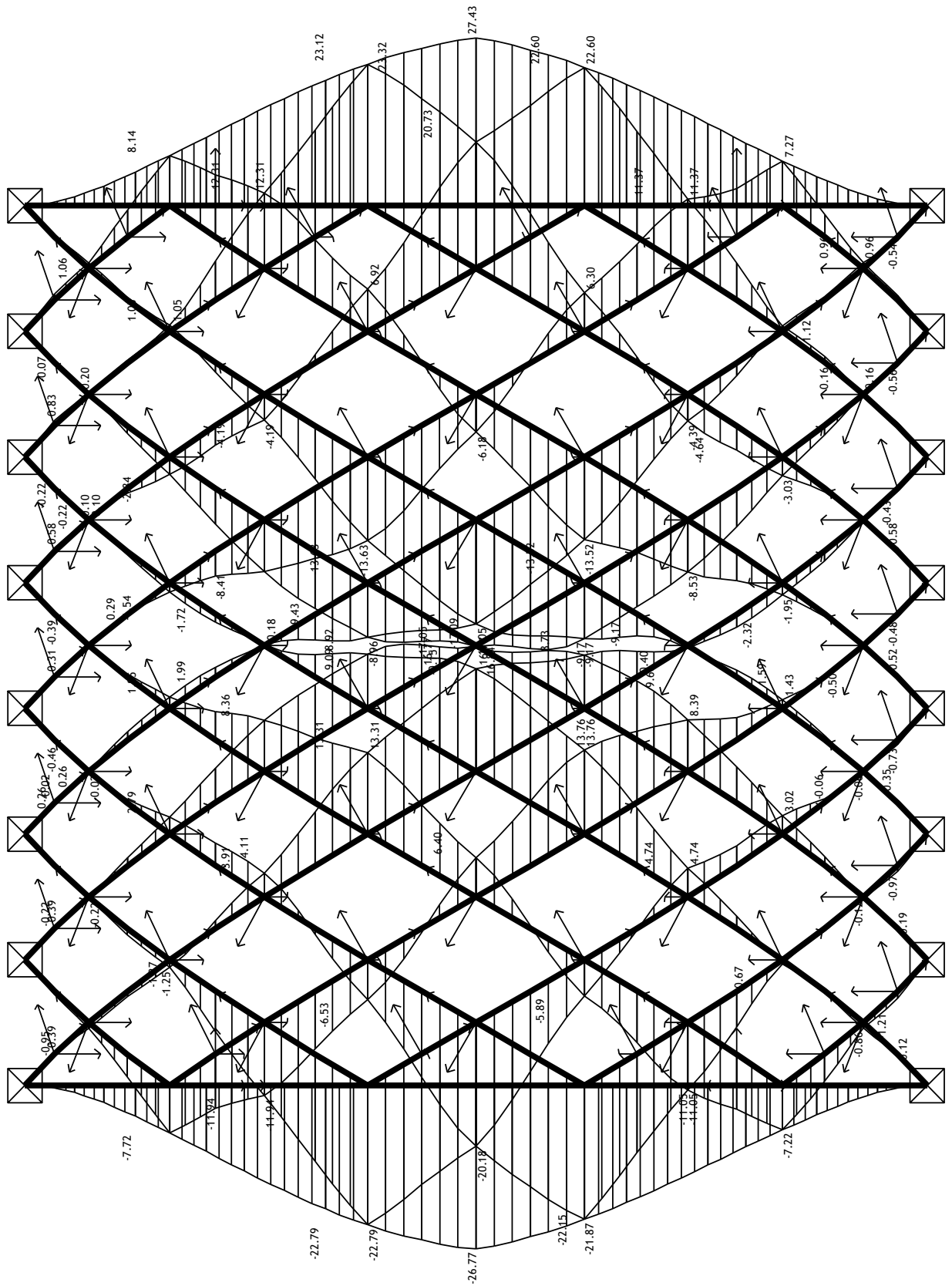


Izometrija (Top)

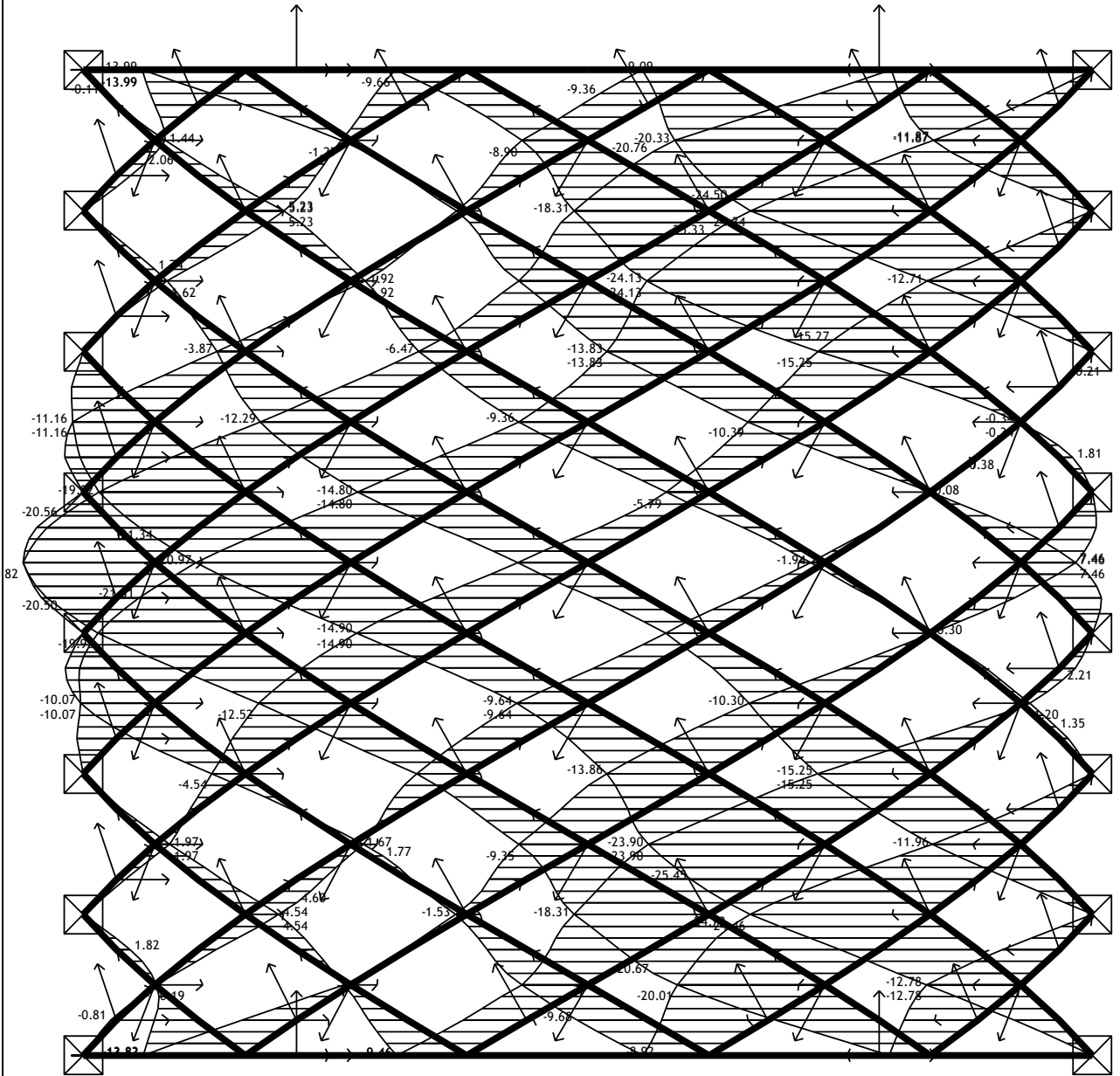
Utjecaji u gredi: max Xp= 14.74 / min Xp= -35.29 m / 1000



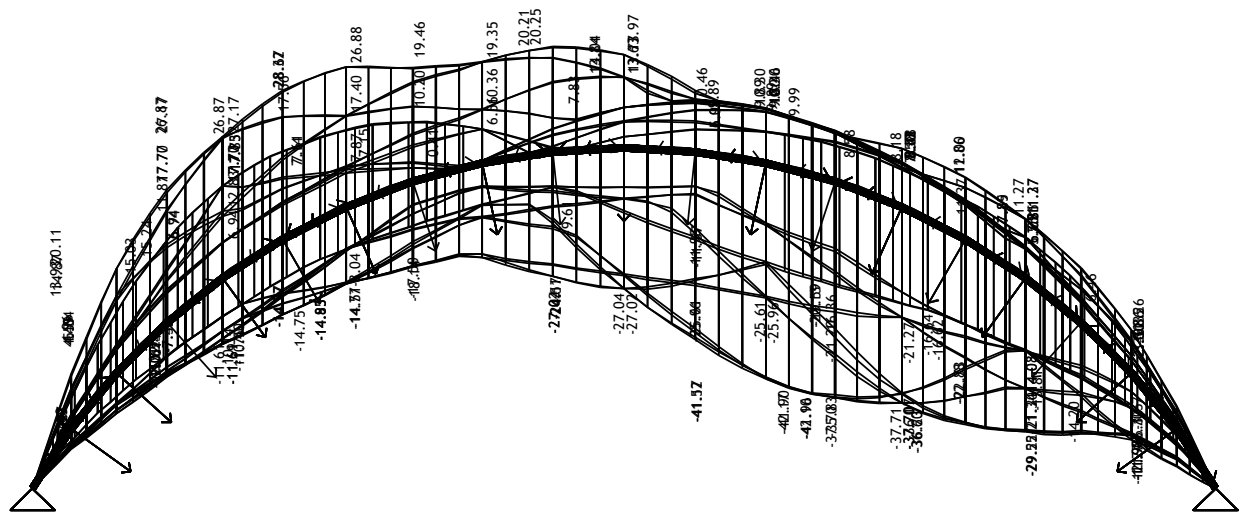
Izometrija (Top)
 Utjecaji u gredi: max Yp= 27.43 / min Yp= -27.24 m / 1000



Izometrija (Top)
 Utjecaji u gredi: max Yp= 27.43 / min Yp= -26.77 m / 1000



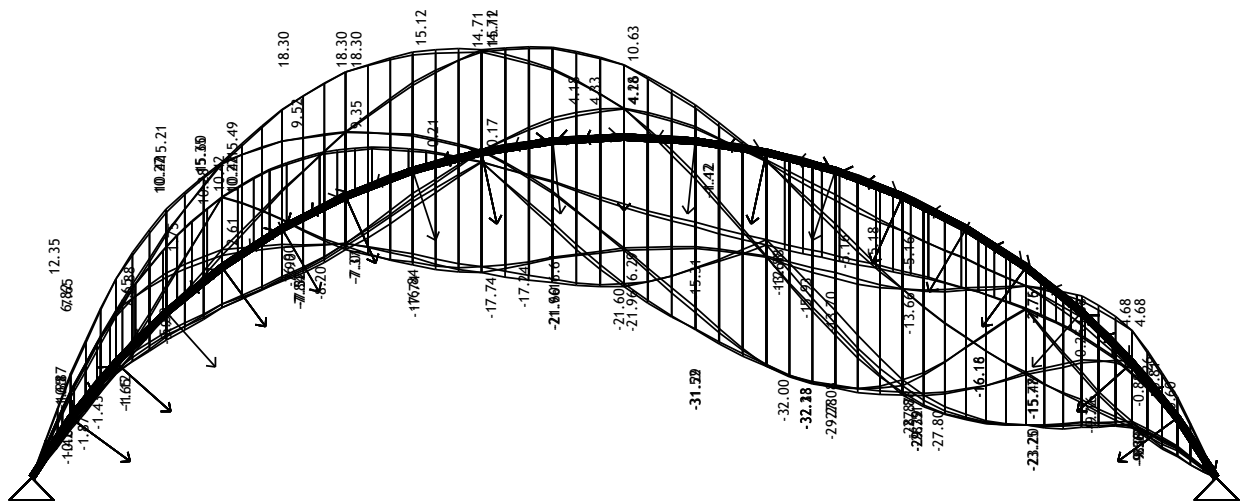
Izometrija (Top)
Utjecaji u gredi: max Xp= 7.46 / min Xp= -25.45 m / 1000



Izometrija (Front)

Uticaji u gredi: max Zp= 28.67 / min Zp= -42.17 m / 1000

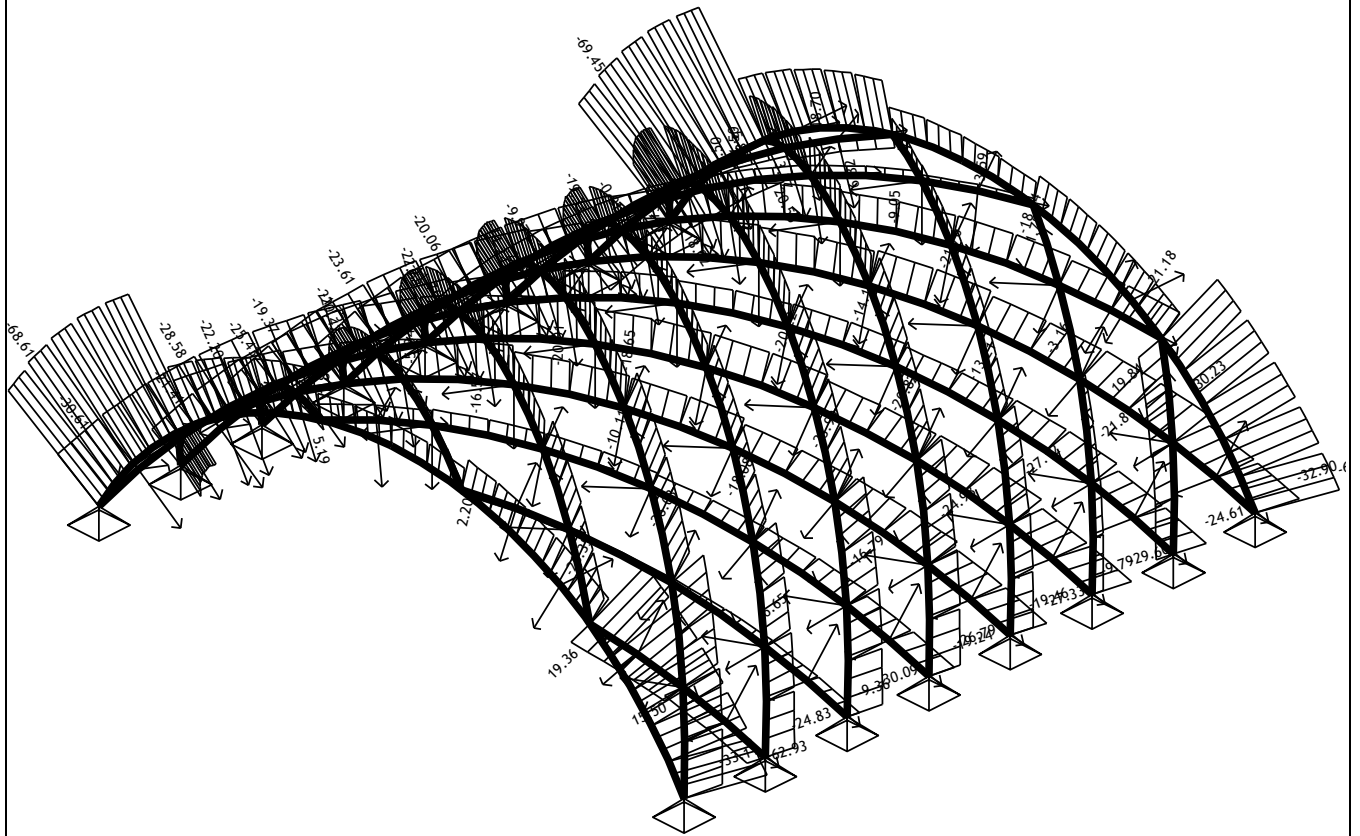
Opt. 21: I+II+III+IV+V



Izometrija (Front)

Uticaji u gredi: max Zp= 18.30 / min Zp= -32.33 m / 1000

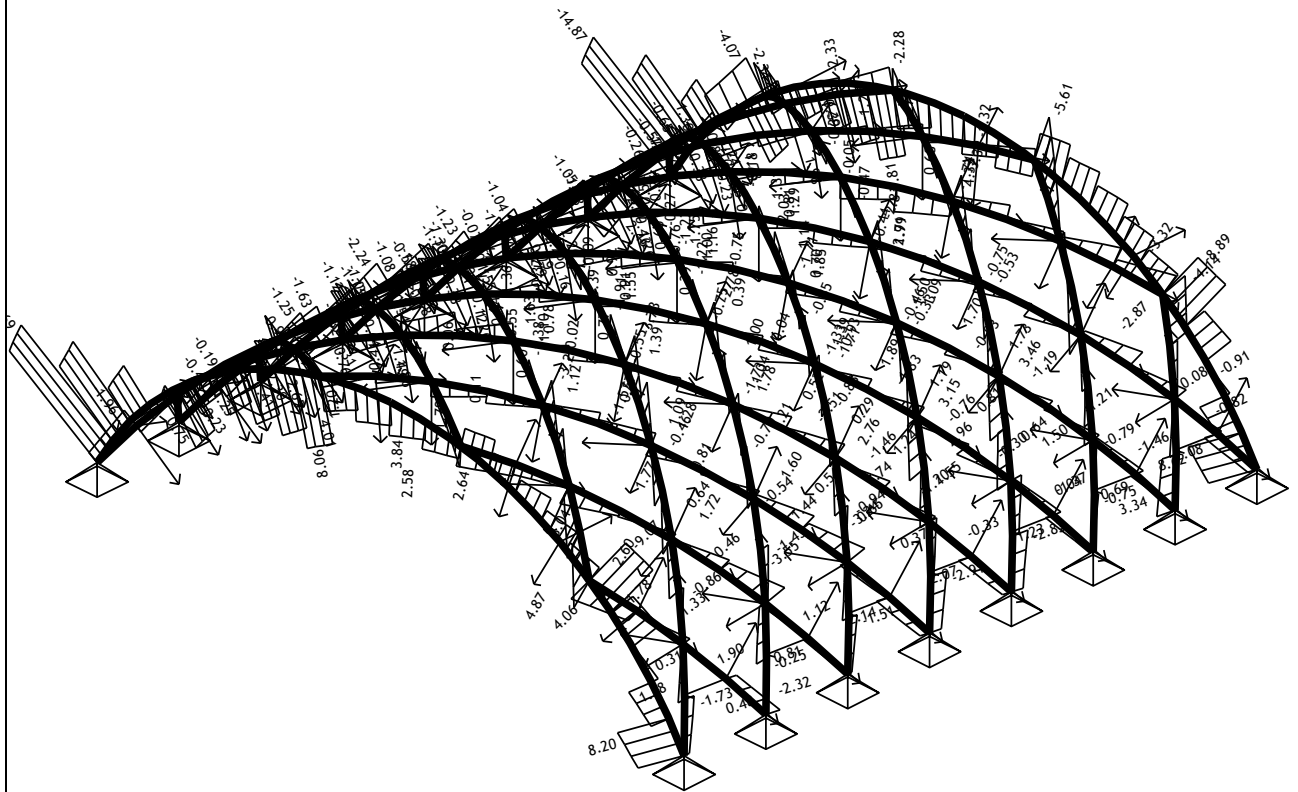
Opt. 21: I+II+III+IV+V



Izometrija

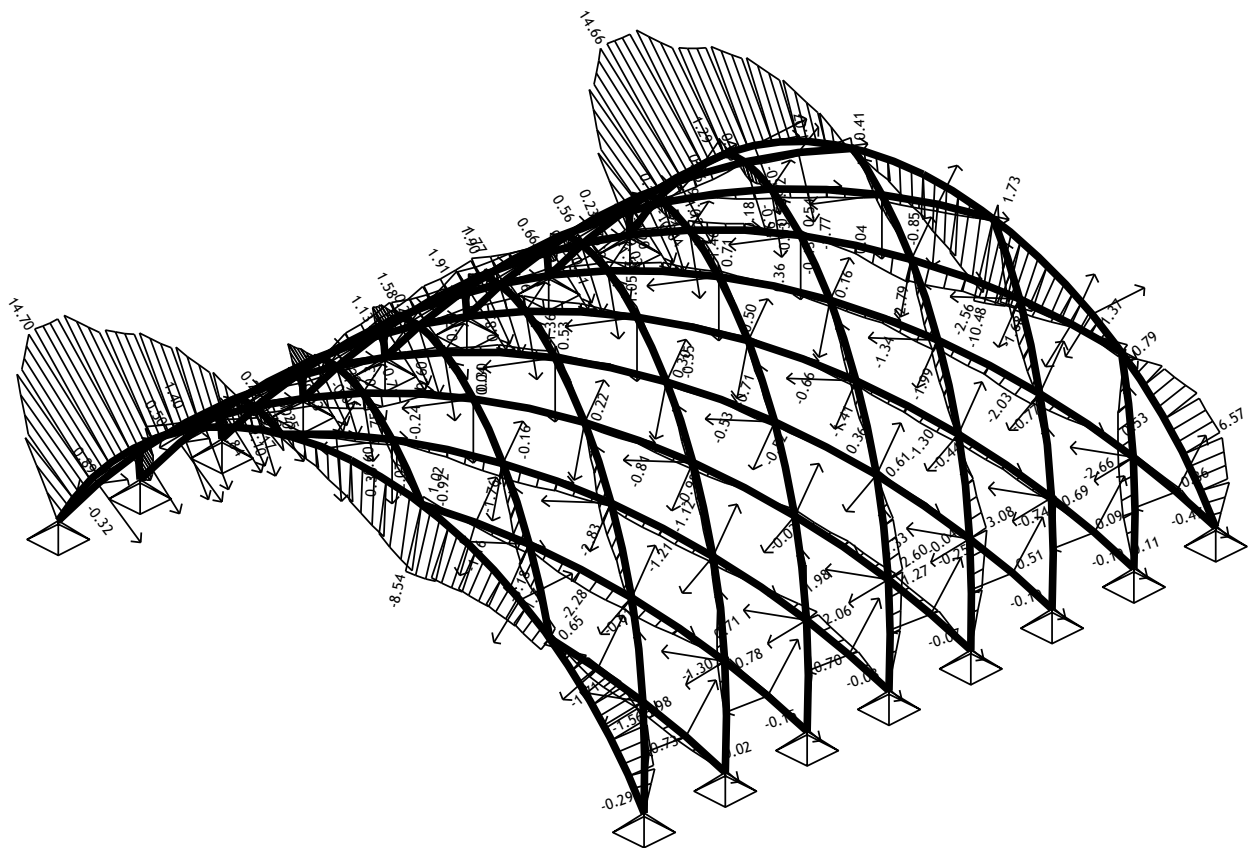
Uticaji u gredi: max N1= 20.56 / min N1= -69.45 kN

Opt. 21: I+II+III+IV+V



Izometrija

Uticaji u gredi: max T2= 8.62 / min T2= -14.87 kN



Izometrija

Utjecaji u gredi: max M3= 14.70 / min M3= -10.48 kNm

Presečne sile u gredama - Ekstremne vrednosti - Opterećenje: 1-21

Oznaka	S.O.	x [m]	N1 [kN]	T2 [kN]	M2 [kNm]	M3 [kNm]
(140 - 385)	17	1.040	-81.313	-6.608	0.508	16.863
(140 - 385)	9	1.040	-81.136	-6.604	0.495	16.839
(3 - 90)	9	1.040	-80.455	-6.584	-0.402	16.912
(3 - 90)	17	1.040	-79.875	-6.574	-0.359	16.831
(140 - 385)	21	0.520	-69.453	-9.095	0.194	7.546
(140 - 385)	13	0.520	-69.277	-9.075	0.185	7.531
(3 - 90)	13	0.520	-69.186	-9.042	-0.128	7.716
(3 - 90)	21	0.520	-68.609	-8.983	-0.098	7.665
(386 - 423)	21	6.497	-63.571	7.827	-0.086	0.313
(89 - 151)	13	6.497	-63.488	7.522	0.046	0.118
(140 - 385)	17	0.520	-79.936	-19.528	0.270	10.064
(140 - 385)	9	0.520	-79.762	-19.494	0.262	10.050
(3 - 90)	9	0.520	-79.094	-19.361	-0.201	10.163
(3 - 90)	17	0.520	-78.524	-19.254	-0.171	10.112
(140 - 385)	21	0.520	-68.449	-14.874	0.221	7.546
(140 - 385)	13	0.520	-68.275	-14.840	0.212	7.531
(3 - 90)	13	0.520	-68.186	-14.799	-0.158	7.716
(3 - 90)	21	0.520	-67.617	-14.693	-0.127	7.665
(140 - 385)	16	0.520	-49.312	-13.288	0.146	6.847
(140 - 385)	8	0.520	-49.138	-13.254	0.137	6.832
(3 - 90)	17	5.198	-30.154	9.846	-2.286	0.386
(3 - 90)	9	5.198	-30.278	9.899	-2.268	0.338
(3 - 90)	21	5.198	-24.932	7.069	-2.221	-1.703
(3 - 90)	13	5.198	-25.056	7.122	-2.203	-1.750
(140 - 385)	9	5.198	-32.341	9.898	2.180	0.977
(140 - 385)	17	5.198	-32.374	9.913	2.173	0.964
(386 - 423)	17	0.000	-12.097	6.334	2.139	-5.972
(89 - 151)	9	0.000	-11.249	6.085	-2.131	-5.785
(386 - 423)	9	0.000	-12.115	6.335	2.126	-5.959
(140 - 385)	21	5.848	-13.064	4.262	2.110	-2.373
(3 - 90)	9	2.079	-79.323	-1.320	-0.913	21.005
(140 - 385)	17	2.079	-80.180	-1.273	1.068	20.944
(3 - 90)	17	2.079	-78.744	-1.359	-0.908	20.938
(140 - 385)	9	2.079	-80.003	-1.283	1.066	20.922
(3 - 90)	8	2.079	-49.442	-1.856	-0.442	15.395
(140 - 385)	16	2.079	-49.927	-1.822	0.548	15.340
(3 - 90)	16	2.079	-48.863	-1.894	-0.437	15.329
(140 - 385)	8	2.079	-49.750	-1.832	0.546	15.318
(3 - 90)	3	2.079	-47.326	-1.874	-0.422	15.098
(140 - 385)	3	2.079	-47.642	-1.847	0.525	15.020

Deformacija greda L.K.S. - Ekstremne vrednosti - Opterećenje:

1-21

Oznaka	S.O.	x [m]	u2 [mm]				
(372 - 377)	17	2.250	49.639	(224 - 281)	9	0.000	48.663
(372 - 377)	9	2.250	49.608	(224 - 281)	17	0.000	48.452
(157 - 167)	9	2.250	49.196	(211 - 217)	9	1.250	48.203
(157 - 167)	17	2.250	48.959	(110 - 225)	9	2.500	47.989

(211 - 217)	17	1.250	[47.972]	(110 - 225)	17	2.500	[47.788]
-------------	----	-------	-----------------	-------------	----	-------	-----------------

Deformacija gređa GLO - Ekstremne vrednosti - Opterećenje: 1-21

Oznaka	S.O.	x [m]	Zp [mm]				
(110 - 225)	9	1.750	-42.174]	(331 - 408)	17	1.750	-41.903]
(157 - 167)	9	2.500	-42.098]	(157 - 167)	17	2.500	-41.895]
(110 - 225)	17	1.750	-41.987]	(331 - 408)	9	1.750	-41.875]
(372 - 377)	17	2.500	-41.964]	(166 - 127)	9	0.000	-41.521]
(372 - 377)	9	2.500	-41.944]	(166 - 127)	17	0.000	-41.326]

Uticaji u tačkastim osloncima - Ekstremne vrednosti - Opterećenje: 1-21

Oznaka	S.O.	R1 [kN]	R2 [kN]	R3 [kN]	M1 [kNm]	M2 [kNm]	M3 [kNm]
138	17	76.805	-17.441	[82.207]	*	*	*
138	9	76.659	-17.390	[82.039]	*	*	*
1	9	75.939	16.836	[80.852]	*	*	*
1	17	75.475	16.685	[80.331]	*	*	*
149	9	-54.958	17.468	[73.822]	*	*	*
149	13	-57.032	16.722	[73.354]	*	*	*
149	17	-54.506	17.315	[73.305]	*	*	*
138	21	64.968	-15.951	[73.290]	*	*	*
138	13	64.822	-15.900	[73.121]	*	*	*
149	21	-56.580	16.568	[72.837]	*	*	*

Deformacija čvorova: max. |Yp|

Čvor	S.O.	Xp [mm]	Yp [mm]	Zp [mm]
385	21	-8.748	27.434	-10.342
384	21	-8.748	27.434	-10.342
386	21	-8.748	27.434	-10.342
385	13	-8.747	27.306	-10.317
384	13	-8.747	27.306	-10.317

386	13	-8.748	27.306	-10.317
90	13	-8.605	-27.239	-9.925
88	13	-8.605	-27.239	-9.925
89	13	-8.606	-27.239	-9.925
385	17	-15.797	26.795	-12.526

Deformacija čvorova: max. |Zp|

Čvor	S.O.	Xp [mm]	Yp [mm]	Zp [mm]
381	17	-29.644	-0.594	-41.615
381	9	-29.609	-0.624	-41.595
195	9	-29.922	1.190	-41.567
166	9	-26.394	-4.484	-41.521
165	9	-26.394	-4.484	-41.520

167	9	-26.394	-4.484	-41.520
176	9	-28.372	-7.579	-41.474
195	17	-29.777	1.258	-41.400
166	17	-26.291	-4.332	-41.326
165	17	-26.291	-4.332	-41.326

Deformacija čvorova: max. |Xp|

Čvor	S.O.	Xp [mm]	Yp [mm]	Zp [mm]
131	9	-35.170	-1.485	28.321
112	9	-35.156	1.691	28.674
112	17	-35.151	1.641	28.645
131	17	-35.124	-1.525	28.268
84	17	-34.278	2.072	27.172
83	17	-34.278	2.072	27.173
85	17	-34.278	2.072	27.173
84	9	-34.239	2.103	27.154
83	9	-34.239	2.103	27.154
85	9	-34.239	2.103	27.154

**Прилог 2: Извештај биаксијалних тестова за текстилну мембрану примењену за прототип конструкције,
извор: ArTech**

BIAx TEST T1



DEKRA Automobil GmbH
Laboratory for Technical Textiles and Films
Breitwiesenstr. 13
70565 Stuttgart
Tel. +49.711.7861-4110
Fax +49.711.7861-4115

Contact:
Jochen Köhnlein
Tel. direct +49.711.7861-4112
E-Mail jochen.koehnlein@dekra.com
Date 22.03.2018

Report on Biaxial Test and Young's Modulus determination

Client:

Sattler PRO-TEX GmbH
Sattlerstraße 45
A-8077 Gössendorf

Index

1. Task	3
2. Introduction	4
3. Theory	6
4. Practical Calculations	8
5. Measuring, Definition of load regime, Calculation of Moduli	9

1. Task

The following biaxial tests has been executed in the lab of DEKRA Technical Textiles and Films according to the client's test requirements and according to DIN EN 17117.

This test was done to determine the Young's Modulus.

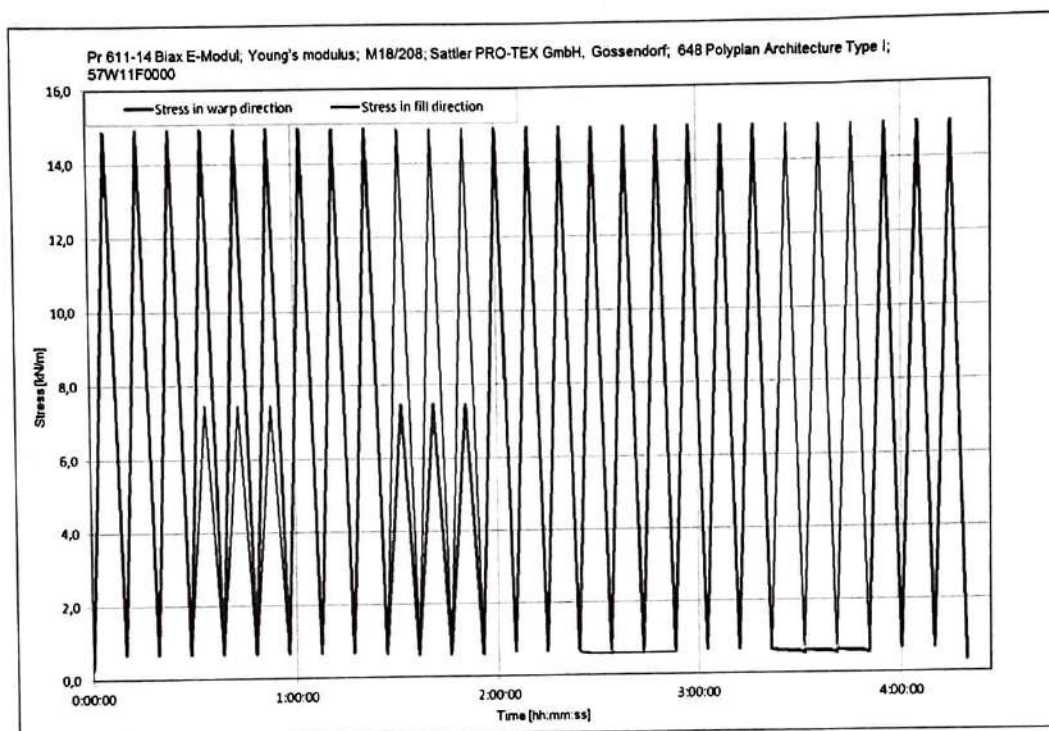
Testing temperature:	23 °C ± 2 K
Date of receipt:	19.01.2018
Date of test:	23.01.2018
Supplier of sample:	Sattler PRO-TEX GmbH, Gössendorf, Austria
Material manufacturer:	Sattler PRO-TEX GmbH, Gössendorf, Austria
Material type:	PVC coated Polyester fibre fabric
Material application type:	648 POLYPLAN Architecture Type I
Batch no:	57W11F0000
Production no.:	
Internal sample no.:	M18/208-01
Load regime:	611-14 Art 648 LG E-Modul
Load conditions:	warp to weft stresses 1:1, 2:1, 1:2, 1:0, 0:1 pre stress 0.6 kN/m

2. Introduction

There are different methods to determine the elastic moduli of a coated fabric.

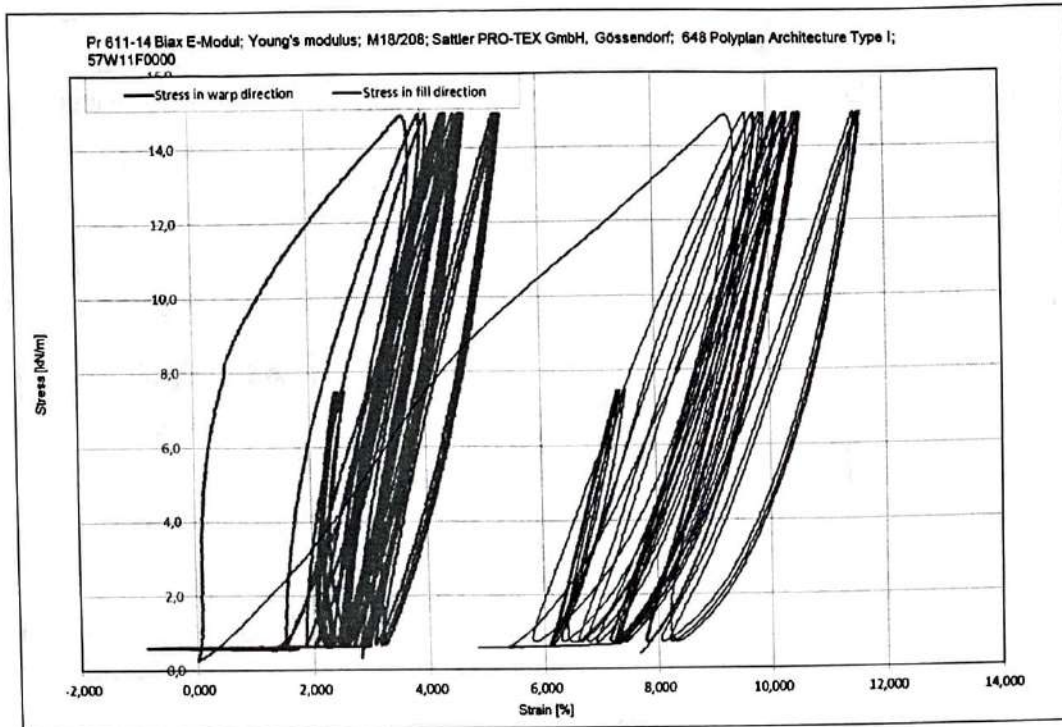
First we have to mention that we want to establish a linear elastic approximation for a non-linear non-elastic behaviour. Furthermore we assume that a fabric behaves as an orthotropic two dimensional material. And we want to simulate only the behaviour under stresses the mean axes of which are parallel to warp and weft.

In the following picture 2.1 a normal load regime to determine the elastic moduli is shown.



Picture 2.1: Load regime for the determination of the elastic moduli

In the second picture we will show a usual diagram for the stress-strain-relations. In many cases the moduli are now calculated as the gradient of a tangent in a chosen working point, normally the prestress which is sketched here.



Picture 2.2: Stress strain diagram

We will show that this procedure can be critical in some cases and that we propose another procedure.

3. Theory

In linear elastic approximation for orthotropic behaviour we have the following relations:

$$\begin{bmatrix} n_{11} \\ n_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{1111} & E_{1122} \\ E_{1122} & E_{2222} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \end{bmatrix}$$

with the inversion:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} \\ C_{1122} & C_{2222} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_{11} \\ n_{22} \end{bmatrix}$$

or, explicitly:

$$n_{11} = E_{1111} \varepsilon_{11} + E_{1122} \varepsilon_{22} = E_{1111} (\varepsilon_{11} + \nu_{12} \varepsilon_{22})$$

$$n_{22} = E_{1122} \varepsilon_{11} + E_{2222} \varepsilon_{22} = E_{2222} (\nu_{21} \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22})$$

with the inversion:

$$\varepsilon_{11} = C_{1111} n_{11} + C_{1122} n_{22}$$

$$\varepsilon_{22} = C_{1122} n_{11} + C_{2222} n_{22}.$$

Index 11 is used for warp direction, index 22 for fill (weft) direction. For stresses n is used, ε for strains, E is used for Young's modulus in the respective direction and C is used for compliance.

The following abbreviations are used:

n_{11} stress in warp direction,

n_{22} stress in fill direction

ε_{11} strain in warp direction,

ε_{22} strain in fill direction

E_{1111} stiffness in warp direction,

E_{2222} stiffness in fill direction,

E_{1122} stiffness interaction between warp and fill,

$\nu_{12} = E_{1122}/E_{1111}$ Poisson ratio for the interaction between warp and fill

$\nu_{21} = E_{1122}/E_{2222}$ Poisson ratio for the interaction between fill and warp

C_{1111} compliance in warp direction,

C_{2222} compliance in fill direction,

C_{1122} compliance interaction between warp and fill.

$$\nu_{12} = \frac{E_{12}}{E_{11}}$$

$$\nu_{21} = \frac{E_{12}}{E_{22}}$$

We have used four indices both for stiffness and compliance to manifest that these terms are tensors of fourth order which link two tensors of second order, the stresses \mathbf{n} and the deformations $\mathbf{\epsilon}$ linearly. With this statement the behaviour under transformation is well defined.

4. Practical Calculations

When the slopes of each load cycle is taken, using the equation:

$$\begin{bmatrix} \Delta \varepsilon_{11} \\ \Delta \varepsilon_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} \\ C_{1122} & C_{2222} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta n_{11} \\ \Delta n_{22} \end{bmatrix}$$

the following two equations are obtained:

$$\Delta \varepsilon_{11} = C_{1111} \cdot \Delta n_{11} + C_{1122} \cdot \Delta n_{22}$$

and

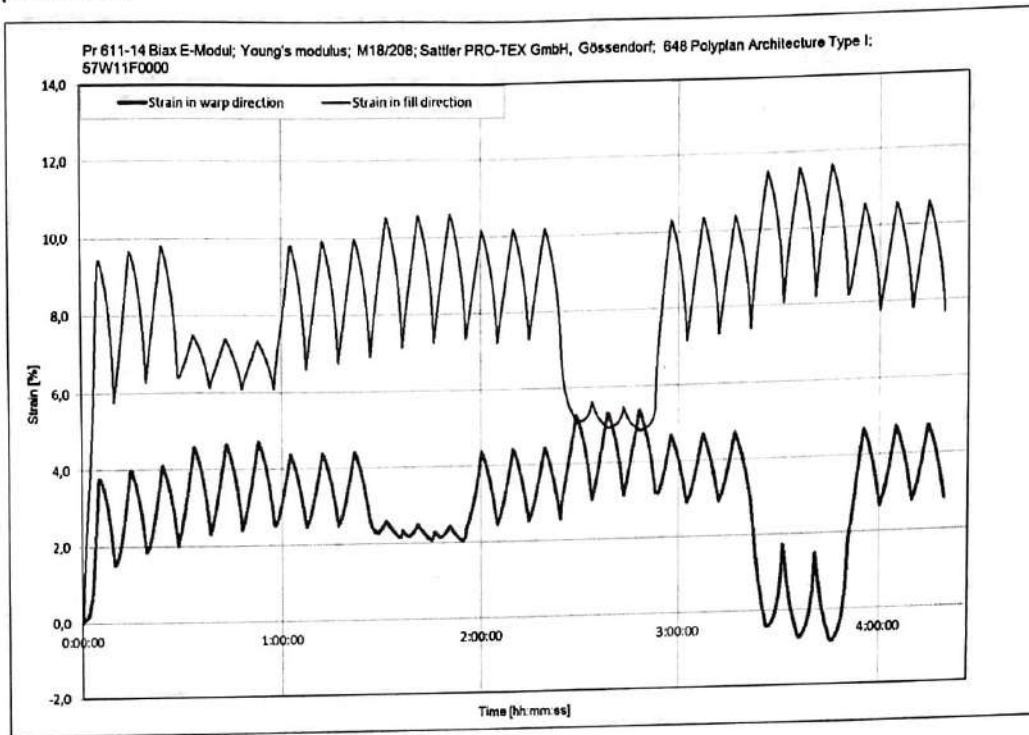
$$\Delta \varepsilon_{22} = C_{1122} \cdot \Delta n_{11} + C_{2222} \cdot \Delta n_{22}$$

The elastic modulus is then:

$$\bar{E} = \frac{1}{\det C} \begin{bmatrix} C_{2222} & -C_{1122} \\ -C_{1122} & C_{1111} \end{bmatrix}$$

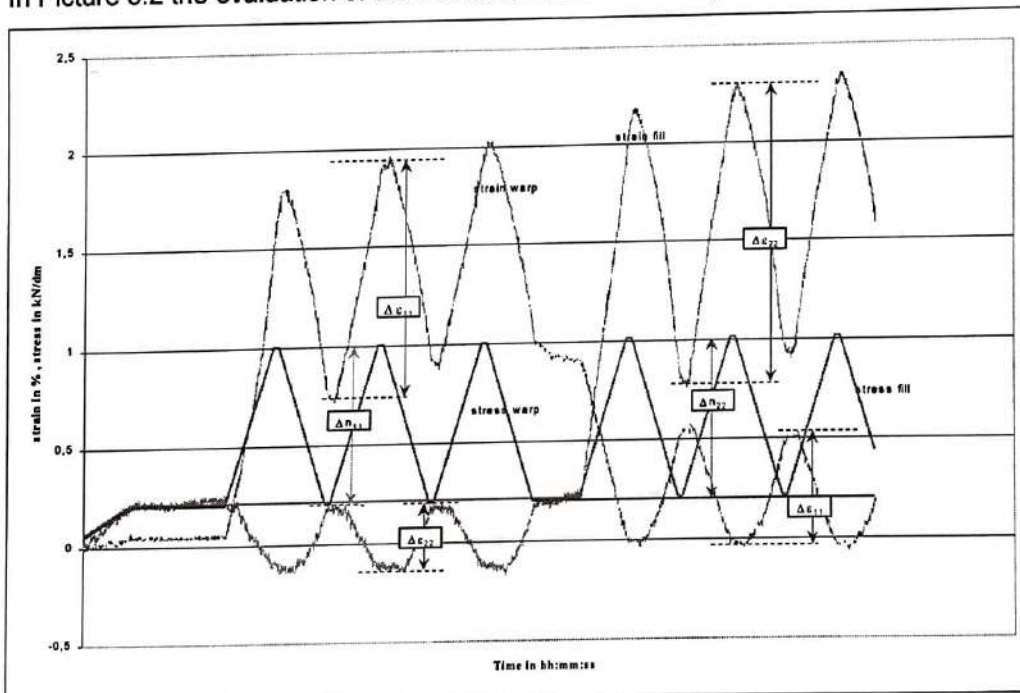
5. Measuring, Definition of load regime, Calculation of Moduli

Now we have applied the load regime shown above in picture 2.1. The resulting strains are shown in picture 5.1.



Picture 5.1: Resulting Strains

In Picture 5.2 the evaluation of the results is shown for example.



Picture 5.2: Evaluation of elastic moduli

Evaluating is made with the strain results as shown in picture 5.1. The differences of stress values and of strain values will be taken for each relationship of ratio (Δn_{11} , $\Delta \epsilon_{11}$, Δn_{22} , $\Delta \epsilon_{22}$...) The results are written down in table 5.1. Then calculation will be done for relation of stress combination as shown in the following table 5.2.

The classical formulation of stress – strain in table 5.2 are taking into account the Poisson's ration, they will be often used in appropriate known calculation programs (finite elements analysis). For comparison, the evaluations of the individual cycles are also listed, where it should be shown that these are not to be regarded as representative.

Table 5.1: Differences of stress and strain and average values for different stress ratio

warp to weft stress ratio	last 2 cycles				averages			
	Δn_{11}	Δn_{22}	$\Delta \epsilon_{11}$	$\Delta \epsilon_{22}$	Δn_{11}	Δn_{22}	$\Delta \epsilon_{11}$	$\Delta \epsilon_{22}$
	kN/dm *min	kN/dm *min	%/min	%/min	kN/dm *min	kN/dm *min	%/min	%/min
1:1	0,300	0,300	0,409	0,684	0,300	0,300	0,416	0,675
	0,300	0,300	0,422	0,666				
2:1	0,300	0,144	0,496	0,257	0,300	0,144	0,492	0,255
	0,300	0,144	0,487	0,253				
1:2	0,144	0,300	0,045	0,697	0,144	0,300	0,042	0,690
	0,144	0,300	0,039	0,682				
1:0	0,300	0,000	0,488	-0,128	0,300	0,000	0,485	-0,117
	0,300	0,000	0,482	-0,106				
0:1	0,000	0,300	-0,483	0,687	0,000	0,300	-0,480	0,683
	0,000	0,300	-0,477	0,679				

Table 5.2: Elastic moduli in dependency of stress ratio combination

		warp to weft stress ratio combination							all combinations
		1:1 2:1	1:1 1:2	1:1 1:0	1:1 0:1	2:1 1:0	1:2 0:1		
E_{1111}	kN/m	558	425	632	337	614	273	465	
E_{1122}	kN/m	97	100	75	120	34	94	131	
E_{2222}	kN/m	388	434	387	442	380	437	440	
ν_{12}		0,17	0,24	0,12	0,36	0,06	0,34	0,28	
ν_{21}		0,25	0,23	0,19	0,27	0,09	0,22	0,3	
<i>classical evaluation</i>									
E_{1111} * resp. E_{2222} * $(1 - E_{1122}^2 / (E_{1111} * E_{2222}))$ respectively									
$\epsilon_{11} = \sigma_{11} / E_1 - \nu_{12} * \sigma_{22} / E_2$; $\epsilon_{22} = \sigma_{22} / E_2 - \nu_{21} * \sigma_{11} / E_1$ mit $E_1 * \nu_{12} = E_2 * \nu_{21}$									
E_1	kN/m	534	402	617	304	611	253		
E_2	kN/m	371	410	378	399	378	405		
<i>evaluation from single sloping graph</i>									
		1:1	2:1	1:2	1:0	0:1			
E_1	kN/m	722	610	3429	619	0			
E_2	kN/m	444	565	435	0	439			

Young's modulus determination is valid only for the calculated loads. !
The results of the biaxial test above should not be used for compensation.

Remark:

All test results are only referring to the above-mentioned samples. A publication in extracts is only allowed in accordance with DEKRA (Automobil GmbH) Laboratory for Technical Textiles and Films.

Stuttgart, 22.03.2018



Dipl.-Ing. Jochen Köhnlein
Technical manager



Prof. Dr.-Ing. Heidrun Bögner-Balz
Laboratory manager

Прилог 3: Извештај из програма Tower 8, извор: аутор

Osnovni podaci o modelu

Datoteka: 50-50-50 semirigid.twp
Datum proračuna: 1.3.2023

Način proračuna: 3D model

- Teorija I-og reda Modalna analiza Stabilnost
 Teorija II-og reda Seizmički proračun Faze građenja
 Nelinearan proračun

Veličina modela

Broj čvorova: 431
 Broj pločastih elemenata: 0
 Broj grečnih elemenata: 328
 Broj graničnih elemenata: 48
 Broj osnovnih slučajeva opterećenja: 2
 Broj kombinacija opterećenja: 2

Jedinice mera

Dužina: m [cm,mm]
 Sila: kN
 Temperatura: Celsius

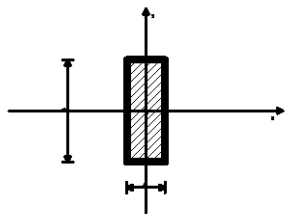
Ulazni podaci - Konstrukcija

Tabela materijala

No	Naziv materijala	E[kN/m ²]	μ	γ[kN/m ³]	αt[1/C]	Em[kN/m ²]	μm
1	Drvo - cetinari - lamelirano	1.100e+7	0.20	5.00	1.000e-5	1.100e+7	0.20

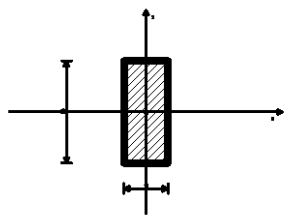
Setovi greda

Set: 1 Presek: b/d=6/16, Fiktivna ekscentričnost



Mat.	A1	A2	A3	I1	I2	I3
1 - Drvo - cetina...	9.600e-3	8.000e-3	8.000e-3	8.803e-6	2.880e-6	2.048e-5

Set: 2 Presek: b/d=12/28, Fiktivna ekscentričnost



Mat.	A1	A2	A3	I1	I2	I3
1 - Drvo - cetina...	3.360e-2	2.800e-2	2.800e-2	1.179e-4	4.032e-5	2.195e-4

Setovi tačkastih oslonaca

Set	K,R1	K,R2	K,R3	K,M1	K,M2	K,M3
1	1.000e+10	1.000e+10	1.000e+10			

Konture greda Set 1. b/d=6/16

No	Čvor I	Čvor J	Oslobađanje uticaja												M	Ozn. pozicije	
			Čvor I						Čvor J								
			M1	M2	M3	P1	P2	P3	M1	M2	M3	P1	P2	P3			
1	1	5~12	%	%	%				%	%	%						
...																	
81	413	418~421	%	%	%				%	%	%						

Konture greda Set 2. b/d=12/28

No	Čvor I	Čvor J	Oslobađanje uticaja												M	Ozn. pozicije	
			Čvor I						Čvor J								
			M1	M2	M3	P1	P2	P3	M1	M2	M3	P1	P2	P3			
1	88	30~1	%	%	%				%	%	%						
2	149	152~88	%	%	%				%	%	%						
3	384	282~138	%	%	%				%	%	%						
4	421	424~384	%	%	%				%	%	%						

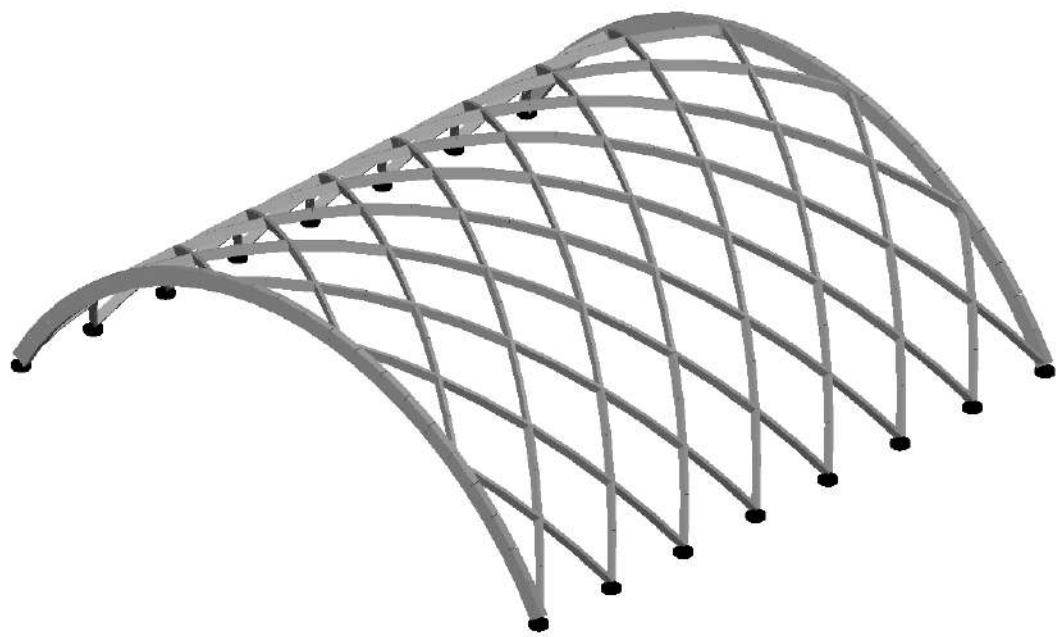
Podaci nelinearnosti oslobađanja uticaja u gredama Set 2. b/d=12/28

No	Oslobađanje uticaja					
	M1	M2	M3	P1	P2	P3
1 - Čvor I	(50%)	(50%)	(50%)			
1 - Čvor J	(50%)	(50%)	(50%)			
2 - Čvor I	(50%)	(50%)	(50%)			
2 - Čvor J	(50%)	(50%)	(50%)			
3 - Čvor I	(50%)	(50%)	(50%)			
3 - Čvor J	(50%)	(50%)	(50%)			
4 - Čvor I	(50%)	(50%)	(50%)			
4 - Čvor J	(50%)	(50%)	(50%)			

Konture tačkastih oslonaca

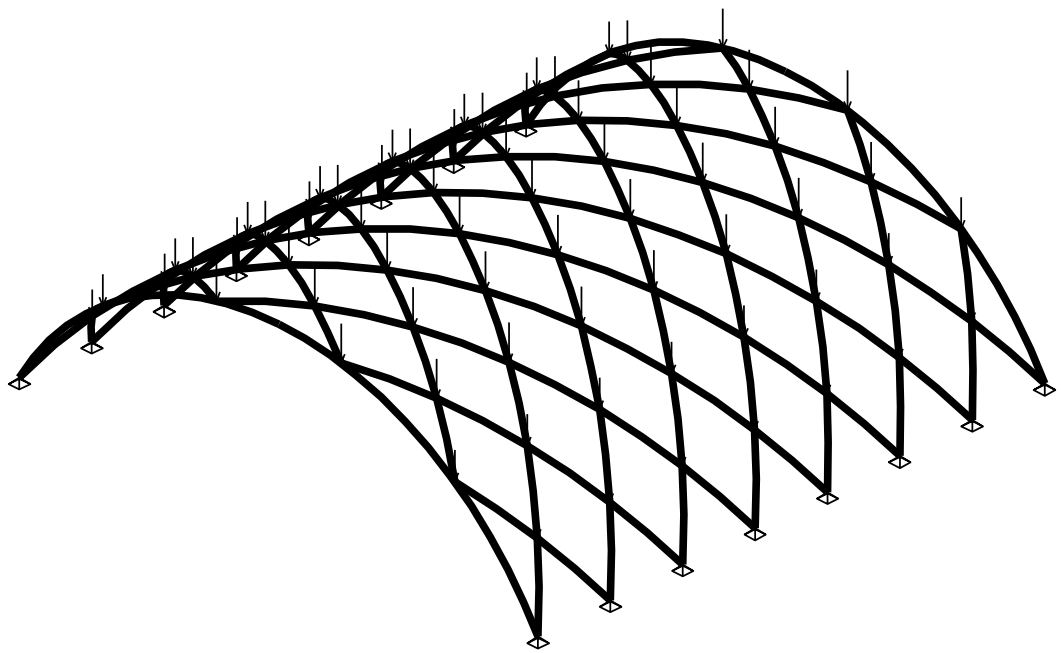
Čvorovi	Set
1, 7, 17, 31, 48, 72, 101, 138, 149, 205, 251,	1

295, 332, 366, 396, 421



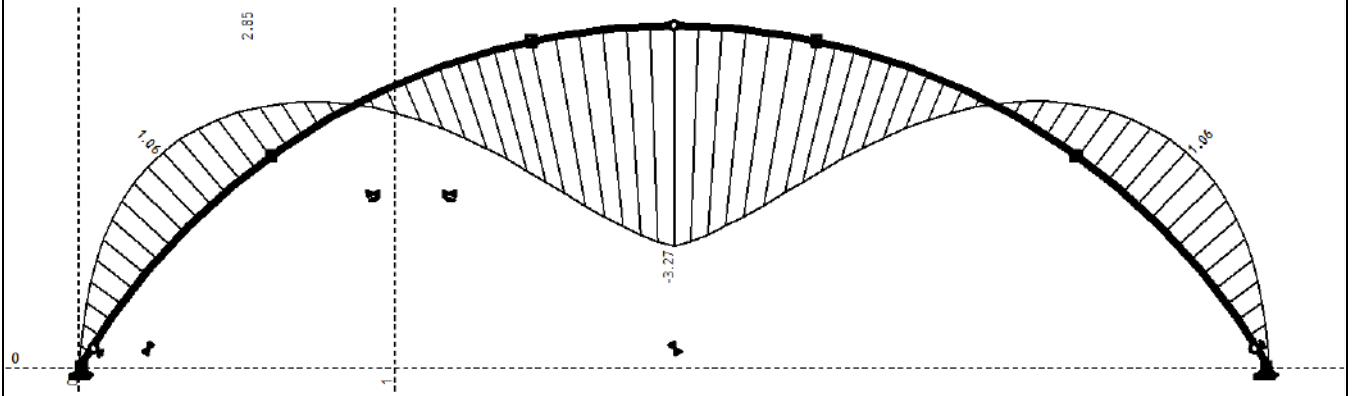
Izometrija

Opt. 2: dzakovi



Izometrija

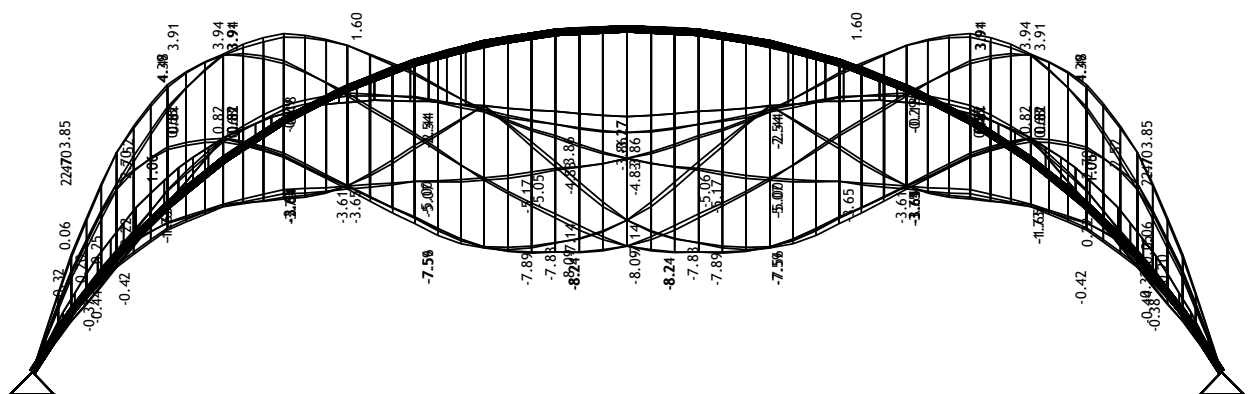
Opt. 4: I+II



Ram: H_2

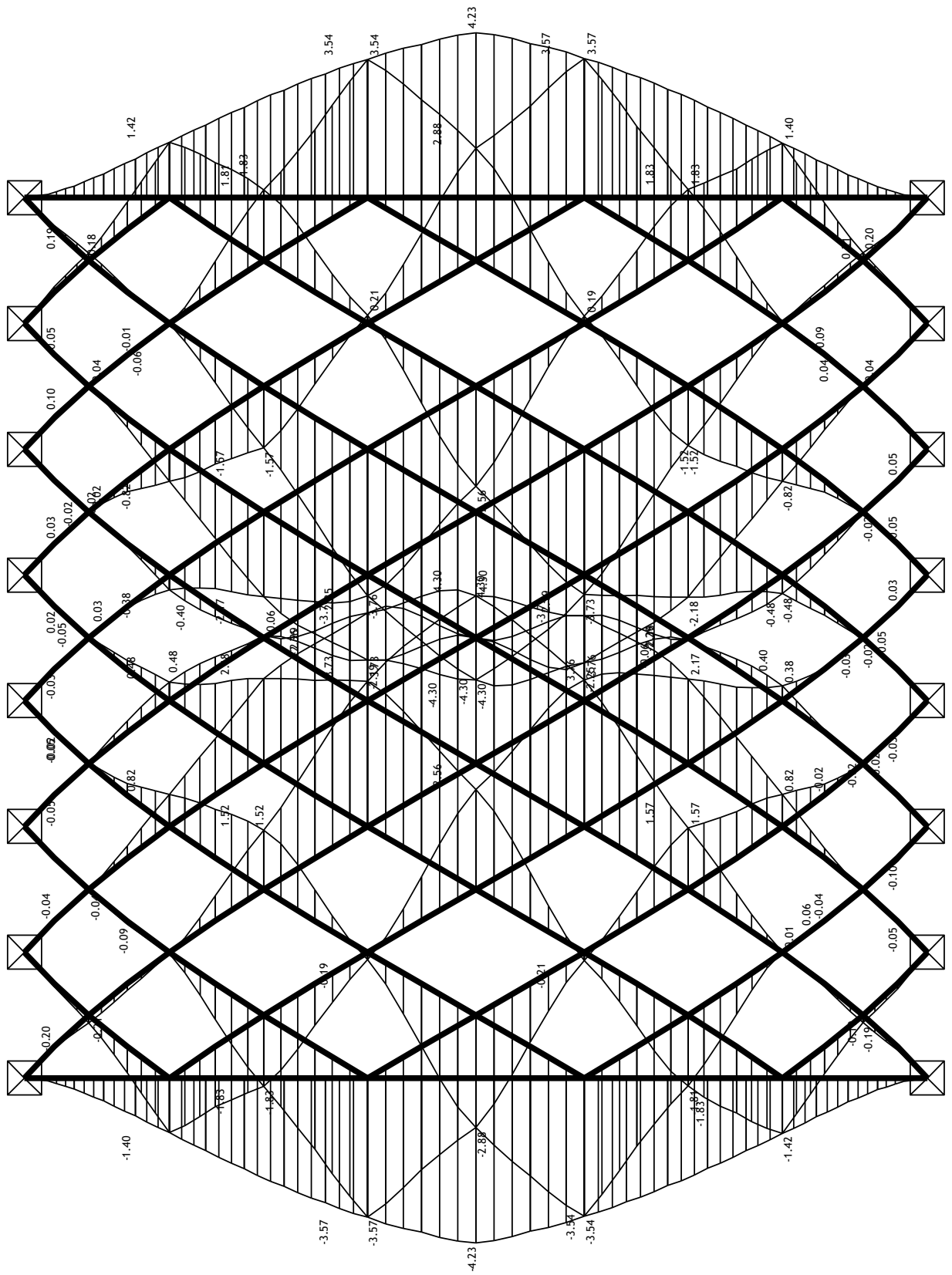
Uticaji u gredi: max Zp= 1.06 / min Zp= -3.27 m / 1000

Opt. 4: I+II

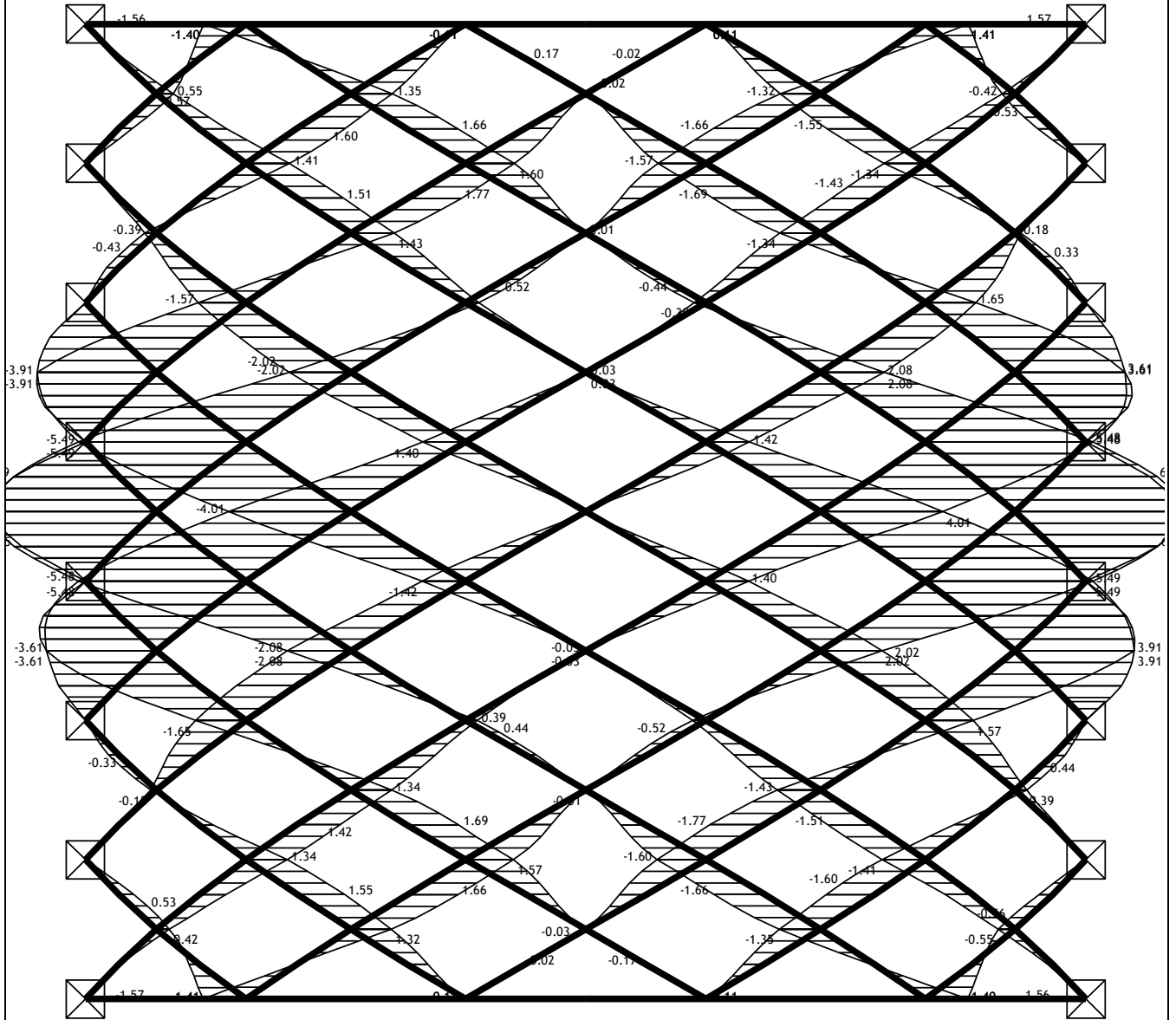


Izometrija (Front)

Uticaji u gredi: max Zp= 4.48 / min Zp= -8.24 m / 1000

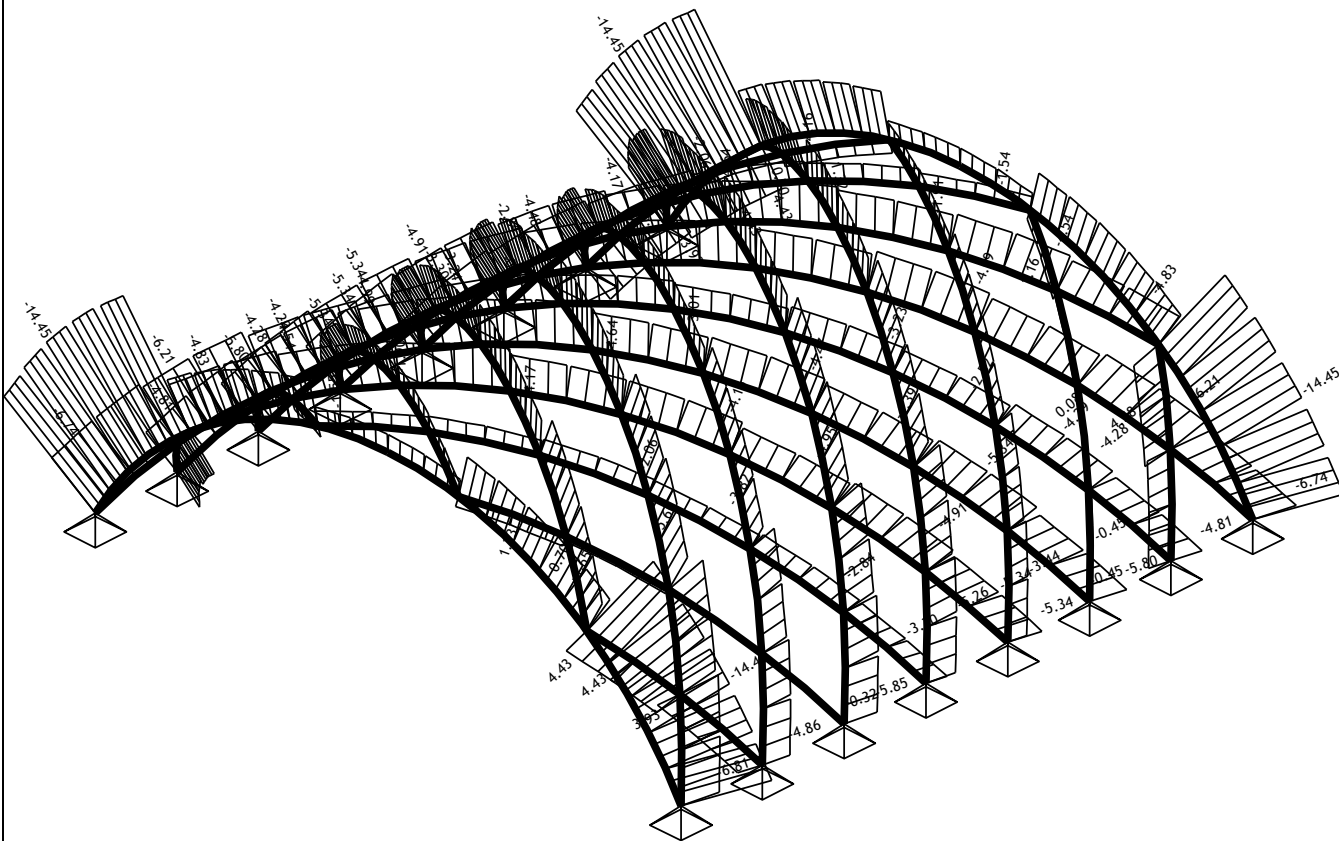


Izometrija (Top)
 Uticaji u gredi: max $Y_p = 4.30$ / min $Y_p = -4.30$ m / 1000



Izometrija (Top)
Utjecaji u gredi: max $X_p = 6.09$ / min $X_p = -6.09$ m / 1000

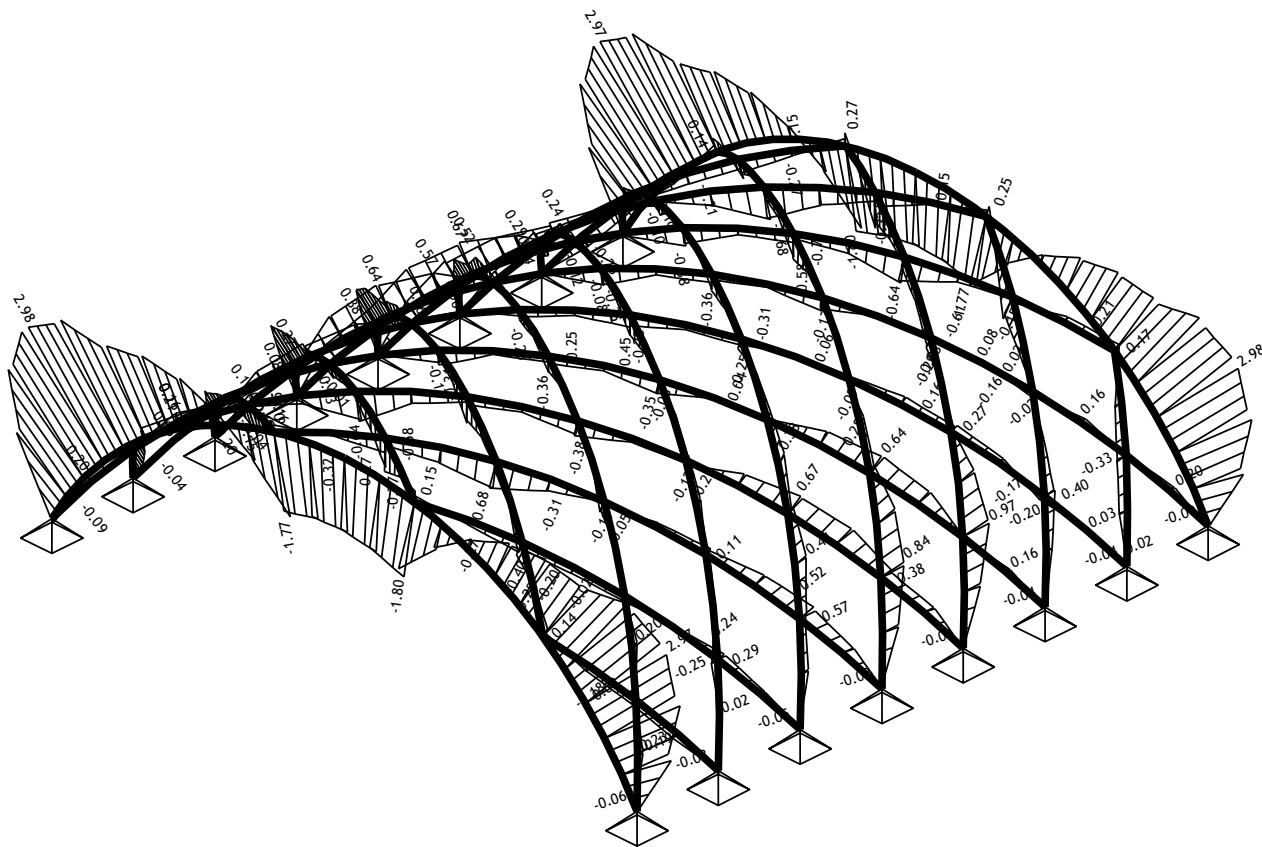
Opt. 4: I-II



Izometrija

Utjecaji u gredi: max N1= 4.58 / min N1= -14.45 kN

Opt. 4: I-II



Izometrija

Utjecaji u gredi: max M3= 2.98 / min M3= -1.80 kNm

Presečne sile u gredama - Ekstremne vrednosti - Opterećenje: 1-4

Oznaka	S.O.	x [m]	N1 [kN]	T2 [kN]	M2 [kNm]	M3 [kNm]
(151 - 90)	4	1.040	[-14.451]	-0.707	0.103	2.587
(385 - 140)	4	5.458	[-14.451]	0.707	-0.103	2.587
(423 - 386)	4	1.040	[-14.447]	-0.693	-0.090	2.600
(89 - 3)	4	5.458	[-14.447]	0.693	0.090	2.600
(151 - 90)	2	2.079	[-12.231]	0.361	0.191	2.460
(385 - 140)	2	4.938	[-12.231]	-0.361	-0.139	2.648
(423 - 386)	2	2.079	[-12.218]	0.373	-0.173	2.458
(89 - 3)	2	4.938	[-12.218]	-0.373	0.124	2.652
(150 - 211)	4	0.000	[-6.807]	-0.325	0.000	-0.064
(220 - 139)	4	3.000	[-6.807]	0.325	0.000	-0.064
(151 - 90)	4	0.520	-14.204	[-3.061]	0.059	1.606
(385 - 140)	4	5.978	-14.204	[3.061]	-0.059	1.606
(423 - 386)	4	0.520	-14.202	[-3.046]	-0.049	1.626
(89 - 3)	4	5.978	-14.202	[3.046]	0.049	1.626
(151 - 90)	2	0.520	-11.936	[-2.692]	0.055	1.428
(385 - 140)	2	6.497	-11.936	[2.692]	0.000	0.029
(423 - 386)	2	0.520	-11.927	[-2.678]	-0.046	1.445
(89 - 3)	2	6.497	-11.927	[2.678]	0.000	0.053
(423 - 386)	4	4.678	-4.660	[2.128]	-0.341	-0.687
(89 - 3)	4	1.819	-4.660	[-2.128]	0.341	-0.687
(423 - 386)	4	5.198	-4.638	2.043	[-0.376]	-1.770
(89 - 3)	4	1.299	-4.638	-2.043	[0.376]	-1.770
(151 - 90)	4	5.198	-4.920	2.035	[0.370]	-1.713
(385 - 140)	4	1.299	-4.920	-2.035	[-0.370]	-1.713
(423 - 386)	2	5.198	-3.579	1.910	[-0.334]	-1.608
(89 - 3)	2	1.299	-3.579	-1.910	[0.334]	-1.608
(151 - 90)	2	5.198	-3.833	1.901	[0.329]	-1.555
(385 - 140)	2	1.299	-3.833	-1.901	[-0.329]	-1.555
(250 - 346)	4	1.500	-2.896	0.027	[-0.183]	-0.151
(107 - 249)	4	1.500	-2.896	-0.027	[0.183]	-0.151
(423 - 386)	4	1.559	-14.382	-0.752	-0.145	[2.975]
(89 - 3)	4	4.938	-14.394	-0.454	0.137	[2.975]
(151 - 90)	4	1.559	-14.386	-0.766	0.162	[2.970]
(385 - 140)	4	4.938	-14.399	-0.441	-0.154	[2.970]
(423 - 386)	2	1.559	-12.207	-0.651	-0.132	[2.652]
(89 - 3)	2	4.938	-12.218	-0.373	0.124	[2.652]
(151 - 90)	2	1.559	-12.218	-0.663	0.146	[2.648]
(385 - 140)	2	4.938	-12.231	-0.361	-0.139	[2.648]
(151 - 90)	4	5.198	-1.947	-0.137	0.350	[-1.801]
(385 - 140)	4	1.299	-1.947	0.137	-0.350	[-1.801]

Deformacija greda L.K.S. - Ekstremne vrednosti - Opterećenje:

1-4

Oznaka	S.O.	x [m]	u2 [mm]				
(343 - 317)	4	2.000	[8.295]	(331 - 407)	4	1.000	[8.140]
(166 - 127)	4	1.000	[8.295]	(376 - 352)	4	0.750	[7.956]
(200 - 330)	4	3.000	[8.214]	(246 - 364)	4	2.000	[7.950]
(148 - 269)	4	0.000	[8.214]	(111 - 225)	4	1.000	[7.950]
(54 - 147)	4	2.250	[8.176]	(117 - 92)	4	2.500	[7.946]

Deformacija greda GLO - Ekstremne vrednosti - Opterećenje: 1-4

Oznaka	S.O.	x [m]	Zp [mm]				
(166 - 127)	4	1.000	[-8.243]	(200 - 330)	4	3.000	[-8.092]
(343 - 317)	4	2.000	[-8.243]	(246 - 364)	4	2.000	[-7.886]
(54 - 147)	4	2.500	[-8.214]	(111 - 225)	4	1.000	[-7.886]
(331 - 407)	4	0.500	[-8.214]	(117 - 92)	4	2.250	[-7.828]
(148 - 269)	4	0.000	[-8.092]	(376 - 352)	4	0.750	[-7.828]

Utjecaji u tačkastim osloncima - Ekstremne vrednosti - Opterećenje: 1-4

Oznaka	S.O.	R1 [kN]	R2 [kN]	R3 [kN]	M1 [kNm]	M2 [kNm]	M3 [kNm]
138	4	13.679	-3.517	[15.206]	*	*	*
149	4	-13.679	3.517	[15.206]	*	*	*
1	4	13.679	3.465	[15.146]	*	*	*
421	4	-13.679	-3.465	[15.146]	*	*	*
138	2	11.808	-3.166	[12.898]	*	*	*
149	2	-11.808	3.166	[12.898]	*	*	*
1	2	11.802	3.122	[12.838]	*	*	*
421	2	-11.802	-3.122	[12.838]	*	*	*
31	4	5.176	0.940	[5.652]	*	*	*
332	4	-5.176	-0.940	[5.652]	*	*	*

Deformacija čvorova: max. |Yp|

Čvor	S.O.	Xp [mm]	Yp [mm]	Zp [mm]
294	4	0.033	-4.300	-4.829
203	4	-0.033	4.300	-4.829
292	4	0.033	-4.300	-4.829
202	4	-0.033	4.300	-4.829
293	4	0.033	-4.300	-4.829

204	4	-0.033	4.300	-4.829
89	4	-0.004	-4.234	-3.265
386	4	0.004	4.234	-3.265
88	4	-0.004	-4.234	-3.265
384	4	0.004	4.234	-3.265

Deformacija čvorova: max. |Zp|

Čvor	S.O.	Xp [mm]	Yp [mm]	Zp [mm]
122	4	0.850	1.128	-8.178
354	4	-0.850	-1.128	-8.178
158	4	-0.819	1.231	-8.170
325	4	0.819	-1.231	-8.170
146	4	-0.010	2.557	-8.092

329	4	0.010	-2.557	-8.092
147	4	-0.010	2.557	-8.092
331	4	0.010	-2.557	-8.092
148	4	-0.011	2.557	-8.092
330	4	0.011	-2.557	-8.092

Deformacija čvorova: max. |Xp|

Čvor	S.O.	Xp [mm]	Yp [mm]	Zp [mm]
87	4	-6.094	-0.024	4.388
314	4	6.094	0.024	4.388
75	4	-6.050	0.234	4.480
328	4	6.050	-0.234	4.480
87	2	-5.673	-0.028	4.091
314	2	5.673	0.028	4.091
75	2	-5.633	0.225	4.180
328	2	5.633	-0.225	4.180
68	4	-5.537	0.023	3.849
322	4	5.537	-0.023	3.849

Прилог 4: Табела измерених вредности манометарског притиска у mmH₂O, извор: аутор

Manometriarski pritisak [mm H ₂ O]		K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	L1	L2	L3	P	P _{statiki}	
0° 45° 90° 135° 180° 225° 270° 315° bez nadstrešnice 20 m/s	S	23	22	21	19	18	19	19	19.5	20	23	19	19		20	18	18	19	19.5	20	20				6	-65	
	SZ	10	10	15.5	13	12	12.5	13	15	13.5	11	10	11		12	9	5.5	12	11	11.5	11						
	Z	10	11	12.5	15	15.5	16	15	12.5	14.5	15	13	10		16	15	14.5	14	14.5	16	17						
	JZ	20	20	20	21.5	24	24.5	25	24.5	23	22	22	21		23	22	21.5	23	22.5	23	22.5						
	J	11	5.5	17	14	14	17	15	17	16.5	14	11	13		17	15.5	15	15	15	16.5	17						
	Jl	23	24	25	24.5	24	24.5	24	23	23	22	22	22		24.5	24	24	24.5	24	24.5	24	24					
	I	19	24	24	22	22	22	20.5	20.5	20	12	25	20		22	19	21	16	20	22.5	21						
	Sl	25	22	19	17	15.5	10.5	15	20	24	24	22.5	21		23	24	20.5	16	21	23.5	22.5						
	0° 45° 90° 135° 180° 225° 270° 315° sa nadstrešnicom gore 20 m/s	S	24	23	20	19	19	20	20.5	18	21	23	21	20		21	20	20	20	20.5	21	21	21	20.5	19		
		SZ	12.5	10.5	18	7	15	17	16.5	15	8.5	4	14	13		15.5	14	12	16	15	15	16	5	22	15.5		
Z		16	17	13	9	18	20	16	12	11	11	15	12	11		15	13	12.5	15	15	15	9	21.5	14.5			
JZ		20	19	20	21	23	24	24	24	22	20	20	20		21	20	20	21	20	22	21	21	22	21			
J		16.5	17	19	12	11	17	15.5	18	13.5	13.5	14	14		14	14	14	14	14	15	14	15.5	20	13			
Jl		21	22	26	25	25	24	23	22	21.5	21	21	21		22	21	21	21	21	21	21.5	21.5	24.5	25.5			
I		13	17	25	24	24	22	18	19	20	17.5	14	14		15	14	14.5	12	13.5	16	15	20.5	23	25			
Sl		24	21	14	8	14	20.5	19	18	25	26	19	19		20	20	19	19	20	20	20	25	24	15			
0° 45° 90° 135° 180° 225° 270° 315° sa nadstrešnicom dole 20 m/s		S	23	23	22	19	18	19	19	20.5	21.5	22.5	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	14	21.5	21		
		SZ	12	10	11	11	12	11	15	15	14	15	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	10	16	8		
	Z	9	11.5	13.5	12.5	17	19	18	15	13.5	13	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	11.5	11	11.5	14	7			
	JZ	18	20	20	21.5	24	25	25.5	26	24	21	13	13	13	13	13	13	13	14	14	14	16	24	21			
	J	13	8	19	13	15	19	16	15.5	15	15	11	11	11	11	10	11.5	11.5	12	11.5	12	11.5	12	14.5	12.5		
	Jl	21.5	23	24	23.5	23	23.5	23	22	22	21.5	16	16		11	16	16	16	16	16	16	18.5	24	22.5			
	I	16	26	27	24	23	21	20.5	20	17.5	11	11	11	11	11	10	11	11	11	11	11	12	25	23.5			
	Sl	28	23	18	14	11	8	11	18	25	28	10	10	10	9	10	10	10	10	10	11	10	12	19	15		

Прилог 5: Табела измерених вредности манометарског притиска у МРа, извор: аутор

Manometarski pritisak [Pa]		K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	L1	L2	L3		
bez nadstrešnice 20 m/s	0° S	797.99	788.18	778.37	758.76	748.95	758.76	758.76	763.66	768.57	797.99	758.76	758.76		768.57	748.95	748.95	758.76	763.66	768.57	768.57					
	45° SZ	33.07	33.07	87.00	62.49	52.68	57.58	62.49	82.10	67.39	42.87	33.07	42.87		52.68	23.26	-11.06	52.68	42.87	47.78	42.87					
	90° Z	33.07	42.87	57.58	82.10	87.00	91.91	82.10	57.58	77.20	82.10	62.49	33.07		91.91	82.10	77.20	72.29	77.20	91.91	101.71					
	135° JZ	131.13	131.13	131.13	145.84	170.36	175.26	180.17	175.26	160.55	150.75	150.75	140.94		160.55	150.75	145.84	160.55	155.65	160.55	155.65					
	180° J	42.87	-11.06	101.71	72.29	72.29	101.71	82.10	101.71	96.81	72.29	42.87	62.49		101.71	87.00	82.10	82.10	82.10	96.81	101.71					
	225° JI	160.55	170.36	180.17	175.26	170.36	175.26	170.36	160.55	160.55	150.75	150.75	150.75		175.26	170.36	170.36	175.26	170.36	175.26	170.36					
	270° I	121.33	170.36	170.36	150.75	150.75	150.75	136.04	136.04	131.13	52.68	180.17	131.13		150.75	121.33	140.94	91.91	131.13	155.65	140.94					
	315° SI	180.17	150.75	121.33	101.71	87.00	37.97	82.10	131.13	170.36	170.36	155.65	140.94		160.55	170.36	136.04	91.91	140.94	165.46	155.65					
	0° S	170.36	160.55	131.13	121.33	121.33	131.13	136.04	111.52	140.94	160.55	140.94	131.13		140.94	131.13	131.13	131.13	136.04	140.94	140.94	140.94	140.94	136.04	136.04	121.33
	45° SZ	57.58	37.97	111.52	3.65	82.10	101.71	96.81	82.10	18.36	-25.77	72.29	62.49		87.00	72.29	52.68	91.91	82.10	82.10	91.91	-15.97	150.75	87.00		
90° Z	91.91	101.71	62.49	23.26	111.52	131.13	91.91	52.68	42.87	42.87	42.87	82.10		82.10	62.49	57.58	82.10	82.10	82.10	82.10	82.10	23.26	145.84	77.20		
135° JZ	131.13	121.33	131.13	140.94	160.55	170.36	170.36	170.36	150.75	131.13	131.13	131.13		140.94	131.13	131.13	140.94	131.13	150.75	140.94	140.94	140.94	150.75	140.94		
180° J	96.81	101.71	121.33	52.68	42.87	101.71	87.00	111.52	67.39	67.39	72.29	72.29		72.29	72.29	72.29	72.29	82.10	82.10	72.29	87.00	131.13	62.49			
225° JI	140.94	150.75	189.97	180.17	180.17	180.17	170.36	160.55	150.75	145.84	140.94	140.94		150.75	140.94	140.94	140.94	140.94	145.84	145.84	82.10	136.04	160.55	180.17		
270° I	62.49	101.71	180.17	170.36	170.36	170.36	150.75	111.52	121.33	131.13	106.62	72.29		82.10	72.29	77.20	52.68	67.39	91.91	82.10	136.04	160.55	180.17			
315° SI	170.36	140.94	72.29	13.45	72.29	136.04	121.33	111.52	180.17	189.97	189.97	121.33		131.13	131.13	121.33	121.33	131.13	131.13	131.13	180.17	170.36	82.10			
0° S	160.55	160.55	150.75	121.33	111.52	121.33	121.33	121.33	136.04	145.84	155.65	52.68		52.68	52.68	52.68	52.68	52.68	52.68	52.68	52.68	72.29	145.84	140.94		
45° SZ	52.68	33.07	42.87	42.87	52.68	42.87	42.87	82.10	82.10	72.29	82.10	13.45		13.45	13.45	13.45	13.45	13.45	13.45	13.45	23.26	33.07	91.91	13.45		
90° Z	23.26	47.78	67.39	57.58	101.71	121.33	121.33	111.52	82.10	67.39	62.49	37.97		37.97	37.97	37.97	37.97	37.97	37.97	47.78	42.87	47.78	72.29	3.65		
135° JZ	111.52	131.13	131.13	145.84	170.36	180.17	185.07	189.97	170.36	140.94	140.94	62.49		62.49	62.49	62.49	62.49	72.29	72.29	72.29	62.49	91.91	170.36	140.94		
180° J	62.49	13.45	121.33	62.49	82.10	121.33	91.91	87.00	82.10	82.10	82.10	42.87		42.87	42.87	42.87	42.87	52.68	47.78	52.68	47.78	52.68	77.20	57.58		
225° JI	145.84	160.55	170.36	165.46	160.55	165.46	160.55	165.46	150.75	150.75	145.84	91.91		91.91	91.91	91.91	91.91	91.91	91.91	91.91	91.91	116.42	170.36	155.65		
270° I	91.91	189.97	199.78	170.36	160.55	140.94	136.04	131.13	106.62	42.87	42.87	42.87		42.87	42.87	42.87	42.87	42.87	42.87	42.87	42.87	52.68	180.17	165.46		
315° SI	209.59	160.55	111.52	72.29	42.87	13.45	42.87	111.52	180.17	209.59	209.59	33.07		23.26	33.07	33.07	33.07	42.87	33.07	42.87	33.07	52.68	121.33	82.10		

**Прилог 6: Табела вредности коефицијената
притисака ветра, извор: аутор**

Koefficient pritisaka $C_p = (p - p_0) / (1/2 \cdot \rho \cdot v_0^2)$		K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	L1	L2	L3
bez nadstrešnice 20 m/s	0° S	-3.19	-3.15	-3.11	-3.04	-3.00	-3.04	-3.04	-3.05	-3.07	-3.19	-3.04	-3.04		-3.07	-3.00	-3.00	-3.04	-3.05	-3.07	-3.07			
	45° SZ	-0.13	-0.13	-0.35	-0.25	-0.21	-0.23	-0.25	-0.33	-0.27	-0.17	-0.13	-0.17		-0.21	-0.09	0.04	-0.21	-0.17	-0.19	-0.17			
	90° Z	-0.13	-0.17	-0.23	-0.33	-0.35	-0.37	-0.33	-0.23	-0.31	-0.33	-0.25	-0.13		-0.37	-0.33	-0.31	-0.29	-0.31	-0.37	-0.41			
	135° JZ	-0.52	-0.52	-0.52	-0.58	-0.68	-0.70	-0.72	-0.70	-0.64	-0.60	-0.60	-0.60	-0.56		-0.64	-0.60	-0.58	-0.64	-0.62	-0.64	-0.62		
	180° J	-0.17	0.04	-0.41	-0.29	-0.29	-0.41	-0.33	-0.41	-0.39	-0.29	-0.17	-0.25		-0.41	-0.35	-0.33	-0.33	-0.33	-0.39	-0.41			
	225° JI	-0.64	-0.68	-0.72	-0.70	-0.68	-0.70	-0.68	-0.64	-0.64	-0.60	-0.60	-0.60	-0.60		-0.70	-0.68	-0.68	-0.70	-0.68	-0.70	-0.68		
	270° I	-0.49	-0.68	-0.68	-0.60	-0.60	-0.60	-0.54	-0.54	-0.52	-0.21	-0.72	-0.52		-0.60	-0.49	-0.56	-0.37	-0.52	-0.62	-0.56			
	315° SI	-0.72	-0.60	-0.49	-0.41	-0.35	-0.15	-0.33	-0.52	-0.68	-0.68	-0.62	-0.56	-0.56		-0.64	-0.68	-0.54	-0.37	-0.56	-0.66	-0.62		
	0° S	-0.68	-0.64	-0.52	-0.49	-0.49	-0.52	-0.54	-0.54	-0.45	-0.56	-0.64	-0.56	-0.52		-0.56	-0.52	-0.52	-0.52	-0.54	-0.56	-0.56	-0.54	-0.49
	45° SZ	-0.23	-0.15	-0.45	-0.01	-0.33	-0.41	-0.39	-0.33	-0.07	0.10	-0.29	-0.25		-0.35	-0.29	-0.21	-0.37	-0.33	-0.33	-0.37	-0.37	0.06	-0.60
90° Z	-0.37	-0.41	-0.25	-0.09	-0.45	-0.52	-0.37	-0.21	-0.17	-0.17	-0.33	-0.21		-0.33	-0.25	-0.23	-0.33	-0.33	-0.33	-0.33	-0.33	-0.09	-0.58	-0.31
135° JZ	-0.52	-0.49	-0.52	-0.56	-0.64	-0.68	-0.68	-0.68	-0.60	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52		-0.56	-0.52	-0.52	-0.56	-0.52	-0.60	-0.56	-0.56	-0.60	-0.56
180° J	-0.39	-0.41	-0.49	-0.21	-0.17	-0.41	-0.35	-0.45	-0.27	-0.27	-0.27	-0.29	-0.29		-0.29	-0.29	-0.29	-0.29	-0.33	-0.29	-0.29	-0.35	-0.52	-0.25
225° JI	-0.56	-0.60	-0.76	-0.72	-0.72	-0.68	-0.64	-0.60	-0.58	-0.56	-0.56	-0.56	-0.56		-0.60	-0.56	-0.56	-0.56	-0.56	-0.58	-0.58	-0.58	-0.70	-0.74
270° I	-0.25	-0.41	-0.72	-0.68	-0.68	-0.60	-0.45	-0.49	-0.52	-0.43	-0.29	-0.29	-0.29		-0.33	-0.29	-0.31	-0.21	-0.27	-0.37	-0.33	-0.54	-0.64	-0.72
315° SI	-0.68	-0.56	-0.29	-0.05	-0.29	-0.54	-0.49	-0.45	-0.72	-0.76	-0.49	-0.49	-0.49		-0.52	-0.52	-0.49	-0.49	-0.52	-0.52	-0.52	-0.72	-0.68	-0.33
0° S	-0.64	-0.64	-0.60	-0.49	-0.45	-0.49	-0.49	-0.49	-0.54	-0.58	-0.62	-0.21	-0.21		-0.21	-0.21	-0.21	-0.21	-0.21	-0.21	-0.21	-0.29	-0.58	-0.56
45° SZ	-0.21	-0.13	-0.17	-0.17	-0.21	-0.17	-0.33	-0.33	-0.33	-0.29	-0.33	-0.05	-0.05		-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.09	-0.13	-0.37	-0.05
90° Z	-0.09	-0.19	-0.27	-0.23	-0.41	-0.49	-0.45	-0.33	-0.27	-0.25	-0.25	-0.15	-0.15		-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.19	-0.17	-0.19	-0.29	-0.01
135° JZ	-0.45	-0.52	-0.52	-0.58	-0.68	-0.72	-0.74	-0.76	-0.68	-0.56	-0.56	-0.25	-0.25		-0.25	-0.25	-0.25	-0.29	-0.29	-0.29	-0.25	-0.37	-0.68	-0.56
180° J	-0.25	-0.05	-0.49	-0.25	-0.33	-0.49	-0.37	-0.35	-0.33	-0.33	-0.17	-0.17	-0.17		-0.13	-0.19	-0.19	-0.21	-0.19	-0.21	-0.19	-0.21	-0.31	-0.23
225° JI	-0.68	-0.64	-0.68	-0.66	-0.64	-0.66	-0.64	-0.60	-0.60	-0.58	-0.58	-0.37	-0.37		-0.17	-0.37	-0.37	-0.37	-0.37	-0.37	-0.37	-0.47	-0.68	-0.62
270° I	-0.37	-0.76	-0.80	-0.68	-0.64	-0.64	-0.56	-0.54	-0.52	-0.43	-0.17	-0.17	-0.17		-0.13	-0.17	-0.17	-0.17	-0.17	-0.21	-0.17	-0.21	-0.72	-0.66
315° SI	-0.84	-0.64	-0.45	-0.29	-0.17	-0.05	-0.17	-0.45	-0.72	-0.84	-0.13	-0.13	-0.13		-0.09	-0.13	-0.13	-0.17	-0.13	-0.17	-0.13	-0.21	-0.49	-0.33

Прилог 7: Научни рад објављен у часопису Buildings (M22)

Article

The Geometry of Timber Lamella Vaults: Prototype Analysis

Milica Petrović ^{1,*}, Isidora Ilić ¹, Svetislav Mijatović ² and Nenad Šekularac ^{1,*} ¹ Faculty of Architecture, University of Belgrade, 11000 Belgrade, Serbia² Faculty of Physics, University of Belgrade, 11000 Belgrade, Serbia

* Correspondence: milica.petrovic@arh.bg.ac.rs (M.P.); nenad.sekularac@arh.bg.ac.rs (N.Š.)

Abstract: This paper presents timber lamella structures applied to the circular cylinder surface when all lamellae axes intersect at the nodes. To achieve the uniformity of all elements in this structure, the geometry of the structure must be carefully designed. The main methods for the research are graphical and numerical methods for geometric design and a prototype construction for a specific geometric pattern. The methods are discussed for their ease of replication, as well as the possibility of reinterpretation on other surfaces, while the prototype design and construction give insight into the process from design to execution. The combination of these methods allows for a thorough analysis of the geometry for lamella structures. The analysis shows that geometrical design must begin from the whole to the lamella, and that the number of element types in the structure depends on the disposition of the elements and the angle of the pattern. The discussion shows the advantages and limitations of the proposed methods, while the conclusions give the guidelines for the implementation of lamella structures into new design projects.

Keywords: right circular cylinder; parametric equations; graphical method; timber structures



Citation: Petrović, M.; Ilić, I.; Mijatović, S.; Šekularac, N. The Geometry of Timber Lamella Vaults: Prototype Analysis. *Buildings* **2022**, *12*, 1653. <https://doi.org/10.3390/buildings12101653>

Academic Editor: Reinhard Brandner

Received: 3 September 2022

Accepted: 8 October 2022

Published: 11 October 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Lamella structures are spatial structures in a diamond pattern formed by ribs called lamellae [1]. They are usually classified as braced structures—vaults and domes [1,2]. This paper will present timber lamella vaults when the diamond pattern of lamellae is applied to a circular cylinder surface. Contemporary tendencies in architecture, following the sustainable development trend, have led architects to think about the return to natural materials and the reduction of pollution created by the construction industry. The advantages of historical timber structures are being examined for possible modification and application in contemporary architectural practice. Lamella structures have stood out because of their aesthetics, economy and ease of construction.

1.1. Literature Review

The design of the Zollinger roof structure made an impact on the construction industry after World War I. The *roof of modernism* [3] was designed by the architect Friedrich Zollinger and patented in 1921 [4]. When invited to the City Council meeting for the rebuilding of Merseburg, Germany at the end of 1918, the architect Zollinger had an idea of how to design a simple construction model for new houses. The loadbearing elements of the house would be made out of cast-in-place concrete, and the innovative roof structure would be constructed out of timber lamellae, easily prefabricated and assembled even by untrained workers. The diamond pattern of the structure, reinforced with decking, required no additional structural elements, making it cost-efficient compared to traditional roofs. The analysis of material consumption showed that traditional roofs require twice as much material per square meter of the floor plan as the Zollinger roof. The section of this timber lamella structure shows that the roof shape is a segmental arch consisting of two circular segments. This form provides additional volume, so two floors could have been placed under the roof as shown in Figure 1 [5].

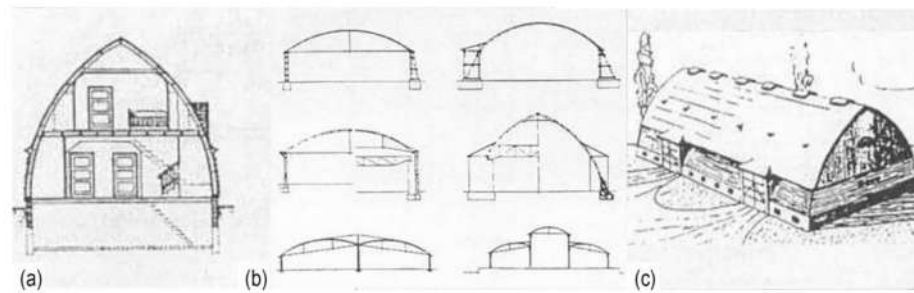


Figure 1. Lamella roofs for (a) housing, (b) halls and (c) barns [5].

The roof is constructed out of timber lamellae with variable cross-section and the upper edge was shaped to follow the arch of the roof. Lamellae were all uniform in shape and size. Two types of lamellae were applied, based on the roof span. The dimensions of the first type were width/height/length = $b/h/L = 2.5/15/190$ cm and the second were $b/h/L = 5/30/150$ cm (Figure 2) [6]. When the need for production halls with large spans increased, so did the cross-section of the lamellae, which showed great deflections right after the construction [7]. Other architects started experimenting with the change of disposition and the doubling of the lamellae [7,8], but soon new types of lamella structures were designed, using steel elements and purlins as reinforcement [7,9].

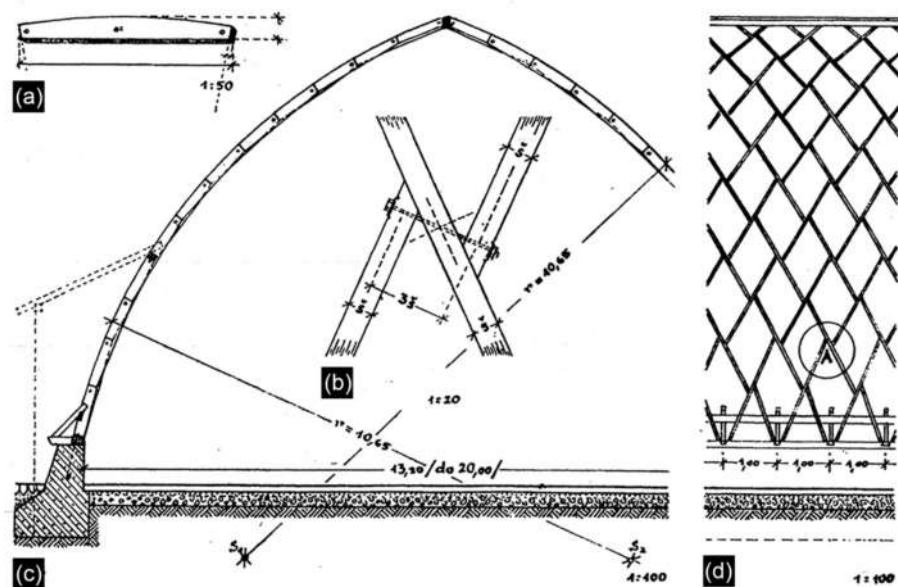


Figure 2. Zollinger lamella roof design: (a) lamella detail with dimensions, (b) joints of lamellae, (c) transverse section and (d) longitudinal section of the roof for housing [6].

The geometry of the first lamella roofs was half of a circular cylinder surface or its segment, in the span to rise ratio between 1:2 (semicircle) to 1:8 (flat arch) [10]. Later, the diamond pattern was applied to the spherical surface for dome structures and to this day, examples on free-form geometries can be found. Lamella structures were built all over the world, from timber to concrete, all following the geometry of a cylinder [7,9–11]. Other types of geometries were too complex to calculate without a computer. If the geometry is symmetrical on both axes, the number of equations is smaller, and the calculation is simpler [10]. With the use of computer software, new lamella structures on free-form geometries were erected.

The aesthetics and expressiveness of the diamond pattern have made lamella structures the primary choice for large-span objects where the structure remains visible. The advantage of lamella structures is the uniformity of the elements—the lamellae and their joints, which

lead to the ease of production and assembly, the speed of erection and the minimised cost of the overall structure regarding the volume it covers. In order to preserve its advantages, it is necessary to find a suitable geometrical pattern for the lamellae axes to be applied to a circular cylinder surface. Throughout the years, several solutions were designed in timber and steel. The original structure, the Zollinger roof, was made out of timber planks placed vertically to the floor. Each lamella is twice the size of the diamond, and they are connected interchangeably, one in the middle of the other [1]. Three lamellae intersect at the node, with one central and two connecting lamellae shown in Figure 2. They are spaced apart for three widths of the lamella to mount the bolts [12]. This spacing also allows for the lamellae to be placed vertically and to follow the curve of the vault. The length of lamellae in steel lamella structures by engineers Emil M. Hünnebeck and Hugo Junkers is the size of the diamond, which allows them to put the connecting lamellae closer and to still follow the vaulted surface [13]. In these structures, the lamellae are rotated or translated in the horizontal plane to have all uniform elements and to follow the envelope of the cylinder, as presented in Figure 3. This creates an eccentricity at the node, resulting in the moment around the vertical lamella axis for the dominant axial forces in the structure.

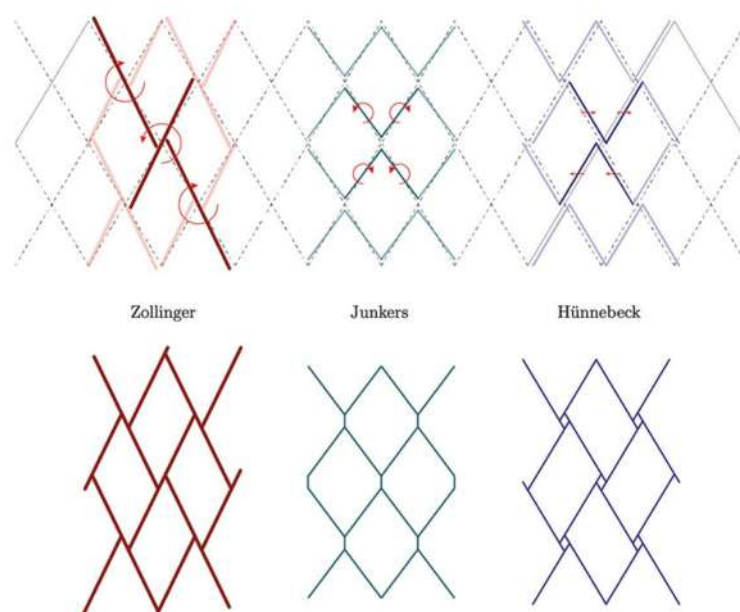


Figure 3. Diagrams showing three types of lamella vaults and the rotation/translation of the lamellae (**up**) with different types of nodes (**down**) [13].

Recent developments in lamella structures have shown the possibility to apply the diamond pattern on a number of forms using contemporary tools. Authors research regularities in different geometries trying to find the best structural pattern and the construction strategy for timber structures [14–16]. In recent years, a development in lamella structures was presented through workshops, experiments and built objects such as TIJ Bird Observatory [17–19].

1.2. The Aim of the Study

This paper discusses the geometry of timber lamella vaults. The design and position of the lamellae on the cylindrical surface have to be precisely defined in order to maintain the diamond pattern and the uniformity of the elements. The focus of this research is the lamella structure where all lamellae axes intersect at the node to avoid eccentricity (Figure 4). This will create a problem of rotation of lamellae in relation to the cylindrical surface, which is analysed and presented in this paper. The aim of this study is to better understand the geometry of lamella structures to be easily modified and adapted for use

in contemporary structures. The idea is to comprehend the regularities of the geometrical design for cylindrical surfaces for the purpose of interpretation on other surfaces.



Figure 4. Diagram showing the node with one central lamella and two connecting lamellae when lamellae axes intersect.

The methods applied in this paper are the graphical method, the numerical method and prototype design. The graphical method presented in this paper is a novel approach, not found in the literature. The authors used different software to find the best possible solution for the geometric design of the lamellae axes. To expand the analysis, and to precisely define the geometry of the axes, a numerical method was applied. The authors presented a new method for defining the geometry of the axes and compared it to the method presented by Tutsch [13]. The prototype design was derived from result comparison of the graphical and numerical method. This prototype shows the level of uniformity of the elements and the time needed for prefabrication and construction. The erection of the prototype followed the instructions presented by Hosseinzadeh [10] since no other authors describe the method of erection.

The discussion includes all three approaches for the geometrical analysis and presentation of timber lamella vaults: (1) the graphical method, (2) the numerical method and (3) the physical model. The conclusions of this research affirm the aim of the study and open new questions for further research.

2. The Geometrical Design Methods

To obtain the precise geometry of the lamellae, the research was carried out using graphical and numerical methods. The main criterion is that the uniformity of the elements needs to be preserved since this is one of the main advantages of lamella structures.

The chosen geometry for the lamella vault is a cylinder surface. The cylinder type is a right circular cylinder, consisting of two of the same parallel bases the shape of a circle. The envelope of a cylinder is a perpendicular surface with all the same and parallel lines equal to the height of the cylinder, which is the vertical distance between the two bases.

The original lamella structure, the Zollinger roof, was designed as two circular cylinder surface segments of the same radius that meet along the ridge. Cylinder surface segments were also used for other types of buildings, such as halls and barns [5,7,9,11].

2.1. The Graphical Method

2.1.1. Connecting of the Arched Lamellae

The first iteration for the geometrical design of the lamella structure using the graphical method was based on the analysis of the lamella joint. The observed joint is a modification of the original joint for a Zollinger roof. In this joint, the axes of the lamellae intersect at the node, reducing the eccentricity. The three lamellae at the node are connected using steel plates bolted to the lamellae [20]. The research conducted by engineers Scheer and Purnomo at TU Berlin has shown a layout of the lamella structure, with a span of 21.5 m, a length of 21 m, an arch rise of 6.2 m and arch segments for the angle 120° [21]. The presented layout was used to design one lamella as a starting point for the geometry of the structure. Lamellae were connected one to another, forming an arch in one direction. The other direction of the lamellae was obtained by the rotation of the arch for 120° . The idea was for all lamellae to be vertical to the floor plane, that is, for the arches to move translationally and to form the vaulted structure.

This design process turned out to be wrong because the lamellae cannot be placed vertically and intersect at the node at the same time. When all the arches made from lamellae are in place, it can be observed that the node of the lamellae is not where it should be placed—each lamella should be connected to the middle of the lamella from the other direction. Figure 5 shows the details A, B and C with respect to the structure. Detail A shows the only position where it is possible to place a lamella vertically to the floor plane and that is the ridge of the vault. Detail B shows the slight distance of the lamella from the middle of the other one, at 1/4 of the arch, while detail C shows the greatest deviation of one lamella to the middle of the other, observed at the point of support of the structure.

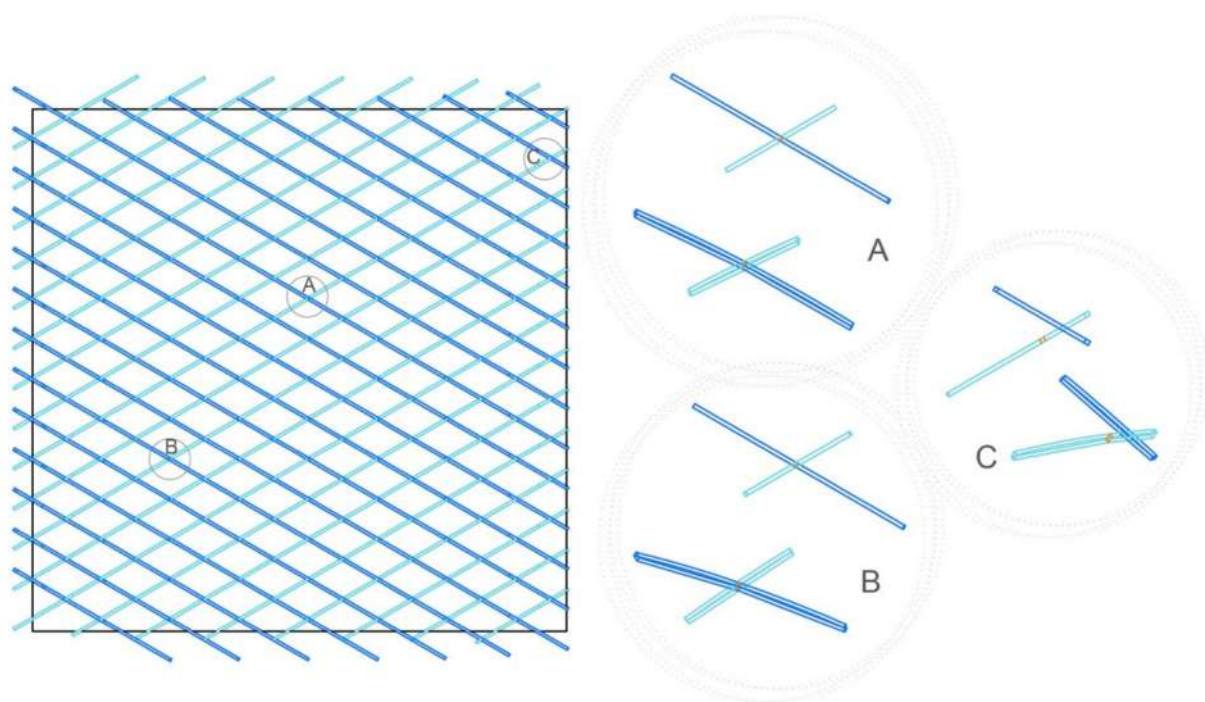


Figure 5. The plan and details of the lamella vault for the graphical method of connecting the lamellae in an arch with details A, B and C showing the misplacement of the connecting lamellae in the node.

The conclusion is that lamella structures cannot be designed starting from an individual element to the whole assembly because the ends of connecting lamellae do not meet at the middle of the central lamella. It is necessary to start with the whole to obtain a more accurate geometry of the lamellae. Vertical sections through the circular cylinder give an ellipse in the section, which cannot give uniform lamellae.

2.1.2. Projection of the Pattern to the Cylinder Surface

The second iteration was led by the idea that the fastest and simplest way of obtaining the diamond pattern structure on a cylinder surface is to project the pattern to the cylinder surface in software for 3D design, such as Rhino [22]. The half-radius of the base circle for the cylinder was $r = 12.4$ m and the length of the cylinder was $l = 21$ m. The arch segment had a span of $a = 21.5$ m and a rise of $f = 6.2$ m, giving the length of the arch $a_1 = 26$ m. The network was made with angles of 60° and 120° , the length of the cylinder surface $l = 21$ m and the width equal to the length of the arch segment of the cylinder $a_1 = 26$ m. The proportions of the cylinder were obtained from the layout by Scheer and Purnomo [21]. When the network is projected onto the cylinder the disposition of lamellae is obtained. This process is shown in Figure 6, which shows the detail of the structure with different lengths of lamellae from support to the ridge.

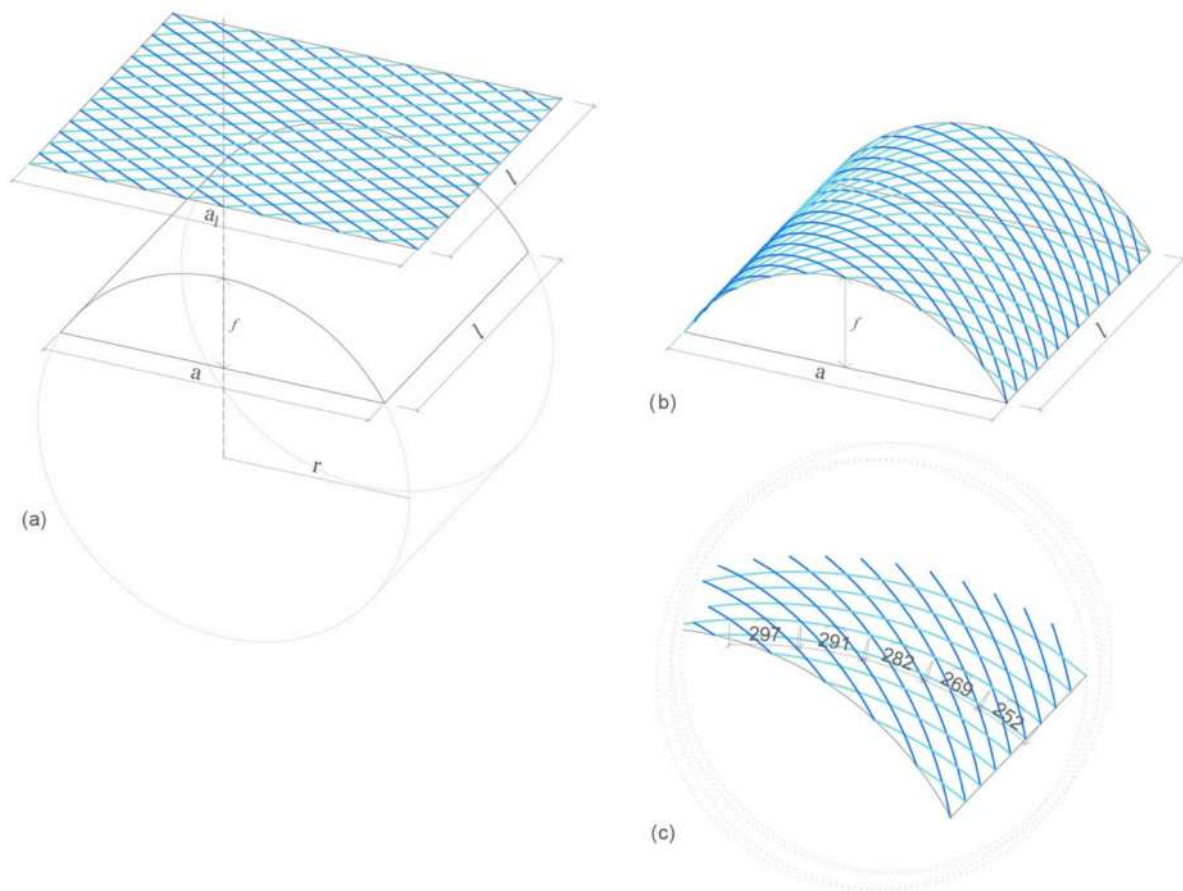


Figure 6. The axonometric view and detail of the lamella vault for the graphical method of projection of the diamond pattern to the cylinder surface: (a) the projection plane and the cylinder surface for projection, (b) the axis of the lamellae lying on the cylinder surface, (c) detail of the lamellae axes showing their different lengths.

This process of geometrical design has many advantages. It is easily understandable, so it is easy to replicate and apply to any surface. It is not time-consuming, nor it is necessary to always apply the same diamond pattern with angles of 60° and 120° , allowing more design freedom. The lamellae are vertical to the floor plane and intersect at the node, creating a continuous surface for placement of any roof tiling. The only problem is the different lengths of the lamellae, which is why this design does not fulfil the main criteria of the uniform elements. On the other hand, each horizontal segment of the vault has the same lamellae with the same joints, thus making sets of uniform elements. From the ridge to the supports, the length of the lamellae decreases and the angle of the bevelling increases. This structure could be easily prefabricated using a CNC machine for the shaping of the lamellae, in order to decrease the time for their production. If steel plates are used for the joints, a large number of different sets would not be economical to make. However, there are lamella structures constructed like this, such as the ice rink structure in Toronto from 2019 with T-section joints [23].

2.1.3. Division of Cylinder Surface to Equal Parts

The third iteration for the geometric design was also led starting from the whole to the elements with the aim for the lamellae of the same geometric characteristics to have uniform elements and to fulfil the main criteria. Based on the layout presented by Scheer and Purnomo [21], a segment of the cylinder surface was divided into equal parts, radially into 20 segments and longitudinally at every 0.75 m to obtain all the nodes of the lamellae. Lamellae rest on supports every 1.5 m and the nodes are placed interchangeably as each

lamella connects to the middle of the one from the other direction (Figure 7a). The nodes were connected with lines passing two lengths of the diamond to obtain the desired length of the lamellae. Two types of lamellae were obtained, the ones 3 m in length and the ones on the perimeter with a length of 1.5 m. These lamellae axes do not intersect at the nodes, so the connection was simulated by a short line, which presented the joint (Figure 7b). Straight axis lamellae create a structure similar to a folded plate, which was not the idea behind the design. The lamellae needed to have the arched axis that lies on the cylinder surface in order to have all the same lamellae and a uniform surface of the structure.

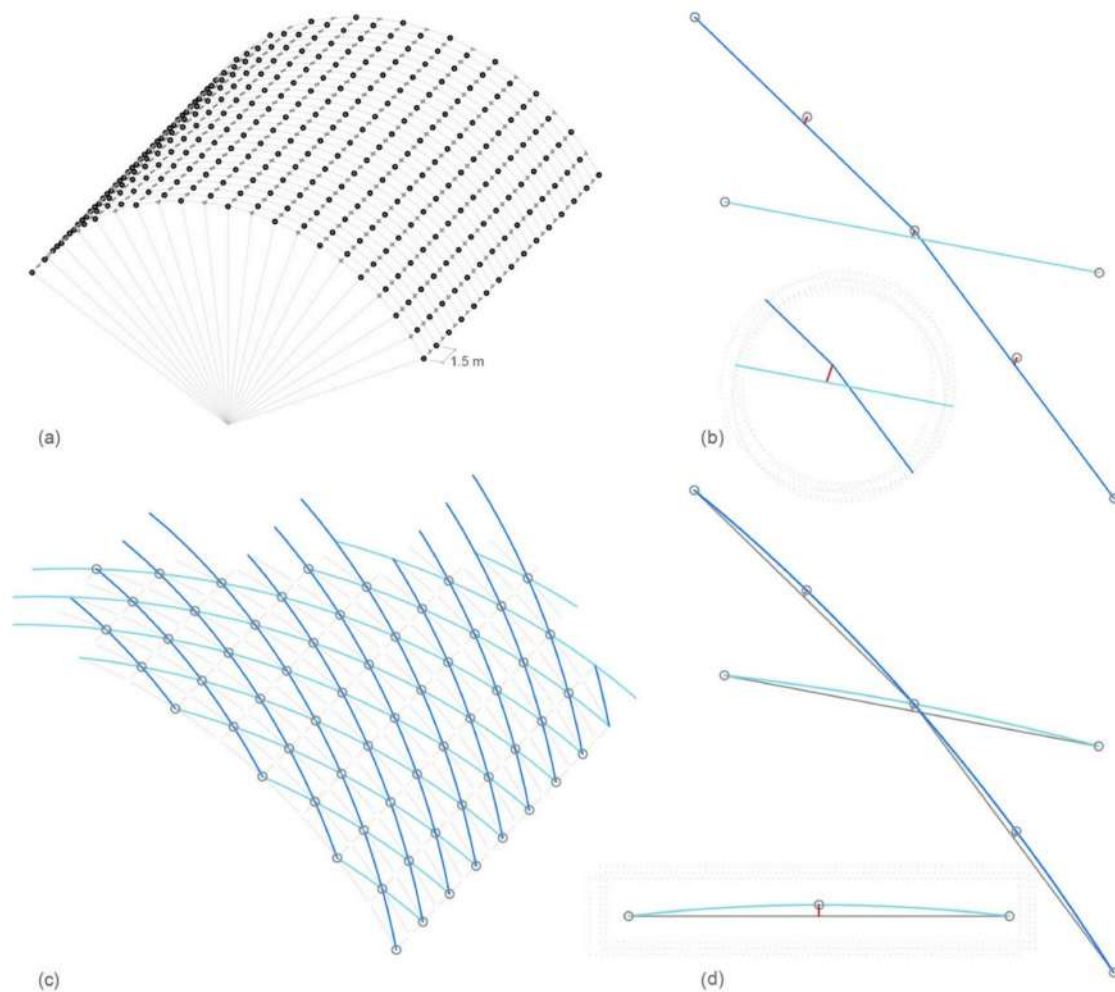


Figure 7. The process of division of cylinder surface to equal parts: (a) axonometric view of the lamellae vault with nodes of the lamellae spaced 1.5 m apart, (b) detail of each lamellae span and the connections at the nodes, (c) segment of a lamellae vault with all arched axes of the lamellae intersecting in the node and (d) detail of the arched lamellae defined by the span and rise lines.

The arched axis of the lamellae was designed using the two lines, which defined the plane for each lamella in the structure. The ends of the line connecting the nodes and the top of the line presenting the connection define the arch span and rise (Figure 7d). The most precise geometry is derived this way and the geometrical model fulfils the main criteria. All lamellae have the same geometry and uniform joints, making the production of the elements easy for mass prefabrication.

2.2. The Numerical Method

The geometrical shape that connects all the nodes and divides the cylindrical surface into uniform segments is a helix.

Starting with the parametric equation of a circle [13]

$$x_k = \begin{pmatrix} y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R \cos \varphi \\ R \sin \varphi \end{pmatrix} \quad (1)$$

from which the parametric equation for a circular cylinder is obtained

$$x_{kz} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ R \cos \varphi \\ R \sin \varphi \end{pmatrix} \quad (2)$$

the parametric equation of the helix can be derived

$$x_s = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} (\varphi - \varphi_0) \tan \beta_s \\ \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{pmatrix} \quad (3)$$

with pitch

$$h_s = 2\pi R \tan \beta_s. \quad (4)$$

The angle formed by the lamellae is constant and can be derived from the parameters, i.e., the length of the roof— L , the length of the arch— B , the number of cylinder divisions in the X-direction— m and the number of cylinder divisions in the Y-direction— n , as shown in Figure 8a, with its equation given as follows:

$$\tan \beta_s = \frac{n \cdot L}{m \cdot B} \quad (5)$$

$$\beta_s = \arctan \frac{n \cdot L}{m \cdot B} \quad (6)$$

The radius of curvature of the helix is

$$R_s = \frac{R}{\cos^2 \beta_s} \quad (7)$$

and its arch length is

$$B_s = \frac{B}{\cos \beta_s} \quad (8)$$

deriving the abstract angle of the opening of the helix

$$\alpha_s = \frac{B_s}{R_s} = \frac{B \cdot \cos \beta_s}{R} = \alpha \cdot \cos \beta_s \quad (9)$$

Based on the elements of the lamella roof structures, as presented in Figure 8b, the authors of this paper derive the following parametric equations for the two helices that form the basic geometry of the lamella roof:

$$x_{s1} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{h}{a} \cdot \varphi \\ R \cos \left(\varphi + \frac{k_1}{2} \cdot \alpha \right) \\ R \sin \left(\varphi + \frac{k_1}{2} \cdot \alpha \right) \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$x_{s2} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{h}{a} \cdot \varphi \\ R \cos \left(\varphi + \frac{k_2}{2} \cdot \alpha \right) \\ -R \sin \left(\varphi + \frac{k_2}{2} \cdot \alpha \right) \end{pmatrix} \quad (11)$$

- h is the length of the helix for one lamella,

$$h = \frac{L}{m} \quad (12)$$

- α is the angle of the helix needed for one lamella,

$$\alpha = \frac{B}{n} \quad (13)$$

- φ is a variable that defines the segment of the helix (the length of the lamella axis is the angle of 24°);

- k_1 is a coefficient that is an even number;

- k_2 is a coefficient that is an odd number.

Coefficients k_1 and k_2 define the movement of the helixes relative to one another for half of the length of a lamella to get the right geometry for each lamella to connect to the middle of the one from the other direction.

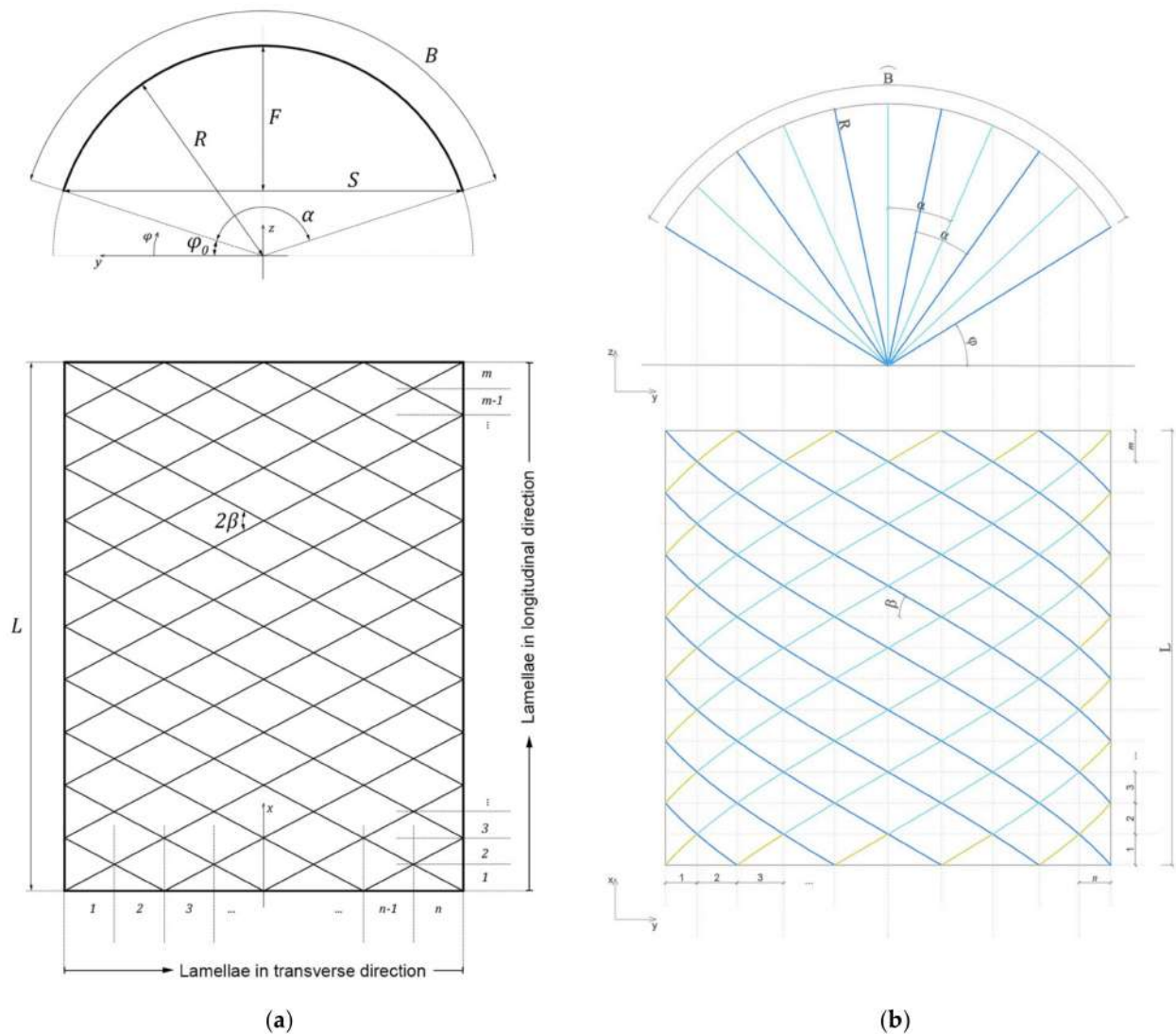


Figure 8. Floor plan and section of the lamella vault for geometrical analysis (a) by Tutsch [13]; (b) by the authors.

In comparison to the parametric equation of the helix by Tutsch [13], the parametric equations provided by the authors define each lamella axis, taking into account the mutual

relation of lamellae. The helix equation by Tutsch defines the helix that follows the segment of the cylinder envelope, not taking into account that the helix from the other direction has to be translated for half of the length of the lamella. The authors define the length of a lamella as a segment of the helix with the variable φ , while the coefficients k_1 and k_2 enable the connection of the lamellae in the middle of the central lamellae. The graphic output of the equations by the authors was developed in Wolfram Mathematica and is presented in Figure 9.

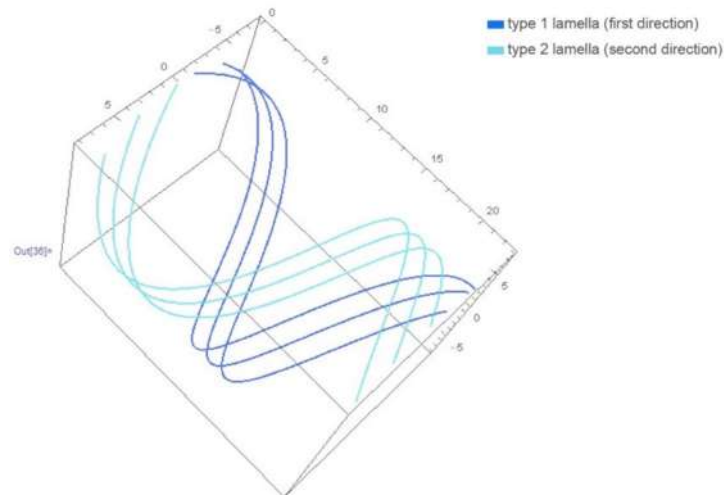


Figure 9. The graphic presentation of the parametric equations for the helices developed in Wolfram Mathematica. The blue graph shows the helix from one direction and the green one shows the helix from the other, translated for half of the lamella length.

When applying the numerical method for the geometrical design, the conclusion is that even the infinitely small segment of a helix is a spatial curve. This results in lamellae torqued around their longitudinal axes, which complicates the manufacture, see Figure 10a. For lamellae to be manufactured, an idealisation is needed. Each segment of a helix needs to be converted to an arch, as it was shown in the graphical method, in order to define a planar curve for the lamellae manufacture. This leads to a slight rotation of the connecting lamellae in the node, as presented in Figure 10b.

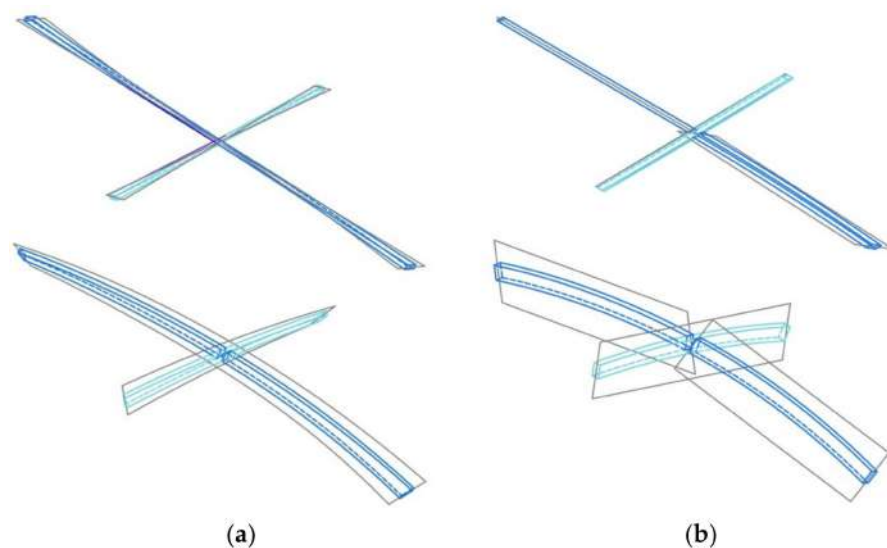


Figure 10. The axonometric view of the intersection of the lamellae at the node (a) showing the lamellae axes following the helix curve obtained by the numerical method, and (b) showing vertical axial planes of the lamellae in order to present the rotation at the node obtained by the graphical method.

3. The Physical Model of a Lamella Vault

In architecture, physical models help to solve problems during the design process, working in parallel with drawings, 3D models and construction with materials corresponding to the designed structure [24]. During this process, different aspects of the design can be modified or changed due to the design process on various scales and with a variety of tools. Design problems can be resolved from the level of the node to the structure as a whole. This practice was common in historical constructions when knowledge was acquired by model design and construction and their analysis. This process of constant iterations and relations between designing on a computer and designing a physical model is called complex modelling in contemporary architecture [25]. The hypothesis is that it helps with better observation and learning about the design.

Following the conclusions of the geometry analysis, the prototype was designed from the lamellae with axes as planar arches to be easily manufactured. The axes of the lamellae intersect at the node, eliminating the eccentricity that appeared at the original joint, making this prototype an improvement of the historical lamella structure.

3.1. The Design of the 3D Model

The first step towards the design of a physical model of a timber lamella vault was the design of a 3D model with all the necessary details of the lamellae and their joints. The model was based on the arched lamellae axes obtained by the graphical method presented in Figure 7, since the geometry of the axes provided by the numerical method results in torqued lamellae, see Figure 10a,b. The cross-section was first assigned to the lamella placed vertically to the floor plane and their connecting lamellae in the middle. The ends of the lamellae were bevelled following the vertical axis planes of the lamellae so that the whole cross-section of the connecting lamellae was pressed onto the middle of the central one. The lamellae were then rotated around the axis of the cylinder in order to obtain the whole structure. Thus, all lamellae are the same and all lamellae axes lie in the envelope of the cylinder. Arches along the gables were designed as three-hinged arches. Lamellae pressed onto the gable were cut obliquely by following the vertical plane of the three-hinged arch.

The joints for the lamellae were designed with steel plates bolted to the lamellae. The inspiration was a T-section joint presented in the Timber Construction Manual [26]. This joint is designed using two steel plates welded to each other to form a T-section. The difference between this joint and the applied one is that, in this design, two steel plates were placed on the outside edges of the lamellae and welded to the central steel plate. The T-section joint is placed inside the lamellae and requires additional shaping, as opposed to the applied joint. The supports were designed as point supports following the same design logic as the joints.

The final design is presented in Figures 11 and 12. The 3D model of the structure can be observed in Figure 11, while Figure 12 presents floor plans and sections of the structure, providing information about its dimensions.

3.2. Elements for the Physical Model

The designed structure has a span of 10.75 m, it is 3.1 m high and requires 81 lamellae. Based on the position of the lamellae in the structure, six types can be distinguished. All lamellae have the same radius of curvature because they all lie on the cylinder surface. The length of most lamellae is approximately 3 m, except the ones along the perimeter, which are 1.5 m long (Table 1). Type 1 has a span of 289 cm and it is the most used type in the structure. Type 3 shows the lamellae next to the supports, and type 4 are the lamellae lying on the gable arch. Two special types are types 5 and 6, which lie on the arch and the supports at the same time. The differences between the lamella types are created by the length and the different angles of the bevelling of the ends. The disposition of the lamellae in the diamond pattern with angles 60° and 120° requires this number of types, and it cannot be reduced. The cross-section of the lamellae is width/height = $b/h = 6/16$ cm.

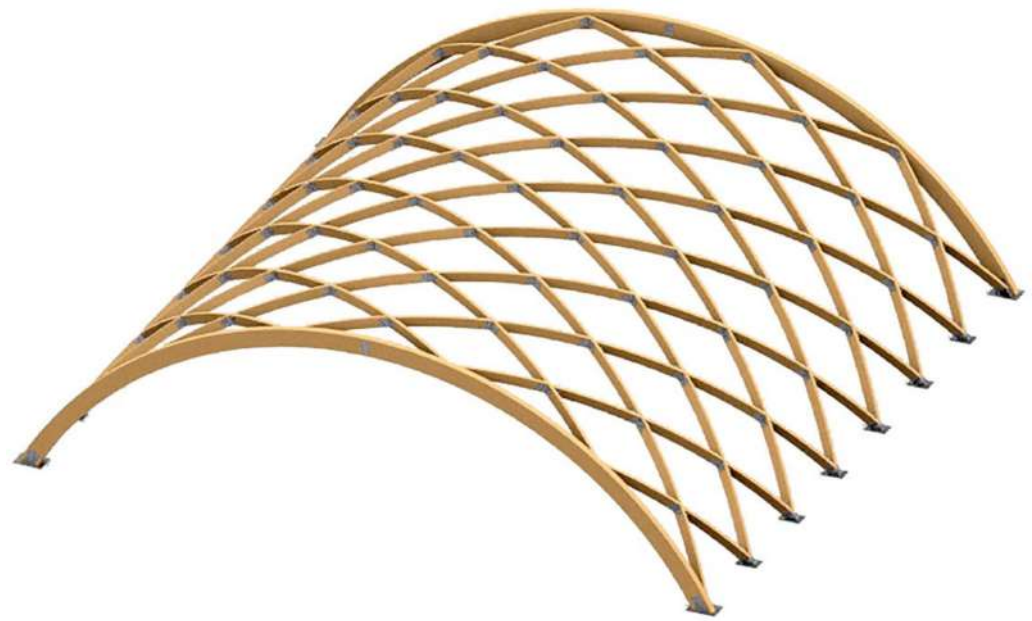


Figure 11. Three-dimensional model of the designed lamella vault.

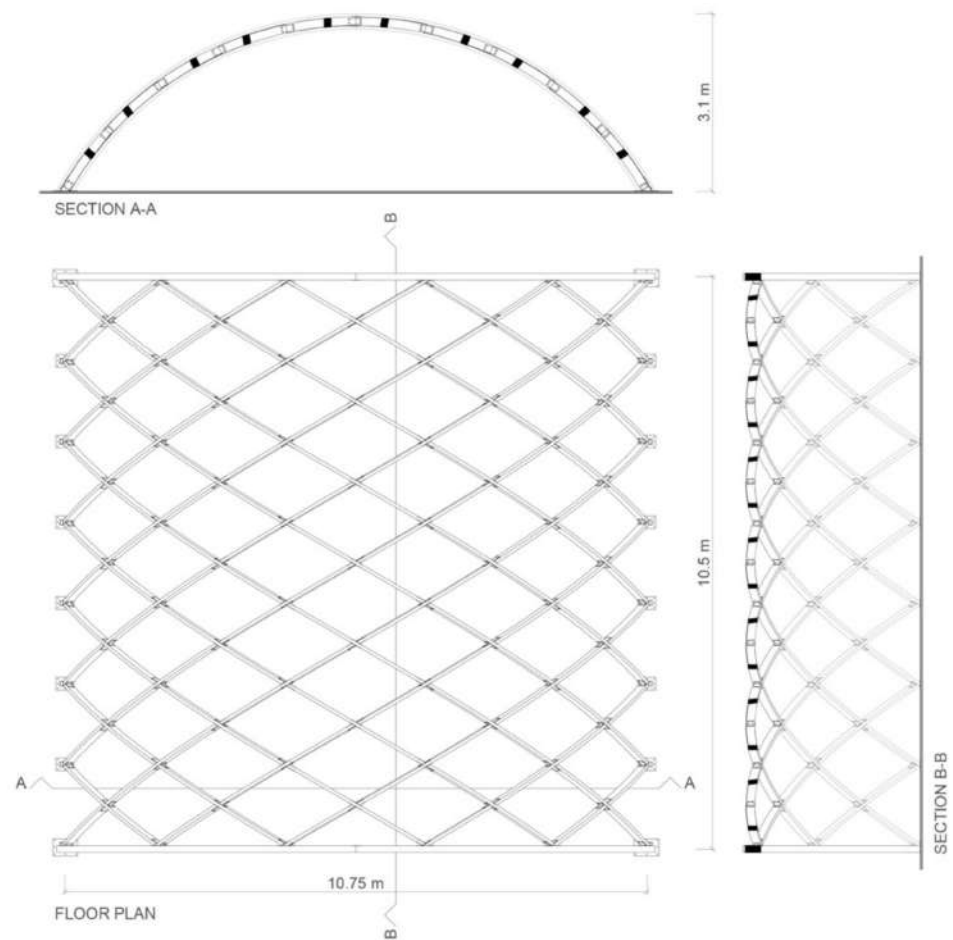
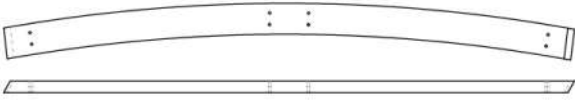
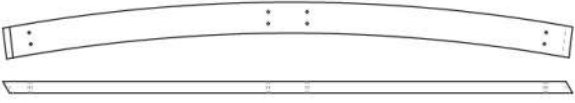
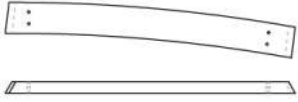
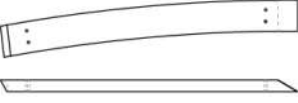




Figure 12. Floor plan and sections of the lamella vault of the physical model.

Table 1. Specification of timber lamellae.

Type		Span of a Lamella [cm]	Number of Lamellae	Total Volume for the Type [m ³]
1		289	33	1.007
2		289	24	0.732
3		149.5	12	0.189
4		153	8	0.129
5		292	2	0.062
6		148	2	0.031
Total:				2.15

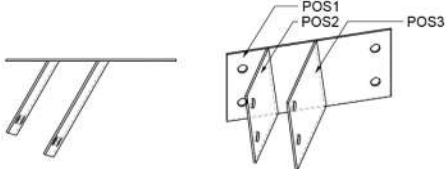
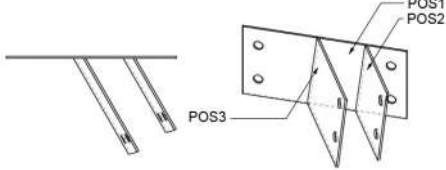
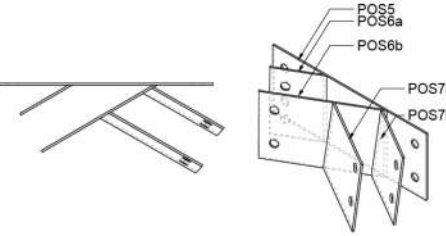
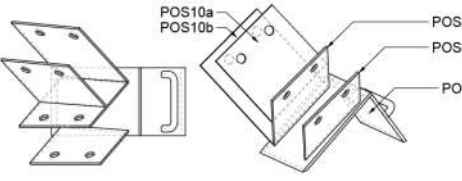
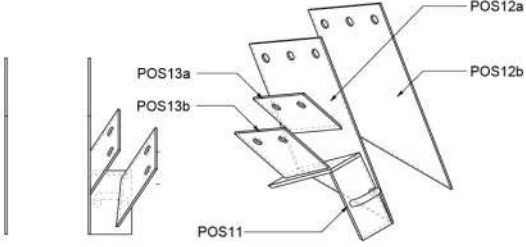
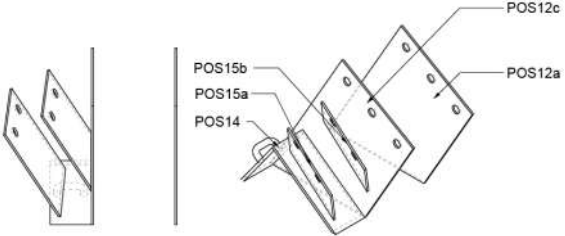
The structure has six types of joints based on their position inside the structure: two types of lamellae joints, the arch and the lamellae joints, the support joints and two types of arch and lamella support joints. The dimensions of the steel plates depended on the position of the node and its geometry, as well as the position of the bolts according to technical regulations (Table 2). The width of the steel plates was 3 mm for all of the joints, except for the supports made from 5 mm thick steel plates. The used bolts were M12, class 5.6.

The majority of the lamellae belong to types 1 and 2 (Table 1) where the bevelling of the lamellae shows that they are mirrored one in reference to the other. Other types of lamellae are derived from types 1 and 2. The same goes for the joints.

3.3. Construction of the Physical Model

The prefabrication of the elements preceded the construction of the designed timber lamella vault. The base for lamellae was made from an arched glued laminated timber beam, with an arch radius of 844 cm and outer edge length of 630 cm. In order to have 81 lamellae, 35 base arches needed to be made. The gable three-hinged arches were made from four equal arched glued laminated timber beams, with an arch radius of 635 cm and an outer edge length of 680 cm. Steel plate joints were prefabricated in a workshop according to the design, out of 3 mm and 5 mm steel plates with mechanically predrilled holes for bolts. The anchor plates were made from 10 mm thick steel plates.

Table 2. Specification of steel joints.

Type		Number of Joints	Total Volume for the Type [m ³]	Total Weight for the Type [kg]
1		70	0.0132	103.620
2		48	0.00904	70.964
3		8	0.00249	19.547
4		12	0.00391	30.694
5		2	0.000855	6.712
6		2	0.000855	6.712
Total:				238.25

The construction of the lamella vault started with the placement and levelling of the anchor plates, anchored to the ground with M16 anchor bolts. Support joints were welded to anchor plates at the designed positions to provide a good starting point for mounting timber elements. The shaping and placement of three-hinged arches was the next step. The gable arches were measured and shaped on the ground, connected with steel plates at the hinge, and then lifted and placed into the supports. The positions of the joints for the lamella and the arch were measured and marked. The joints were then mounted to the

three-hinged arch. To achieve the stability of the gable arch, the first lamellae needed to be placed near the arch supports, as presented in Figure 13. The construction layout dictated the sequence of the lamellae assembly, starting from one gable to the next, forming one bay at a time in order to check the dimensions and the positions of the lamellae and the joints. The described process of bay-by-bay construction was presented as the best manner of construction for a lamella vault [10].

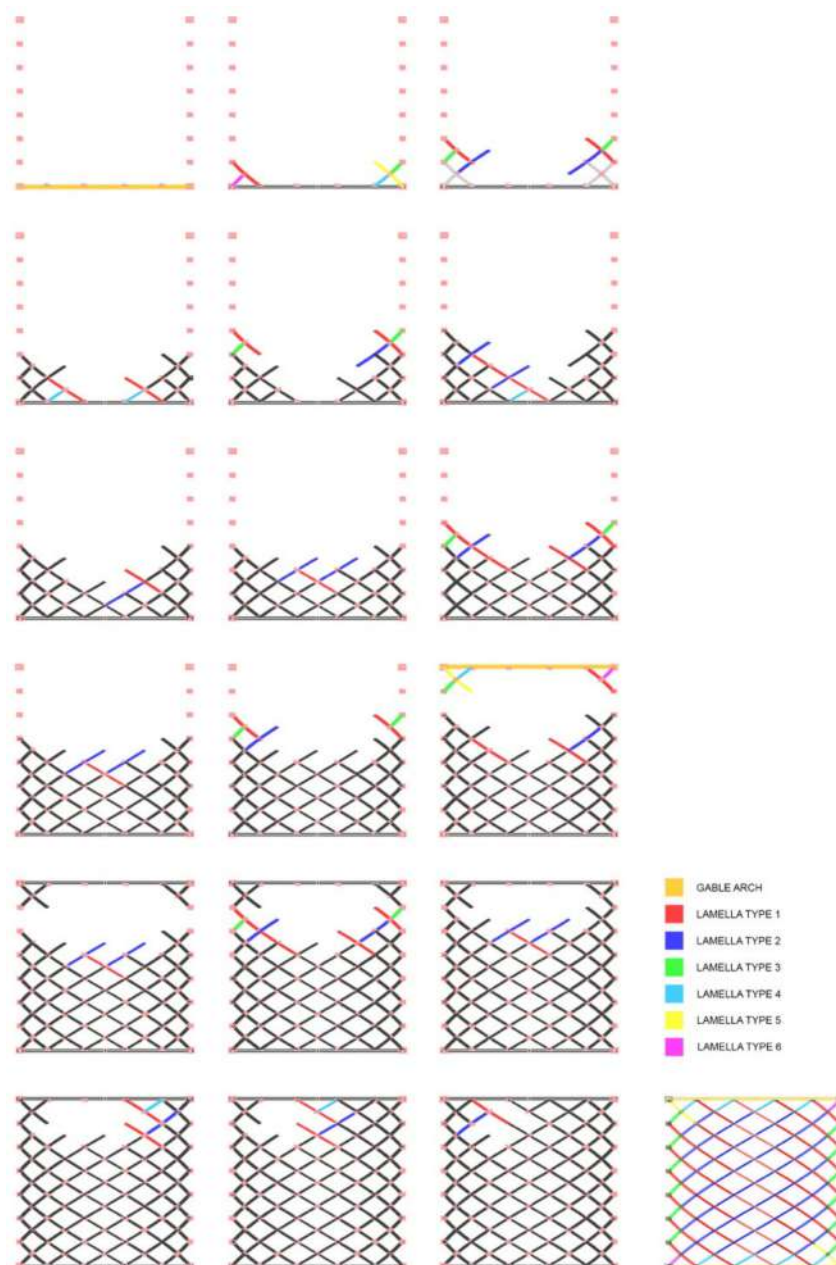


Figure 13. A diagram of the construction process of the physical model.

The base arches for the lamellae were delivered to the building site where they were measured and bevelled according to the specifications. During the construction, it was concluded that the base arches tended to elongate because of high temperatures, so the position of the joints had to be measured according to the triangle between the edge joints and the middle one. The joints were mounted onto the middle of each lamella on the ground. The lamellae would be then placed at the designed position in the structure and controlled by the position of the stings marking the height of the nodes. The lamellae

would be temporarily secured with screws until the whole bay was positioned, after which the holes for the bolts would be drilled and the bolts mounted.

At the beginning of the construction, there was a need for additional supports, since the structure was very unstable. With the increase of the bays, the structure began to adapt to the cylinder shape. The larger number of lamellae showed that every other lamella reinforced the previous one and set its position in the structure. This was observed as a successive relief in the construction process right after the construction of the first bay, and it was confirmed after half of the structure was constructed.

The construction experience contributed to a better understanding of the timber lamella vault. Conclusions were drawn regarding the method of assembly and the preparation of the structural elements. This experience also opened questions related to the modification of the structure.

The construction process and the physical model are shown in Figure 14.



Figure 14. Photo of the construction process and the physical model in detail.

4. Discussion

Lamella structures are a specific type of spatial structure primarily because of their diamond pattern. They have the advantage of the uniformity of elements, leading to an economical structure that is easily assembled. This pattern creates an unstable system if no additional structural elements are applied. One of the ways to solve this problem is to form moment connections between lamellae. In order to design a lamella structure, the geometry must be precisely defined.

The original joint has a large moment of eccentricity compared to the other types of joints and the load capacity of the bolts connecting the three lamellae at the node is much smaller [12,26]. Throughout the years, engineers have suggested a modification of the original joint and have designed a joint with all three lamellae axes intersecting at the node, thus eliminating the eccentricity [20,21,26]. The proposed joints are usually designed with steel plates, having a greater loading capacity than the original one. The geometrical design and the prototype presented in this paper are for the lamella structure where all lamellae axes intersect at the node, and the eccentricity is eliminated.

The chosen geometry of the lamella structure in this paper is a lamella vault. The diamond pattern is applied to the envelope of the right circular cylinder. The material of the lamellae is timber, and the joints are formed out of steel plates bolted to the lamellae.

The discussion in this paper is led by the following criteria:

1. The geometry of the structure must provide uniformity of all structural elements.
2. The lamellae must intersect at the nodes to reduce the eccentricity of the joints.
3. The construction must be simple and performed in a short period.
4. The designed structure must be economical.

The criteria are derived from the advantages of historical lamella structures, which must not be damaged by the modification of the structure.

The geometrical design of the lamella vault was approached using the graphical method and the numerical method. The numerical method for geometrical design opens the possibility of easy modification of set parameters. The diamond pattern of the lamellae can be applied to any type of surface by following the methodology shown in Section 2.2. The authors' numerical method presents a further observation of the specific pattern of lamellae and gives the possibility of adaptation, which would include the interchangeability of the original connection—one lamella connects to the middle of the next one from the other direction. The presented parametric equations can also be used for 3D modelling in different software plug-ins, such as Grasshopper for Rhino. This enables the fast and precise design of the geometrical model [15,16,19]. For the physical model, the axis curves of the lamellae would have to be optimised. The parametric definition of the helix, even for an infinitesimal segment, gives a spatial curve, so it is necessary to modify it into a planar curve—an arch that will define the axis of the lamella for the construction. One of the graphical methods has shown this modification. The presented graphical methods have shown two possible approaches to geometric design: (1) from lamella to the whole structure and (2) from the whole to the lamella. The analysis has shown that the right process of design is the second one and both graphical methods that followed this process have proven successful.

The method of pattern projection to the cylinder surface creates a reasonable structure with all vertical lamellae that intersect at the nodes. This geometry does not fulfil the first criteria since there are numerous sets of uniform lamellae, depending on the density of the structural pattern. This could be overcome by the production of lamellae on a CNC machine, thus reducing the prefabrication time. The number of joint sets would be the same as the number of lamellae sets, so a simple joint must be designed to be easily modified for different angles in the structure. If the elements were to be mass-produced, this structure would have complied with all the criteria except the first one.

The method of division of the cylinder surface into equal parts was applied to the design of the physical model of the lamella vault. This method gives a uniform structure with six types of lamellae and the corresponding joints, no matter the density of the pattern

since the types of the elements depend on their position in the structure. The differences among lamellae are created because of different angles for bevelling, which also influences the angles in the joints. Types 1 and 2 are mirrored elements, which are the consequence of the diamond pattern and the angles of 60° and 120° . The number of types could be reduced for one if the pattern was created with 90° angles. This proves that the structure fulfils the first two criteria. The only problem with this structure is the rotation of lamellae at the nodes because the axes of the lamellae intersect at the nodes.

In historical lamella structures, the rotation/translation of the lamellae was applied in the horizontal plane to have all lamellae vertical to the floor [13]. This resulted in a variety of joints that had large moments of eccentricity, since the lamellae do not intersect at the nodes, but the criteria for uniform elements was fulfilled. The advantage of Junkers' structure, over the ones of Zollinger and Hünnebeck, was that all the joint elements were the same. In comparison to these structures, the designed joint for the presented physical model has reduced the eccentricity in the node, leaving the axes of lamellae to intersect. On the other hand, the rotation of the lamellae appears in the vertical plane, making a torsional movement around the axis, so they are not vertical in relation to the floor. The rotation of the lamellae at the node is the consequence of the approximation of the arched axis of the lamella corresponding to the helix curve, as presented in Sections 2.1.3 and 2.2. This rotation of the lamellae demands further shaping after the construction is finished, to provide a continuous surface, as it would be for the vertically placed lamellae.

The construction of the physical model for the timber lamella vault with a 10.75 m span and a length of 10.5 m lasted seven days with only three workers. The hypothesis is that five workers would finish the construction in a smaller amount of time, thus also fulfilling the third criterion. The number of workers and the period of construction affect the economy of the structure [27], i.e., the cost of construction is reduced for a small number of workers and the short construction time. In comparison to standardised timber vaults, this structure is not economical because all the elements are specially designed only for this structure, while standardised vaults use mass-produced elements.

The discussion and analysis of the presented geometry of timber lamella vaults still leave an open question for choosing the best way to design a lamella structure, thus giving the designer the possibility to adapt the structure to its needs.

5. Conclusions

The presented research shows the problems of the geometrical design of timber lamella vaults. The diamond pattern of the lamellae is applied to the right circular cylinder envelope with the idea to explore different methodologies for geometrical design that could be replicated on any type of surface. The physical model of the structure has presented problems that emerge during the construction, contributing to the thorough analysis from design to execution.

The conclusions about the geometry of timber lamella vaults are drawn as follows:

- The graphical geometrical design method needs to follow the process of design from the whole to the lamella to obtain the correct geometry with as many possible uniform elements.
- The graphical method following the process of projection of the pattern to the cylinder surface gives various sets of uniform elements—lamellae and the corresponding joints—leaving them vertical to the floor plan. This process is easily replicated and the lamellae pattern is easily modified to meet designers' needs.
- The graphical method of the division of the cylinder surface into equal parts results in the most uniform elements. The lamellae are rotated around their longitudinal axis, so they are not vertical to the floor plan.
- The smallest possible number of element types is five for timber lamella vaults where the axes of lamellae intersect at the nodes. This can be achieved only for the 90° angle between the lamellae, that is, for the square pattern of lamellae.

- The geometrical design approach using the numerical method gives parametric equations that are easily modified in 3D modelling software to meet designers' needs.

The presented geometrical analysis and physical model of a timber lamella vault have shown the adaptability of lamella structures and the possibility to use them in different contemporary architectural projects.

Author Contributions: Conceptualization, M.P.; methodology, M.P. and S.M.; software, S.M.; validation, N.Š.; formal analysis, M.P., I.I. and S.M.; investigation, M.P. and I.I.; resources, M.P.; data curation, M.P., I.I. and S.M.; writing—original draft preparation, M.P.; writing—review and editing, M.P. and N.Š.; visualization, M.P. and I.I.; supervision, N.Š.; project administration, M.P.; funding acquisition, N.Š. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Acknowledgments: This research was supported by LAB—Architectural Engineering Laboratory—Structural Problems of Architectural Buildings in the Faculty of Architecture at the University of Belgrade.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

- Lan, T. Space Frame Structures. In *Handbook of Structural Engineering*; Chen, W.F., Ed.; CRC Press: London, UK, 1997; pp. 943–1001.
- Makowski, Z.S. *Analysis, Design and Construction of Braced Barrel Vaults*; Elsevier: New York, NY, USA, 1985.
- Programme © Bauhaus Kooperation 2020. Available online: <https://www.bauhaus100.com/programme/eventdetails/400/> (accessed on 29 September 2020).
- Zollinger, F. Space-Enclosing, Flat or Curved Components. German Patent DE387469C, 28 December 1923.
- Winter, K.; Rug, W. Innovationen im Holzbau—Die Zollinger-Bauweise. *Bautechnik* **1992**, *69*, 190–197.
- Peulić, Đ. *Konstruktivni Elementi Zgrada*; Croatia Knjiga: Zagreb, Croatia, 2002.
- Wolf, K. Rautennetze by Emil Hünnebeck—Steel Lamella Roofs of the Interwar Period. In *Iron, Steel and Buildings: The Proceedings of the Seventh Conference of the Construction History Society*; Construction History Society: Cambridge, UK, 2020; pp. 117–128.
- Tutsch, J. Die Rautennetzwerke von Emil M. Hünnebeck. Lecture, Technische Universität München. 2017. Available online: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1380458/982932173316.pdf> (accessed on 7 October 2022).
- Weller, B.; Tasche, M.; Baatz, J. Lamella Roof Constructions by Hugo Junkers. In Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium, Valencia, Spain, 28 September–2 October 2009; Domingo, A., Lazaro, C., Eds.; Universidad Politecnica de Valencia: Valencia, Spain, 2009; pp. 1611–1621.
- Hosseinzadeh, H. Analysis of Lamella Structural Systems with Particular Reference to Lamella Barrel Vaults. Master's Thesis, Department of Civil Engineering, University of Surrey, Guildford, UK, 1967.
- Leslie, T. Laborious and Difficult: The Evolution of Pier Luigi Nervi's Hangar Roofs, 1935–1941. In Proceedings of the 6th International Congress on Construction History, Brussels, Belgium, 9–13 July 2018.
- Franke, L.; Stahr, A.; Dijoux, C.; Heidenreich, C. How does the Zollinger Node really work? A Structural Experimental Investigation to a Better Understanding of the Nodal Behavior. In Proceedings of the IASS Annual Symposium 2017, Hamburg, Germany, 25–28 September 2017.
- Tutsch, J.F. Weitgespannte Lamellendächer der Frühen Moderne: Konstruktionsgeschichte, Geometrie und Tragverhalten. Ph.D. Dissertation, Fakultät für Architektur, Technische Universität, München, Germany, 2020.
- Petrović, M.; Ilić, I. Structural patterns in architecture. In Proceedings of the IASS Annual Symposium 2020/21, Guildford, UK, 23–27 August 2021; pp. 858–864.
- Löschke, H.; Stahr, A.; Schröder, T.H.; Schmidt-Kleespies, F.; Hallahan, R. Segmentation and assembly strategy for lamella roof shell structures. In Proceedings of the IASS Annual Symposium 2020/21, Guildford, UK, 23–27 August 2021; pp. 2800–2807.
- Jin, J.; Han, L.; Chai, H.; Zhang, X.; Yuan, P.F. Digital design and construction of lightweight steel-timber composite gridshell for large span roof. In *Intelligent & Informed, Proceedings of the 24th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA), Wellington, New Zealand, 18 April 2019*; Victoria University of Wellington: Wellington, New Zealand, 2019; Volume 1, pp. 183–192.
- FLEX. ZolinkR Wave IASS 2015 Amsterdam. Available online: <https://vimeo.com/135884817> (accessed on 2 September 2022).
- Adieste. Digitally Fabricated Lamella Structure. Available online: <https://issuu.com/adieste/docs/mp3ad> (accessed on 2 September 2022).
- Pintos, P. Tj Observatory/RAU Architects + RO&AD Architecten. 2019. Available online: <https://www.archdaily.com/915456/tij-observatory-ro-and-ad-architecten> (accessed on 2 September 2022).

20. Müller, C. *Holzeimbau, Laminated Timber Construction*; Birkhauser: Berlin, Germany, 2000.
21. Scheer, C.; Purnomo, J. Recent Research on Timber Lamella Barrel Vaults. In *Analysis, Design and Construction of Braced Barrel Vaults*; Makowski, Z.S., Ed.; Elsevier: New York, NY, USA, 1985; pp. 406–421.
22. Rhino Software. Available online: <https://www.rhino3d.com> (accessed on 15 July 2022).
23. BlogTO on Twitter. Available online: <https://twitter.com/blogTO/status/1090708821083934722/photo/1> (accessed on 12 August 2022).
24. Stojanović, Đ.V. Adaptivni Principi u Arhitektonskom Projektovanju. Ph.D. Thesis, Faculty of Architecture, University of Belgrade, Beograd, Serbia, 2013.
25. Tamke, M. CITA: Working for and with material performance. *Serb. Archit. J.* **2013**, *5*, 202–226. [[CrossRef](#)]
26. Herzog, T.; Natterer, J.; Schweitzer, R.; Volz, M.; Winter, W. *Timber Construction Manual*; Detail: Munich, Germany, 2004.
27. Šekularac, N. Oblikovanje Naborastih Konstrukcija Primenom Drvenih Rešetkastih Nosača. Ph.D. Thesis, Faculty of Architecture, University of Belgrade, Belgrade, Serbia, 2010.

ИЗВОРИ И ЛИТЕРАТУРА

- Adriaenssens, Sigrid, Philippe Block, Diederik Veenendaal and Chris Williams (eds). 2014. *Shell structures for Architecture: Form Finding and Optimization*, New York: Routledge.
- Abubaker, A., Kostić, I., Kostić, O., Stefanović, Z. 2018. "CFD Modeling of Atmospheric Boundary Layer Simulations in Wind Tunnels." *Tehnički vjesnik*, 25 (6), p. 1595-1602. <https://doi.org/10.17559/TV-20161125134410>
- Adieste. Digitally Fabricated Lamella Structure. Available online: <https://issuu.com/adieste/docs/mp3ad> (accessed on 2 September 2022).
- Apolinarska, Aleksandra Anna. 2018. *Complex Timber Structures from Simple Elements Computational Design of Novel Bar Structures for Robotic Fabrication and Assembly*. PhD diss., ETH Zurich.
- ArTech, <https://artech.rs>.
- ArchDaily. 2012. "GC Prostho Museum Research Center / Kengo Kuma & Associates" <https://www.archdaily.com/199442/gc-prostho-museum-research-center-kengo-kuma-associates> ISSN 0719-8884 (pristupljeno 15.01.2023.)
- Beorkrem, Christopher. 2013. *Material Strategies in Digital Fabrication*. New York: Routledge.
- Beorkrem, Christopher. 2017. *Material Strategies in Digital Fabrication (Second edition)*. New York: Routledge.
- Boggs, D. and A. Lepage. 2006. "Wind Tunnel Methods" In *Performance-Based Design of Concrete Building for Wind Loads October 24, 2004, San Francisco, California, USA* edited by Joseph M. Bracci. 125-142.
- BlogTO on Twitter. Available online: <https://twitter.com/blogTO/status/1090708821083934722/photo/1> (accessed on 12.08.2022.)
- Chiorino, Mario A. 2012. "Art and Science of Building in Concrete: The Work of Pier Luigi Nervi." International exhibition and ACI Spring 2012 Convention. <http://email.concrete.org/marketing/resources/ci3403chiorino.pdf>
- Chen, B., Cheng, H., Kong, H., Chen, X. Yang, Q. 2019. "Interference effects on wind loads of gable-roof buildings with different roof slopes." *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, vol. 189, p. 198-217, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.03.033>
- Colliers, J., Mollaert, M., Degroote, J., De Laet, L. 2019. "Prototyping of thin shell wind tunnel models to facilitate experimental wind load analysis on curved canopy structures." *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, vol. 188, p. 308-322, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.03.004>
- Conić, Igor. 2013. Pogledajte kako će izgledati Vila sa peristilom na Medijani u Nišu. <https://www.gradnja.rs/pogledajte-kako-ce-izgledati-vila-sa-peristilom-na-medijani-u-nisu/>
- Cross, Nigel. 2001. "Designerly ways of knowing: design discipline versus design science." *Design Issues*, 17(3) pp. 49–55. DOI: <https://doi.org/10.1162/074793601750357196>
- Dai, S.F., Liu, H.J., Yang, J.H., Peng, H.Y. 2022. "Wind loads on roof-mounted isolated solar panels of tall buildings through wind tunnel testing." *Solar Energy*, vol. 231, p. 607-622, <https://doi.org/>

- [10.1016/j.solener.2021.12.005](https://www.designboom.com/interviews/kengo-kuma-designboom-interview/) Design Boom. 2005. kengo kuma: designboom interview, <https://www.designboom.com/interviews/kengo-kuma-designboom-interview/> (pristupljeno 15.01.2023.)
- Deplazes, Andrea. 2008. *Constructing Architecture: Materials, Processes, Structures: a Handbook* (2nd edition). Basel: Birkhäuser
- Dijoux, Cristoph, Alexander Stahr, Lukas Franke and Christian Heidenreich. 2017. "Parametric Engineering of a Historic Timber-Gridshell-System" In *Proceedings of the IASS Annual Symposium 2017, Hamburg* edited by Annette Bögle and Manfred Grohmann.
- Ding, W., Uematsu, Y. 2022. "Discussion on Design Wind Loads on a Vaulted Free Roof." *Wind*, vol. 2, p. 479-494, <https://doi.org/10.3390/wind2030026>
- Detail 10/2015. Discussion: Pure Invention? – The Lamella Halls of the Aviation Pioneer Hugo Junkers. <https://inspiration.detail.de/discussion-pure-invention-the-lamella-halls-of-the-aviation-pioneer-hugo-junkers-113111.html>
- Divisare. 2017. Frei Otto-Mannheim Multihalle. Published on March 08, 2017. <https://divisare.com/projects/339341-frei-otto-marco-vedana-mannheim-multihalle>
- Dutton, Hugh. 2000. "An Integral Approach to Structure and Architecture." *Perspecta* Vol. 31, Reading Structures: 60-69.
- Engel, Heino. 2007. *Structure systems (Third edition)*. Berlin: Hatje Cantz.
- Fiúza, Ana Patricia Leopoldo. 2016. *Polymeric Membranes in Architecture: Principles and applications in temporary and permanent structures*. PhD. Técnico Lisboa.
- FLEX. 2015. "ZolinkR Wave IASS 2015 Amsterdam" Posted 2015. at © 2020 Vimeo, Inc. Video 01:56. <https://vimeo.com/135884817>
- Franke, Lukas, Alexander Stahr, Cristoph Dijoux and Christian Heidenreich. 2017. "How does the Zollinger Node really work? A Structural Experimental Investigation to a Better Understanding of the Nodal Behavior" In *Proceedings of the IASS Annual Symposium 2017, Hamburg* edited by Annette Bögle and Manfred Grohmann.
- Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H., Carissimo, B. 2007. *Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment*, COST Office, Brussels.
- Fuller, R. Buckminster. 1983. *Inventions - The patented works of R. Buckminster Fuller*. New York: St. Martin's press.
- Furuto, Alison. 2012. "KREOD / Chun Qing Li of Pavilion Architecture" Last modified 8 years ago. <https://www.archdaily.com/275460/kroed-chun-qing-li-of-pavilion-architecture>
- Gavanski, E., Nishimura, H. 2022. "Wind loads on multi-span roof buildings." *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, vol. 220, p.104824, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104824>
- Geometria Architecture Ltd. 2019. Tij - Bird Observatory. <https://geometria.fi/project/tij-bird-observatory/>

- Gojković, Milan, Boško Stevanović, Milorad Komnenović, Sreto Kuzmanović i Dragoslav Stojić. 2001. *Drvene konstrukcije*. Beograd: Građevinski fakultet
- Građevinarstvo. 2011. Kengo Kuma: Arhitektura je jedna vrsta filozofije o sredini i okolini. <https://www.gradjevinarstvo.rs/tekstovi/1810/820/kengo-kuma-arhitektura-je-jedna-vrsta-filozofije-o-sredini-i-okolini> (pristupljeno 15.01.2023.)
- Hegy, Dezső. 2021. "Numerical stability analysis of arch-supported membrane roofs." *Structures* No. 29. 785-795.
- Herzog, Thomas, Julius Natterer, Roland Schweitzer, Michael Volz and Wolfgang Winter, ed. 2004. *Timber Construction Manual*. Munich: Detail.
- Hosseinzadeh, H. 1967. *Analysis of Lamella Structural Systems with particular reference to Lamella Barrel Vaults*, Master of Philosophy Thesis. University of Surrey, Department of Civil Engineering.
- Huntigton, Craig G, ed. 2013. *Tensile Fabric Structures: Design, Analysis and Construction*. Virginia: American Society of Civil Engineers.
- Ивановић-Шекуларец, Јелена. 2017. *Дрво у савременој архитектури*. Београд: Универзитет у Београду, Архитектонски факултет.
- Iori, Tullia and Sergio Poretti. 2005. "Pier Luigi Nervi's Works for the 1960 Rome Olympics" In *Actas del Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Cádiz* edited by S. Huerta and I. Juan de Herrera, 605-613. SEdHC, Arquitectos de Cádiz, COAAT Cádiz.
- Jin, J.; Han, L.; Chai, H.; Zhang, X.; Yuan, P.F. 2019. "Digital design and construction of lightweight steel-timber composite gridshell for large span roof." In *Intelligent & Informed, Proceedings of the 24th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA), Wellington, New Zeland, 18 April 2019*; Victoria University of Wellington: Wellington, New Zeland, 2019; Volume 1, pp. 183–192.
- Jirka, O. and Mikes, K. 2010. "Semi-rigid joints of timber structures." *Pollack Periodica*, Vol. 5, No. 2.
- João, Luís São, Raquel Carvalho and Raul Figueiro. 2016. "A study on the durability properties of textile membranes for architectural purposes." *Procedia Engineering* No. 155. 230-237.
- Johanides, M.; Lokaj, A.; Mikolasek, D.; Mynarcik, P.; Dobes, P.; Sucharda, O. 2022a. "Timber Semirigid Frame Connection with Improved Deformation Capacity and Ductility." *Buildings*, 12, 583. <https://doi.org/10.3390/buildings12050583>
- Johanides, M.; Lokaj, A.; Dobes, P.; Mikolasek, D. 2022b. "Numerical and Experimental Analysis of the Rotational Stiffness of a Timber Semi-Rigid Dowel-Type Connection." *Materials*, 15, 5622. <https://doi.org/10.3390/ma15165622>
- Jess. 2019. "Zollinger roof" Posted 07.06.2019. at © Bath Bespoke Limited. <https://www.bathbespoke.co.uk/2019/06/07/zollinger-roof/>
- Kasperski, M. 2003. "Specification of the design wind load based on wind tunnel experiments." *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, vol. 91, no. 4, p. 527-541, [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(02\)00407-5](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(02)00407-5)

- Kebody, Natural Wood Made to Last, © Kebody AS 2021. <https://kebody.com/en>Knippers, Jan, Jan Cremers, Markus Gabler and Julian Lienhard. 2011. *Construction Manual for Polymers + Membranes: Materials, Semi-Finished Products, Form-Finding, Design*. Basel: Birkhäuser.
- Krasić, Sonja. 2012. *Geometrijske površi u arhitekturi*. Niš: Galaksija ISBN 978-86-88601-02-03
- Kuma, Kengo. 2006. "A Return to Materials," in *Kengo Kuma: Works and Projects* edited by Luigi Alini. Milan: Electa Architecture.
- Lan, Tien T. 1997. "Space Frame Structures." In *Handbook of Structural Engineering* edited by W. F. Chen, 943-1001. CRC Press.
- Larsen, Olga Popovic. 2008. *Reciprocal Frame Architecture*. New York: Routledge, ISBN 9781138142244
- Leslie, Tomas. 2003. "Form as Diagram of Forces: The Equiangular Spiral in the Work of Pier Luigi Nervi." *Journal of Architectural Education* Vol. 57, No. 2. 45-54.
- Leslie, Tomas. 2018. "Laborious and Difficult: The Evolution of Pier Luigi Nervi's Hangar Roofs, 1935-1941." *6th International Congress on Construction History*, July 2018, Brussels, Belgium.
- Liddel, Ian. 2015. "Frei Otto and the development of gridshells." *Case Studies in Structural Engineering* No. 4. 39-49.
- Löschke, H.; Stahr, A.; Schröder, T.H.; Schmidt-Kleespies, F.; Hallahan, R. 2021. "Segmentation and assembly strategy for lamella roof shell structures." In *Proceedings of the IASS Annual Symposium 2020/21*, Guildford, UK, 23–27 August 2021; pp. 2800–2807.
- Machacek, Josef and Ondrej Svoboda. 2021. "Stability of steel arches strengthened by textile membranes." *Thin-Walled Structures* No. 165. 1-14.
- Madanipour, Ali. 1996. *Design of Urban Space: An Inquiry into a Socio-spatial Process*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Makowski, Z. S., ed. 1985. *Analysis, design and construction of braced barrel vaults*. New York: Elsevier.
- Мала енциклопедија Просвета* (треће издање). 1978. Београд: Просвета
- Milošević, Vuk S. 2017. *Aspekt promene geometrije pri dejstvu koncentrisane sile u projektovanju montažnih membranskih konstrukcija*. Doktorska disertacija. Univerzitet u Nišu, Građevinsko-arhitektonski fakultet.
- Mitrović, Č., Vorotović, G. (eds) 2017. *80 godina redovne nastave u oblasti vazduhoplovstva 1937.-2017. (80 years of classes in the field of aviation 1937. -2017.)*. Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade. ISBN 978-86-7083-962-5
- Meinhold, Bridgette. 2010. French Centre Pompidou-Metz Almost Complete. <https://www.evolo.us/french-centre-pompidou-metz-almost-complete/>
- Meteoblue, from https://www.meteoblue.com/sr/vreme/historyclimate/climatemodelled/beograd_Cpбуја_792680, accessed on 23.11.2022.
- Müller, Christian. 2000. *Holzimbau, Laminated Timber Construction*. Berlin: Birkhauser.

- Mullord, P. 1985. "Introduction to the Analysis of Braced Barrel Vaults." In *Analysis, design and construction of braced barrel vaults* edited by Z.S. Makowski, 406-421. New York: Elsevier.
- Nikolić, Emilija. 2018. "Evaluation of the protection and presentation of historic buildings in the Viminacium archeological park in relation to their spatial concept." *Spatium* No. 39. 26-37.
- Nerdinger, Winfried. 2005. *Frei Otto Complete Works Lightweight Construction Natural Design*. Basel: Birkhauser.
- Nervi, Pier Luigi. 1965. *Aesthetics and Technology in Building, The Charles Eliot Norton Lectures, 1961–1962*. Cambridge: Harvard University Press.
- Nestorović, Miodrag. 2000. *Konstruktivni sistemi: Principi konstruisanja i oblikovanja*. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Arhitektonski fakultet.
- Parke, G. A. R. 1985. "Comparison of the Structural Behaviour of Various Types of Braced Barrel Vaults." In *Analysis, design and construction of braced barrel vaults* edited by Z.S. Makowski, 406-421. New York: Elsevier.
- Petrović, Milica i Luka Skansi. 2018. "An architect's relation to structure: Analysis of Pinki Cultural Sports Center by Ivan Antić." *Spatium* No. 40. 33-41.
- Petrović, Milica, Ilić, Isidora, Mijatović, Svetislav, Šekularac, Nenad. 2022. "The Geometry of Timber Lamella Vaults: Prototype Analysis." *Buildings*, vol. 12, no. 10, p. 1653, <https://doi.org/10.3390/buildings12101653>
- Petrović, Milica i Isidora Ilić. 2021. "Structural patterns in architecture." In *Proceedings of the IASS Annual Symposium 2020/21*, Guildford, UK, 23–27 August 2021; pp. 858–864.
- Peulić, Đuro. 2002. *Konstruktivni elementi zgrada*. Zagreb: Croatia knjiga.
- Pintos, Paula. 2019. Tij Observatory / RAU architects + RO&AD Architecten. <https://www.archdaily.com/915456/tij-observatory-ro-and-ad-architecten>
- Polomova, B., Hanuliak, P., Vargova, A. 2019. "Application of Atrium Tensile Structure in Historic Building. Case study: Daylight Modeling of Atrium within Historic Building." In *Proceedings of the TensiNet Symposium*, p. 526-534. DOI: 10.30448/ts2019.3245.26
- Programme © Bauhaus Kooperation 2020, <https://www.bauhaus100.com/programme/eventdetails/400/>
- roofstructures.tumblr.com, n.d. "The Original Promotional Brochure for The Arena" <https://roofstructures.tumblr.com/tagged/Arena>
- Roggema, Rob. 2017. "Research by Design: Proposition for a Methodological Approach" *Urban Science* 1, no. 1: 2. <https://doi.org/10.3390/urbansci1010002>
- Rural Studio. 2005. HALE COUNTY ANIMAL SHELTER <http://ruralstudio.org/project/hale-county-animal-shelter/> (pristupljeno 03.01.2023.)
- Sarma, H. D., Zisis, I., Matus, M. 2023. "Effect of roof shape on wind vulnerability of roof sheathing panels." *Structural Safety*, vol. 100, p. 102283, <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2022.102283>

- Scheer, Claus and Jeffrey Purnomo. 1985. "Recent Research on Timber Lamella Barrel Vaults" In *Analysis, design and construction of braced barrel vaults* edited by Z.S. Makowski, 406-421. New York: Elsevier.
- Seidel, Michael. 2009. *Tensile Surface Structures: A Practical Guide to Cable and Membrane Construction*. Berlin: Ernst & Sohn.
- Serpentine Galleries. 2021. <https://www.serpentinegalleries.org/whats-on/serpentine-pavilion-2021-designed-by-counterspace/>
- Stevens, Philip. 2015. "kengo kuma sets wind eaves pavilion in the grounds of a taiwanese hotel" Last modified May 21, 2015. <https://www.designboom.com/architecture/kengo-kuma-wind-eaves-pavilion-hsinchu-county-taiwan-05-21-2015/>
- Стојановић, Ђорђе В. 2013. *Адаптивни принципи у архитектонском пројектовању*. Докторска дисертација. Универзитет у Београду, Архитектонски факултет.
- Tamke, Martin. 2013. "CITA: Working for and with material performance." *Serbian Architectural Journal*, Vol. 5, No. 2. 202-226.
- Tamke, Martin, Jacob Riiber and Hauke Jungjohann. 2010. "Generated lamella." *Acadia in:formation*. 340-347.
- Timoshenko, Stephen P. 1983. *History of Strength of Materials*. New York: Dover Publications.
- Tominaga, Y. et al. 2008. "AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol 96, no. 10-11, p. 1749-1761. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.02.058>
- Трактенберг, Марвин. 1997. "Деветнаести век." У *Историја модерне архитектуре: Антологија текстова. Књига 1, Корени модернизма*, ур. Милош Р. Перовић, 87-131. Београд: Идеа: Архитектонски факултет Универзитета.
- Tutsch, Joram. 2017. "Die Rautennetzwerke von Emil M. Hünnebeck." Lecture, Technische Universität München.
- Tutsch, Joram F. 2020. *Weitgespannte Lamellendächer der frühen Moderne: Konstruktionsgeschichte, Geometrie und Tragverhalten*, Doktor-Ingenieur Dissertation. Technische Universität München, Fakultät für Architektur.
- Uematsu, Y., Iizumi, E., Stathopoulos, T. 2008a. "Wind loads on free-standing canopy roofs: Part 1 local wind pressures." *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, vol. 96, no. 6-7, p. 1015-1028, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2007.06.047>
- Uematsu, Y., Stathopoulos, T., Iizumi, E. 2008b. "Wind loads on free-standing canopy roofs: Part 2 overall wind forces." *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, vol. 96, no. 6-7, p. 1029-1042, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2007.06.026>
- Van Craenenbroeck, Maarten, Silke Puystiens, Lars de Laet, Danny Van Hemelrijck and Marijke Mollaert. 2015. "Biaxial testing of fabric materials and deriving their material properties - A quantitative study." In *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2015, Amsterdam, Future Visions*, 17 - 20 August 2015, Amsterdam, The Netherlands.

- Weller, Bernhard, Martin Tasche and Julia Baatz. 2009. "Lamella Roof Constructions by Hugo Junkers." In *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009, Valencia* edited by Alberto Domingo and Carlos Lazaro, 1611-1621. Universidad Politecnica de Valencia, Spain.
- Winter, Klaus and Wolfgang Rug. 1992. "Innovationen im Holzbau - Die Zollinger-Bauweise." *Bautechnik* 69, Heft 4. 190-197.
- Wolf, Kilian. 2020. "Rautennetze by Emil Hünnebeck – steel lamella roofs of the interwar period", In *Iron, Steel and Buildings: the Proceedings of the Seventh Conference of the Construction History Society*. 117-128. Cambridge: Construction History Society.
- Шекуларац, Ненад. 2010. *Обликовање наборастих конструкција применом дрвених решеткастих носача*. Докторска дисертација. Универзитет у Београду, Архитектонски факултет.
- Šmak, M., Barnet, J., Straka, B., Kotásková, P. & Havířová, Z. 2016. "Doweled joints in timber structures experiment-design-realization." *Wood Research*, Vol. 61, No. 4, 651-662.
- Zhelykh, V., Ulewicz, M., Furdas, Y., Adamski, M., Rebman, M. 2022. "Investigation of Pressure Coefficient Distribution on the Surface of a Modular Building." *Energies*, vol. 15, p. 4644, <https://doi.org/10.3390/en15134644>
- 韩爽 - HAN Shuang. 2014. Centre Pompidou-Metz / Shigeru Ban Architects. <https://www.archdaily.com/490141/centre-pompidou-metz-shigeru-ban-architects>

ПАТЕНТИ

DE387469C - Friedrich Zollinger

US2908236A - Roof structure, G. R. Kiewitt

US2914074A - Geodesic tent, Buckminster Fuller

СТАНДАРДИ

EN 1991-1-1:2002 Evrokod 1 - Dejstva na konstrukcije, Deo 1-1: Zapreminske težine, sopstvena težina, korisna opterećenja za zgrade

EN 1991-1-3:2003 Evrokod 1 - Dejstva na konstrukcije, Deo 1-3: Dejstva snega

EN 1991-1-4:2005 Evrokod 1 - Dejstva na konstrukcije, Deo 1-4: Dejstva vetra

EN 1993-3-1:2012 Evrokod 3 - Projektovanje čeličnih konstrukcija, Deo 1-1: Opšta pravila i pravila za proračun zgrada

EN 1995-1-1:2012 Evrokod 5 - Projektovanje drvenih konstrukcija, Deo 1-1: Opšta pravila i pravila za zgrade

SRPS EN 1991-1-4 / NA. Evrokod 1 — Dejstva na konstrukcije — Deo 1-4: Opšta dejstva — Dejstva vetra — Nacionalni prilog

СПИСАК ИЛУСТРАЦИЈА И ТАБЕЛА

Слика 1-1. Временски дијаграм, извор: аутор

Слика 2-1. Лук Филбера де л'Орма, извор: *Tutsch*, 2020, 24.

Слика 2-2. Елементи Золингер крова, извор: патент DE387469C

Слика 2-3. Типови објеката са Золингер кровом, извор: *Winter and Rug*, 1992, 194.

Слика 2-4. Елементи Золингер крова: 1) детаљ ламеле, 2) елемент везе, 3) попречни пресек крова, 4) подужни пресек крова, извор: *Peulić*, 2002, 635.

Слика 2-5. Унутрашњост амбара, *Gut Garkau 1923-1926*, архитекта: Хуго Харинг (*Hugo Häring*), конструкција: Фридрих Золингер, извор: *designcouncil.tumblr*

Слика 2-6. Унутрашњост амбара, *Gut Garkau*, извор: SEIER+SEIER

Слика 2-7. Везе ламела Емила Хунебека, извор: *Tutsch*, 2020, 49.

Слика 2-8. Дено за рафинерију шећера, конструкција Хунебек (сегмент фотографије), извор: *Wolf*, 2020, 126.

Слика 2-9. Конструкција железничке станице, Хуго Јункерс (сегмент фотографије), извор: *Detail 10/2015*

Слика 2-10. Хангар у Орбетелу, Пјер Луиђи Нерви, извор: *Nervi*, 1965, 111.

Слика 2-11. Астродом у Хјустону, Густел Кивит, извор: *Hosseinzadeh*, 1967, 28.

Слика 2-12. Тоскана Терме, извор: toskanaworld-consulting.de

Слика 2-13. Осматрачница за птице Тај, извор: аутор

Слика 2-14. Повезивање модула са околним модулима - принцип самоорганизације, извор: *Tatke et al.*, 2010.

Слика 2-15. Прототип конструкције, СИТА, извор: *Tatke et al.*, 2010.

Слика 2-16. Сегмент лам. конструкције монтиране роботском руком, извор: *Apolinarska*, 2018.

Слика 2-17. Сегмент двоструко закривљене ламелне конструкције, извор: *FLEX*, 2015.

Слика 3-1. Прикази начина добијања резане грађе од дебла дрвета, извор: *Deplazes*, 2004, 83.

Слика 3-2. Елемент од лепљеног ламелираног дрвета, извор: *Deplazes*, 2004, 85.

Слика 3-3. Класе чврстоће и карактеристичне вредности за монолитно дрво, извор: *Gojković et al*, 2001.

Слика 3-4. Класе чврстоће за лепљено ламелирано дрво, извор: *Gojković et al*, 2001.

Слика 4-1. Приказ ткања: а) густо ткана обична тканина, б) положено платно, извор: *Knippers et al*, 2011, 70-71

Слика 4-2. Биаксијални тест мембране на хидрауличној кидалици. Извор: *Van Craepenbroeck et al.*, 2015, н.п.

Слика 4-3. *Frei Otto - Mannheim Multihalle* унутрашњост објекта, извор: *Divisare*, 2017

Слика 4-4. *Frei Otto - Mannheim Multihalle* детаљ конструкције и мембране, извор: *Wooddays*, н.д.

Слика 4-5. *Centre Pompidou-Metz*, дневна фотографија објекта, извор: 韩爽 - Han Shuang, 2014

Слика 4-6. *Centre Pompidou-Metz*, ноћна фотографија објекта, извор: Han Shuang, 2014

Слика 4-7. *Kreod*, ноћна фотографија павиљона, извор: Furuto, 2012

Слика 4-8. *Wind Eaves Pavilion*, фотографија објекта, извор: Stevens, 2015.

Слика 4-9. *Wind Eaves Pavilion*, детаљ конструкције и мембране, извор: Stevens, 2015.

Слика 4-10. Медијана, унутрашњост заштитне конструкције, извор: PiramidaSM, n.d.

Слика 5-1. Истраживање које су спровели инжењери Шер и Пурномо, извор: Scheer and Purpoto, 1985, 411-415.

Слика 6-1 Дијаграмски приказ три типа ламелних сводова и ротација/транслација ламела (горе) са типовима веза (доле), извор: Tutsch, 2020, 106.

Слика 6-2. Позиција ламела када се оса централне ламеле сече са осом прикључних ламела у једној тачки, извор: аутор

Слика 6-3. Основа ламелне конструкције настале графичком методом са издвојеним детаљима, извор: аутор

Слика 6-4. Пројекција мреже као поступак добијања ламелне конструкције: раван са мрежом која се пројектује на сегмент цилиндра (а), осе ламела у равни омотача цилиндра (б) и детаљ (в), извор: аутор

Слика 6-5. Процес поделе цилиндра на једнаке делове: (а) аксонометрија ламелне конструкције са местима чворова конструкције удаљеним 1.5 m, (б) детаљ осе сваке ламеле и везе ламела, (в) сегмент конструкције са лучним ламелама које се секу у чвору и (г) детаљ лучне ламеле дефинисане распоном и стрелом лука, извор: аутор

Слика 6-6. Геометрија ламелне конструкције, извор: Tutsch, 2020, 88.

Слика 6-7. Геометрија ламелне конструкције, извор: аутор

Слика 6-8. Графичка презентација параметарских једначина завојница из програма *Wolfram Mathematica*.

Слика 6-9. Аксонометријски приказ ламела које се секу у чвору: (а) када ламеле прате завојницу, према нумеричком методу и (б) вертикалне равни у којима се налазе ламеле служе да прикажу ротацију у чвору која се јавља као последица геометрије добијене графичком методом, извор: аутор

Слика 7.1-1. Модел са вертикалним ламелама добијен пројекцијом мреже на цилиндар, извор: аутор

Слика 7.1-2. Приказ димензија једне типске ламеле за прототип ламелне конструкције у основи и изгледу, извор: аутор

Слика 7.1-3. Модел за прототип са заротираним ламелама добијен поделом цилиндра на једнаке сегменте, извор: аутор

Слика 7.2-1. Геометрија криве за једнаке удаљености чворова између ламела је спирала око омотача кружног правог цилиндра (лево). Три могућности постављања ламела тако да прате криву по омотачу цилиндра. Тип а) приказује торзију ламела, тип б) су раванске ламеле које прате спиралу и тип в) су вертикалне ламеле. На овом цртежу ламеле су дужине једне странице паралелограма (десно), извор: Tutsch, 2020, 95,102.

Слика 7.2-2. Золингер веза у којој су ламеле одвојене за троструку ширину ламела (3d), извор: Müller, 2000, 14.

Слика 7.2-3. Модификација Золингер везе, извор: Müller, 2000, 14.

Слика 7.2-4., Micro step веза са приказаном критичном зоном III у којој може да дође до лома, извор: Franke et al, 2017, 3.

Слика 7.2-5. Тесарска веза примењена за двоводни кров. Лева слика приказује остварену везу ламела, а на десној се налази детаљ средишње ламеле са постављеном једном прикључном ламелом, извор: Bath Bespoke.

Слика 7.2-6. Аксонометријски прикази веза са челичним лимовима: а) веза оковом од савијених челичних лимова остварена ексерима, б) веза са хоризонталним челичним лимовима остварена ексерима и в) веза са челичним оковом Т-облика, извор: Herzog et al, 2004, 246.

Слика 7.2-7. Основа (лево) и пресек (десно) комплексне веза ламела са челичним лимовима у којој се веза ламела остварује вијцима са навојем, извор: Scheer and Purnoto, 1985, 418.

Слика 7.2-8. Аксонометријски приказ новопроектване везе: експлодирана аксонометрија (лево) и повезане ламеле (десно), извор: аутор

Слика 7.2-9. Позиција рупа за вијак на челичном окову, извор: аутор

Слика 7.3-1. Основа оса елемената конструкције и детаљи на местима везе текстилне мембране са ивичним луком и ослонцима, извор: аутор

Слика 8-1. Основа, пресеци и тродимензионални модел ламелне конструкције за прототип, извор: аутор

Слика 8-2. План монтаже, извор: аутор

Слика 8-3. Прототип конструкције без мембране (лево) и са мембраном (десно), извор: аутор

Слика 8-4. Дијаграм за одређивање коефицијената спољашњег притиска за конструкције форме цилиндра, извор: Еурокод EN 1991-1-4:2005 и аутор

Слика 8-5. Глобални координатни систем ламелне конструкције и локални координатни систем ламела,

извор: аутор

Слика 8-6. Позиције мерних места и план оптерећења за испитивање конструкције прототипа, извор: аутор

Слика 8-7. Мерење деформација конструкције прототипа, извор: аутор

Слика 8-8. Мерење деформација конструкције прототипа, извор: аутор

Слика 8-9. Вредности деформација ФАЗА I, извор: аутор

Слика 8-10. Вредности деформација ФАЗА II, извор: аутор
Слика 8-11. Вредности деформација ФАЗА III, извор: аутор
Слика 8-12. Вредности деформација ФАЗА IV, извор: аутор
Слика 8-13. Вредности деформација ФАЗА V, извор: аутор
Слика 8-14. Вредности деформација ФАЗА VI, извор: аутор
Слика 8-15. Вредности деформација ФАЗА VII, извор: аутор
Слика 8-16. Вредности деформација ФАЗА VIII, извор: аутор
Слика 8-17. Вредности деформација ФАЗА IX, извор: аутор
Слика 8-18. Вредности деформација након растерећења конструкције, извор: аутор

Слика 10-1. Атријуми у Милану/ Риму/Валенсији, извор: prof. dr N. Šekularac / Affaritaliani, 2017 / Silvia J, 2020

Слика 10-2. Позиција надстрешнице у атријуму зграде Техничких факултета: а) без надстрешнице, б) са надстрешницом ослоњеном на венац атријума и в) са надстрешницом унутар атријума, извор: аутор

Слика 10-3. Приказ надстрешнице у атријуму зграде Техничких факултета, извор: аутор

Слика 10-4. Основа и пресеци макете за аеротунел, извор: аутор

Слика 10-5. Позиција мерних тачака на крововима и зидовима атријума и на надстрешници, извор: аутор

Слика 10-6. Тродимензионални модел аеротунела "Мирослав Ненадовић", извор: Катедра за ваздухопловство

Слика 10-7. Експеримент у аеротунелу: манометар (горе лево), контролна табла (горе десно), цевчице на макети ламелне конструкције (средина), макета у аеротунелу (доле), извор: аутор

Слика 10-8. Позиција мерних тачака у односу на правац ветра, извор: аутор

Слика 10-9. Коефицијенти притисака без надстрешнице за северозападни ветар (слика 10-8б), извор: проф. др А.Бенгин и аутор

Слика 10-10. Коефицијенти притисака са надстрешницом за северозападни ветар (слика 10-8б), извор: проф. др А.Бенгин и аутор

Слика 10-11. Коефицијенти притисака без надстрешнице за југозападни ветар (слика 10-8г), извор: проф. др А.Бенгин и аутор

Слика 10-12. Коефицијенти притисака са надстрешницом за југозападни ветар (слика 10-8г), извор: проф. др А.Бенгин и аутор

Слика 10-13. Коефицијенти притисака без надстрешнице за југоисточни ветар (слика 10-8ђ), извор: проф. др А.Бенгин и аутор

Слика 10-14. Коефицијенти притисака са надстрешницом за југоисточни ветар (слика 10-8ђ), извор: проф. др А.Бенгин и аутор

Слика 10-15. Коефицијенти притисака без надстрешнице за североисточни ветар (слика 10-8ж), извор: проф. др А.Бенгин и аутор

Слика 10-16. Коэффициенти притисака са надстрешницом за североисточни ветар (слика 10-8ж), извор: проф. др А.Бенгин и аутор

Слика 10-17. Компарација коефицијената притисака за различите равни без надстрешнице изнад атријума (х) и са надстрешницом (о), извор: Исидора Илић и аутор

Слика 10-18. Софтверска симулација утицаја југоисточног ветра на објекат са атријумом без надстрешнице (лево) и са надстрешницом (десно), извор: проф. др Бенгин

Слика 10-19. Једноводни (лево) и двоводни кров (десно) са назанченим правцем ветра, извор: EN 1991-1-4:2005

Слика 10-20. Сводни кров, извор: EN 1991-1-4:2005

Табела 1. Систематизација ламелних конструкција (извор: аутор)

Табела 2. Систематизација веза ламела у дрвеним ламелним конструкцијама (извор: аутор)

Табела 3. Спецификација ламела (извор: аутор)

Табела 4. Спецификација челичних веза (извор: аутор)

Табела 5. Оптерећење од снега, случај I - без нагомилавања снега (извор: аутор, према Еурокоду I EN 1991-1-3:2003)

Табела 6. Оптерећење од снега, случај II - са нагомилавањем снега (извор: аутор, према Еурокоду I EN 1991-1-3:2003)

Табела 7. Оптерећење од ветра, дејство управно на цилиндричну површину (извор: аутор, према Еурокоду I EN 1991-1-3:2005)

Табела 8а. Вредности деформација ламелне конструкције од дрвета без текстилне мембране за вертикално оптерећење (извор: в.проф. др Зоран Мишковић)

Табела 8б. Вредности деформација ламелне конструкције од дрвета без текстилне мембране за вертикално оптерећење (извор: в.проф. др Зоран Мишковић)

Табела 9а. Вредности деформација ламелне конструкције од дрвета са текстилном мембраном за вертикално оптерећење (извор: в.проф. др Зоран Мишковић)

Табела 9б. Вредности деформација ламелне конструкције од дрвета са текстилном мембраном за вертикално оптерећење (извор: в.проф. др Зоран Мишковић)

Табела 10. Упоредна анализа утрошка материјала прототипа и типске хале (извор: аутор, према Еурокоду I EN 1991-1-3:2003)

БИОГРАФИЈА АУТОРА

Кандидат Милица Петровић рођена је 1993. године у Београду. Основне и мастер академске студије завршава у року на Универзитету у Београду - Архитектонском факултету. Мастер тезу са темом „Мултипликација основног елемента конструкције као метод формирања просторне структуре“ и мастер пројекат заштитне конструкције одбранила је са оценом 10. Њен мастер пројекат био је изложен на Темишварском бијеналу архитектуре (2016), презентован на конференцији „Заштитне конструкције над непокретним културним наслеђем“ у Сремској Митровици (2016) и изложен на 39. Салону архитектуре у Београду (2017).

Докторске студије уписала је 2016. године на матичном факултету са циљем да настави истраживање на тему пројектовања просторних конструкција од дрвених елемената. У оквиру семинара „PhD Talks“ на Архитектонском факултету и семинара „Notation, Algorithm, Criticism“ у Inter-University Centre у Дубровнику презентовала је своје почетне идеје везане за докторску дисертацију пред професорима са факултета из Србије и иностранства.

Током школовања радила је као студент сарадник у настави, а запослена је као асистент од 2017. године на Департману за архитектонске технологије. У међувремену је радила у архитектонским бироима.

Аутор је радова приказаних на конференцијама и радова у научним часописима и коаутор практикума за вежбе на предмету Теорија конструкција на Архитектонском факултету.

Као члан Српског удружења за земљотресно инжењерство учествовала је у организацији семинара „Концептуално сеизмичко пројектовање за архитекте“ предавача Ендрју Чарлсона (Andrew Charleson). У оквиру „21. Интернационалног конгреса за естетику - ICA2019:Belgrade“ била је члан медија тима. На конгресу „Одржива архитектура - Енергетска ефикасност“ била је тутор на радионици ментора архитектке Марка Лавита (Marco Lavit).

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Милица Петровић

Број индекса 41009/2016

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

ЛАМЕЛНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ ОД ДРВЕТА СА ТЕКСТИЛНОМ МЕМБРАНОМ

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, _____

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Милица Петровић

Број индекса 41009/2016

Студијски програм Докторске академске студије Архитектура и урбанизам

Наслов рада Ламелне конструкције од дрвета са текстилном мембраном

Ментор професор др Ненад Шекуларац

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, _____

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

ЛАМЕЛНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ ОД ДРВЕТА СА ТЕКСТИЛНОМ МЕМБРАНОМ

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, _____

1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.