



УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
UNIVERSITY OF BANJA LUKA

АРХИТЕКТОНСКО-ГРАЂЕВИНСКО-ГЕОДЕТСКИ ФАКУЛТЕТ

**АРХИТЕКТОНСКО ОБЛИКОВАЊЕ,
ТЕХНОЛОГИЈЕ ПРОЈЕКТОВАЊА И
ПРИМЈЕНЕ ПРОСТОРНЕ РЕШЕТКЕ
НА СЛОБОДНИМ АРХИТЕКТОНСКИМ
ФОРМАМА**

МАСТЕР РАД

**Ментор:
Проф. др Саша Чворо**

**Кандидат:
Марко Кољанчић**

Бања Лука, 2024. године



УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
UNIVERSITY OF BANJA LUKA



АРХИТЕКТОНСКО-ГРАЂЕВИНСКО-
ГЕОДЕТСКИ ФАКУЛТЕТ

**АРХИТЕКТОНСКО ОБЛИКОВАЊЕ,
ТЕХНОЛОГИЈЕ ПРОЈЕКТОВАЊА И
ПРИМЈЕНЕ ПРОСТОРНЕ РЕШЕТКЕ
НА СЛОБОДНИМ АРХИТЕКТОНСКИМ
ФОРМАМА**

МАСТЕР РАД

Ментор:
Проф. др Саша Чворо

Кандидат:
Марко Кољанчић

Бања Лука, 2024. године



UNIVERSITY OF BANJA LUKA
FACULTY OF ARCHITECTURE, CIVIL
ENGINEERING AND GEODESY



ARCHITECTURAL DESIGN, DESIGN TECHNOLOGIES AND APPLICATION OF SPATIAL TRUSS ON FREE ARCHITECTURAL FORMS

MASTER THESIS

Mentor:
Prof. dr. Saša Čvoro

Candidate:
Marko Koljačić

Banja Luka, 2024.

АРХИТЕКТОНСКО ОБЛИКОВАЊЕ, ТЕХНОЛОГИЈЕ ПРОЈЕКТОВАЊА И ПРИМЈЕНЕ ПРОСТОРНЕ РЕШЕТКЕ НА СЛОБОДНИМ АРХИТЕКТОНСКИМ ФОРМАМА

РЕЗИМЕ

Велики технолошки напредак и огромна инжењерска иновативност задњих двадесет година довели су до тога да одређени конструктивни системи у архитектури и грађевинарству постану далеко економски оправданији него што је био случај раније. Развој машинске индустрије, система фабрикације и напредак на пољу производње материјала отворили су врата све чешћој употреби решеткастих конструкција на великим и грандиозним архитектонским објектима.

Јако мала заступљеност употребе ових система на нашем поднебљу подстакла је истраживање на тему конструктивне примјене система просторне решетке на конструкцијама слободне форме. Постоји низ практичних проблема који носе овакве конструкције при пројектовању, имплементацији и одржавању, а наравно и потенцијали као што су ослобађање простора, слободни дизајн форме и утицај исте на амбијент предметне локације. Архитектонске технологије и приступ пројектовању комплексних форми материјализованих просторном решетком захтијевају употребу дигиталних алата и технологија. Прављење виртуелних прототипа неопходно је да би се обезбједио ефикасан, мултидисциплинарни и колаборативни оквир пројектовања. Израда процедуралне дигиталне аутоматизоване скрипте као и израда параметарског БИМ (*Building Information Modeling*) модела ће бити употребљени на пројекту кровне конструкције жељезничке станице у Бањој Луци. Проблематика ће бити обрађена кроз истраживање са теоријског и практичног аспекта. Практично ће се показати да је просторна решетка на слободним формама изводива кроз пројекат конструкције крова жељезничке станице у Бањој Луци.

Кључне ријечи: конструкција, просторна, решетка, материјал, жељезница, обликовање, технологија, дигитални, прототип, форма, студија.

МЕНТОР

Проф. др Саша Чворо, Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет УНИБЛ, ужа научна област: Архитектонске технологије и Архитектонско пројектовање;

Научна област: Архитектонске технологије

Научно поље: Архитектура и урбанизам

Класификациона ознака према CERIF шифрарику: T240

Тип одабране лиценце Креативне заједнице: CC BY-NC-ND

ARCHITECTURAL DESIGN, DESIGN TECHNOLOGIES AND APPLICATION OF SPATIAL TRUSS ON FREE ARCHITECTURAL FORMS

RESUME

Great technological progress and engineering innovation in the last twenty years have led to the fact that certain constructive systems in architecture and construction have become far more economically justified than was the case before. The development of the mechanical industry, manufacturing systems, and progress in the field of material production have opened the door to the increasingly frequent use of lattice structures on large and grandiose architectural structures.

The very low prevalence of the use of these systems in our climate encouraged research on the topic of constructive application of spatial grid systems on free-form structures. There are a number of practical problems that come with such constructions during design, implementation, and maintenance, and of course potentials such as freeing up space, free-form design, and its impact on the ambiance of the location in question. Architectural technologies and an approach to the design of complex forms materialized by a spatial grid require the use of digital tools and technologies. Creating virtual prototypes is necessary to ensure an efficient, multidisciplinary, and collaborative design framework. The creation of a procedural digital automated script as well as the creation of a parametric BIM (Building Information Modeling) model will be used on the project of the roof construction of the railway station in Banja Luka. The problem will be addressed through research from a theoretical and practical aspect. Practically, it will be shown that the spatial lattice on free forms can be performed through the project of the construction of the roof of the railway station in Banja Luka.

Key words: construction, spatial, grid, material, railway, design, technology, digital, prototype, form, study.

MENTOR

Prof. Saša Čvoro, Ph.D., Faculty of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, UNIBL, specialized field: Architectural technologies and Architectural design;

Scientific field: Architectural Technologies

Scientific area: Architecture and Urbanism

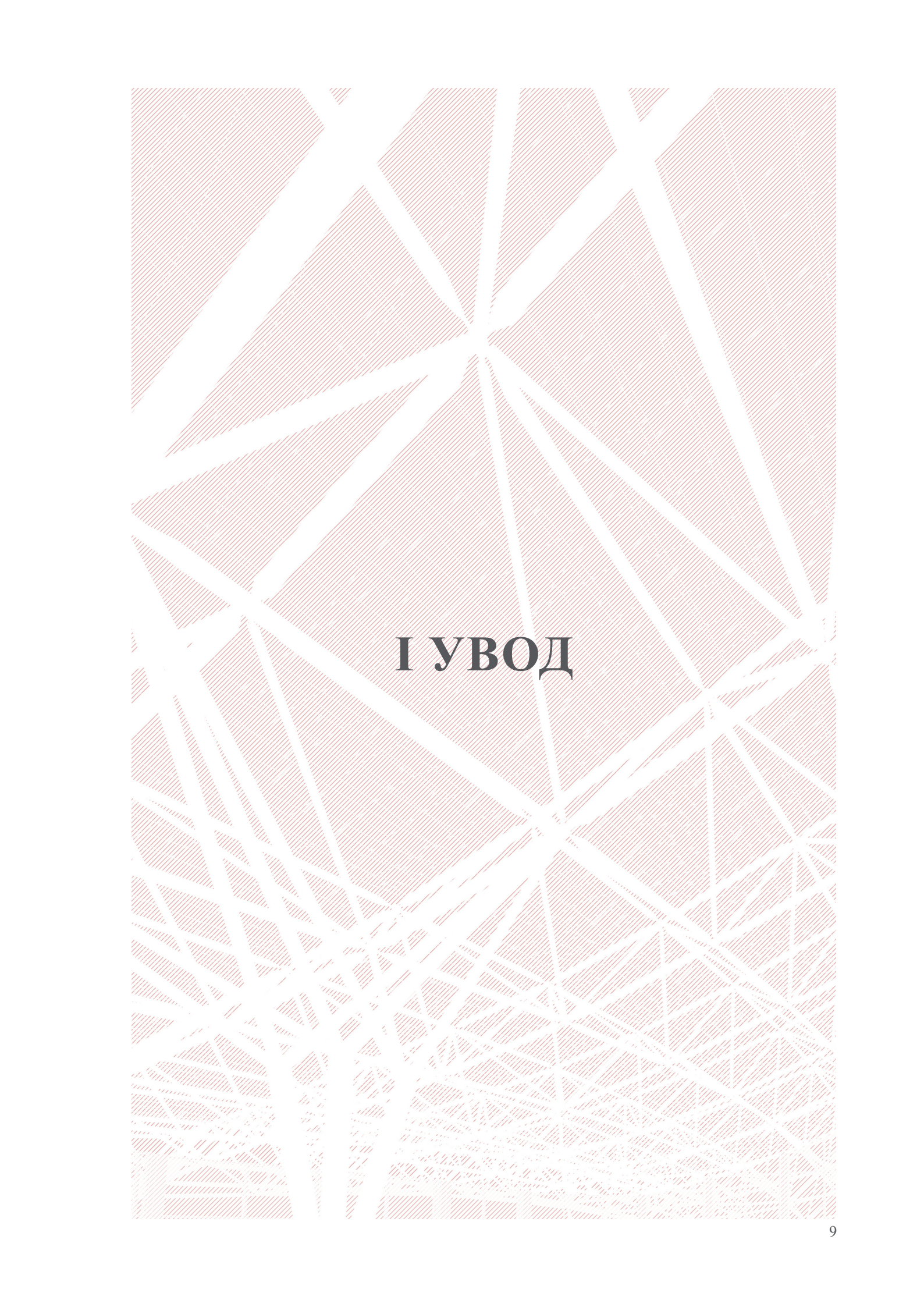
Classification code according to CERIF classification: T240

Type of selected Creative Commons license: CC BY-NC-ND

САДРЖАЈ

I УВОД	9
1.1 Образложење теме	10
1.2 Хипотезе и претпоставке за истраживање	11
1.3 Научне методе истраживања	12
1.4 Очекивани допринос истраживања	13
II ТЕОРИЈСКИ ОКВИР ИСТРАЖИВАЊА	14
2.0 Просторна решетка у савременој архитектури	15
2.1 Увод - потенцијали употребе просторне решетки	16
2.2 Рани развој просторних решетки - историјски преглед	18
2.3 Просторна решетка у архитектонском контексту - потенцијали обликовања	26
3.0 Основне особине просторне решетки	37
3.1 Врсте просторних решетки и прелиминарно планирање	38
3.2 Двослојне просторне решетки	39
3.2.1 Избор типа двослојне решетки	43
3.2.2 Параметри при дизајнирању двослојних просторних решетки	46
3.2.3 Методе подизања двослојних просторних решетки - утицај на планирање	47
3.3 Комплексне архитектонске форме за материјализацију просторним решеткама	50
3.3.1 Цилиндричне љуске	52
3.3.2 Куполе	54
3.3.3 Хиперболични параболоид - форма љуске	57
3.3.4 Комбиноване форме и добијање комплексних обликовања	58
3.4 Геометријске особине модуларних склопова - геометријска стабилност	60
4.0 Просторне решетки - системи и особине	62
4.1 Увод у савремене системе просторне решетки	63
4.2 Спојни елементи - чворне тачке конструкције	64
4.3 Метро КК систем	67
4.4 Орона СЕО систем	70
4.5 Нодус систем	72
4.6 Триодетски систем	74
4.7 Униструт или Модуспан систем	75
4.8 Системи без чворних елемената	76
4.9 Харли Кондер систем	77
4.10 "MAI SKY" и "CATRUS" системи	78
4.11 Модуларни "SPACE DECK" систем	80
4.12 "UNIBAT" и "SPACEgrid" системи	82
4.13 "ABBA Space Structures" модуларни системи	84
4.14 "CUBIC" систем модуларних просторних решетки	85
4.15 Материјали за материјализацију просторних решетки	86
5.0 Кровни покривачи - еластичне текстилне мембране	89
5.1 Затегнути текстилни покривачи – архитектонски и историјски контекст	90
5.2 Обликовање и проналажење оптималне форме	93
5.3 Материјали мембранских покривача	98
6.0 Стабилност и разни утицаји на просторне решетки	101

6.1 Сопствено и покретно оптерећење и атмосферски утицаји	102
6.2 Утицај вјетра	103
6.3 Утицај топлоте и отпорност на пожар	104
6.4 Сеизмички утицаји и решетке у трусним зонама	106
7.0 Дигитални прототипи просторних решетки на слободним формама	109
7.1 Интегрисани дизајн и техничка комплексност пројектовања аморфних просторних решетки	110
7.2 Алгоритамски приступ процедуралном моделовању и оптимизацији	112
7.3 Процедурално моделовање и принципи интегрисаног пројектовања	114
7.4. Комерцијални системи просторне решетки за материјализацију слободних форми	117
8.0 Анализа просторних решетки на слободним формама у савременој пракси.119	
8.1 “FERRARI WORLD” - концепт и анализа обликовања и конструкције	120
8.2 “HEYDAR ALYEV” културни центар – концепт и анализа обликовања и конструкције	123
8.3 Еден пројекат - концепт и анализа обликовања и конструкције.....	127
9.0 Обликовање савремених жељезничких станица	132
9.1 Жељезничке станице са аспекта обликовања и избора конструкције.....	133
III СТУДИЈА СЛУЧАЈА	142
10.0 Контекст и концепт	143
10.1 Анализа контекста – макро локација	144
10.2 Микро локација.....	145
10.3 Постојећа жељезничка станица у Бањој Луци.....	146
10.4 Концепт реконструкције крова	147
10.5 Материјализација нове кровне конструкције жељезничке станице.....	149
11.0 Пилот пројекат реконструкције крова жељезничке станице у Бањој Луци 150	
11.1 Основа приземља 1 : 200	151
11.2 Основа првог спрата 1 : 200	152
11.3 Основа конструкције просторне решетки 1 : 200.....	153
11.4 Основа крова 1 : 200	154
11.5 Пресеци 1 : 200.....	155
11.6 Изгледи конструкције 1 : 200	159
11.7 3Д пресеци.....	160
11.8 Погледи из ентеријера и екстеријера	162
11.9 3Д прикази	163
IV ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА	166
12.0 Архитектонске технологије дигиталног пројектовања и закључак	167
12.1 Практична употреба процедуралног моделовања просторне решетки на слободној архитектонској форми	168
12.2 Могућности процедуралног доласка до додатних информација о конструкцији.....	174
12.3 Закључак.....	176
V ЛИТЕРАТУРА.....	178
VI БИОГРАФИЈА	181

The background of the page is a complex geometric pattern. It consists of numerous thin, parallel red lines that intersect to form a series of white, irregular polygonal shapes. These shapes vary in size and orientation, creating a dynamic and textured visual effect. The overall color palette is a combination of a muted red and a clean white.

I УВОД

1.1 ОБРАЗЛОЖЕЊЕ ТЕМЕ

Циљ избора ове теме за истраживање је указивање на проблеме који прате процес употребе конструкција просторне решетке на слободним формама како са конструктивног становишта, тако и са аспекта ослобађања форме при пројектовању. Поставком хипотеза и детаљним истраживањем показало се да је могуће користити ове системе и њихову оправданост у конструктивном и естетском смислу. Рад ће садржавати теоретска истраживања као и дио које ће се бавити практичном употребом просторне решетке на слободној форми.

Теоријским истраживањем биће обухваћене области историје система просторне решетке, затим њихова примјена на слободним архитектонским формама и материјалима конструкције и кровних покривача, конструктивним особинама како материјала, тако и просторне решетке. Практични дио базира се на конструктивној примјени просторне решетке на слободним формама кроз студију случаја на пројекту нове кровне конструкције жељезничке станице у Бањој Луци. Комплексност геометријске форме биће изазов, због кога ће се размотрити употреба приступа процедурално дигиталног моделовања како би се направио виртуални прототип и олакшала израда техничке документације предложеног рјешења.

Узимајући у обзир технолошки напредак и инжењерску иновативност посљедњих двадесет година довели су до тога да одређени конструктивни системи постану далеко економски оправданији него што је то био случај раније. Доступност нових материјала, напредни процеси фабрикације, те креирање виртуелних прототипа редефинисали су основне принципе процеса пројектовања и подigli су на већи ниво мултидисциплинару сарадњу. То је довело да изградња комплексних конструктивних система постане значајно мањи изазов него раније ако се употребе технологије и праксе које су сазријевале деценијама.

Системи просторних решетки прошли су дуг историјски пут примјене, тестирања, учења на грешкама из прошлости и унапјеђивања да би постали саставни дио арсенала конструктивних система савремене праксе. Од примјене на мостовима, архитектонским објектима, слободностојећим надстрешницама терминала, у авионској индустрији, бродоградњи и многим другим областима ови системи су кориштени као основни склопови под разним условима у којима ће бити употребљени. Кроз истраживање сагледаће се које су све могућности које нуди употреба аморфне просторне решетке на само пројектовање и ослобађање форме, као и проблеме који ће се појавити.

Фокус истраживања се базира на конструктивној употреби и истраживању примјене система просторне решетке на конструкцијама слободне форме и самим технологијама пројектовања и документовања које укључују израду дигиталних прототипа и специјализованих алата за аутоматизовано моделовање дигитално моделовање. Процедурални системи моделовања могу ослободити пројектанта неефикасног и ручног документовања и оставити им више времена да се баве проналаском оптималне форме, естетским квалитетима и сагледавањем више варијанти дизајна и система ефикасније. Са друге стране документовање рјешења може бити значајно убрзано у поређењу са традиционалним методама. Чак и на глобалном нивоу, теоријски материјал који на озбиљном научном нивоу истражује потенцијале процедуралне израде дигиталних, математичко-логичких виртуелних модела је веома ограничен. Они се могу примијенити на оптимизацији фабрикационих система елемената решеткастих конструкција и унапјеђењу мултидисциплинарног пројектовања.

1.2 ХИПОТЕЗЕ И ПРЕТПОСТАВКЕ ЗА ИСТРАЖИВАЊЕ

Хипотеза подрзумјева својеврсни мисаони одговор на предмет истраживања, односно мању или већу вјероватноћу да постоји одређена појава као узрок или последица неке друге појаве. Хипотеза није насумична претпоставка, она је више од обичне претпоставке а мање од доказа поткрепљене теорије^[18].

Истраживање је фокусирано на просторне решетке у контексту слободних архитектонских форми са једне стране и технологијама оптимизације процеса дизајна, пројектовања, фабрикације и израде техничке документације. Базира се на проналажењу одговора на три постављене хипотезе. Долазак до одговора ће водити кроз теоријска и практична истраживања и поткрепљеност јасним доказима који произилазе из истих. Циљ истраживања је показати могућност примјене у нашем поднебљу, оправданост са свих релевантних аспеката савременог градитељства, као и изградити основни материјал за едукацију и унапрјеђење знања из области примјене и имплементације конструктивних система просторних решетки на слободним архитектонским формама.

- **Хипотеза 1:** Конструкције просторне решетке су примјенљиве на слободним архитектонским формама.

Чињеница је да на нашим просторним јеро ријетко, скоро, никако нисмо у могућности да наведемо примјер употребе конструкција просторне решетке на слободној форми. Истраживањем прве хипотезе претпоставља се да ће се доћи до закључка да су ови системи примјенљиви, сигурни и изведиви у пракси. Испитивање конструктивних карактеристика оваквих система је један од предуслова за прихватање и едукацију инжењерског кадра укљученог у планирање и пројектовање, а самим тим и мотивацију за употребу оваквих система.

- **Хипотеза 2:** Аморфне форме конструктивно материјализоване просторном решетком могу да премосте велике распоне, отворе, покрију и дефинишу простор.

Велики затворени простори који траже да буду покривени су одличан примјер за употребу просторних решетки. Њихова могућност обликовања и прилагођавања формама, као и потенцијал отварања великих фронта визура чини их идеалним за овакве просторе. Кроз истраживање и израду пројекта доградње и реконструкције крова постојеће жељезничке станице у Бањој Луци указаће се на све потенцијале и проблеме које носи употреба аморфних просторних решетки, као и одговоре на проблеме. Први утисак са одређеном урбаном средином се може остварити атрактивношћу амбијента при првом контакту. жељезничку станицу у Бањој Луци сматра се једном од таквих потенцијалних амбијенталних цјелина, односно “капијом града”.

- **Хипотеза 3:** Израдом дигиталних прототипа системом процедуралног логичко-математичког моделовања могуће је креирати системе и алате за дефинисање неограниченог броја варијанти дигиталног модела система просторне решетке, оптимизовати исти и олакшати процес фабрикације и материјализације.

Један од првих проблема са којим се може срести приликом пројектовања просторних решетки на слободним формама је сама геометријска комплексност структуре. Традиционални приступ пројектовању и дизајнирању форме и конструкције је неефикасан. Рјешавање ове проблематике може дубоко утицати на оправданост избора и имплементације просторних решетки, као и популаризацију у савременој инжењерској пракси нашег поднебља.

1.3 НАУЧНЕ МЕТОДЕ ИСТРАЖИВАЊА

Истраживање прве хипотезе односиће се на анализе екстерних утицаја на просторне решетке, али и на естетске квалитете конструкција на слободним формама. Заснива се на методи критичке анализе садржаја. Проучавањем доступне литературе, ранијег градитељског искуства и примјера презентоваће се релевантни подаци унутар предметне области овог дијела истраживања. Затим ће се синтезом релевантних података, добијених истраживањем, презентовати примјењивост конструктивног система просторне решетке на слободним архитектонским формама са историјског и савременог аспекта. У циљу испитивања ове хипотезе извршиће се анализа три савремена репрезентативна примјера архитектонских објеката чија слободна форма је подржана конструкцијом просторне решетке. Анализа ће се извршити путем методе студије случаја – индивидуална дескрипција. Након анализе извршиће се компаративна анализа наведених студија случаја ради упоређивања ранијих искустава, идеја, концепата, приступа проблематици, конструктивних карактеристика аморфних просторних решетки и анализе оправданости. Из ове анализе и синтезе ће се методом индукције (закључујући од појединачног ка општем) дефинисати конструктивне карактеристике просторне решетке на слободним формама и њихова употребљивост на истим.

Кроз испитивање друге хипотезе дефинисаће се разне сложене форме које се могу материјализовати употребом просторне решетке. Кроз израду идејног рјешења пројекта нове кровне конструкције жељезничке станице у Бањој Луци, као и методом прикупљања података *in situ*. Анализом локације и теоријским истраживањем тражиће се оптимално обликовање, позиција и габарити конструкције у складу са раније дефинисаним циљевима и предметним контекстом. Испитаће се однос форме и конструкције, као и њихов заједнички однос при уклапању и дефинисању амбијента. Самим архитектонским моделом конструкције у контексту унапрјеђивања постојеће станице, као и сагледавањем његовог уклапања у постојећу амбијенталну цјелину испитаће се поставка друге хипотезе.

Трећа хипотеза дефинише претпоставку да је могуће оптимизовати и олакшати процес израде конструкције, кроз израду процедуралног дигиталног прототипа. Истраживање тестираће се разне варијанте форме, стандардизовати и припремити прецизно сви елементи решетке. Мултидисциплинарни процес сарадње и пројектовање захтјева висок ниво детаља конструкције и саме форме. То укључује атрибуте склопа као што су позиције у простору, број и геометријске карактеристике елемената, идентификовање сличности између елемената система и документовање индивидуалних компоненти, као што су штапови и чворни елементи.

1.4 ОЧЕКИВАНИ ДОПРИНОС ИСТРАЖИВАЊА

Научни допринос истраживања обухвата:

- Синтезу и интеграцију свих релевантних знања из изучаване области.
- Отварање нових путева и могућности за наставак истраживања.

Практични допринос истраживања укључује:

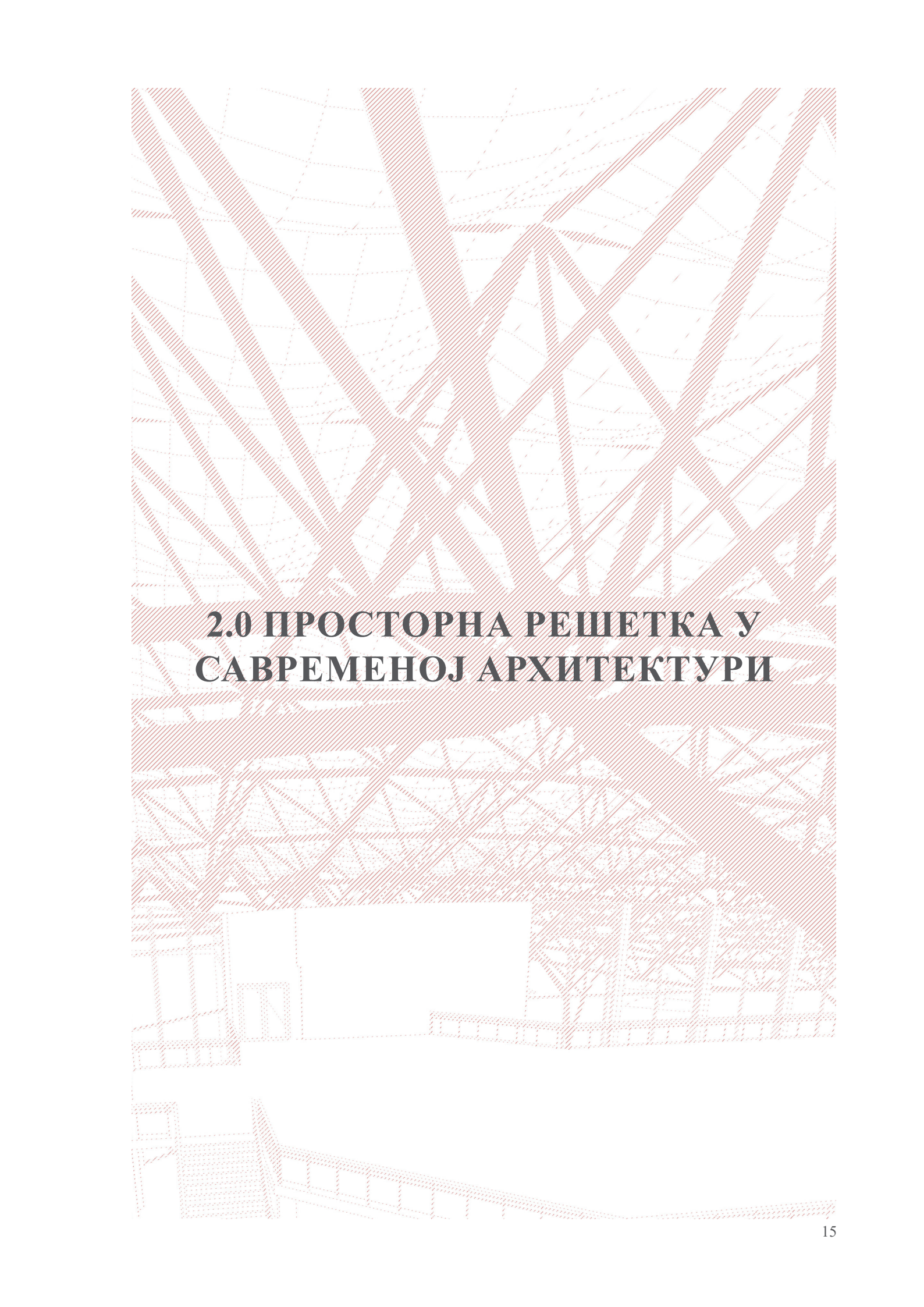
- Примјену система просторне решетке при дизајнирању слободних форми.
- Мотивацију за дубље исцрпно разматрање могућности примјене склопова просторне решетке на слободним формама.
- Унапрјеђење и модернизацију жељезничке станице у Бањој Луци, доприносећи повећању урбанитета посматране градске зоне и трансформацији амбијента.
- Синтезу релевантног едукативног материјала који може послужити као ресурс за све учеснике у процесу планирања и пројектовања, пружајући им интегрисан приказ свих релевантних знања и закључака из предметне области.
- Примјену детаљних информација из дефинисане области у процесу урбанистичког и архитектонског пројектовања и планирања.

Иако незаступљена код нас, конструктивна примјена система просторне решетке на слободним формама посједује велики потенцијал употребе у одређеним контекстима и амбијенталним цјелинама. Самом незаступљеношћу теоријског и практичног материјала постоји одређени ниво скептицизма када су у питању овакви системи и њихова оправданост. Ово су чињенице које су утицале на формирање идеје о истраживању специфичне области и проблематике.

Свеукупни очекивани допринос је синтеза релевантних чињеница које ће имати утицај на савремену архитектонску праксу, како локално, тако и регионално.



II ТЕОРИЈСКИ ОКВИР ИСТРАЖИВАЊА

The background of the page is a complex, abstract architectural drawing. It features a dense network of thin, light red lines forming a grid-like pattern. Overlaid on this are several thick, solid red lines that intersect at various angles, creating a sense of depth and structure. The overall effect is reminiscent of a technical drawing or a conceptual architectural plan.

2.0 ПРОСТОРНА РЕШЕТКА У САВРЕМЕНОЈ АРХИТЕКТУРИ

2.1 УВОД - ПОТЕНЦИЈАЛИ УПОТРЕБЕ ПРОСТОРНЕ РЕШЕТКЕ

Савремена архитектонска пракса интензивно истражује нове облике и форме, захтијева елегантна конструктивна рјешења која не задовољавају само аспекте стабилности и економичности него и естетске. У лепези разних рјешења пројектанти имају широк избор система које могу да употребе и на аморфним облицима. Један од тих је, свакако, просторна решетка која својом лакоћом и контролисаним усмјеравањем сила може да премости велике распоне, а при том да остане стабилна и сигурна. Због своје модуларне природе постоји могућност дизајнирања разних обликовања и употребе на различитим позицијама у архитектонским објектима.

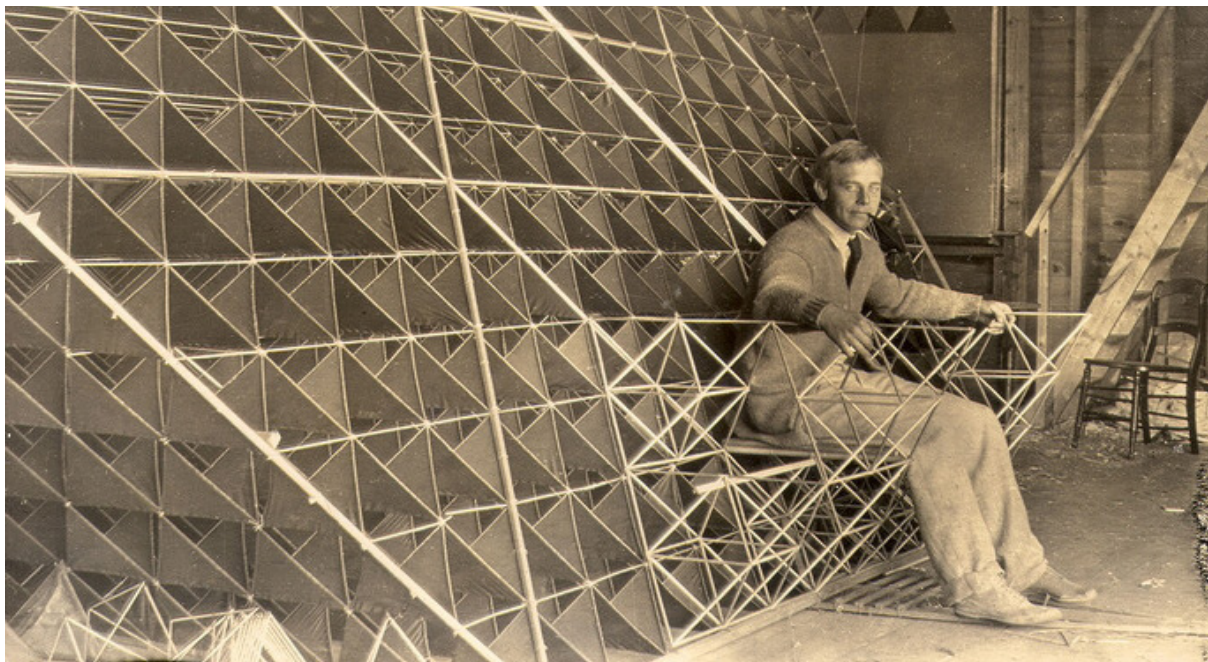
Просторна решетка као идеја и концепт за примање и преношење оптерећења није нов. Са историјом дугом више од једног вијека прошла је кроз разне фазе развоја и употребе од једноставних објеката торњева, који нису настањени људима, до једнопородичних кућа, луксузних тржних центара, хангара на аеродромима и војним објектима, у сакралној архитектури, и на спортским објектима импозантних димензија и распона. Поред изведених пројеката може се примијетити да су постојали покушаји креирања експерименталних неизведених објеката који су помјерали границе могућег у смислу конструктивних и естетских карактеристика оваквих конструкција и архитектонских форми.

Поред свих досадашњих сазнања на примјерима из историјско – архитектонског контекста не смије се заборавити и на уску повезаност развоја технологије производње материјала, машинске индустрије, као и рачунара и софтверских технологија које су значајно су убрзале и олакшале употребу просторне решетке. Могућности пројектовања дигиталних прототипа прије производње обезбјеђује, поред прорачуна модула и елемената конструкције, пројектантима да слободно обликују и истражују форме. Након година употребе и многих пројеката и даље се може, не ријетко, чути да су овакве конструкције скупе и неефикасне.

Особине решеткастих конструкција нуде многе потенцијале за употребу. Са естетског аспекта може се ослонити на модуларност система и лакоћу. Прихватањем ових особина отварају се могућности креирања разних облика форми. Пројектанти могу лакше обликовати простор и правити амбијенталне фокусне тачке у окружењу. Са аспекта модуларности система може се, као велики потенцијал, навести могућност фабрикације и стандардизације система. Иако се дизајнирају аморфни облици увијек постоји простор за стандардизовање конструктивних елемената. Ово посебно долази до изражаја на планарним просторним решеткастим конструкцијама гдје је могуће планирати систем од неколико елемената који се даље могу масовно брзо и ефикасно производити. На овај начин се директно утиче на економски аспект исплативости употребе просторне решетке, као и на шире прихватање исте. Решеткаста конструкција може се материјализовати употребом широке палете материјала. Иако су најчешће од челичних елемената, неријетко се могу примијетити дрвене па чак и стаклене конструкције. Напредак у технолошким процесима развоја производње композитних и синтетичких материјала испратили су пројектанти и инжењери. Они су материјализовали најпознатије примјере употребе просторне решетке у историји архитектуре.

Материјали високих конструктивних перформанси употребљени на правилно изабраном систему штапова могу да премосте изузетне распоне са релативно малом конструктивном висином. Поред челика, могу се користити дрвени штапови решетке. Дрво за конструктивну употребу спада у релативно јефтине и доступне материјале. Може да има високе конструктивне карактеристике, нарочито лијеplено ламелирано дрво. Не треба заборавити стакло, које је скуп материјал за директну масовну употребу, али постоји одређен број конструкција гдје су пројектанти жељели направити транспарентну

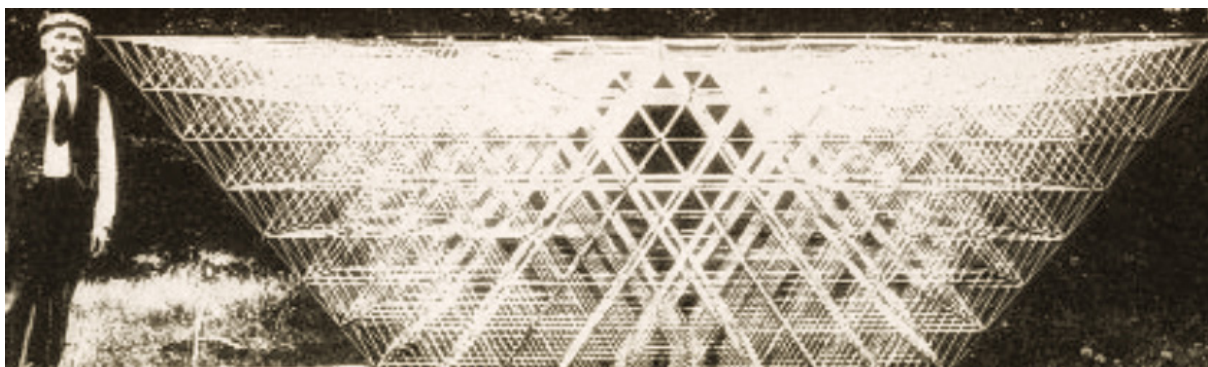
визуелну комуникацију између ентеријера и екстеријера. Као потенцијални проблем при имплементацији оваквих система намеће се монтажа и постављање конструкције у конструктивни оквир објекта. Са аспекта историјског контекста могу се примијетити системи који су елегантно дизајнирани и конструктивно ријешени, али гдје се није много водило рачуна о фази монтирања, па је ова фаза постајала најтежа у процесу физичке материјализације. Резултати имплементација на овај начин обично су значили драстично поскупљење, креирање привремених објеката за монтажу итд.



Слика 1. Александар Грахам Бел са прототипом просторне решетке (1911. година). Фотографија дјело Валдона Фасета (*Waldon Fawcett*).

2.2 РАНИ РАЗВОЈ ПРОСТОРНИХ РЕШЕТКИ - ИСТОРИЈСКИ ПРЕГЛЕД

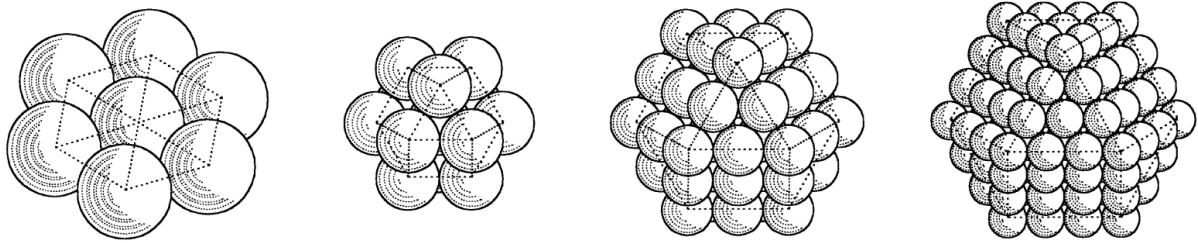
Нови материјали, бржи начини прорачунавања конструктивних карактеристика решеткастих конструкција, јефтинији и ефикаснији системи фабрикације грађевинских елемената довели су до тога да се популаризује употреба просторне решетке. Иако је годинама уназад важила за скуп систем, многи пројекти су демантовали увријежено мишљење и показали да је могуће јефтино и ефикасно пројектовати и материјализовати просторну решетку као скелет за подршку слободних, али и правилних архитектонских форми. Разноврсност система који су развијени на овим пројектима говори да је просторна решетка прошла дуг пут од концептуалних рјешења Александра Грахама Бела (*Aleksander Graham Bell*, на слици 1 и 2) до великог броја стандардизованих система који чине палету разноврсности у употреби на архитектонским објектима. Поред својих позитивних карактеристика, временом су савладани основни проблеми употребе и уградње система просторне решетке. Пут је био дуг кроз разне пројекте различитих функционалних намјена и карактеристика. Постављена су правила, записане су праксе и искуства као темељи даљих истраживања и практичних примјена. Почетак XX вијека доноси многе радикалне умјетничке покрете као одговор на технолошки напредак али и раскидања са традицијом^[16].



Слика 2. Рани експериментални радови на просторној решетки. Рад Александра Грахама Бела на почетку XX вијека. Фотографија дјело Валдона Фасета (*Waldon Fawcett*).

Инжењери су одувијек истраживали нова и напреднија рјешења, како на пољу форме, тако и на пољима развоја физичких конструктивних система који ће подржати идеју о обликовању и материјализацији визије коришћења простора. Затворити простор и од њега направити амбијент за живот и рад су основне премисе постојања ових грана инжењерског и умјетничког аспекта архитектуре. Искуством, посматрањем, проучавањем, тестирањем дошло се до сазнања која гарантују сигурност и употребљивост у конструктивном и естетском погледу. Системи просторних решетки су једна од тих.

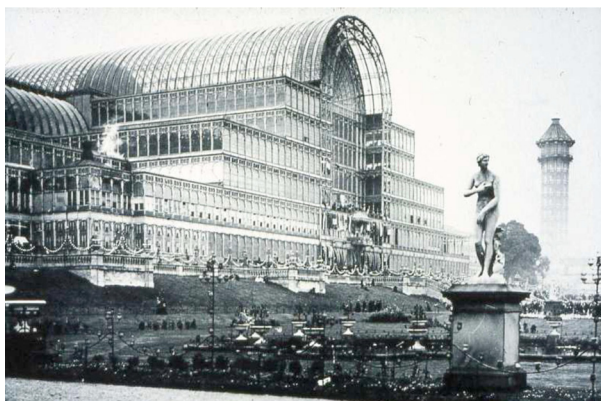
Кроз историју употребе материјала на архитектонским објектима употребљавани су разни материјали чије су се карактеристике побољшавале временом. Поред свих материјала, до средине XIX вијека, примат су имали камен, дрво и опека. Метал се због недостатка, споре и скупе експлоатације, користио углавном за елементе спојева елемената од других материјала. Камен и опека су материјали који изузетно добро подносе силе притиска и самим тим су се наметнули као градивне јединице за форме зидова и сводова. Њихов основни недостатак у потреби на конструкцијама великих распона су тежина, грануларна форма и лоше физичке карактеристике при прихватању сила затезања, крти су материјали, који брзо попуштају под силама које их затезу.



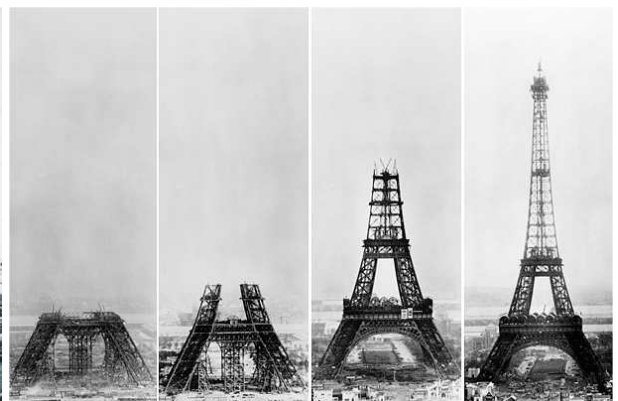
Слика 3. Најближе позиционирање сферичних елемената, студија Ричарда Бекминстера Фулера. Цртеж дјело Дона Чилтона (*John Chilton*).

Изддржљиво дрво као конструктивни материјал има добре карактеристике при силама притиска и затезања, али доноси друге проблеме при проналажењу и експлоатацији. Неки од тих су ограничења по питању дужине и попречног пресјека елемената због саме природе дрвета. За конструкције великих размјера спајање дрвених елемената представља проблем. Заштита од пожара је велики изазов када су у питању дрвене конструкције. Употреба дрвета за премоштавање великих конструктивних распона посебно је изражена у Јапану. Најпознатији примјер оваквих архитектонских конструкција је на Тодаици храму (*Todaiji Temple* изграђен 1712. године) у Нари, Јапан. Нестао је у пожару, а премоштавао је распон^[22] од 59 m са 52 m са 49 m. Иако су ови материјали често кориштени за конструкције великих распона показали су се као тешки и масивни, физичке карактеристике им често нису одговарале оптерећењу које преносе. Један од њих, а можда и највећи, је влага.

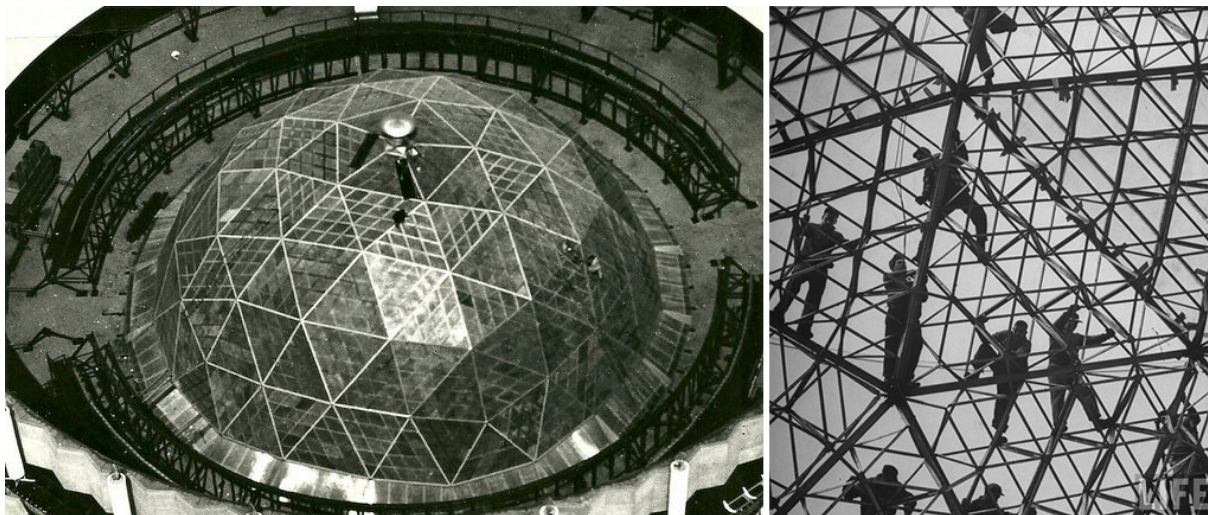
Жељезо се почело појављивати у већим количинама у вријеме индустријске револуције. Напредак у методама проналажења и достављања, као и огромна потражња на тржишту довели су до тога да буде далеко доступније него раније. Самим тим у архитектури размишља се на креативан начин о могућностима употребе челика и жељеза. Ова експлоатација материјала доводи до повећавања могућности премоштавања распона, као и да архитектонске форме расту у висину. Хемичари и технолози дају свој допринос, тако да се постепено креирају нови и комбинују постојећи материјали који имају израженије карактеристике, на примјер на силе затезања, притиска, торзије и слично. Не треба занемарити и жељезничку индустрију која је битно утицала на развој и потражњу за овим материјалима, и употребом истих. Жељезнице и њени пратећи објекти (станице, мостови, хангари за сервис, перонске конструкције итд.) су архитектонски објекти који нису имали традицију грађења и стилова, тако да су били склони употреби нових конструкција, материјала, форми и генерално биле су полигон за тестирање. Доступност и савладан процес дизајнирања квалитетних материјала



Слика 4. Кристална палата, дјело Џозефа Пакстона (*Joseph Paxton*) за Велику изложбу 1851. године у Лондону. Аутор фотографије непознат.

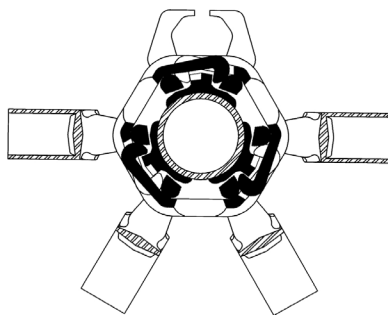


Слика 5. Аиџелов торањ у Паризу, име добио по инжењеру Густаву Ајџелу (*Gustave Eiffel*). Конструисан за Велику свјетску изложбу 1889. године. Аутор фотографије непознат.



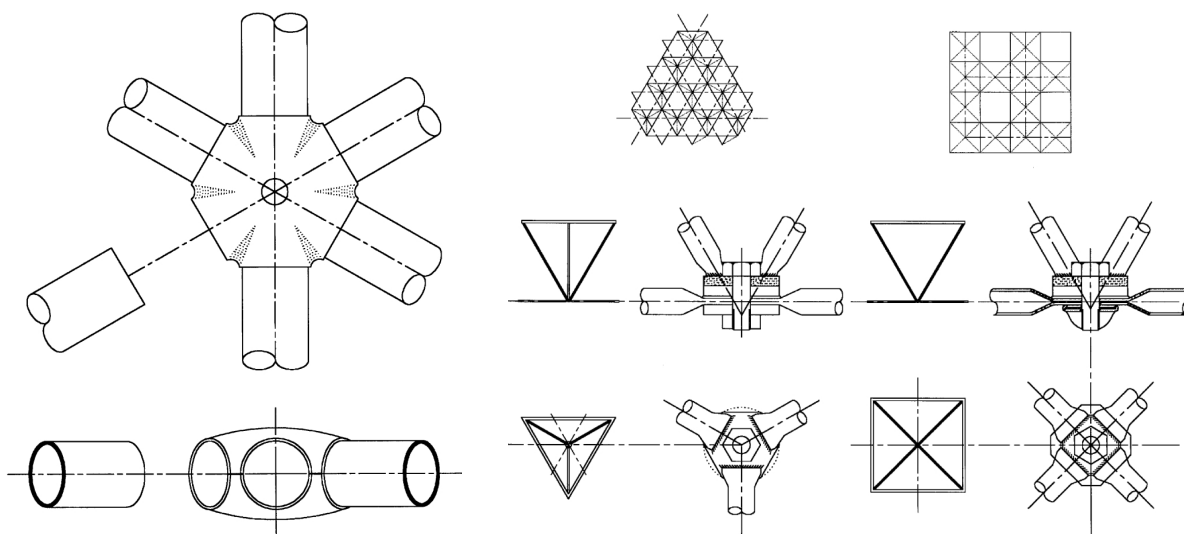
Слика 6. Купола Форд Ротонда зграде у Дирборну, Мичиген. Конструисана употребом великог броја штапова употребом Октет система који је развио Ричард Бакминстер Фулер (*Richard Buckminster Fuller*). Фотографија дјело Катарине Х. Ферли (*Katarina H. Fairley*).

челика и жељеза, као и нове функције објеката који до тада нису постојали, били су права подлога за храбро експериментисање на пољу форме и конструктивних рјешења од челичних елемената просторних решетки. Многи конструктивни системи ,укључујући и просторне решетке, имају потенцијал да буду модуларни. Овај концепт је доказан још 1852. године на металној конструкцији Кристалне Палате (*Crystal Palace*) у Хајд Парку (слика 4) у Лондону. Цијели процес креирања од идеје до реализације трајао је само шест мјесеци. Након ове конструкције гради се импресивна конструкција Ајфеловог Торња у Паризу (од 1897. до 1899. слика 5). Грађена да слави сто година од велике Француске Револуције постала је један од највећих успјеха архитектонског инжењерства. Витка форма висока око 115 m ^[22] са модуларном челичном конструкцијом која је и након једног вијека у првобитном стању. Ово је пројекат који је изискивао огромну инжењерску иновативност да би се реализовао. Послужио је као угледни примјер за употребу челичних конструкција са модуларним шематским понављањем (слика 2). Александар Грахам Бел (*Alexander Graham Bell*), творац телефона, је најранији проналазач који је приказао нешто што се данас зове просторна решетка. Лагане, чврсте, модуларне тродимензионалне формације штапова које су имале могућност да се масовно фабрикују и производе. Бел је експериментисао са оваквим конструкцијама и креирао два основна типа, октаедарску и тетраедарску форму. Кроз развој концепта конструкције, Бел, је дошао до закључака да геометријски облик утиче на носивост и понашање елемента при оптерећењу силама. Он



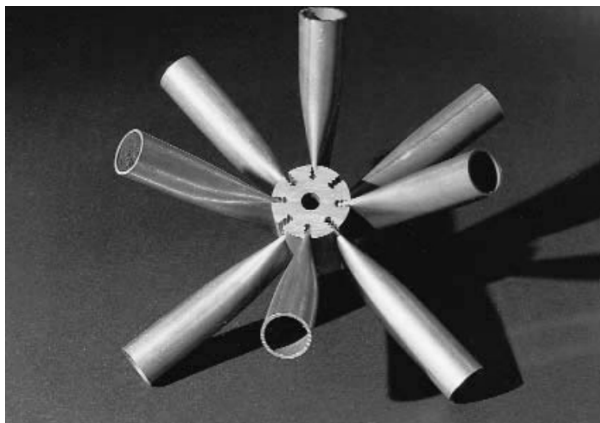
Слика 7. Универзални конектор Конрада Вочмена који се састоји од четири стандардна елемента и дозвољава спајање до двадесет цјевастих штапова у једном зглобном елементу. Цртеж дјело Конрада Вочмена (*Konrad Wachman*).

је решетке имплементирао у многе своје пројекте као што је осматрачки торањ у мјесту Бен, Брег у САД који је конструисан 1908. године.



Слика 8 лијево. Традиционални С.Д.Ц. систем из 1957. године. Овај систем захтијева варење штапова за зглобне елементе на лицу мјеста. Развио га је Стефан де Шато. Илустрација Џон Чилтон после С. де. Шатоа (*John Chilton, S. du Chateau*).

Слика 9 десно. Пирамитек систем из 1960. године. Базиран је на пирамидалним модулима који могу имати троугаону, квадратну или хексагоналну основу. Дјело је Стефана де Шатоа. Илустрација Џон Чилтон после С. де. Шатоа (*John Chilton, S. du Chateau*).



Слика 10 лијево. Триодетски систем развијен 1960. у Отави, Канада. У потпуности се састоји од алуминијумских штпова и спојних елемената. Фотографија власништво Глин Холса (*Glyn Halls*).

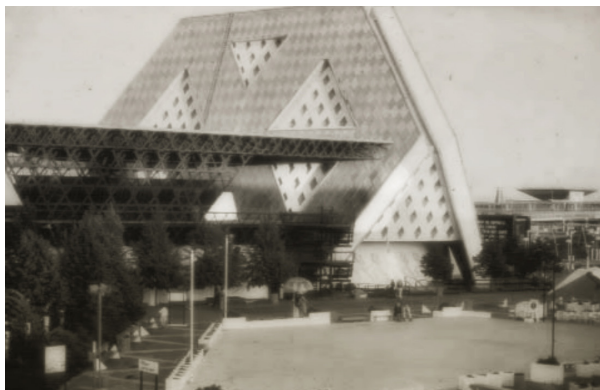
Слика 11 десно. Пројекат Ричарда Бакминстера Фулера, конструисан за Експо сајам 1967. у Монтреалу, Канада. Фотографија дјело Алистера Гарднера (*Alastair Gardner*).

Упркос Беловом развоју лаганих модуларних елемената они нису директно употребљавани у архитектури све до проналаска прве верзије МЕРОсистема на почетку двадесетог вијека. Овај систем који је дјело истраживања др. Макса Менгерингхаузена (*Dr. Max Mengerinhausen*) у Њемачкој. Заслуга ових система је то што су прва доступна рјешења за широку употребу у конструкцијама разних намјена у архитектури. Систем је имао једноставан и ефикасан концепт, састојао се од планарних елемената који су спајани у чворним тачкама помоћу система кугли на сутицању штапова. Ова конструкција се састојала из два слоја, што је прототип модерних двослојних просторних решетки. Упоредо са појавом и развојем МЕРО система и њиховом популарношћу развијају се системи са префабрикованим модулима, који се брзо и ефикасно производе и такође постају доступни широкој употреби^[40]. Увођењем концепта фабрикације и масовне производње постављају се темељи за даљи развој и спуштају се, драстично, трошкови имплементације истих. Појавили су се педесетих година прошлог вијека у Британији. Један од најзаслужнијих инжењера је Денинг Чард (*Denning Chard*) који је развио Деск систем (*Desk system*). Систем се блиско ослањао на префабрикацију, а састојао се од челичних пирамидалних модула. Са малим варијацијама система је постигао огромну популарност и најчешће се употребљавао на конструкцијама кровова. Сличан модуларни систем под именом Ненк (*Nenk*) развијају инжењери у министарству за грађевинарство Британије у сарадњи са Денингом. Кориштен је у почетку за градњу војних објеката, односно барака и хангара, раних шездесетих година XX вијека. Премоштавао је распоне¹ до 13,1 m^[22] са нормалним покретним и статичким оптерећењима на крову. Оно што доноси овај систем, као и остале просторне решетке јесте слобода унутрашњег простора од стубова и других конструктивних елемената.

У временском распону од педесетих до шездесетих година просторне решетке постају опште прихваћене и употребљавају се на скоро свим крајевима планете. Архитекти експериментишу са разним врстама форме и новом естетиком коју нуде ове конструкције. Такође се убрзано развијају и истражују нови системи спојева модуларних елемената и њихових градивних јединица штапова. Познато име међу великим архитектама је Ричард Бакминстер Фулер (*Richard Buckminster Fuller*) који такође даје свој допринос². Он у САД-у открива своју варијанту поменутих система под именом Окта решетке (*Octa*

1 Значајно је истраживање Џона Чилтона (*John Chilton*) у дјелу *Space Grid Structures (John Chilton)*, Oxford Architectural Press, Oxford, 2000.

2 Рад Ричарда Б. Фулера (*Richard B. Fuller*) оставио је велики утицај на рани развој просторне решетке. Своја истраживања објавио је у дјелу *The Dome Builder's Handbook (Fuller R. B.)*, Running Press, Philadelphia, 1973.



Слика 12 лијево. Модуларна вишеслојна просторна решетка павиљона “Човјек произвођач” на Експо сајму у Монтреалу 1967. године. Фотографија власништво Камлех Парик архитектонске асоцијације (*Kamlesh Parikh, Architectural Association Photo Library*).

Слика 13 десно. Пирамида и Вулкан (познати ка Жиротрон). Чине их конструкције од вишеслојних просторних решетки. Експо 1967. године, Монтреал, Канада. Власник фотографије Фос Продукција (*Fos Productions*).

truss слика 6). Име им је дериват форме која их чини, а то је октаедар-тетраедар. Чине га линијски елементи који су континуално спојени у чворним кутлама, које се увијек спајају са наредних дванаест елемената. Неки од пројеката развијених употребом Окта решеткастог система су Форд Ривер Руж фабрика (*Ford River Rouge factory*) у Мичигену из 1954. године. Конструкција на овој згради је хемисферичне форме, пречника 29,2 m што је био импресиван резултат за временски период^[22]. Временом су се појављивали разни системим, а један од њих који заслужује посебну пажњу био је дјело америчког конструктора Конрада Вочмана (*Konrad Watchmann*) 1958. године. Његов систем који се састојао од иновација на пољу спојних елемената штапова, односно чворова решетке. Основна премиса са којом је Конрад Вочмена развио своју варијанту (слика 7) је да систем просторне решетке треба моћи монтирати и демонтирати, као и да исти треба лако да се проширује додавањем нових штапова без уклањања постојећих. Самим тим је посветио велику пажњу чворним елементима које је назвао универзалним јер су имали могућност да приме било каквих максимално 20 штапова у једној тачки конструкције. Овај хангар је такође био решетка у два слоја. Горњи слој који је носио штапове у правцу простирања конструкције имао је већи пречник, а доњи (дубински) слој штапова мањи пречник. О успјешности рјешења говори податак да је на градилишту за склапање модула конструкције био потребан само основни ручни алат.

Штефан Шато (*Stefan de Chatou*) истражује и проналази тросмјерни С.Д.Ц. систем (слика 8), 1958. године, који захтијева, супротно Вачмановом систему, да се велика количина посла обавља на самом градилишту. Челични елементи се трајно спајају варењем, нераскидивом везом. Такође је развијао и хексагоналне (шесто угаоне) модуларне просторне решетке. Канадски инжењери су дали свој допринос у раној фази развоја решеткастих конструктивних система.

Триодетски систем је користио примарно алуминијум за материјализацију својих модуларних елемената штапова и чворних спојева^[29] (слика 10). Своју прву употребу имао је 1960. године у Канади. Употребљени су издужени цјевасти елементи који су се сужавали у плочасте равне крајеве, а исти су ковани на крајевима тако да су се уклапали са осталим штаповима без посебног зглобног елемента. Конструисани су многи прототипи од дрвета да би се пронашла оптимална форма штапова. Рани експериментални прототип демонстриран је на конструкцији хангара за авионе. Ова просторна формација штапова је била потпуно расклопљива и способна за брзу и ефикасну демонтажу. Овим потезом канадски инжењери су размишљали о битним карактеристикама као што су могућности фабрикације, а самим тим и економској компоненти при избору система просторне



Слика 15. Тошиба ИХИ павиљон на Експо сајму 1970. године у Осаки, Јапан. Састоји се од тетраедалних модула које је пројектовао Кишо Курокава. Фотографија власништво Денис Кромтон архитектонске асоцијације (*Dennis Crompton, Architectural Association Photo Library*).

решетке. Битан објекат развијен овим системом је и холандски павиљон на Експо (*Expo 1967*) изложби 1967. године. Процес грађења ове импозантне конструкције ослањао се на једну битну карактеристику триодетског система, а то је модуларност и склапање на лицу мјеста. Комплетна форма изграђена је на предвиђеној локацији без посебних метода подизања конструкције, а то је употребом класичне методе монтаже и постављања на предвиђену локацију. Вријеме потребно за грађење је самим тим, било изузетно брзо и ефикасно. Куполу су чиниле десетине хиљада штапова од алуминијума. На мјестима највећих оптерећења на доњем дијелу конструкције инжењери су одлучили да поставе неколико хиљада челичних штапова, због веће носивости челика у односу на алуминијум при заданом оптерећењу. Алуминијумски конектори су кориштени у чворним тачкама. Право признање за свој рад, Ричард Бакминстер Фулер, добио је конструисањем куполе америчког павиљона на Експу 1967.године у Монтреалу (слика 11). Решетка која је била костур објекта, дизајнирана је у сарадњи Бекминстера са компанијама Садао, Геометрикс, и Симпсон, Гамерц и Хегер (*Sadao Inc., Geometrics Inc., and Simpson, Gumpertz and Heger Inc.*). Конструкција је двослојна триангулисана хемисфера на спољашњем слоју, а шестоугаона на унутрашњем.

Експо у Монтреалу 1967. се показао као јако битна изложба за развој, прихватање и популаризацију просторних решетки. Поред горе наведена два павиљона још два значајна су „Човјек истраживач“ (*Man the Explorer*) и „Човјек произвођач“ (*Man the Producer*). Они су тематских павиљони конструисани од стране архитеката Афлек, Десбаратас, Димакопулос, Лебенсолд и Сисе (*Affleck, Desbarats, Dimakopoulos, Lebensold, Sise*). И они су изабрали модуларну решеткасту конструкцију. Представљају рану студију изводљивости дизајнирања стамбеног простора велике запремине, пројектованог употребом модуларних малих елемената решетки.

На сајму Експо у Монтреалу најрепрезентативније мјесто заузимала је вишеслојна

просторна решетка висине више од 50 m под именом „Пирамида“ и „Вулкан“³ (*Pyramid and Vulcan, слике 12 и 13*), такође позната као Жиротрон (*Gyrotron*). Ово је дјело архитеката Шона Кенија, Џорџа Ђурковића и инжењера Бојда Аугера (*Sean Kenny, George Djurkovic, Engineer: Boyd Auger*) састављена од великог броја алуминијумских цјевастих елемената. Подконструкција и облога су примијењени са унутрашње стране, чиме је објекат поносно изложио своју решеткасту конструкцију са вањске стране.

Нове технологије се појављују у вријеме Експо сајма у Монтреалу. Почињу се развијати рачунари и софтверске апликације које омогућавају инжењерима да много лакше прорачунају комплексне конструкције. Напредак омогућава архитектама да слободније пројектују форме архитектонских објеката. Сигурнији прорачуни такође доприносе широј популаризацији. Током 1960-их и 1970-их година почетна пионирска истраживања и експерименти на пољу дизајна система просторних решетки мијења наредна генерација инжењера. „*British Steel Corporation*“ развија Нодус систем малог димета, софистицирани стандардизовани чворни елементи прорачунати да прихвате и споје цјевасте елементе које производе стандардизовано разних дужина и конструктивних карактеристика. Сви елементи су тестирани на отпорност у тестном центру. Тиме су потврђени емпиријски прорачуни у сигурном практичном окружењу. Сигурност у прорачуну је јако битан сегмент развоја решеткастих конструкција јер гарантује безбједност корисника од стране инжењера конструктора.

Олимпијске игре у Мексико Ситију одржане су 1968. године, за које архитекте Феликс Кандела, Антони Пејри и Кастенада Тамборел (*Felix Candela, Antoni Peyri and Castenada Tamborrel*) дизајнирају спортску дворану. Носиву конструкцију чини серија укрштених лукова која се развија у двослојну двоструко закривљену тродимензионалну форму са конструкцијом просторне решетки^[22]. Покривена бакарним покривачем одише једноставношћу облика у простору. Као и у Монтреалу, и сајам Експо у Осаки, доноси неколико пројеката који се баве просторним решеткама на захтјевним архитектонским формама. Најмаркатније обликовање на изложби је огромна решетка димензија 290 m са 110 m. Своје оптерећење преноси на само шест стубова висине^[22] од 30 m. За дизајн и обликовање су залужни архитекти Кензо Танге и инжењер Јошикацу Цубои (*Kenzo Tange, Yoshikatsu Tsuboi*).

Метаболисти су пројектовали неколико павиљона у Осаки. Један од њих је Експо торањ, дјело Кјунорија Кикутакe (*Kiyonori Kikutake*). Скоро 1500^[29] модула облика тетраедра чине решеткасту конструкцију Тошиба ИХИ (*Toshiba IHI*) павиљона који је такође дјело Курокаве уз павиљон „Такара Бјутилион“ (*Takara Beautilion*). Последњи је материјализован употребом само четири модула који су спојени нераскидивом везом. Ова конструкција је двослојна. Монтажа конструкције извршена је за неколико дана. Префабрикована форма унутрашњег изложбеног простора накнадно је убачена у вањску конструкцију. На овом примјеру види се како фабрикација и паметно дизајниран систем понављања елемената играју велику улогу. Цијели објекат изграђен је у временском оквиру од седам дана. Напредак у развоју просторних решеткастих структура може се уочити на примјерима премоштавања великих распона. Један од таквих је објекат хангара за сервисирање авиона британског ваздухопловства. З. С. Маковски (*Z. S. Makowski*) је архитекта одговоран за пројекат. Замислио је вишеслојну конструкцију којом је премостио 65 m распона^[22]. Све већа употреба хладно ваљаног челика, почетком 1980-их, доводи до развоја јефтинијих и лакших система⁴ као што је „*Harli*“, који се појавио у Аустралији. Овај систем је успјешно потиснуо употребу традиционалних порталних носача. Нови системи попут „*CUBIC Space*“, „*Frame SPACEgrid*“ и „*Condor Harley*“ појављују се у

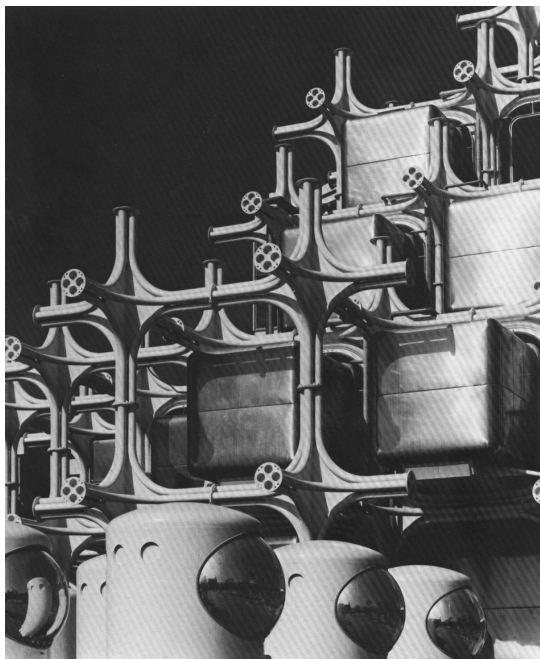
3 Детаљна анализа конструкције објављена у научном раду *Space Grid Structures* (John Chilton), Oxford Architectural Press, Oxford, 2000.

4 Детаљна анализа лакших система просторне решетки може се пронаћи у *Analysis, design and construction of steel space frames* (G.S. Ramaswamy, M. Eekhout, G.R. Suresh), Thomas Telford, London, 2002.

Британији. Ови системи су модуларни, префабриковани и стандардизовани.

Историјски контекст и преглед дјеловања битан је за разумијевање савремене проблематике просторне решетке. Наведени најбитнији примјери и системи просторних решетки нису једини, али су свакако најутицајнији на савремену праксу. Доприносили су томе да данас имамо просторну решетку као саставни дио конструктивних рјешења. Инжењерска иновативност и истраживање форме помјерили су границе могућег у временском контексту и утабили су стазе будућим генерацијама градитеља.

2.3 ПРОСТОРНА РЕШЕТКА У АРХИТЕКТОНСКОМ КОНТЕКСТУ - ПОТЕНЦИЈАЛИ ОБЛИКОВАЊА



Слика 16 лијево. “Takara Beautilion” павиљон на Експо сајму 1970. године у Осаки, Јапан. Састављен од шестокраких круто спојених модула формира кубичан тродимензионални растер. Фотографија власништво Ричард Роналд архитектонске асоцијације (Richard Ronald, Architectural Association Photo Library).

Слика 17 десно. “Takara Beautilion” архитекте Киша Курокаве. Фотографија власништво Ричард Роналд архитектонске асоцијације (Richard Ronald, Architectural Association Photo Library).

Утицај нових конструктивних система оставио је траг на архитектонској форми и промишљању. Просторна решетка се данас употребљава на разноврсним архитектонских форми. Кроз кратке приказе значајних примјера примјене просторних решетки на правилним и неправилним формама анализирани су исте са аспекта обликовања⁵. Технолошки напредак задњих четрдесет година утицао је на могућности развоја конструкција и битан је јер доноси највећи број иновативних рјешења и значајно помјерања граница.

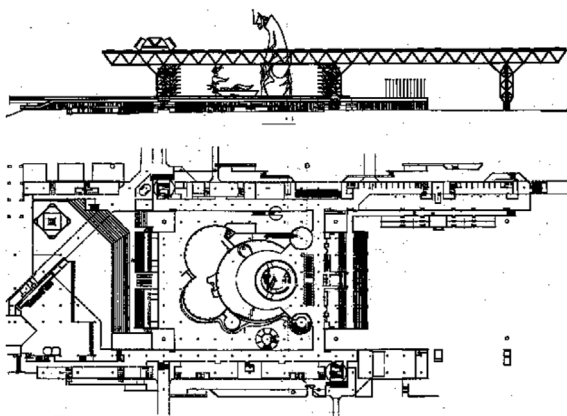
После сајма Експо 1967. (*Expo 1967*) године и популаризације просторних решетки, долази период напредне стандардизоване производње модуларних система решетки. На Експо сајму 1970. године у Осаки, Јапан, Кензо Танге (*Kenzo Tange*) пројектује павиљон димензија^[29] 290 m са 110 m (слика 18 и 19). Кровна конструкција је материјализована употребом просторне решетке. Архитекта се одлучио да направи велики кружни отвор на средини крова кроз који је отворио простор за торањ назван „Сунце“ да продре кроз

5 Познате су анализе Проф. др. Џона Чилтона (*John Chilton*) у којима се бавио односом конструкције са техничког аспекта и утицаја на естетски доживљај архитектонског објекта. Један дио анализе објавио је у дјелу *Space Grid Structures* (*John Chilton*), Oxford Architectural Press, Oxford, 2000.

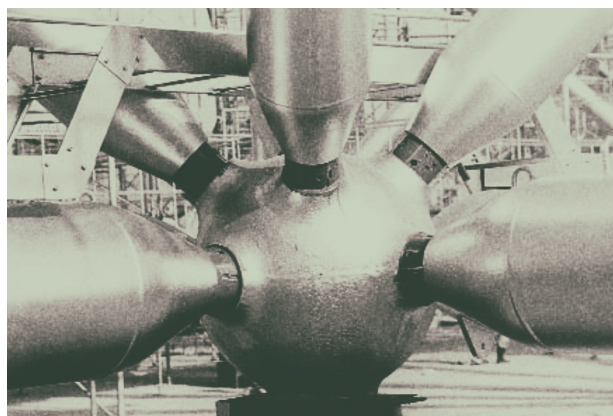


Слика 18. Поглед на кровну конструкцију “Симбол зоне” на Експо сајму 1970. године у Осаки, Јапан. Фотографија дјело Мамору Кавагучија (*Mamoru Kawaguchi*).

форму и разбије монотонију равне плоче крова. На овако великој конструкцији цијеви штапова решетке крећу се од 400 *mm* до 325 *mm* за дијагоналне елементе^[29] (слика 20). Линија објекта наставља се са кровне решетке на стубове, који су направљени од идентичних модуларних елемената. Велики број стандардизованих модула тражио је и посебну пажњу при фабрикацији, захтијевана је велика прецизност да се не прекорачи укупна толеранција, која би се кумулативно накупила сабирањем малих одступања на великом броју модула. Генерални захтјев свих система је прецизност при спровођењу унутрашњих сила које се уобичајено сутичу на пресеку осовина штапова у чворним тачкама. Ово је иновативно рјешење, за то вријеме, које дефинише транспарентна решеткаста конструкција. Покривач крова је посебан за овај временски контекст и састоји се од јастука који се налазе у квадратним пољима другог слоја решетке. Јастуци пропуштају свјетлост. То је омогућено употребом полиестера, као материјала покривача,



Слика 19 лијево. Источни поглед и основа “Симбол зоне”, Експо у Осаки 1970. године. Фотографија дјело Мамору Кавагучија (*Mamoru Kawaguchi*).



Слика 20 десно. Спој чворног елемента и штапова на “Симбол зона” павиљону. Архитекта Кенцо Танге. Фотографија дјело Мамору Кавагучија (*Mamoru Kawaguchi*).



Слика 21 *лијево*. Нусатсум кућа пројектована 1978. године. На слици је екстеријер са формом која фантастично комуницира са окружењем. Употреба природних материјала и стјеновито залеђе креирају сликовит амбијент. Фотографија дјело Р. Г. Сатервајта (*R. G. Satterwhite*).

Слика 22 *десно*. Ентеријер Нусатсум куће показује форму неправилног полиедра који отварањем поља ствара динамичан амбијент. Фотографија дјело Р. Г. Сатервајта (*R. G. Satterwhite*).

како би служили као заштита од ултраљубичастог зрачења.

Да просторна решетка може да материјализује разне геометријске форме показује објекат Нусатсум (*Nusatsum*) у Канади. У времену стандардизације породичних кућа, ријетко се срећу обликовања која бјеже од кубичног сведеног облика. Доминацију ортогоналне форме становања изазвао је архитекта Рендал Сатервајт (*Randall G. Satterwhite*) у свом пројекту куће Нусатсум (слика 21 и 22). База форме је облик тетраедра и октаедра који симулирају форму планине која доминира локацијом. Употреба овакве конструкције на кући Нусатсум је занимљива из разлога што је корисна запремина објекта дефинисана и зепремински прожета елементима решетке. Ова једноставна симбиоза конструктивног и естетског чини објекат уникатним узимајући у обзир временски контекст. Животни простор се одвија унутар модула решетке. Избор дрвета као основног материјала ове конструкције употпуњује јединство ентеријера и екстеријера (слика 23).

Најчешћа примјена просторних решетки је на крововима разних форми и етажним плочама. Ту премоштавају велике распоне и чине простор слободним без много конструктивних елемената у ентеријеру. На пројекту Кристалне катедрале (*Crystal cathedral*) у Гарден Грову у Калифорнији може се примјетити оригинална употреба решетке, која чини зидове. Сачињени од штапова и спојница (слика 25) који се уздижу у висину и чине основну форму објекта сведеног на фасаду која је разиграна и динамична. Црква која је потпуно омотана решетком која асоцира на чипкасте украсне детаље са барокних цркава (слика 24). Модерним објектом, цркву, чини употреба материјала, великих стаклених површина и метала за модуле конструкције. Оваквом материјализацијом остварена је прозачна и отворена корисна површина (слика 26). Цркву упечатљивом чини и ентеријер који је освјетљен кроз велике стаклене површине које обликују зидове и сјенкама од конструктивне решетке, динамичност простора на овај начин долази до изражаја.

Интересантан примјер за студију утицаја форме на употребу решетке је Национални изложбени центар у Бирмингему (*The National Exhibition Centre and Birmingham International Arena*), Велика Британија (слика 27). Пројекат са собом носи највећу конструкцију направљену помоћу стандардизованог Нодус система. Дворана је сачињена од модула решетке који су префабриковани и ослоњени на растер стубова. Овакав систем је савршено уклопљен у модуларну природу Нодус решетке. Брза индустријска производња елемената,



Слика 23. Спој штапова у чвору конструкције на кући Нусатсум. Фотографија дјело Р. Г. Сатервајта (R. G. Satterwhite).

склапање модула и коначна уградња извршени су у рекордном року (слика 28). Дворана изложбеног центра ослобођена је, скоро у потпуности, од стубова. Премоштен је простор од 110 m са 85 m без ослонца у пољу^[22]. Простор се користи као сајамски и за концерте. Конструкција крова на централном пољу подигнута је у односу на остатак дворане. Кроз ово планарно смицање равни по вертикали добијен је простор за зенитално природно освјетљење, чиме је добијен хуманији унутрашњи простор. Сви планарни сегменти су склопљени на лицу мјеста са потребним инсталацијама, а након тога подизани су и ослањани на припадајуће носаче.

“Meishusama Hall”, Шига у Јапану (слика 29) је модерни храм који црпи инспирацију из дуге традиције јапанске сакралне архитектуре. Форма храма је модерна и сведена. У основи је квадратна, а главна асоцијација на старе јапанске храмове је традиционални облик крова (слика 30). Улазна партија је кубична и визуелно је одвојена од остатка објекта. Конструкцију чини комбинација једнослојне планарне просторне решетке са двослојном закривљеном која подржава закривљени облик крова. Одише грандиозним једноставним обликовањем коју карактерише дисциплина и снажан осјећај постојања у амбијенту и окружењу. Форма је у балансираном и промишљеном односу са микро локацијом, којом доминирају планине. Конструкција је креирана употребом челика, за разлику од осталих будистичких храмова који су обично од дрвета и камена. Употреба решетке на крову обезбиједила је лако постављање транспарентних плоча на



Слика 24 лијево. Поглед на Кристалну катедралу у Гарден Гроуву, Калифорнија, Сједињене Америчке Државе. Фотографија дјело Н. М. Т. Џексона (N. M. T. Jackson).

Слика 25 десно. Ентеријер Кристалне катедрале. Поглед на главну осовину која је дужине $126,5\text{ m}$. У позадини се види олтар са оргуљама. Фотографија дјело Н. М. Т. Џексона (N. M. T. Jackson).



Слика 26. Ентеријер Кристалне катедрале са зидовима и кровом од просторне решетке, изузетно прозрачне и динамичне атмосфере. Посебна пажња посвећена заштити конструкције од прекомјерног загријавања које изазива контракцију и експанзију. Фотографија дјело Н. М. Т. Џексона (*N. M. T. Jackson*).

конструкцију, које чине покривач. Овај покривач је обезбједио зенитално освјетљење. Закривљени зидови су бојени свијетлом бојом која има рефлективна својства, тако да прихватају сво свјетло које долази кроз решеткасту конструкцију крова. Унутрашњи простор је, употребом ових конструктивних елемената, хомоген и симетричан.

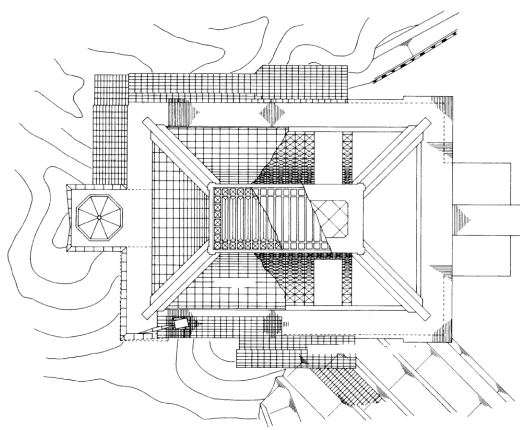
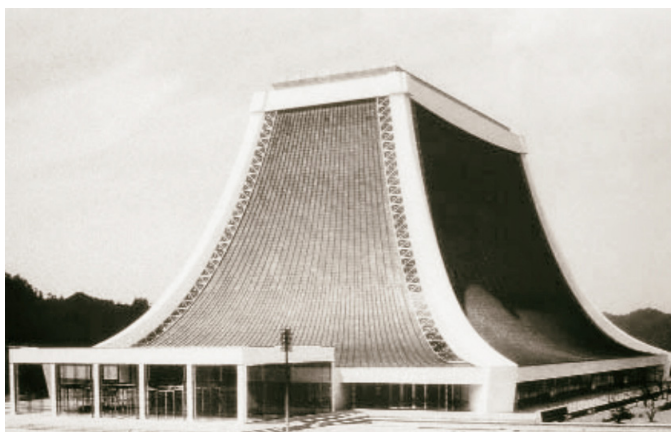
Може се примјетити да су до сада наведене просторне решетке скоро ексклузивно материјализоване употребом челика. Дрво је такође материјал који се може употребити за грађење решетки. Изузетно је повољно за прављење просторних решетки, али такође носи одређене недостатке. Неки од најбитнијих су димензије попречног пресека, дужина елемената, проблем проналаска високо квалитетне дрвене грађе која има изузетне физичке и конструктивне карактеристике. Када се превазиђу сви горе наведени проблеми добијемо савремену спортску дворану, Огуни (*Oguni-machi*) у Јапану (слика 21), закривљену у два смјера са двослојном просторном решетком и премоштеним распоном од 45 m континуално без ослонаца у пољу^[22]. Ова дворана изграђена је 1988. године. Савремена аморфна форма у облику спљоштене куполе прекривена је полупровидним покривачем и спојницама покривача од нерђајућег челика. Цедар, четинарско дрво, кориштено је за модуле просторне решетке (слика 23). Дворана у основи има димензије 65 m дужине и 45 m ширине (слика 22). На крају сваког штапа решетке налази се челични елемент који служи за спајање штапова решетке. Дрво и облик дворане асоцирају на јапанске храмове, тако да је по ријечима, архитекте основни концепт био храм спорта. Ентеријер одише топлином, а зенитално ублажено освјетљење унутрашњи простор обезбјеђује уједначено



Слика 27 лијево. Национална Арена у Бирмингему, Велика Британија. Фотографија власништво "*British Steel, Tubes & Pipes*".



Слика 28 десно. Подизање конструкције за Националну Арену у Бирмингему, Велика Британија. Фотографија власништво "*British Steel, Tubes & Pipes*".



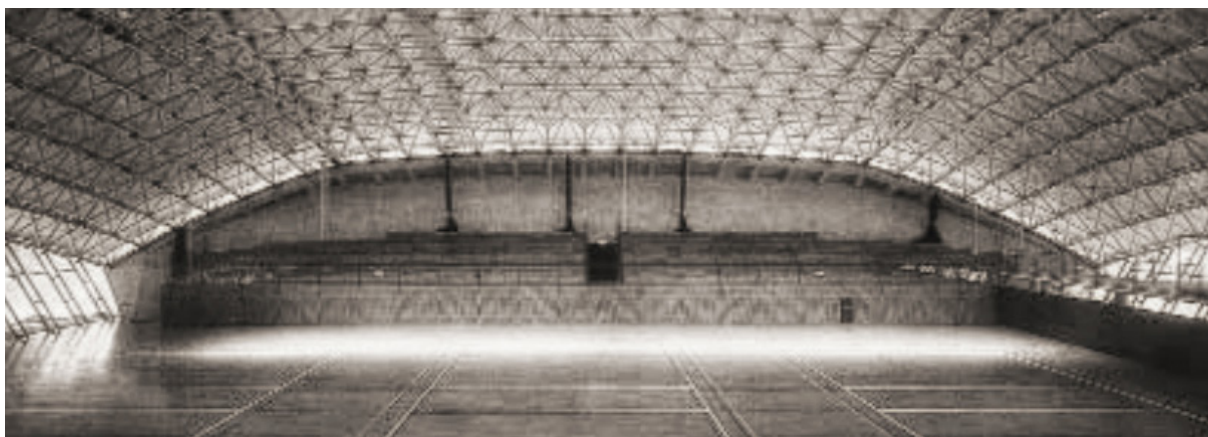
Слика 29 лијево. Меишушама храм, Шига у Јапану изграђен 1988. године. Поглед на масивни плато и симетричну форму храма у екстеријеру. Фотографија дјело Мамору Кавагучија (Mamoru Kawaguchi).

Слика 30 десно. Основа партера Меишушама храма у Шиги, Јапан. Симетрична форма која је дефинисана двоструко закривљеним, традиционалним, кровним равнима. Цртеж власништво Мамору Кавагучија (Mamoru Kawaguchi).

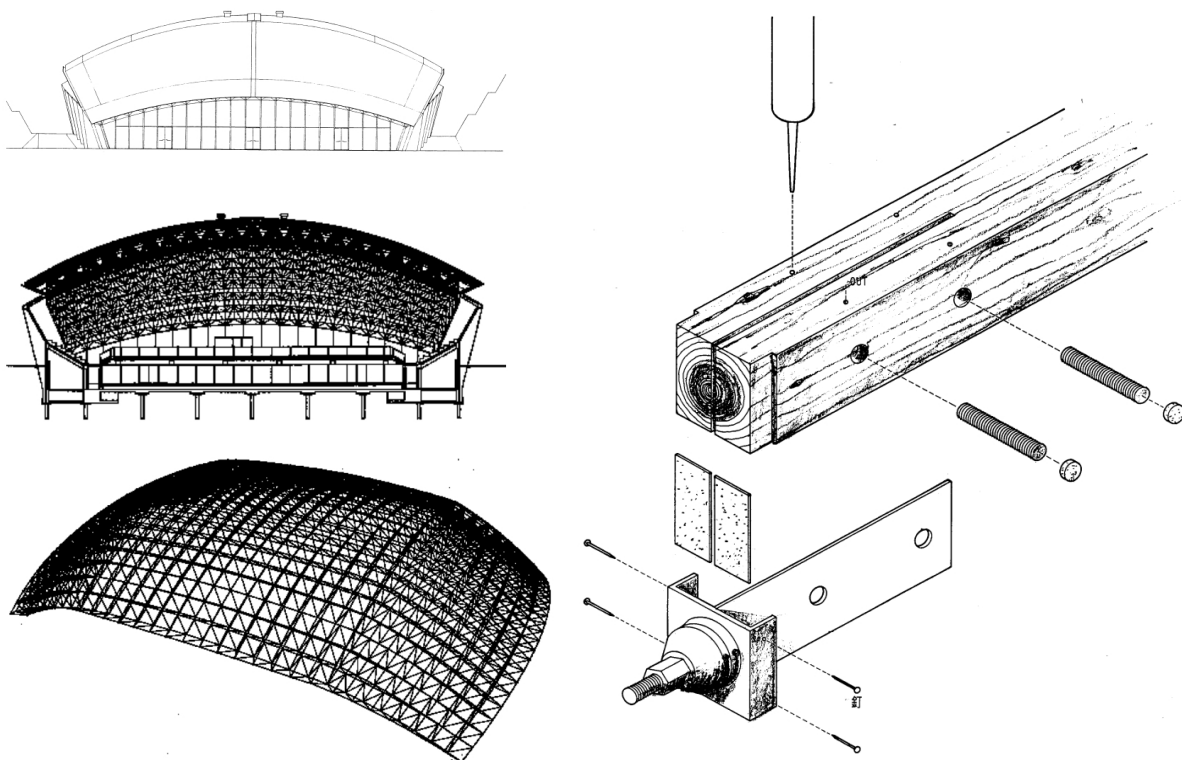
освјетљење на читавој површини ентеријера. Узевши у обзир једноставност форме и елегантну конструкцију од дрвета дворана “Oguni Dome” завређује у сваком случају пажњу када се говори о могућностима координације облика и тродимензионалних просторних конструкција.

Највећа непрекинута конструкција креирана употребом система просторне решетке је хангар за одржавање авиона аеродрома у Стенстеду у Великој Британији. Ова импозантна грађевина дужине 180 m по дужој оси је премоштена просторном решетком [22]. Конструкција је “CUBIC” система. Цијела конструкција крова ослоњена је на стубове, који су на растојању од 6 m [29]. На великим површинама зидова јављају се значајне силе вјетра, које примају стубови на које се ослања кровна конструкција просторне решетке. Поред стандардних оптерећења тежине конструкције, снијега, вјетра, итд. значајан је утицај и динамичног оптерећења. Тежина авиона при уласку и изласку из хангара, кранови, порталне дизалице и друге машине качене су за ову просторну двослојну решетку. Ортогонално постављени штапови чине модуле димензија 4 m, а у основи су постављени штапови који се понашају као спрегови конструкције и штите од сила вјетра стабилност тродимензионалне формације [29].

Конструкције просторне решетке нису економски не исплативе при употреби на слободним формама. Аргументе је први дао архитекте Арата Исозаки и Мамору Ковагучи



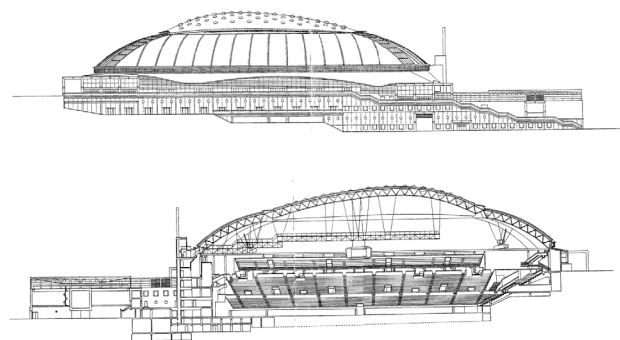
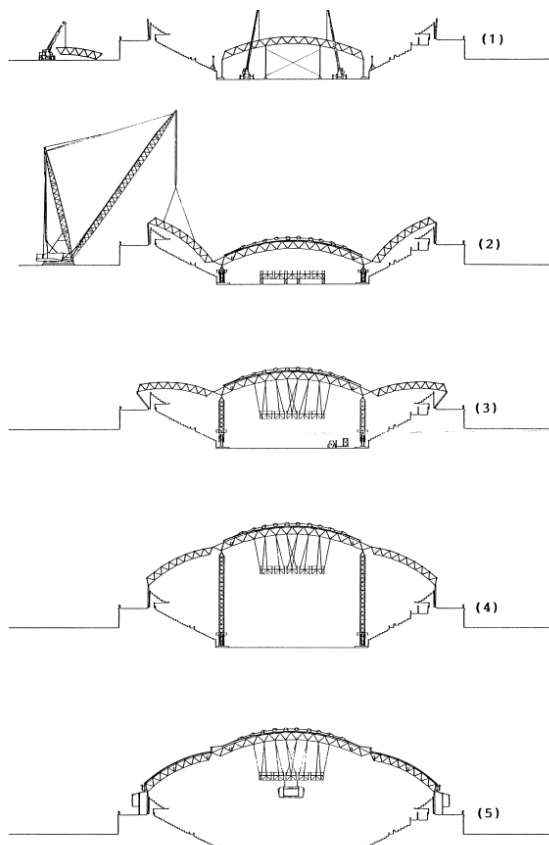
Слика 31. Ентеријер Огуни дворане у Јапану. На слици је дрвена двослојна решеткаста конструкција на неправилној форми. Фотографија власништво Јах архитеката (Yah Architects).



Слика 32 лијево. Сјеверни поглед на Огуни дворану, затим пресјек и тродимензионални дигитални прототип конструкције. Цртеж власништво Јах Архитеката (*Yah Architects*).

Слика 33 десно. Детаљ споја дрвене конструкције крова Огуни дворане у Јапану. Цртеж власништво Јах архитеката (*Yah Architects*).

(*Arata Isozaki, Mamoru Kawaguchi*) на пројекту Сант Џорди (*Sant Jordi Sports Palace*) спортске дворане у Барселони (слика 34 и 35), Шпанија 1988. године. Пројектована је и изграђена за Олимпијске игре у Барселони 1992. године. Концептуално, пројектанти су договорили да овим пројектом желе да забиљеже дух времена. У ери технолошког напретка и развоја дигиталних алата за пројектовање, пројектовали потпуно модуларан и стандардизован систем који се могао лако фабриковати. Значајан напредак на пољу “САМ” (рачунарски генерисаних модела) у софтверској индустрији, обиљежио је рад на овом пројекту. Обезбиједио је лакше прорачуне геометријских карактеристика елемената решетке и лакшу стандардизацију која је драстично утицала на економску компоненту пројекта. Све стране дворане су двоструко закривљене форме. Овим је креирана привидно неправилна слободна форма објекта. Изнад централног дијела налази се раван кров од просторне решетке који је качен на главну аморфну кровну конструкцију. За материјализацију конструкције кориштен је “SEO” систем. Штапови су спојени у чворовима округлим чворним елементима, који имају урезане позиције са ужљебљењем штапова. Овај систем чворних елемената креиран је употребом најсавременијих машина за обраду метала које су са прецизношћу урезивале отворе за штапове решетке. Иновације у приступу производњи утицале су на економску исплативост грађења. Поред своје необичне форме, процес подизања конструкције је оригиналан. Састојао се од склапања размотане форме на тлу, затим подизања исте на носаче и коначно разматавање у конструктивну позицију. Овим приступом слободни облик форме третира се као површински, а тек у последњој фази, након што је подигнут, добија финални облик. Систем је познат као „Пантадоме“ метода подизања. Конструкција је подизана употребом рачунарских система управљања са хидрауличним дизалицама (слика 36). Процес је трајао око мјесец дана. Још једна битна особина оваквог начина подизања конструкције је што су све инсталације постављене док је решетка била на тлу. Тиме је избјегнута градња унутрашњих привремених конструкција за постављање инсталација, а не треба



Слика 34 горе лијево. Сент Џорди, спортска дворана у Барселони Шпанија. Фотографија дјело Џона Чилтона (John Chilton).

Слика 35 доле лијево. Пресеци кроз Сент Џорди дворану у Барселони, Шпанија. Цртеж власништво Мамору Кавагучија (Mamoru Kawaguchi).

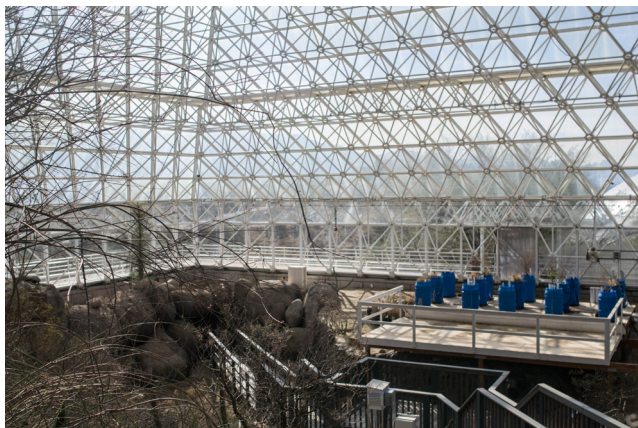
Слика 36 десно. Фазе подизања конструкције дворане сент Џорди у Барселони. Цртеж власништво Мамору Кавагучија (Mamoru Kawaguchi).

заборавити на сигурност радника при монтажи и склапању^[22].

Челичне просторне решетке нису без мана, једна од њих је осјетљивост на температуру. При топлоти челик се шири, а на хладноћи скупља. На великом броју штапова, дворане Сент Џорди, и овај проблем се морао узети у обзир. Ријешен је на начин да је просторна кровна решетка објешена и у горњој и доњој зони за стубове на ободу форме. Тиме се дозвољава блага експанзија при загријавању и добија се дилатација конструкције. Велике површине су у сталном односу са силама вјетра.

Пројекат Биосфера 2 (*Biosphere 2*) који се налази у пустињи Сонора, САД је још један у низу објеката који користи могућности просторне решетке. На локацији у пустињи, представља интересантан приступ контролисању природног окружења и прилагођавању својим потребама. Конструисана је 1990. године у близини града Тусон у Аризони (слика 37 и 38). Састављен од пет павиљона у потпуности провидног омотача који обликом израђа из пејзажа сачињеног од камена и пијеска. Просторна решетка је двослојна, а на најмањем павиљону једнослојна. Систем преношења сила аксијално са штапова на сусједне ријешен је у потпуност преко шарафа који чине непотребним посебне чворне елементе конструкције. Са оваквим системом без посебних спојних елемената, односно, директном крутом везом постигнуте су боље перформансе решетке и унапређена је стабилност. У потпуности провидни зидови и кров павиљона потпуно пропуштају свјетло у ентеријер.

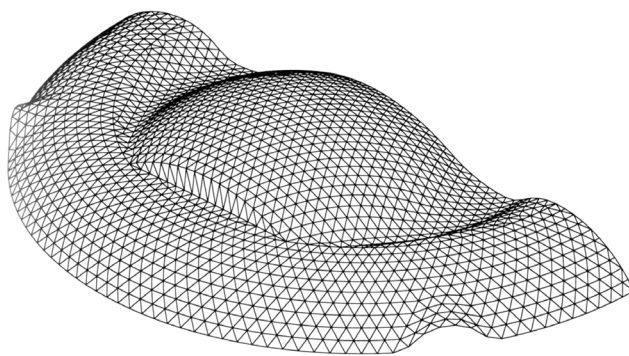
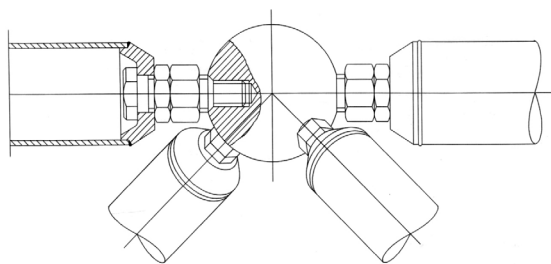
Најсмјелија од свих наведених досадашњих конструкција, у погледу обликовања, припада спортској дворани Палафолос (*Palafolls Sports Hall*) у Шпанији, конструисана



Слика 37 лијево. Пројекат Биосфера 2 у пустињи Сонора, Аризона, САД. Поглед на широку степенасту пирамиду зоне са дивљим биљкама. Фотографија дјело Питера Требилкока (*Peter Trebilcock*).

Слика 38 десно. Пројекат Биосфера 2 у пустињи Сонора у Аризони, САД. Фотографија дјело Питера Требилкока (*Peter Trebilcock*).

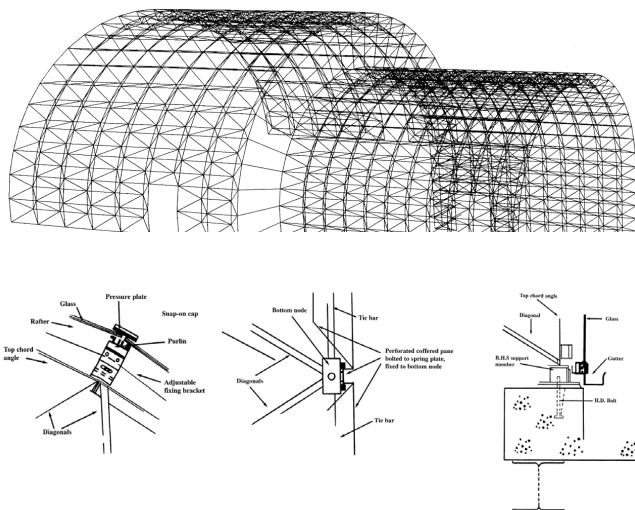
1991. године (слика 41). Карактерише је двоструко закривљена симетрична површ коју подржава просторна решетка. Пресјек варира од синусоидног ка линијском, а у основи је кружног облика. Ова дворана је конструисана за Олимпијске игре у Барселони 1992. године. Арата Исозаки (*Arata Isozaki*) је дизајнирао конструкцију дворане Џорди у Барселони. Допринос овог пројекта је популаризација просторне решетке и технологија пројектовања на слободним архитектонским формама. Да би се пустило природно свјетло у ентеријер централни дио форме је куполастог облика радијуса 25 m, чиме је конструкција издигнута тако да прима свјетло са југа и сјевера^[29]. Улази у дворану наглашени су благим лучним издизањем вањског омотача. Кровну конструкцију чини двослојна просторна решетка. Да би се постигли нагли прелази у форми крова употребљена решетка има модуле мањих димензија, чиме је постигнута прецизност у визуелном симулирању неправилног закривљења крова. Из овог разлога растер има велики број спојних елемената. Мале спојнице са великом прецизношћу израде су биле кључ за прецизну дистрибуцију силе кроз штапове решетке. Конструкција је “ORTZ” система, који се састоји од сферичних спојних елемената и цјевастих попречних пресјека штапова (слика 39). Рачунарска технологија је обезбиједила подизање дигиталног прототипа, који је помогао да монтажа и склапање тродимензионалног растера буде ефикасна у сваком погледу. Подизање склопљених сегмената вршено је помоћу специјалних телескопских привремених стубова који су посебно пројектовани за ову намјену^[22].



Слика 39 лијево. Детаљ споја штапова и зглобних елемената дворане Палофолос у Шпанији. Цртеж дјело Х. Мартинеза Калцона (J. Martínez-Calzón).

Слика 40 десно. Обликовање кровне конструкције дворане Палофолос у Шпанији, архитекте Арата Исоакија за Олимпијске игре у Барселони 1992. године. Цртеж дјело Х. Мартинеза Калцона (J. Martínez-Calzón).

“Barrel Vault Atrium”, у граду Кингстон на ријеци Темзи у Великој Британији, је архитектонски објекат импозантних размјера (слика 41 и 42). Дужине је 120 m, а висине до 32 m од пода. Пројектована је да има облик свода. Ова просторна конструкција је сачињена од пирамидалних модула система “Space Deck”. Конструкција симетричног облика састављена је од решеткастих зидова и свода. Као и на свим конструкцијама од челика и на овој се морала узети у обзир особина материјала да се шири при изложености топлоти. Проблем је ријешен спојним елементима постављеним у низу и дизајнираним тако да постоје у функцији дилатације, односно имају могућност да прихвате експанзију штапова при загријавању и тиме спријече међусобно задржавање сила у истим (слика 42). Занимљива је и улога избора материјала и попречног пресека штапова који су правоугаоног попречног пресека^[29].

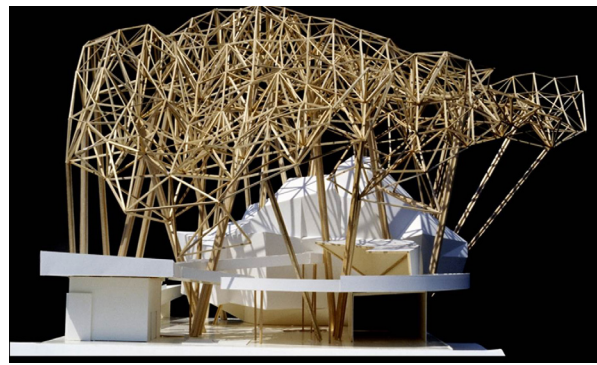
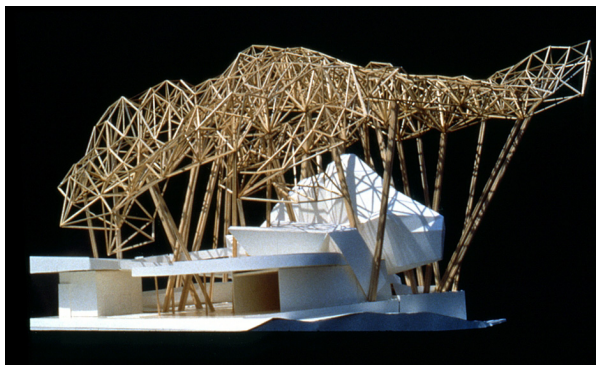


Слика 41 лијево. Ентеријер тржног центра Бентал у Кингстону на Темзи, Велика Британија. Фотографија власништво “SpaceDecks Ltd”.

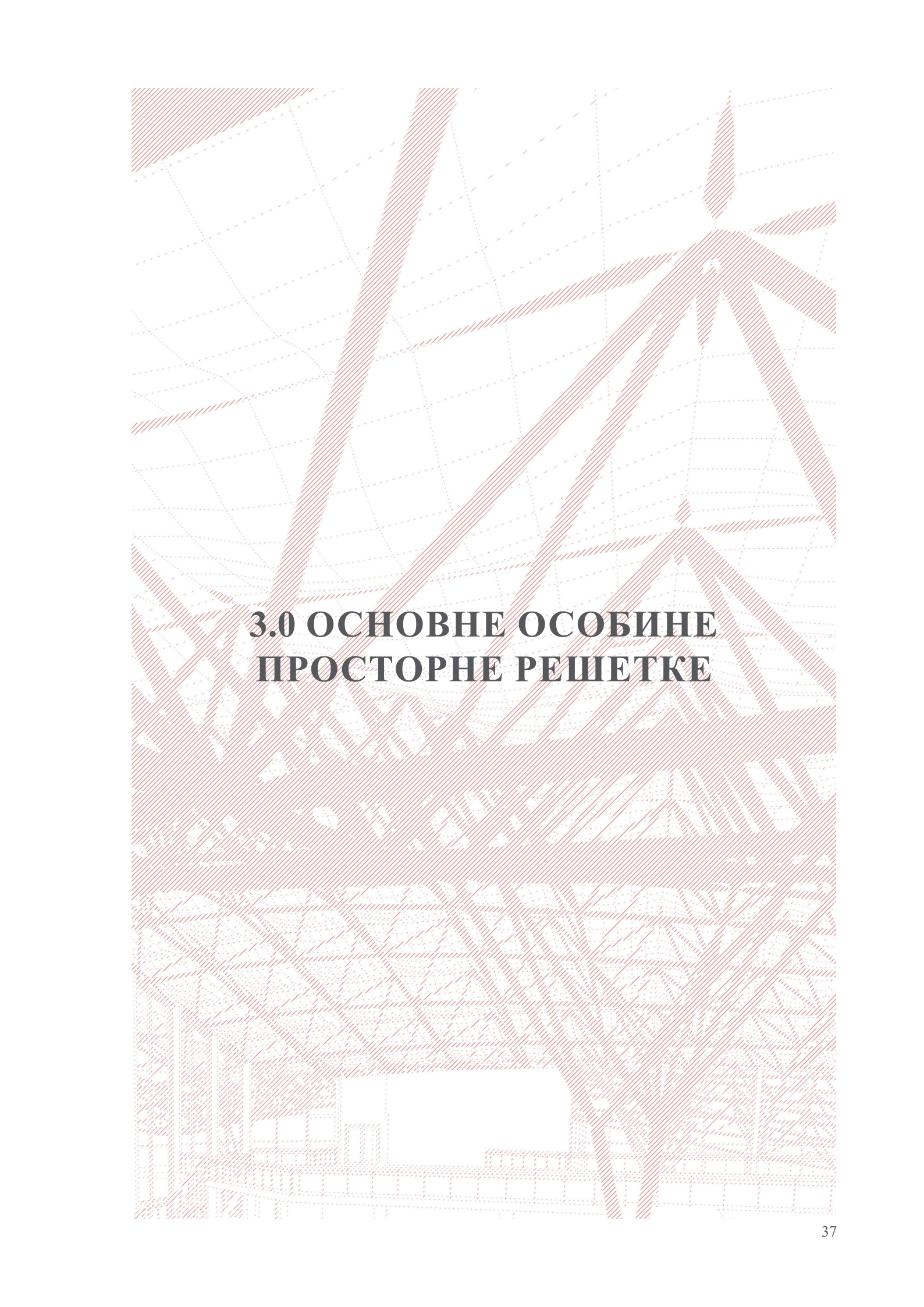
Слика 42 горе десно. Детаљи спојева конструкције на крову Бентал центра у Кингстону на Темзи у Великој Британији. Цртеж власништво “SpaceDecks Ltd”

Слика 43 доле десно. Кровна конструкција Бентал тржног центра. Рачунарски модел распореда осовина штапова. Цртеж власништво “SpaceDecks Ltd”.

Један од пројеката инспирисаних идејама “Roundwood” торња је павиљон Атланта (*Atlanta pavilion*, на сликама 44 и 45). Иако неизграђено, рјешење пројектовано од дрвене грађе помјерило је границе у промишљању када су у питању просторне решетке. Пројекат је остао само у сфери виртуелног дигиталног прототипа који је предложен на конкурс за Олимпијске игре 1996. године. Приједлог комплексне конструкције је изазвао значајну пажњу и инспирисао размишљање о рачунарским техникама дизајнирања комплексних просторних решетки^[22]. Пројектован је од стране архитеката Скогина, Елама и Браја (*Scogin, Elam, Bray*) и представљао је конструкцију која би обликовала простор за продају карата са разним аудио-визуелним инсталацијама. Ова конструкција може се дефинисати као потпуно неправилна просторна решетка на неправилној форми објекта. Због неправилности облика, сви штапови решетки су различитих дужина и самим тим прецизност прорачуна дужина и позиција захтијевала је иновативан приступ. Неправилност позиција штапова утицала је на избор спојних елемената који су облика челичне кугле. Због цијене коштања изградње конструкције и предложеног кратког вијека трајања (двије до три године) пројекат није прошао финалну комисију, али је утицао на развој просторних решеткастих конструкција инспирисао је дизајн многих савремених конструктивних рјешења на слободним формама.



Слика 44. и 45. Атланта павиљон са аморфном просторном решетком. На слици је макета не изведеног пројекта. Макета и фотографија минијатуре дјело Мека Скогина и Мерил Елам (*Mack Scogin Merrill Elam Architects*).



3.0 ОСНОВНЕ ОСОБИНЕ ПРОСТОРНЕ РЕШЕТКЕ

3.1 ВРСТЕ ПРОСТОРНИХ РЕШЕТКИ И ПРЕЛИМИНАРНО ПЛАНИРАЊЕ

Због своје геометријске форме и комплексности имплементације прије избора система решеткасте конструкције потребно је узети у обзир одређен број иницијалних параметара за успјешну материјализацију. Параметри⁶ који се могу набројати не утичу само на лакше прорачуне и функционалну позицију у ткиву објекта који се пројектује, него и естетски аспект.

- У почетној фази планирања и дизајнирања конструкције потребно је изабрати и сагледати основну форму конструкције^[2]. Пошто се тродимензионалне просторне решетки састоје од аксијалних елемената штапова и спојних елемената у чворовима, потребно је детаљно анализирати и сагледати просторне и геометријске карактеристике истих. Овај задатак може бити комплексан када се посматра вишеслојна просторна решетка на слободној архитектонској форми. Тражење планарних површина које описују илузију просторног закривљења, број слојева решетки и начини понављања модула играју велику улогу у наведеним аспектима избора и дизајна оваквих конструкција.

- Наредни битан фактор који се узима у разматрање је тродимензионални облик модула конструкције^[2]. Овај аспект битно утиче на носивост конструкције и њену тежину. Модул који ће се понављати представља дериват димензија и форме за коју се конструише. Дубина конструкције је резултат избора дводимензионалног и тродимензионалног система понављања и обликовања. У иницијалној фази пројектовања потребно је дати почетни прорачун за пројектанта који се даље рафинира на основу свих специфичности које са собом носи пројекат до посљедње фазе у којој се задовољавају сви критеријуми, носивост, употребљивост у концепту или пројекту, праћење или одступање од иницијалне форме код слободних архитектонских облика итд.

- Избор облика и система спајања штапова игра велику улогу у дизајну конструкција у естетском и функционалном аспектима^[2]. Чворни конструктивни елементи у великој мјери дефинишу чврстоћу и крутоост конструкције и просјечно чине 15% до 35% укупне тежине. Правилним избором може се значајно утицати и на економску исплативост при развоју пројекта и коначној материјализацији. Постоји читава палета различитих система који су данас доступни, а који су прошли велики пут тестирања и примјена у пракси. Чворни елементи се посматрају са становишта квалитета, цијене и карактеристика у смислу промишљености при подизању и избору система подизања и уграђивања у објекат. Може се слободно рећи да, без обзира на избор просторне решетки, суштину конструкције чини систем спојева дефинисан чворним елементима.

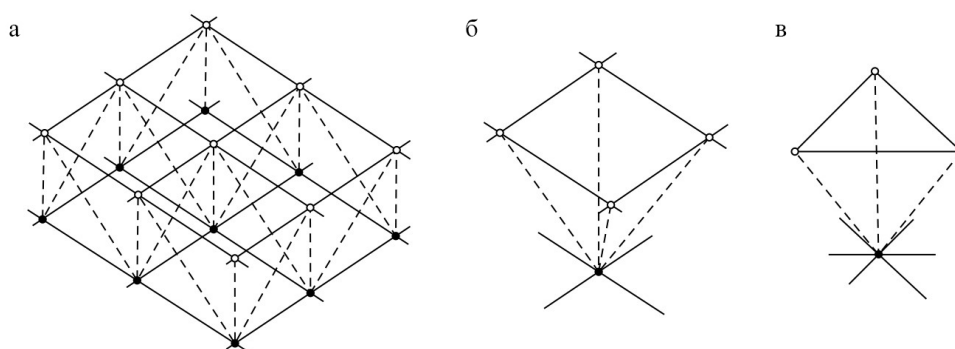
- Поред наведених аспеката и редоследа избора потребно је имати у виду и систем уградње или подизања елемената и технологије са којом се располаже за уградњу скелета конструкције у објекат^[2]. Различите форме које су подржане, у конструктивном смислу, просторним решеткама траже различите приступе подизању. На примјер хемисферичне форме са подконструкцијом од зидова испод могу се монтирати у низу, секвенцијално, без помоћних конструкција. То није случај са планарним формама изнад тла, из разлога што је потребно дефинисати помоћну конструкцију па приступити монтажи, или на тлу завршити монтажу сегмента склопа па ју позиционирати на дефинисано мјесту у објекту, или употребити неку другу методу. Ово је изузетно битна проблематика која може имати велики утицај на цијену коштања изградње.

⁶ Детаљна анализа параметара за избор просторне решетки може с пронаћи у научном раду *Analysis, design and construction of steel space frames* (G.S. Ramaswamy, M. Eekhout, G.R. Suresh), Thomas Telford, London, 2002.

3.2 ДВОСЛОЈНЕ ПРОСТОРНЕ РЕШЕТКЕ

Двослојне решетке се састоје од двије мреже штапова и чворних елемената које су повезане вертикално и дијагонално постављеним елементима. Равне двослојне решетке карактерише систем зглобних елемената у којима се не појављују моменти отпора силама извијања, стога сви елементи примају само силе затезања или притиска у зависности од позиције у конструкцији. У системима који подржавају круте спојеве утицај савијања и извијања се третира као занемарив. Равне двослојне решетке обично се дизајнирају употребом основних геометријских система понављања^[24]:

- равна решетка у равни (слика 46а),
- пирамиде са правоугаоном основом која настаје из математичког облика октаедра (слика 46б),
- пирамиде са троугаоном основом, или исјечак из тетраедра (слика 46в).



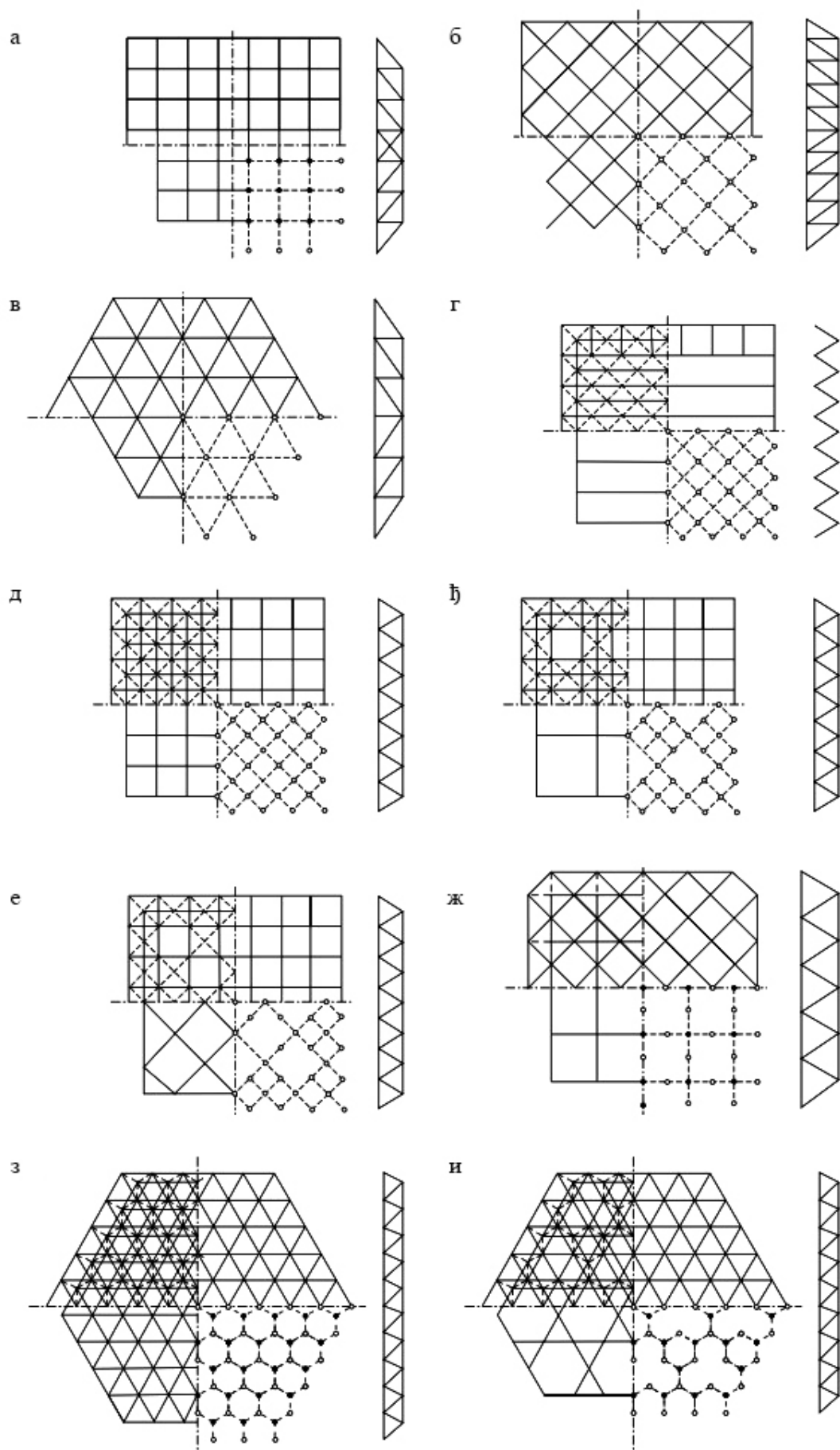
Слика 46. Основни елементи просторног двослојног конструктивног растера. Аутор илустрације Тиан Т. Лан (Tien T. Lan).

Узимањем у обзир наведених геометријских особина може се дизајнирати неколико варијанти равне двослојне решетке. Варијације се добијају на начин да се мијењају правци система понављања горњег и доњег слоја који су узајамно повезани. У зависности од обликовних карактеристика основних елемената двослојне решетке се могу подијелити у двије генералне групе, равне и просторне системе понављања.

Равни системи се састоје од два слоја спојена вертикалним и дијагоналним елементима са којом заједно чине правилан растер тродимензионалне просторне формације штапова.

Просторне растере карактеришу комплексније геометријске карактеристике. Састоје се од комбинације правоугаоних или троугаоних пирамидалних облика као основних модула конструкције. Ова група тродимензионалних растера формира се смицањем горњег слоја у односу на доњу раван, с тим да им се задржава идентичан правац простирања система понављања у слојевима. Овако се постиже тродимензионална подјела која чини правилно понављање модула у простору. На слици 47 могу се видјети разни типови решетки формираних манипулацијом позиција горње и доње равни једне у односу на другу, као и смицањем тачака спајања горњег у односу на доњи слој решетке. Овакве просторне формације се често дијеле су у двије основне групе⁷.

7 Проф. др Тиен Т. Лан (Tien T. Lan) са универзитета *Institute of Building Structures, Chinese Academy of Building Research* из Пекинга дао је, на основу детаљног истраживања, основне препоруке за избор правилних геометријских топологија просторне решетке. Истраживања је објединио у дјелу *Spatial Structures at the Turn of the Millenium* (Wester T. Medowski, S. J. Mogensen), *Kunstakademie Forlag Arkitektskolen*, 1999.



Слика 47. Двослојне просторне решетке и однос растера и основе. Илустрација Тиен Т. Лан (Tien T. Lan).

Прву групу чине решетке састављене од планарних равних решеткастих растера које се даље могу подијелити у четири подгрупе по својим карактеристикама.

- Правоугаони решеткасти растер у два правца^[24] (слика 47а). Основни потенцијал овог типа је једноставност у смислу позиционирања штапова и дизајнирања детаља спојева, односно чворних елемената. Отварају могућност да сви штапови буду исте дужине и леже у двије равни које се сијеку под правим углом. Због овакве форме и распореда јављају се изузетно мале и занемариве силе које узрокују савијању штапова.

- Дијагонална решеткаста формација у два правца^[24] (слика 47б). Овај тип је сличан правоугаоном по својим карактеристикама, осим што је заротиран за 45° . Обе имају исту дубину, и повезане су вертикалним елементима, тј. горња и доња равни у којој леже аксијални конструктивни елементи.

- Равне решетке са системом понављања у три правца^[24] (слика 47в). Основна карактеристика ових формација растера је да се сви аксијални елементи сијеку под углом од 60° и заједно чине једнакостраничне троуглове. Ово је крут и изузетно ефикасан геометријски систем, дијелом из разлога што је троугао стабилан геометријски облик. Због природе понављања своје растерске формације овај тип се може употребљавати и за премоштавање кружних распона архитектонских форми. Потенцијални проблем са којим се може срести је систем спајања јер у екстремним случајевима један чворни елемент треба да прими већи број штапова, што утиче на комплексност чворних елемената.

- Равна двослојна решетка у једном правцу^[24] (слика 47г) састоји се од низа штапова спојених у заједничким тачкама. Композиција овако сложених штапова резултира формом коју је могуће размотати у равни. У правцу распона могу се примијетити само штапови који су под углом постављени и ослоњени једни на друге. Потребна су ојачања по ободима решеткастог носача, да би се додатно постигла потребна укрућења конструкције и неутралисале силе савијања.

У другу групу спадају двослојне решетке које се састоје од пирамидалних модула са квадратном основом. Уобичајено се употребљавају на модуларним системима. Постоји неколико доминантних типова:

- Ортогонални решеткасти растер сачињен од пирамидалних модула квадратне основе^[24] (слика 47д). Горња површ растера дислоцирана је у односу на доњу. Настаје спајањем одговарајућих чворних тачака слојева конструкције. Поред тога што су сви штапови у слојевима решетке исте дужине, постоји специјални случај у коме је угао између дијагонале и штапова у слојевима једнак 45° . Геометријска правилност овог система понављања је погодна за фабрикацију.

- Правоугаони систем од пирамидалних форми квадратне основе са отворима у пољу решетке^[24]. До ове формације долази се смицањем шеме понављања горње зоне у односу на доњу зону. Отвори се дефинишу дијагоналама квадратних поља. Овај примјер може се видјети на слици 2ж. Растер и геометријски распоред штапова и спојних елемената сличан је претходно описаном типу система двослојне решеткaste конструкције, са разликом да су уклоњене унутрашње групе пирамида у пољу. Резултат уклањања унутрашњих модула је смањен број конструктивних елемената потребних за материјализацију просторне решетке. Добија се и на лакоћи конструкције.

- Диференцијални тип од пирамида квадратне основе^[24] (слика 47е). Двије равни просторне решетке позиционирају се под углом од 45° једна у односу на другу. На овај начин значајно се смањују утицаји непожељних сила савијања и смицања у систему. Растер горње зоне поставља се ортогонално. На овај начин се добија изузетно оптималан систем у коме су краћи горњи штапови који примају силе притиска, а дужи доњи који су притиснути.

- Тип дијагоналних пирамида квадратне основе^[24], као што се може примјетити на слици 47ж. Овај тип је такође диференцијални, али има обрнуту шему понављања у

односу на претходни. Састоји се од пирамида квадратне основе које су својим тјеменима спојене са доњим штаповима. Дозвољавају спајање мањег броја штапова и једноставније спојне елементе решетке.

Постоје и растери са пирамидалним основама троугаоног облика. Употребљавају се на системима заснованим на дискретним елементима тако и на модуларним^[24]. Репрезентативна су два основна типа:

- Троугаона пирамидална просторна подјела са планарним понављањем, *слика 47з*). Троугаоне пирамиде се, у овом случају, користе као модуларни елементи и спојени су са својим тјеменима тако да чине просторну решетку. На овај начин добија се систем понављања троуглова у горњој зони која је смакнута у односу доњу зону. Постоји специјални случај у коме је дубина просторне решетке једнака квадратном коријену од двије трећине. Тада су сви штапови исте дужине, што овакав просторни растер чини оптималним за фабрикацију и серијску производњу.

- Троугаона пирамидална просторна решетка са унутрашњим отворима (*слика 47и*). Овај тип подржава уклањање унутрашњих елемената што омогућује олакшавање просторне решетке.

3.2.1 ИЗБОР ТИПА ДВОСЛОЈНЕ РЕШЕТКЕ

Због свих потенцијалних проблема при изградњи и експлоатацији просторних решеткастих конструкција избор правог типа је од велике важности. Правилним одабиром непосредно се утиче на економску компоненту исплативости и са тог аспекта оправданости употребе. Потребно је детаљно сагледати обликовне карактеристике архитектонске форме која се пројектује. Облик основе конструкције, узимање у обзир постојећих или планираних ослонаца на које је могуће пренијети оптерећење као и сопствену тежину конструкције су само неки од улазних параметара при почетном планирању.

Постоји низ почетних правила по коме се постиже ситуација у којој се добијају релативно кратки штапови који примају силе притиска, и дужи који су оптерећени силама затезања, што је често потребно обезбједити у раној фази пројектовања конструкције. Просторна решетка је најчешће од челика. Њена тежина се мора узети у обзир у раној фази пројектовања.

Табела 1. Табеларно приказан однос избора типа двослојне просторне решетке у односу на облик основе. Илустрације типова могу се видјети на *слици 47*.

Облик основе	Начин ослањања	Препоручени типови
Квадратни, правоугаони са омјером 1 - 1,5	По ивицама основе	а, б, д-ж
Правоугаони, омјер страница 1,5 - 2	По ивицама основе	а, д-е
Дугачки, тракасти - омјер већи од > 2	По ивицама основе	г
Квадратни, правоугаони	Унутар основе	а, д, ђ
Квадратни, правоугаони	Унутар основе комбиновано са ослањањем по ивицама основе	а, б, д, ђ, ж
Кружни, троугаони, шестоугаони и остали облици	По ивицама основе	в, з, ј

Облик основе на којој се дефинише конструкција просторне решетке је један од најбитнијих параметара за избор типа равне двослојне решеткасте конструкције⁸. Ако се посматра правилна квадратна основа или квадратна приближно квадратна основа гдје је омјер страница над ослонцима и распона 1:1 или 1:1,5 онда је могуће употребити било који од типова у два смјера двослојне просторне конструкције^[24] описаних и приказаних на *слици 47*. Када је основа издужена и спада у форму омјера ослонаца према распону (1:1,6 или 1:25)^[24] тада се препоручује употреба ортогоналних равних решеткастих типова у односу на оне са дијагоналним распоредом модула, из разлога што се тада употребљава значајно мање елемената тако да је конструкција лакша и јефтинија. У овом случају препоручује се избор неког од типова а, д, ђ или е са *слике 47*. Када је основа значајно издужена онда је једино оптимално рјешење за избор двослојна решетка у усмјерена једном правцу. За правоугаоне или квадратне двослојне просторне решетке са ослонцима на три стране са једном слободном страном може се, у суштини, изабрати било који од типова. Тада се слободна не ослоњена страна може учврстити повећавањем дебљине или додавањем нових слојева конструкцији. Не препоручује се постављање нових конструктивних елемената и носача на слободној страни. Уколико је ситуација у којој су дефинисани носачи у пољу решетке тада се обично бира неки од ортогоналних квадратних типова у два правца, типови са пирамидом квадратне основе или неки од ових са отворима у пољу ради олакшавања конструкције. На *слици 47* ови типови су на позицијама а, д и ђ. И у коначници задња ситуација са којом се може срести при иницијалном избору типа двослојне равне просторне решетке је комбинација ослонаца на

8 Препоруке за избор основног типа двослојне просторне решетке резултат су истраживања професора Тиен Т. Лана са института за истраживање грађевинских конструкција из Пекинга, Кина. Радови су сабрани и објављени у научном раду *Space Frame Structures (Tien T. Lan), International Journal of Space Structures, 1985*.

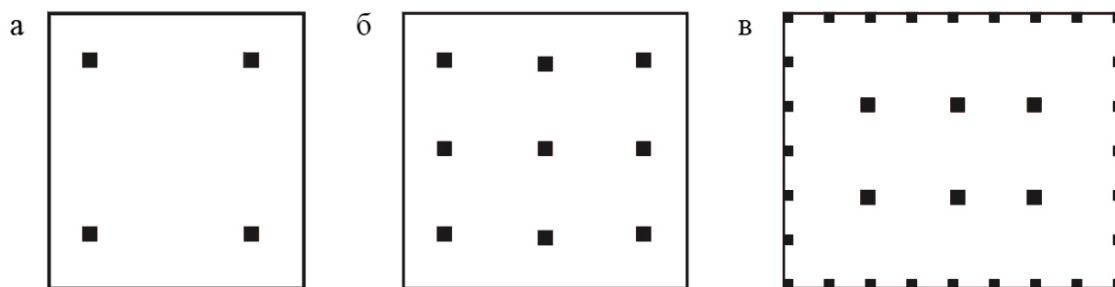
ивицама и носача у пољу. За ситуације овог типа на располагању, као оптималне системе, може се усвојити дијагонално орјентисана равна решетка у два правца, као и дијагонално постављене пирамиде квадратне основе као што је приказано на *слици 2*, типови б и ж.

За двослојне решетки са троугаоном, кружном и хексагоналном, или било којом другом основом неправилног облика, по ободима решетки препоручена је употреба пирамида троугаоних основа у горњем слоју. Графички приказ типова погодних за ове основе може се видјети на *слици 47*, типови в, з, и. У *табели 3* може се видјети однос између избора типа двослојне равне просторне решетки и облика основе као и ситуације распореда носача испод исте. Двослојне просторне решетки су увијек оптималан избор уколико испод постоје носачи и конструктивни елементи који формирају кружну или квадратну основу, или било који други облик који подржава континуално позициониране ослонце по ободу форме. У пракси се може срести са разним ситуацијама и позицијама ослонаца на које је потребно поставити решетку. По начину ослањања двослојне решетки могу се подијелити у неколико генералних типова.

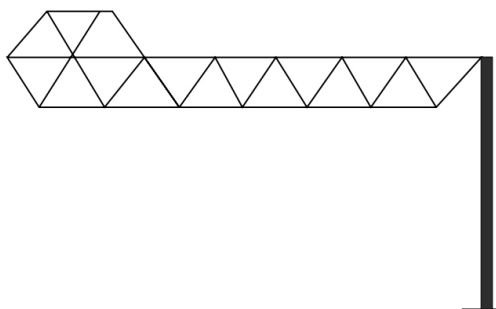
- Континуално ослањање на ивицама форме решетки. Овај тип је најчешће употребљаван у пракси. Двослојна решетка може директно пренијети своје и корисно оптерећење на стубове или прстене греда које повезују стубове или зидове.

- Ослањање на више стубова у основи. За објекте који захтијевају јединствен распон и континуално премоштавају основу, као што су спортске дворане или стадиони, могу се поставити стубови на ивице основе. Стубови се могу постављати у растер у пољу решетки, или комбиновати их ивично постављене са носачима који се налазе на ивицама основе (*слика 48*). Уобичајено се креирају препусти да би се смањила унутрашња сила која тежи савијању елемената конструкције у пољу решетку. За ситуације гдје постоје стубови у пољу, препусти се дефинишу као четвртина или трећина унутрашњег распона између стубова.

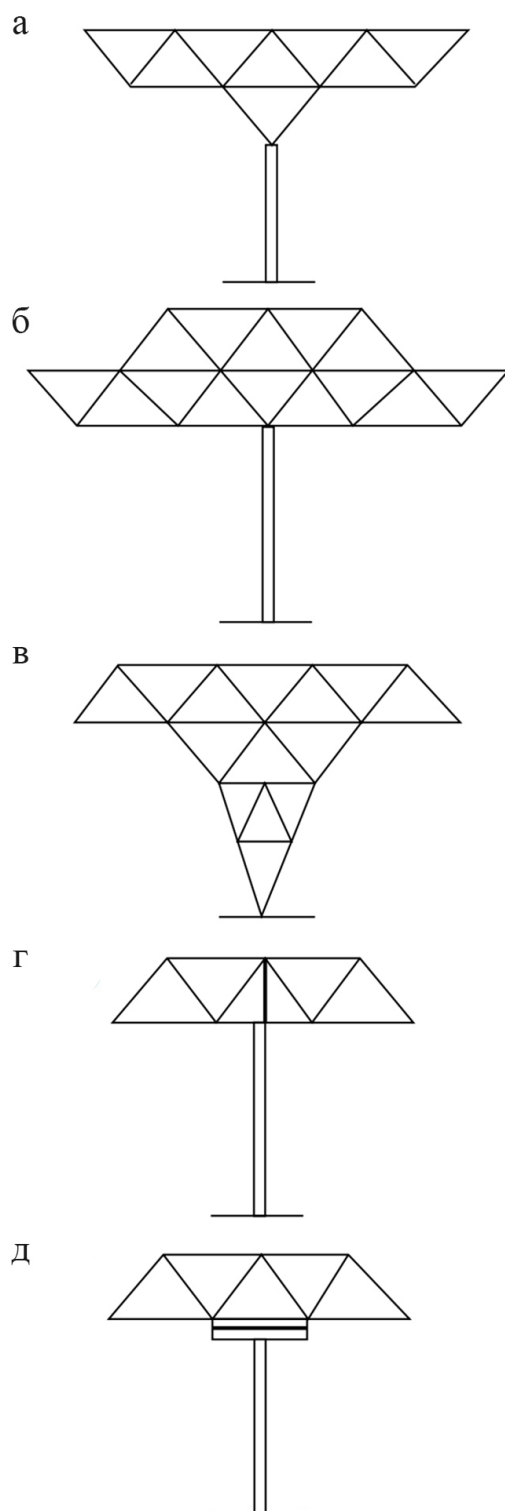
- Ослањање на носаче постављене по ивицама основе (на три стране са једном слободном у простору). Употребљавају се обично код објеката гдје је потребно да се дефинише једна слободна страна и три на које ће се ослањати конструкција. Обично су то објекти великих складишта или објекти који се граде у етапама и гдје се очекује њихово



Слика 48. Типични распореди стубова испод двослојне просторне решетки. Илустрација Тиен Т. Лан (Tien T. Lan).



Слика 49. Ојачавање препуста код двослојних просторних решетки додавањем додатног слоја. Илустрација Тиен Т. Лан (Tien T. Lan).



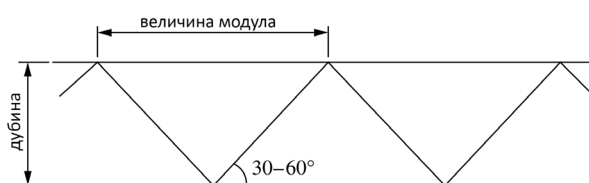
проширивање у будућности. Отворену слободну страну није потребно ојачавати додатним носачима, већ се употребљава троугаона формација двослојне решетке и на екстремном дијелу поставља додатни слој конструкције, тако да сама премоштава конструктивни распон. За мање распоне овај проблем се рјешава повећавањем конструктивне дубине просторне решетке, што резултира већом тежином цјелокупне конструкције. Поред гравитационих сила тежина конструкције, покретног оптерећења итд. Стубови морају да приме и бочне силе које дјелују на објекат, као што су удари вјетра, сеизмички утицај и сличне. Силе које се налазе у штаповима су често велике и њихово преношење на стубове мора бити ријешено посредно. Један од начина је да се подвуче обрнута пирамидална просторна решетка као посредник између равне просторне решетке и стубова (слика 50а). У одређеним ситуацијама ова пирамида се може продужити до тла и на тај начин преузети улогу стуба. Пирамидална решетка позиционирана на претходни начин скрађује распоне решетке и ослобађа дио сила из главне двослојне просторне решетке. Обрнута решеткаста пирамида се може замијенити постављањем подупирача изнад стубова које ће свести силе у стубове. Наведена метода заузима мање простора, али тражи додатне материјале и радове на објекту. Подметач који мора бити изузетне чврстине је површински елемент који прима силе из штапова под разним угловима, последњи примјер на слици 5.

Слика 50. Стубови испод решеткастих конструкција и начини преношења оптерећења са штапова решетке на стубове^[24]. Илустрација Тиен Т. Лан (Tien T. Lan).

3.2.2 ПАРАМЕТРИ ПРИ ДИЗАЈНИРАЊУ ДВОСЛОЈНИХ ПРОСТОРНИХ РЕШЕТКИ

При избору типа двослојне просторне решетке узима се у обзир велики број параметара који утичу на оптималан омјер цијене, доступности, флексибилности и других параметара који су специфични за пројекат. Један од битних улазних параметара је груби иницијални прорачун конструкције на основу кога се приступа даљем раду⁹. Резултат калкулације је дубина решетке и релација у вези са димензијама модуларних елемената конструкције, као и иницијално димензионисање штапова конструкције. Дубина је најкраћа дистанца између два, обично паралелна, слоја решетке, а величина модула представља растојање између два штапа у слоју решетке^[39]. Графички приказана ова два параметра могу се видјети на слици 6. Њихово дефинисање игра велику улогу у раној фази пројектовања конструкције, а може се одразити и на економичност рјешења. На ове промјенљиве и њихово дефинисање утиче тип просторне решетке и систем спојница које се планирају употребити, распон који премоштава, врста покривача ако је кров у питању, и многи други параметри. Величина модула и дебљина решеткасте конструкције обично се дефинишу кроз знања до којих се дошло практичним тестирањем и посматрањем конструкција. Ова запажања су записана и емпиријски потврђена. Однос распона и дебљине конструкције варира од 10-25 : 1 ^[24].

Дебљина просторних решеткастих конструкција је мања него код конвенционалних конструкција из разлога специфичног спровођења унутрашњих сила. Овакве просторне конструкције производе драстично мање силе извијања. Уколико се повећава распон, као одговор обично се добијају мањи модули који смањују могућност савијања решетке, али повећава тежину исте. Кроз раније анализе, које се узимају као репери за почетне параметре пројектовања решетке, усваја се висина конструкције и дефинишу се димензије модула. Постоје и друге промјењиве које је потребно ријешити, као што је цијена коштања. На овај начин поставља се спона између физичке конструкције и економске исплативости и оптималног избора типа двослојне решетке. Већина двослојних решеткастих конструкција је довољно крута, тако да су силе савијања обично јако мале или занемариве величине. Савијање и силе које га производе узимају се у обзир када се процијени да ће доћи до угибања конструкције под оптерећењем.



Слика 51. Основни параметри за дизајнирање двослојних решетки. Илустрација М. Кољанчић.

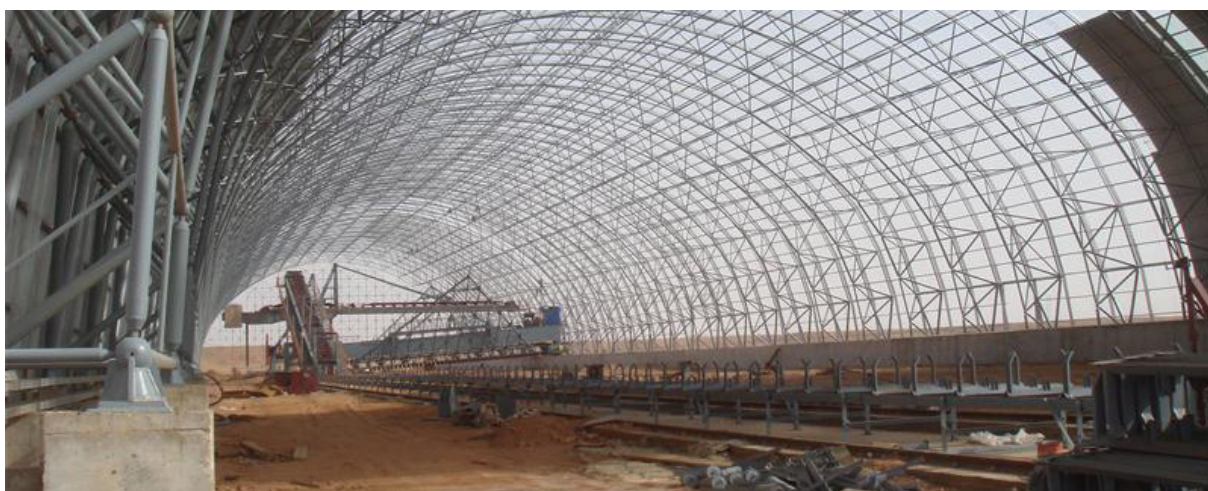
9 Детаљно истраживање са препорукама објављено је у научном раду *Spatial Structures at the Turn of the Millennium* (Wester T. Medowski, S. J. Mogensen), Kunstakademie Forlag Arkitektskolen, 1999.

3.2.3 МЕТОДЕ ПОДИЗАЊА ДВОСЛОЈНИХ ПРОСТОРНИХ РЕШЕТКИ - УТИЦАЈ НА ПЛАНИРАЊЕ

Због геометријских карактеристика и величина просторних решетки потребно је дефинисати метод подизања конструкције. Избор зависи од расположивог простора на локацији, доступне механизације, типа система и модуларности решетки, сигурности радника при монтажи и уградњи, и многим другим аспектима. Сигурност, брзина и економичност су циљеви који требају бити испуњени у што већој мјери. Поред многих специфичних ситуација са којима се може срести у пракси, методе подизања двослојних решетки могу се подијелити на неколико основних типова.

- Монтажа решетки директно на коначној локацији у ткиву објекта. Ова метода подразумева постављање штапова и спојница, као и префабрикованих модула, директно на коначну локацију у пројектованом систему. За склопове и монтаже који се раде на овај начин потребно је изградити помоћне привремене конструкције на које ће се решетка привремено ослонити док се не премости предвиђени распон. Елементи који су фабриковани у индустријским постројењима довозе се на градилиште, и подижу на привремену конструкцију. На овај начин није потребна механизација за подизање великих терета већ се подиже у више наврата мање количине елемената за уградњу. Примјер монтаже може се видјети на куполи Форд Ротонда (*Ford Rotonda factory*) коју је пројектовао Ричард Бекминстер Фулер (*Richard Buckminster Fuller*).

- Уградња просторних решетки у дефинисаним сегментима. Када се у основи подјели конструкција на сегменте тада се може изводити монтажа на тлу поред објекта и онда подизати на коначну локацију. У зависности од конкретне ситуације, и овде се може имати привремена конструкција, који су ту док у потпуности не заврши склапање решетки.



Слика 52. Подизање у сегментима. На слици је приказана просторна решетка закривљена у једном правцу. Фотографија власништво Ал Рафид индустрије (*Al Rafid Industry*).



Слика 53. Монтажа просторне решетки на тлу поред објекта. Наредна фаза је подизање једном од описаних метода. Фотографија власништво Фридом Стила (*Freedom Steel Co.*)



Слика 53. Подизање двослојне просторне решетке помоћу хидрауличних дизалица. Фотографија власништво Ал Фарокија (*Al Farooqi Engineering Consultants*).

Један од аспеката овог начина уградње је повећана сигурност радника на монтажи јер су на тлу и самим тим мања је могућност поврједе.

- Монтажа просторних решетки транслацијом на коначној локацији изнад тла^[24]. Прије подизања сегмената конструкције на ослонце се постављају шине помоћу којих се врши помјерање решетку на планирану локацију. На овај начин уградња се изводи паралелно са осталим радовима у унутрашњости објекта. Тиме се скраћује вријеме изградње, и смањују трошкови.

- Дизање комплетне решетки помоћу хидрауличких и других дизалица^[24]. Комплетна монтажа изводи се на тлу поред или унутар објекта прије подизања. Дизалицама се транслатира и поставља на коначну локацију у конструкцији. Ова метода убрзава процес монтаже и подизања, чини процес склапања сигурнијим за раднике који га изводе. Постоје разне варијанте овог метода. За решетке већих распона и тежина потребно је више од једне дизалице које ће синхронизовано подизати просторну решетку. У зависности од броја и позиције кранова, решетка се може ротирати и транслатирати у ваздуху у самој фази подизања, тако да се монтажа на земљи може слободно организовати. Метода подизања комплетне решетки може бити примијењена на било који тип двослојне решеткасте конструкције.

- Подизање цјелокупне конструкције и постављање на коначну локацију у објекту^[24]. Као и претходни и овај метод има предност монтаже на тлу. Због разлике у употреби машина, у односу на претходну методу, при подизању није могуће хоризонтално помјерање терета. Обично се користе хидрауличне дизалице. Главна хидраулична дизалица поставља се на средину, а помоћне се постављају на ивицама у основи решетки. Уз конструкцију се често подижу оплоте за стубове или зидове распоређене по обиму конструкције. Користи се углавном за типове двослојне просторне решетки који се ослањају по ивицама основе или оне које се ослањају на више стубова који могу да буду у пољу решетки.

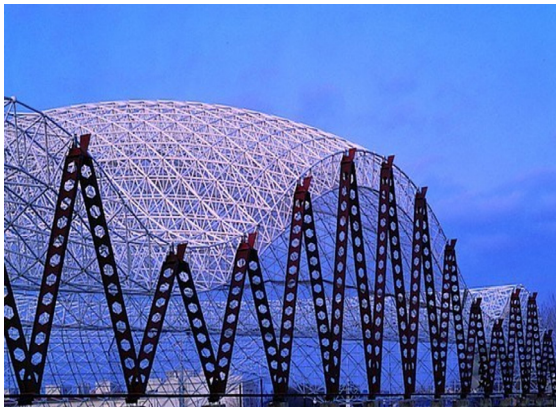
- Подизање комплетне решетки специјалним хидрауличним дизалицама^[24]. Ова метода је погодна за типове двослојних решетки код којих су ослонци стубови у пољу и на обиму форме. Подиже се са више хидрауличних дизалица постављених на позицијама стубова. И ова метода подржава монтажу решетки на тлу са подбаченим дизалицама и подметачима испод.

Наведене методе подизања¹⁰ су основне и најчешће кориштене у пракси. Прва се

10 Методе подизања су описане на основу сакупљених практичних искустава инжењера на разним пројектима. Подјела метода је преузета из научног рада *Space Frame Structures (Tien T. Lan)*, *International Journal of Space Structures*, 1985.

обично користи када ни једна друга није изводива. Простор за комбиновање ових метода и иновације је велики. Постоји одређен број критеријума који нису директно везани за саму постојећу конструкцију или облик решетке. Један од тих услова који врло често може да одлучи коју методу је потребно употребити, а то је терен око објекта и контекст у коме се налази. Тачније то је слободни простор и конфигурација терена и у одређеним случајевима близина сусједних објеката. У идеалним ситуацијама терен има равну конфигурацију.

Поред топологије терена потребно је имати слободан простор испод коначне позиције конструкције уколико је одабран метод подизања који не подржава хоризонталну транслацију конструкције. Постоји и начин да се монтажа решетке врши на тлу подигнута на одређену висину, довољну да се ту монтира све што је иначе планирано убацити у техничком слоју накнадно, инсталације, вентилационе канале, и др. Монтирана решетка са инсталацијама подиже се и позиционира на коначну локацију и тиме штеди вријеме и новац за накнадно убацивање елемената у конструкцију на висини. На примјеру дворане Џорди у Барселони (*Sant Jordi Sports Palace*) за Олимпијске игре 1992. године конструисаном употребом Орона система, подизање је извршено иновативном методом названом „Пантадом“, коју је развио Мамору Кавагучи (*Mamoru Kawaguchi*). Осмишљена је као варијанта подизања у којој се конструкција склапа на тлу, па се хидрауличним дизалицама подиже на коначну позицију. Због својих димензија, тежине и закључено је да је потребно раставити просторну решетку, закривљену у два правца, на три сегмента гдје се централни дио монтира директно испод своје коначне локације и подиже хидрауличним дизалицама. Остале двије форме решетке монтиране су изван објекта и подигнуте су великим крановима, јер је било потребно ослободити могућност транслације и ротације у ваздуху при подизању.



Слика 54 десно. Просторна решетка на комплексној аморфној форми. Фотографија власништво ЛФ-БЈМБ (*Bolted Joint Modular Building System*).

Слика 55 лијево. Форме конструктивно подржане употребом решеткастих конструкција. Конгресна дворана у Јужној Кореји, Кон Педерсен Фокс 2011. године. Фотографија власништво Гејл (*Gail International*).

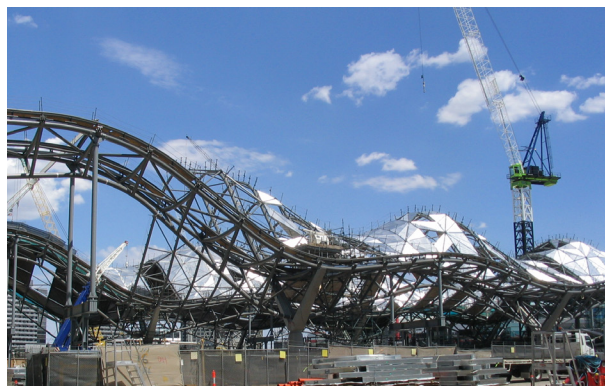
3.3 КОМПЛЕКСНЕ АРХИТЕКТОНСКЕ ФОРМЕ ЗА МАТЕРИЈАЛИЗАЦИЈУ ПРОСТОРНИМ РЕШЕТКАМА

Употребом просторних решетки могу се материјализовати разне архитектонске форме и обликовања. Иако се најчешће употребљавају на равним, просторне решетки могу да се употребе на комплексним формама као што су сводови, куполе, исјечци лопте, хиперболични параболоид или било који аморфни, двоструко закривљени, облик. Овакве просторне решетки обично се дизајнирају као двослојне са два паралелна слоја штапова повезаних дијагоналама. Поред облика који се конструктивно подржава употребом просторне решетки не постоји ограничење у смислу броја слојева.

Основна разлика између двослојних решетки и просторних решеткастих топологија је облик површи која се може дефинисати конструкцијом. Архитектонско обликовање тада може да буде закривљена површина или било који од математички дефинисаних облика. Облици се могу комбиновати да би се постигле жељене форме конструкције. Број комбинација је неограничен. Тражени облик конструкције игра одлучујућу улогу у скоро свим аспектима пројектовања и прорачуна, почевши од начина преноса оптерећења, снаге, чврстине, економичности конструкције па све до естетских квалитета завршеног пројекта. Просторне решетки се могу дефинисати са три различите одвојене математичке категорије форме, а то су једноструко закривљене, конкавне и конвексне геометрије. Цилиндрична љуска представља типичан примјер математичке површи која се може развити у раван, тако да на свим својим унутрашњим тачкама има нулти степен закривљености. Сферична или елиптична купола (исјечак лопте и елиптични параболоид) се сврстава у конвексне облике, док хиперболични параболоид представља чест примјер форме која је конкавна.

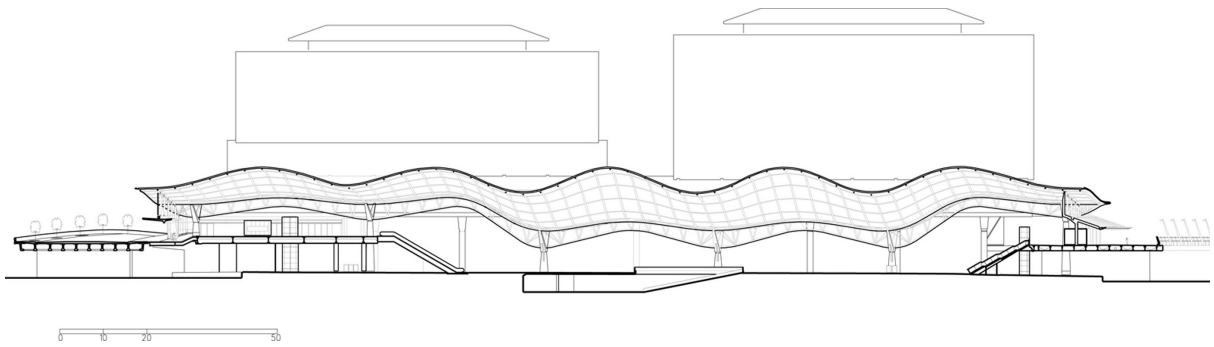


Слика 56 *лијево*. Ентеријер жељезничке станице у Мелбурну, Аустралија. Фотографија власништво Стивена Калахана (*Steven Calaghan*).



Слика 57 *десно*. Изградња просторне решеткасте конструкције на аморфној форми жељезничке станице у Мелбурну. Стивена Калахана (*Steven Calaghan*).

Изузев математичких метода за дефинисање тродимензионалних површи постоје и друге методе којима се могу тражити оптимални облици за просторне решетки. Са математичког аспекта посматрано површи се могу дефинисати употребом полинома вишег реда гдје постоје непознати коефицијенти који се установљавају са познатим обликом ивица форме и неколико познатих унутрашњих тачака. Ове дефинисане, познате, тачке одређене су архитектонском функцијом и особинама простора који се дизајнира обликовањем. Ако се са стране оставе комплексни математички прорачуни обликовања до форме се може доћи експерименталним путем. Један од оваквих начина био би да се установе границе математичке фигуре и познате тачке, након тога могу се качити мреже жица и ланаца, или површинских растегљивих тканина које имају еластична



Слика 58. пресјек кроз станицу у Мелбурну, Аустралија. Аморфна форма подржана употребом просторне решетке. Аутор илустрације непознат.

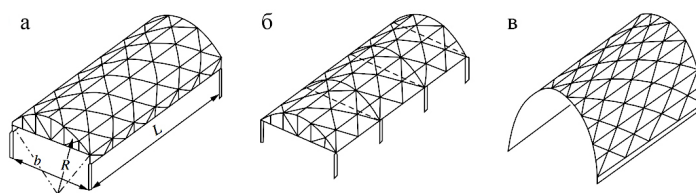
својства. Употребом ове методе може се доћи до мембране која даје информације о релативним позицијама тражених тачака у односу на унапријед установљене позиције, односно константе запремине објекта. Коначни резултат метода је облик мембране са минималном површином за унапријед постављене константе. Експериментално тражење форме помаже да се боље сагледа површ и потенцијални проблеми, али и предности које иста може да пружи кроз анализирање до синтезе сазнања и примјену на конкретној конструкцији.

Једнослојна просторна решетка је конструктивни систем који обично захтјева круте спојеве, док двослојне дозвољавају зглобне везе. Љускасти облици решетки су склони извијању, стога се препоручују мањи распони. Наравно уколико је потребно премостити веће распоне, онда се препоручује уситњавање у више форми или дизајнирање чворних елемената које ће неутралисати или прихватити торзионе силе. Краћи штапови решетки утичу на значајно смањење интензитета сила савијања у решетки. Неке од најчешћих тродимензионалних математичких куполастих форми за просторне решетке су:

- цилиндричне љуске,
- куполасте форме,
- љуске хиперболичног параболоида,
- неправилне математичке форме (закривљене у више праваца).

3.3.1 ЦИЛИНДРИЧНЕ ЉУСКЕ

Просторне решетке се могу употребити на форми цилиндричне љуске, облика који се обично састоји у пресјеку од кружног или елиптичног исјечка, параболе или неке друге сличне математички јасно дефинисане криве. Распоред и систем понављања модула, као и конструктивне особине, ове форме зависе од позиције ослонаца испод решетке, а тај однос може се означити као L/R , гдје је L удаљеност ослонаца у правцу осовине љуске и R је радијус који представља закривљеност форме у простору. На основу мјерења и записаних искустава¹¹ забиљежене су одређене релацију између L и R . Уколико је удаљеност између ослонаца велика тада се постављају греде као посредни елементи између просторне решетке и стубова испод. Улога им је да смање распон и равномјерно пренесу оптерећење на стубове. За однос $1,6 < L/R < 7$ каже се да су издужене љуске (слика 60a) [4].

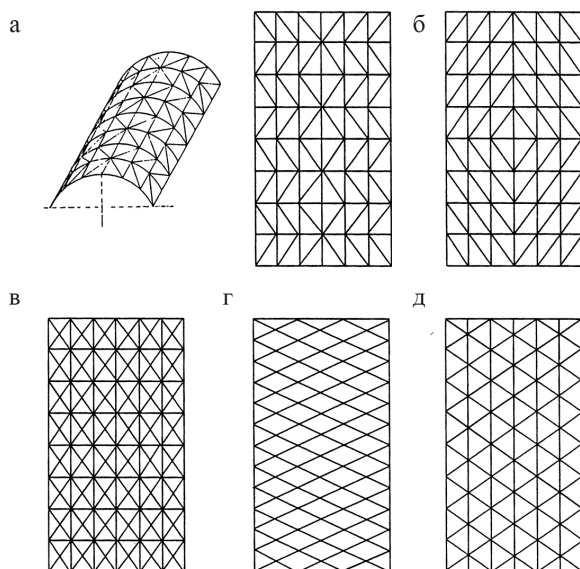


Слика 59. Цилиндричне љуске. Однос дужине, радијуса, подужног и попречног распона. Илустрација М. Кољанчић.

Ако се умањује попречни распон између попречних трансверзалних носача љуске, или ако осовински распон између стубова умањи, до границе у којима вриједи релација $0,2 < L/R < 1,6$ [4], тада примарно оптерећење прихватају лучни носачи који попречно сијеку љуску (слика 59б). Цилиндричне љуске оваквих карактеристика називају се кратким и њихово конструктивно прорачунавање је драстично другачије у односу на дугачке љуске, зависи од њихових пропорција и распореда носача на које су ослоњене. Тада, ако се посматра комплетна просторна решетка може се третирати као греда. Може се примјетити да је распоред оптерећења валовит граф у односу на дугачке љуске које немају више попречних лучних носача постављених по осовини код којих се крива распрострањања оптерећења третира као линеарни граф. Попречни носачи код кратких решетки, који се постављају ортогонално у односу на осу облика, могу да буду решетке или лучни носачи од разних материјала и склопова.

У ситуацијама у којима се цилиндрична љуска ослања континуално на зидове или греде испод по својим ободима форме, или када је однос L/R изузетно мали ($< 0,25$, као на слици 59в) силе се директно преносе из попречних пресјека просторне решетке на ослонце континуално^[4]. Могу се третирати као низ лукова иако немају попречне носаче. Повећавањем радијуса лука, или мијењам пресјека из кружног исјечка у елиптични лук, утиче се на смањивање сила које теже да савију облик и изазову смицање ослоњених ивица из лежишта на ослонцима. Као предности наведене методе може се навести да се могу премостити већи распони, али потребна је већа количина штапова и спојних елемената што утиче на поскупљење конструкције. Једна од примјена цилиндричних љуски овог типа је на спортским дворанама, сервисним хангарима и објектима код којих су зидови и стубови спојени, потребан слободан унутрашњи простор и висока спратна висина од пода до плафона. Однос форме и начина ослањања исте на носаче, те односу распона и радијуса закривљења у пресјеку је битна релација за анализирање. Још једна особина

¹¹ Однос просторне решетке и цилиндричне љуске је описан у познатом научном раду Рамсвеја, Екаута и Суреша под именом *Analysis, Design and Construction of Braced Domes* (Makowski Z. S.), Granada Press, London, 1984. Синтезом релевантних података и анализом истих дошло се до закључака који су практично употребљени и потврђени.

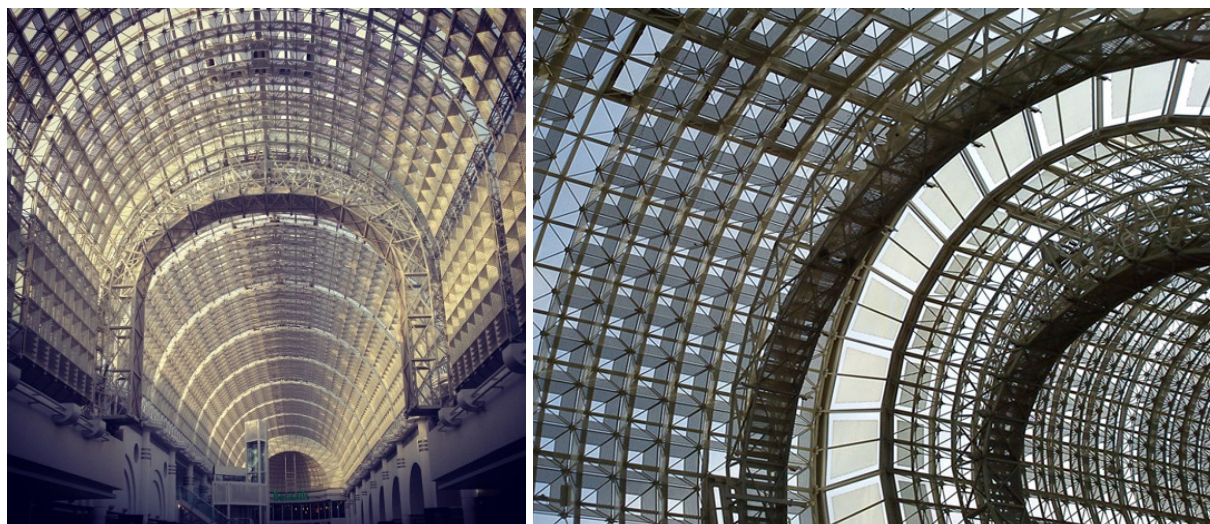


Слика 60. Типови облика и шема понављања модула просторних решетки на цилиндричним љускама. Аутор цртежа Џон Чилтон (*John Chilton*).

цилиндричних љускастих просторних решетки је могућност правилног понављања модула конструкције јер је могуће основну форму развити у раван.

Цилиндричне љуске су облик који је једноставно математички дефинисати. Оне имају особину да се могу развити у раван што олакшава дизајнирање и дефинисања система понављања елемената на просторној решетки^[17]. Могућност развијања у раван без дисторзије топологије је битна предност у односу на друге математичке површи код којих је тешко или немогуће развијање. С тим знањем долази се до констатације да је потребно употребити друге методе позиционирања штапова и спојних елемената на форми. Из разлога честе употребе цилиндричних љуски као форме

за дефинисање просторне решетки спроведена су многа истраживања и тестирања начина распоређивања и преношења оптерећења кроз исте. Показано је да се сваки од ових типова значајно разликује у овом погледу, с тога је изузетно битно да се правилно изабере одговарајући тип. Са собом носе различите карактеристике носивости и чврстоће. За разлику од употребе на осталим математичким формама цилиндричне љуске уједначено преносе оптерећење под равномјерним оптерећењем и пружају мање могућности савијања под неуједначеним оптерећењима. Иако ове карактеристике кажу да је погодна форма за употребу просторне решетки, на великим распонима једнослојне просторне решетки цилиндричне љуске склоне су нестабилности, поготово када је у питању асиметрично дјеловање сила. У тим случајевима ојачавају се додатним конструктивним елементима као што су лучне греде, попречне решетки лучног облика, челичне затеге и други конструктивни елементи.



Слика 61 лијево. Бентал Центар у Кингстону на Темзи, Велика Британија. Једнослојна просторна решетка. Аутор фотографије Иан М. Кардлеар Архитекти (*Ian M. Cardlehar Architects*).

Слика 62 десно. Поглед на просторну решетку из ентеријера, Бентал Центар. Аутор фотографије Иан М. Кардлеар Архитекти (*Ian M. Cardlehar Architects*).

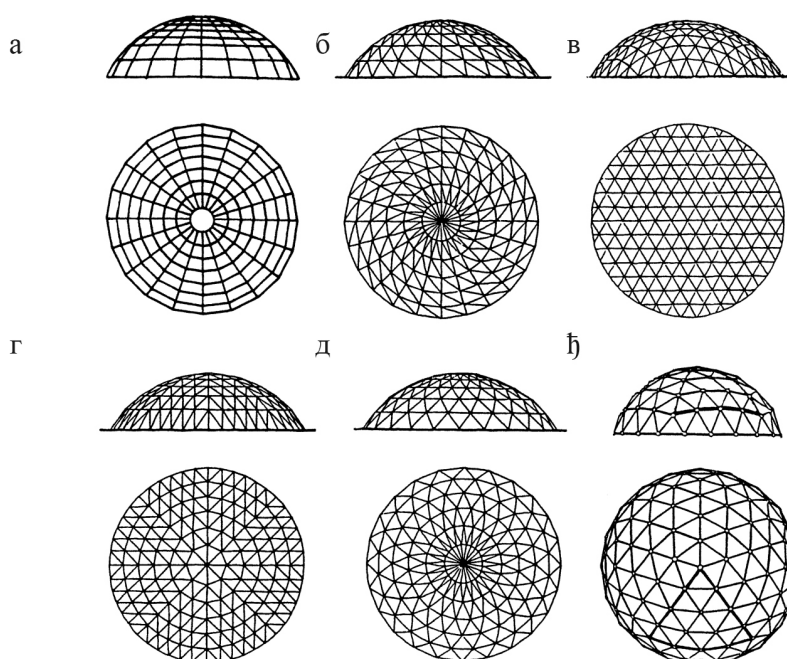
3.3.2 КУПОЛЕ



Слика 63. Зграда сената и скупштине у Бразилији, Бразил. Примјер употребе конкавне и конвексне куполасте форме у савременој архитектури. Фотографија власништво Марија Роберта Дурана Ортиза (*Mario Roberto Duran Ortiz*).

Куполе су једна од најстаријих геометријских форми употребљаваних за материјализацију архитектонских форми. Још су рани градитељи увидјели потенцијале једноставности, стабилности и предности геометријских карактеристика куполе. Грађене су употребом разних материјала и конструктивних склопова. Само неки од изузетних примјера су Пантеон (*Pantheon*), купола цркве Санта Марија дел Фиоре (*Santa Maria del Fiore*) и многе друге познате грађевине из богате историје архитектуре.

Инжењерима је куполаста форма дуго времена јако занимљива јер је облик који затвара и дефинише максимални простор употребом минималне површине у основи. Показало се да су јако економични облици аспекта избора конструктивног материјала. Генерално напрезања су у облику мембране и притиска у већем дијелу форме осим у граничном периферном појасу гдје се јављају силе затезања и мали моменти савијања на споју куполе са ослонцима.



Слика 64. Типови купола са подјелама и врстама модула за просторне решетке. Цртеж дјело Џона Чилтона (*John Chilton*).

Већина купола дефинише се као површ настала ротацијом пресјечне линије око осе ротације. Криве које се ротирају су обично круг, кружни исјечак, парабола, елиптични лук и оне својом ротацијом затварају кружну или полигону основу. Куполасте форме могу да буду конкавне или најчешће конвексне (испупчене).

На примјеру конгресне дворане и дворане сената у Бразилији архитекте Оскара Нимајера (*Oscar Niemeyer*), може се примијетити фантастична употреба конкавне и конвексне куполе (слика 63) у сваком погледу. Поред великог броја типова¹² позиционирања и понављања модула просторне решетке на куполама најчешће се понавља четири до пет:

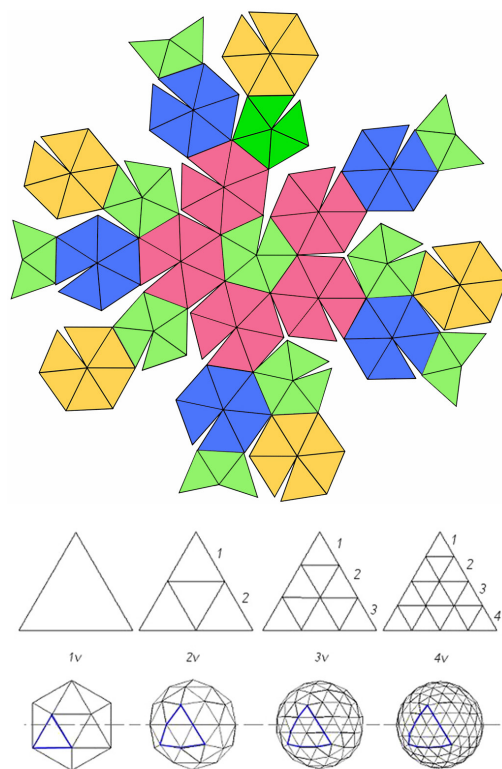
- купола са ребрастим носачима,
- шведлерова купола,
- растер у три правца на куполи,
- ромбоидни растер,
- геодетска, триангулирана купола.

Ребраста купола материјализује се употребом лучних носача или решетки постављених тако да се спајају у тјемени куполе у елементу који се назива потисни прстен. Могу бити пресјечени прстеновима на одређеном растојању по висини куполе. На овај начин носачи формирају модуле трапезастог облика. Ребрасте куполе се често учвршћују употребом ојачаног бетонског прстена у основи форме.

Шведлерова купола се састоји од вертикалних лучних носача повезаних међусобно дијагоналним штаповима и пресјечених са низом хоризонталних прстенова који укрћују конструкцију тако да иста може да прима и преноси асиметрично распоређена оптерећења. Дијагонални штапови се дефинишу као дијагонала која пресијеца трапезасти модул настао из пресјека лучних вертикалних носача са хоризонталним прстеновима. У изузетним ситуацијама основни трапез може се подијелити на четири троугла, односно може имати два дијагонална штапа^[19]. Ова врста система позиционирања штапова дјело је њемачког инжењера Ј.В.Швадлера (*J. V. Svaдler*) из 1864. године. Швадлерова решетка је доживјела велику употребу јер се могла статички анализирати и дефинисати тако да је спајање штапова извршено употребом тачкастих спојних елемената. У пракси се под дјеловањем аксијалних сила јављају могућности извијања и савијања. Данас употребом рачунарских и софтверских технологија може се релативно лако приступити статичком прорачуну и дефинисању решетке на Швадлеровој куполи, што није био случај раније.

Тип са ромбоидним системом понављања, гдје су модули два пута веће дужине од ширине, представља начин уједначеног система понављања модула решетке на куполама. Кружна основа се може подијелити у неколико специфичних сегмената (обично 6 или 8), а они се даље могу дијелити. Овај тип је јако популаран у САД и често се назива Кивитовом куполом^[19] (слика 64д).

Геодетска купола је дио специфично подијељене лопте на равне сегменте истих димензија коју је дизајнирао амерички инжењер Р. Б. Фулер. Дизајнирање геодетске лопте



Слика 65. Развијени модел геодетске лопте и однос подјела икосаедра и лопте (фреквенција геодетске лопте). Илустрација Магнус Венингер (*Magnus Wenninger*).

¹² Детаљна анализа подјеле може се пронаћи у научном раду *Spatial Structures at the Turn of the Millenium* (Wester T. Medowski, S. J. Mogensen), Kunstakademie Forlag Arkitektskolen, 1999.

или куполе почиње од математичког облика икосаедра који се може подијелити n пута. Са сваком новом подјелом облик постаје прецизнији и ближи форми лопте. Ако се сагледа мрежа троуглова може се уочити да уколико тјемена троуглова леже на лопти добијају се троуглови који имају различите дужине ивица. За конструктивну примјену у облику куполе са просторном решетком поједностављује се ситуација и апроксимира се идеална математичка дефиниција геодетске лопте тако што се дозвољава да тјемена троуглова не леже на лопти већ близу исте, па посматрано са дистанце и у зависности од густине подјела посматрач стиче илузију да се ради о сферичној форми. Битно је напоменути да са сваком новом подјелом добија већи број елемената који нису истих дужина. Тиме се може директно утицати на цијену коштања конструкције и самим тим доводи до закључка да нису исплативе за велике распоне јер потенцијално се добија значајно већи број различитих дужина штапова решетке. За премоштавање малих распона су исплативе и носе интересантне естетске квалитете. Свака подјела почетног икосаедра резултира већим бројем модула, а број дијелења често се назива фреквенцијом или резолуцијом лопте.

Куполе су за разлику од цилиндричних љуски геометријска форма која се не може разматати у равн. За потребе имплементације просторне решетке на неку форму увијек се настоји пронаћи начин да се што правилније изврши подјела облика.



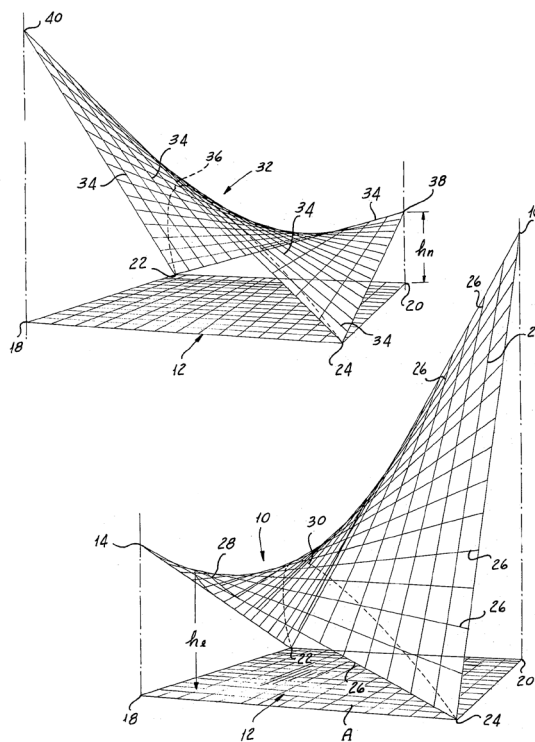
Слика 66. Пројекат Ричарда Бакминстера Фулера, $3/4$ лопте пречника 76 m . Конструисан за Експо сајам 1967. у Монтреалу, Канада. Геодетска купола са просторном решетком. Фотографија Кејстон Хултон (Keystone Hulton).

3.3.3 ХИПЕРБОЛИЧНИ ПАРАБОЛОИД - ФОРМА ЛЪУСКЕ

Хиперболични параболоид је површ настала транслацијом конкавног параболоида, или генератора, паралелно са самим собом по конвексној параболу, званој директриса, која је паралелна са генератором. Исјецањем добијене површи вертикално у пресеку добијају се параболе, а у хоризонтали хиперболе (слика 67 и 68). Хиперболични параболоид се често скраћено назива хипар.

Иако је на изглед неправилна слободна форма, она у себи носи математичке геометријске карактеристике које ју чине често употребљаваном формом у архитектури. Двоструко је закривљена површ и дијели са на двије групе равних линија које се сијеку, а у основи граде мрежу ћелија ромбоидног облика. Ово је једна од интересантних геометријских карактеристика, иако је двоструко закривљена површ може се дефинисати равним линијама. Самим тим представља занимљив облик за употребу на конструкцијама, јер нуди естетске квалитете, али и могућност уједначеног дизајнирања елемената који чине носаче. На основу ове особине може се рећи да се једнослојне хиперболичне решетке могу фабриковати од равних штапова, а двослојни системи решеткастих конструкција од површинских равних решетки (у облику греда). Један хипар може да се пројектује у основу на разне геометријске облике. Специјални случајеви су пројекције у правоугаоник и квадрат. На овај начин може се постављати на љуске и њима обликовати закривљене форме архитектонских објеката.

У контексту понашања у конструкцији може се примјетити да се под континуалним оптерећењем јављају силе смицања, које даље узрокују појављивање сила притиска и истезања. У реалним условима јављају се додатне силе у близини ивица у облику смицања и савијања. На хиперболичном параболоиду могу се употребљавати једнослојне и вишеслојне просторне решетке сличне дистрибуције подјела као на куполастим и цилиндричним љускама.

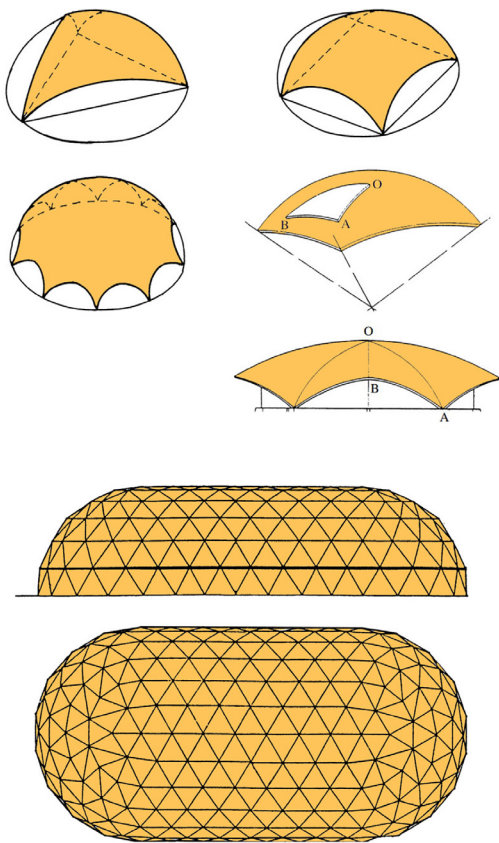


Слика 67. Хиперболични параболоид у координатном систему. Цреж власништво америчког патентног завода.

3.3.4 КОМБИНОВАНЕ ФОРМЕ И ДОБИЈАЊЕ КОМПЛЕКСНИХ ОБЛИКОВАЊА

Просторне решетке се могу материјализовати на формама једноструко закривљене цилиндричне љуске, двоструко закривљеног исјечка лопте и на хиперболичним параболоидима. Ово су облици који посједују одређене геометријске математичке правилности, тако да су погодни за дизајнирање интересантних растера за фабрикацију модула конструкције. Поред појединачне употребе могу се исијецати и комбиновати да се добију комплексни геометријски облици. На *слици 68*, а може се видјети један од начина изоловања облика из цилиндричне љуске кроз дијагонално исјецање. Комбиновањем добијених облика могу се формирати куполасте структуре разних обликовања (*слика 68*). На сферичним љускама могу се користити исјечци троугаоног облика, квадрата или нгона као што је приказано на *слици 68*. Даље их је могуће слагати у формације које дефинишу динамичне куполасте облике^[25].

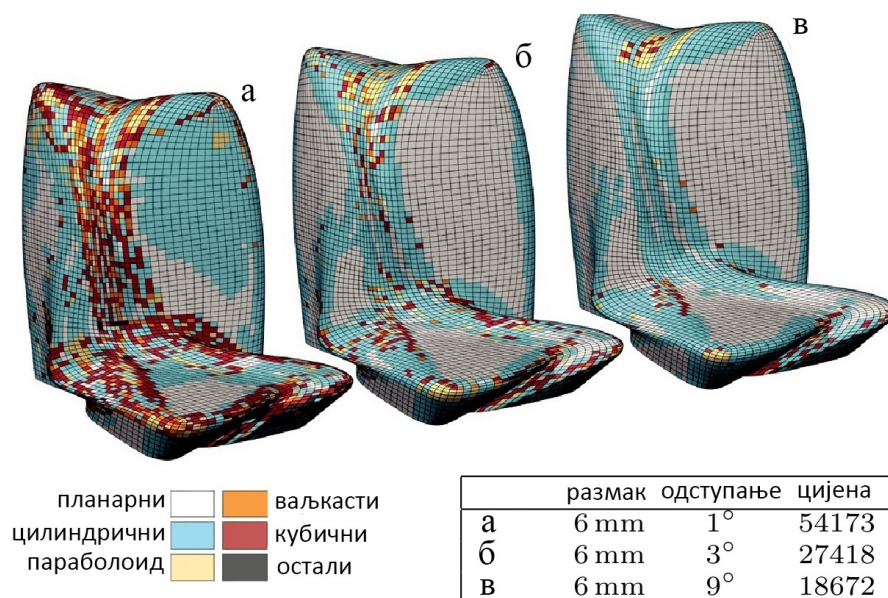
Математички геометријски облици су деценијама служили архитектама као инспирација. Са аспекта естетике истраживани су вијековима и употребљавани су у разноврсним комбинацијама. Употреба површи слободне форме доживјела је експанзију од деведесетих година прошлог вијека и још увјек траје. Овај напредак је омогућио развој савремених рачунарских и софтверских технологија, као и нове методе фабрикације. Напредак није само у смислу обликовања и приказа комплексних геометрија него и у контексту рационализације и оптимизације, које директно утичу на економску компоненту, а самим тим и шире прихватање. Савремене технологије које омогућавају аутоматизоване процесе моделовања, оптимизације и рационализације у разним аспектима употребе на конструкцијама и чувања података за брзу и ефикасну фабрикацију увећало је постојећим индустријским постројењима. За савременог инвеститора ово значи далеко приступачнију и сигурнију инвестицију, него што је то био раније случај када се говори о решеткама на слободним формама. Један од главних аспеката представља рационализација неправилних облика, односно смислено уситњавање за употребу постојећих конструктивних система. Употреба оваквих форми је комплексан мултидисциплинаран процес који је, показало се на практичним реалним имплементацијама, итеративан алгоритамски рад на анализирању, моделовању, прорачунима и модификовањима у потрази за оптималним геометријским карактеристикама погодним за употребу на вишеслојним просторним решеткастим конструкцијама. Сфере и љуске се често називају прерационализованим облицима форме јер се може ослонити на претходно искуство у употреби. Слободне форме се не могу подвести под категорију



Слика 68. Комбиноване површи настале од сегмената цилиндричне љуске и куполе, као и комбинована форма састављена од сегмената лопте и цилиндра. Комбинације омогућавају дефинисање простора и искориштавање најбољих карактеристика појединачних форми у комбинованој. Цртеж Тиен Т. Лан (Tien T. Lan).

јер свака је јединствена и потребно је индивидуално приступити са свих аспеката дефинисања и оптимизовања за употребу. Геометријске особине двоструко закривљених површи захтијевају велики број различитих конструктивних елемената и осмишљених архитектонских детаља потребних за реализацију.

Оптимизација слободних површи за употребу на конструкцијама просторне решетке (једнослојне или вишеслојне) подразумева свођење на правилне мање површи¹³. Потребно је детаљно проучити карактеристике постојеће површи и приступити тражењу тополошке система понављања по површини од мањих правилних облика који се могу развијати у дводимензионалне форме^[12]. Овај процес, поред геометријске подјеле, захтијева да се иста ради у контексту одабраног конструктивног система и процеса фабрикације за који се пројектанти одлуче. На примјер, постоје могућности дизајнирања планарних и двоструко закривљених панела којима се може описати облик форме. Ивице поља која чине приближно или потпуно правилно тополошко понављање представљају штапове решеткасте конструкције. Самим тим директно утичу на облик и величину поља којима се дијели оригинална површина^[13].

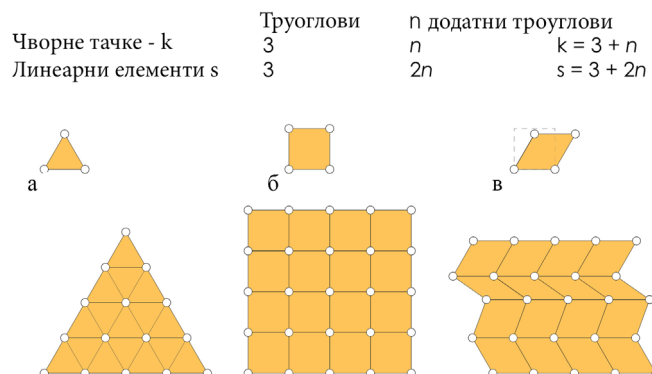


Слика 69. Слободна форма објекта са графички приказаном анализом оптимизације за панелизацију. Одступање од правилних геометријских облика правоугаоника постављених употребом алгорита за уситњавање на неправилних облика. Сличан приступ се користи за креирање шема понављања модула на комплексним формама за креирање система просторне решетке. Аутор илустрације непознат.

13 Рачунарске апликације омогућавају инжењерима да лакше сагледају комплексне геометријске облике какви су површи закривљене у два правца у простору. Параметарским моделовањем могуће је лакше уочити потенцијале и предвидјети проблеме у фази тестирања виртуелних прототипа те утицати на процес фабрикације још у концептуалној фази разраде пројекта. Дио закључака и истраживања на ову тему преузет је из *Functional Webs for Freeform Architecture* (Deng B, Pottmann H, Wallner J.), *Eurographics Symposium on Geometry Processing*, Wien, 2011.

3.4 ГЕОМЕТРИЈСКЕ ОСОБИНЕ МОДУЛАРНИХ СКЛОПОВА - ГЕОМЕТРИЈСКА СТАБИЛНОСТ

Како за разне конструктивне системе и склопове, тако и за тродимензионалне просторне решеткасте конструкције важно је да остану постојане у унапријед дефинисаним конфигурацијама под претпостављеним условима. Поред улоге материјала и система спајања елемената у модуле, велику улогу игра и сама геометријска организација саставних елемената, односно формација у коју се слажу у тродимензионалном простору. Конструкција је димензионално стабилна у колико се не мијења као резултат дјеловања спољашњих сила што је крајњи жељени циљ.

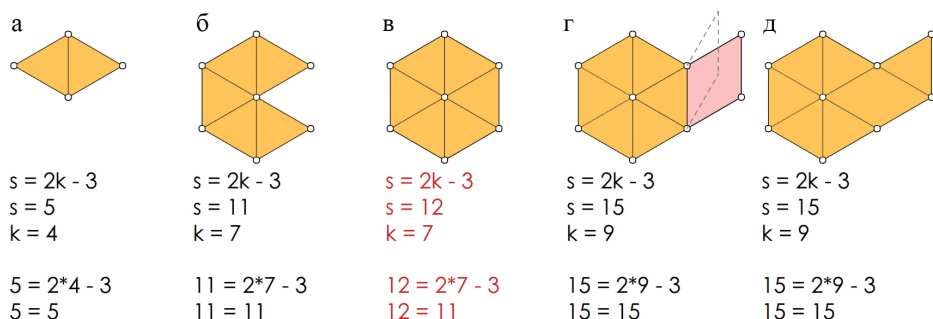


Слика 70. Геметријска стабилност облика са формулом за дефинисање првог услова стабилности. Цртеж дјело Михаела Бујсена (Michael Buijsen)^[8].

а) троугао

б) квадрилатерални облик

в) квадрилатерални облик под дјеловањем сила

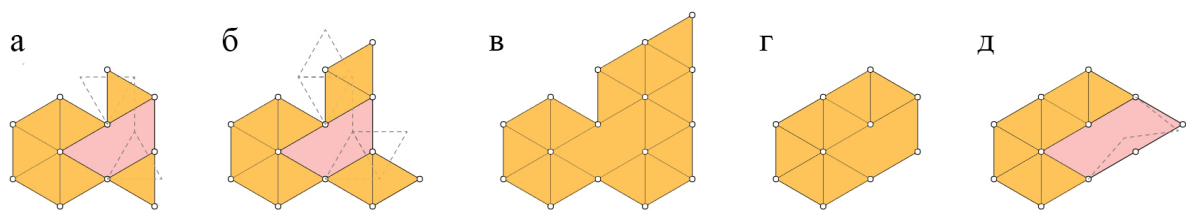


Слика 71. Провјера димензионалне стабилности употребом формула^[8]. Цртеж дјело Михаела Бујсена (Michael Buijsen).

Математички посматрано формација са најмање елемената је троугао сачињен од три чворне тачке и три штапа. Додавањем нове чворне тачке добија се правоугаони модул, а са додавањем више тачака резултат математички објекат који се назива полигоном. Ако се детаљније анализирају троуглови, као карактеристичан облик, може се примијетити да има три ивична линеарна елемента који могу имати исте или различите дужине. Три штапа, различитих дужина дају исти троугао. Овакви троуглови се не могу понављати без да се у једном тренутку не прекlope, за разлику од једнакостраничних троуглова. Са правоугаоницима истих димензија може се дизајнирати модуларни систем понављања. Поред дводимензионалног понављања, могу се организовати у формације које чине било какве тродимензионалне површи, под претпоставком да систем спојница просторне

решетке подржава спајања штапова под било којим угловима¹⁴. Као што се може видјети на *слици 70*. само је троугао геометријски стабилна фигура. Ако се чворне тачке назову k и додатне линеарне елементе s на *слици 70*. може се видјети формула која дефинише однос између броја чворова и штапова стабилних и нестабилних геометријских формација. Да би се неутралисала вриједност n која дефинише број додатних троуглова, горе наведену формулу за број линијских елемената може се одузети од формуле за количину чворова и помножити са 2. На овај начин долази се до једначине $s = 2k - 3$ ^[8]. Овако добијена формула је потребан, али не довољан услов да би геометријски облик био сматран стабилним. На *слици 71*. могу се видјети примјери геометријских облика који испуњавају услов по добијеној формули, али нису стабилне.

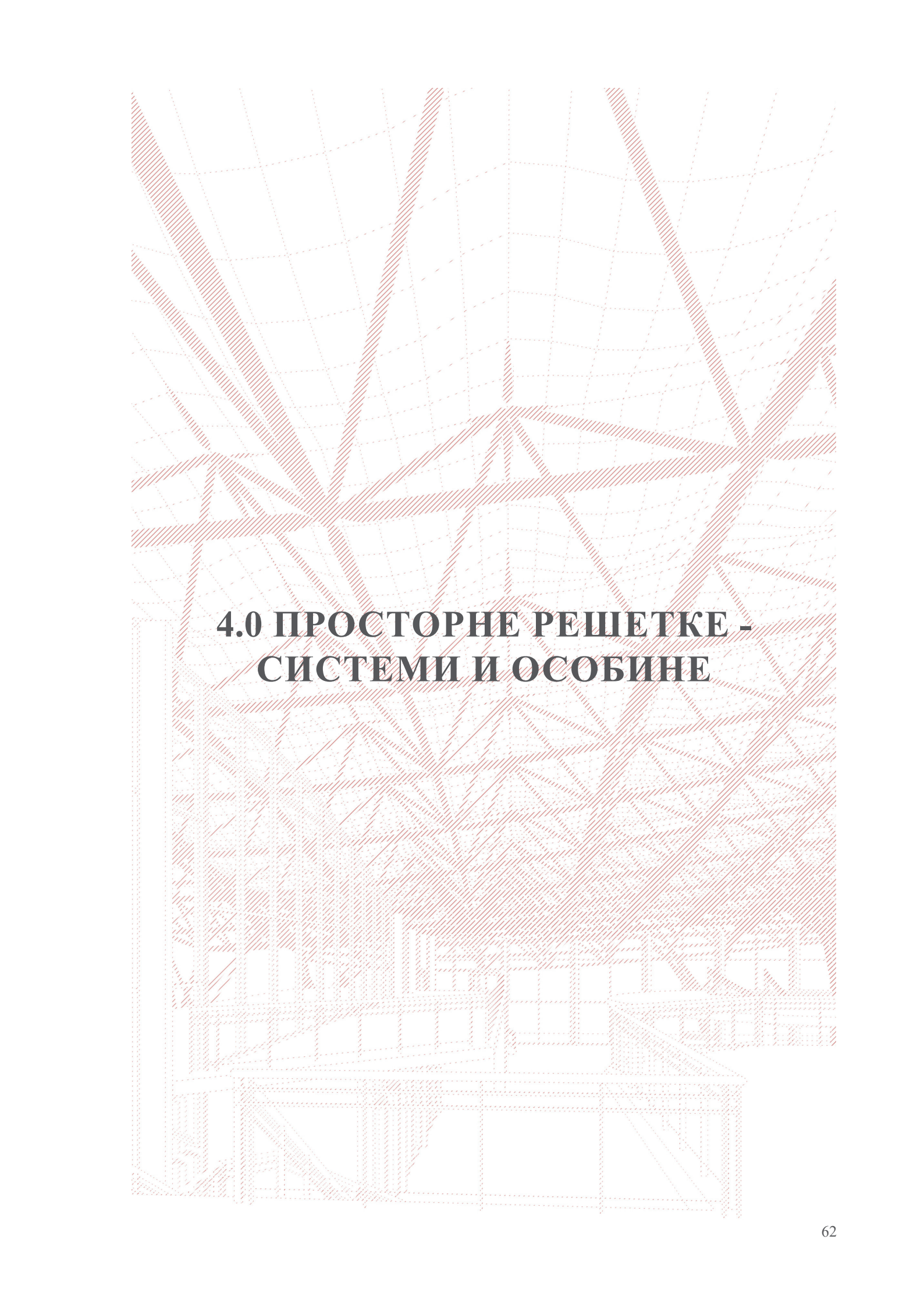
Поред тога што се може рачунски дефинисати један од услова, не може се у потпуности гарантовати да ће иста у постављеној формацији бити геометријски стабилна. Постоји још неколико особина које је потребно анализирати као што је приказано на *слици 72*.



Слика 72. Певјера стабилности форме употребом додатних правила. Црвена боја представља нестабилне тополошке формације. Цртеж дјело Михаела Бујсена (*Michael Buijsen*)^[8].

- а. Нестабилна, не троугаона форма, окружена стабилном конфигурацијом и три стабилне форме
- б. Нестабилна, не троугаона форма, окружена са три стабилне конфигурације
- в. Стабилна, не троугаона форма окружене са двије стабилне формације
- г. Стабилна, не троугаона форма, окружене са једном стабилном формом и двије слободне ивице
- д. Нестабилна, не троугаона форма, окружена једном стабилном конфигурацијом и са трислободне ивице.

¹⁴ Детаљно истраживање утицаја геометријских карактеристика математичког облика на конструктивну стабилност спровео је Михаел Буисен (*Michael Buisen*) у раду *Dynamic Space Frame Structures (Michael Buijsen)*, TU Delft, Delft, 2011.

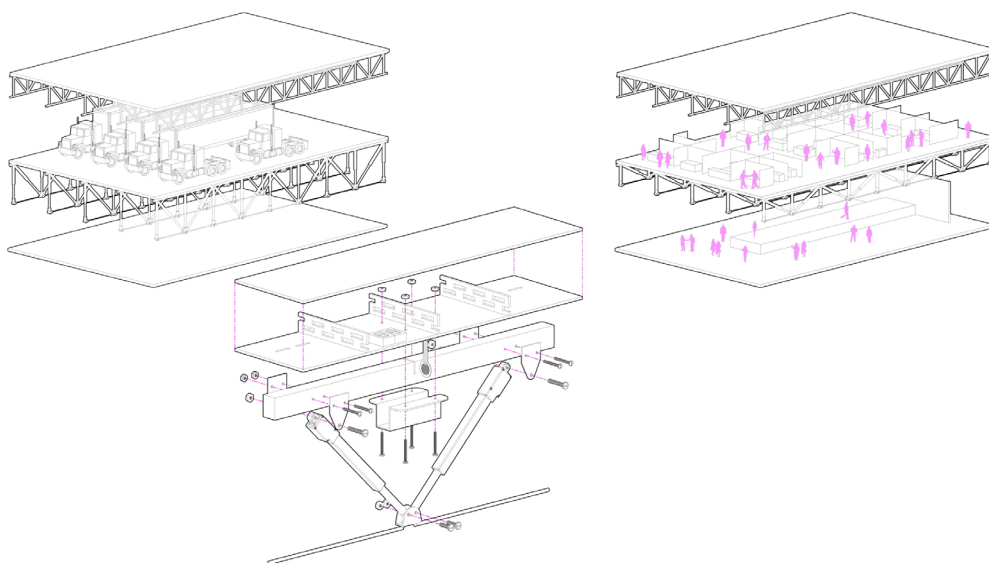


4.0 ПРОСТОРНЕ РЕШЕТКЕ - СИСТЕМИ И ОСОБИНЕ

4.1 УВОД У САВРЕМЕНЕ СИСТЕМЕ ПРОСТОРНЕ РЕШЕТКЕ

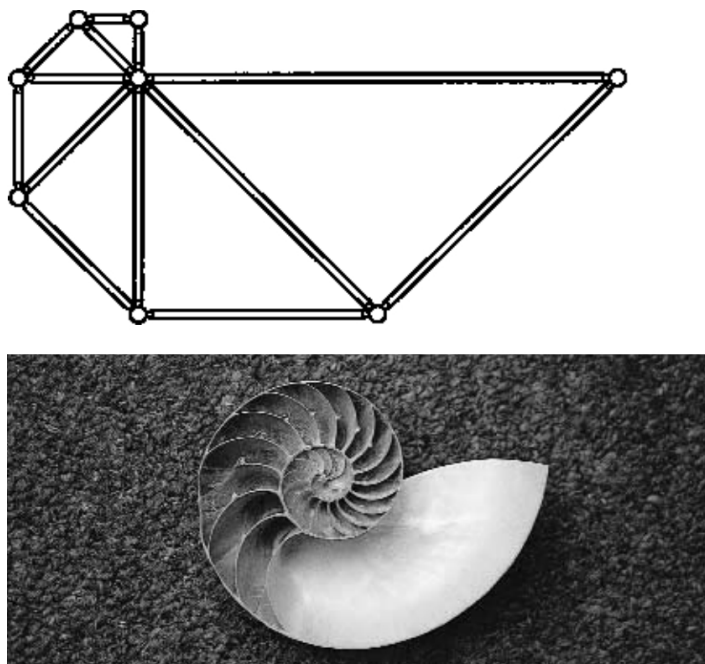
Просторне решетке су концепт за који су инжењери добили инспирацију у природним формама и структурама, њиховој лакоћи и оптимизованом систему преношења оптерећења. Од давнина посматране су природне конструкције и формације и дошло се до закључка да оне дјелују у правцу минималног напора^[23] (слика 74.). Најмања употреба материјала и максимална конструктивна носивост су једна од најважнијих особина истих до којих се долази на разне начине. Просторна решетка је један од одговора. Са проналаском савремених материјала који имају изузетну чврстоћу и лакоћу створене су могућности употребе оваквих концепата на комплексним формама. У претходним поглављима анализирани су геометријски облици и њихове особине на основу којих се могу материјализовати просторне решетке, као и формације и система понављања аксијалних елемената, односно штапова у простору. Систем није потпун без спојница и интеракције аксијалних елемената са чворним. Дефинисањем и интегрисањем оба елемента добија се “систем”.

Постоје многи стандардни типови просторне решетке који су временом развијани и усавршавани, па и на крају стандардизовани за масовну употребу. Многи од њих се баве и начином монтаже и подизања и генералним економским аспектима. Одређени системи посебно се фокусирају на избор материјала, начина транспорта, рјешавања логистичких изазова, сигурност при грађењу, изложеност негативним утицајима разних врста, естетским потенцијалима и многим другим. Инжењери су временом дали одговоре на ова питања тако да данас постоји значајан број система са унапријед познатим карактеристикама.



Слика 73. Динамична просторна решетка за мултифункционалну употребу са могућношћу прилагођавања дужине штапова у зависности од оптерећења које на њу дјелује. Тестни модел развио је Дејвид Лонг 2011. године. Овим пројектом су истражене и тестиране могућности примјене роботизованих система штапова контролисаним сензорима да би се добила прва динамична прилагодљива решеткаста конструкција. Ова конструкција представља примјер савремених тенденција при истраживању и примјени просторних решетки. Илустрација дјело Дејвида Лонга (*David Long*).

4.2 СПОЈНИ ЕЛЕМЕНТИ - ЧВОРНЕ ТАЧКЕ КОНСТРУКЦИЈЕ



Слика 74. У раној фази промишљања о системима који аксијално преносе оптерећење, из којих се изродила идеја о решеткастим конструкцијама, инжењери су инспирацију добили из природних структура. На слици се види поређење модуларног природног система насталог израстањем и Мерио штапова са омјером раста од квадратног коријена из централног чворног елемента. Илустрација Џон Чилтон (John Chilton).

Од тренутка када се појавио први комерцијални систем просторне решетке па до данас развијено је на десетине различитих варијанти на тему односа форме, геометријских формација и система спојних елемената који чине просторну решетку. Процес напретка у истраживању и имплементацији система није завршен. Са све већим и комплекснијим захтјевима, појављују се нови генерални или посебно дизајнирани системи за специфичне намјене¹⁵. Неки од њих се употребљавају дуже вријеме док су неки пројектовани за само један пројекат. Готово сви су са дијагоналним штаповима између слојева конструкције.

Комерцијално доступни системи просторних решетки могу се подијелити у три основна типа. Први се односи на системе који се састоје од дискретних, индивидуалних, елемената који се простиру од чворне до наредне чворне тачке. Овакви системи се у литератури често називају „*piece-small*“^[22]. Други тип чине решетке код којих су штапови континуални, а трећи чине системи који се фабрикују у индустријским постројењима и доносе се на градилиште као модуларни елементи.

Дискретни системи се разликују од осталих по дизајну чворних елемената¹⁶. Често користе шупље штапове различитих попречних пресека. Геометријске особине штапова често дају одговор на питање односа тежине конструкције и понашања под силама које дјелују у просторним решеткама, а које су углавном аксијалне силе затезања и притиска са малим или занемаривим силама савијања и торзије. Штапови кружног попречног пресека посједују одређене естетске квалитете пошто архитекти често остављају конструкцију видљивом. Разлика између цилиндричних штапова и оних са квадратним пресеком је само у детаљима спајања штапа и чворног елемента^[7].

Одређени комерцијални системи захтијевају додатне геометријске карактеристике

15 Систематична анализа система објављена је у научном раду Џона Чилтона (John Chilton) *Space Grid Structures* (John Chilton), Oxford Architectural Press, Oxford, 2000.

16 Детаљне разлике преузете као закључци научног рада *Cost-Effective Design of Space Structure Joints: A Review*, International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering (Mohamed I. Ali, Feng Fan, Peter N. Khakina, Ma H. H.), London, 2013.

линеарних елемената да би били дио истогa. На примјер Метро систем захтијева да се штапови спајају са купастим крајевима. Овакви завршеци се сједињују заваривањем са унапријед одсјеченим цилиндричним или штаповима са квадратним пресјеком. Поред Метро, Нодус и „*KT Space Truss*“ система, остали захтијевају штапове који су унапријед модификовани за примјену на њиховим спојним елементима у чворовима. Обично подразумијевају штапове који су равни на крајевима са равним или профилисаним облицима као што је случај са Триодетским системом. Одређени лагани системи као што је Унистрат или Модуспан (*Unistrut, Moduspan*) често користе хладно ваљане профиле који се савијају и имају отворе за шарафе. Разлика између система са дискретним елементима и осталих је у облику чворних спојних елемената и методама спајања штапова у истим. Постоји велики број различитих типова спојних елемената који најбоље илуструју тежину једноставних и естетски прихватљивих спојница. По типу чворног елемента могу се подијелити^[22] у неколико категорија¹⁷:

- сферични чворни елементи,
- цилиндрични,
- полигонални и призматични,
- плочасти,
- без чворних елемената.

Сферични чворни елементи су међу најпопуларнијим, а самим тим постоји и највише варијанти истих. Производе се као лопте пуног попречног пресјека или са шупљином. Пуне челичне лоптасте спојнице буше се под пројектованим угловима ради спајања са припадајућим штаповима и њиховим углом осовине у односу на референтни координатни систем у коме лежи решетка. Веза штапа и чворног елемента успоставља се употребом шарафа који пролази осовином штапа решетке и пролази кроз чворни елемент. Референтни системи који подржавају ову методу су поједине верзије Метро и „*Orona SEO*“ система. На наредној страници приказане су табеле¹⁸ са основним подјелама система са ч и без чворних елемената, као и системи спајања на модуларним системима просторне решетке^[25].

17 Подјела је резултат истраживања Џона Чилтона (John Chilton) у научном раду *Space Grid Structures* (John Chilton), Oxford Architectural Press, Oxford, 2000.

18 Закључци и илустрације преузете из научног рада *Space Frame Structures* (Tien T. Lan), International Journal of Space Structures, 1985.

Табела 2. Системи спајања са чворним елементима. (табела лијево)^[25]. Илустрације дијело Тиен Т. Лана.

облик чворног елемента	облик спојног елемента	попречни пресјек	примјер система решеткасте конструкције
сфера	пуни пресјек		Mero KK, Germany; Montal, Germany; Uzay, Italy; Zublin, Germany
			Steve Baer, United States; Van Tiel, Netherlands; KT space truss, Japan
	шупљи пресјек		Mero MT, Germany
			Spherobat, France
	шупљи		NS space trusses, Japan; Tubal, Netherlands; Orbik, United Kingdom
	шупљи		NS space trusses, Japan; Tubal, Netherlands; Orbik, United Kingdom
цилиндар	шупљи		SDC, France
	шупљи		Oktaplatla, Germany
	шупљи		WHSJ, China
	шупљи		Vestrut, Italy
диск	пуни		Triodetic, Canada; Nameless, East Germany
	шупљи пресјек		Octatube Plus, Netherlands; Nameless, Singapore
			Pieter Huybers, Netherlands
			Nameless system, United Kingdom
	равни		Palc, Spain
			Power strut, United States
призма	заварени		Pieter Huybers, Netherlands
			Piramodul large span, Netherlands
	пуни пресјек		Nodus, United Kingdom
	шупљи		

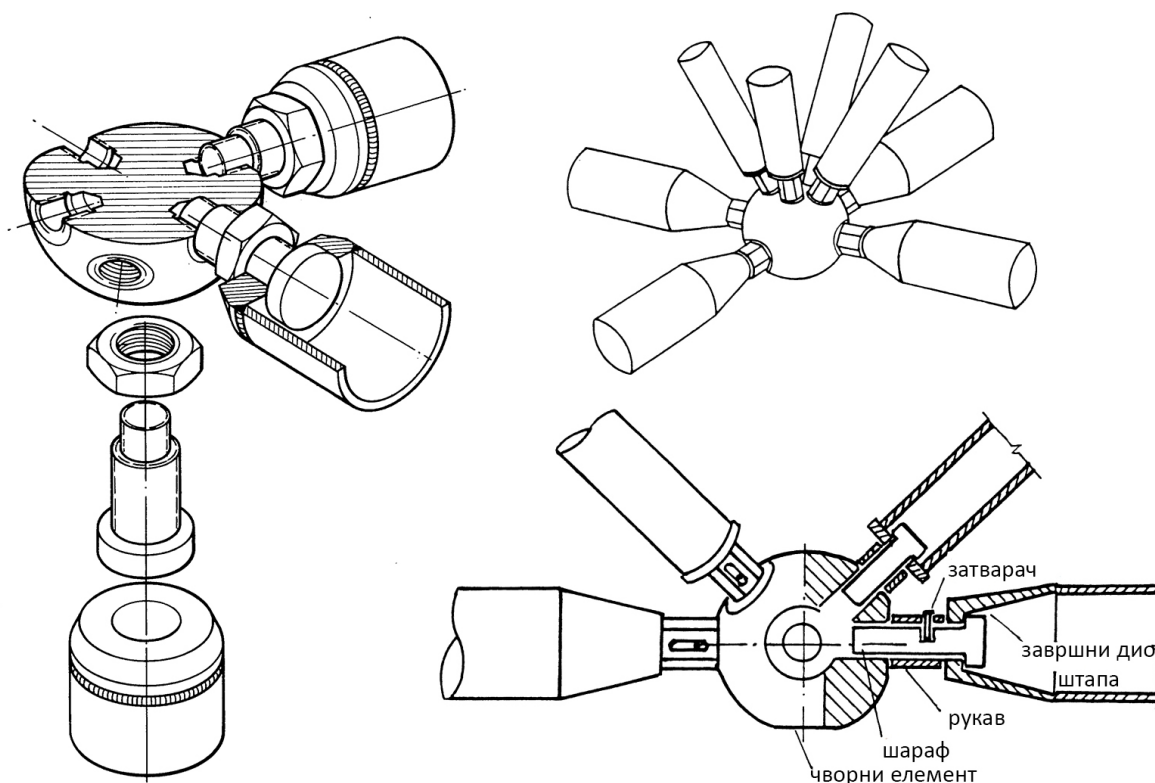
Табела 3. Системи спајања без чворних елемената са примјерима^[25]. Илустрације дијело Тиен Т. Лана.

облик чворног елемента	облик спојног елемента	попречни пресјек	примјери система
облик линеарног елемента	начин формирања		Buckminster Fuller
			Nonadome, Netherlands
	спољоштени и свијени		Radial, Australia
			Harley, Australia
додатни елемент на штаповима	плочице		Mai Sky, United States
	облик крајева штапова		Pieter Huybers, Netherlands
			Pierce, United States
			Buckminster Fuller

Табела 4. Системи спајања елемената просторне решетке на модуларним типовима^[25]. Илустрације дијело Тиен Т. Лана.

облик чворног елемента	префабриковани модуларни елементи	попречни пресјек штапова горњи / дијагонални / доњи	примјери система
правилна геометријска тјела			Space deck, United Kingdom
			Mero DE, Germany
			Unistrut, France
			Nameless system, Italy
2Д елементи			Ruter, Germany
			Nameless system, Italy
3Д елементи			Cubic, United Kingdom

4.3 МЕРО КК СИСТЕМ



Слика 75. Меро систем просторне решетке. Склоп и пресјек кроз карактеристични спој чворног елемента и штапа решетке. Илустрација власништво америчког патентног завода.

Меро КК је прво систематизовано рјешење просторне решетке са чворним елементима и додацима за спајање са штаповима за масовну употребу. И данас се сматра једним од најједноставнијих рјешења за конструисање тродимензионалних просторних решетки у сваком аспекту од пројектовања до склапања. Спада у најчешће употребљаване системе за разне врсте објеката и намјена под различитим условима. Постоји велики број подваријанти овог система. Састоји се од цилиндричних цијеви повезаних са чворним елементима сферичног облика помоћу једног шарафа по штапу¹⁹. Овај концепт је настао из истраживања природних форми доктора Макса Мангерингхаузена (*Max Menger- inghausen*). Његово истраживање витких, а чврстих тродимензионалних формација, као што стабљике биљака, инспирисале су га да размишља о употреби линеарних носача цјевастог попречног пресјека. Име Меро по коме је познат овај систем настало је од имена оригиналног проналазача "*Mangeringhausen Rohrbauweise*". Систем је иницијално замишљен као фиксни модуларни начин спајања у чворовима. Састоји се универзалних конектора, односно чворних кугли, и штапова минималне дужине 1 m па све до максималних 2.74 m^[40]. Штапови се могу фабриковати за било коју потребну дужину. Спојни чворни елемент је хладно кована челична лопта и назива се КК систем. Производи се са 18 предефинисаних отвора, под правилним угловима од 45°, 60° и 90°, за прелазне спојне елементе лопте и штапова које су машински избушене у процесу фабрикације у контролисаним условима^[22]. Овакви чворни елементи производе се стандардизовано у разним величинама у зависности од очекиваног оптерећења^[40]. Такође производе се у стандардним серијама чворне кугле са мање рупа, које се обично користе као ојачања главне конструкције. Поред најчешће кориштених стандардизованих кугли у Меро систему је могуће захтијевати чворне елементе са рупама под било којим углом

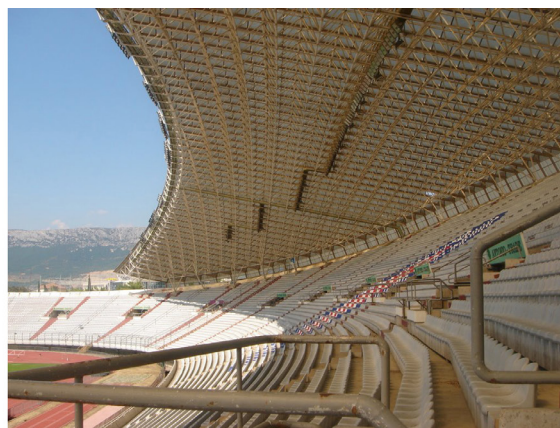


Слика 76. Примјери изведених Меро систем просторних решетки на великим и малим пројектима. Слика лијево приказује један типични спој штапова у чворном елементу на пројекту Бисфера 2 у Аризони, САД. Фотографије власништво Маро ТСК компаније (Mero TSK).

јер се систем ослања на савремене прецизне машинске методе обраде у индустријским постројењима. Ово је једна од предности развоја савремених рачунарских и машинских технологија.

Углови се могу одредити и претворити у рупе за конекторе штапова са јако великом прецизношћу. Једино ограничење које посједује бушење рупа у куглама је да сусједне осовине морају да буду веће од 25° , што директно утиче на креирање формација штапова и планирање система понављања^[40]. Сама чињеница да је могуће формирати учвршћивање штапова у чворовима под овако различитим угловима представља једну од основних предности Меро система за употребу на двоструко закривљеним сложеним формација елемената просторне решетке. Може се рећи да су типови конструктивних спојница изузетно погодни за примјену, не само на правилним, него и на неправилним површима које спадају у категорију неразвијајућих двоструко закривљених површи. Такође треба узети у разматрање могућности које се отварају архитектама при дизајнирању просторних решетки и постизању тражених естетских квалитета. Штапови за употребу са Меро системима су обично шупљи и цилиндрични, у зависности од избора специфичног типа система. Уобичајено су од челика или алуминијума са крајевима који се сужавају према спојницама у чворним тачкама. На крајевима штапова се постављају се шарафи, који служе да се штап учврсти са чворним елементом. Уврћу се у чворни елемент и на тај начин чине везу која не дозвољава смицање осе аксијалног у односу на центар чворног спојног конструктивног елемента.

Уобичајено је да се метал посебно заштићује од корозије која може временом да

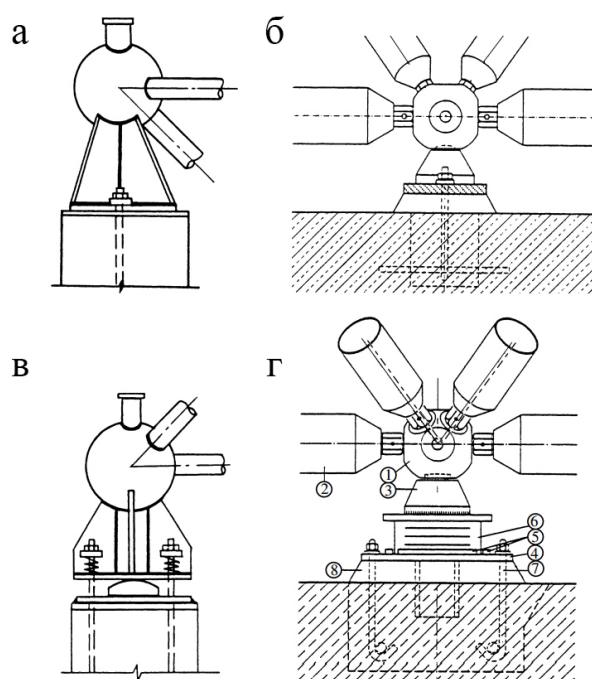


Слика 77. Стадион у Сплиту, Хрватска. Кровна конструкција из два сегмента материјализована употребом Меро система просторне решетки. Фотографије власништво министарства културе Републике Хрватске.

угрози конструктивне карактеристике система. Метро Холц (*Mero Holz*) систем се може материјализовати употребом ламелираног дрвета које се, у овом случају, користи за штапове решетке, а спаја се чворним елементима помоћу челичних прелазних елемената.

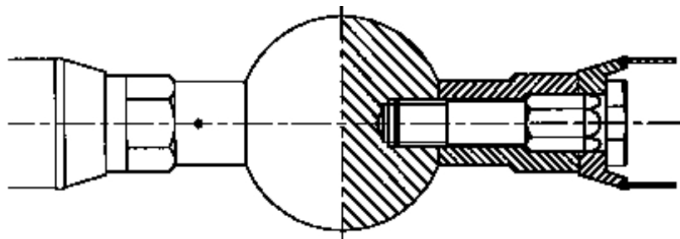
Величина спојног елемента између чвора и штапова највише зависи од сила за које се систем пројектује и прорачунава. Силе затезања се преносе од почетка штапа до одговарајућег чворног елемента преко кружне спојнице па све до јединственог шарафа посматраног штапа у систему. Силе притиска преносе се директно преко рукавца шарафа за спајање непосредним контактом истога са унутрашњом назубљеном површи. На овај начин штап може да заузме само један могући положај у конструкцији^[22].

Облик спојног елемента је такав да се све аксијалне линије утицаја примања и преношења сила кроз штапове сучију у центру чвора решетке. Скоро апсолутно је неутралисана могућност постојања ексцентрицитета у чвору решетке. Тестирањем и искуством произвођачи су дошли до табела које показују узајамне односе између чворних кугли, штапова и карактеристика спојних шарафа. Метро системи решеткастих конструкција имају на располагању велики број стандардизованих елемената са свим познатим карактеристикама који су доступни инжењерима. Метро системи су доказани у пракси као приступачни, сигурни, флексибилни и стандардизовани системи. Елегантно ријешени спојеви, конструктивно поједностављени са могућношћу дизајнирања великог броја формација и материјализовања комплексних архитектонских форми, прије 50 година омогућили су популаризацију употребе просторних решетки.



Слика 78. Позиционирање елемената Метро система. Илустрација дјело Метро ТСК компаније (*Mero TSK*).

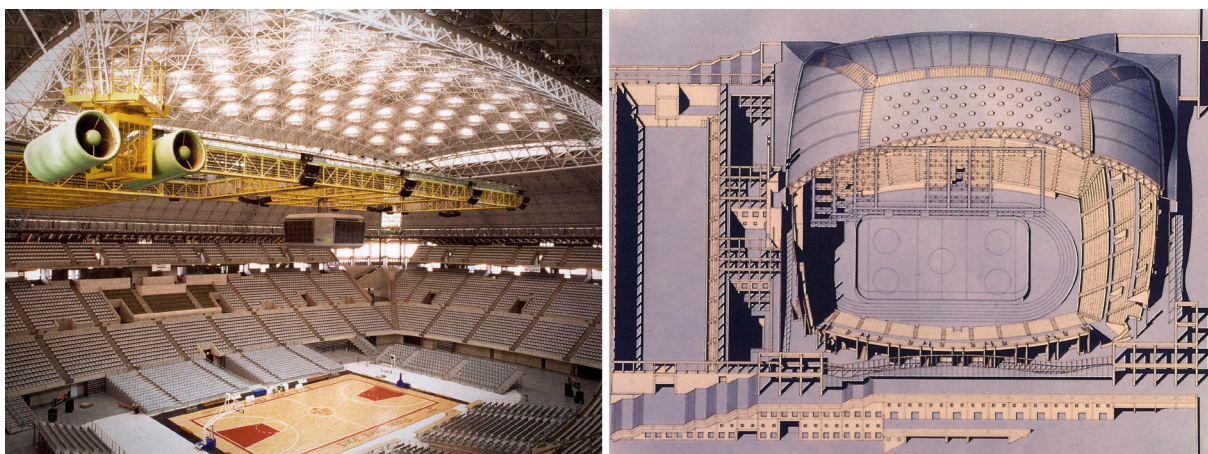
4.4 ОРОНА СЕО СИСТЕМ



Слика 79. Пресјек кроз типични спој чворног елемента и штапова "Orona SEO" система просторне решетке. Илустрација Џон Чилтон (John Chilton).

Систем просторне решетке Орона СЕО²⁰ (*Orona SEO*) развијен је у Сан Себастијану у Шпанији. Може се у грубо дефинисати као конфигурација састављена од челичних кугли и цилиндричних штапова. Слично као Метро, тако и Орона СЕО, спада у групу „*piece-small*“ система јер постоји јасна подјела на индивидуалне елементе система. Орона је први пут употребљена на пројекту кровне конструкције спортске дворане Сант Џорди (*Sant Jordi Sports Hall*, на слици 80).

У СЕО систему постоје пуне челичне кугле са избушеним рупама у зависности од позиције чворног елемента у геометријској формацији штапова. Број штапова који се сучију у јединственом чвору ограничен је само међусобним односом, односно геометријским интеракцијама у простору. Засјечени конични дијелови спајају се методом заваривања са осовински постављеним челичним цилиндричним штаповима (слика 79).



Слика 80. Дворана Сант Џорди изграђена за потребе Олимпијских игара у Барселони 1992. Кровна конструкција материјализована употребом "Orona SEO" система просторне решеке. Фотографија и власништво Орона СЕО компаније.

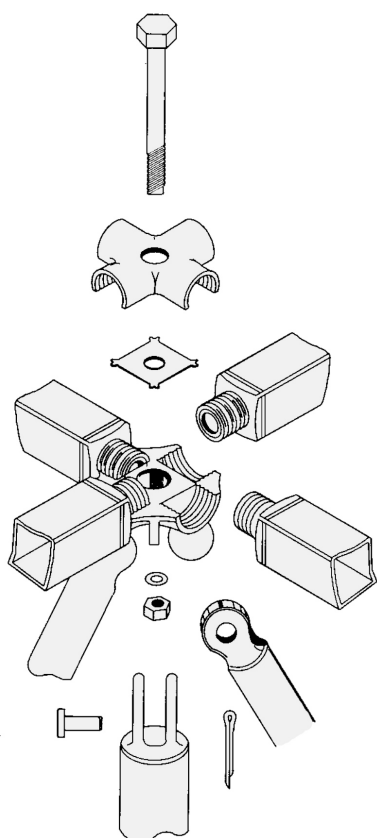
Конични прелазни елементи у себи носе челичне спојне шарафе. Између цилиндричног штапа и припадајуће челичне чворне лопте поставља се, такође челични, рукав који има задатак да чува унапријед дефинисано пројектовано растојање штапа од чворног елемента. Да би се учврстио спој рукав употребљава се шараф који улази у чворну куглу и тиме се остварује веза система. На овај начин могуће је обрнуто дјеловати, у смислу одвртања штапа из система чиме се поједностављује процес демонтаже што је један од честих захтјева инвеститора.

Током фазе фабрикације цилиндрични штапови се спајају нераскидивом везом, методом заваривања, за коничне прелазне елементе, да се избјегне додатни корак при монтажи на самој локацији. Поред уштеде времена спајање ових елемената у

20 Детаљно истраживање и опис система може се пронаћи у научном раду *Space Grid Structures* (John Chilton), Oxford Architectural Press, Oxford, 2000.

аутоматизованим погонима као резултат даје изузетно прецизне геометрије штапова. Штапови решетке доносе се на градилиште и заврћу за одговарајуће чворне елементе у дефинисаним позицијама конструкције. Коначна дужина аксијалног склопа, без чворова, дефинише се на локацији уз помоћ шарафа тако да се може неутралисати акумулација грешке. Дозвољено одступање, по препоруци произвођача је $0,5\text{ mm}$, што је податак који говори о како прецизном систему се ради^[22]. Прелажењем дозвољене толеранције грешка се може акумулирати, а као резултат појављује се смицање осовина штапова у односу на центар чворне кугле, што даље води до потенцијалне нестабилности цијелог система. Због велике потребе за изузетном прецизношћу, за бушење рупа у чворним куглама обично се користе аутоматизоване виско прецизне машине.

4.5 НОДУС СИСТЕМ



Слика 81 лијево. Тродимензионални склоп карактеристичног споја чворног елемента и штапова Нодус система. Цртеж дјело Џон Чилтона (*John Chilton*).

Слика 82 десно. Типични челични елементи стандардног чвора Нодус система. Добијају се излијевањем високо квалитетног челика. Фотографија власништво Џон Чилтона (*John Chilton*).

Системи са шупљим сферичним чворним елементима могу се подијелити на типове који су потпуно сферични и имају прецизно унапријед пројектоване и пробушене отворе за везу са штаповима и типове који чине сферични елементи који се састоје из два дијела, приближно хемисферичне форме, са или без унутрашње плоче. У случају другог типа штапови се спајају помоћу приступних отвора који се не буше, него су производ геометријског склопа два дијела и међусобно се уклапају. Постоје разни начини фиксирања аксијалних и чворних елемената. Један од начина понуђен је кроз Нодус²¹ систем.

Нодус систем спада у групу дискретних типова решеткастих конструкција. Развијен је касних шездесетих година XX вијека од стране “*Tubes Division*” огранка “*British Steel Corporation*”. Комерцијалну употребу први пут доживљава раних седамдесетих година, а од средине осамдесетих година власништво над патентом и правом производње и дистрибуције има “*Space Deck Ltd of Chard*”. Током развоја систем спајања и чворних елемената пројектован је у разним под типовима заснованим на основном концепту Нодус технологије. Сprovedена су многа тестирања на разним формацијама, величинама и конструктивним карактеристикама елемената Нодус система. Након почетних употреба извршене су бројне интервенције на систему како би се побољшале конструктивне карактеристике.

Спојни чворни елементи Нодус система састоје се од дискретних елемената

21 Детаљне анализе Нодус система могу се пронаћи у научном раду *Space Grid Structures* (*John Chilton*), *Oxford Architectural Press, Oxford, 2000*.

комплексних геометријских карактеристика (слика 81 и 82) код којих прецизност израде игра велику улогу када су у питању конструктивне перформансе склопа. Специфичне прелазне спојнице су од челика. Производе се ливењем челика у калупе, а затим се елементи спајају у чворну куглу у постројењима за фабрикацију како би се повећала прецизност.

Сам чворни елемент се састоји из два дијела који чине цјелину спајањем помоћу шарафа од челика високих перформанси. Постоје два типа спојница један за штапове у хоризонтали, а други за дијагоналне штапове. Резултат система је такав да се аксијални елементи могу третирали као континуални и тиме неутралише појава сила које се уобичајено третирају као маргиналне када су у питању просторне решетке. Постоје четири стандардна типа спојних елемената у чворовима, и разликују се у зависности од типа и димензија попречних пресека штапова^[22].

Нодус систем је један од често употребљаваних на конструкцијама формираним на равним површинама. Карактерише га стандардизованост и једноставност монтаже. Основна особина му је да се велики дио монтаже може урадити у фабричким постројењима, тако да се при подизању користе најједноставније методе и појефтиније уградња.

Поред позитивних карактеристика, посједује и одређене недостатке. Један од њих је ограниченост при креирању геометријских топологија линијских елемената у просторној решетки. То је резултат дизајна чворних елемената који дозвољавају постављање штапова у само два правца са малом могућношћу манипулације истим. Као успјешни примјери употребе могу се навести употреба Нодус система на изложбеној дворани у Бирмингему (*The National Exhibition Centre and Birmingham International Arena*) у Великој Британији и други терминал аеродрома у Манчестеру.

4.6 ТРИОДЕТСКИ СИСТЕМ

Триодетски систем је један од најпознатијих дизајнираних употребом пуних цилиндричних чворних елемената који су обично од алуминијума (*слика 83*). Геометријски посматрано они су цилиндричног облика са наzubљеним вертикалним зидовима, у чије отворе улазе цјевасти елементи са спљоштеним крајевима. Позиција им се задржава у фиксном стању употребом шарафа.

И триодетски систем спада у категорију система са дискретним елементима. У односу на остале користи потпуно другачији приступ. Развијен је педесетих година XX вијека у Отави, Канада. Фокус овог система, и основни проблем који је рјешава, је проналазак најједноставнијег начина спајања великог броја штапова у једном чворном конструктивном елементу (*слика 83*). Посматрајући машине са вилицама које притиском држе елементе тестиране на истезање дошло се на идеју да се притисак користи као спојни механизам. Чворни елементи могу да приме различите формације штапова, које зависе од могућности усјецања жљебова у чвор. Потребно је да се штапови на крајевима спљоште. На овај начин нису ослабљени јер материјал није уклоњен из пресјека овом методом задржава конструктивне карактеристике.

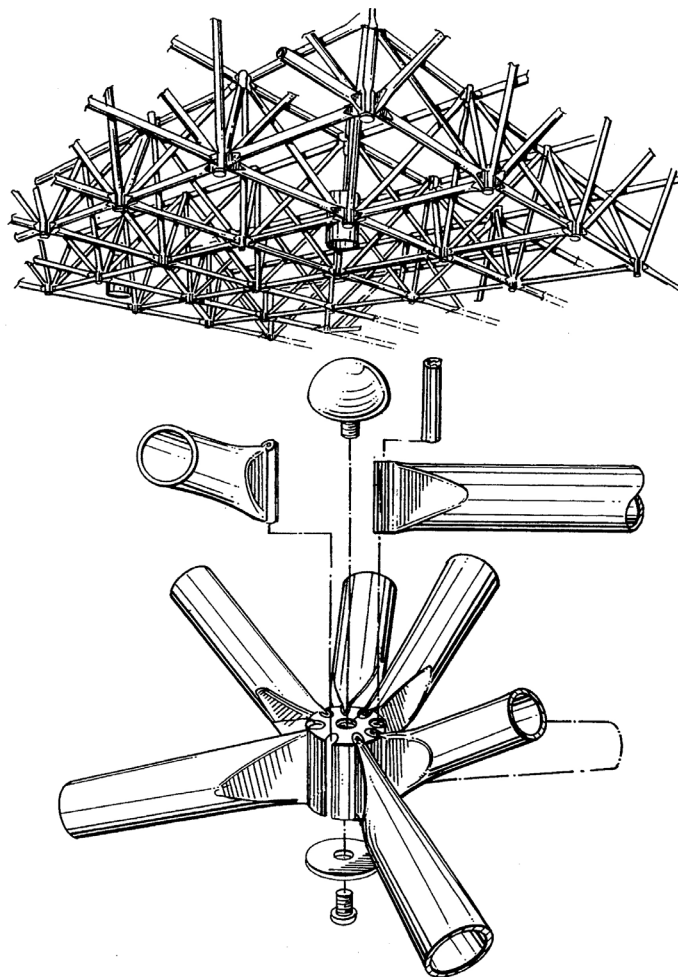
Елементи овог система су од алуминијума, што смањује сопствену тежину конструкције. Један од утицаја је поднебље гдје је развијен, Канада, у којој шездесетих и седамдесетих није било довољно квалитетног челика на тржишту. Цилиндричне шупље цијеви се производе у фабричким постројењима методом извлачења или ваљања са заваривањем спојне ивице. Велике дужине у производњи сијеку се по наруџби клијената на коначне дужине штапова са прецизношћу и толеранцијом од $0,15\text{ mm}$ ^[22].

Монтажа је такође поједностављена. Када се сви штапови поставе на предвиђену локацију, веза се осигурава заврњима за које није потребан посебно софистициран алат. Триодетски систем се једноставно производи и цијена му је ниска. Алуминијум није једини материјал који се употребљава, постоји могућност употребе челика. Могуће је и комбиновање ова два материјала по потреби. И алуминијум и челик се уобичајено третирају премазима како би се заштитили од разних непожељних утицаја.

4.7 УНИСТРУТ ИЛИ МОДУСПАН СИСТЕМ

Легани системи просторне решетке нерјетко употребљавају пресоване челичне плоче. Модуспан је колекција варијација система ланих решеткастих конструкција заснованих на употреби плочастих елемената у чворовима решетке. Тренутно се користи прва итерација система са малим модификацијама. Постоји пет основних компоненти система спојених једноставним шарафљењем, гдје су сви елементи стандардизовани. Плоче које служе у функцији спојних елемената од челика дебљине од 6 mm^[22]. Затим се буше отвори за шарафе који се користе за спајање два дијела.

Штапови имају неколико дужина који се производе у стандардним серијама. Сви штапови имају исте геометријске карактеристике између слојева просторне решетке. Доња страна плочастог чворног елемента посједује отвор кроз који се може провући штап (слика 84 и 85). Челични шарафи се користе како би се осигурала веза штапова у чворовима. Ови елементи су од челика високих конструктивних перформанси. Поред набројаних некад се користе и додатни елементи за учвршћивање конструкције, као што су челичне затеге, додатни прелазни елементи за спајање чворова ослоњених на стубове конструкције испод.

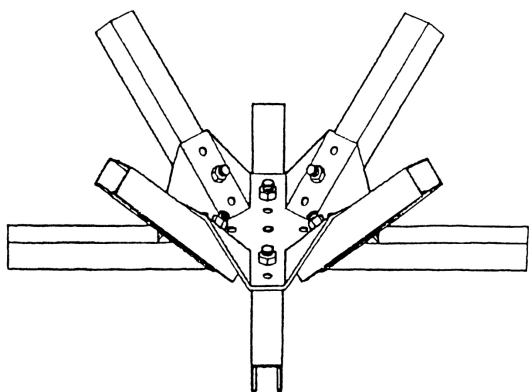


Слика 83. Триодетски систем, склоп за спајање штапова и чворних елемената, формација штапова у двослојној просторној решетки. Илустрација власништво амерчког патентног завода.

4.8 СИСТЕМИ БЕЗ ЧВОРНИХ ЕЛЕМЕНАТА

Системи без чворних елемената, развијени су са економским аспектом на уму, обично за потребе лаганих и јефтиних префабрикованих конструкција. Често високу цијену коштања конструкције чине чворни елементи који су захтијевни за производњу и носе већи дио цијене коштања конструкције. Циљано је дизајнирано неколико система који су дали одговор на ова питања и ослањају се на начине директног спајања штапова по одређеним унапријед дефинисаним правилима која су документована и стандардизована. Економска компонента је јача страна ових система, али флексибилност је заузврат значајно уназађена.

Изузетно су крути системи јер свјесно се жртвује флексибилност углова под којим се сучишу штапови. Један од најстаријих примјера употребе оваквих система је Октет који је развио и употребио Ричард Бекминстер Фулер. Састоји се од штапова произведених извлачењем кроз укрштени пресјек и који су сјечени под углом на крајевима тако да одговарају тетраедарским и октаедарским формацијама. “Вишеструко качени” је други систем просторних решетки без чворних елемената који је развијен у Сједињеним Америчким Државама . Заснован је на идеји плочастих елемената који се заваривањем спајају са штаповима и имају отворе за шарафе за учвршћивање конструкције. Најпознатији примјер је имплементација на пројекту Биосфера 2 (*Biosphere 2*) у Аризони, САД (приказано на сликама 37 и 38).



Слика 84 лијево. Карактеристични тродимензионални детаљ Униструт система спајања штапова са плочастим елементима у чворним тачкама просторне решетке. Аутор цртежа непознат.

Слика 85 десно. Типични Модуспан (Униструт) чвор који на слици показује хладно-ваљане челичне штапове шарафљене у чвору за плочасте елементе. Фотографија дјело Џона Чилтона (*John Chilton*).

4.9 ХАРЛИ КОНДЕР СИСТЕМ

Поред “*piece-small*” систем који се састоје од дискретних, одвојених, штапова са разним системима спајања у формације просторне решетке, постоји други тип и приступ који је суштински заснован на идеји континуалних штапова^[22]. Третира се као прелазно рјешење између система индивидуалних, дискретних, елемената и модуларних система. Континуални типови штапова не посједују у правом смислу чворне конструктивне елементе. Системи овог типа осмишљени су тако да имају не прекинуте линеарне елементе кроз чворове конструкције. На овај начин, до одређене мјере, јавља се ексцентрицитет сила у чворовима који резултирају појављивањем секундарних момената савијања који се спрјечавају на разне начине. Предности су им непостојање скупих чворних елемената, а штапови се могу спајати једноставним јефтиним спојним елементима са шарафима што их чини јефтиним за производњу и уградњу.

Систем који најбоље представља овај концепт конструкције је Харли Кондер, такозвани Харли систем. На тржишту постаје доступан крајем осамдесетих година кроз компанију која га је развила, “*Conder-Group*”. Као и ранији системи прошао је ригорозне тестове прије своје прве практичне примјене. Установљено је да је много ефикаснији од традиционалних скелетних конструкција које су честе у том периоду на индустријским и хангарским објектима. Суштински се разликује од Метро, Орона СЕО и Нодус система. Састоји се од хладно ваљаних челичних штапова који континуално пролазе кроз чворове. Сијеку се на потребне дужине, мање од максималних 12 m^[22]. Штапови који су ортогонални постављају се у смакнутим равнима (слика 86) да се спријечи директно сударање, а испод њих се провлаче дијагонални штапови који повезују слојеве решетке. Дијагонални штапови су цилиндричног попречног пресека. Дијагонале су шупље цилиндричне цијеви које, на мјестима савијања имају отворе за шарафе. Ови шарафи су једини спојни елементи система. Смицањем ортогоналних штапова у паралелне равни, и провлачењем дијагоналних између ортогоналних, јасно се може примијетити ексцентрицитет сила које аксијално дјелују у штаповим тако да се појављују додатни моменти савијања. Уколико се прорачуном идентификује појава значајног момената савијања, тада се спојеви штапова ојачавају додатним елементима. Ови елементи ус обично од челика.



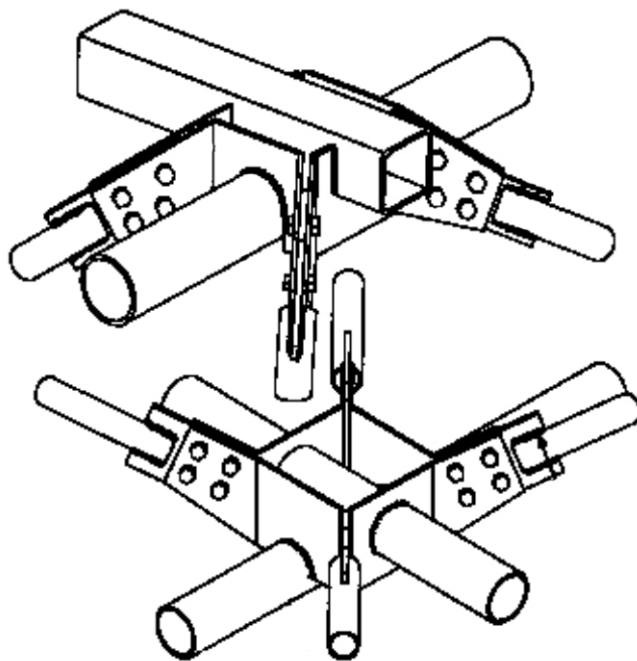
Слика 86. Карактеристичан Харли Кондер тип 80 спојни систем у чвору решетке. Аутор фотографије Џон Чилтон (*John Chilton*).

4.10 “MAI SKY” И “CATRUS” СИСТЕМИ

“*Mai Sky*” систем, у основи, је настао из потребе развијања просторне решетке са акцентом на исплативост при производњи, уградњи и експлоатацији. Растерска формација система у горњој зони је обично правоугаона са смакнутом доњом зоном. Као код Харли система и овде су штапови континуални, не прекидају се у чворним тачкама. Додатни елементи за причвршћивање су плоче. Ту су да вертикално стабилизују челичне шарафе који спајају штапове решетке. Штапови су континуални у једном правцу, а у другом ортогонално постављени. Дијагонални штапови који повезују слојеве решетке такође имају заварене челичне плоче на крајевима, а сами штапови су обично шупље цјевасте форме (слика 87).

Монтажа система се врши на самој локацији. У процесу монтаже на тлу, основни задатак је осигуравање везе штапова употребом челичних шарафа. Само основни ручни алат је потребан да би се извршила монтажа. Конструкција се монтира на нивоу тла, а затим се подиже на коначну локацију у објекту. Прво се постављају континуални штапови доњег слоја, двослојне решетке, и позиционирају се на одговарајућа пројектована растојања. На њих се позиционирају дисконтинуални штапови који се спајају са завртњима. Након спајања ортогоналних елемената ствара се простор за уклапање и шарафљење дијагонала. Идентичан процес се користи и за горњи слој решетке. Једна од предности монтаже на тлу је што се безбједно и брзо могу монтирати инсталације које су планиране у конструктивној дубини просторне решетке. Континуалне ивичне греде, постављене на стубове, су најчешћи ослонац који прима и преноси оптерећење решетке. Стубови се постављају на прорачунатим растојањима да се избјегне савијање греда. “*Catrus*” је, слично као “*Mai Sky*”, дао одговор на питање економичних и једноставних конструкција просторних решетки.

Анализирани традиционални системи су поједностаљени и деконструисани да би се добило ново рјешење. Сprovedена истраживања и анализе дала су одговор у виду система концентричних формација штапова у чворним тачкама у којима се избацује употреба посебних елемената. Просторне решетке су крти системи који могу да се уруше



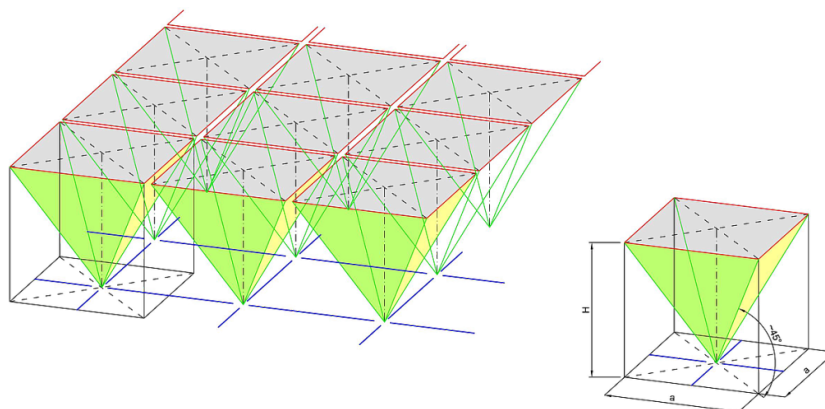
Слика 87. Детаљ “*Mai Sky*” система у чвору решетке. Цртеж дијела система власништво Маи Скај компаније (*Mai Sky co.*).

попуштањем само једног или два штапа у комплетној тродимензионалној формацији, без икаквих знакова упозорења. Поред оваквих недостатака потенцијали употребе су им лакоћа, велика чврстина, једноставна производња и монтажа.

Детаљним тестирањима и анализама утврђено је да “*Catrus*” систем посједује много већу чврстоћу и димензионалну флексибилност него многи системи просторне решетке. Као и код раније наведених типова континуалних штапова постоји ексцентрицитет у чворним тачкама. Заснован је на челичним шупљим штаповима квадратног попречног пресека за горњу зону, цјевасте дијагонале шупљег попречног пресека и челичне тракасте форме доњег слоја. Штапови горње и доње зоне пружају се континуално без прекида у чворним тачкама система и спајају се једноставним завртњима од квалитетног челика високих перформанси, тако да нису потребни посебни чворни елементи^[25].

Изражљивост материјала се користи да би се неутралисале силе извијања које су резултат ексцентрицитета сила у чворовима. Правоугаони штапови у горњој зони имају пробушене рупе за вертикално постављене шарафе и на тај начин су спојени са ортогоналним. Производе се у разним дужинама прилагођеним димензијама ортогоналног растера и континуално се спајају на дуплом растојању два сусједна чвора решетке^[22].

4.11 МОДУЛАРНИ “SPACE DECK” СИСТЕМ



Слика 88. Модуларни систем понављања јединица просторне решетке. Аутор илустрације непознат.

Један од најпознатијих модуларних система је “*Space Deck*”. Настао је у раној фази модерног истраживања просторних решеткастих конструкција, а до сада је доживио велики број употреба у објектима разних намјена широм свијета. Промјене су у смислу димензионалних прилагођавања и избора материјала за штапове и спојне елементе. Систем се базира на пирамидалној форми модуларних јединица састављених од квадратне основе челичних штапова засјечених под углом и спојених заваривањем, и цјевастих челичних штапова који чине ивице пирамиде. Сви елементи се производе у фабрикама и спајају се заваривањем у посебним калупима да би се обезбиједила максимална геометријска конзистентност модула. На врховима се постављају метални спојни дијелови, кроз које се лако монтира систем ортогоналних шипки и чини доњи слој двослојне решетке. Спој се учвршћује контра навојима.

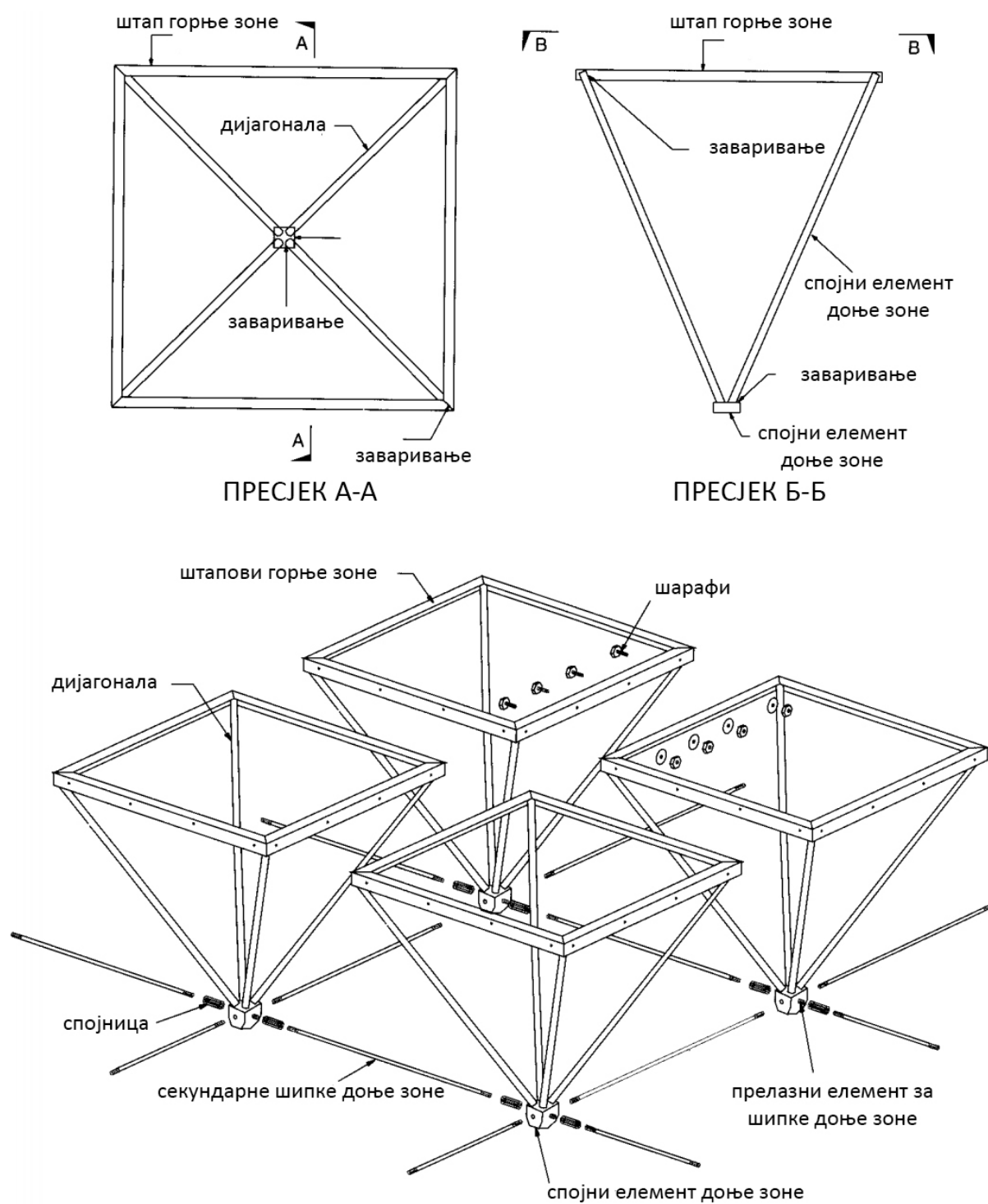
“*Space Deck*” је систем са великом традицијом употребе на објектима разних намјена под различитим условима. Као такав стандардизован је за индустријску производњу (слика 89 и 90) великих количина. Модули се производе у димензијама квадратне основе 1200 mm и конструктивном дубином од минималних 750 mm до максималних 2000 mm [22]. Поред избора по димензијама, модули се разликују и по типу конструктивних перформанси за коју су дизајнирани независно од димензија јединица. Ова разлика у чврстоћи долази од димензија штапова који чине конструкцију.

Модули решетке се производе и склапају у фабрикама. Модули се третирају заштитним премазима због спрјечавања корозије. Постоји могућност премазивања средствима која смањују утицај топлоте и повећавају, у одређеној мјери, отпорност на високе температуре.

Монтажа “*Space Deck*” система врши се постављањем модула у формацију задане основе, а прво спајање се врши у горњој зони. Постављају се завртњи који пролазе кроз елементе квадратне основе и доњи дио штапова који чине дијагонале. У наредном кораку формира се доња зона која се добија провлачењем и спајањем челичних цилиндричних штапова са спојницом на врху модула. Због спајања доње зоне са спојницама и завртњима постоји могућност добијања укупне формације која има благо куполасти облик. Овај начин се често користи на великим површинама просторне решетке да би се нагибом саме конструкције ријешо проблем одводњавања. Тип шеме понављања двослојне решетке добијен употребом “*Space Deck*” система је квадрат на смакнутом квадрату [25].

Индустријска производња и стандардизација појефтиније цијену коштања конструкције просторне решетке. Још једна значајна компонента код модуларних система је транспорт од фабрике до градилишта, који може бити јефтин, али може

драстично повећати трошкове при избору исте. Модули “*Space Deck*” система имају могућност слагања једних у друге тако да се процес допремања на локацију и логистика поједностављују и нису потребна специјална транспортна возила.

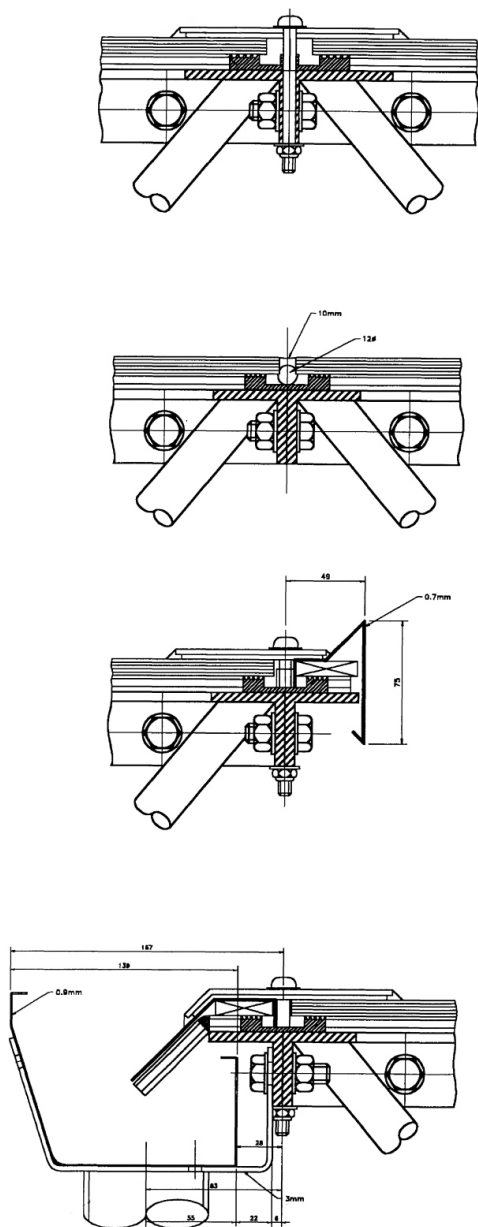


Слика 89. Саставни елементи Триодетског система. Илустрација М. Кољанчић после Дејвида Лонга (*David Long*).

4.12 “UNIBAT” И “SPACEGRID” СИСТЕМИ

“Unibat” и “SPACEgrid” су системи просторних решеткастих конструкција који спадају у категорију модуларних. Идејни творац им је један од најзначајнијих инжењера са поља истраживања и примјене просторних решетки, Стефан де Шато (*Stefan de Shatoa*). “Unibat” се појавио почетком шездесетих година као још један по принципу модуларних пирамидалних јединица са квадратном основом која чини горњу зону конструкције. За разлику од других система у овом се модули у горњој зони спајају завртњима, од челика високих перформанси, на ивицама штапова (*слика 91*) који чине основу модула. Наведеном методом се поједностављује и убрзава монтажа јединица у конструкцију и директно се утиче на исплативост употребе. “Unibat” модули су стандардизовани и производе се индустријски у фабричким постројењима. До сада анализирани модуларни системи су стандардизовани и поручују из каталога гдје су јасно унапријед дефинисане

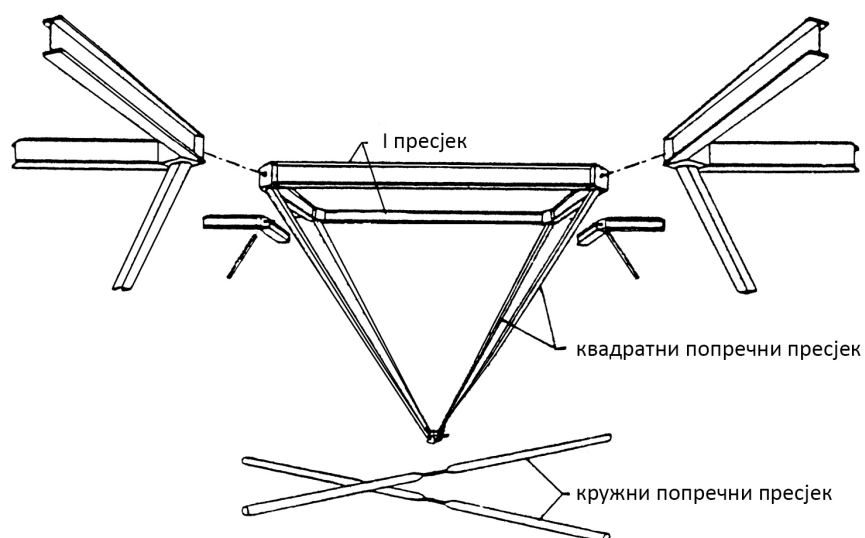
конструктивне карактеристике добијене тестирањем и искуством у употреби. “SPACEgrid” је систем базиран на темељима “Unibat-a”, са једном битном премисом да модули не требају бити стандардизовани, што је сматрао непотребним ограничавајућим фактором за инжењере и пројектанте. На овај начин “SPACEgrid” се може третирати мање као систем јер не посједује стандардизоване елементе. Концепт је заснован на идеји да се најоптималнији систем треба изабрати на основу димензија основе и распона који треба да премосте и оптерећења која треба да поднесе. Са овом премисом логика “SPACEgrid” система је дијаметрално супротна од осталих врста комерцијално доступних просторних решетки, конструкција се прилагођава контексту у коме ће бити употребљена, а не обрнуто. За најекономичнији попречни пресјек и материјал штапова конструкције усвојен је кружни челични или алуминијумски профил који може бити разних одговарајућих дужина. Овај систем нема стандардизоване спојне елементе у чворним тачкама и заступа тезу да се исти морају дизајнирати по потребама одабране тополошке шеме понављања поља просторне решетки, попречном пресјеку и димензијама штапова. “SPACEgrid” решетке се могу примјењивати на различитим формацијама штапова, а најчешћа употреба је заротирани квадрат на квадрату. Као и код претходног система модули се спајају у горњој зони, док се доњи слој формира употребом индивидуалних



Слика 90. Пресјечи кроз типичну “Space Deck” модуларну јединицу просторне решетки. Цртежи власништво “Space Deck Ltd” компаније.

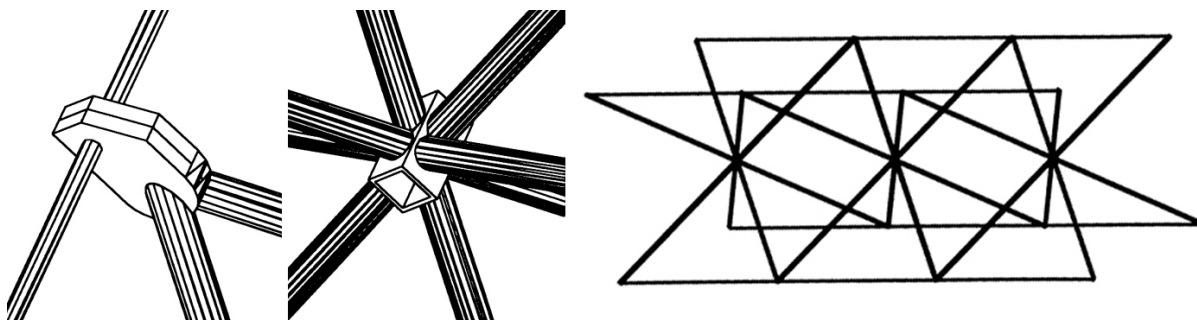
штапова који спајају сусједне чворне тачке, на начин да се формира ортогонални растер.

“SPACEgrid” решетке су погодне за употребу и дају архитектама далеко већу слободу него остали системи засновани на модуларним јединицама. Са друге стране економски аспект експлоатације може да постане отежавајући фактор при одлучивању за овај тип јер се стандардизовањем елемената смањује цијена производње, а “Unibat” и “SPACEgrid” нису стандардизовани.



Слика 91. Унибат систем, попречни пресједи штапова и склоп модуларне јединице. Аутор илустрације М. Кољанчић после непознатог аутора.

4.13 “ABBA SPACE STRUCTURES” МОДУЛАРНИ СИСТЕМИ



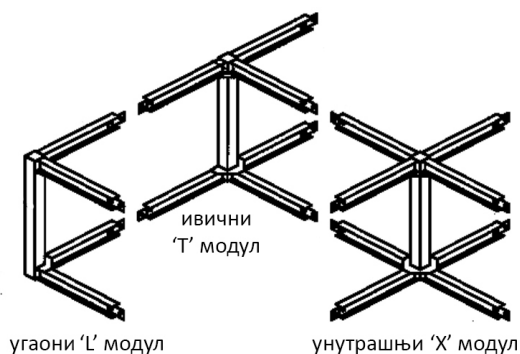
Слика 92. “ABBA Spider Frame“, модуларна јединица решетке и детаљ спајања. Цртежи власништво “ABBA Space Structures co.“ компаније.

Просторне решетке и системи којима се материјализују нису јефтини. Са овом чињеницом на уму А. Х. Нобл (*A. H. Noble*) истражије једноставнији и исплативији склоп од тада актуелних типичних заснованих на линеарним дисконтинуалним штаповима са универзалним спојним елементима у чворним тачкама. “*ABBA Space Structures*” систем развијен је у Јужноафричкој Републици.

Постоји много под типова који су развијени. Један од подсистема је “*Cubicspace*”. Састоји се од квадратних и троугаоних модула који се слажу у формацију тако да чине двослојну просторну решетку са просторном топологијом квадрат на дојагоналном квадрату. Поред најчешћих двослојних, “*Cubicspace*” дозвољава и вишеслојне решетке. Штапови на овом систему су спојени осмо угаоним чворним елементима који су патентирани као дио система. Имају цилиндричан облик осмо угаоног пресека са два спојна елемента са горње и доње стране. Чворни елементи су дизајнирани на начин да када се преполове на двије једнаке половине тада дозвољавају монтажу модула на тлу па и накнадно подизање на коначну локацију. Резултат оваквог дизајна је већа безбједност радника на монтажи јер се већина радова изводи на тлу. Систем дозвољава све стандардне методе подизања на коначну локацију у објекту^[22].

Значајан је подсистем “*Deckspace*” који се састоји од пирамидалних модуларних јединица које се производе у фабрикама, са разликом у малим модификацијама. Слично као на “*Spacedeck*” систему модули се спајају у горњој зони завртњима који пролазе и кроз крајеве попречних штапова између слојева конструкције. Додатни цилиндрични челични штапови се монтирају у доњој зони и спајају се са врховима пирамидалних модула. Познат је примјер “*Southgate Shopping Center*” кровне конструкције. Направљена је од 2000 модуларних пирамидалних јединица. Интересантно за овај пројекат је то што су и зидови конструисани употребом просторне решетке. Да би се смањио број модула и омогућила приближна паралелност између горњег и доњег слоја конструкције предвиђено је оригиналним рјешењем да се доњи штапови постављају дијагонално и чине укрштenu формацију. Проблем се јављао на крајевима решетке код ослонаца на зидовима јер се ове преплетене формације нису сретале у потребним тачкама. Једно од рјешења је било да се на овим тачкама допусти да један од штапова прође кроз други што је усвојено за остатак решетке након извршених тестирања.

4.14 “CUBIC” СИСТЕМ МОДУЛАРНИХ ПРОСТОРНИХ РЕШЕТКИ



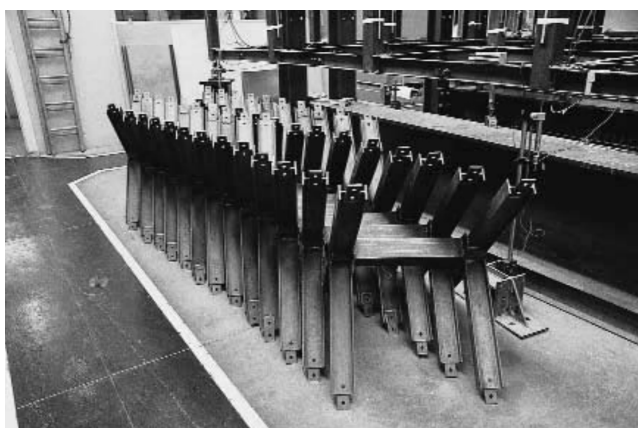
Слика 93. Стандардни “CUBIC Space Frame” модули облика “Т”, “L” и “X” у основи, експлодирани тродимензионални приказ склопа. Илустрација дјело Џона Чилтона (John Chilton).

Најпознатији представник, модуларног типа, је “CUBIC” систем који је развијен почетком седамдесетих година од стране Леслија и Лазека Кубика (Lesli, Lazek Kubik) који су га патентирали. Модуларни је систем и у потпуности заснован на четвороугаоним геометријским елементима (слика 93). Оптерећењу се супротставља потискивањем сусједних кутијастих модуларних јединица, тако да су вертикални елементи изложени моментима савијања који нису занемариви. Поред њих утичу значајне силе смицања, а најзначајније су оне које се прихватају аксијално, и на овај начин “CUBIC” те се из овог разлога категоризује као систем просторне решетке.

“CUBIC” системом се могу материјализовати једино двослојне просторне решетке. Елементи модула се довозе из фабрике на градилиште у растављеном стању (слика 94) ради лакшег и јефтинијег транспорта. Није потребна посебна технологија за производњу модуларних јединица јер се састоје од топло ваљаних челичних профила и плочастих елемената који се спајају једноставном крутом везом варења. Спајање се врши, као и код ранијих модуларних система, у фабричким калупима како би се обезбиједила прецизност и геометријска конзистентност јединица. Проблем крутог спајања је што попуштањем једног зглоба може се угрозити стабилност комплетне конструкције. За “CUBIC” је јако битна фаза спајања, односно заваривања, која се тестира на појединачним узорцима. Модули се на градилишту спајају завртњима од челика високих перформанси са нераскидивом везом. Простор између слојева се обично искориштава за провлачење инсталација. Највећа конструкција до данас материјализована употребом “CUBIC” система је кров ваздухопловног сервисног хангара за одржавање авиона Боинг на аеродорму у близини Лондона. Први пут је употребљен за поновно постављање кровне конструкције димензија 12 m са 20 m на Трент Политехнику^[22], универзитетској згради у Великој Британији 1970. године. Пошто систем није до тог тренутка подлијегао британским стандардима, тада су проведена детаљна испитивања. Лакоћа монтаже и подизања су биле основни услови који су обезбиједили ширу употребу “CUBIC” система. У скорије вријеме развијене су додатне промјене на систему да би се могао употребљавати на конструкцијама већих распона од уобичајених за модуларне системе.

4.15 МАТЕРИЈАЛИ ЗА МАТЕРИЈАЛИЗАЦИЈУ ПРОСТОРНИХ РЕШЕТКИ

Челик је материјал са врхунским перформансама у грађевинским конструкцијама. Његова употреба је доказана на многим пројектима у историји архитектуре и конструкторског инжењерства, почевши од Ајфеловог торња, Густава Ајфела (*Gustave Eiffel*) у Паризу, па све до савремених структура као што је конструкција Сиграм небодера у Њу Јорку и Волт Дизнијеве дворане (*Walt Disney Concert Hall*) у Лос Анђелесу, САД. Конструкције просторне решетке се материјализују употребом челика као најдоминантнијег материјала. Свакако није једни који се употребљава. У последње вријеме се све чешће могу уочити конструкције од алуминијума и дрвета. Нису ријетке комбинације више различитих материјала на истој конструкцији, на примјер употреба алуминијума за штапове, а челика за спојне елементе у чворовима решетке. Постоји и могућност коришћења армираног бетона за специјалне просторне решетке, иако се ријетко користи. Нове тенденције у развоју и пројектовању захтијевају лагане, лакообрадиве материјале високих конструктивних перформанси, па се прибјегава посебним армираним пвц композитима и специјалним стаклима за употребу на конструктивним елементима. Последњи експерименти и тестирања су показали да се могу користити посебно узгојени штапови бамбуса на конструкцијама малих распона.



Слика 94 лијево. Транспорт модуларних система просторне решетке може да представља значајан трошак који треба урачунати при избору система. То није сличај са “CUBIC Space Frame” модуларним јединицама, слажу се једна у другу и не заузимају много простора при транспорту. Фотографија дјело Дагласа Тарнера (*Douglas Turner*).

Слика 95 десно. Примјер лагане челичне просторне решетке, хладно ваљани профили. Фотографија власништво “Qingdao Havit Steel Structure Co.,Ltd.” компаније.

Челик се производи у разним варијантама у зависности од захтијеваних конструктивних карактеристика и изложености негативним утицајима. Штапови решетке добијају се на два основна начина, један је хладно ваљана метода, а други је метода извлачења кроз пресјечне калупе за профилисане елементе (слика 95). Челик је изузетно отпоран на силе затезања и притиска, што су обично силе које се појављују у аксијалним елементима, односно по осовини штапова у конструкцијама просторне решетке. Потребно га је додатно заштити од негативних утицаја који могу бити изложеност топлоти, атмосферским утицајима и другим. Често се заштићују поцинчавањем од корозије која, ако се јави, може да угрози конструктивне особине челика и доведе до попуштања под силама у конструкцији. Штапови и чворни спојни елементи се производе и од разних алуминијумских легура. Алуминијум има око три пута мању запреминску масу од челика

(2500 kg/m^3 алуминијум^[28], а око 7870 kg/m^3 челик^[28])²². Иако лакши има мањи модул еластичности, који се дефинише Јанговим модулом и износи $E_{\text{alum}} = 70000 \text{ N/mm}^2$ и $E_{\text{alum}} = 250000 \text{ N/mm}^2$ ^[28]. Модул еластичности је битна особина материјала која говори колика је отпорност материјала на савијање у конструкцији. Алуминијумске конструкције су много лакше од челичних, тако да на великим распонима сопствено оптерећење даје мањи утицај. Уколико се у прорачуну не појављују велике силе савијања систем штапова у чворној тачки аксијалне силе преноси у тежиште чворног елемента. Тада се могу употребити алуминијумске легуре под скоро истим условима као челик, или комбиновати алуминијумске елементе са челичним ојачањима чиме се добија искориштавање најбољих особина оба материјала.

Челик је јефтинији материјал, тако да се и та компонента може узети у обзир. Алуминијум има већи коефицијент ширења при излагању топлоти од челика. Из тога разлога алуминијуму је потребно више простора за ширење код изложености топлоти, што може имати даље импликације на дизајн чворних елемената гдје се појављује потреба за одређеним дилатацијама за штапове, или неки други начин прихватања експанзије. Велике конструкције захтијевају посебну заштиту од термалних утицаја, сакривањем под површине крова, премазивањем и другим методама. Постоји још неколико разлога због којих се челик чешће употребљава. Велики број система је дизајниран тако да спојеве третира заваривањем. Алуминијум се теже спаја на овај начин.



Слика 96. Дрвена просторна решетка изузетних естетских квалитета музеја савремене умјетности, Шигеру Бан 2014. године. Фотографија власништво Шигеру Бан архитектонског бироа.

Дрво се употребљава као конструктивни материјал од давнина. На решеткастим конструкцијама се користи у форми линеарних елемената кружног попречног пресјека. Комбинује се са челичним спојницама разних система развијених за потребе спајања дрвених штапова у просторне аксијално напрегнуте конструкције. При дизајнирању система потребно је узети у обзир да се аксијалне силе из штапова морају преносити преко посредних чворних елемената. Због великих сила, које иначе дјелују у осовинама, штапова потребно их је на крајевима ојачати металним додацима како би се обезбиједила чврстина и правилан пренос сила на наредне елементе. На примјеру Меро Холц (*Mero Holtz*) система дрвених просторних решетки може се примијетити да се кроз штапове силе своде преко крајњих металних елемената на чворне.

Бетонске просторне решетке нису честе као металне, од алуминијумских легура или дрвене, али имају своју употребу у оваквим конструктивним склоповима. Много су теже и масивније у физичком и естетском смислу (слика 97) од раније набројаних, али су зато јефтиније за експлоатацију. Ако се посматра географски, обично се могу видјети употребљени у земљама у којима је челик изузетно скуп, а радна снага јефтина.

²² Перформансе материјала су детаљно обрађене у научном раду *Structure and Architecture* (Angus J. Macdonald), Architectural Press, Edinburgh, 2001.

Најпознатији примјери уобичајено долазе из земаља у развоју. Познат је примјер великог изложбеног павиљона у Њу Делхију у Индији изграђеног почетком осамдесетих година. Пројекат се састојао од пет великих пирамидалних павиљона који су материјализовани употребом армираног бетона ливеног на лицу мјеста у конструкцији вишеслојне просторне решетке октаедралне и тетраедралне геометријске форме.

Одређен број експерименталних решетки изграђен је употребом неконвенционалних материјала, за ову намјену, као што су од армиране пластике и стакла ојачаног полиестерима. Иако у зачећу ови материјали имају изузетан потенцијал за експлоатацију.



Слика 97. Бетонска просторна решетка спортске дворане у изградњи. Фотографија власништво “Shanghai SSRF Space Frame Steel co.” компаније.



5.0 КРОВНИ ПОКРИВАЧИ - ЕЛАСТИЧНЕ ТЕКСТИЛНЕ МЕМБРАНЕ

5.1 ЗАТЕГНУТИ ТЕКСТИЛНИ ПОКРИВАЧИ – АРХИТЕКТОНСКИ И ИСТОРИЈСКИ КОНТЕКСТ



Слика 98 лијево. Њемачки павиљон на “EXPO 1967” изложби. Мембране на великој површини. Дјело Ото Фреја, једног од најзаслужнијих инжењера за популаризацију затегнутих текстилних покривача у архитектури. Непознат аутор фотографије.

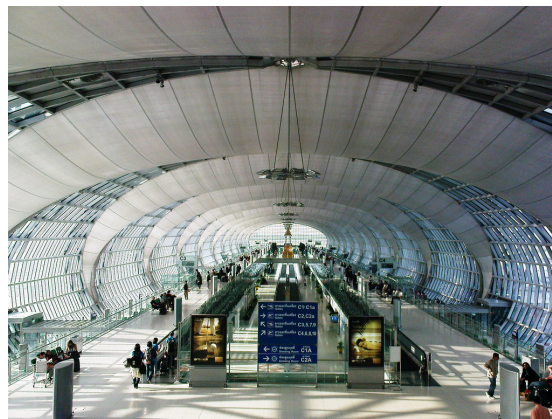
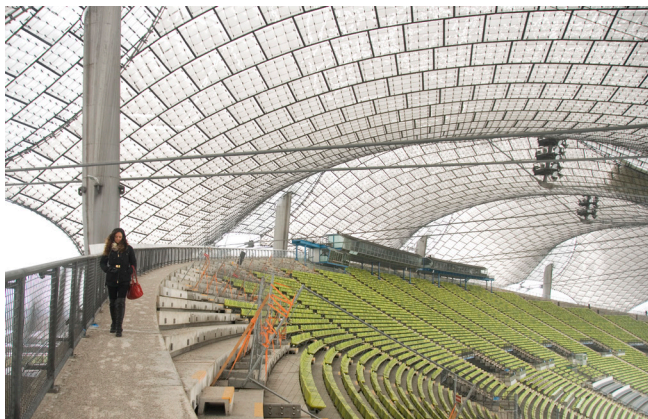
Слика 99 десно. Олимпијски стадион у Минхену, Њемачка за олимпијске игре 1972. године. Кровни покривач од затегнутих текстила. Фотографија власништво Местера Ескалта (*Mester Eiskalt*).

Просторне решетке могу се прекрити разним врстама покривача. У зависности од облика могу се употребљавати класични материјали и системи или., у колико су двоструко тродимензионално закривљене или слободне форме, тада се могу употребити материјали и облици који ће пратити или опонашати закривљење форме које покривају^[1]. Употреба специјалних тканина у функцији покривача није нова идеја. Историјски гледано први примјери датирају још од давнина када су људи упознали потенцијале затегнутих тканина на шаторима. Трибине Колосеума у Риму биле су покривене текстилом на сличан начин као што се данас користе на савременим објектима. Посебно дуго су се користили у сјеверној Африци и земљама Арапског свијета. У мањим размјерама и уобичајеним величинама употребљавале су се као заштита од сунца и кише.

Системи великих размјера разапетих текстилних покривача²³ популаризовали су се са “EXPO” сајмом 1967. године. Њемачки павиљон је био покривен аморфном, елегантном и динамичном формом коју су дизајнирали Ото Фрај и Гутброд Ролф (*Otto Frei, Gutbrod Rolf*, слика 98). Поставили су темеље савременој употреби и дизајнирању великих кровних покривача овог типа. Дизајн је асоцирао на низ шатора који лебде изнад посјетилаца сајма. Материјал тканине дозвољава пролазак свјетла. За конструкцију су одлучили да буде од затегнутих каблова који тродимензионално обликују форму на коју се каче текстилне површине. Концепт је наишао на велико одушевљење и прихватање, дјелимично из разлога што се може једноставно и ефикасно производити на једној локацији, а транспортовати на другу. Потенцијално велики покривачи заузимају релативно мало мјеста при транспорту, а конструктивни елементи су лагани. Оригинално Њемачки павиљон пројектован је као затегнута текстилна мембрана, али је касније препројектован у систем мреже сајли и затега,. Мембране од текстила послужиле су као секундарни покривач. Раније пројектоване мембранске конструкције и покривачи конструктивно су се ослањали на ваздушни притисак.

Једна од најрепрезентативнијих употреба затегнутих текстилних покривача долази кроз пројекат конструкције Олимпијског стадиона у Минхену (слика 99). Ако се примијети да је ъемачки павиљон на “EXPO 1967” изложби 1967. године заслужан за популаризацију, онда је покривач крова стадиона у Минхену заслужан за читав низ открића и истраживања који су обезбиједили реалне параметре за прорачуне и препоруке

23 Значајно истраживање на тему разапетих текстилних покривача објављено је у научном раду *Conceptual Design and Analysis of Membrane Structures* (Erica Henrysson), Chalmers University of Technology, Goteborg, 2012.



Слика 100 лијево. Олимпијски стадион у Минхену, поглед са врхатрибина. Посебан амбијентални ефекат креира јастучасти облик и материјал покривача који пропушта свјетло. Фотографија власништво Сузан Гибсон (*Suzanne Gibson*).

Слика 101 десно. Терминал међународног аеродрома у Банкоку, Тајланд, изграђен 1996. године. Комплексна вишеслојна форма кровног покривача мембранске форме. Фотографија дјело Бена Брајанта (*Ben Briant*).

при дизајнирању. Представља до тада највећу овакву мембранску форму, а пројектовали се ју инжењери Клаус Кол и Карл Хаберман (*Klaus Kohl, Karl Haberman*).

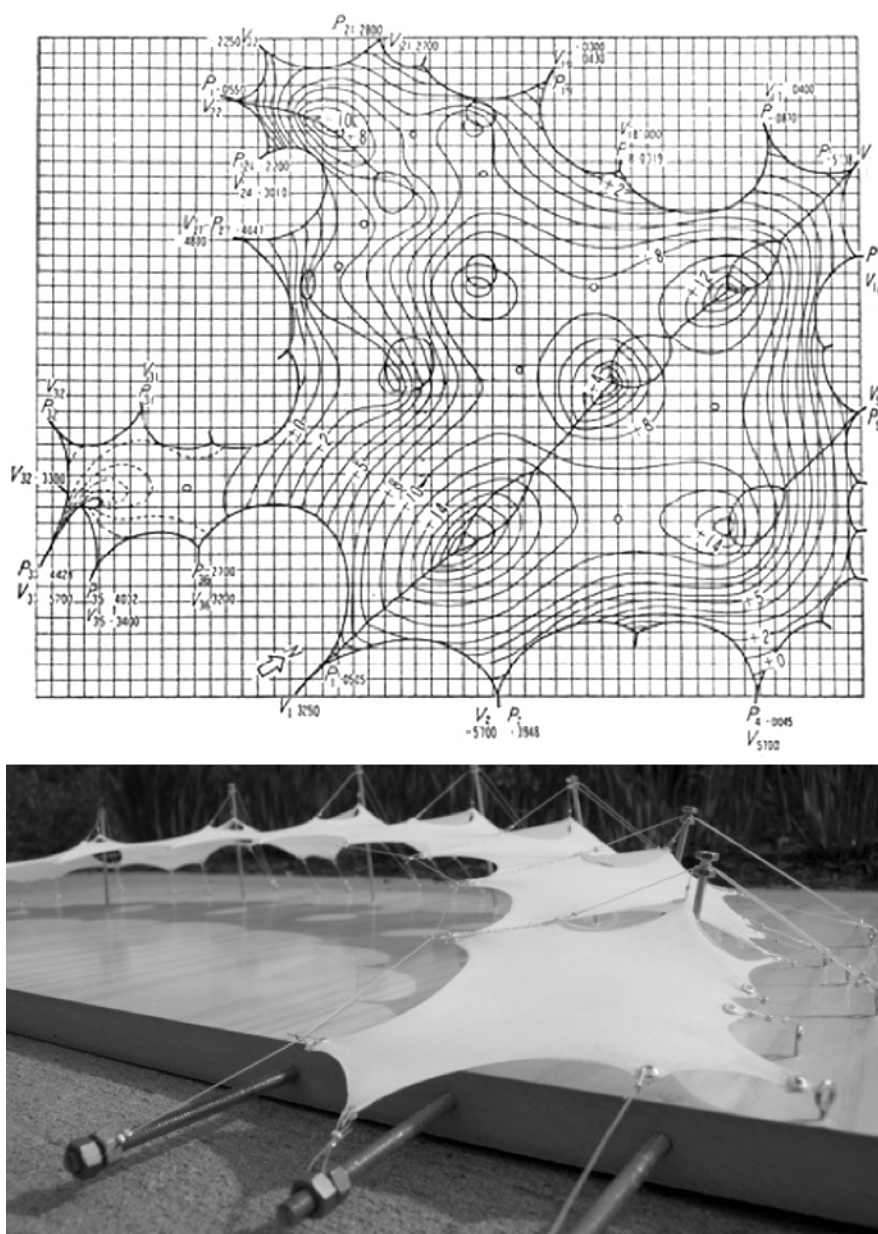
Посебно значајан је допринос у креирању рачунарских модела за тражење оптималне форме и система оптимизације. На спортским дворанама средњих и посебно великих распона постале су мање више стандард. Као и просторне решетке у конструктивним системима мембранске затегнуте тканине могу да премосте изузетно велике распоне без ослонаца у пољу. Овом особином су се истакле као изузетни системи за покривање великих површина. Лондонски Олимпијски стадион за игре 2012. године је још један примјер који завређује посебну пажњу. У пројектном задатку за овај стадион дефинисана је потреба за кровном конструкцијом са покривачем који се може лако демонтирати и замјенити након завршетка игара. Пројектанти су се одлучили за затегнуте текстиле, не само због јефтиног транспорта и могућности лаког скидања и постављања, него и због лакоће са којом су се премотавали велики распони и потенцијала обликовања форме која је учинила ентеријер стадиона атрактивним. Спортске дворане, изложбени простори и стадиони захтијевају велику количину свјетла. Материјали који се могу употребити на текстилним покривачима долазе у широкој лепези избора. Већина уједначено проводи свјетло, а у исто вријеме обезбјеђује конструктивне карактеристике које задовољавају потребе слободних аморфних форми. На пројекту стадиона у Лондону покривач не прекрива цијели стадион него само трибине и дио партера и штити од вјетра спортисте на теренима.

Са аспекта архитектонског пројектовања и дизајнирања носи значајно пуно предности у односу на класичне покриваче, али и неколико недостатака. Естетски квалитети и потенцијали затегнутих текстилних покривача су изузетни. Обликовање отвара могућности слободног пројектовања ентеријера јер им није потребан велики број крутих носача у виду стубова, зидова и греда. Могу се качити на сајле и каблове и њих користити као конструкцију на коју ће пренијети оптерећења. Тренутно постоји велики број материјала и специјалних полимера којима се могу материјализовати. Равномјерно пропуштање свјетла у ентеријер, а у исто вријеме физичко дефинисање простора су особине са којима архитекти могу да експериментишу и дизајнирају. Скоро увијек су слободне форме.

Тражење, анализирање и дефинисање слободних и двоструко тродимензионално закривљених облика дуго је представљало велики проблем. Сводило се на реалне експерименте на минијатурним макетама. Данас је процес поједностављен јер постоје

специјализоване рачунарске апликације које имају могућности тражења оптималних облика и развијања у раван што је битно за усвајање правилне шеме поља текстилних покривача. Прва истраживања²⁴ на овом пољу употребом рачунарских симулација почели су пројектовањем Олимпијског стадиона у Минхену 1992. године Банкоку (слика 102).

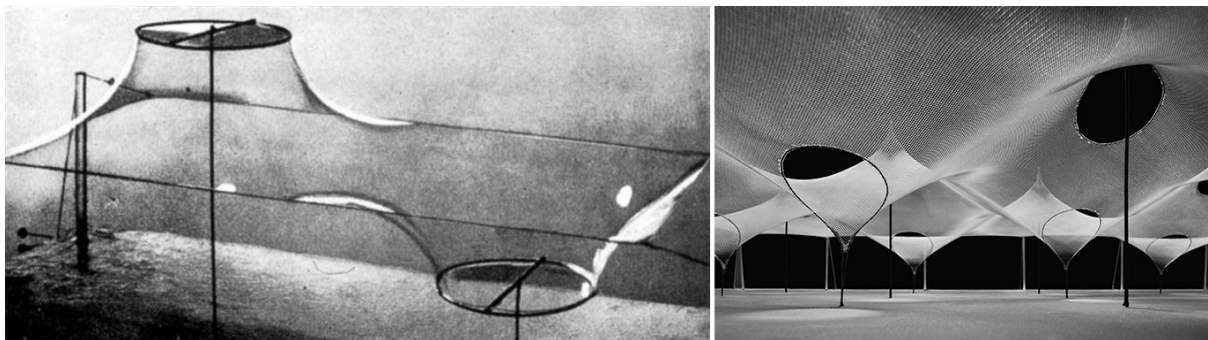
Ослобађање форме може се видјети на разим примјерима. Један који заслужује посебну пажњу је зграда међународног аеродрома у Банкоку (слика 101). Комплексни облик текстила са чврстом растерском конструкцијом дефинисан је изузетно квалитетан унутрашњи простор. Занимљиво је да је употребљен вишеслојни покривач из разлога апсорбовања звука због буке која је честа на аеродромима.



Слика 102. Стадион у Минхену. Макета кориштена за тестирање и анализирана форма представљена дводимензионално на цртежу. Макета и цртеж дјело Ота Фраја (Otto Frei).

24 Значајна истраживања употребом рачунарских симулација могу се пронаћи у научном раду *Conceptual Design and Analysis of Membrane Structures* (Erica Henrysson), Chalmers University of Technology, Goteborg, 2012.

5.2 ОБЛИКОВАЊЕ И ПРОНАЛАЖЕЊЕ ОПТИМАЛНЕ ФОРМЕ



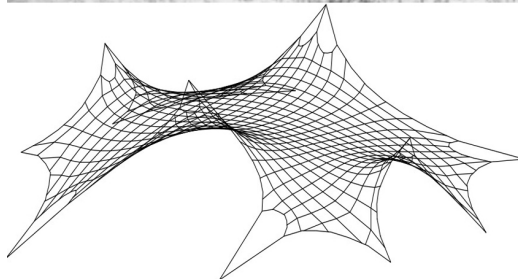
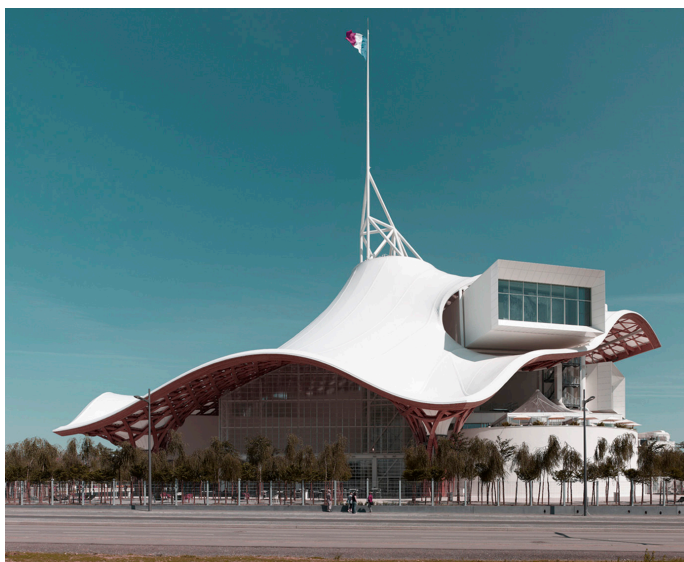
Слика 103. Истраживање Ота Фреја на физичком моделу балона сапунице и макетом за концепт једног од својих пројеката. Изузетно важна истраживања из области проналажења оптималне форме. Макета и фотографије дјело Ота Фраја (*Otto Frei*).

Затегнуте текстилне површине покривача су скоро увијек слободне форме. Као такве спрегнуте су и објешене на носаче. Облици које формирају су конвексне математичке површи, односно удубљења. Овакви облици оптерећење примају се најчешће само у једном правцу. При пројектовању један од првих корака је дефинисање геометрије мембране. Због своје површинске комплексности инжењери су увидјели потребу за креирањем модела за проналажење оптималне форме. Један од најстаријих је такозвани физички модел који се често назива моделом балона сапунице^[41]. Посматрањем је утврђено да увијек заузима најмању могућу површину у простору. За било који број формација поља даје бесконачан број форми површина сапунице. Сваки је јединствен и оптималан за посматрано поље. Слично као са просторном решетком инспирација долази из анализирања понашања природних појава и њихових особина. На слици 103 може се видјети макета са примијењеном методом балона сапунице за добијање оптималне форме. Ото Фреј (*Otto Frei*) је извршио велики број истраживања са намјером проналазка идеалне форме најмање површине у разним облицима које дефинишу конструктивни елементи (слика 103). Наравно, овакав приступ захтијева макете на којима се врше експерименти и преносе на папир.

Данас се најчешће употребљавају математички модели који се ефикасно прорачунавају употребом рачунара и специјализованих апликација. Једна од основних премиса коју је потребно имати на уму је да је цијела површина мембране једнако оптерећена. То је случај само код оптималних облика. Тада не постоји негативан утицај извијања и потпуно је неутрализован, за разлику од решеткастих конструкција које су склоне овом неповољном утицају.

Због лакоће покривача утицај вјетра је битан фактор који се узима у обзир, посебно у поднебљима у којима је честа појава. Са геометријског становишта против утицаја вјетра може се борити на начин да се дизајнирају облици који ће разбијати силе вјетра на мање површине. Утицај је знатан у оба правца, одоздо према горе и обрнуто. Мембране се често преднапрежу прије постављања на коначну позицију у ткиву објекта. Ово их чини јачим и мање еластичним у смислу да ће теже доћи у стање у коме напуштају оптималан облик мембране за коју су пројектоване и прорачунате.

Постоји неколико облика текстилних покривача. Први су мембране које су најлакши систем када је у питању сопствено оптерећење, уобичајено се креће око 1 kg/m^3 ^[31]. Саме од себе су и конструкција и покривач. На слици 125 може се видјети типичан примјер са основним елементима система. На слици 107 могу се примијетити основни начини постављања мембрана и распореда носача за постизање сила затезања које су одговорне



Слика 104 лијево. Помпиду центар у Метцу, Француска. Мембрански покривач органске форме са коничним отворима. Обликовање покривача и комплексна дрвена конструкција развијени за фабрикацију употребом апликација за процедурално рачунарско моделовање. Дигитални прототип је значајно олакшао рад и комуникацију између фаза при дизајнирању и пројектовању. Фотографија власништво Шигеру Бан архитектонског бироа (*Shigeru Ban Architects*).

Слика 105 десно. Кровни покривач, тензоформа, зграде архитектонског бироа Вилија ван дер Мерена из 1969. године у Белгији. Фотографија и илустрација дјело Вилија ван дер Мерена (*Willy Van Der Meeren*).

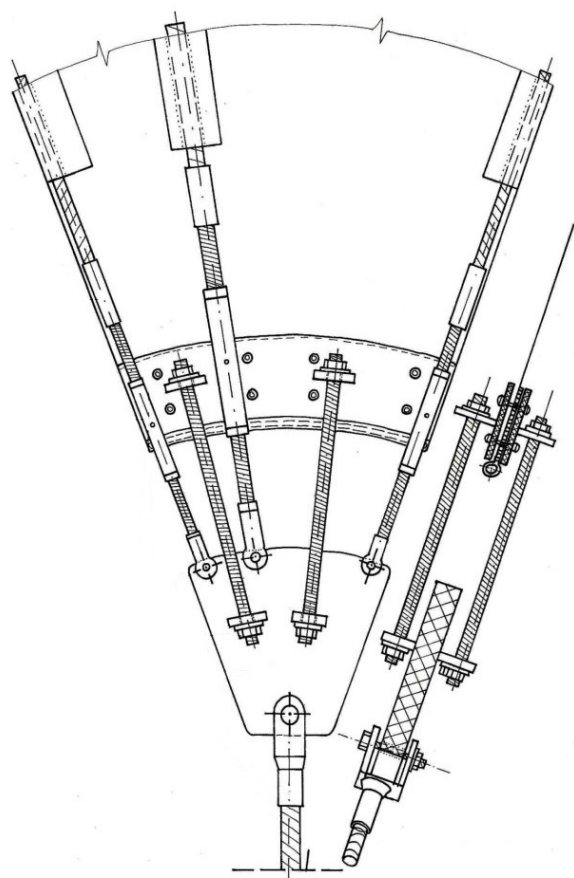
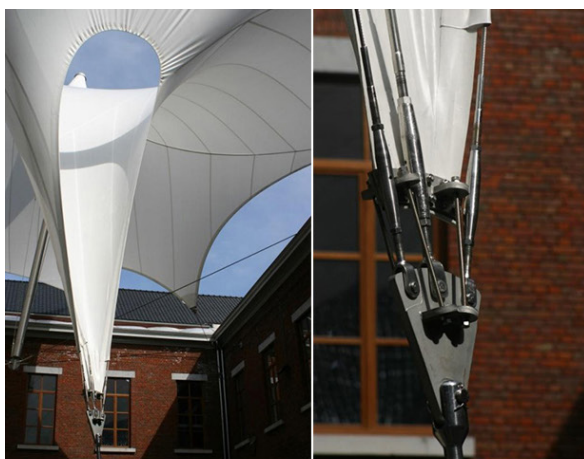
за конструктивну стабилност система. Геометријска топологија облика које производе је битан аспект који је потребно дефинисати и описати. На слици 107 виде се основни типови. Избором полигона или правилних облика битно се утиче на форму мембране. Из великог броја форми који се користе за дефинисање обликовања мембрана издваја се хиперболични параболоид или краће хипар. Интересентна особина му је да се може дефинисати са односом позиција двије равне линије у простору. Хипар је закривљен у два правца у тродимензионалном простору. У контексту обликовања текстилни материјал се може затезати за равне елементе у виду шипки или затегнутих челичних сајли, али и сајли које нису у потпуности затегнуте, тако да се на овај начин добијају модификовани љускати облици који су настали из хиперболичног параболоида. Неријетко може се примијетити да се могу комбиновати унформно или неправилно како би се добили изузетно комплексни геометријски облици слагањем и модуларним спајањем у велике цјелине. Слично је урађено на примјеру кровног покривача Олимпијског стадиона у Минхену (слика 102). Распоред тачака које ће чинити фиксне позиције је такође битан полазни параметар од кога се може кренути у истраживање и проналажење жељеног облика. Вили ван дер Мерен 1969. године дизајнирао је занимљив кровни покривач за зграду свог архитектонског бироа. Сматра се једним од пионира употребе. Облик чине четири горње и четири доње фиксне тачке између којих проналази оптимално обликовање, а испод ње пројектује објекат са равним кровом. Овакве површине се често називају тензоформама²⁵ (слика 105).

Конични облици су чести, уобичајено долазе у мањим величинама. Дефинишу се тако што се доњи сет тачака усвоји као фиксне планарне позиције, а затим се једна тачка унутар површине подиже и поставља на жељени положај. Могу да имају егзо конструкцију, односно додатне носаче са спољашње стране који раде као спреглови у случајевима великих мембрана. Ото Фреј се бавио коничним структурама и спајањем у веће кластере. Најпознатији јако утицајан објекат је њемачки павиљон на “EXPO 1967”

25 Дефиниција тензоформе и основне карактеристике дјело истраживања *Conceptual Design and Analysis of Membrane Structures* (Erica Henrysson), Chalmers University of Technology, Goteborg, 2012.

изложби. И велика имена у историји архитектуре дала су допринос развоју мембранских текстилних покривача, као што је Кишо Курокава (*Kisho Kurokawa*) на пројекту зграде сајма у Јокохами у Јапану из 1996. године.

Истински комплексне форме долазе са континуалним површима са коничним шупљинама. Математички модели за опис оваквих геометријских облика није једноставан. Примјер је пројекат Помпиду центра у Метцу у Француској, пројектован у бироу Шигеру Бан Архитекти (*Shigeru Ban Architects*, слика 104). Конструкцију чине елементи од плетеног ламелираног дрвета са носачима у виду стубова који продиру кроз кровну површ и челичним сајлама затежу континуалну мембрану са коничним отворима. Таласасти облици се могу примијенити на великим површинама код којих оптерећење преузимају и каблови између интервала површи. Последњи метод чине затегнуте мембране

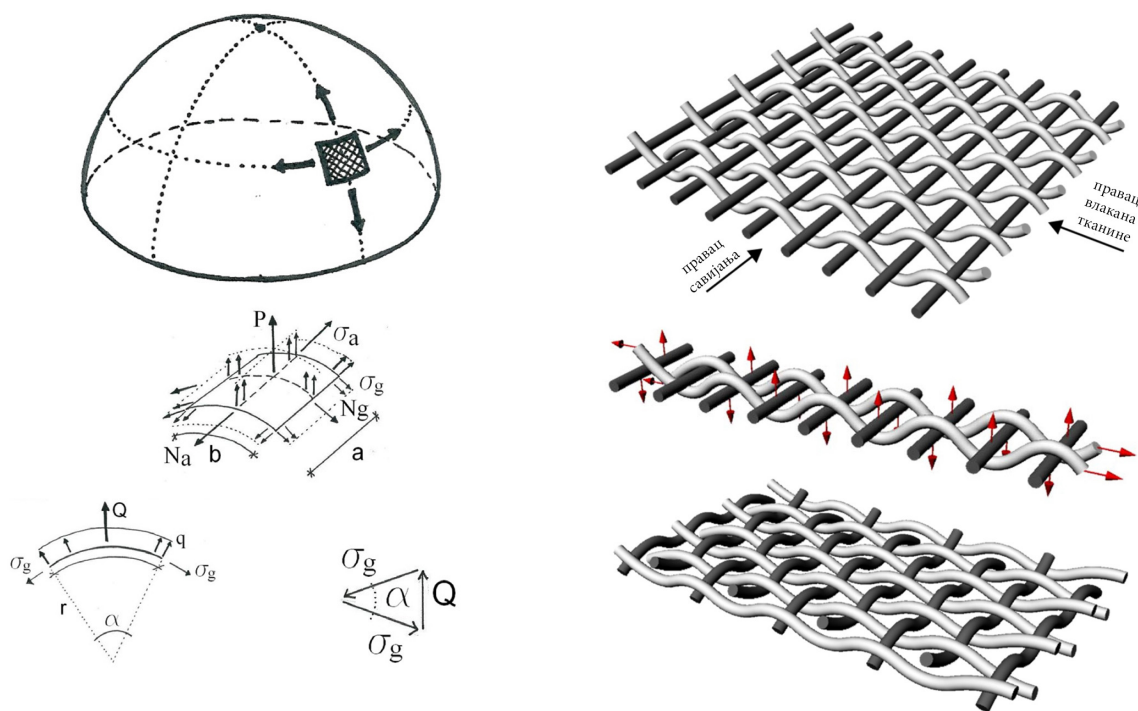


Слика 106. Детаљ спајања мембранског текстилног покривача са носачима и затегама. Цртеж дјело Хегија Дешоа (*Hegyí Dezső*).

конструктивно подржане растерима носача. У том смилу Помиду центар у Метцу (*Centre Pompidou-Metz*) спада у ову категорију.

При употреби текстилних затегнутих покривача употребљава се неколико конструктивних елемената: техничке мембране од разних система ткања и материјала, затеге у виду сајли, плетени канани разних пречника и конструктивних карактеристика, плочасте спојеве мебрране и носача, потенцијално подконструкције у виду растера носача. Мембране прве примају и преносе оптерећење на остале конструктивне елементе. Материјал и систем формирања тканине играју значајну улогу дефинисању конструктивних карактеристика. На слици 108 може се видјети неки од примјера. Структура текстила који се употребљавају је ортотропична, што значи да је различита у два правца, слично као што је код влакана дрвета. Чврстоћа и крутост је различита у два правца. Сваки је задужен за одређене утицаје. На примјер у правцу највећег савијања мембрана орјентишу се влакна која имају мању чврстоћу. Обично у правцу облика који је дужи, супротно аналогји чвршћа влакна су орјентисана у правцу краћег растојања до ослонаца, тако да примају највеће утицаје. Најбољи резултати добијају се постављењем система оса влакана у дијагоналном правцу према носачима или затезним сајлама. Влакна у правцу савијања зетежу се при производњи текстила што им омогућава веће конструктивне карактеристике.

Овакве структуре су уско постављене, ортогоналне и као такве имају јако мале шансе да дође до смицања јер сва влакна приближно једнако континуално примају



Слика 107 лијево. Приступ анализирању мембрана и текстилних материјала на узорку са приказаним силама оптерећења. Непознат аутор цртежа.

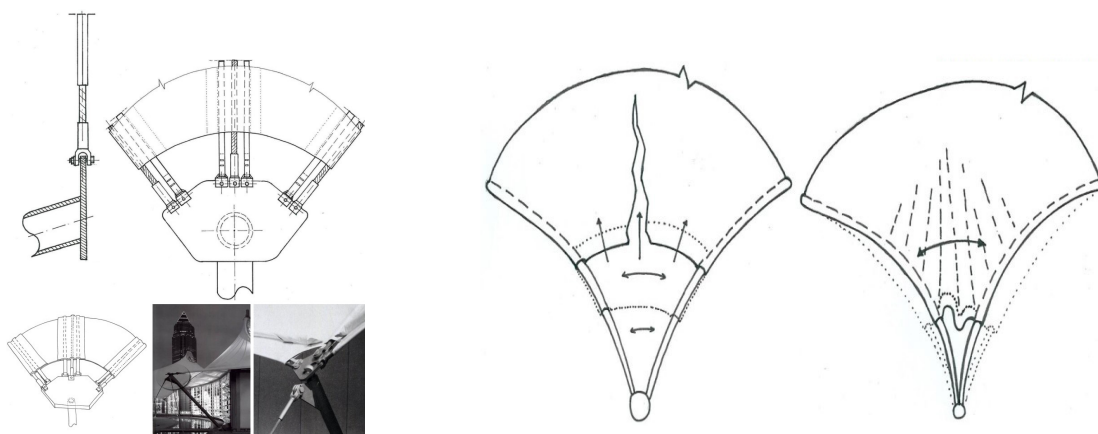
Слика 108 десно. Положај влакана текстилних материјала може да утиче на конструктивне карактеристике које се траже за мембранске покриваче. Илустрација Марко Кољанчић.

силе утицаја. При дизајнирању уобичајена пракса каже да се пролази кроз три фазе²⁶: проналажење оптималне форме, статичке анализе и креирање шема за производњу тканина по конструктивним пољима у разним правилним или неправилним растерима. У многим случајевима идеална оптимална форма није дата математичком формулом него до ње се долази на два начина. Први је традиционални метод или модел балона сапунице Ото Фреја. Други је метод адитивне рачунарске симулације математичког модела који укључује убрзање, силе отпора форме, масу, гравитацију и многе друге. Велики број сложених калкулација у малим јединицама времена су оно што рачунар чини идеалним кандидатом за овакве математичке моделе^[5]. Поред облика потребно је унапријед дефинисати основни статички модел који ће бити кориштен и коме ће се тежити. Када се дође до жељеног резултата тада се примјењују статичке анализе и конструктивни облик се оптерећује прописаним оптерећењима за прорачуне који ће гарантовати сигурност покривача. Кроз анализе форма мембране се може додатно модификовати да би се добио истински оптималан резултат.

Пројектовање и долажење до резултата нису у потпуности јасно дефинисан јер је велики број параметара утицаја укључен, из тог разлога резултат се назива оптималним, а не идеалним. На примјер, влакна, иако су иста у идеалним условима, у реалном окружењу постоје мале разлике. Идеално не постоји ексцентрицитет сила, али у реалном контексту иако је мали кумулативно може да се накупи и постане значајан. Још један не занемарив аспект је тежак начин доласка до Поисоновог односа, односно коефицијента експанзије по попречној осовини у односу на ортогонално аксијално напрезање^[5]. Проблем долази из разлога што се посматра динамичан облик, а не крут фиксан конструктивни елемент. С тим на уму калкулације нису у потпуности прецизна репрезентација мембране, али приближно описују идеално стање. У индустрији и практичној употреби ови фактори се неутралишу прописаним коефицијентима сигурности.

26 Истраживање фаза проналажења оптималне форме може се детаљно погледати у научном раду *Conceptual Design and Analysis of Membrane Structures* (Erica Henrysson), Chalmers University of Technology, Goteborg, 2012.

У многим ситуацијама каблови носачи се понашају слично као мембране. Основна разлика између њих, када је у питању механичко понашање, долази од чињенице да конструктивни текстили имају много већи ниво интеракције између попречног и аксијалног правца пружања влакана^[5]. Каблови су линеарни, динамични, потенцијално тродимензионално закривљени, конструктивни елементи. Моногу су чвршћи када је у питању отпор силама кидања него мембране, тако да су прорачуни једноставнији јер се ове појаве могу игнорисати. Такође пролазе кроз процес проналажења оптималне форме. Математички модел за адитивно проналажење облика мембране описује се кроз неколико наредних једначина. Метода се заснива на принципу гдје се маса додјељује појединачним тачкама које су униформно распоређене на равној површини неформиране мембране на дефинисаном растојању једна од друге. Уврштавају се и фактори отпора са сваком новом итерацијом прорачуна.



Слика 109 *лијево*. Детаљ споја мембране текстилног покривача употребом челичне плоче. Цртеж дјело Хегија Дешоа (Hegyí Dezső).

Слика 110 *десно*. Честе негативне појаве на мембранама услед разних утицаја, са правцима простирања. Цртеж дјело Хегија Дешоа (Hegyí Dezső).

5.3 МАТЕРИЈАЛИ МЕМБРАНСКИХ ПОКРИВАЧА

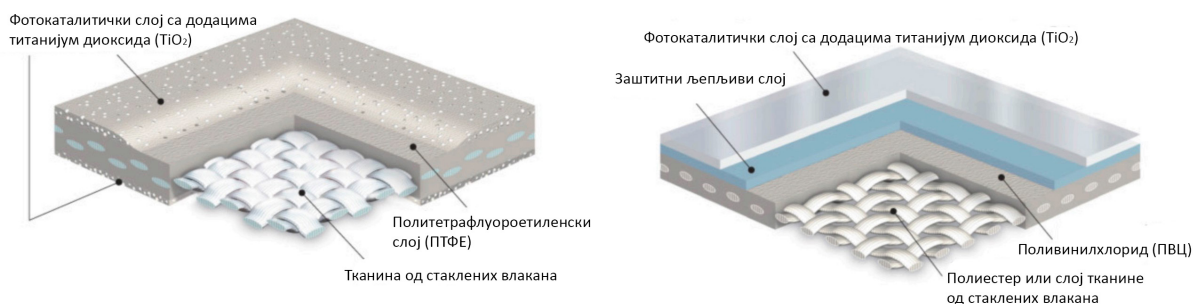


Слика 111 лијево. Мембрански текстилни покривач од ПТФЕ (тефлон са слојем стаклених влакана) на примјеру спортског стадиона. Фотографија Сатоши Наканое (*Satoshi Nakanoue*).

Слика 112 десно. Мембрана од ПВЦ полиестера. Фотографија Вернер Собек (*Verner Sobek*).

Материјали за текстилне мембранске покриваче требају да испуне неколико критичних захтјева као што су отпорност на разне атмосферске утицаје, конструктивне карактеристике у смислу еластичности, чврстоће и лакоће обраде и производње^[32]. Употребљавају се на свим континентима под разним климатским условима, од Арктика и његових екстремних временских услова до Африке и друге крајности изузетно суве климе и изложености високим темпратурама. Затегнути покривачи се дизајнирају кориштењем рачунарских симулација у неколико итерација за добијање оптималног облика који користи минималну површину. Након добијања форме потребно је направити шеме и спецификације форме за фабричку производњу од одређених материјала. Употребом рачунарских математичких модела добијају се дводимензионално планарно представљени сегменти који се спајају лијепљењем, шивањем, електричним варењем или топљењем материјала по спојним правцима. Комплексност обликовања може да утиче на методу спајања, а она на избор материјала који посједује способност обраде на изабрани начин. Након производње сегмената они се модификују или преднапрежу да би се обезбиједиле прорачунате конструктивне перформансе. Избор материјала који се може употребити је широк. Постоји неколико најчешће употребљаваних као што су ПТФЕ (тефлон обложен слојем стаклених влакана), СиПЕ (силикон ојачан стакленим влакнима), еПТФЕ (ткани ПТФЕ), ЕТФЕ (етилен тетрафлуороетилен), ПВЦ (полиестери) и ХДПЕ (полиетирени високе густине)^[32].

ПТФЕ тефлон је тренутно најпопуларнији материјал за мембранске покриваче структура које се пројектују као дугорочно рјешење, посебно на великим површинама. Пројектовани рокови трајања по спецификацијама произвођача иду и до 30 година, што говори о како издржљивом текстилном материјалу се ради. Поред дуготрајности предности су му изузетна отпорност на временске услове, топлоту и хемијска отпорност. Посједују занимљиву особину да могу пропуштати свјетлост у распону^[32] од 5% до 20% чиме отварају интересантне могућности при пројектовању спортских, сајамских или аеродромских објеката који захтијевају велику количину свјетла у ентеријеру. Свјетло које пропуштају улази уједначено јер већину апсорбује сам материјал. Апсорбује око 14% топлоте сунчеве енергије, а 73% рефлектује^[32] и ослобађа са своје вањске површине. Остатак пропушта кроз површину у унутрашњост објекта. Боја материјала при производњи и постављању варира од свијетло сиве до свјетло смеђе. Чисту бијелу боју добија само неколико дана по постављању, односно изложености директном сунчевом свјетлу. Спајање сегмената мембрана употребом ПТФЕ материјала врши се топљењем



Слика 113. Слојеви ЕПТФ и ПВЦ текстила за затегнуте текстилне кровне покриваче. Илустрација власништво “Birdair” компаније.

истога по пројектованим осовинама спојева. Хемијски је инертан материјал који је способан да поднесе екстремне температуре у распону од -70°C до $+230^{\circ}\text{C}$ [32]. Структура му дозвољава да се чисти сам под дјеловањем кише или снијега што је велика предност у односу на материјале којима је потребно обезбиједити одржавање чиме се поскупљује експлоатација. Поред основне варијанте инжењерима су данас доступни и деривати који садрже ватросталне слојеве као заштиту од дјеловања ватре и екстремних температура, субстрате који ПТФЕ чине еколошким или једноставно са хемијским додацима којима се обезбјеђује могућност избора боје текстила^[42].

СиПЕ је материјал који је хемијски дизајниран као јефтинија алтернатива ПТФЕ тефлону и посједује велики број његових особина. Карактеришу га велика отпорност и чврстоћа на затезање и кидање и најфлексибилнији је материјал за употребу на мембранским покривачима. За спајање дијелова форме служе љепила и адхезивна средства којима је потребно мање времена да постигну пуну чврстоћу од методе топљења која се употребљава на ПТФЕ мембранама. СиПЕ је дуготрајан материјал који је отпоран на ватру и хемијски стабилан материјал добрих конструктивних карактеристика. Доступан је у разним бојама и провидностима за потребе освјетљавања простора.

ЕПТФЕ односно ткани ПТФЕ тефлонски текстил (слика 113), добија се од ПТФЕ-а високе чврстоће и карактеришу га издржљивост, чврстоћа и флексибилност. Пропушта и до 40% равномјерног свјетла у ентеријер^[32]. Водоотпоран је и лаган, а способан је да се спаја разним методама за разлику од ПТФЕ и СиПЕ текстила. Због своје велике флексибилности често се употребљава на мембранама које се динамично постављају, односно отварају и затварају по потребама.

ПВЦ полиестери су најјефтинија рјешења. Нису гарантовано и најекономичнија јер захтијевају одређена третирања при експлоатацији која их, дугорочно посматрано, могу поскупити у односу на остале. Могу се употребљавати на привременим и сталним покривачима. Карактерише их велики број варијација на тему основног ПВЦ материјала који су доступни на тржишту. Већина има посебне додатне слојеве са горње стране мембране који надопуњују недостатке основног ПВЦ материјала. Уобичајен рок трајања им је 20 до 25 година^[32]. Доступни су у разним бојама и текстурама. Негативна особина им је склоност ка пластичним деформацијама на шта се обраћа посебна пажња при прорачунима. Спајање се врши посебном радио-фреквенцијском опремом.

ХДПЕ, или полиетирени високе густине, су још једна породица материјала за материјализовање затегнутих текстилних форми кровних покривача. Често се употребљава на великим агрикултурним објектима због високог процента пропуштања директног свјетла, али и у плетеном облику за мембране на објектима разних функционалних намјена. Изузетно је отпоран на силе затезања и у плетеном текстилу посједује велику чврстоћу у оба правца, што је изузетно битна карактеристика код одређених великих комплексних тродимензионалних форми. Апсорбује велику већину сунчевог ултраљубичастиог зрачења и отпоран је на утицај ватре. У пракси се најчешће употребљава у сувим тропским

предјелима гдје је потребна заштита од сунца. ХДПЕ није водоотпоран материјал. Спајање се врши у индустријским постројењима са посебним механичким машинама. Уобичајен рок трајања му је од 8 до 10 година^[32]. Генерално, материјали за текстилне покриваче, су дизајнирани са еколошким аспектом на уму. Углавном су рециклирајући или изузетно дуготрајни материјали. Могу да пропуштају дневно свјетло и чине просторе равномјерно освјетљеним, а одређени имају јако мали коефицијент топлотне проводљивости чиме утичу на штедњу енергије и економску исплативост при употреби.



Слика 114. Комплексни текстилни кровни покривач од ХДПЕ (полиетирена високе густине). Непознат аутор фотографије.



6.0 СТАБИЛНОСТ И РАЗНИ УТИЦАЈИ НА ПРОСТОРНЕ РЕШЕТКЕ

6.1 СОПСТВЕНО И ПОКРЕТНО ОПТЕРЕЋЕЊЕ И АТМОСФЕРСКИ УТИЦАЈИ

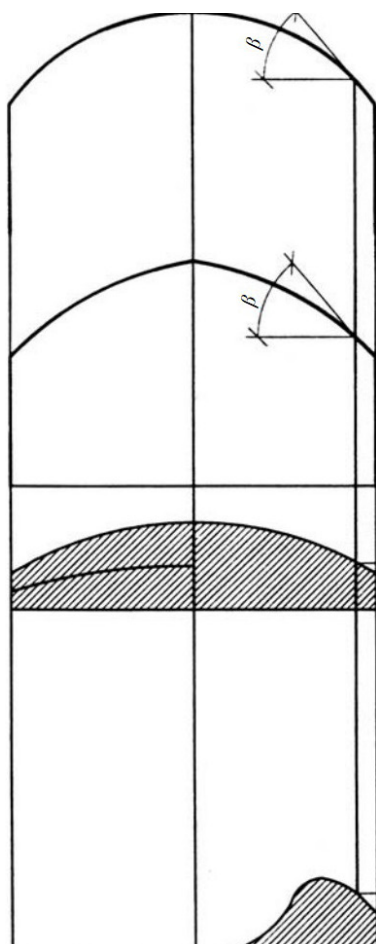
Први параметар који се узима у обзир при прорачунима носивости решеткастих конструкција је сопствено оптерећење. Састоји се од укупне тежине конструкције и оптерећења које долази од додатних елемената који се постављају на исту, као што су инсталације између слојева решетке, расвјетна тијела, вентилациони канали провучени кроз решетку, ослоњени елементи који се не помјерају, као што су зидови, стубови, слојеви подова или крова, у зависности од улоге конструкције у посматраном објекту. Сопствено оптерећење се третира као континуално које дјелује истим, одређеним, интензитетом на свим сегментима конструкције.

Покретно оптерећење се прорачунски дефинише кроз стандарде који су на снази, а примјењују се у пракси и зависе од поднебља у коме се гради. Чине га углавном динамична оптерећења објеката који се помјерају временом у простору и стварају ударе, моменте сила, вибрације и друге врсте оптерећења, а изазвана су кретањем људи, позицијама намјештаја и многим другим. Често се третирају као утицаји који нису стално константни него се прорачунавају на бази вјероватноће појављивања. Тежина снијега или воде услед кише се, такође, уврштава у прорачун у зависности од поднебља. Ова оптерећења се третирају као континуална са дефинисаним максималним интензитетом узимајући у обзир облик и нагиб конструкције. Ребрасте куполасте просторне решетке кружне основе утицај снијега, кише или неког другог симетрично постављеног оптерећења може се прорачунски формулисати као континуално оптерећење које дјелује на лучни носач и на тај начин свести прорачун на једноставнији математички облик.

Количина и утицај кише може да игра значајну улогу и један је од параметара који се углавном дефинише географском позицијом објекта. На примјер, узима се у обзир у тропским влажним климама са великом количином падавина на годишњем нивоу. На крововима који су формирану употребом двослојне просторне решетке често се вода више задржава него што отиче, тако да се мора прорачунски дефинисати оптерећење којем ће се изложити конструкција.

6.2 УТИЦАЈ ВЈЕТРА

На куполастим љускастим конструкцијама просторне решетке вјетар представља значајно оптерећење које се прорачунски обрађује са циљем гарантовања стабилности система. Слично као код утицаја снијега, вјетар се такође посматра у контексту поднебља у коме се гради конструкција као и важећих прописа и стандарда. Може се примијетити да се практична знања имплементирана кроз стандарде разних земаља драстично разликују. Вјетар преноси утицај у виду сила удара, притиска и потиска у зависности од форме површи на коју дјелује. На слици 114 може се видјети шематски приказан утицај вјетра на љускасту решеткасту конструкцију са позицијама дјеловања сила потиска на горњем централном дијелу пресјека и притиска на доњим сегментима. Поред разних свјетских стандарда, када су у питању прорачуни утицаја ваздушног струјања, европски комитет за стандардизацију (*European Committee for Standardization*) је дао препоруке које важе на тлу Европске Уније и које се практично употребљавају у прорачунима. Посебно су битни у фази пројектовања и дизајнирања комплексних решеткастих конструкција, изузетно на аморфним обликовањима, чијом се употребом смањује број итерација враћања не дорађивање формације штапова и облика конструкције. Значајне разлике, у погледу коефицијента притиска, постоје за стандарде разних земаља, када су у питању тродимензионално закривљене површи материјализоване употребом просторних решетки у које спадају љускасте конструкције куполе, цилиндричног исјечка, хиперболични параболоиди и слободне форме. Ове разлике, такође долазе, и од



зависности коефицијената од Рејнолдсовог броја, обраде материјала конструкције или покривача, брзине, правца и интензитета вјетра, руже вјетрова посматране локације и сличних промјенљивих параметара специфичних за поднебља и конкретну конструкцију са материјалом од које је изграђена. Имајући у виду ове чињенице може се закључити да су прорачуни сила утицаја вјетра изузетно битни за решеткасте конструкције великих распона и тродимензионално закривљених површи. Уобичајено је да се раде тестови у контролисаним лабораторијским условима у вјетро-тунелима. Тестови се врше на посебно пројектованим минијатурама, односно макетама, са прецизно мјереним простирањем и позиционирањем сила притиска које производи вјетар на површинама. Мјерења се репрезентују у форми пресјека кроз конструкцију са приказаним дијаграмима интензитета и позиције притиска у низу припадајућих пресјека. Данас се чешће користи рачунарска симулација у којој се, на скоро идентичан начин, као у ранијем случају на макети тестира форма у односу на утицај вјетра. Дјеловање се дефинише као векторско поље са усмјерењем и магнитудом које представља струјање ваздуха. Овакве симулације су релативно јефтине и прецизне. Дозвољавају инжењерима могућност више итерација тестирања и боље уочавање недостатака конструкције. У оба случаја потребно је добити пресјеке са дијаграмима утицаја при струјању природног вјетра и ефекат рејнолдсовог броја на закривљену површ.

Слика 114. Оптерећење под утицајем снијега на једноставне и закривљене кровне конструкције. Цртеж дјело Тиен Т. Лан (Tien T. Lan).

6.3 УТИЦАЈ ТОПЛОТЕ И ОТПОРНОСТ НА ПОЖАР



Слика 115. Приказ урушавања кровне конструкције од просторне решетке дворане “Hartford Civic Center” у САД-у. Несрећа се догодила 1978. године. Конструкција је димензија 100 m са 120 m. Мокри сњежни покривач дебљине 12 cm изазвао је попуштање једног штапа, а затим је уследила ланчана реакција и урушавање. Фотографија дјело Нејтана Симонса (Nathan Simmons).

Конструкције просторне решетке су углавном материјализоване употребом метала као што су челик или алуминијум, нешто мање употребом дрвета, а ријетко од бетона, стакла и пластичних субстрата. Као такве склоне су термалној контракцији и експанзији при дјеловању високих или ниских температура којима су често изложене. Мијењање запреминских и димензионалних карактеристика може врло лако довести до губљења потребних конструктивних карактеристика елемената конструкције и самим тим до попуштања под силама које дјелују аксијално у елементима решетке. Из ових разлога утицај топлоте се узима у обзир при дизајнирању и прорачуну решеткастих конструкција, посебно на великим распонима и великом број спојних елемената.

Избор позиције ослонца у односу на ивице форме конструкције у основи, положај стубова унутар површи коју формирају, тип ослонца и везе са истима, фиксирани спојеви, дилатација, слободна транслација и ротације у споју, као и геометријске карактеристике попречних пресјека и штапова који преносе оптерећење на ослонце могу да утичу на драстично неутралисање ефеката при излагању екстремним и наглим температурним разликама. Манифестују се у виду скупљања и ширења материјала. Прорачунавају се употребом матрица и методом дислоцирања. Раније су ови прорачуни вршени ручно и били су изузетно захтијевни и дуготрајни. Данас већина специјализованих рачунарских програма може брзо и ефикасно израчунати и дати потребне параметре. Брзина калкулација коју је могуће добити довела је до тога да се данас подразумијева да се овај прорачун уврштава у стандардне анализе које се врше при пројектовању просторних решетки.

У класичним скелетним конструкцијама, као и решеткама, материјализованих употребом челичних профила потребно је обезбиједити заштиту свих или циљане већине елемената формације јер њихова међусобна зависност може, у случају попуштања једног носача, довести до катастрофалних посљедица по читаву конструкцију. Познат је случај рушења крова дворане Хартфорд Колосеум 1978. године у коме је дошло до попуштања само једног носача и цијела конструкција се урушила.

Данас постоје стандардни модели за процјену јачине утицаја ватре на конструкцију. Један од најбитнијих параметара је распоред оптерећења по секцијама конструкције, односно да уколико дође до оштећења једне зоне да негативан утицај не захвати остатак конструкције. С друге стране овај метод може се посматрати као количину материјала решетке до које ватра допире. Наредни параметар представља термалне карактеристике граничних елемената секција решеткасте конструкције, колико лако или тешко ватра може да се шири. Геометријски облик секција такође игра улогу, положај, површина и

облик отвора у граничним елементима сегмената. Брзина и подложност запаљивости материјала узима се у обзир као и повећање температуре услед дужег горења ватре и временско трајање изложености.

Стандардни традиционални модели нису у потпуности егзактни и предвидиви због великог броја фактора који се узимају у обзир, али добра су полазна тачка за основну анализу. У савременом инжењерству постоји тенденција ослањања на брзе и ефикасне рачуарске симулације које могу процесуирати велике количине параметара и дати ефикасне резултате анализа, као и сугестије за обезбјеђивање конструкција. Рачуарске методе симулације често се називају природним моделима утицаја ватре. Традиционални модели праве једну нереалистичну претпоставку, а то је да је температура гасова у цијелој секцији захваћеној ватром иста, поготово у просторима велике запремине као што су спортске дворане, сајамске хале или хангари што резултате чини изузетно непрецизним. У првој фази анализе описује се модел ватре у коме се одређује температура и дистрибуција гасова у секцијама. Након тога прави се модел дистрибуције температуре на конструкцију, као и пренос топлоте на сусједне конструктивне елементе. Са добијеним одговарајућим математичким моделом ових процеса даље се може дефинисати, у односу на раст температуре, смањење конструктивних карактеристика челика у одређеном временском периоду. Ефекат пораста температуре и промјена карактеристика материјала уноси се у прорачун конструкције.

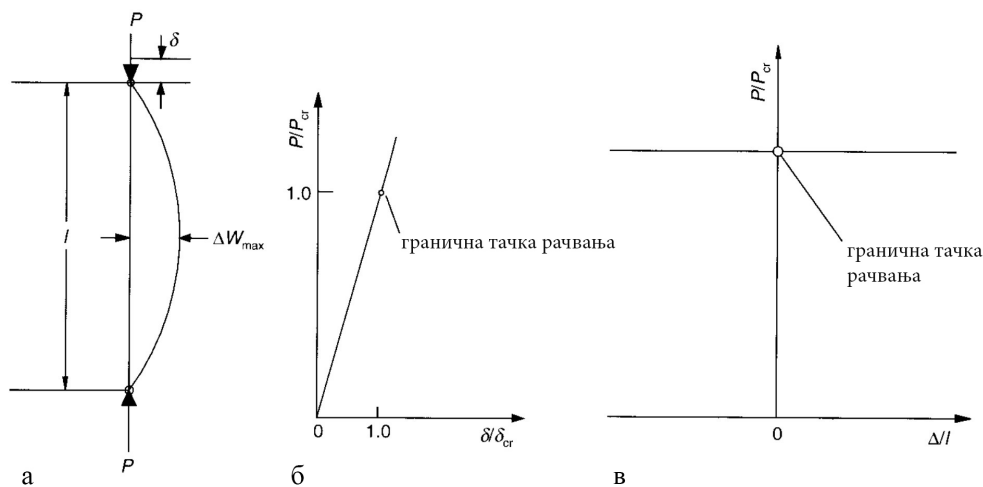
У коначници спроводи се серија конструктивних анализа, са узимањем у обзир времена и повећања температуре, у којима се тестира стабилност цијеле просторне решетке у свакој итерацији. Анализе се спровode до граничног случаја у коме се под одређеном температауром конструкција понаша неповољно и постоји опасност од конструктивне нестабилности. Употребом ове методе могуће је стећи увид у редослед и начин потенцијалног урушавања конструкције у току времена изложености високој температури. Елементи решетки заштићују се од утицаја екстремних температура узрокованих ватром само на сегментима на којима су тестови показали да је конструкција изложена неповољном утицају. Заштита се врши разним врстама премаза који формирају заштитне слојеве. Овакве врсте изолација су обично скупе, посебно на великим конструкцијама са изузетно великим бројем штапова и спојних елемената. Други начин је постављање препреке у виду слојева материјала качених или ослоњених на конструкцију који су слаби проводници топлоте и не горе. Могу непожељно утицати на естетске квалитете које посједују просторне решетеке, али су најбоља заштита. При дјеловању нормалних атмосферских температура конструкција се може заштити дизајнирањем или употребом спојних система штапова који остављају простор дилатације за контракције и експанзије елемената. Уколико се не обезбиједи овај простор могу се јавити високе аксијалне силе притиска или затезања узроковане промјеном геометријских карактеристика штапова.

6.4 СЕИЗМИЧКИ УТИЦАЈИ И РЕШЕТКЕ У ТРУСНИМ ЗОНАМА

Једна од битних анализа конструкције је анализа на утицаје сеизмичких сила, посебно за решетке које су изграђене у трусним зонама²⁷. Комбинација чврстоће укупне форме и способности појединачних елемената да поднесу велика оптерећења чини просторнерешеткерелативно добрим конструктивним склопом када су у питању сеизмички утицаји. Наравно, нису у потпуности отпорне на ове утицаје. Постоје ситуације у којима може доћи до попуштања одређеног броја или једног елемента које потенцијално доводи до конструктивне нестабилности цијелог система. Анализе сеизмичких утицаја свде се на проналажење слабости формације штапова под дјеловањем наглих хоризонталних сила помјерања тла под конструкцијом.

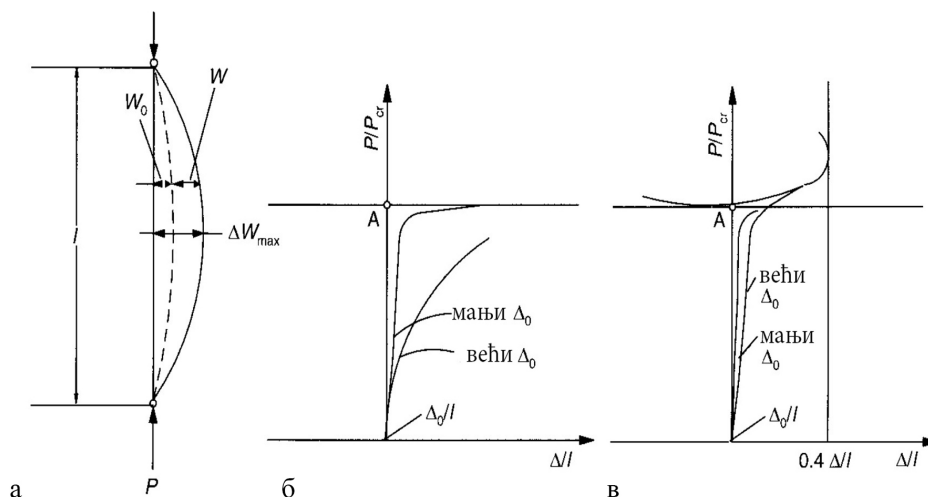
У оваквим случајевима силе нису аксијалне и узрокују деформације елемената. При прорачунима узима се у обзир вјероватноћа појављивања ове врсте утицаја на конструкције и разни фактори који карактеришу земљотресе, као што су максимално помјерање тла, профил фреквенције, временско трајање и многи други. Понашање просторне решетке зависи од крутости конструкције на коју је ослоњена, јер преко ње се преносе силе изазване земљотресом^[17]. Када је решеткаста конструкција ослоњена на систем стубова тада се понаша као флексибилна дијафрагма. У случајевима ослањања на масивну подконструкцију као што су на примјер, зидови стадиона, тада не утиче на укупну отпорност објекта сеизмичким силама. Понаша се само као проводник истих сила на подконструкцију. Препоручује се да ослањање просторне решетке на конструкцију испод обезбједи мало помјерање, али и недозвољавање да се појави велики ивични ексцентрицитет у ослањању.

Помјерање тла испод објекта узрокује појаву сила инерције саме конструкције које су пропорционалне величини и маси исте. Сеизмички утицаји се класификују као динамички и сходно томе спроводе се динамичке анализе. Ове анализе су компликоване и захтјевне из разлога што су амплитуда убрзања помјерања тла, правац и интензитет помјерања карактеристике које је тешко прецизно дефинисати и предвидјети^[17]. Динамичко понашање просторне решетке се проучава прво кроз вибрационе особине топологије посматраног система и описују се проналажењем њених природних фреквенција. Земљотрес, са овог аспекта, значајно утиче на фреквенцију и динамичке карактеристике конструкције. Двослојне решетке имају релативно већу крутост и отпорност на сеизмичке



Слика 116. Извијање штапа решетке у идеалним условима употребом Ојлерове методе. Цртеж дјело Г. Р. Суреша (G. R. Suresh).

27 Детаљнија истраживања могу се пронаћи у научном раду *Space Frame Structures* (Tien T. Lan), *International Journal of Space Structures*, 1985.



Слика 117. Графички приказан почетни ефекат несавршености система. Цртеж дјело Г. Р. Суреша (G. R. Suresh).

утицаје. Даљом анализом разних типова, односа периода осилације и распона, може се са сигурношћу тврдити да постоји веза између периода, који се повећава, са повећавањем распона конструкције, односно да већи распони дају већу геометријску флексибилност. Модули вибрације двослојних решетки класификују се као вертикални и хоризонтални. Уобичајено, прво се јављају, вертикални који за различите типове просторних решетки дају сличне дијаграме фреквенције. Искуством и мјерењем утврђено је да се силе у конструкцији, услед дјеловања вертикалних земљотреса, сучињу у три симетрична вертикална модула.

Најједноставнија метода анализе утицаја земљотреса на конструкције просторне решетки је употребом поједностављеног статичког модела прорачуна, који се изводи на начин да се силе земљотреса посматрају сведено као уједначено оптерећење на решетку. Ова метода је уврштена у стандарде прорачуна у разним земљама. У зонама у којима је максимално вертикално убрзање тла $0,058 g$ при земљотресу није потребно вршити детаљне анализе овог утицаја на конструкције. При прорачунима утицаја методом поједностављивања дјеловања сила и представљањем као класично оптерећење, узима се у обзир да исто није константно идентичног интензитета на цијелој конструкцији. Највеће силе утицаја су у пољу и смањују се према тачкама ослањања на подконструкцију. У случајевима комплексних решетки и великих распона употребљавају се методе креирања спектра отпора конструкције које дају добре приближно максималне вриједности до којих се формација понаша еластично. “ASCE Task Committee on Latticed Structures under Extreme Dynamic Loads” је међународни комитет за истраживање утицаја динамичких оптерећења, или прецизније утицаја земљотреса, на конструкције просторних решетки. Истраживачки рад је дао велики допринос у бољем разумијевању сеизмичких сила. Кроз историју употребе и посматрања спроведен велики број истраживања из области утврђивања деформација просторних решетки под дјеловањем разних оптерећења тренутна рјешења нису дала у потпуности тачан и егзактан, односно предвидив модел. У основи је комплексност геометријске нелинеарности формација аксијалних елемената конструкције у простору. Постојање разних система спојева штапова резултује свођењем система на начин да се овакве конструкције посматрају као тачкасто повезане. Дефинишу се три стања у спојевима, односно стање у коме није дозвољено помјерање у спојевима, парцијално дозвољено помјерање и стање у коме је спојни елемент дизајниран тако да подржава помјерање или клизање аксијалних елемената у спојним тачкама. Из разлога великог утицаја на прорачун потребно је коректно одабрати модел прије наредних корака анализе конструкције. Непожељна појава извијања, када су у питању конструкције просторне решетки, најбоље се може схватити пажљивим и детаљним посматрањем

једног аксијално преоптерећеног штапа. Почетно понашање показује смањење дужине осовински посматрано. Након константног повећања оптерећења долази до одређене тачке у којој се може констатовати бочно савијање и угиб који постаје већи са повећањем оптерећења. Споменута тачка се назива тачком критичног оптерећења. До ње граф деформације је равна линија по осовини штапа. Линеарна Ојлерова теорија предвиђа да ће се са постизањем тачке критичног оптерећења конструкција или савити или ће остати у линеарном стању нестабилности. Оба случаја су могућа, тако да се ова тачка напона често назива тачком рачвања, односно појављивања једног од два стања. Ојлерова теорија није способна да предвиди путању осовине штапа након критичне тачке. Битно је споменути да је ово теоријска анализа и да вриједи у идеалним условима савршено центрично постављеног оптерећења на идеални линеарни елемент. У пракси су овакве идеализоване ситуације јако ријетке, тако да се у анализу узима одређен број фактора из релних услова грађења конструкција просторне решетке. Неки од ових фактора су из области, горе наведених, карактеристика геометријске нелинеарности. Сазнања са тестирања вриједи, како на једном штапу, тако и на цијелом низу штапова који чине просторну решетку.

Линеарна теорија није у потпуности довољна да опише комплексна понашања након тачке савијања елемената. Из тог разлога се прибјегава употреби нелинеарне анализе. Генерално, постоје три типа извијања конструкција просторне решетке: извијање штапова, локално извијање у чворним елементима и генерално савијање цјелокупне решеткасте формације штапова. Када дође до конструктивне нестабилности и извијања једног штапа просторне решетке, а остали остану нетакнути тада се ово понашање класификује као прво од три генерална случаја.



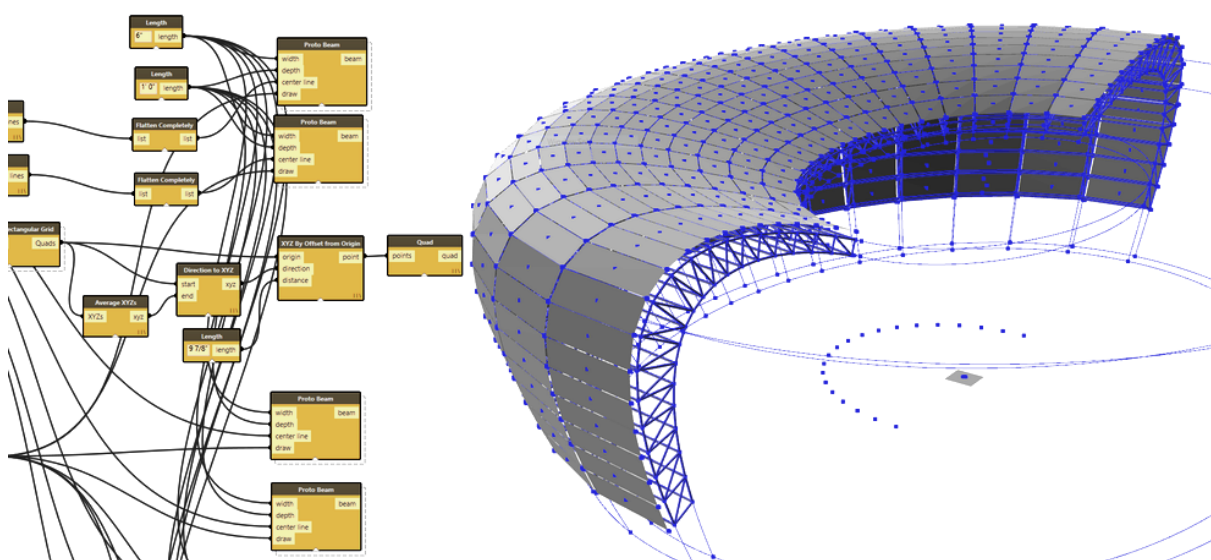
7.0 ДИГИТАЛНИ ПРОТОТИПИ ПРОСТОРНИХ РЕШЕТКИ НА СЛОБОДНИМ ФОРМАМА

7.1 ИНТЕГРИСАНИ ДИЗАЈН И ТЕХНИЧКА КОМПЛЕКСНОСТ ПРОЈЕКТОВАЊА АМОРФНИХ ПРОСТОРНИХ РЕШЕТКИ

Просторне решетке на аморфним формама, поред својих квалитета, носе и висок ниво техничке комплексности који се мораја узети у обзир. Мултидисциплинарност и координација између дизајна и стабилности конструкције са једне стране и економске компоненте са друге стално се преплићу и утичу једна на другу. Архитекти дефинишу форму која се треба прецизно конструктивно одредити и обезбиједити. Велики број елемената који чине решетку, избор система, припремање документације за фабрикацију, оптимизација у геометријском смислу, економска компонента кроз коју се требају провући естетски и технички аспекти пројекта су само неки од најбитнијих изазова на које је потребно дати одговор. Када се говори о основном процесу пројектовања аморфних просторних решетки обично се пролази кроз неколико фаза^[25]:

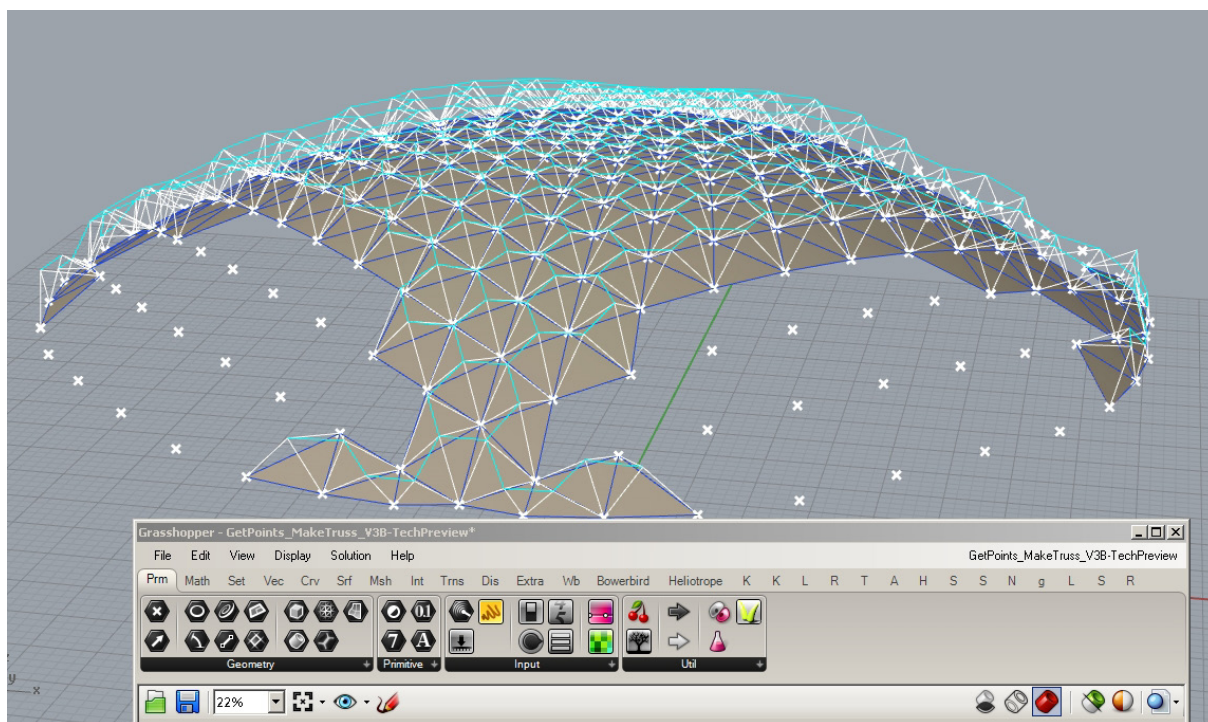
- планирање и концептуални дизајн
- прелиминарни дизајн
- коначни дизајн и оптимизација.

Са аспекта пројектовања архитектонског обликовања у теорији нису потребни



Слика 118. На слици је приказан систем процедуралног моделовања са резултирајућом комплексном конструкцијом просторне решетке. Промјена улазних параметара даје слично ново рјешење. Аутор илустрације Зек Крон (Zach Kron).

посебни алати, и ручне методе цртања и документовања дале су релативно добре резултате. У савременом инжењерству брзина и ефикасност играју велику улогу на конкурентном тржишту па се обично ослања на рачунарске методе. Аутоматизација и дигитализација процеса дизајна је кључна и са аспекта укључивања мултидисциплинарних тиова који раде на пројекту. Са становишта геометријске комплексности, брзине и прецизности постоји потреба за креирањем виртуелних дигиталних прототипа и алата за брзу реализацију наведених захтјева. Може се доћи до закључка да је најприкладније рјешење употреба процедуралних математичко-логичких алгоритама. Дигитални прототипи на којима је могуће тестирати особине система и прије него што се физички изгради спадају у категорију интегрисаног пројектовања званог “BIM” (*Building Information Modeling*). Брзина размјене прецизних и синхронизованих информација између тимова у оваквом мултидисциплинарном процесу представља најбоље могуће рјешење. Прелиминарни дизајн подразумјева избор конкретног система и дефинисано идејно рјешење. При



Слика 119. На слици је приказан систем процедуралног моделовања са резултирајућом комплексном конструкцијом просторне решетке у *Grasshopper 3D* алату. Аутор илустрације непознат.

избору типа просторне решетке на аморфној форми усваја се рјешење које подржава позиционирање штапова под разним тродимензионалним позицијама у склопу као и систем спојних елемената који требају подржати комплексне тродимензионалне формације у простору. Детаљном анализом узимају се у обзир све потребе и атрибути система, као и недостаци истога. На примеру Метро система зна се да спојни елементи могу подржати разне формације сутицања аксијалних конструктивних елемената у чвору под неколико критеријума. Један од њих је да било која два сусједна штапа не смију затварати угао мањи од 35^0 [22]. Са становишта разматрања економске компоненте посматра се доступност елемената система на конкретну локацију, могућност оптимизације саставних елемената за фабрикацију. У идеалној ситуацији тежи се да сви штапови или јединични модули буду истих димензија. На слободним формама није могуће испунити све услове који ће гарантовати апсолутно оптималан систем. Када се пронађе онај који највише обећава пролази се кроз читав низ прорачуна са циљем проналажења форме, конструктивних прорачуна и провлачење кроз системе за аутоматизовано оптимизовање.

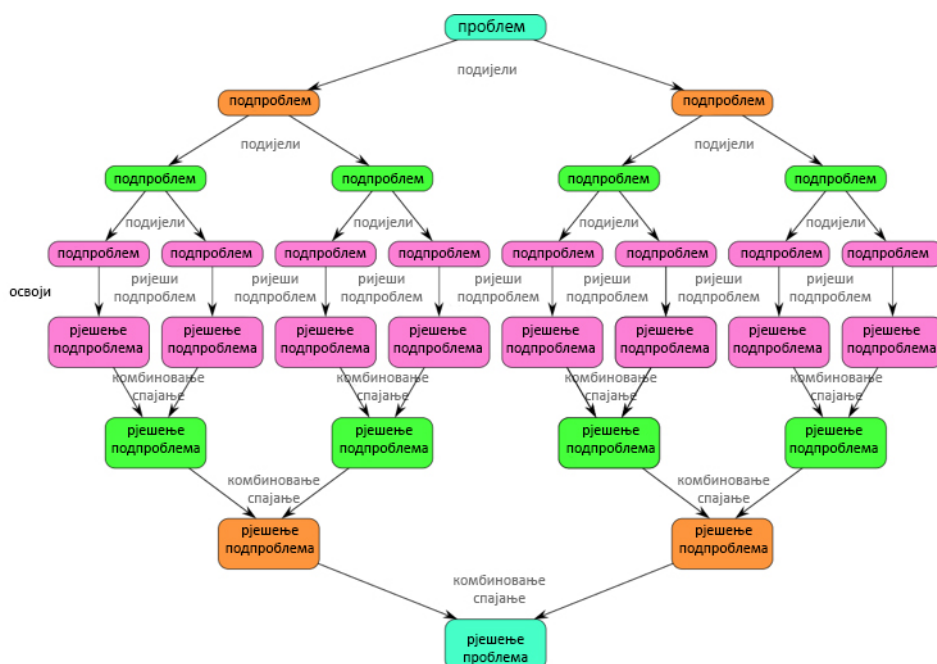
У коначном пројекту преплићу се све анализе и креира се документација на основу које се комуницира између иницијалне идеје са једне стране и производње, логистике, монтаже и сигурности са друге. Пракса је показала да се израдом паметних дигиталних прототипа стварају могућности боље информисаног дизајна. Креирања дигиталних прототипа аморфних просторних решетки у смислу виртуалног репрезентовања са аспекта израде документације и постојања могућности за ефикасну имплементацију разних система оптимизације. Метода која задовољава све потребне услове је прављење математичког геометријског алгоритамско – логичког дигиталног модела по методологији процедуралног моделовања. Једна од основних потреба је брзина којом се могу вршити промјене на једноставан и изузетно прецизан начин при координацији са свим дисциплинама и интересним странама укљученим у израду пројекта^[33]. Потребно је ставити акценат на остављање што је могуће веће могућности оптимизације рјешења.

7.2 АЛГОРИТАМСКИ ПРИСТУП ПРОЦЕДУРАЛНОМ МОДЕЛОВАЊУ И ОПТИМИЗАЦИЈИ

При рјешавању проблема обично се полази од стратегије, глобалне генералне идеје којом се води до доласка до жељеног циља. У овом случају жељени циљ је оптимизована просторна решетка материјализована на слободној математчкој површи. Систем који ће дати смислене жељене резултате под низом улазних параметара. Конкретно дигитални прототип комплексне тродимензионалне формације штапова са системом спојница у виду модела са кога се може аутоматски отворити простор за динамичне промјена на моделу. Из наведених потреба методе интегрисаног “BIM” (*Building Information Modeling*) процеса у комбинацији са процедуралном рачунарском математичко – логичком парадигмом представљају најефикаснији приступ. Искуствено је уочено, имплементацијом ове методологије на разним конструкцијама, да је неопходан систематичан нелинеаран приступ моделовању.

Један од најпознатијих уопштених алгоритама за рјешавање комплексних проблема представља “*Divide and Conquer*” алгоритам^[3], или често скраћено назван “*DnC*” (слика 120). У најширем смислу представља деконструкцију проблема на низ једноставних или једноставнијих којим се реконструише од фундаменталних концепата до потпуног рјешења. “*DnC*” се третира као вишеслојни рекурзивни приступ у коме је потребно пронаћи основне компоненте и низ спајања истих за потребе реконструисања резултата. Када се дође у ситуацију да се успјешно конструише комплексна појава тада се добија приступ њеним градивним компонентама чијом се манипулацијом стварају могућности једноставног контролисања резултирајуће комплексности. Задатак се деконструише на два или више подпроблема све до нивоа у коме су довољно једноставни да се директно ријеше. Комбинација њихових рјешења чини почетно стање.

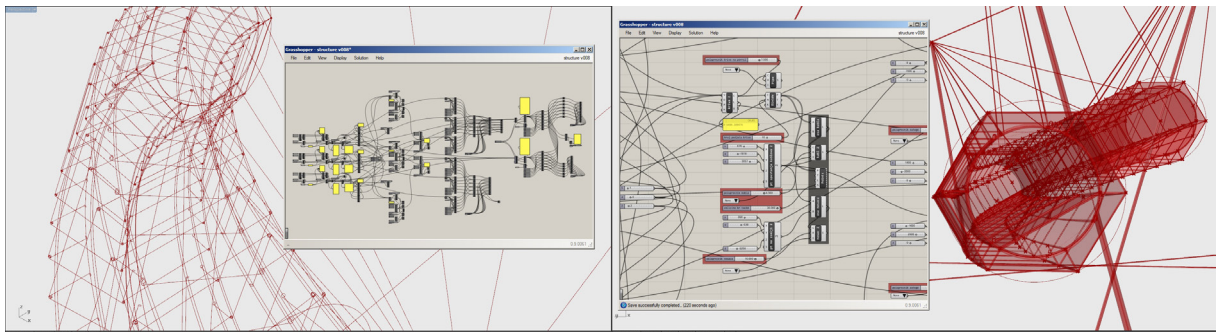
“*DnC*” је један од најчешће употребљаваних приступа у разним областима који захтијева дискретизацију појава или проблема. Историски посматрано, предности систематизованог рјешавања комплексних проблема уочени су још у античким



Слика 120. Илустрација која показује рекурзивни приступ рјешавању комплексног проблема употребом “*Divide and Conquer*” алгоритма. Деконструкција и проналажење подпроблема, рјешавање и на крају комбинација за реконструкцију система којим се рјешава почетни проблем. Илустрација М. Кољанчић после непознатог аутора.

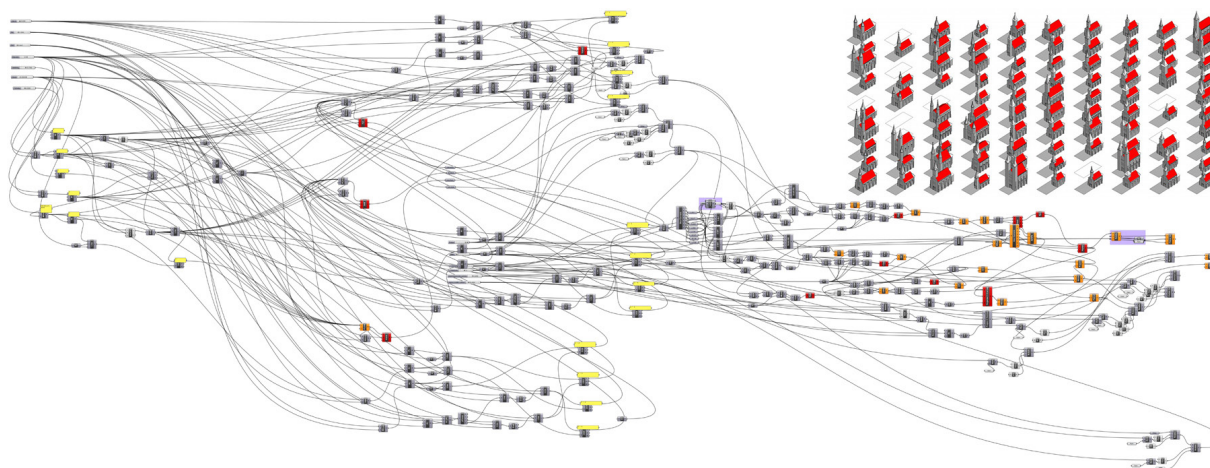
цивилизацијама, па описи истог могу се пронаћи у Вавилону, који датирају још од прије прије нове ере. Предности дискретизације и деконструкције по “*DnC*” методологији могу се уочити одређене предности. Једна од њих је рјешавање компликованих проблема на контролисан систематичан начин. Алгоритамска ефикасност, односно деконструисани проблем се тада најчешће може оптимизовати за добијање коначног циља. На примјеру дефинисања позиција штапова двослојне просторне решетке на слободној математичкој форми може се градити логички систем за топологизацију геометрије на било којој аморфној површи. До оваквих резултата долази се детаљном анализом и реконструкцијом и тиме се утиче на подкомпоненте и редизајнирање система. Подпроблеми се тада могу синхронизовано, па чак и паралелно, рјешавати. Ово је јако битан концепт јер процедурално моделовање је рачунарска алгоритамска техника која која посједује могућност искориштавања предности брзине калкулација рачунара, па тада брзина и ефикасност система добијају нову димензију. Појам рекурзивних процедура може се посматрати као начин доласка до једног или више слојева парцијалних подпроблема у односу на почетни.

Опис и анализа “*DnC*” алгоритма игра велику улогу у приступу моделовању конструкције који је планиран имплементирати у било коју аморфну форму, као и отварању могућности за оптимизацију система поготово одређених компоненти као што су тражење најправилнијег математичког тополошког модела подјеле двоструко закривљених тродимензионалних површи који ће чинити шему понављања поља двослојне решетке. Анализирање структуре у смислу испуњавања услова конкретних система и типа просторне решетке са аспекта могућности физичке материјализације у конструктивно ткиво објекта је једна од могућности. Генерисање комплетне статистике конструкције са документацијом за фабрикацију свих неопходних елемената, као и могућности тражења оптималне форме текстилних мембранских покривача који је предвиђен за употребиту као покривач кровне конструкције на пилот пројекту реконструкције крова жељезничке станице у Бањој Луци.



Слика 121. Примјењени “*Divide and Conquer*” алгоритам на рјешавању тродимензионалних геометријских проблема конструкције моста. Илустрација М. Кољанчић.

7.3 ПРОЦЕДУРАЛНО МОДЕЛОВАЊЕ И ПРИНЦИПИ ИНТЕГРИСАНОГ ПРОЈЕКТОВАЊА



Слика 122. На слици се може видјети процедурални тродимензионални модел са сличним варијантама добијен визуелим моделовањем, односно процедуралним алгоритмом. Једна скрипта промјеном улазних параметара генерише сличне моделе који увјек одговарају улазним параметрима, односно генераторима. Пројекат рађен у “Grasshopper 3D” апликацији. Непознат аутор илустрације.

Данас постоји велики број радова који критички посматрају помјерање парадигме дизајнера и алата који користи посебно када су у питању рачунарске методе или како су често називане “*shift in digital computational design paradigm*”. Критичко посматрање обухвата сва поља креативних занимања у која спада и архитектонско пројектовање. Иако су рачунари првенствено дизајнирани као помоћни алати при калкулацијама инжењери су брзо схватили да их могу употребити за разне задатке и прешли су на прву технологију која је названа “*CAD*” (*Computer Aided Design*)^[36]. На почетку је кориштен као замјена за папир и оловку, да би еволуирао у алат који врши огроман утицај на процес и начин промишљања у дизајну.

Први забиљежени процедурални параметарски дизајн је дјело Антонија Гаудија. Он је експериментисао са теговима окаченим о канаве, које је могао подизати како би добио интересантне облике форме конструкције своје најпознатије катедрале. Ова техника је позната као аналогни параметарски дизајн^[38].

Алгоритам је низ корак по корак процедура за процесуирање података употребом јасно описаних задатака. За сваки дио податка алгоритам ће извршити раније дефинисани сет инструкција и дати резултат. Водећи се овом логиком, може се закључити да ће алгоритам за дизајнирање дати дизајн ако се кроз њега провуку релевантне информације. Док се код конвенционалних дизајн алгоритама и система дизајн параметара сматрају локација, тип објекта, функција, естетика, конструкција и многи други, у алгоритамским системима постоји еквивалентан начин давања релевантних података који резултира траженим циљем^[32]. Рад на моделовању и пројектовању алгоритамском методологијом, у стручној литератури, назива се “*Algorithmic*”, “*Parametric*” или “*Generative*” моделовање и обично се изводи на “*CAD*” апликативним платформама^[37]. Захтијевају се улазни подаци у виду одређеног типа рачунарског записа, а то је број, текст, слика, тродимензионална геометрија и други²⁸. Резултат је геометрија или низ алфанумеричких карактера, као што су координате чворних тачака решетке, површине комплексних кровних површина и многе друге варијанте.

Да би овакви методи били могући потребан је спој рачунања и геометрије који се најчешће назива “*Computation Geometry*”. Наведени приступ није специфичан само

28 За више информација препоручује се научни рад *Engineering a New Architecture* (Robin T.), Yale University Press, 1996. научни рад.

за архитектуру, него се употребљава често у класичној математици, физици, машинству, индустријском дизајну и другим областима^[36]. “CAD” технологије и процедурално моделовање нису омогућили само лакше документовање пројеката, него су увели на велика врата истраживање комплексних геометријских облика за архитектонске форме. На самом почетку употребе резултати истраживања називани су често напредном геометријом, а тицала се слободних “NURBS” (*Non Uniform Rational Bezier Surfaces*) површи, морфингом, комплексним трансформацијама у тродимензионалном простору, односима између геометрија, времена, динамичких кинематичких операција и анализа разних врста које обликују, у геометријском смислу, одређену форму^[3].

Алати који су кориштени до револуције у процедуралном моделовању су били програмски језици гдје се текстуално програмирао алгоритам који је извршавао аутоматизоване низове задатака. Огромна експанзија у употреби десила се са појавом “*Generative Modeling*” технологија, које ослобађају дизајнера захтјевног писања рачунарског кода, већ инсистирају на употреби алгоритамског визуелног програмирања.

Истраживања на пољу комплексних геометрија, трансформација у простору



Слика 123. Процедурално моделована сложена конструкција Помпиду центра у Мецу, Француска. Преплетена структура од ламелираног дрвета пројектована по модуларној методологији са акцентом на једноставном и ефикасном генерисању документације за потребе фабрикације елемената. Фотографија и цртежи власништво Шигеру Бан архитектонског бироа (*Shigeru Ban Architects*).

и анализа које аутоматски мијењају облик геометрије пратила је и свјест о потребама израде документације и анализа за фабрикацију и утицаја на економску компоненту коначне креације. Рачунари су убрзали овакве задатке, али сам дизајн никад није дошао самостално од машине, него од дизајнера или творца алгоритма.

“*Generative Modeling*” обезбјеђује пројектовање и анализирање комплексних облика и математичких трансформација у простору, али врло брзо се долази до проблема реализације идеје у физичку структуру^[32]. Архитекти се ослањају на фабрикацију и употребу разних врста машина које се могу програмирати, као што су “CNC” машине и 3D штампачи. Поред моделовања унутар алгоритама оставља се простор за логичко разбијање модела на блокове који се могу фабриковати тренутно доступним технологијама. Процеси ове врсте захтјевају изузетну прецизност и интерактивност дизајна, у смислу да свака промјена улазних података даје смислен и предвидив резултат.

Одабиром “*Generative Modeling*” приступа изради модела и студије случаја пројекта кровне просторне решетке на жељезничке станице у Бањој Луци потребно

је показати потенцијал и лакоћу са којом дизајнер може да приступи рјешавању комплексних геоемтријских проблема. Анализе оваквих архитектонских обликовања, сложене симулације, а све са аспекта тражења најоптималнијег рјешења и оптимизације конструкције су постављени задаци. Основна компонента, поменуте методологије, је могућност имплементације идеје о фабрикацији, брзим креирањима варијација дизајна, одржива и енергетски ефикасна градња у раној фази дизајнирања и прожимање кроз цијели процес на алгоритамском модуларном парадигмом.

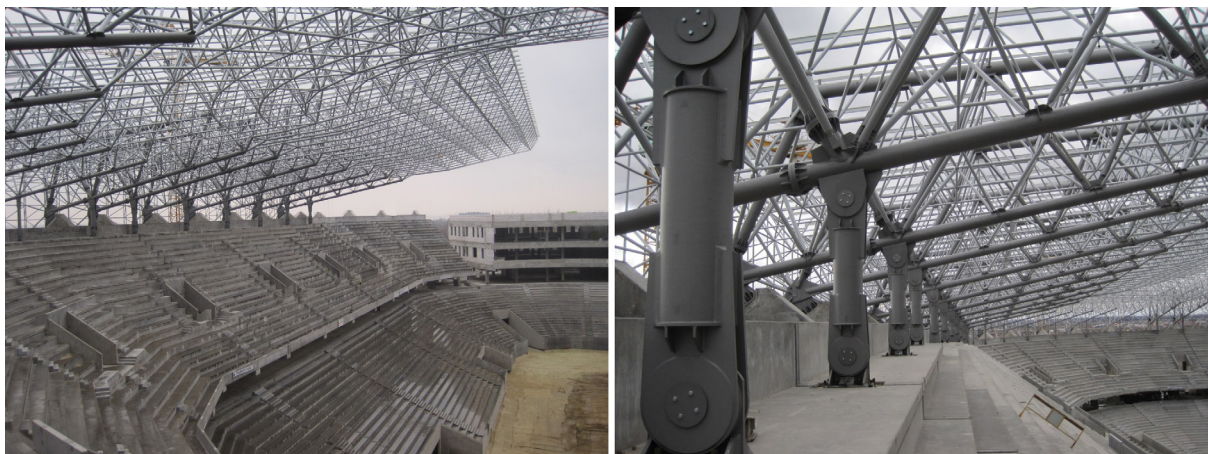
Суштина “*Generative Modeling*” је препуштање комплесног рачунања рачунару, а архитекта дизајнер је заслужан за доношење одлука. Ово је поменута парадигма у којој се генерише одређена разлика у односу на традиционални приступ пројектовању. Из техничког угла посматрања, данас, већ постоји велики број рачунарских апликација које су специјализоване за “*Generative Modeling*”, али неколико се издвојило, као што су “*McNeel’s Grasshopper 3D*, *Autodesk Dynamo*, *SideFx Houdini*”, “*Bentley Design Alorithms*” и слични.

Алгоритамско математичко моделовање често не мора бити линеарна процедура, у којој се полази од улазне информације и линеарно се обрађује док се не дође до жељеног резултата. Овај пут може да буде нелинеаран, што значи да је процедура која се описује способна за доношење одређених одлука у зависности од стања у коме се налази систем у посматраном тренутку у времену. На примјер, могуће је, на одређеном сегменту, имплементирати генетички еволуциони математички модел који може на паметан начин тражити оптимално рјешење проблема и чији ће резултат бити улазна информација за наставак наредног низа процедура. Шта ово значи конкретно за дизајнера може се видјети на *слици 123*, гдје је једном генетичком моделу додијељена функција тражења најправилније подјеле комплексне математичке површи за потребе фабрикације и стандардизације фасадних поља. Сличне методе се могу употребити на задатку проналажења оптималне форме мембранских текстилних покривача, односно симулацијом добити прецизан модел.

Просторне решетке система дискретних елемената су геометријске структуре које се могу пројектовати тако да су склопиве и расклопиве по потреби^[9]. Мере системи су познати по релативно једноставној монтажи и демонтажи. Процедурално моделовање може поједноставити системе пројектовања и секвенцирања уградње конструкција просторне решетке.

Постоји одређен број чланова професионалне глобалне заједнице који нису на страни употреби процедуралног дизајна у архитектонском пројектовању. Као најзначајнији аргумент наводе ограниченост алгоритамског дизајнирања као и губитак основне креативне енергије^[30]. Овакви системи се требају посматрати као помоћно средство у сврси тражења одговора на геометријска питања која рачунар може дати дале ефикасније него човјек.

7.4. КОМЕРЦИЈАЛНИ СИСТЕМИ ПРОСТОРНЕ РЕШЕТКЕ ЗА МАТЕРИЈАЛИЗАЦИЈУ СЛОБОДНИХ ФОРМИ



Слика 124. Метро систем на двоструко закривљеној конструкцији двослојне просторне решетке кровне конструкције спортског стадиона. Фотографија власништво Метро ТСК компаније (*Metro TSK*).

Приликом избора оптималног система за материјализацију двослојне просторне решетке потребно је узети читав низ параметара да би се пронашло задовољавајуће рјешење. Оно подразумева систем, тип и подтип који ће обезбиједити могућност обликовања двоструко закривљених тродимензионалних површи. Потребно је обезбиједити да спојни елементи подржавају комплексне геометријске формације аксијалних конструктивних елемената, број елемената који је дозвољен у једном чвору, те односе између истих, могућности фабрикације и стандардизације. Употребљавају се и за потребе економски исплативије градње, правилан избор материјала и могућности монтаже на посматраној локацији, конструктивне карактеристике система и многе друге.

“*Piece-small*” типови²⁹ су најлогичнији избор у оваквим ситуацијама јер се састоје од дискретних чворних елемената са системом спајања и индивидуалних штапова. Долазе у великој палети избора система у зависности од произвођача и постоји могућност стандардизовања за производњу у индустријским постројењима. Са становишта слободне форме, иновације је потребно фокусирати на систем спајања штапова у чворном елементу што дефинише флексибилност система. Одговор на проблем дали су инжењери на изради Метро, Орона СЕО и многих других система. Употребљени су у пракси и документована су искуства, са својим оригиналним рјешењима. Орона СЕО се одлично показала при изградњи комплексне геометријске форме крова спортске дворане Сент Џорди за Олимпијске игре у Барселони 1992. године, а још раније Метро је кориштен на “*EXPO*” изложби, као и на пројекту Биосфера 2 у пустињи Сонора, САД. Метро чворне кугле могу да приме до 18 штапова без појављивања нежељеног ексцентрицитета. Постоји само услов да аксијални елементи, који се сучињају, у заједничком чвору не заклапају међусобни угао мањи од 35° . Флексибилност Метро решетке чини је добрим кандидатом за слободне форме, слично Орона СЕО систему. “*Generative Modeling*” приступ може обезбиједити изузетно прецизно дефинисање позиција за машинско бушење отвора чворних кугли у које долазе спојни елементи, чиме се смањује могућност ексцентрицитета сила које путују кроз аксијалне елементе до чворова.

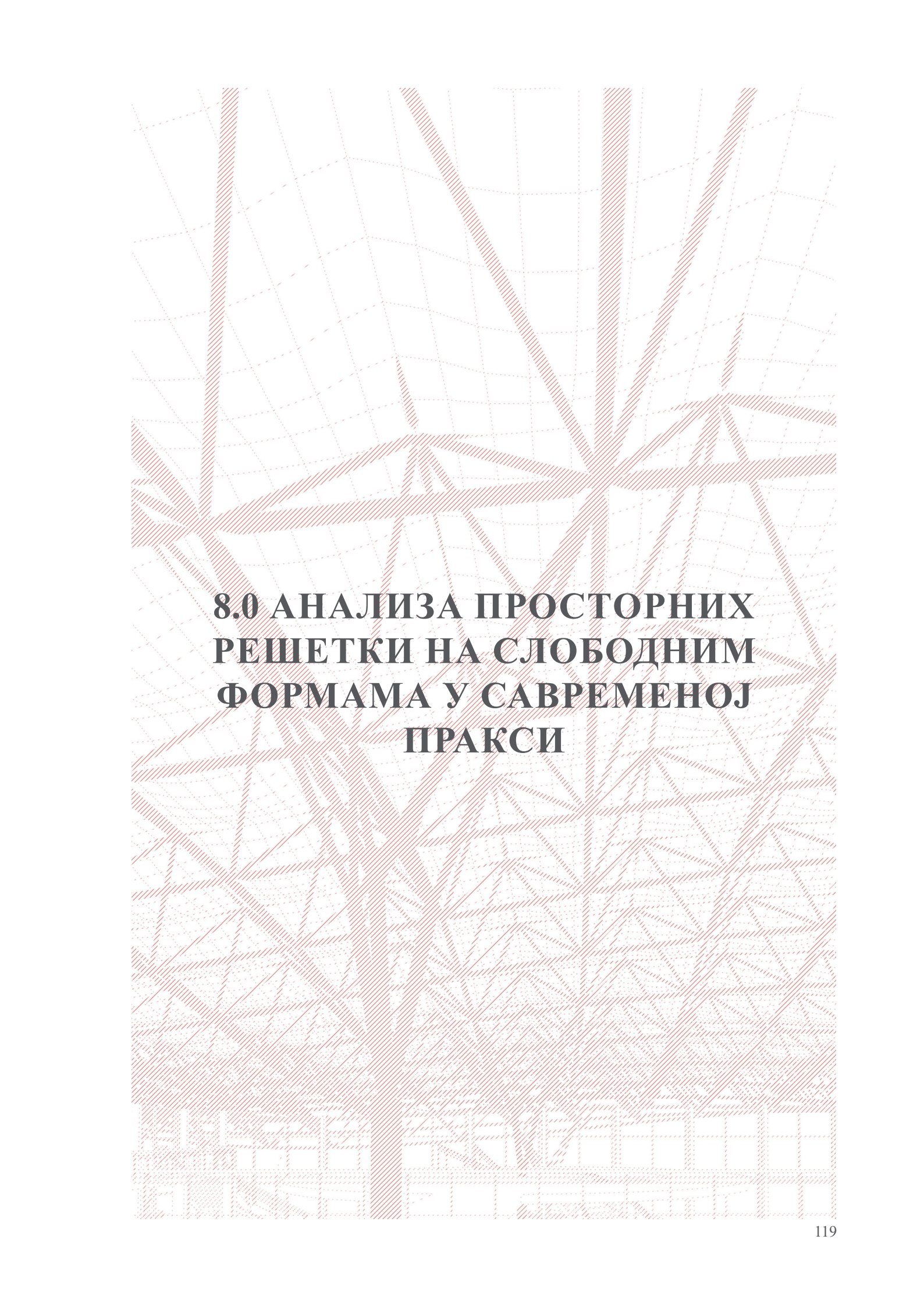
Најмања појава неправилности на великим конструкцијама, каква је кров жељезничке станице у Бањој Луци, може довести до кумулативног скупљања и појаве

²⁹ Позната су истраживања професора Тиен Т. Лана у научном раду *Space Frame Structures* (Tien T. Lan), *International Journal of Space Structures*, 1985.

читаваог низа нежељених утицаја на конструкцију. Уколико се говори о оптимизовању потребно је анализирати могућности истога на штаповима. Процес производње је такав да се уобичајено добијају ваљањем или извлачењем материјала кроз профилисане отворе. Ако се може гарантовати висок ниво прецизности усвојених дужина које је потребно произвести, онда се значајно утиче на стабилност система.

Меро систем је дизајниран са планарним двослојним просторним решеткама на уму. Међутим, доживио је многе измјене и развоје под типова због све веће популарности непланарних форми. Један од подтипова, односно Меро Плус, нуди сферични облик са унапријед избушеним рупама које су профилисане тако да се могу завртати штапови. Овом методом избјегнут је посебан додатни прелазни елемент при спајању са штапом. Машинским бушењем отворалежишта штапова отварају се могућности за материјализацију великог броја разних формација у простору. Иако ријетке на нашем поднебљу, просторне решетке на слободној форми могу се видјети на кровној конструкцији спортског стадиона у Сплиту, који је материјализован Меро системом.

Сви набројани параметри могу се добити употребом “*Generative Modeling*” методологија у виду модела и информација које се могу програмски скупити једном када се дизајнира дигитални прототип. Традиционални модели доласка до форме, позиције штапова и чворних елемената били су махом непрецизни или дуготрајни, што се одражавало на квалитет коначно изграђене конструкције. Све су ово разлози зашто су прве “*CAD*” технологије усвојене у самом зачећу, посебно када се говори о аморфним конструкцијама просторне решетке.



8.0 АНАЛИЗА ПРОСТОРНИХ РЕШЕТКИ НА СЛОБОДНИМ ФОРМАМА У САВРЕМЕНОЈ ПРАКСИ

8.1 “FERRARI WORLD” - КОНЦЕПТ И АНАЛИЗА ОБЛИКОВАЊА И КОНСТРУКЦИЈЕ



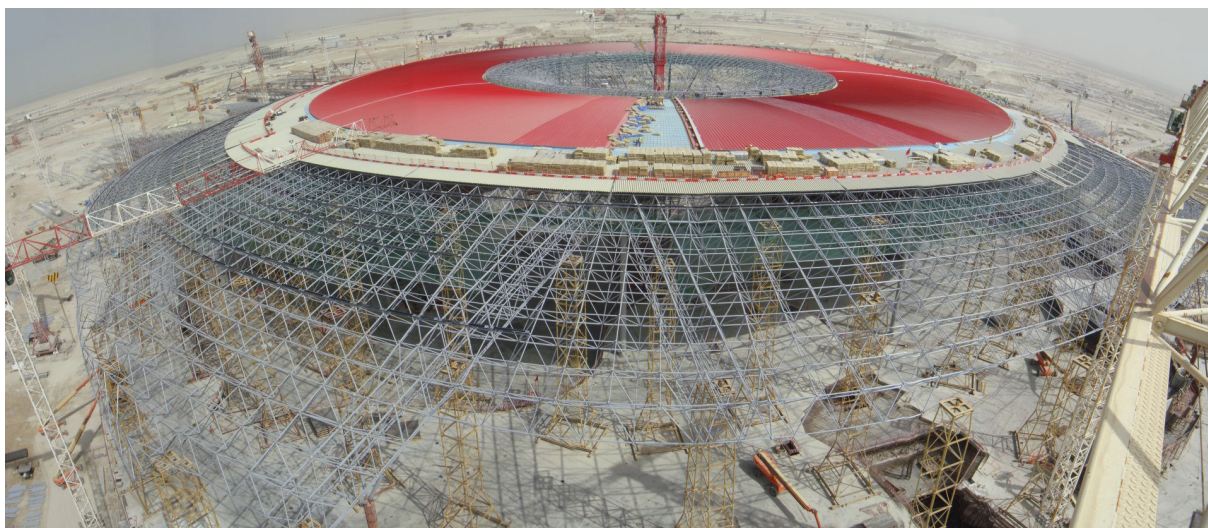
Слика 125 лијево. “Ferrari World“ у Абу Дабију. Трокрака форма крова. Цртеж власништво “Benou” студија.

Слика 126 десно. Процес изградње “Ferrari World“ тематског парка у Аби Дабију на острву Јас. На слици инад је приказана фаза изградње “штита“ изнад централне зоне. Фотографија власништво Метро ТСК компаније (Mero TSK).

“Ferrari World” је тематски парк у Абу Дабију, главном граду Уједињених Арапских Емирата. Пројекат је дјело архитектонског студија “Benou”. Дизајниран је у складу са елегантном линијом једног од најпознатијих свјетских брендова и моделом који је обиљежио неколико деценија историје спортких аутомобила. Налази се на “Yas” острву у Абу Дабију. Са 300000 m^2 , један је од највећих затворених тематских паркова на свијету^[34]. Изградња је почела 2009. године и трајала је пет година. Са разним садржајима од којих су само неки најбржи тобоган на свијету, достиже брзину од 200 km/h , тржни центри, изложбени салони, симулатори трке, школа аутомобилизма и вожње и многи други. Овде је обиљежена ера напретка, брзине и сведених линија спортског аутомобилизма.

Архитекти су инспирацију црпили из модела “Ferrari GT” шасије. Двоструко закривљена линија аутомобила пропорционално је пренесена на закривљену површину да би се добили омјери висине и ширине посматрано из људске перспективе (слика 124 и 125). Од врха “штита“ до завршетка трокраке форме растојање је нешто више од 700 m ^[34]. Заштита од екстремне температуре долази од огромног крова који садржи специјалне изолаторе и дефинише обликовање комплетног објекта. Фасада и зидови обложени су специјалним стаклима која смањују пролазак топлоте и одсјај директног сунца. На крову је постављен велики лого “Ferrari” компаније, с циљем да се види из авиона који слијећу на међународни аеродром у близини. Због екстремно топле климе, која је карактеристична за поднебље Абу Дабија, скоро сви садржаји су у ентеријеру који краси кров импозантних димензија и форме. Обликовање објекта се може посматрати кроз призму шест основних елемената^[34]:

- централна зона са атријумом,
- три крака,
- завршни дио трокраке форме који симулира облик носа болида формуле један,
- облога доње површине лучног облика,
- велики застакљени дио крова,
- главни улаз и излаз са визуром која гледа на огромне тобогане у ентеријеру.

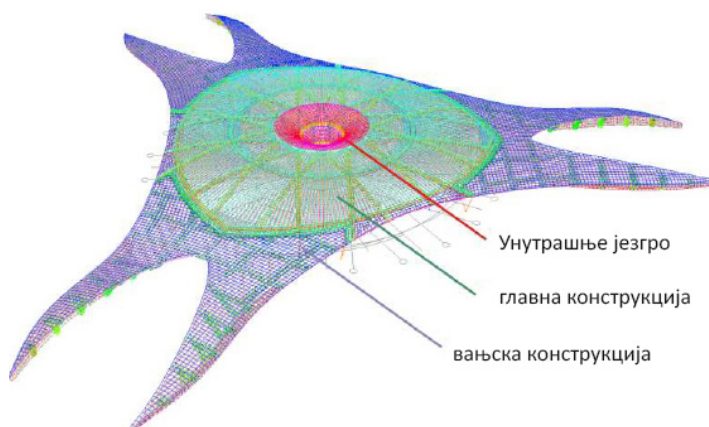


Слика 127. Конструкција трослојне и двослојне просторне решетке Меро система. Највећа конструкција ове врсте на свијету. Фотографија власништво Меро ТСК компаније (Mero TSK).

Облик зграде “Ferrari World” парка диктирало је неколико параметара од којих су топологија и позиција острва на коме се налази директно утицали на форму у основи. Са острва се виде пјешчане дине од црвенкастог пијеска које своју валовиту линију настављају са кровом и чине једну од веза кровне конструкције са контекстом у коме се налазе. Три крака у основи изгледају као клијешта која захватају вањске садржаје парка. Главни улаз орјентисан је ка великом тржном центру унутар, а у продужетку је павиљон добродошлице. Ентеријером доминира визуелно изузетно интересантна конструкција просторне решетке која је у функцији кровне огромних димензија. Главни утицај на обликовање оставила је детаљна анализа архитеката двоструко закривљеним линијама бројних класичних спортских аутомобила компаније.

Кровна површина нагло се завршава у централној зони гдје се оштро спушта и наставља стакленом материјализацијом. Висина зграде је 20 m у просјеку, а дужина је, по једној оси, максимално 1 km [34]. Садржаји се налазе на платоу и видљиви су са улазне партије. Трегиране су као унутрашњост хаубе брэнда који производи луксузне спортске аутомобиле.

Кровна површина формирана је од три крака који су позиционирани по осама на сваких 120° [34]. Комплетна конструкција налази се у радијусу од око 700 m од централног атријума [34]. Затвара три етаже од 175000 m^2 услужног простора [34]. Кров је површине преко 200000 m^2 [34]. Слободну ,двоструко закривљену, форму чини конструкција просторне решетке Меро КК система са покривачем. Употребом Меро система одговорено је на



Слика 128. Подјела аморфне кровне конструкције просторне решетке на три основне зоне. Цртеж власништво “Benou” студија.

проблем флексибилности у смислу материјализације аморфног обликовања. Састоји се од 172000 штапова и 43100 дискретних спојних елемената^[34]. Кровна конструкција *“Ferrari World”* тематског парка је највећа икада изграђена просторна решетка. Компанија Меро-ТСК је била задужена за дизајн, прорачуне и подизање конструкције. Коначна решетка је углавном двослојна просторна, а на одређеним сегментима трослојна. Конструкција је свеукупно пројектована да буде трослојна, тако да се обезбиједио простор за оптимизовање у двослојним зонама. На дужине штапова утицао је растер који је истих димензија на свим сегментима испод кровног покривача, а самим тим директно на економску компоненту при наручивању и фабрикацији великих количина. Са релативно малом површином попречног пресека, тродимензионална геометрија крова изгледа изузетно прозрочно и лагано.

Конструкцију централне атријумске зоне чини дванаест решеткастих стубова који обликују форму остакљеног лијевка у коме се завршава кров. Ови стубови су у основи квадратног облика, а на пола висине раздвајају се у два лучна носача, који подсећају на оштре углове готичких катедрала. Централна остакљена конструкција у облику лијевка и три крака су пројектовани на начин да дјелују статички независно. То значи да је парк подијељен, у суштини, на четири одвојена сегмента садржана под истим кровом. Конструктивни елементи Меро система прорачунати су и конструктивно обезбијеђено по *“DIN”* стандарду који прописује процедуре када су у питању тачкасто спојене конструкције, као што су вишеслојне просторне решетке. Зграда *“Ferrari World”* је доказ да просторне решетке могу да буду у служби дизајна, а у исто вријеме да конструктивно обезбједе огромне просторе. Објекат ове величине и садржаја је од великог значаја за Емирате, а постао је један од препознатљивих симбола Абу Дабија.

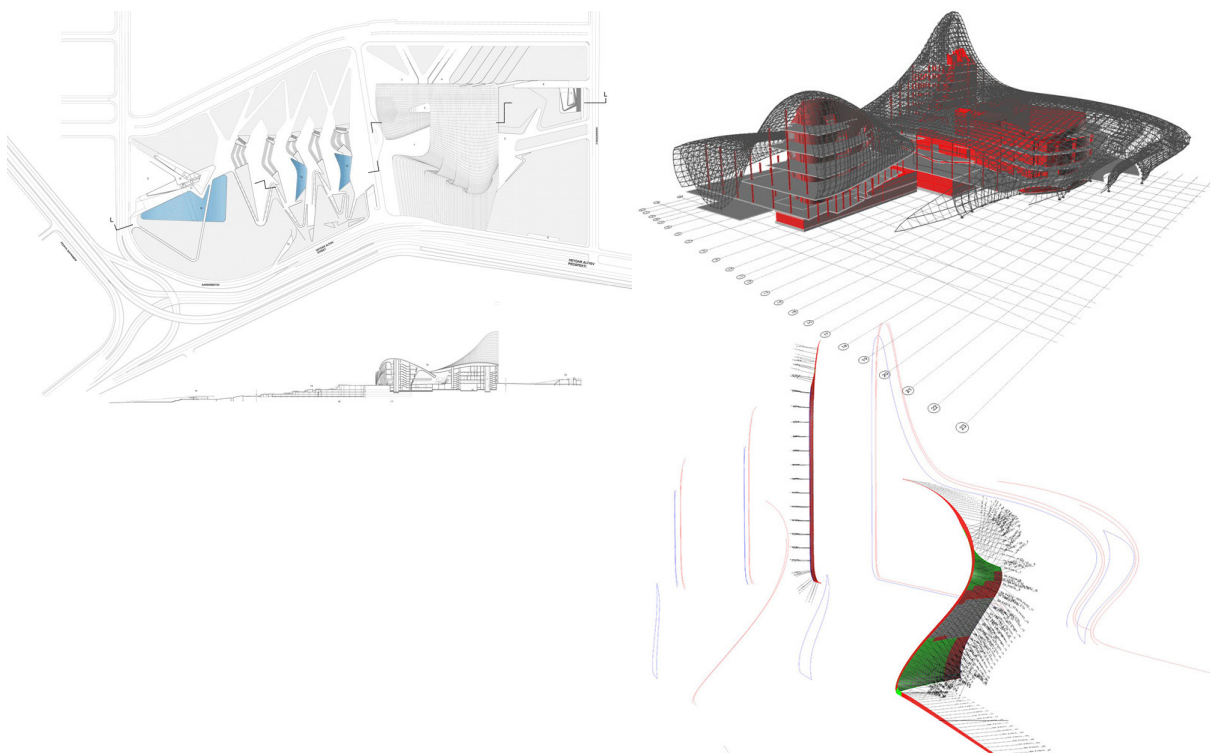
Поред ове конструкције слична значајна имплементација Меро ТСК система^[35] може се примјетити на импозантној кровној конструкцији аеродрома КАИА интернационалног аеродрома у Саудијској Арабији.



Слика 129 лијево. Дванаест стубова око централне зоне који формирају облик лијевка. У основи квадратни стубови на пола висине равају се у оштре лучне решеткасте конструктивне елементе. Фотографија власништво Меро ТСК компаније (*Mero TSK*).

Слика 130 десно. Меро систем је познат по флексибилности и могућности прилагођавања двоструко закривљеним формама. *“Ferrari World”* је један од примјера помјерања граница када је у питању употреба конструктивног система просторне решетке на неправилним облицима. Фотографија власништво Меро ТСК компаније (*Mero TSK*).

8.2 “HEYDAR ALYEV” КУЛТУРНИ ЦЕНТАР – КОНЦЕПТ И АНАЛИЗА ОБЛИКОВАЊА И КОНСТРУКЦИЈЕ

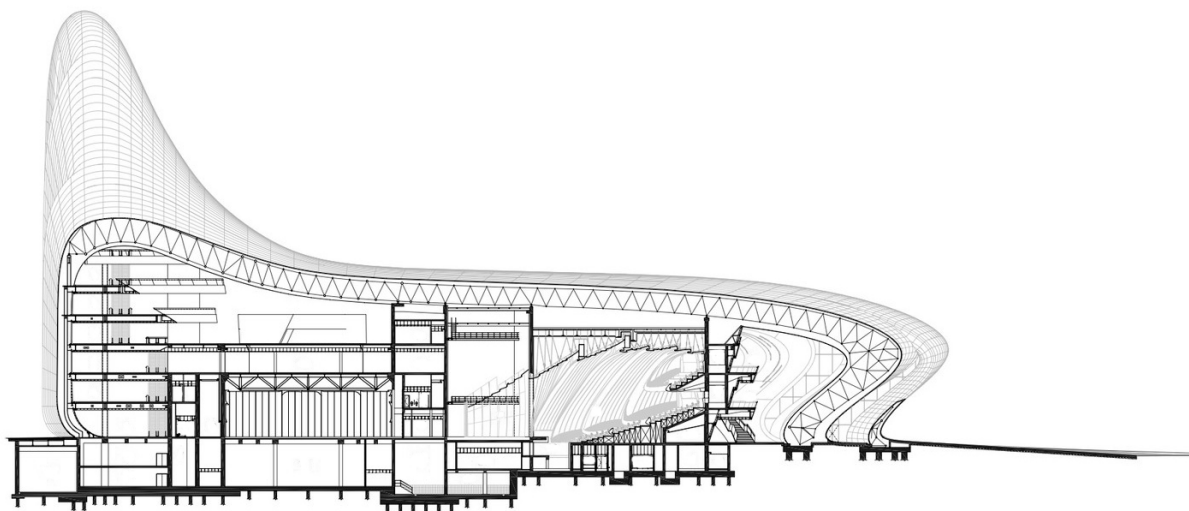


Слика 131 лијево. “Heydar Alyev” културни центар у Бакуу, Азербејџан. Партер и пресјек кроз објекат гдје се може видјети интеграција омотача и терена. Цртеж власништво Заха Хадид Архитекти (*Zaha Hadid Architects*) студија.

Слика 132 десно. Дигитални прототип кориштен за вријеме пројектовања. Синхронизованост свих фаза комплексног пројекта као што је “Heydar Alyev” је од немјерљивог значаја. Технике процедуралног моделовања употребљене су да би се развио модел двослојне просторне решетке на слободној форми. На основу овог модела промјене, у процесу пројектовања, вршене су у реалном времену. Цртежи власништво Заха Хадид Архитекти (*Zaha Hadid Architects*) студија.

“Heydar Alyev” културни центар из грађен је на обали Каспијског мора у Баку, Азербејџан. Подигнут је у сјећање на преминулог оца, дугогодишњег председника Азербејџана, од стране садашњег председника. Један је од најпознатијих пројеката архитектонског бироа Захе Хадид (*Zaha Hadid*), који носи препознатљив печат стила и форме познатог студија. Футуристички дизајн помјерио је границе могућег у односу архитектонског обликовања и конструкције. Асиметрични комплексни облик омотача материјализован је употребом Метро КК лоптастог чворног система.

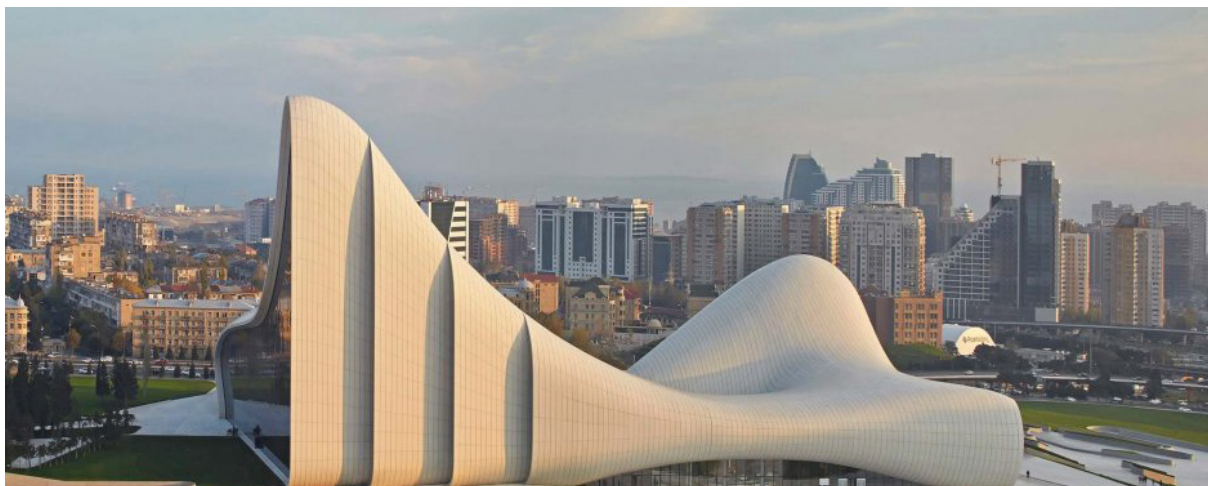
Форма се истиче у окружењу којим доминира заоставштина совјетске сведене стамбене изградње. Пројектован је на концептима валовитости, набора, рачвања закривљених површи и модулација. Резултат је изузетно маркантно обликовање које израђа из урбаног пејзажа и интегрише се у плато на коме се налази. Материјализацијом завршних слојева може се видјети да велики плато и објекат комуницирају и надопуњују један другог. Течне линије дјелују као да опонашају скице архитеката на слици главног града, правце, визуре и терен. Пркосе, али не негирају историјско архитектонско наслеђе. Азербејџан је муслиманска земља са снажном исламском традицијом у архитектури. Заха Хадид архитекти су одали поштовање традицији и провукли су ову тему кроз футуристичко обликовање, које се одликује динамичношћу и покретом, смирене и складне детаље карактеристичне за традиционалну архитектуру контекста града Баку. Оштар нагиб терена, који је раније, дијелио локацију на два дијела искориштен је за изградњу



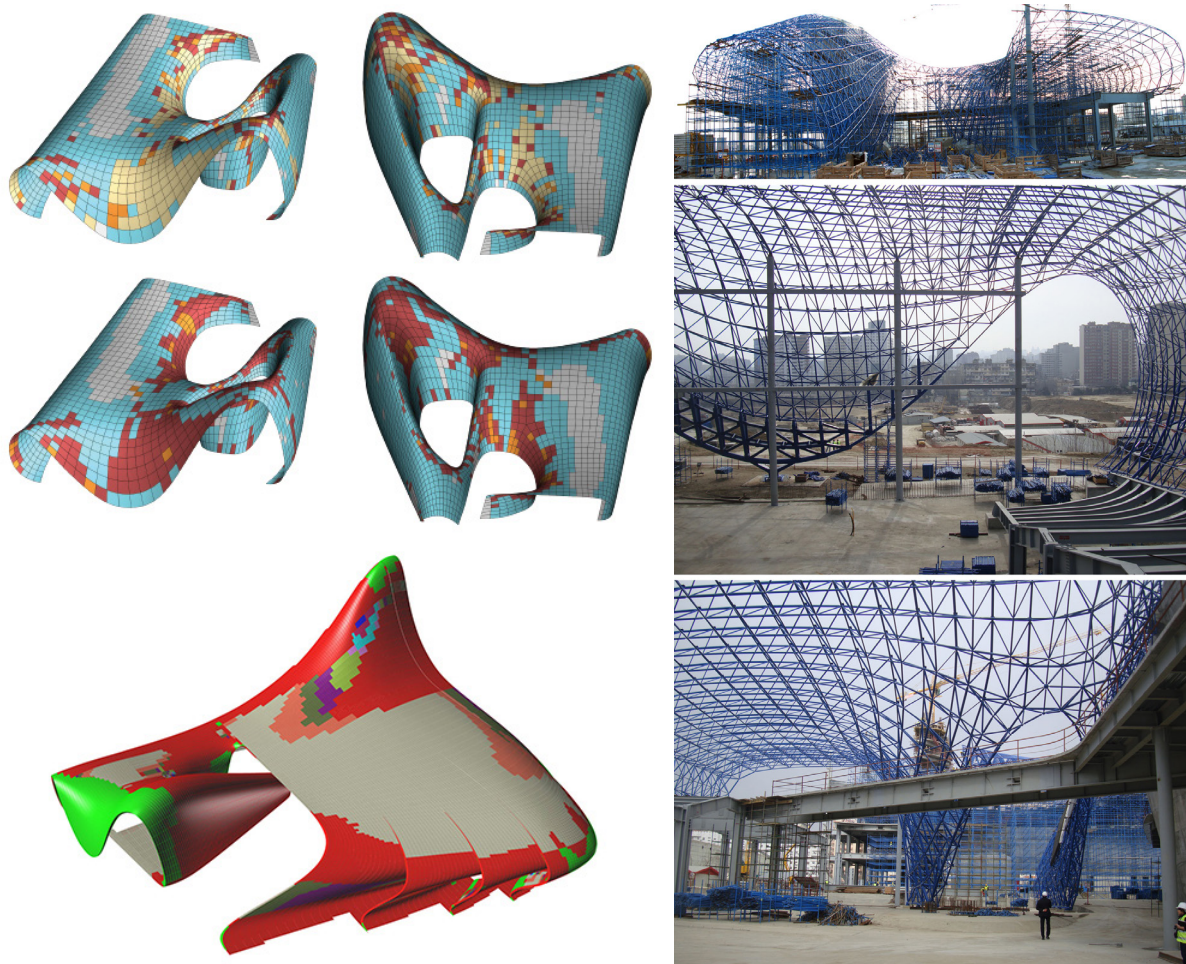
Слика 133. На слици се види двослојна просторна решетка која се ослања на неправилни скелетни растер. У погледу се виде панели на омотачу. Цртеж власништво Заха Хадид Архитекти (*Zaha Hadid Architects*) студија.

подземне гараже која ја обликовањем одвојена од јавног дијела партера и саме зграде културног центра. Искориштени су негативни аспекти топологије локације и претворени у главне одлике коначног објекта. Један од кључних проблема пројектовања и саме изградње је била материјализација и оптимизација омотача зграде. Изузетно комплексна форма која је у функцији зидова и кровног покривача изграђена је употребом Метро КК система. Идеја о хомогеном обликовању у коме је кључ визуелна интеграција партера и омотача зграде представљала је проблем који је захтијевао велику количину инжењерске иновативности и употребу савремених метода рачунарске оптимизације конструкције и елемената покривача. У суштини објект се састоји из двије основне конструкције, армирано бетонске и челичне скелетне зграде унутар просторне решетке на двоструко тродимензионално закривљеном облику.

Да би се обезбиједио што већи слободан простор у ентеријеру из кога се може сагледати закривљени унутрашњи простор употребљени су велики закривљени стубови на ивицама скелетне конструкције. На овај начин ослобођен је класичног растера стубова и отворене су визуре према унутрашњости. Зграда је великих димензија са 100000 m^2 корисне површине^[19]. У раној фази пројектовања одлучено је да ће се ослањати у што је могуће већој мјери на савремена рачунарска рјешења за потребе статичких прорачуна, дефинисање и оптимизацију система, фабрикацију, те само сагледавање запреминских



Слика 134. Културни центар се налази у контексту који је испуњен архитектонском заоставштином из совјетске ере. Фотографија власништво Заха Хадид Архитекти (*Zaha Hadid Architects*) студија.



Слика 135 лијево. Због неправилног облика омотача развијен је систем оптимизације геометријских карактеристика панела. Систем је свео материјализацију на нешто мало преко 2000 различитих елемената који су се фабриковали^[19]. Сачувана је правилна растерска линија спојева на којој се инсистирало од самог почетка израде пројекта. Оптимизација је играла велику улогу и значајно је утицала на економску компоненту изградње. На слици се може видјети графички представљени резултати разних анализа. Цртежи власништво Заха Хадид Архитекти (Zaha Hadid Architects) студија.

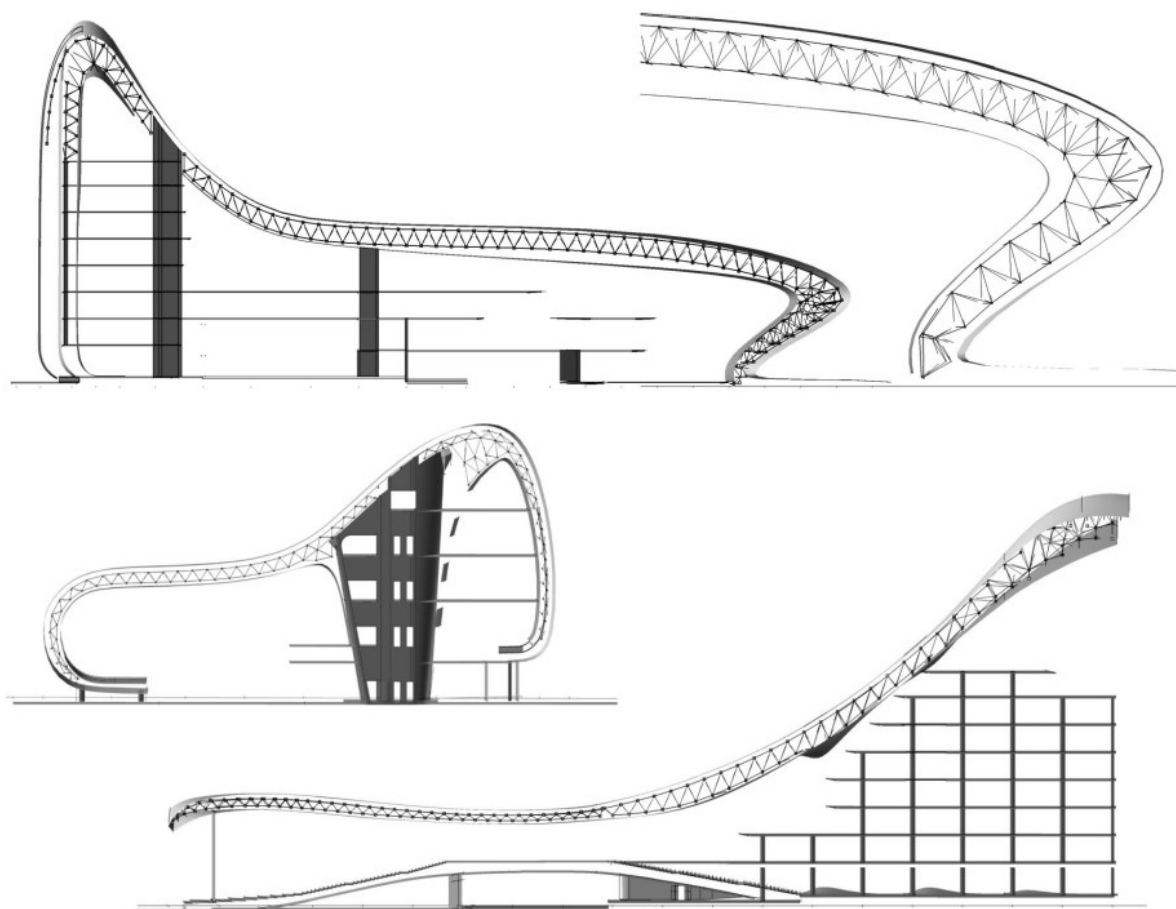
Слика 136 десно. На сликама изнад може се видјети аморфна двослојна просторна решетка Метро КК система која је дала слободу архитектама да дефинишу обликовање омотача. Фотографије власништво Заха Хадид Архитекти (Zaha Hadid Architects) студија.

квалитета дизајна. У процесу пројектовања родила су се нова рјешења за оптимизацију закривљених фасадних панела те тестирање у реалном времену њихових геометријских карактеристика (слика 135). Конструкција се све вријеме виртуелно анализирала на сеизмичке активности турског подручја локације и снажне ударе вјетра који су карактеристични за Баку.

Да би се обезбиједила флексибилност обликовања омотача просторна решетка се наметнула као логичан избор конструкције, која је развијена у складу са ослањањем на чврсту и непомићну растерску структуру испод. Спољашњи утисак на посматрача оставља правилан растер спојева елемената покривача решеткасте конструкције и доприноси свеукупном естетском квалитету.

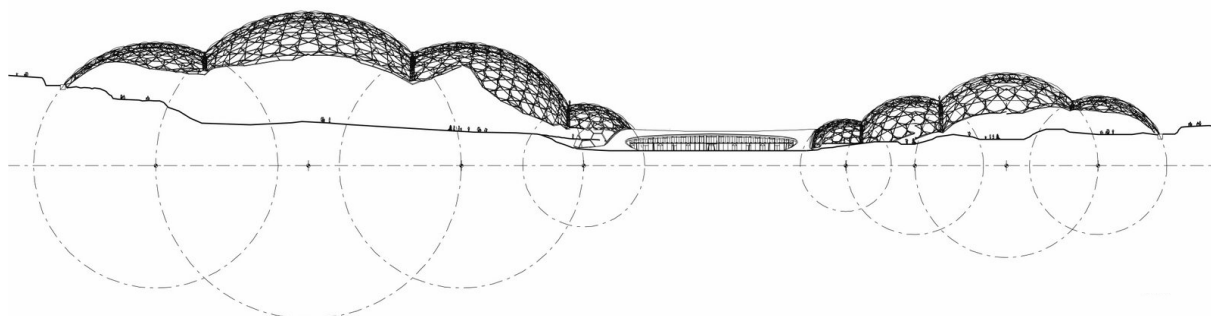
Панели покривача материјализовани су употребом бетона ојачаног стакленим влакнима и полистиренима, који су такође ојачани стакленим влакнима. Битан аспект употребе ових материјала је и велика загађеност ваздуха која долази од рафинерија нафте у окружењу. Постојала је потреба за избором материјала који се лако одржава. Ако је архитектонска композиција музика онда је површина ритам који је дефинише. Ово је идеја водиља архитеката на пројекту “Heydar Alyev” културног центра. Пројекат је настао као

результат исцрпног истраживања топографских карактеристика терена локације и улоге будућег центра на културни пејзаж и могућности азербејџанске нације у цјелини.



Слика 137. Пресјечи кроз конструкцију просторне решетке. Карактерише је слободна форма и промјенљива конструктивна висина. Цртежи власништво Заха Хадид Архитекти (*Zaha Hadid Architects*) студија.

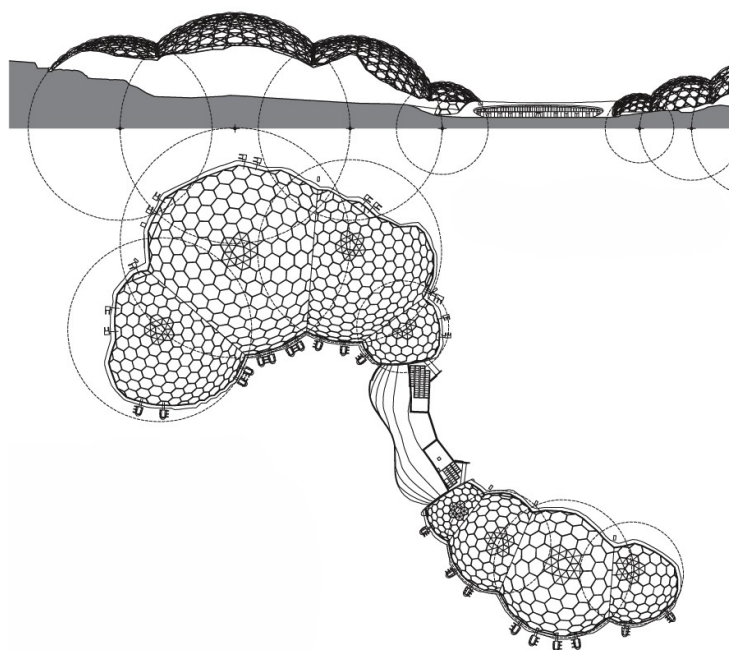
8.3 ЕДЕН ПРОЈЕКАТ - КОНЦЕПТ И АНАЛИЗА ОБЛИКОВАЊА И КОНСТРУКЦИЈЕ



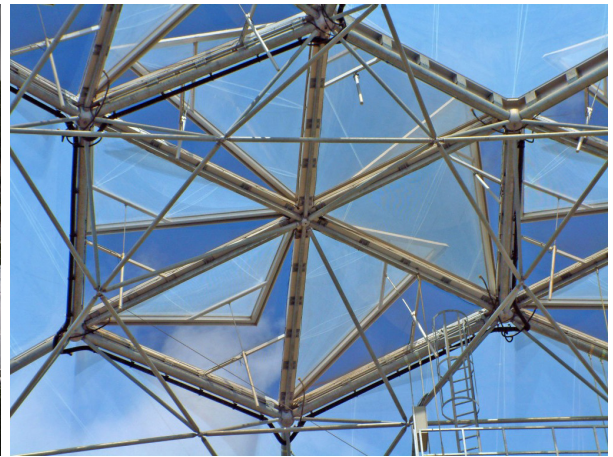
Слика 138. Пресјек кроз куполасту форму Еден пројекта у области Корнвал у Енглеској. Цртеж власништво Гимшоу Архитекти (*Grimshaw Architects*) студија.

Просторне решеткасте конструкције употребљавају се на објектима разних намјена. Еден пројекат је затворена зелена башта отворена за јавност од 2001. године у области Корнвал у Енглеској. Налази се на локацији од 15 *ha* и чине га два затворена врта са вјештачки симулираним климатским условима^[27]. Састоји се од двије велике сфере материјализоване употребом Метро система просторне решетке. Штапови су спојени шарафима од челика високих конструктивних перформанси, на начин да спој штапова чини замјену за дискретни чворни елемент. Поред основних обликовних и естетских захтијева трагало се и за конструкцијом која се може брзо монтирати и која нуди јако мале толеранције по питању ексцентрицитета сутицања аксијалних сила у штаповима.

Комплекс се састоји од неколико дијелова. Поред екстеријера и помоћних објеката главни дио чине четири зграде чија је форма дериват исијецања геодетске лопте са триангулацијом површи. Улазни дио и центар за посјетиоце налазе се изнад велике јаме комплекса. Чине их неколико продавница са сувенирима, ресторан и милтифункционални простори који углавном служе за потребе изложби експоната. Главни комплекс са вртovima чине три дијела. Први је зона са влажном тропском климом гдје су пренесени читави екосистеми из западне Африке, Малезије и југоисточне Азије. Чине га четири куполасте



Слика 139. Основа комплекса коју чине три зоне са различитим климатским условима. Цртеж власништво Гимшоу Архитекти (*Grimshaw Architects*) студија.



Слика 140 лијево. Поглед на објекте Еден пројекта из улазне зграде. Топологија терена је савладана са флексибилним решеткастим конструктивним системом. Фотографија власништво Гимшоу Архитекти (*Grimshaw Architects*) студија.

Слика 141 десно. Конструкција двослојне просторне решетке са покривачем од ЕФТЕ фолије јастучастог облика. Препознатљива шестоугаона растерска формација. Фотографија власништво Гимшоу Архитекти (*Grimshaw Architects*) студија.

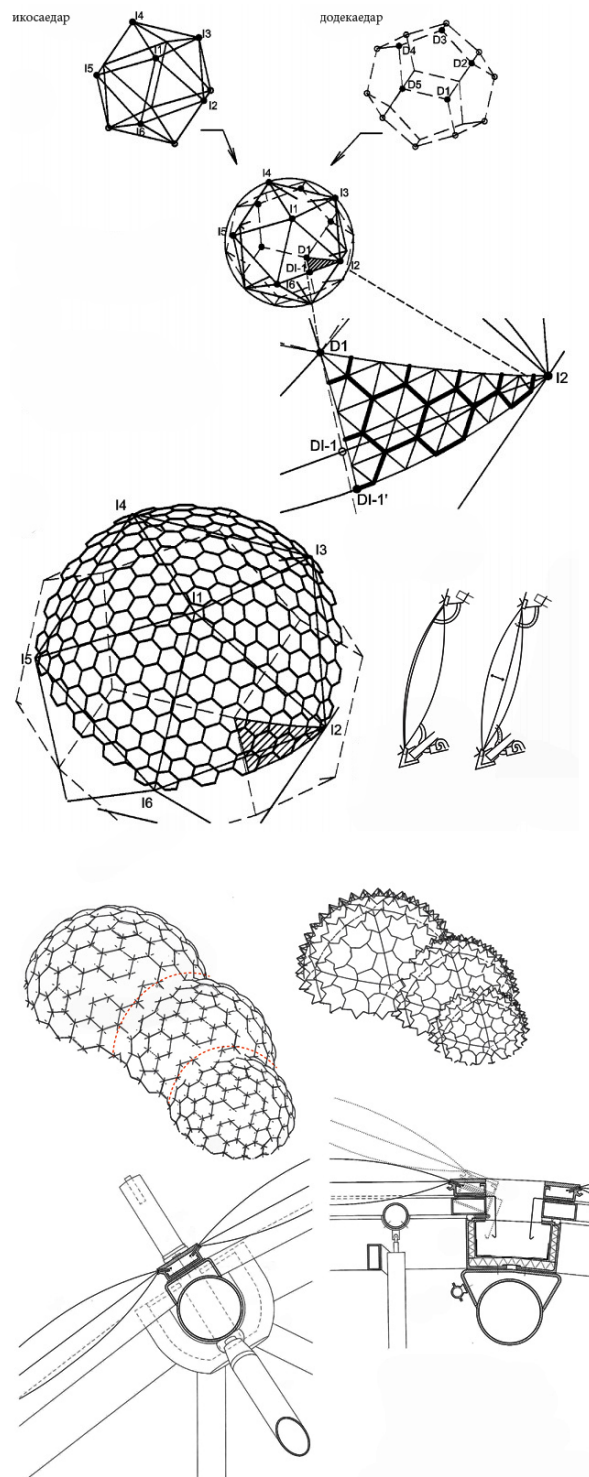
конструкције. Највећа је пречника од скоро 125 m и слободне унутрашње висине од 55 m , тако да и велика стабла из афричких џунгли имају довољно простора да расту^[27]. Остале куполе удомљавају биљни свијет из топлих климатских услова са унутрашњом дужином од 150 m и корисном слободном висином од 35 m ^[27]. Чине их углавном екосистеми из јужне Африке, Калифорније и Средоземног мора. Са остатком комплекса спојени су зградама са потпуно зеленим крововима, тако да су скоро невидљиве са улазне зоне и потпуно су интегрисане у терен. Попуњене су функцијама који варирају од санитарних простора, ресторана до зона за одмор посјетилаца. Вањска централна зона је површине близу 150000 m^2 и дефинисана је као простор за разне врсте биљног свијета континенталне климе које немају посебну заштиту и контролисане климатске услове^[27].

Прве скице за пројекат Еден комплекса дао је архитекта Николас Гримшоу са инжењерским бироом Антони Ханта (*Antoni Hunt*). Орогинална идеја је била јако блиска концепту Ватерло жељезничке станице (*Waterloo Railway Station*) у Лондону. Сачињена од челичних лукова и греда са стакленим кровним покривачем, конструкција је обезбјеђивала све потребне услове за своју намјену зеленог врта³⁰. Проблем је представљао изузетно денивелисани терен који је захтијевао лагану и флексибилну конструкцију, а и цијена коштања је била превисока. Ова два параметра били су кључни за одустајање од првобитне идеје. У наредној итерацији дизајна пројектанти су осмислили куполасте форме које су пројектовали као једнослојне решеткасте конструкције засноване на шестоугаоном растеру. Овај концепт³¹ је донио неколико предности као што је лакше уклапање у топологију терена. Шестоугаони распоред носача обезбиједио је више свјетла у унутрашњости што је један од основних услова за опстанак екосистема који удомљавају. Асоцирали су на природне структуре јер су се могле пронаћи на разним биљним врстама, тако да је успостављена веза форме, функције и садржаја на елегантан начин са високим естетским квалитетима. Следећи одговор који је морао дати нови концепт је економска компонента изградње и одржавања огромних објеката. Компанија Метро која посједује лиценца права на прослављени Метро систем са под типовима прикључила се пројекту накнадно. Овим системом су пројектоване и изграђене многе комплексне конструкције

30 Детаљан опис пројекта од концептуалне фазе до разраде конструкције дао је Алан Џонс (*Alan Jones*) у научном раду *Civil and Structure Design of the Eden Project (Alan Jones), International Symposium on Widespan Enclosures at the University of Bath, 2000*.

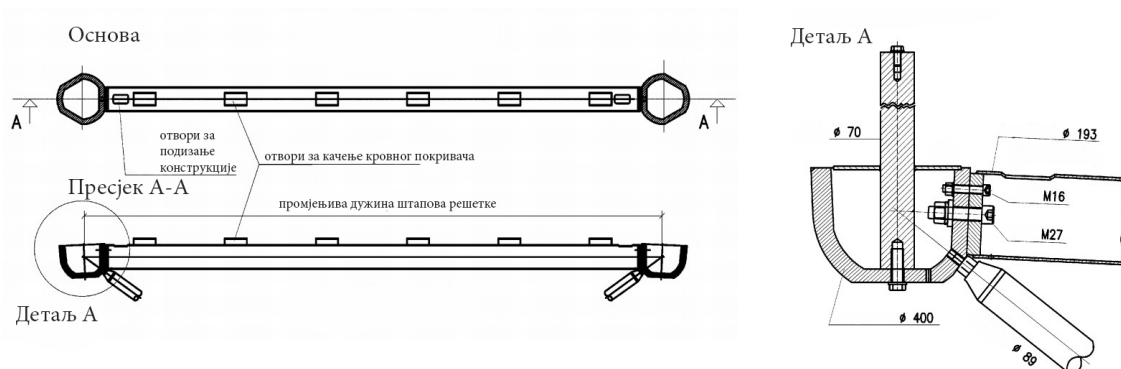
31 Концепт са детаљима је резултат истраживања објављеног у научном раду *Architecture in Detail (Graham Bizley), Architectural Press, Oxford, 2008*.

како у смислу димензија и посебних намјена тако и у контексту различитих слободних обликовања. После првобитних анализа утврђено је да се једнослојна расторна решетка не може економично изградити, али да задовољава све конструктивне карактеристике које су захтијеване од стране тима архитеката који су пројектовали другу варијанту пројекта. Резултат сарадње архитеката и Метро тима инжењера била је двослојна просторна решетка са вањским слојем који карактерише препознатљива шестоугаона формација штапова.



Развијен је и посебан систем за кровни покривач у виду облога од ЕФТЕ фолија испуњених гасовима, тако да се сопствено оптерећење на конструкцију смањило више десетина пута^[6]. Избором оваквог рјешења за покривач, који је у многоме био оригиналан, остављен је простор за додатну оптимизацију тежине челичних елемената просторне конструкције. Фолија је обезбиједила далеко већи продор у свјетла у куполе, али и добру топлотну изолацију јер је унутрашња клима вјештачки контролисана. Куполасти облик је потпуно отворио простор, потпуно слободна запремина без додатних носача. Геометријски посматрано дизајн се ослања на од давнина познате карактеристике куполастих облика. Геодетска лопта је сфера чија је површина подијељена на једнаке троуглове, а из овог растера добијен је низ правилних шестоугаоних поља на којима се инсистирало од самог почетка разраде концепта. Геодетску лопту је популаризовао Бакминстер Фулер (*Richard Buckminster Fuller*) на својим раним истраживањима просторних конструкција. За потребе ове решетке кориштена је лажна геодетска лопта јер штапови не путују по закривљеној површи лопте него су равни и уситњавањем поља ствара се илузија лоптастог облика. Сличне системе подјеле сфере за дефинисање позиција осовина конструктивних елемената истраживали су Емде у Њемачкој, Павлов у Русији, Фулер у САД (*Emde, Pavlov, Fuller*) и многи други. На слици 142 може се видјети процес долажења од геодетске лопте до троугаоних поља конструкције Еден врта. Геометрија деконструкције геодетске лопте је додатно утицала на

Слика 142. Основни елементи конструкције купола Еден пројекта. На горњим сликама види се процес доласка до осовинских позиција штапова решеткасте Метро конструкције. Сlike испод показују концепт јастучастих ЕФТЕ фолијских јастука са детаљима спајања са основном конструкцијом. Илустрација власништво Гримшоу Архитекти (*Grimshaw Architects*) студија.



Слика 143. Типични штап и чворни елемент побољшаног Метро система употребљеног на куполастој форми Еден вртова^[27]. Цртеж власништво Гимшоу Архитекти (*Grimshaw Architects*) студија.

естетске карактеристике. Шестоугаони растер добијен геометријским трансформацијама троугаоних поља није планаран. Свако поље је благо закривљено у односу на површ идеалне лопте из које је настало, међутим развијени су математички и геометријски модели који су под одређеним дефинисаним толеранцијама претварали шестоуглове на лопти у планарна поља. Тиме је конструкција обезбијеђена од колизија носача у простору и олакшана је фабрикација елемената, јер је много лакше и јефтиније производити равне него закривљене конструктивне елементе.

Поља су сведена са толеранцијом од 60 mm одступања тачака од планарне позиције поља, што је био изузетан успјех инжењера који су још једном директно позитивно утицали на економску компоненту израде^[27]. Нису сва шестоугаона поља идентичних димензија. Ивица највећег је дужине 5 m ^[27]. Толеранција одступања је постављена јер је утврђено да уколико би се наставила поравнавати поља изгубило би се на правилности мреже, која је мјерена у односу између максималне и минималне дужине растера, те би се угрозио тражени система центрирања и преношења сила у штаповима на сусједне. Локација је укопана у терен изнад кога је висораван па самим тим је утврђено да вјетар на конструкцију дјелује сишућом силом. За просторне решетке на куполастим формама утицај топлоте се уобичајено не узима у обзир јер штапови врше контракцију и експанзију у радијалним правцима. Из тог разлога нису остављене дилатације за промјене запреминских карактеристика конструктивних елемената.

Основни параметри конструкције су крути елементи спајања штапова од пречника 190 mm , објешено качење три дијагонална штапа који повезују слојеве решетке, брзо и ефикасно подизање конструкције, минималне толеранције, без додатног заваривања са страна и архитектонски естетски угођај^[27]. Из ових параметара и исцрпног истраживања изродио се Метро лоптасти чворни елемент са крутом везом (слика 143). Спој је усавршена верзија ранијег Метро система са лоптастим и кубичним шупљим спојним елементом штапова^[27]. Димензије су им промјенљиве и око 400 mm су у пречнику са дебљином зида од 40 mm и пројектовано је 1100 сличних^[6]. Сваки је тежак око 80 kg ^[6]. Штапови су шупљи цјевасти челични профили пречника $193,7\text{ mm}$. Разликују се у дебљинама зидова које долазе од детаљне оптимизације тежине конструкције која је спроведена у фази пројектовања. За спајање су кориштени челични преднапрегнути шарафи високих конструктивних перформанси. Лучни елементи конструкције су троугаоне просторне решетке и један елемент премотава распоне до 100 m без додатних ослонаца у пољу^[6]. У пресјеку су челични штапови пречника 220 mm и 160 mm ^[27]. Спојени су у тродимензионалну формацију методом заваривања, дио на терену, а дио се спајао у процесу фабрикације. Оптерећење преносе на темеље који су од великих пуних бетонских блокова. Посебну улогу игра и систем вентилације којим се на једноставан начин може контролисати унутрашња клима. На врху сваке од осам купола постављени су вентилациони отвори. Пет шестоугаоних отвора који су окружени са по три троугла на којима је по тридесет додатних отвора

даљински су конструлисани из централне контролне собе за цијели комплекс. Процес производње конструктивних елемената извршен је у Метро постројењима која се налазе у Њемачкој. Производња и прецизно бушење извршено је у аутоматизованом рачунарски контролисаном окружењу. Дио варења крајњих спојних челичних плоча вршен је ручно. Заштита премазима и легурисање урађени су у фабрици, а само мали дио на локацији Еден пројекта.

Покривач конструкције је ЕФТЕ или етилтетрафлуоретиленска фолија. Одабрана је због неколико карактеристика од којих су најзначајније лакоћа, пропуштање свјетла, могућност обликовања. Постављена је у виду јастука од који се сваки састоји од три слоја. Доњи слој је задужен да конструктивно подржи наредна два која су ту да обезбиједи изолационе карактеристике кровног покривача. ЕФТЕ се употребљава преко 30 година у савременом градитељству и доказан је у разним климатским условима и облицима које је дефинисао. Укупна површина купола је око $40\,000\text{ m}^2$, а слободни простор унутрашњости је скор $16\,000\text{ m}^2$ [27]. Покривач је подјељен на шестоугаоне сегменте како би се добили правилни сегменти за елементе конструкције, али и поља за покривач од ЕТФЕ материјала [10].

За потребе одизања конструкције прво су изграђене темељне траке од бетона у дужини од више од 860 m [6]. Широке су 2 m и ослоњене су на шипове дубине до 12 m [6]. Да би се подигла конструкција кориштене су привремене скеле. Већина је монтирана на тлу па су накнадно подизане крановима на позиције са којих је вршена монтажа двослојне просторне решетке. Префабриковани дијелови лукова су били и до 13 m дужине [6]. Након завршетка конструкције скеле су уклоњене, а затим су постављене ЕФТЕ фолијасте јастуци. Паралелно са материјализацијом покривача вршени су унутрашњи радови на постављању садржаја са екосистемом. У септембру 2000. године званично су завршени радови на конструкцији, покривачу и вентилационим системима.

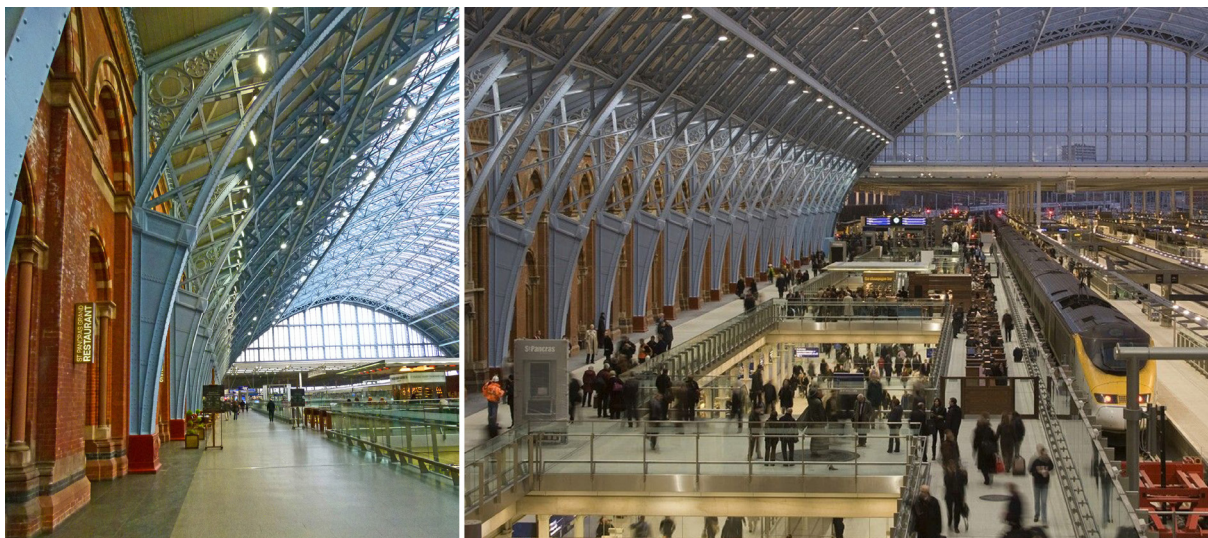


Слика 144. Процес монтаже и подизања кровног покривача. Постављен је након завршеног подизања просторне решетке. Фотографија власништво Гимшоу Архитекти (*Grimshaw Architects*) студија.

The background of the page is a faint, light-colored architectural drawing of a railway station. It shows a large, arched roof structure supported by a complex network of beams and trusses. Below the roof, there are rectangular outlines representing platform canopies and station buildings. The entire drawing is overlaid with a dense, diagonal red hatched pattern that covers the entire page.

9.0 ОБЛИКОВАЊЕ САВРЕМЕНИХ ЖЕЉЕЗНИЧКИХ СТАНИЦА

9.1 ЖЕЉЕЗНИЧКЕ СТАНИЦЕ СА АСПЕКТА ОБЛИКОВАЊА И ИЗБОРА КОНСТРУКЦИЈЕ



Слика 145. Изузетан примјер конструктивне естетике челичне конструкције и поглед на пероне у ентеријеру станице Светог Панкраса. Фотографије дјело Герија Џ. Вуда (Gary J. Wood).

Посматрањем жељезничких станица кроз призму историјског контекста може се примијетити да је обликовање и употреба разних врста конструкција значајно еволуирала. Архитектонски објекти ове намјене су релативно нови у историји архитектуре. На почетку индустријске револуције, када се појављују прве станице, нико није знао како треба да изгледају па су пројектантима биле одријешене руке да експериментишу са формом, функцијом и различитим конструктивним системима³². У Француској и Шпанији у почетку нису имале ни име па су називане пристаништима као алузија на пристаништа за бродове. Скромне по димензијама и функционалном садржају обично су садржавале билетарницу, малу чекаоницу и канцеларију. Сервисне функције за одржавање локомотива и вагона појавиле су се касније. Са урбанистичког аспекта систематски су дислоциране ван градских центара. На почетку жељезнички саобраћај је посматран као футуристичко достигнуће савременог човјека, али није третиран као чист вид транспорта.

Развој и прихватање жељезнице је имао велики утицај на социјални аспект живота. Све више су се користиле за транспорт људи и робе. Индустријска револуција је директно зависила од брзине и количине транспорта. Са све већом индустријализацијом жељезничке станице су расле и третиране су као огледало града, главна капија и први утисак. Жељезничке компаније су постајале све важније и јавила се потреба за још више улагања. Улагачи су привлачени великим грандиозним станицама које су представљале стабилност и биле су слика развоја ове врсте индустрије. Циркулација људи довела је до великих промјена на урбанистичким плановима градова. Читава предграђа су рушена да би се градиле станице и провлачиле пруге. Жељезнице су обрзале индустријску револуцију. У другој половини XIX вијека јављају се прве репрезентативне станице и имена архитеката који су помјерали границе и дали прве истраживачке радове. Познато је дјело архитекте Вилијама Барлова (*William Barlow*) станица Светог Панкраса (*St Pancras station*) које је грађено од 1865. до 1868. (слика 145). Први велики лондонски терминал пројектовао је Едвард Вилсон (*Edward Wilson*) у Ливерпулу у Лондону. Грађена је од 1871. до 1875. године (слика 146). На обе се може примијетити значајан раскид са традицијом и еклектичким стилем који је доминирао у том периоду. Челик се употребљава све више па се може примијетити да су стубови витки и високи челични конструктивни елементи,

32 Појава жељезничких станица и њихов утицај на савремену архитектуру обрађени су у научном раду *Railway Stations - The Borderline Between Architecture and Structure* (Ewa, Maria Kido), Architectural Press, Tokyo, 2015.



Слика 146 лијево. Кровна конструкција жељезничке станице у Ливерпулу. Фотографија дјело Дејвида Илифа (David Iliff).

Слика 147 десно. Станица Ватерло у Лондону је једна од најпрометнијих на свијету. Фотографија власништво Бјорна Кристијана Торисена (Bjørn Christian Tørrissen).

а сводови су прве примитивне решеткасте конструкције. Захтјевале су велике високе кровне површине. Да би се одговорило на овај инжењерски изазов кориштене су прве примитивне решеткасте конструкције. Њиховом употребом повећани су распони између конструктивних растера и олакшана је кровна конструкција. Тадашње локомотиве су испуштале пуно дима па је то био још један од разлога што су кровови били високо позиционирани.

Прва дилема била је да ли возови треба да улазе у станицу или да се заустављају поред исте. У великим градовима као што су Лондон и Париз возови су улазили у станицу. Репрезентативан примјер је Ватерло (*Waterloo*) станица у Лондону коју је пројектовао Џејмс Роб Скот (*James Robb Scott*) 1922. године (слика 147). Ови објекти су доживјели праву „ренесансу“ деведесетих година прошлог вијека. Убрзан развој технологија, прихватање и проналазак нових материјала и конструктивних система омогућили су еволуцију у односу конструкције и естетике. Нови материјали олакшавају пројектовање комплексних форми и интеракцију конструктивних елемената као што су мембрански покривачи и просторне решетке од челика високих конструктивних перформанси. Уочене су три карактеристике које дефинишу конструктивну естетику: ефикасност, економичност и елеганција обликовања. Естетика жељезничких станица може се дефинисати као баланс између обликовања ентеријера и екстеријера, те између архитектуре објекта и односа са видљивом конструкцијом и транспортном функцијом. Естетски фактори се могу разложити на следеће³³:

- Димензије станице и ентеријера ставарају емотивну реакцију и импресију визуелном тежином или лакоћом^[14]. На примјеру станице Светог Панкраса у Лондону може се примјетити да нису пројектоване само да приме путнике него и да импресионирају величином и оставе утисак на кориснике. Овакви објекти, слично као готичке катедрале, имају многа значења поред чистог функционалног као што су политички, социјални и урбани аспект.

- Пропорција је везана за облик^[14]. Сведене форме могу да оставе сублимирани утисак хуманости архитектуре на посјетиоца. Употребом видљивих конструктивних елемената може се пројектовати визуелни ритам. Уобичајено пропорције се добијају из оригиналног облика из кога је концепт поникао. Ово је једноставно правило природне пропорције.

- Визуелна тежина површина и запремина је битна спона која утиче на јединство,

33 Уочене везе између разних архитектонских техника пројектовања простора и прометне функције жељезничких станица детаљно су истражене у научном раду *Historical and Modern Structures at the Railway Stations* (Ewa, Maria Kido), Architectural Press, Tokyo, 2012.



Слика 148 лијево. Поглед на импозантну конструкцију и кровни покривач станице Кинг Крос у Лондону. Фотографија власништво Џон Стурок (*John Sturrock*).

Слика 149 десно. Терминал Кинг Крос станице у Лондону. Фотографија власништво Џон Стурок (*John Sturrock*).

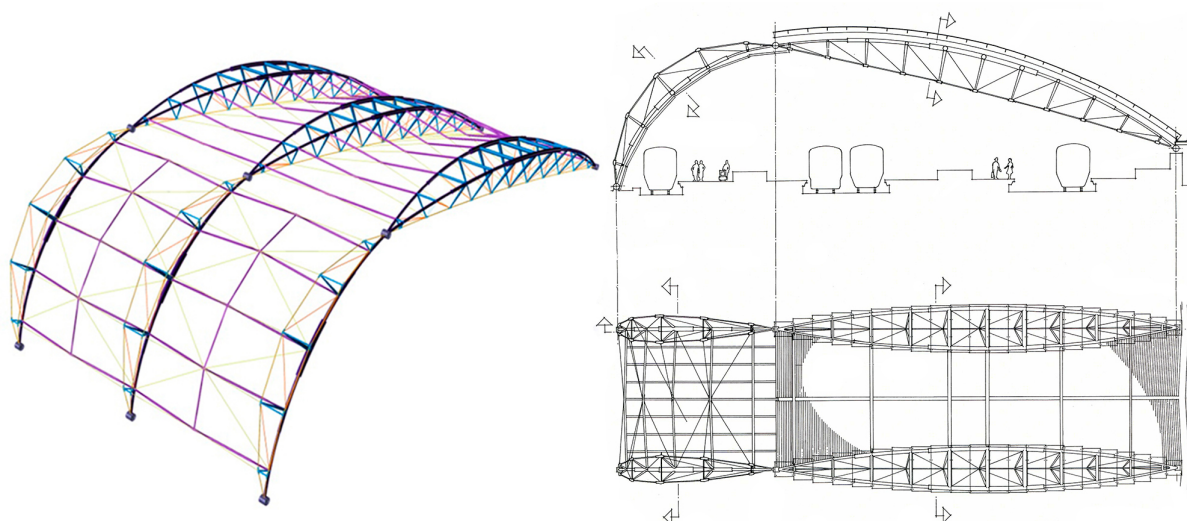
баланс и композицију форме архитектонског објекта или објеката^[14]. Надопуњују ју свјетло, боја и текстура одабраних материјала. Савремене станице на којима су употребљене просторне решетке и мембрански покривачи изгледају лагано и прозачно без обзира на величину.

- Свјетло са сјенком наглашава природу форме^[14]. Динамична игра са свјетлом може нагласити текстуру, а квалитет простора може се истаћи углом и бојом дневног свјетла. Нови материјали попут ЕТФЕ коју пропуштају дневно свјетло у великом проценту могу значајно утицати на утисак природне структуре обликовања.

- Текстура је природа површине^[14]. Може се перципирати визуелно и контактом. Понављање интересантних детаља утиче на осјећај кретања и динамичности.

- Боја је субјективан фактор на који утиче величина површине, друге боје у видном пољу посматрача и свјетло^[14]. Утичу на визуелну форме и могу ју учинити хладном, топлим, хуманом, већом или мањом зависности од избора и интензитета боје. Одређене су захтјевима са аспекта стандарда безбједности и закона који је на снази у посматраном поднебљу.

- Жељезничке станице су комерцијални објекти и често су уочене потребе за постављањем рекламних и информационих материјала^[14]. Потребно је обезбједити



Слика 150. Пресјек кроз Ватерло станицу у Лондону са излованим аналитичким тродимензионалним детаљом конструктивног склопа. Цртеж власништво Гимшоу Архитекти (*Grimshaw Architects*) студија.



Слика 151. Основа и пресјек жељезничке станице у Мадриду, Шпанија. Цртеж власништво “CESMA & IETec – CSIC” студија.

просторе и описе за начине постављања. Савремени материјали попут ЛЦД дисплеја и ЛЕД расвјетних тијела могу обогатити простор и утисак посјетилаца.

Кингс Кросс (*King's Cross Station*) станица је завршена 1852. године (слика 148 и 149). Дјело је Луиса Кубита (*Lewis Cubbit*) и реконструисана је 2012. године. Са преко 47 000 000 путника годишње једна је од највећих и најпрометнијих. Трансформација³⁴ је извршена комбинацијом три основне интервенције кориштењем и оживљавањем постојећих садржаја, рестаурацијом и реконструкцијом и дограњом нових садржаја. Нова конструкција преноске надстрешнице дала је импресиван амбијент. Ведар и визуело лаган остакљени кровни покривач импресивно дјелује на посјетиоце. Историјски дио са рестаурираном оригиналном фасадом чини идеалан баланс између традиције и печата савремене архитектуре.

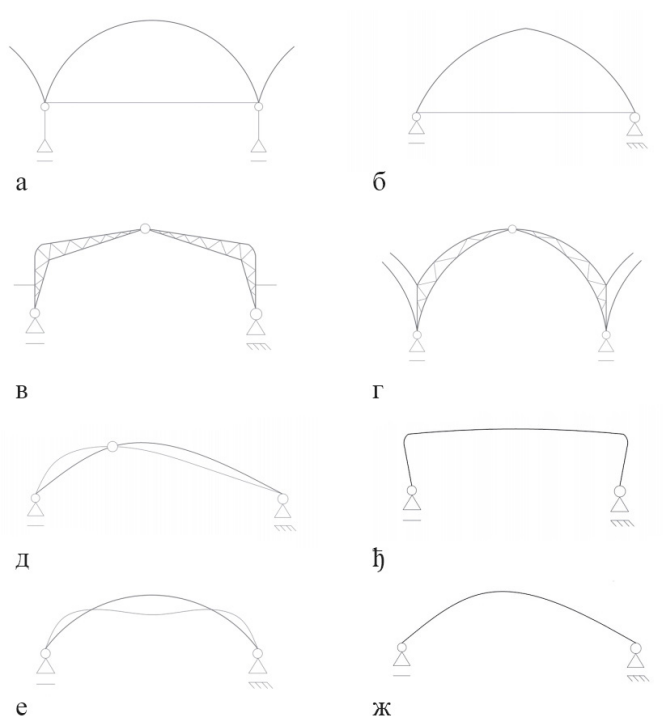
После Другог свјетског рата велики број станица је потпуно или парцијално уништен. Појавиле су се нове технологије које су омогућиле пројектовање великих лаганих конструкција ослобођених традиционалних историјских стега форме. Жељезничка станица је једна од главних приступних тачака савременом виду транспорта. Поред своје првобитне функције све више постаје јавни простор. У пројектовању ових намјена простора преплићу се архитектура, конструкторско инжењерство и индустријски дизајн. Конструктивни елементи, поред своје основне функције, добијају и естетску димензију и постају обликовни елемент у дизајнирању квалитетног архитектонског простора. Правилан избор конструкције, сјенила за сунце и пројектовање са свјетлом и текстуром на уму чине их препознатљивим објектима и реперима у простору са визуелног и функционалног аспекта. Одлука о избору конструктивног система уобичајено се доноси на бази економичности, доступности материјала, локализације, потреба инвеститора, карактера објекта и многим другим параметрима.

На основу облика типова, оптерећења и материјала системи се могу подјелити на разне начине као што је: скелетни систем, решеткасти систем, рамовски систем, лучни систем, љускасти систем, растерски системи у виду ламела, специјални системи који настају комбиновањем два или више горе наведених система да би се добио нови прилагођен свим специфичностима планираног пројекта.

Током ране фазе развоја жељезничких објеката за кровну конструкцију је уобичајено употребљавана решеткаста конструкција ослоњена на масивне зидове од опеке и жељезне пиластре. Лучне конструкције су од давнина познате као оптималан облик за премоштавање великих распона између ослонаца, посебно често се употребљавају на конструкцијама раних жељезничких станица.

Ватерло (*Waterloo International*) је једна од најпознатијих и најпрометнијих жељезничких станица на свијету. Са дужином од 400 m и ширином од 32 m до 48 m представља објекат импозантних размјера. Пројектовао ју је тим архитеката Гримшоу Архитекти (*Grimshaw Architects*), а отворена је 1993. године. Пројекат је материјализован доминантном употребом челика, а покривен стаклом и плочама од нерђајућег челика.

34 Значајно истраживање трансформације и карактеристике постојеће Кингс Кросс станице могу се пронаћи у научном раду *Railway Stations - The Borderline Between Architecture and Structure* (Ewa, Maria Kido), Architectural Press, Tokyo, 2015.



Слика 152 лијево. Поглед на кров и конструкцију са перона жељезничке станице у Мадриду. Фотографија власништво “CESMA & IETcc – CSIC” студија.

Слика 153 десно. Шематски приказ конструкције станица^[14]:

- а) Падингтон станица 2 (*Paddington Station II*), Лондон (1854.)
- б) Свети Панкрас (*St Pancras*), Лондон (1868.)
- в) Хамбург жељезничка станица (*Hamburg Hauptbahnhof*), Хамбург (1906.)
- г) Миланска станица (*Milano Centrale*), Милано (1931.)
- д) Ватерло станица (*Waterloo International*), Лондон (1993.)
- ђ) Лајпциг аеродромска зграда и жељезничка станица (*Laipzig/Halle Airport Railway Station*), Лајпциг (2003.)
- е) Берлин жељезничка станица (*Berlin Hauptbahnhof*), Берлин (2006.)
- ж) Лијеж станица (*Liege-Guillemins*), Лијеж (2009.)

Новопроектвана кровна конструкција завршена је 2007. године и садржи функције издавања карата, обезбјеђење, чекаонице и терминале за укрцавање путника. Простор урбанистичке микролокације диктирао је издужени закривљени облик објекта. Прозрачност ентеријера добијена је употребом стакла као кровног покривача да би се обезбједило уједначено зенитално освјетљење. Кровна конструкција сачињена је од лучних носача ослоњених на растер масивних бетонских стубова испод. Лукови су у тјемени качени на греду која се пружа дужином објекта (слика 153 д). Олакшања и ојачања су остварена употребом просторне решеткасте конструкције на 36 попречних лукова. Ова ојачања су постављена асиметрично у односу на осовину пружања крова. Један дио решетке се налази унутра, а други вани. Унутрашња решетка је дужа и постављена је да би се одговорило на силе притиска тежине конструкције на асиметрични лучни профил крова (слика 150). Елементи решетке су спојени тачкастим спојницама од челика. Са закривљењем осовине крова и повећањем распона ивичних ослонаца расту и моменти савијања па је на исте одговорено увећаном конструктивном дубином просторне решетке на средини распона. Секундарна конструкција постављена је на лучне носаче и служи да конструктивно подржи плоче које су у функцији кровног покривача. Састоји се од греда постављених у оба правца попречно у односу на лучне носаче и паралелно са истима. Ватерло станица и новопроектвана кровна конструкција представљају примјер добре употребе просторне решетке да би се олакшала и обезбједила аморфна форма објекта. Употребом лучних носача добијена је корисна висина која простор чини

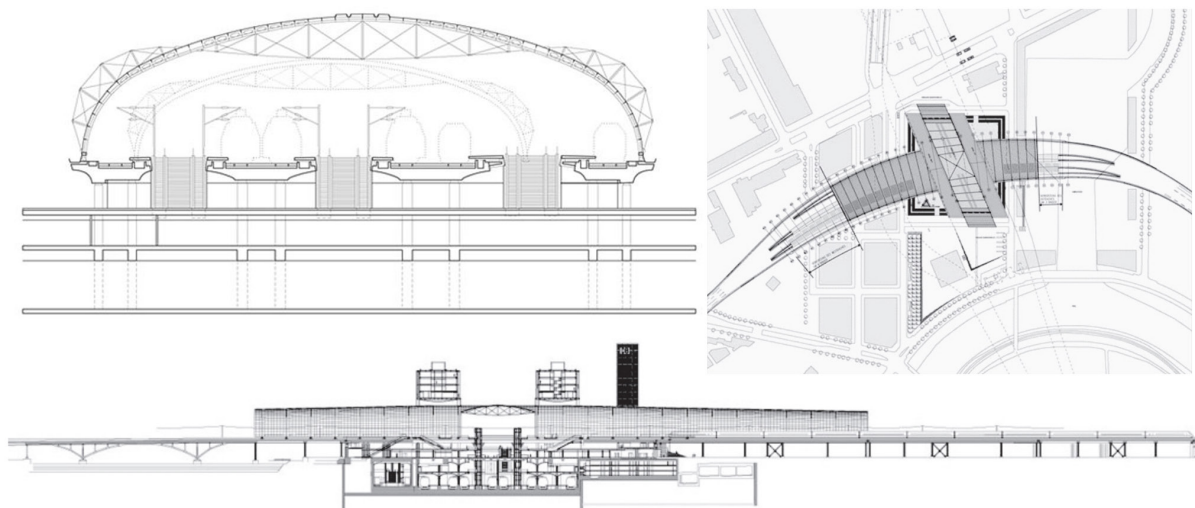


Слика 154. Поглед на перонску кровну конструкцију жељезничке станице у Лајпцигу.Фотографија Хантер Блиц (*Hunter Blitz*).

адекватним за функцију перона. Истицањем конструкције и погледом из ентеријера по дубини просторна решетка је дала изузетне естетске квалитете који овај објекат сврстају у један од најпрепознатљивијих на свијету.

Жељезничка станица у Мадриду, Шпанија, грађена је од 1999. до 2003. године. Под вођством тима инжењера бироа Карлоса Фератера (*Carlos Freterra*), Хозеа Валера (*Jose Valero*), Елена Матеа (*Elen Mateu*) и Феликса Аранца (*Felix Aranzo*) пројектован је и изграђен објекат дужине 500 m, ширине 110 m и корисне висине 30 m^[14] (слика 151). Главна конструкција покривача хола, највећег простора станице, материјализована је употребом челичних шипки ојачаних љускастом конструкцијом. Објектом доминира употреба челика и армираног бетона. Покривена је стаклом и дрветом, а ојачана мрежом челичних сајли. Кров је објешен на девет лучних носача и укрућен великом мрежом челичних сајли које чине тетраедралне облике. Покрива 40000 m² корисне површине^[14]. Греде од армираног бетона које се налазе изнад приземља позициониране су у троугаоном растеру. Да би се пустила оптимална количина свјетла у ентеријер (слика 145) пројектанти су искористили троугаони растер бетонских носача на начин да су одређена поља отворили и прекрили стакленим покривачем како би се добило зенитално освјетљење. Ентеријер карактерише изузетно динамична геометријска шема понављања конструктивних елемената која се може видјети на слици 152.

За пројекат станице у Мадриду, узимајући у обзир све специфичности пројекта и предметне локације, закључено је да је једини оптималан материјал за израду конструкције ојачани челик. Економска исплативост је узета у обзир па се велика пажња водила о хомогенизацији, односно стандардизацији, свих саставних елемената који су уграђени у кровну конструкцију. На овај начин скоро цијела конструкција је произведена и димензионисана у фабричким постројењима, а на градилишту се вршила скоро искључиво само монтажа. Спојеви лучних носача и троугаоних растера су ријешени крутом везом. Дилатације су постављене на блоковима од по три лука и припадајућим гредама испод истих. Попречни пресједи носача се разликују у зависности од позиције и функције у ткиву објекта. Компатибилност између профила и њихових спојних елемената је један од битних фактора када је у питању избор попречног пресјека. За видљиви дио конструкције, пројектанти, су инсистирали и на упном естетском утиску архитектонског обликовања и креирања амбијента па економичност и функционалност нису били једини параметри у



Слика 155. Основа и пресјеци кроз кровну конструкцију жељезничке станице у Берлину. Цртежи власништво “MERO Bausysteme Inland” компаније.

избору попречног пресјека. Узимајући у обзир све наведене критеријуме и специфичности кружни цјевасти попречни пресјек је употребљен за већину конструктивних елемената. Правоугаони попречни пресјек појављује се на лучним носачима. Однос лучног радијуса и распона је приближно $1/11^{[20]}$. Попречни пресјек правоугаоног облика лука је 1200 mm са $1000\text{ mm}^{[14]}$. Дебљина челичних плоча за укрућење је од 30 mm до $45\text{ mm}^{[14]}$.

Светло и сјенка се смјењују у троугаоним пољима па простор има упечатљив визуелни идентитет. Стаклене призме кроз које улази свјетло ослоњене су на троугано постављене челичне греде са отворима у профилу. Оваква конструкција је у стању да премости распоне до 110 m од ослонаца^[14]. Зидови станице су од масивних префабрикованих бетонских модула. Ентеријер чине два нивоа од којих је други резервисан за комерцијалне садржаје, улазну партију и чекаонице. Приступ доњем нивоу остварен је преко монументалних ескалатора. Садржај који удомљује је платформа за укрцавање на возове. На примјерима ових размјера посебан третман је захтјевао и систем одвођења воде са крова површине преко $40000\text{ m}^2^{[14]}$. Кровна конструкција жељезничке станице у Мадриду са собом је носила изузетно комплексне геометријске и функционалне захтјеве. Пажљивим планирањем и пројектовањем узимајући у обзир интеракције између геометрија носача, функцију, концепт конструкције и естетске вриједности исте дале су препознатљив објекат, један од најпознатијих симбола града.

Лајпциг је град у Њемачкој са дугом традицијом употребе жељезничког саобраћаја која је почела још 1839. године. Кроз историју су се промјенили разни објекти који су удомљавали функцију жељезничке станице. Задња је отворена 2003. године, а пројектовали су ју архитекти АП Брунерт и Партнери (*AP Brunnert and Partners*). Станица се налази уз објекат аеродромског терминала како би се обезбједила најкраћа могућа путања путника за промјену начина транспорта. Карактеристични дио објекта са аспекта избора конструкције је кров платформе са перонима. Пројектована је употребом два челична портала са кровним покривачем од затегнутог текстила. Станице је дужине 405 m , ширине 45 m и висине од око $9\text{ m}^{[14]}$. Дужина кровне конструкције је $320\text{ m}^{[14]}$. Из разлога потребе за креирањем лагане и витке порталне конструкције која може да премости распоне од 45 m челик је кориштен као примарни материјал^[14] (слика 153 ђ). Мембрански текстил је тефлонски покривач са заштитним премазима. Портал је састављен варењем челичних “Т” профила. Дизајнирани су тако да приме оптерећење кретања возова преко платформе (слика 154) која је ослоњена на њих. Мембрански покривач је преднапрегнут да би се премостили распони од портала који је на удаљености од 14 m један од другог^[14]. Покривач је ојачан челичним сајлам које се простиру по дијагоналама поља затворених растром

основне порталне конструкције. Укрућење система ријешено је растером челичних греда ортогоналних у односу на рамове. Овим начином обезбјеђена је конструктивна стабилност у подужном правцу кровне конструкције. Иако значајно мања станица од раније наведених у Лондону и Мадриду, одликује се изузетно прозачним и квалитетним простором. Лагана конструкција и тефлонски покривач потпуно отварају простор и стварају везу са окружењем.

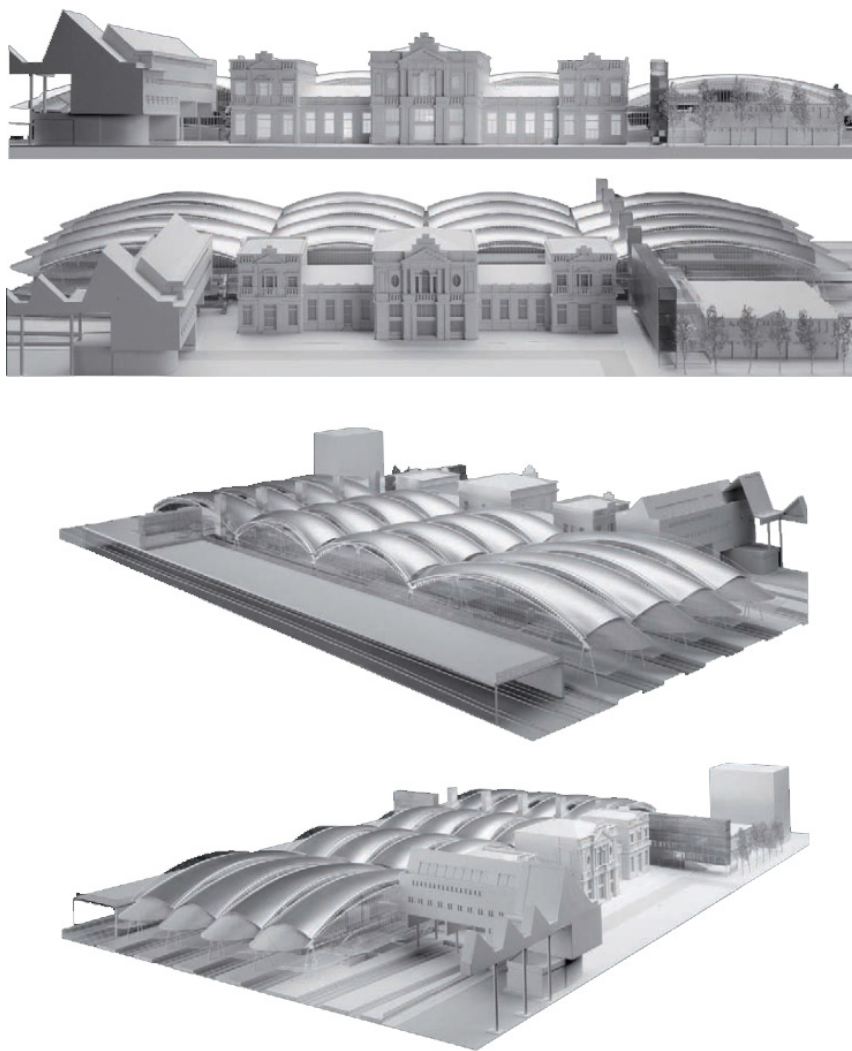
Зграда жељезничке станице у Берлину је јединствен објекат који је отворен 2006. године. Дневно прими 1500 возова и има просјечну посјећеност од 25000 путника у току 24 часа. Посједује корисну површину од 175000 m^2 од којих је 21000 m^2 резервисана за жељезнички саобраћај и припадајуће функције^[14]. Мултифункционални објекат посједује многе садржаје који нису директно везани за функцију транспорта путника, само неки од њих су: ресторани, биоскоп, тржни центар и многе друге. Представља битан репер и фокусну тачку у урбаном ткиву овог дијела Берлина. Пројектована је за потребне локалног и међународног пуничког жељезничког саобраћаја. Зграда станице је дугачка 320 m , широка 66 m и висока 12 m ^[14] (слика 155). Челик и стакло су основни материјали видљиви из свих погледа из ентеријера и екстеријера.

Основна конструкција крова платформе материјализована је употребом два елемента. Лучни носачи ојачани челичним сајлама и тродимензионална цилиндрична љускаста конструкција. У основи обликовања је просторни растер постављен на аморфној и сведеној кубичној форми. Један дио приступа платформе одвија се испод земље на дубини од 15 m ^[14]. Путнички терминал налази се на платформи 10 m изнад тла ^[14]. Кровни покривач чини скоро 12000 стаклених панела ^[14]. Закривљени кров перона састоји се од остакљене једноструко савијене површи елиптичног попречног пресека. Три централна лучна носача постављена на осовинском размаку од 13 m ^[14] објешени су на челичне сајле (слика 153 е). Растерска поља на површи формирана су правоугаоном шемом понављања попречних греда у чијим пољима се налазе стаклене стијенке кровног покривача. Димензије им варирају због закривљености површи и крећу се од 1,4 m до 1,6 m . Ојачана су дијагонално затегнутим спреговима од челичних сајли. Плоче покривача укрућене су ивичним профилима који су ношени растером греда на површи елиптичног попречног пресека. Све су различитих димензија. На одређеним мјестима стакло је обложено фотонапонским ћелијама које обезбјеђују 2,5% ^[14] потреба за електричном енергијом станице. На крајњим тачкама распони елиптичних лукова су 45 m и 57 m и према средини се проширују на максималних 65 m ^[14].

Посматран у контексту микро локације интересантан је избор обликовања перонске кровне конструкције. Продор издуженог и закривљеног крова у сведену кубичну форму зграде станице ствара илузију брзине и динамичности. Избор стакла као основног покривача крова и фасаде отвара станицу ка ужем урбанистичком контексту и визуелно ју смањује те чини хуманијом са великом количином природног освјетљења у ентеријеру. Поред истицања конструкције и употребе ради креирања јединственог естетског доживљаја станица је карактеристична и по великом броју неонских реклама којима је обојен простор. Иако великих габарита избор конструкције и начина затварања простора не чине ју нехуманом, него напротив.

Жељезнице станице су дио транспортног система скоро свих земаља. Временом су еволуирале у мултифункционалне објекте који удомљују разне садржаје попут ресторана, тржних центара, пошти, биоскопа и многих других. Примају посјетиоце који нису нужно корисници услуга транспорта него постају кључна тачка у јавним просторима многих градова, као што се може примјетити на примјеру жељезничке станице у Берлину. На овим објектима се преклапају области инжењерског дјеловања разних струка. Архитектура, машинство и индустријски дизајн се преплићу на разним нивоима. Без снажног историјског терета традиције помјерале су развој многих конструктивних система и увјек захтјевале одговоре на огромну палету проблема које је било потребно анализирати и преточити у

угодан простор који ће пружити максимални угођај и комфор посјетиоца. Посматрано у ширем контексту представљају први утисак путника о националном идентитету, слику развијености и гостопримивости поднебља. Са аспекта избора типа и конструктивног система може се примијетити да су често конструктивни елементи изложени и чине основни модул за дизајнирање естетике објекта. Својим обликовним потенцијалима и избором материјала архитекти се служе да одогуворе на много дубља питања која постављају изузетно прометни и значајни објекти што свакако јесу жељезничке станице.



Слика 156. Макета пројекта НМБС жељезничке станице. Макета власништво “*Philippe Samyn and Partners*” студија.



III СТУДИЈА СЛУЧАЈА



10.0 КОНТЕКСТ И КОНЦЕПТ

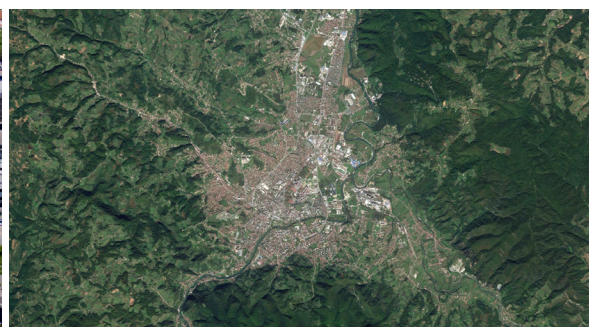
10.1 АНАЛИЗА КОНТЕКСТА – МАКРО ЛОКАЦИЈА

Бања Лука је административни центар са великим гравитационим потенцијалом привлачења локалног становништва. Поред локалног утицаја сваке године се биљежи све већи прилив страних посјетилаца. Трансформација и отварање су синоними за савремену Бања Луку. Капацитети и могућности тренутних станица нису на задовољавајућем нивоу. Не посједују идентитет који је оличење града на Врбасу и који је прикладан за први сусрет са градом високог потенцијала. Прва слика и утисак долазе од иницијаног контакта са градом, за велики број посјетилаца то су аутобуска и жељезничка станица. Налазе се на истом потезу који је пројектован седамдесетих година прошлог вијека и од тада се није битније мијењао. Аутобуски саобраћај је интензивнији по броју путника, али постоји потенцијал оживљавања путничког жељезничког саобраћаја и већег повезивања са регионалним центрима. Поред путничког активан је и транспортни саобраћај који је регионално битан. Бања Лука је позиционирана у долини Врбаса и окружена је брдима.

Постоји потреба за амбијенталном просторном цјелином и објектима који ће пружити функционалне и естетске квалитете потребне граду који је познат као транзитна зона за путнике из сјеверних центара и градова који путују ка југу. Планирана мрежа аутопутева додатно ће активирати Бању Луку. Тренутна локација жељезничке станице посједује низ потенцијала. Добра повезаност са центром града и близина транзитног и ауто пута чине ју идеалном за своју функцију.

Климатски услови су умјерено континентални са израженим лјетним и зимским периодима. На климатску слику Бање Луке, односно сјеверног Балканског полуострва, у првом реду утичу струје субтропског појаса високог ваздушног притиска и субполарног појаса ниског ваздушног притиска што за резултат има смјену хладних и тропских ваздушних маса. Средња просјечна температура ваздуха износи $10,5^{\circ}\text{C}$, јануар је најхладнији мјесец са просјечном темпатуром од $-0,6^{\circ}\text{C}$. Најтоплији мјесец је јул са просјеком од $20,4^{\circ}\text{C}$.

Бања Лука се налази у седмој се измичкој зони и препознатљива је по подрхтавању тла на којем се налази. Бањалучки тектонски блок се протеже са истока од Делибашиног села и Клашница долином Врбаса према Сави, на запад преко Пискавице и Бронзаног Мајдана. Сеизмогено подручје обухвата појас око града пречника између 50 km и 60 km . Грађевинска законска регулатива налаже обавезе и услове за градњу који узимају у обзир трусну зону у којој се налази град.



Слика 157. *лијево*. Поглед на центар Бања Луке. Непознат аутор фотографије.

Слика 158. *десно*. Сателитски поглед на Бања Луку и окружење. Фотографија преузета са “Google Earth” сервиса.

10.2 МИКРО ЛОКАЦИЈА

Железничка станица се налази у улици Браће Подгорника у Бањој Луци. Са површином од скоро 6,5 ha посједује простор планиран за аутобуску и железничку станицу са пратећим садржајима које дијеле исту парцелу. Постојећи објекти су пројектовани почетком седамдесетих година XX вијека. Садржаји коју су у функцији су аутобуска станица, услужне функције на приступном тргу, железничка станица са администрацијом, заједнички паркинг за станице и зелена површина. Поред трга налази се станица за такси службу и локални градски превоз чиме се остварује лака комуникација са свим дјеловима града. У непосредној близини налази се царински терминал и централна пошта, а недалеко је и хотел.

Степен изграђености око локације је релативно висок тако да се у окружењу налазе продавнице, угоститељски објекти, тржница и објекти са функцијом становања. Сама парцела је димензија 230 m са 300 m. Иако су на истој локацији обе станице имају приступне саобраћајнице са различитих страна, сјеверно-источна страна је за железничку док је југо-западна за аутобуску. Из улице Браће Подгорника могу се сагледати оба објекта. Топологија локације је равна и повољна за разне садржаје без потребе савладавања висинских разлика.



Слика 159. Локација железничке станице и позиција у урбаном ткиву града. Фотографија преузета са “Google Earth” сервиса.

10.3 ПОСТОЈЕЋА ЖЕЉЕЗНИЧКА СТАНИЦА У БАЊОЈ ЛУЦИ

Постојећа жељезничка станица у Бањој Луци пројектована је и изграђена 1973. године (слика 160). Један од пројектованих, неизграђених објеката, је хотел у склопу станице са свим потребним услужним садржајима. Након неколико деценија експлоатације згради је потребна реконструкција. Иако нису вршене битније интервенције од саме изградње административни блок је у добром стању. Дио садржаја у самом објекту није у функцији дуги низ година. Ресторан и сувенирница са продавницом у ентеријеру се не користе и не одржавају. Слаба посјећеност је један од разлога. Да би се привукли путници потребно је оживити и модернизовати садржаје унутар саме станице као што су сувенирнице, кафетерија, ресторан и слични, али и “обући” станицу у ново рухо и вратити културу путовања возом која је заборављена из разних разлога. Испред главне зграде позициониран је приступни трг који дистанцира жељезницу од аутобуске станице са пратећим услужним садржајима. До њега води пјешачка стаза која пролази поред аутобуске станице. Перонска конструкција је у лошем стању и потребна је промјена како самог крова тако и у естетском смислу (слика 161).

На сјеверној страни локације налази се припадајући паркинг и станица за локални градски превоз и такси служба које омогућавају бржу и једноставнију комуникацију са остатком града. Материјали који тренутно доминирају зградом жељезничке станице су бетон, стакло и челик. Конструкција је скелетни систем са планарном просторном решетком без дискретних спојних елемената штапова. Ослоњена је на 12 стубова који су на конструктивном растеру од 20 m са 24 m. Стубови доминирају фасадом и чине ју монументалном, а остакљени фасадни зидови прозračном и освијетљеном. У ентеријеру главног хола смјештени су билетарница са дијелом канцеларија администрације, чекаоница, сувенирница, продавница и вертикалне комуникације за приступ ресторану на првом спрату. Комуникације су чисте и прегледне. Простор је осовински подијељен возом између главног улаза и излаза на пероне. Јужни блок је пројектован као административни дио са канцеларијама и управом станице са свим потребним функцијама. Сама конструкција је у добром стању.



Слика 160 лијево. Поглед са сјевера на постојећу перонску конструкцију и зграду жељезничке станице. Фотографија М. Кољанчић.

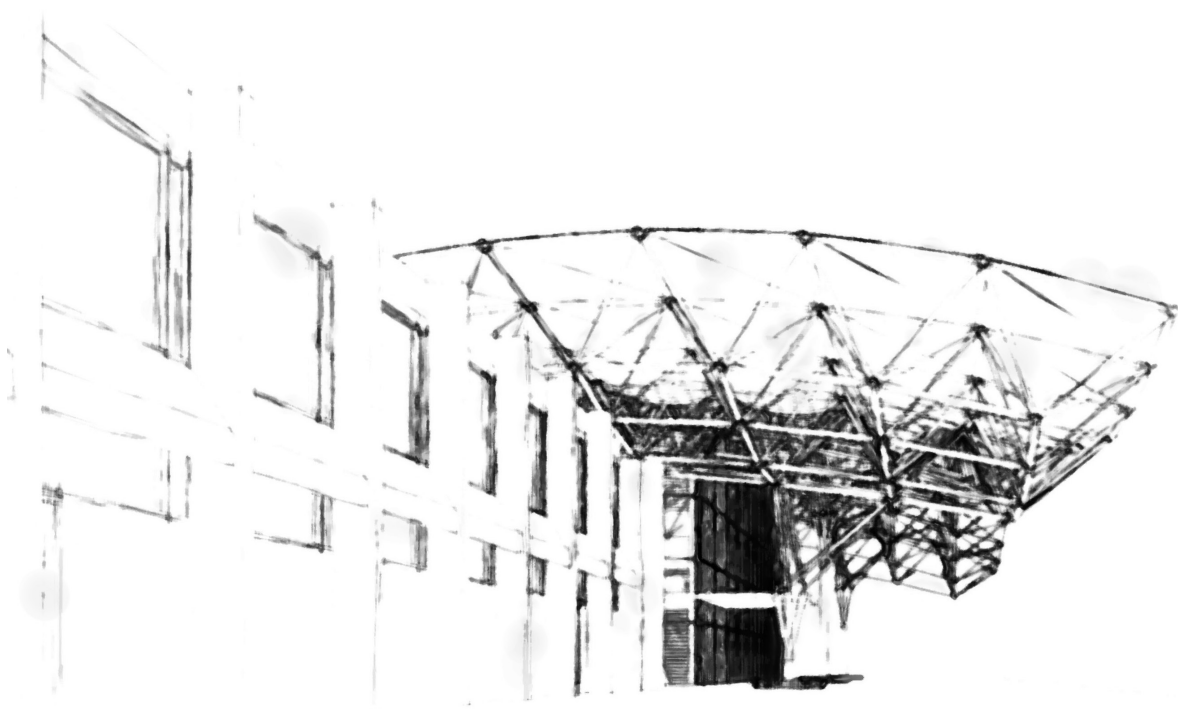


Слика 161 десно. Поглед са југозапада на зграду жељезничке станице. Фотографија М. Кољанчић.

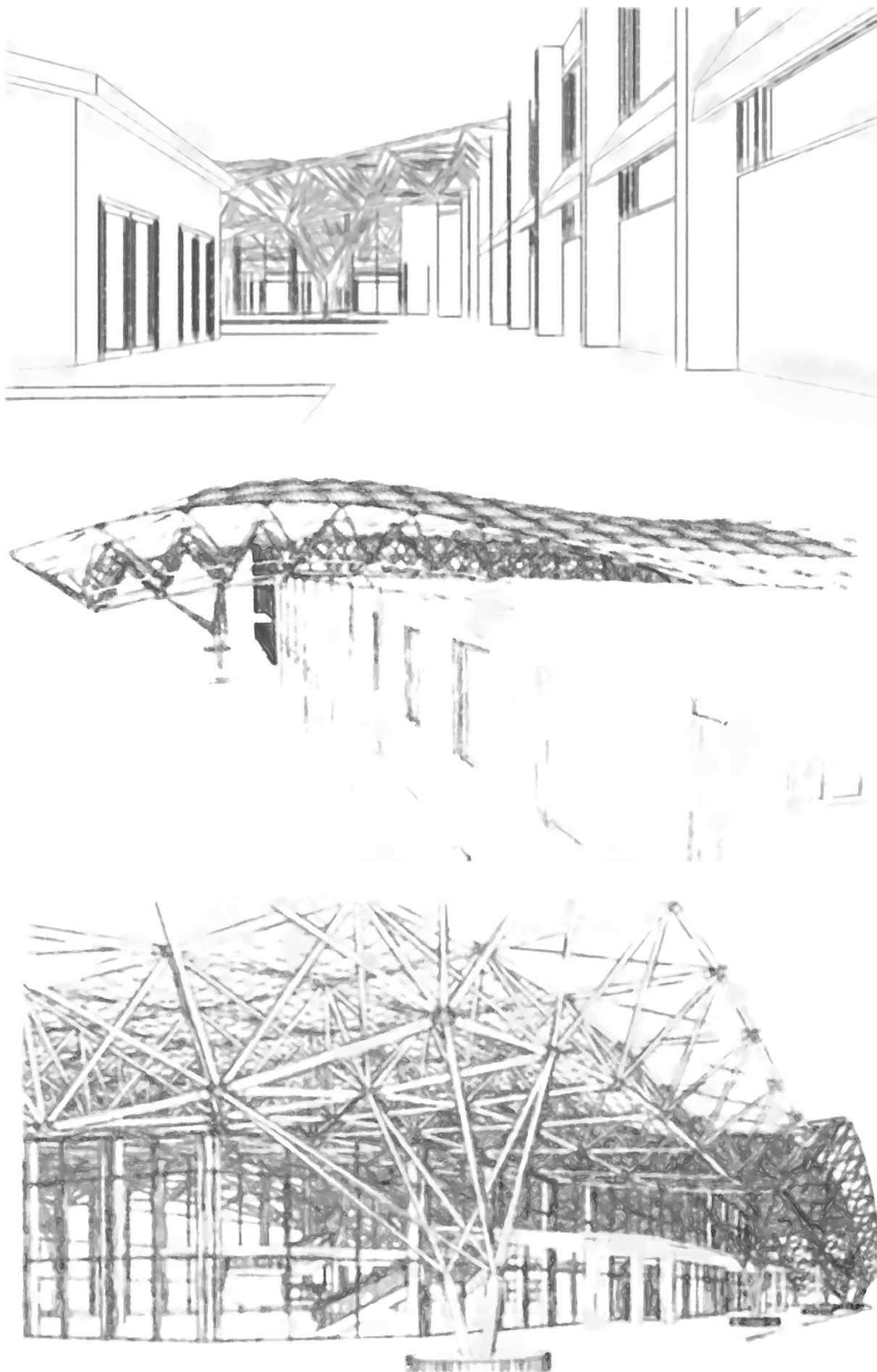
10.4 КОНЦЕПТ РЕКОНСТРУКЦИЈЕ КРОВА

Железничку станица је једна од „капија“ града. Представља први утисак и контакт. Као таква битна за град не само у функционалном смислу него врши индиректан утицај на цијелу Бања Луку. Иако тренутна станица не задовољава све потребне критеријуме постоји снажан потенцијал за ревитализацију и оживљавање. Низ година коришћења без адекватног одржавања учинили су да објекат и локација железничке станице не остављају жељени утисак на посјетиоце. Пројекат реконструкције крова железничке станице у Бањој Луци је пројекат јединствене кровне конструкције двослојне просторне решетке на слободној форми. Ослања се на закривљену линију и контраст са сведеним, оштрим и строгим линијама остатка постојеће зграде и објеката у непосредном окружењу. Контраст и недопуњавање, а не негирање су идеје које су водиле ка дизајну новог крова. Конструкција је истакнута и видљива из ентеријера и екстеријера. Избором система са дискретним спојним елементима асоцира на формације облика који се могу пронаћи у природи. Зглобови и аксијални елементи формирају аморфну растерску мрежу кроз коју се пропушта зенитално освјетљење.

Стубови на које је ослоњена решетка рачвају се у неколико нивоа како би разбили равну линију и учинили фасаду динамичнијом и визуелно компактнијом. Асоцирају на разгранату крошњу дрвета која је један од препознатљивих симбола града алеја и зеленила. Опонашају обликовање решетке и чине да изгледа као да је израсла из тла. Употребом генетичких еволуционих алгоритама позиције чворова и димензије растера су дизајниране тако да формирају најправилнију могућу топологију изворне двоструко закривљене тродимензионалне површи. Симулацијом су обликоване јастучасте форме транспарентног покривача. Избор материјала потенцира природну површину јер је кровни покривач материјализован са ЕТФЕ-ом у форми јастука који попуњавају растерска поља.



Слика 162. Концепт обликовања кровне конструкције. Поглед са перона. Илустрација М. Кољанчић.

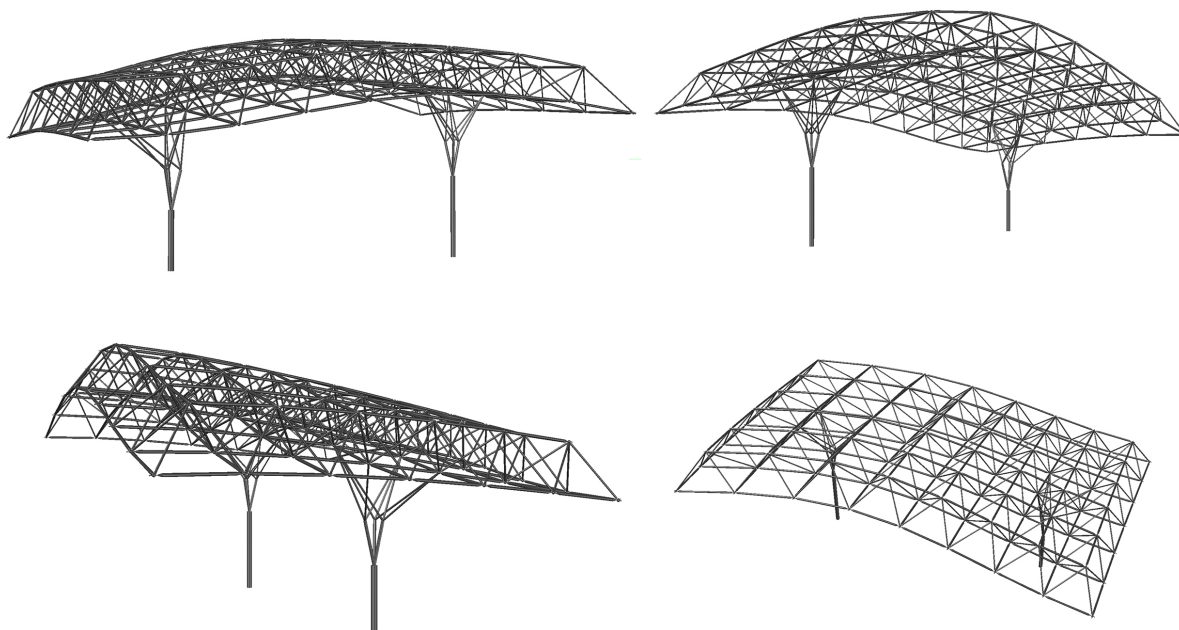


Слика 163. Истраживање обликовања кровне конструкције. Илустрација М. Кољанчић.

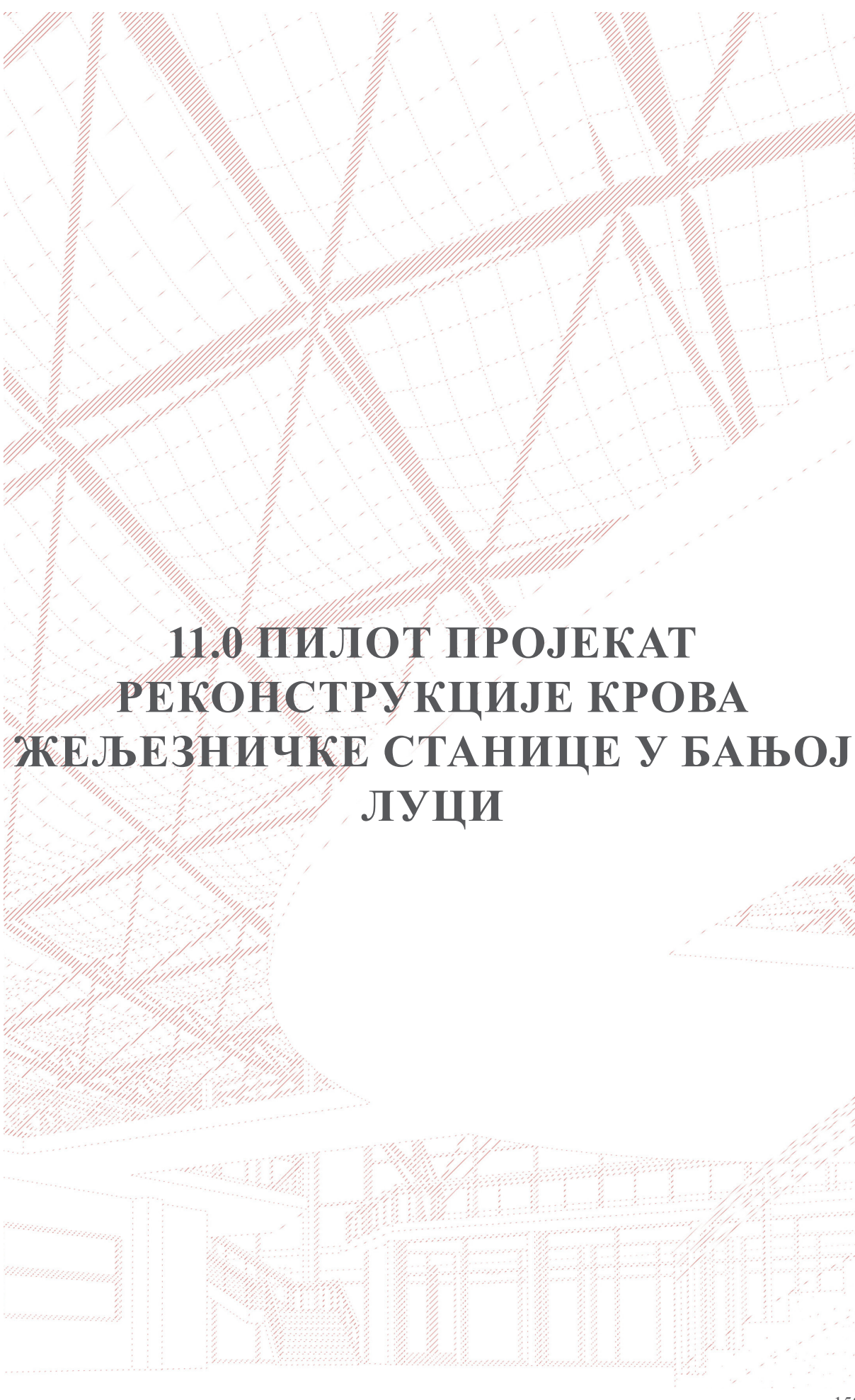
10.5 МАТЕРИЈАЛИЗАЦИЈА НОВЕ КРОВНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ ЖЕЉЕЗНИЧКЕ СТАНИЦЕ

Три су основна материјала која доминирају на згради жељезничке станице у Бањој Луци: бетон, стакло и челик. Интервенцијом кроз пилот пројекат реконструкције крова до изражаја долази још ЕТФЕ мембрански покривач са својим особинама рефлектовања и пропуштања свјетла. Овај материјал пружа велику пропустљивост природног свјетла у распону од 50 до 80%, а истовремено спрјечава непожељно ув зрачење и пропуштање топлоте. Аспект избора материјала који штити од директне изложености топлоти сунчевог зрачења је битан јер штити конструкцију од негативних особина челика који је склон експанзији и контракцији при промјенама темпаратуре. На овај начин се неутралише стварање нежељених напона у штаповима и појава промјене запреминских карактеристика конструктивних елемената.

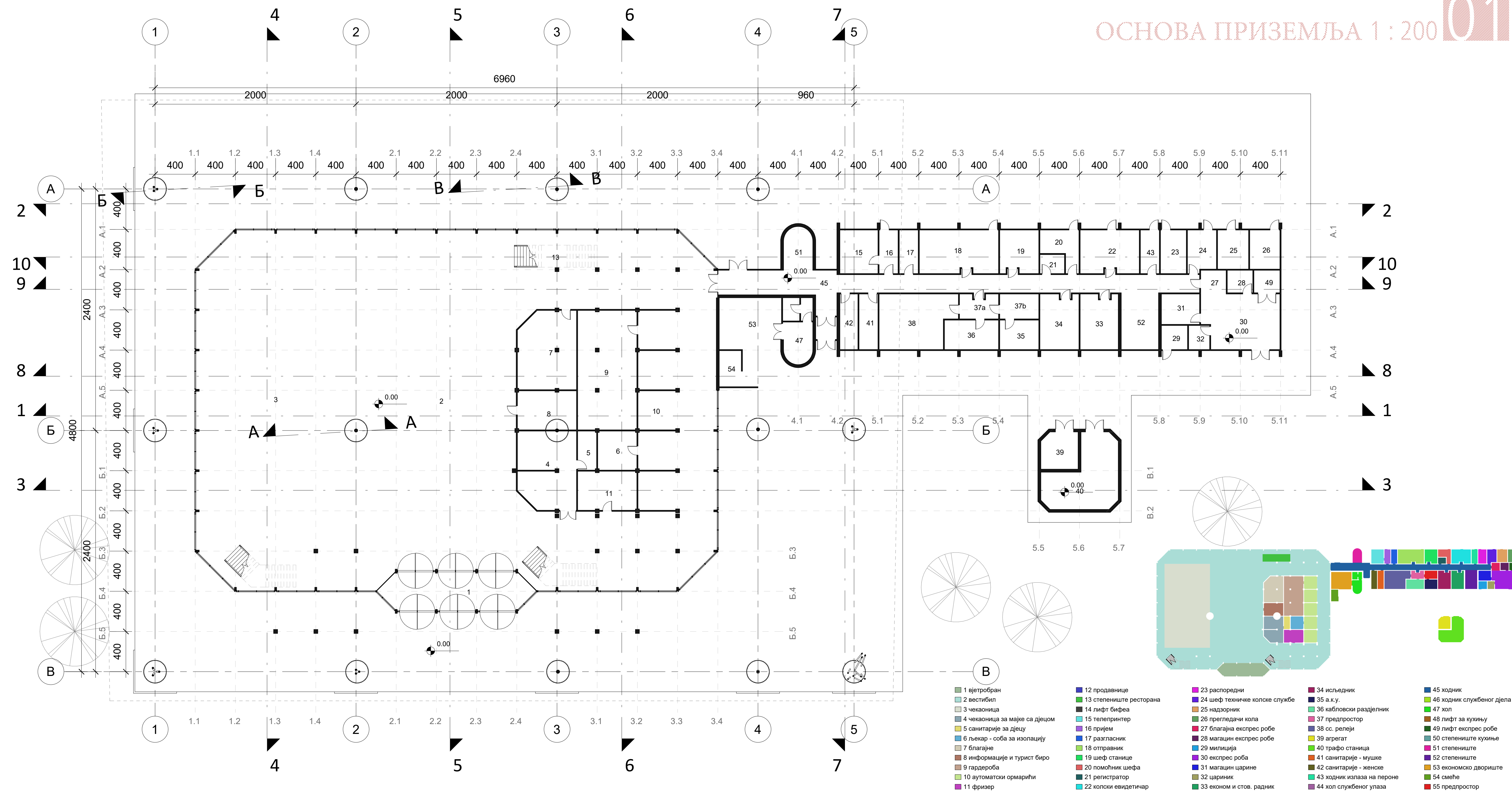
Аморфна просторна решетка материјализована је употребом челика високих конструктивних перформанси због избора већих димензија растерских поља и саме “неправилности” обликовања које неуједначено оптерећује све сегменте конструкције. Предвиђено је заштићивање челика премазима и емулзијама у доњој зони у којој постоји могућност појаве пожара. Задржане су растерске позиције ранијих стубова. Искориштени су постојећи темељи самци на које су ослоњени нови стубови. Темељи самци су од армираног бетона и налазе се на растеру од 20 m и 24 m осовинске удаљености.

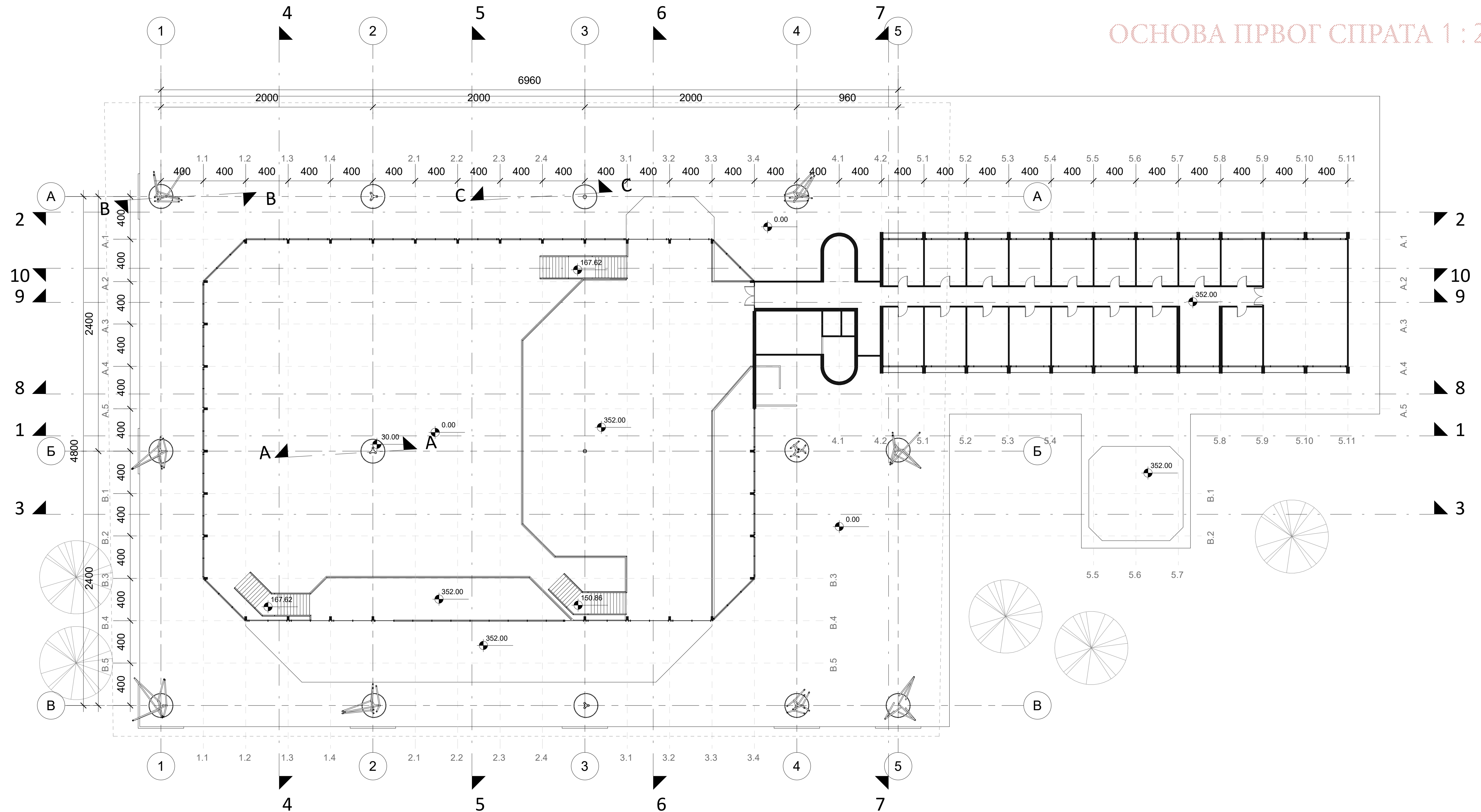


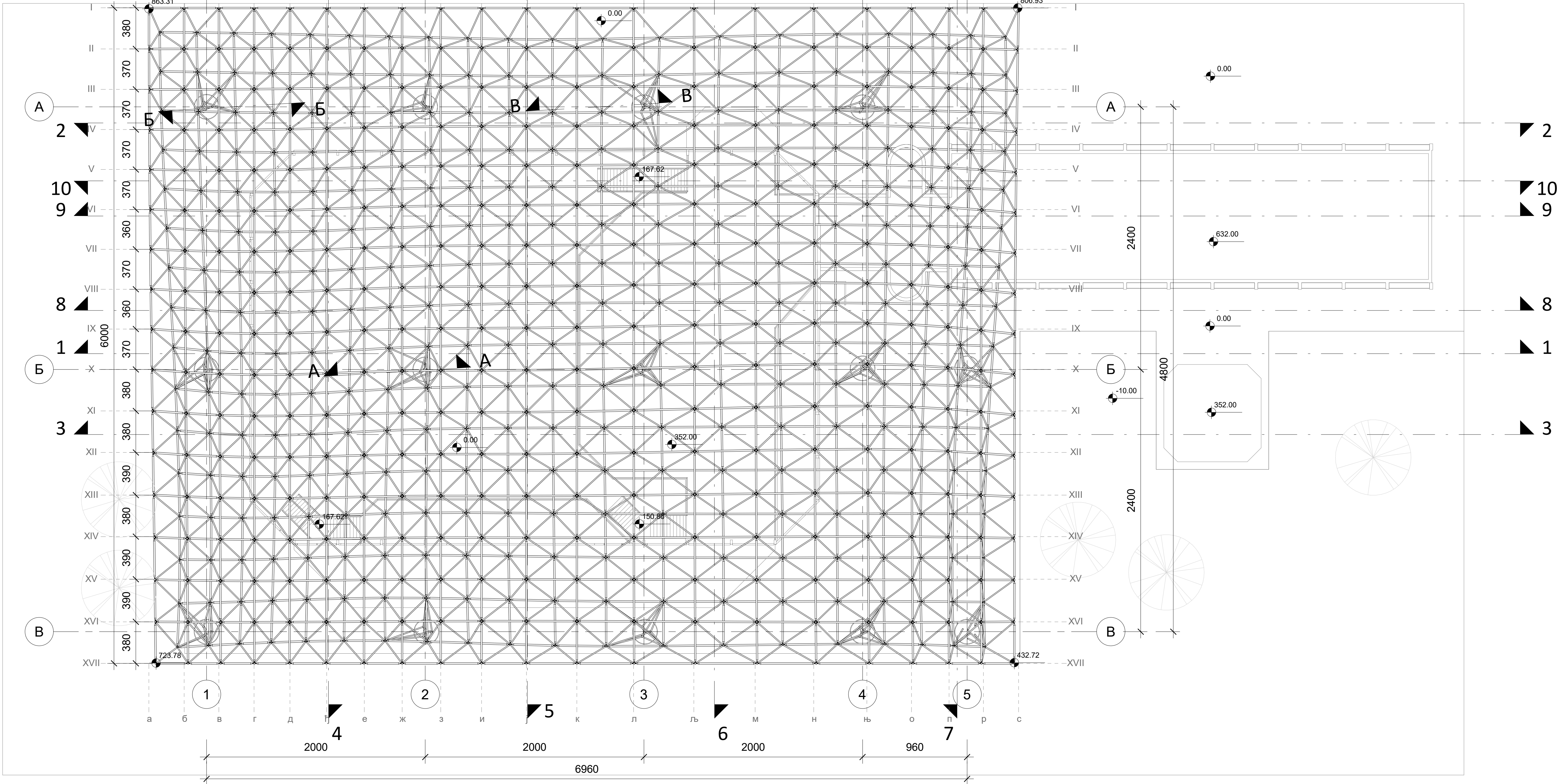
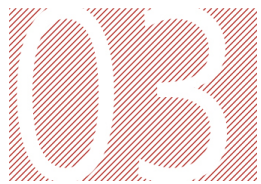
Слика 164. Сегмент просторне решетке на слободној двоструко закривљеној форми. Модел израдио М. Кољанчић.

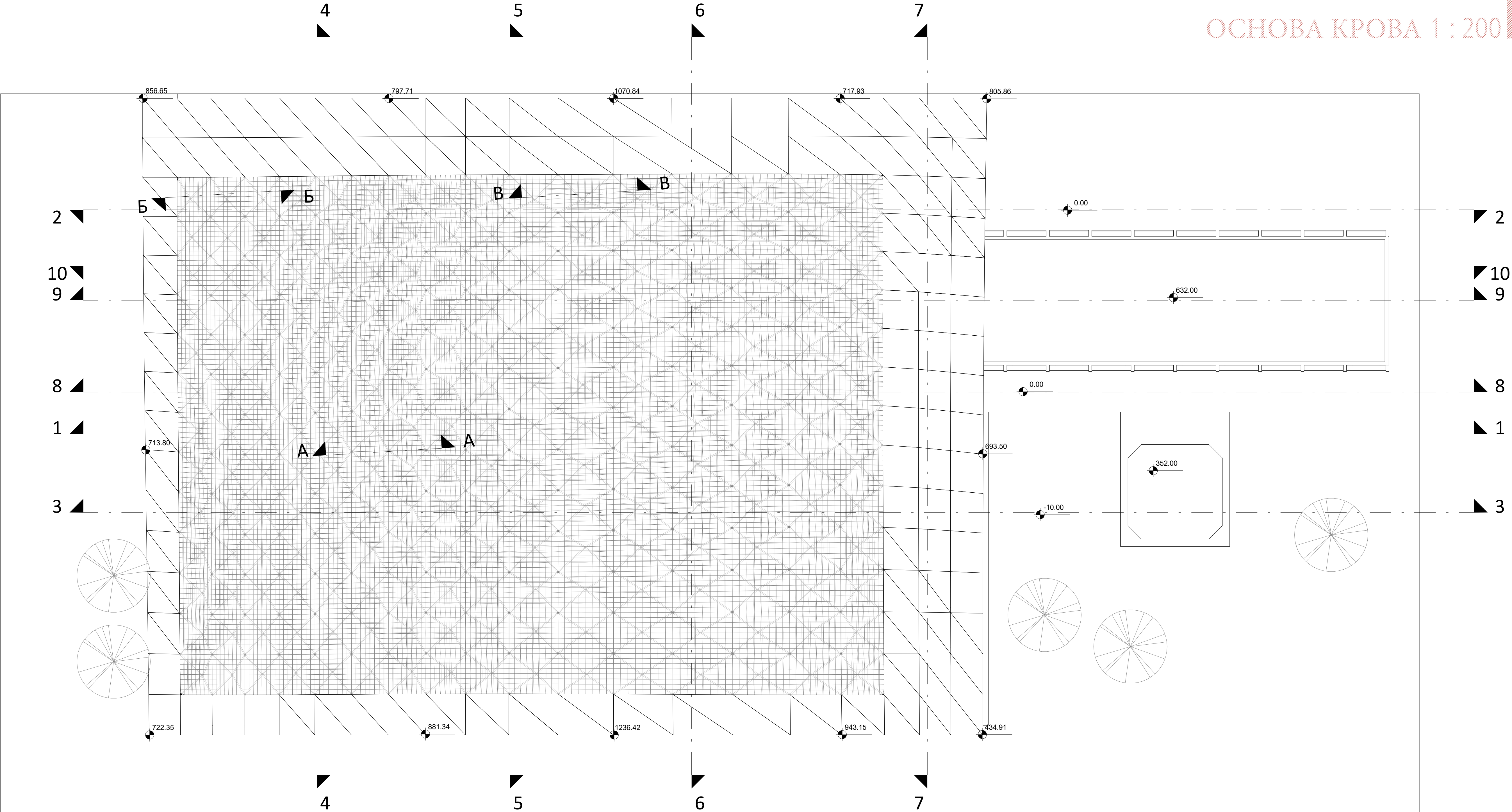


11.0 ПИЛОТ ПРОЈЕКАТ РЕКОНСТРУКЦИЈЕ КРОВА ЖЕЉЕЗНИЧКЕ СТАНИЦЕ У БАЊОЈ ЛУЦИ

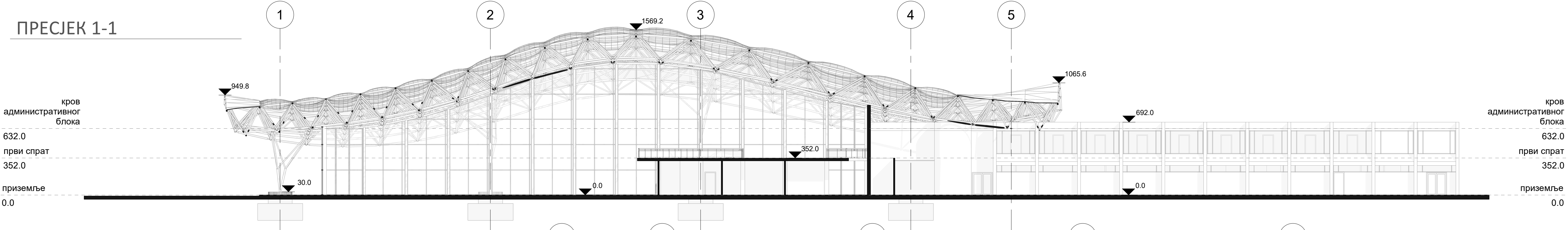




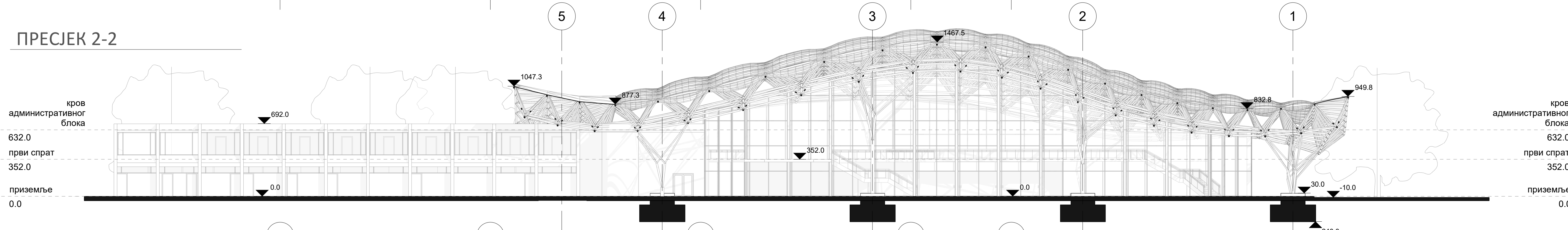




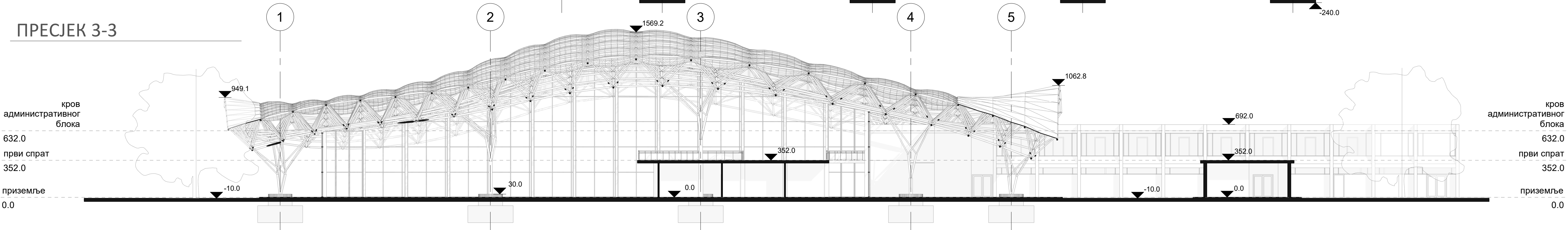
ПРЕСЈЕК 1-1



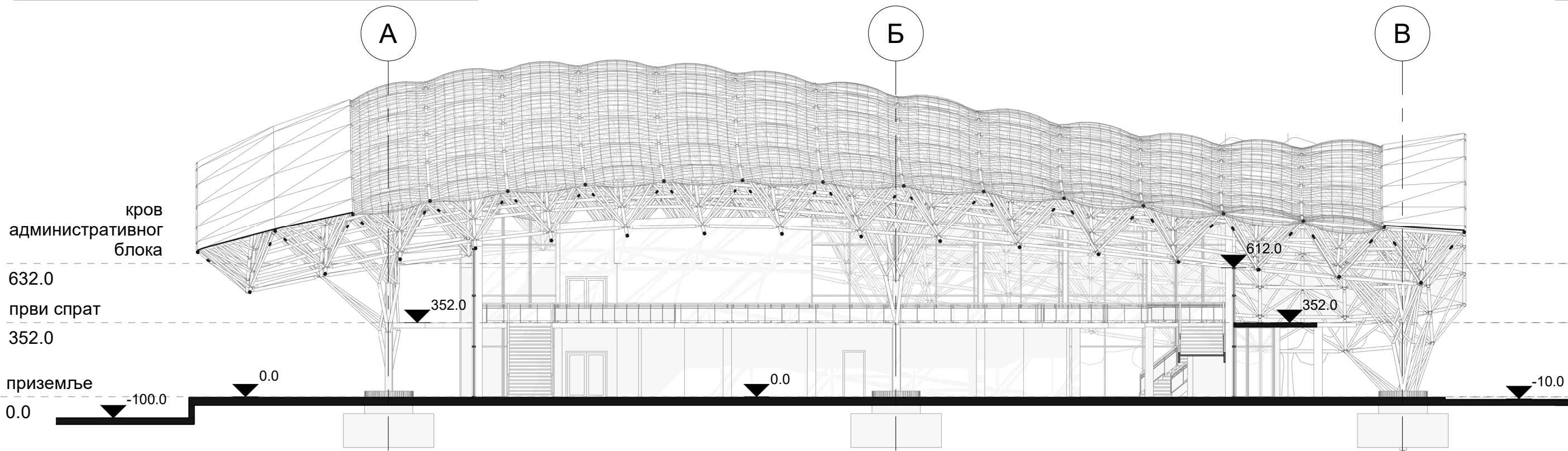
ПРЕСЈЕК 2-2



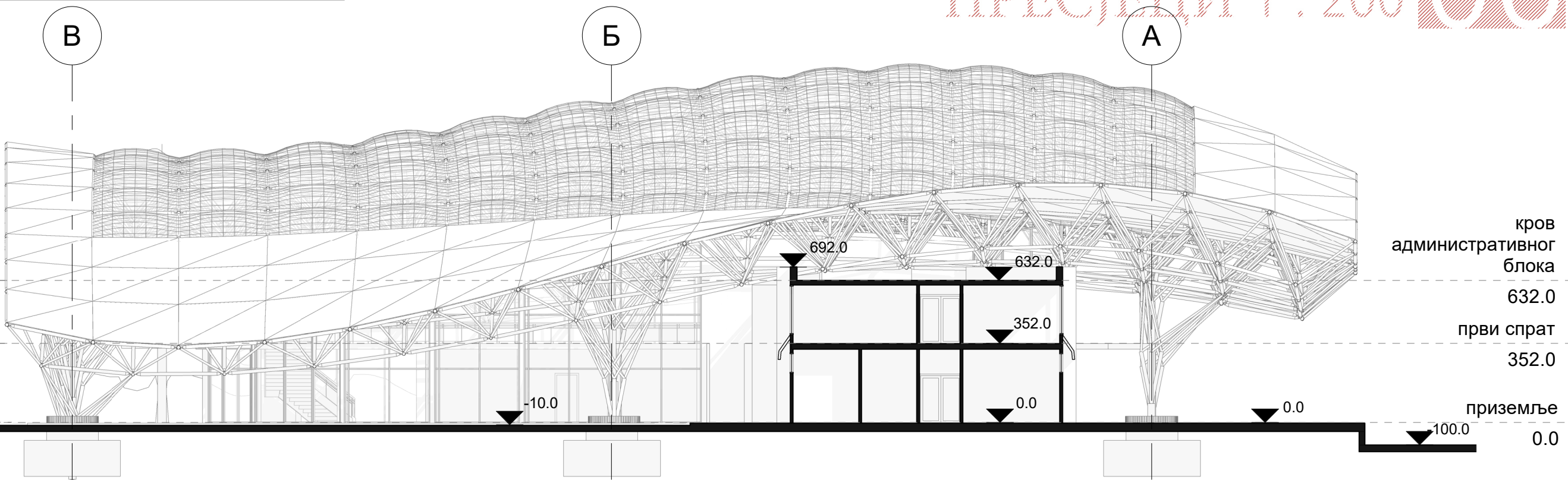
ПРЕСЈЕК 3-3



ПРЕСЈЕК 4 - 4

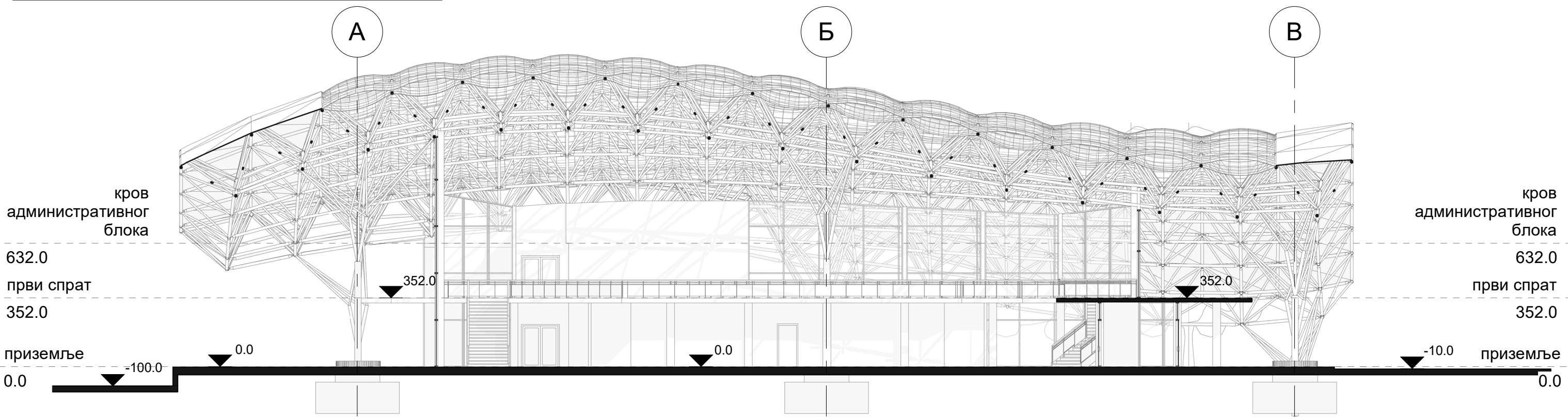


ПРЕСЈЕК 7 - 7

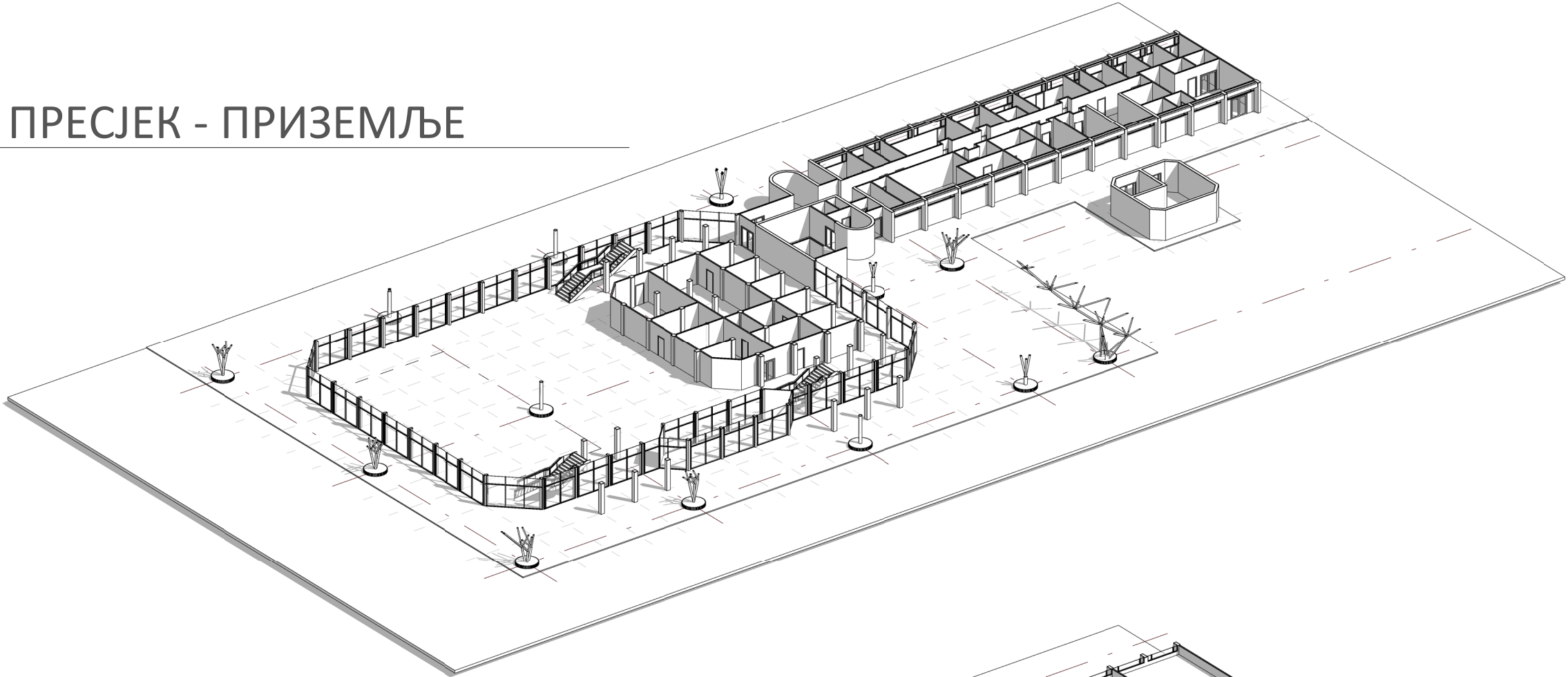


ПРЕСЈЕЦИ 1 : 200 06

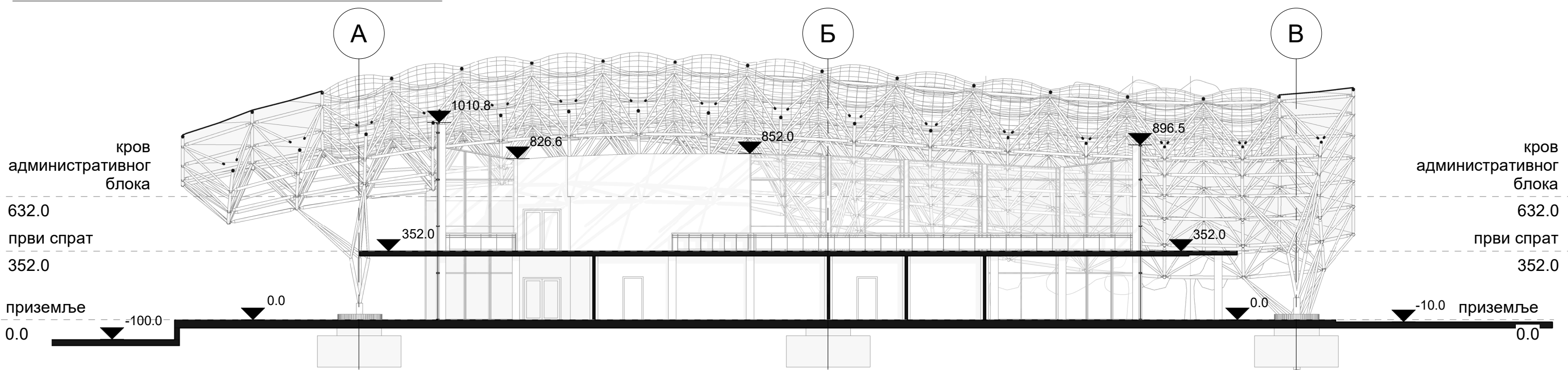
ПРЕСЈЕК 5 - 5



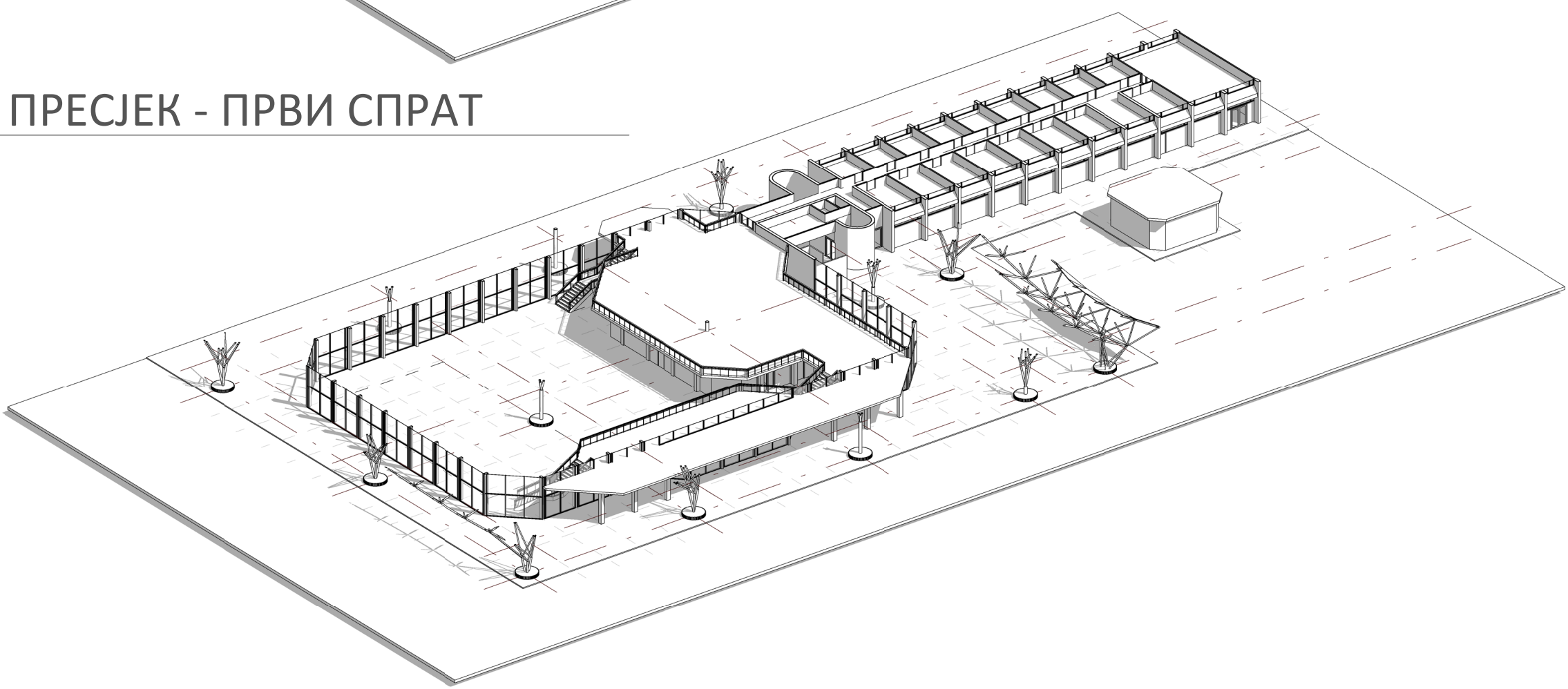
ЗД ПРЕСЈЕК - ПРИЗЕМЉЕ



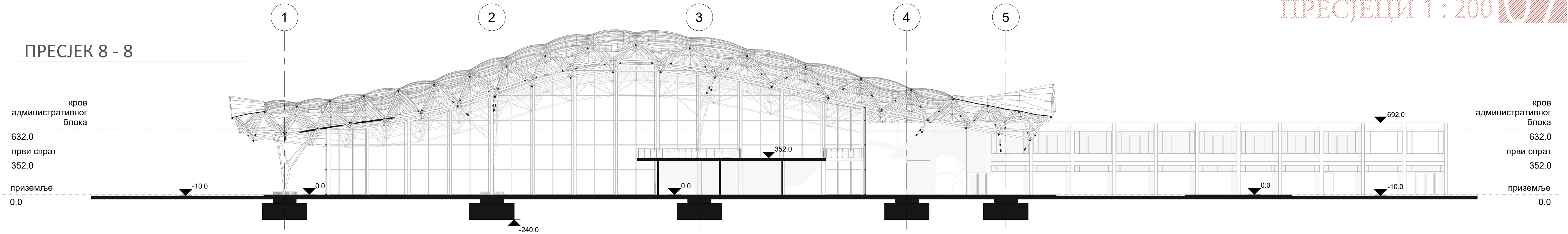
ПРЕСЈЕК 6 - 6



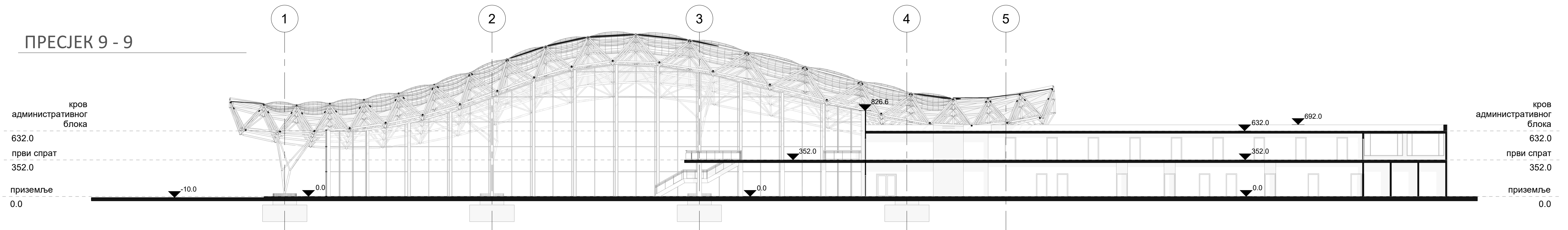
ЗД ПРЕСЈЕК - ПРВИ СПРАТ



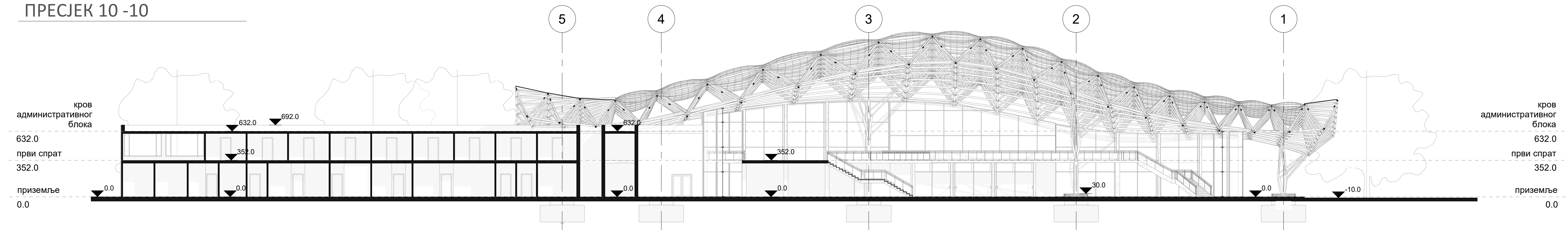
ПРЕСЈЕК 8 - 8

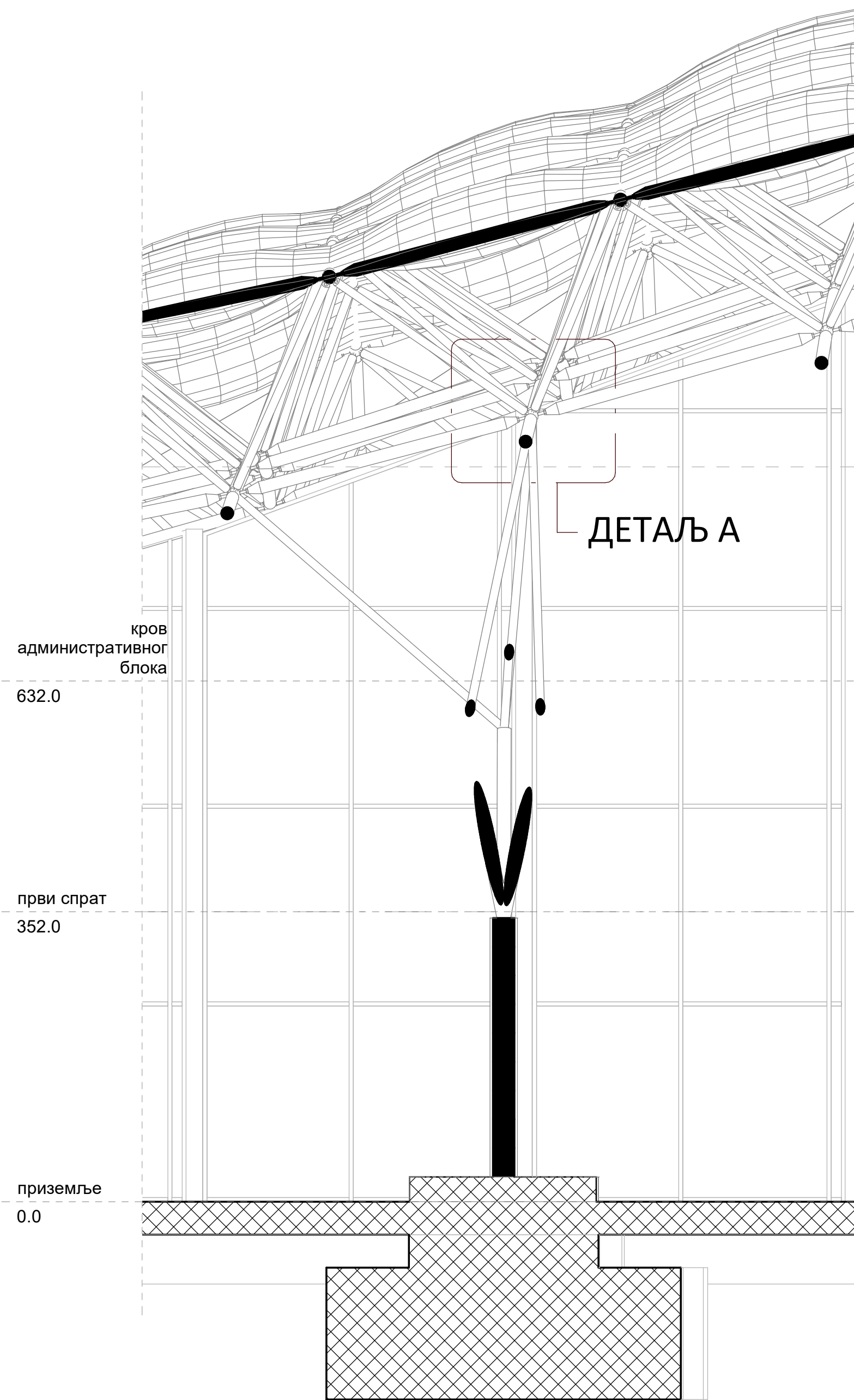


ПРЕСЈЕК 9 - 9

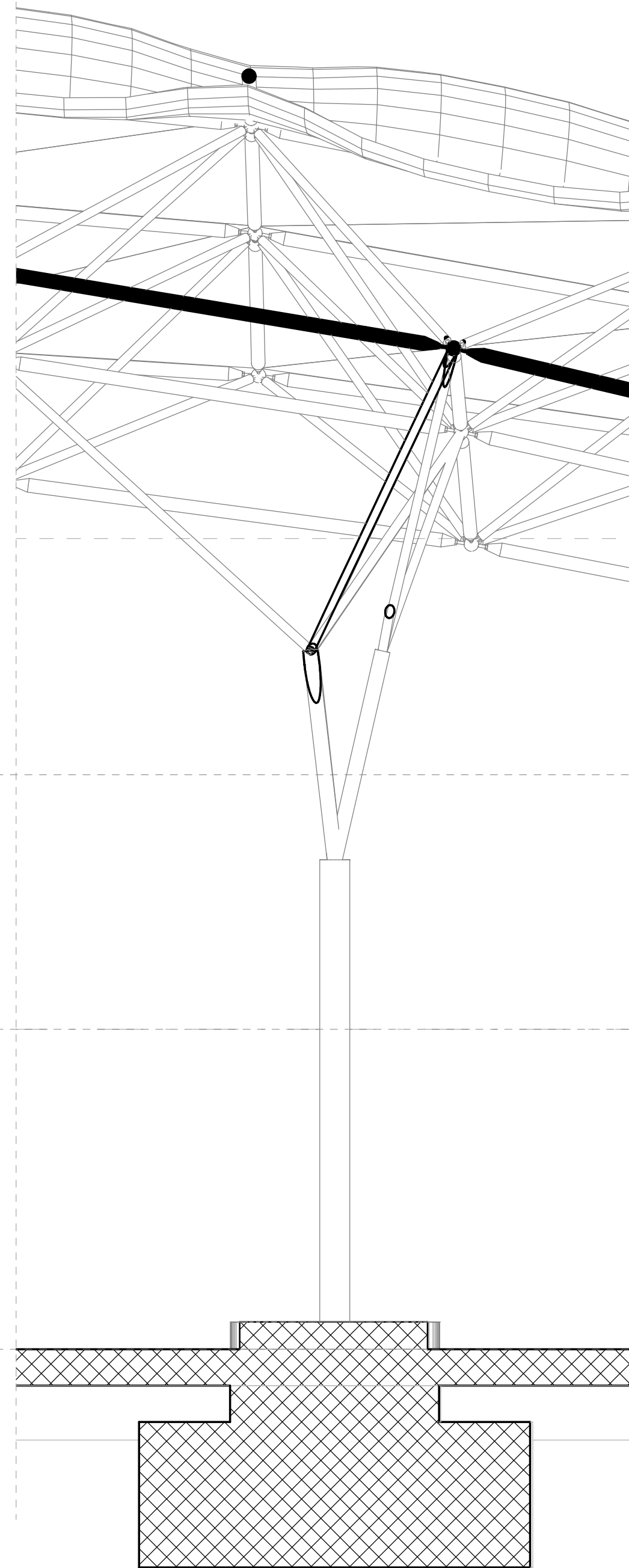


ПРЕСЈЕК 10 -10

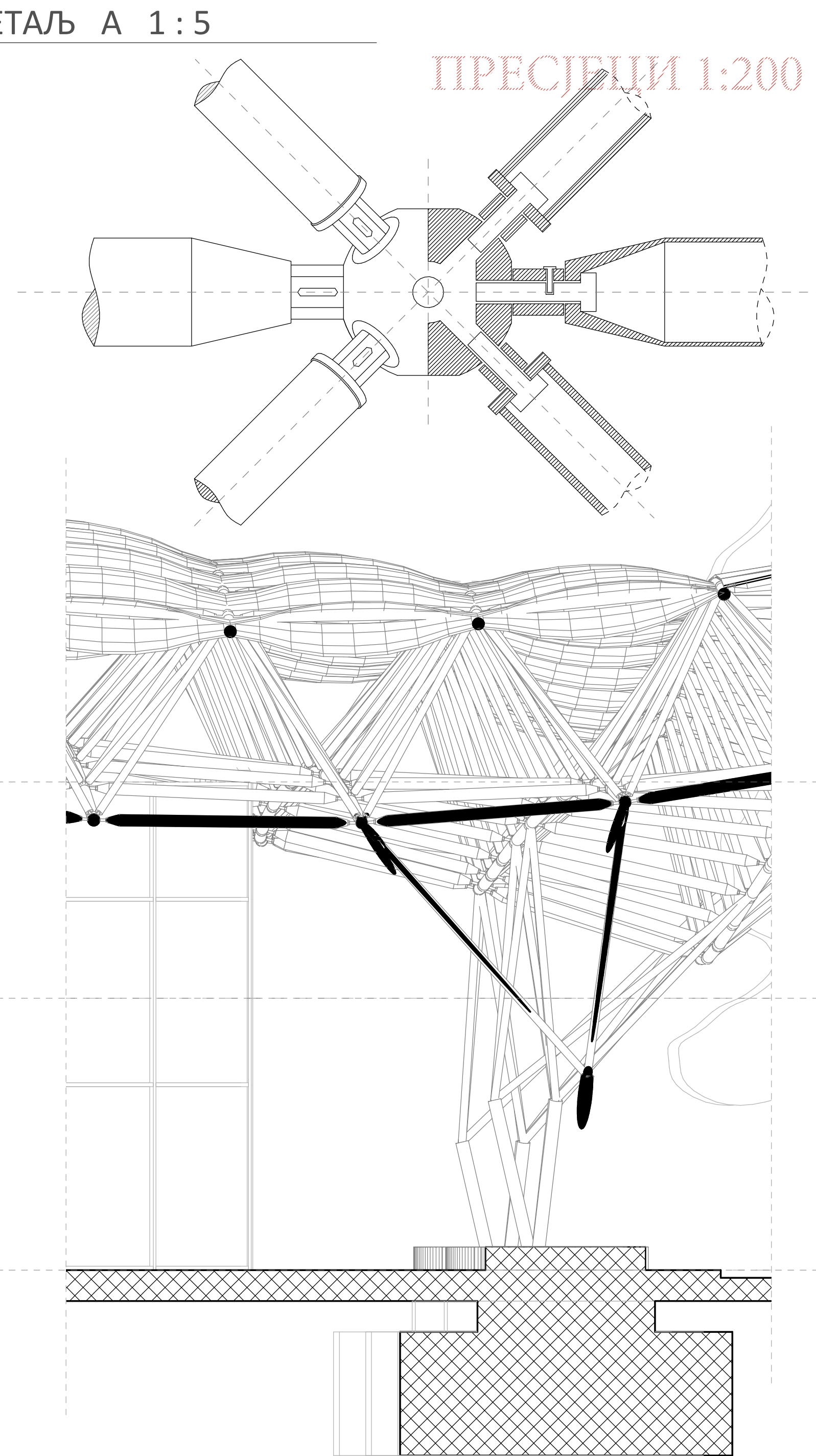




ПРЕСЈЕК А - А

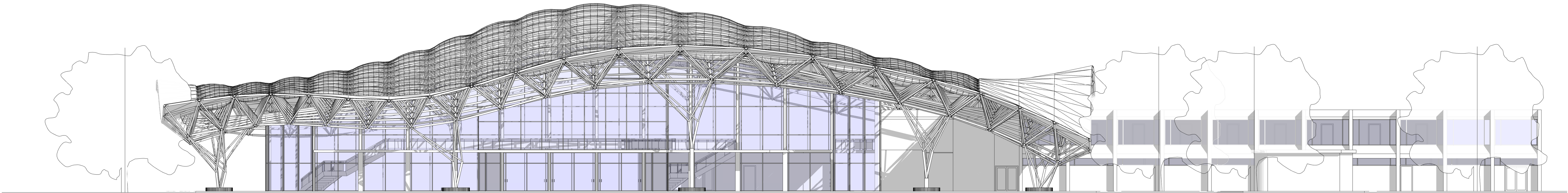


ПРЕСЈЕК Б - Б

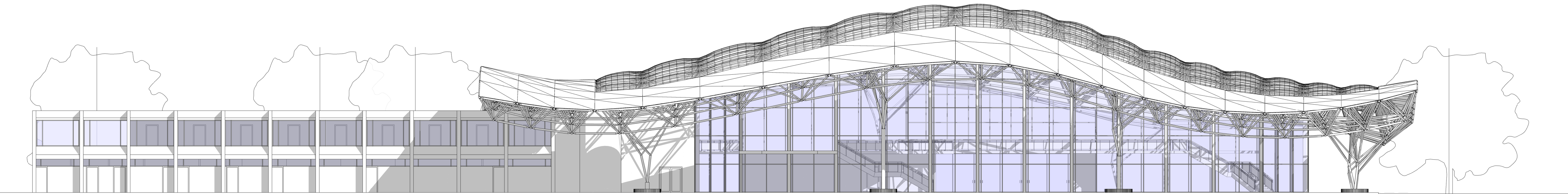


ПРЕСЈЕК В - В

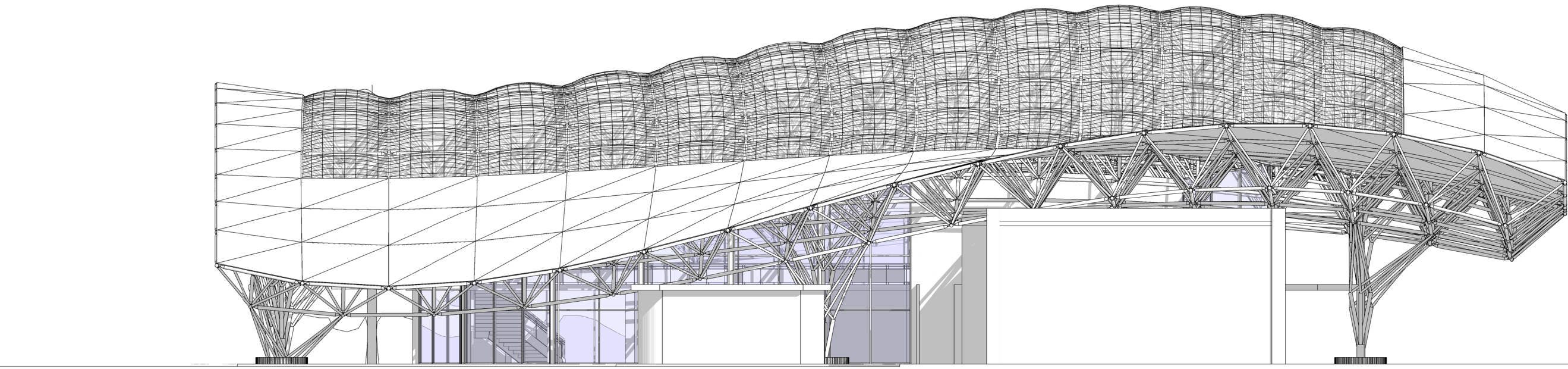
ЈУЖНА ФАСАДА 1 : 200



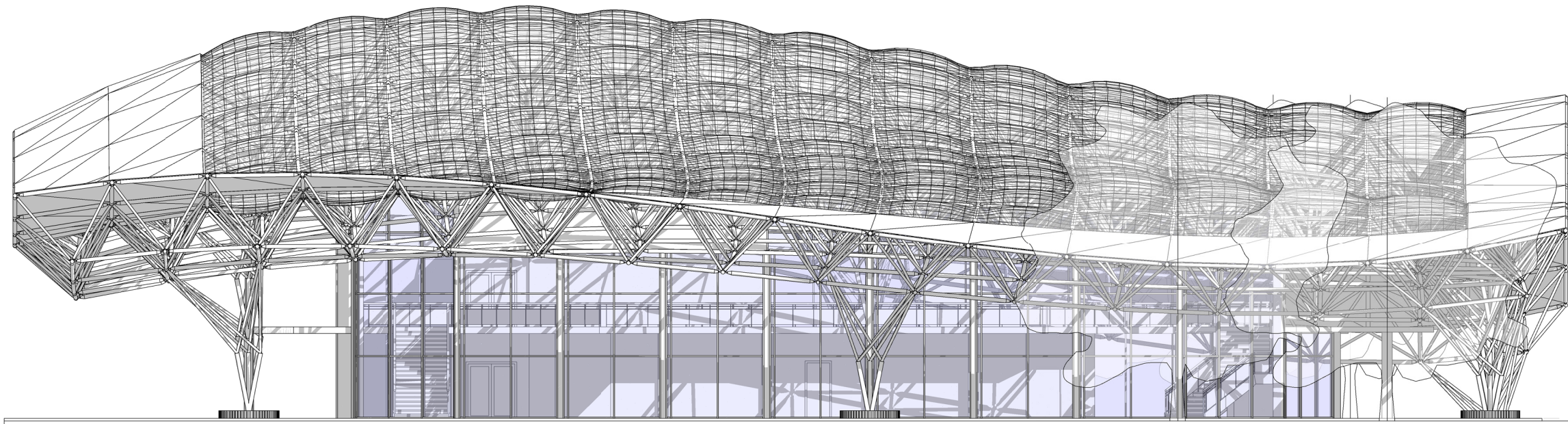
СЈЕВЕРНА ФАСАДА 1 : 200



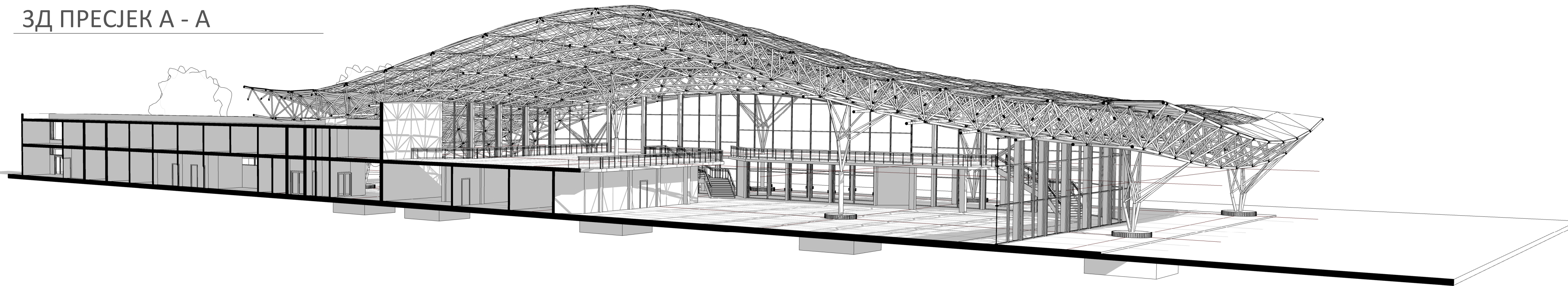
ИСТОЧНА ФАСАДА 1 : 200



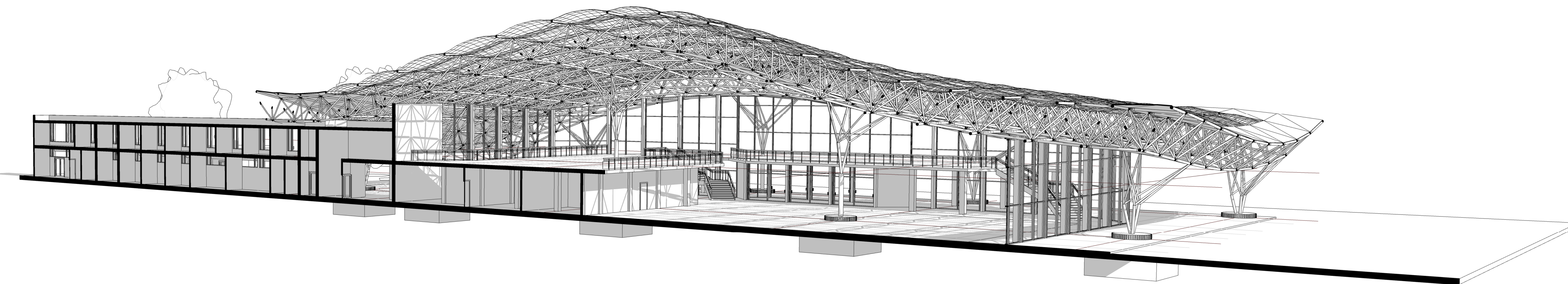
ЗАПАДНА ФАСАДА 1 : 200



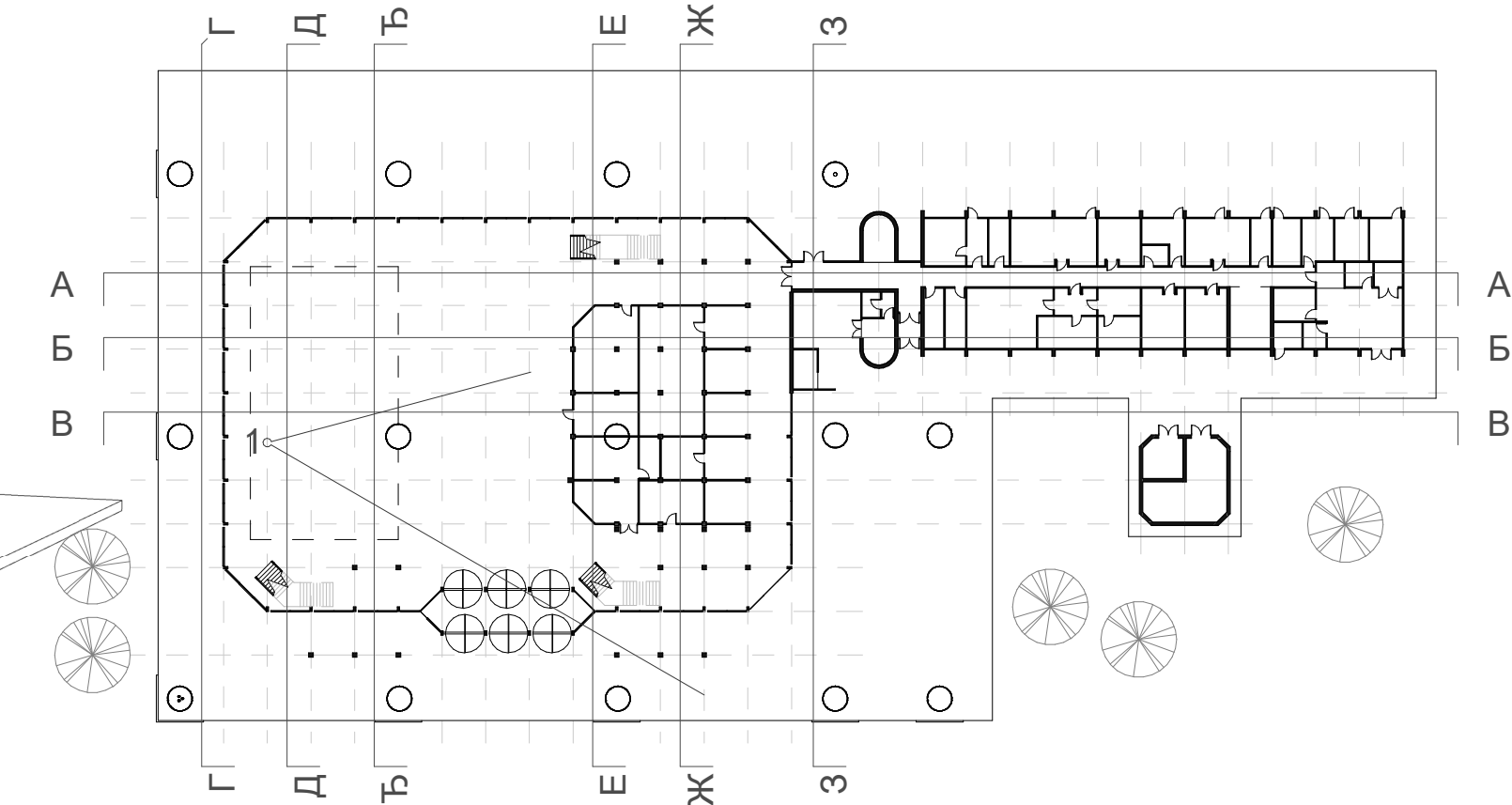
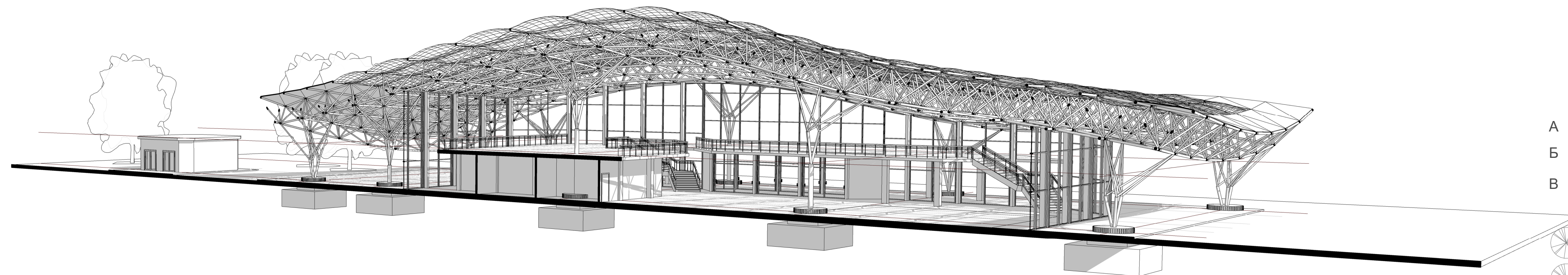
ЗД ПРЕСЈЕК А - А



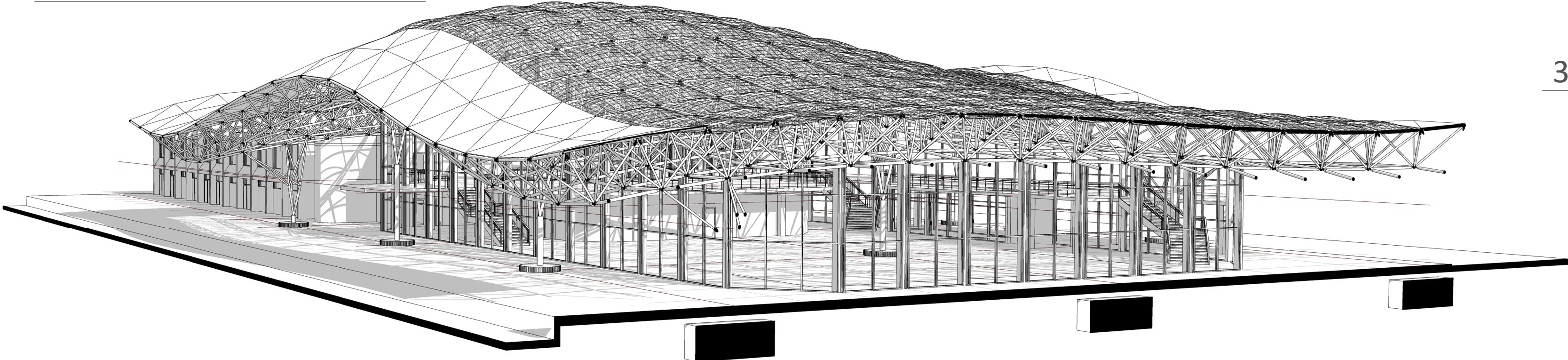
ЗД ПРЕСЈЕК Б-Б



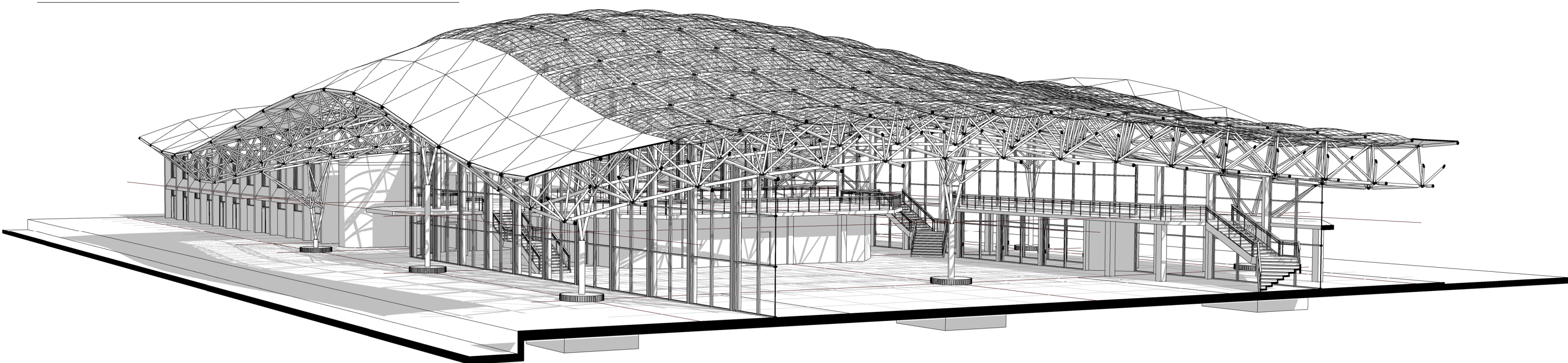
ЗД ПРЕСЈЕК В - В



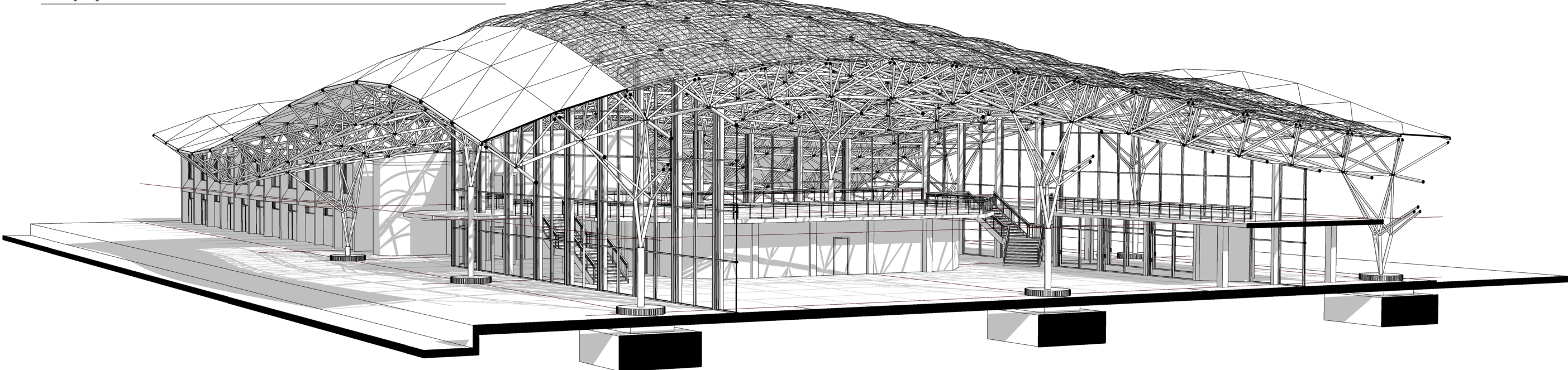
ЗД ПРЕСЈЕК Г - Г



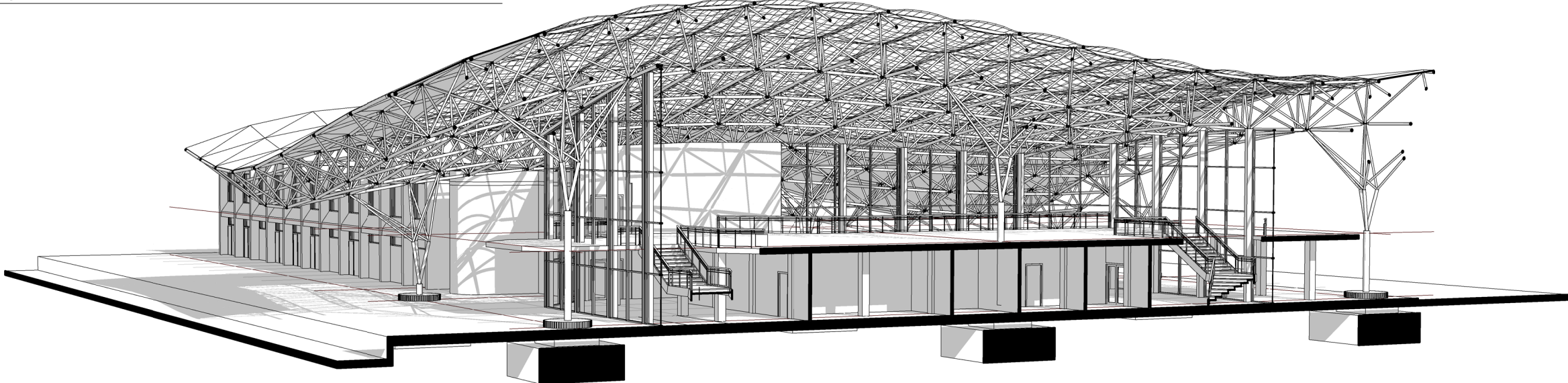
ЗД ПРЕСЈЕК Д - Д



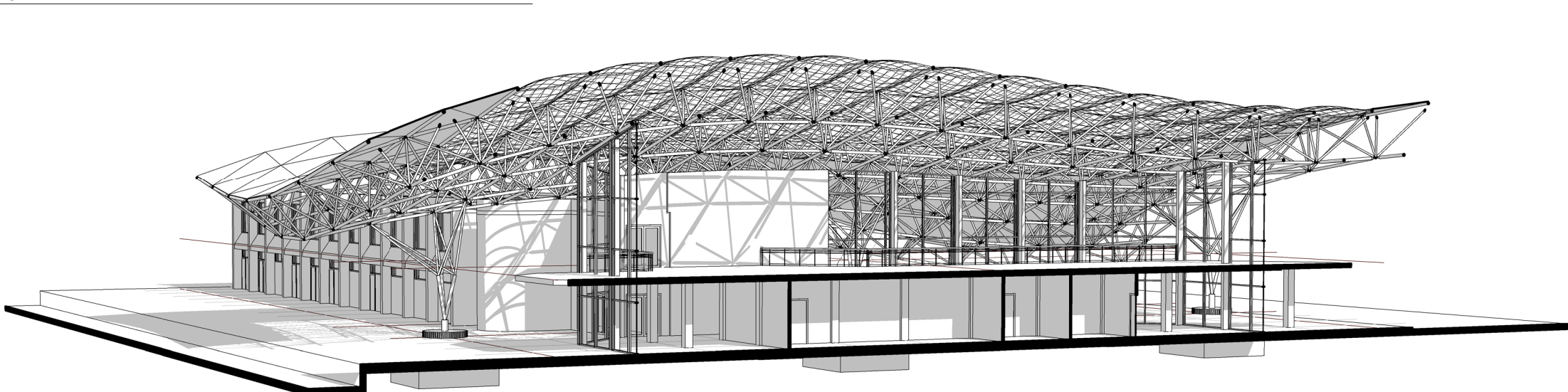
ЗД ПРЕСЈЕК Ђ - Ђ



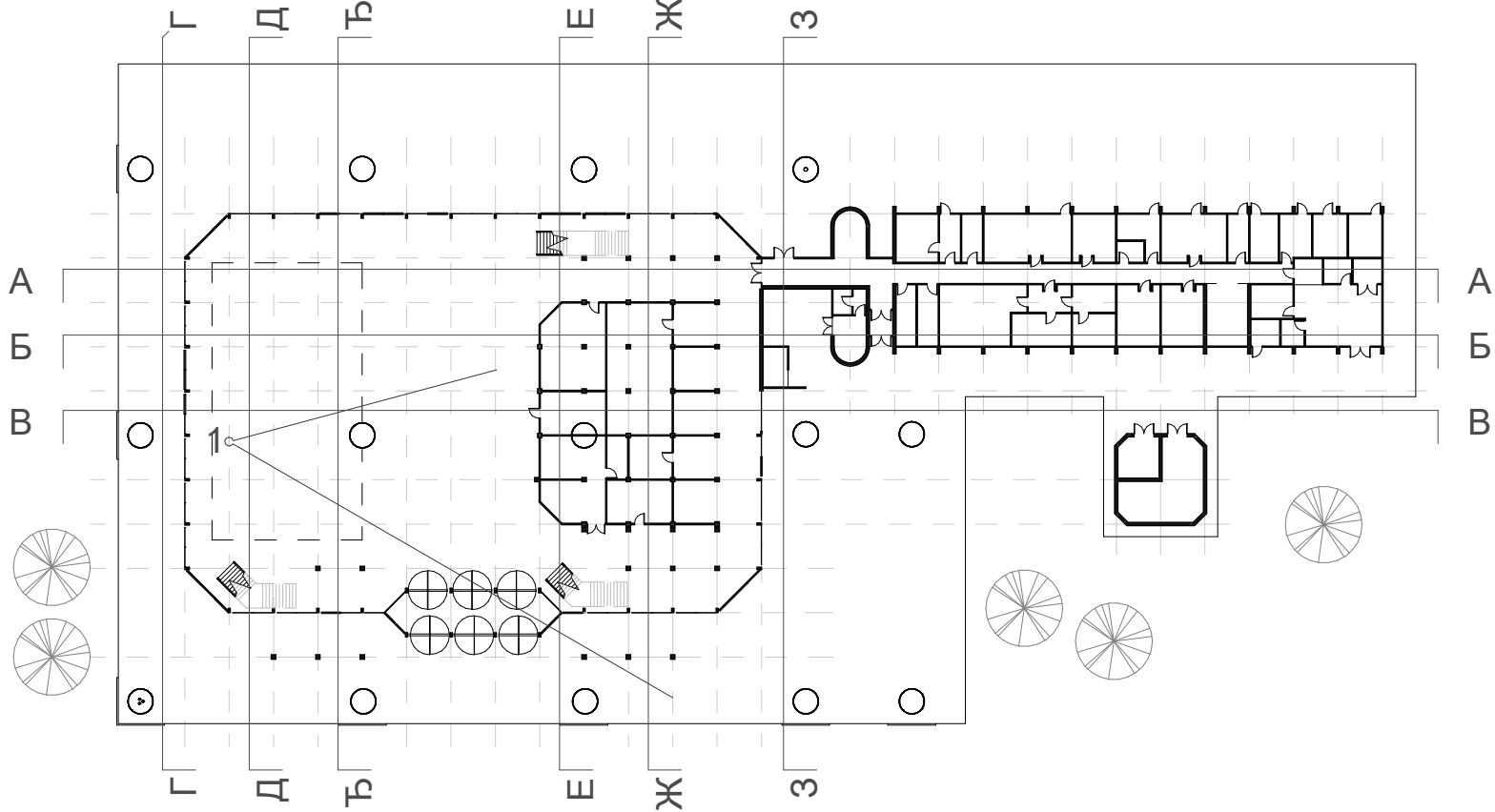
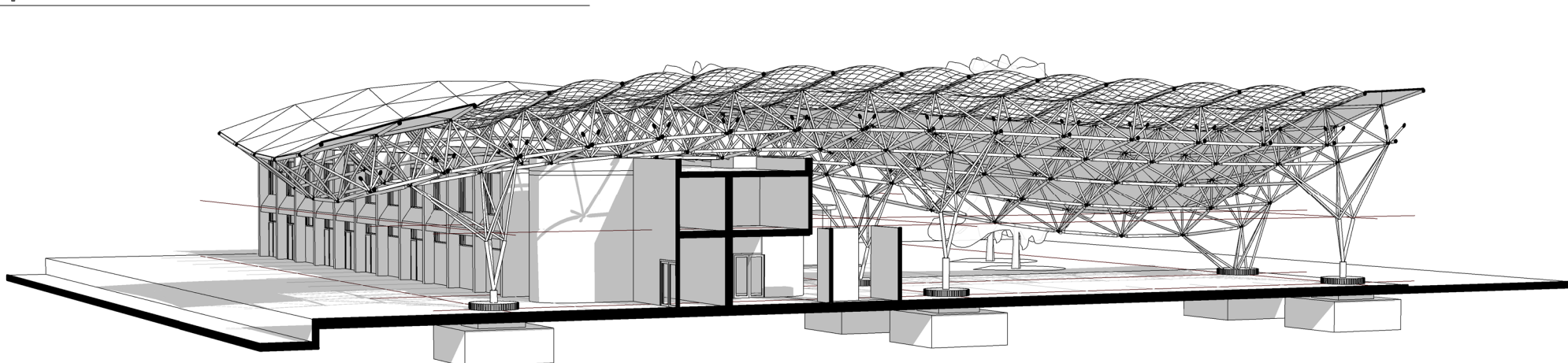
ЗД ПРЕСЈЕК Е - Е

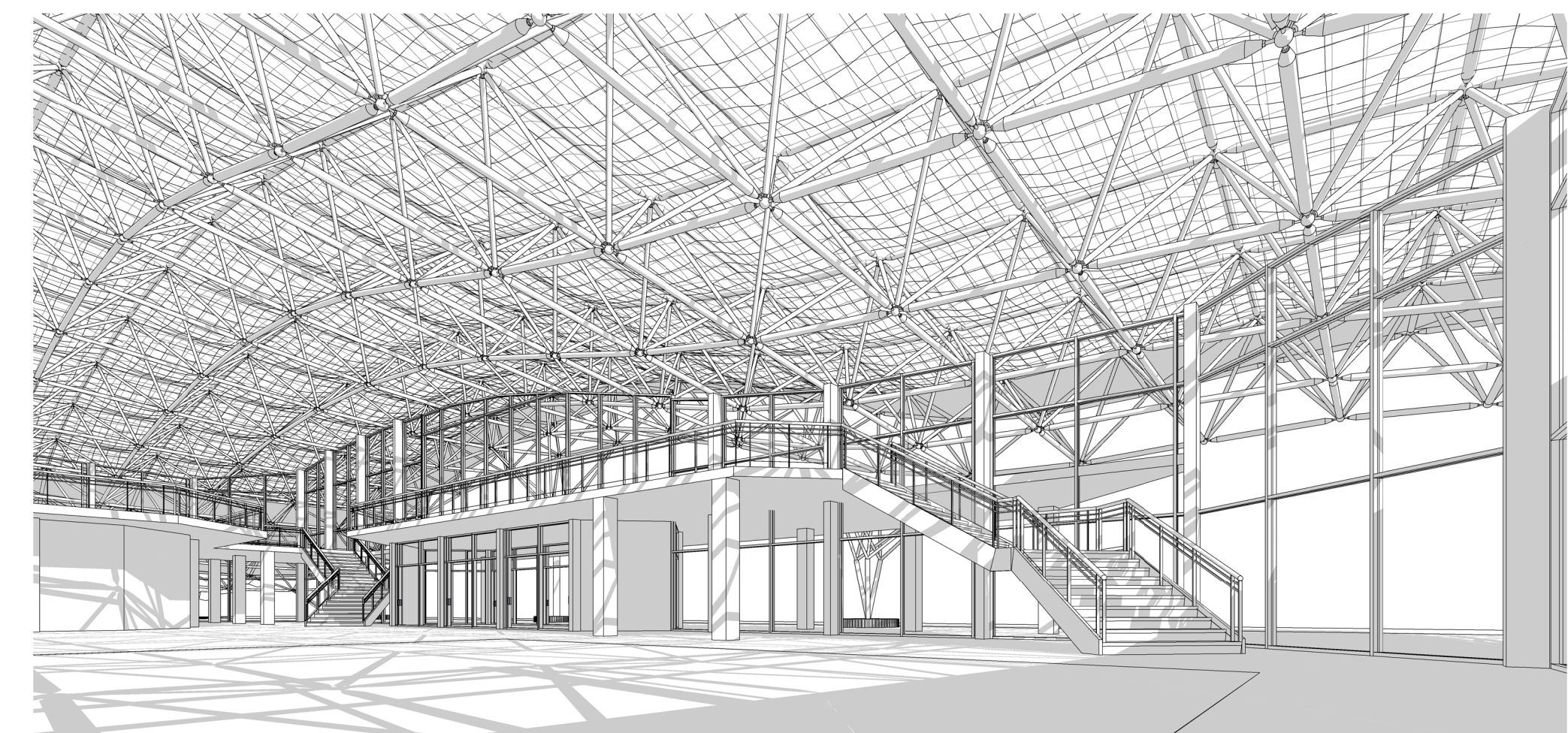
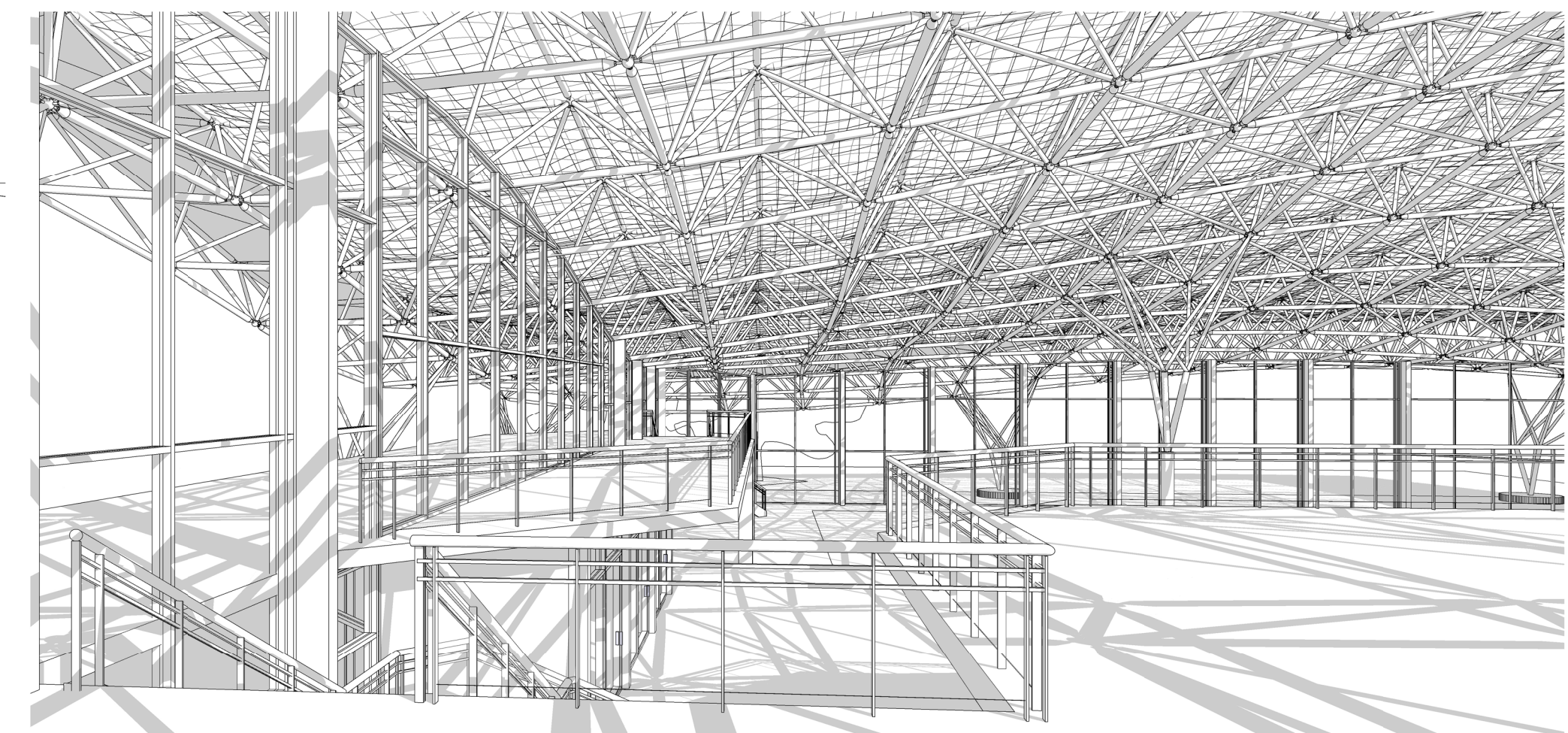
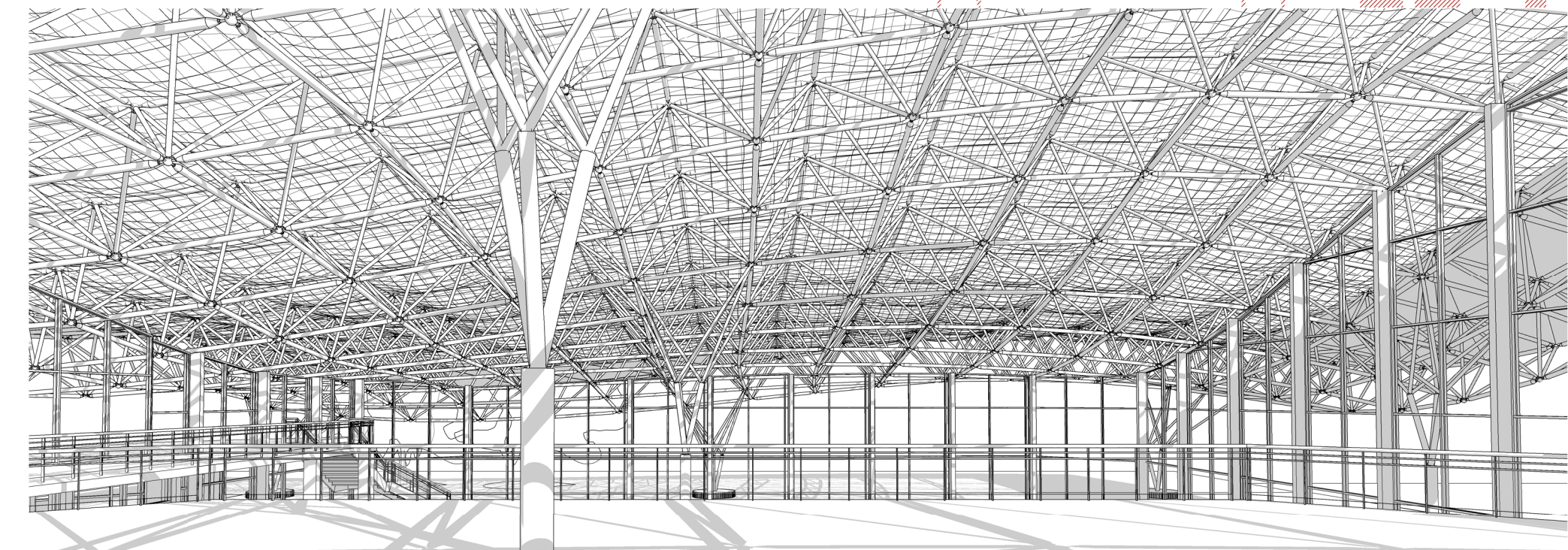
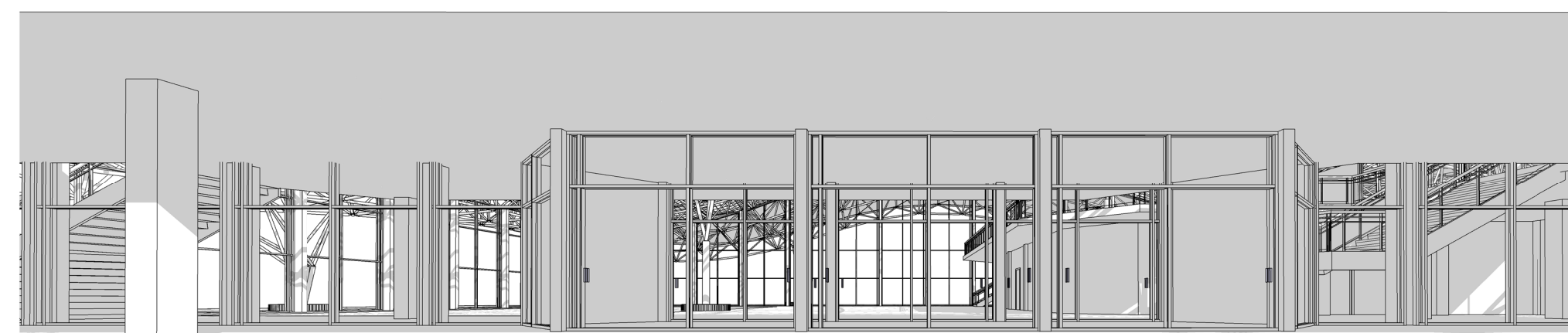
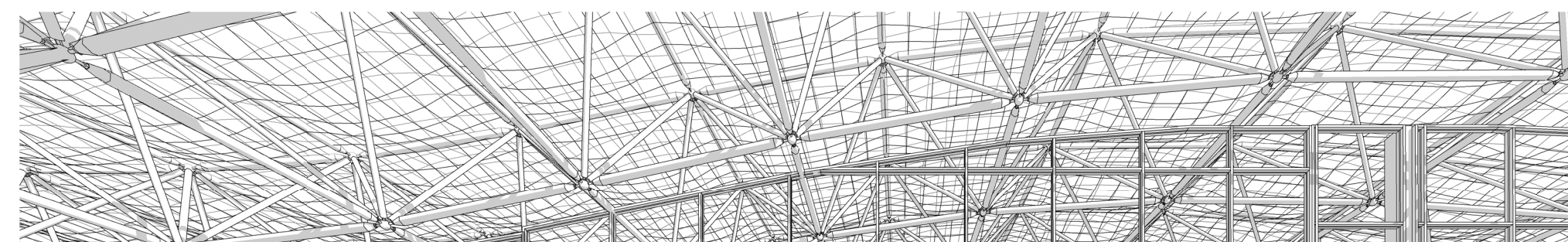
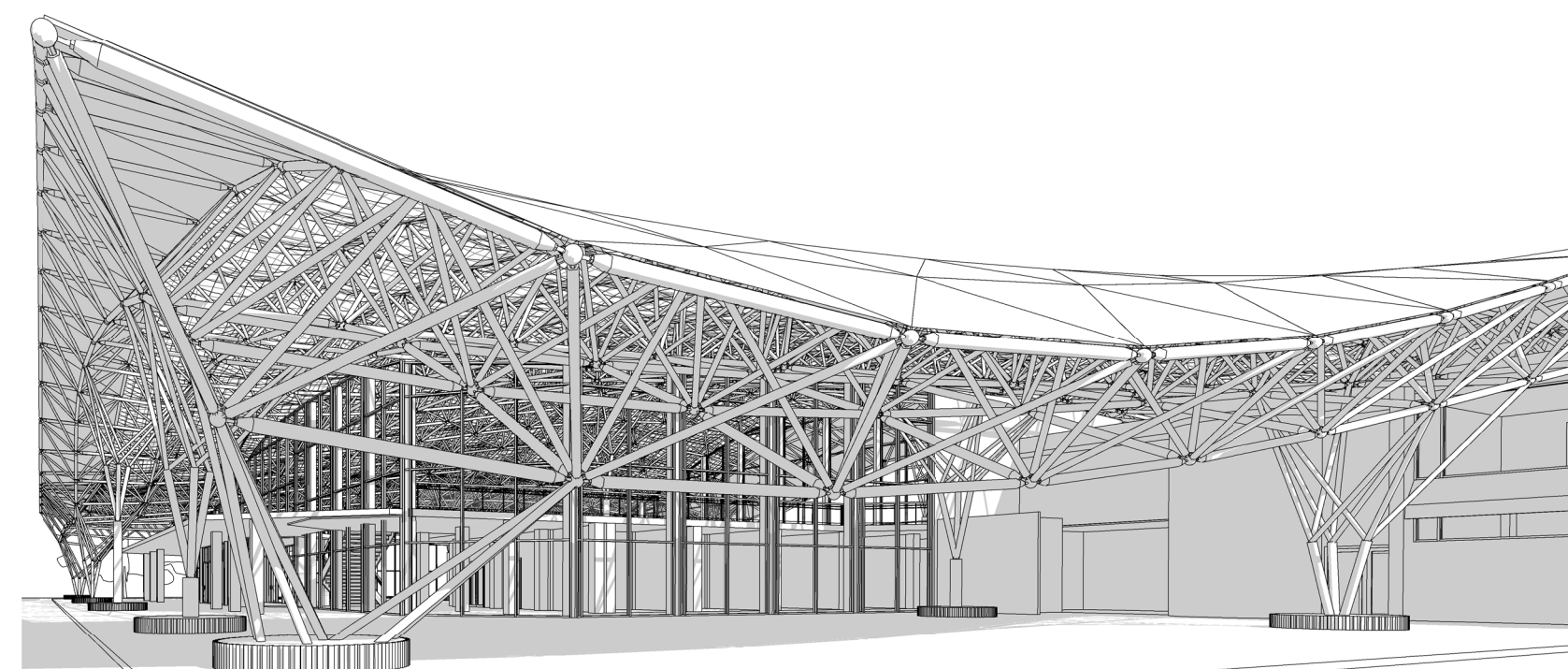
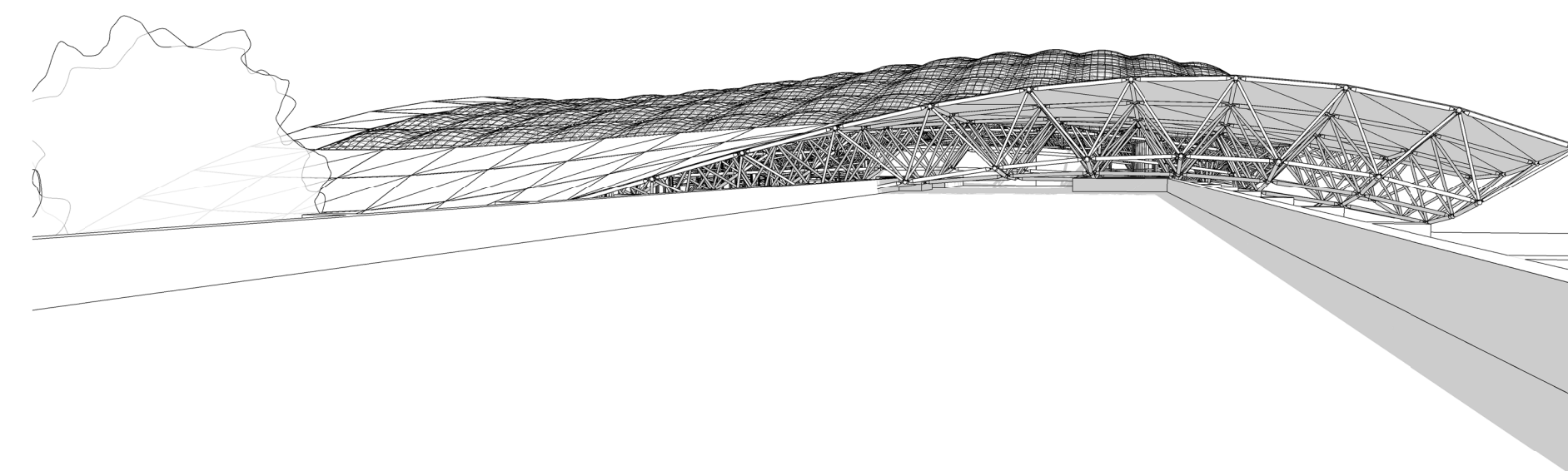


ЗД ПРЕСЈЕК Ж - Ж



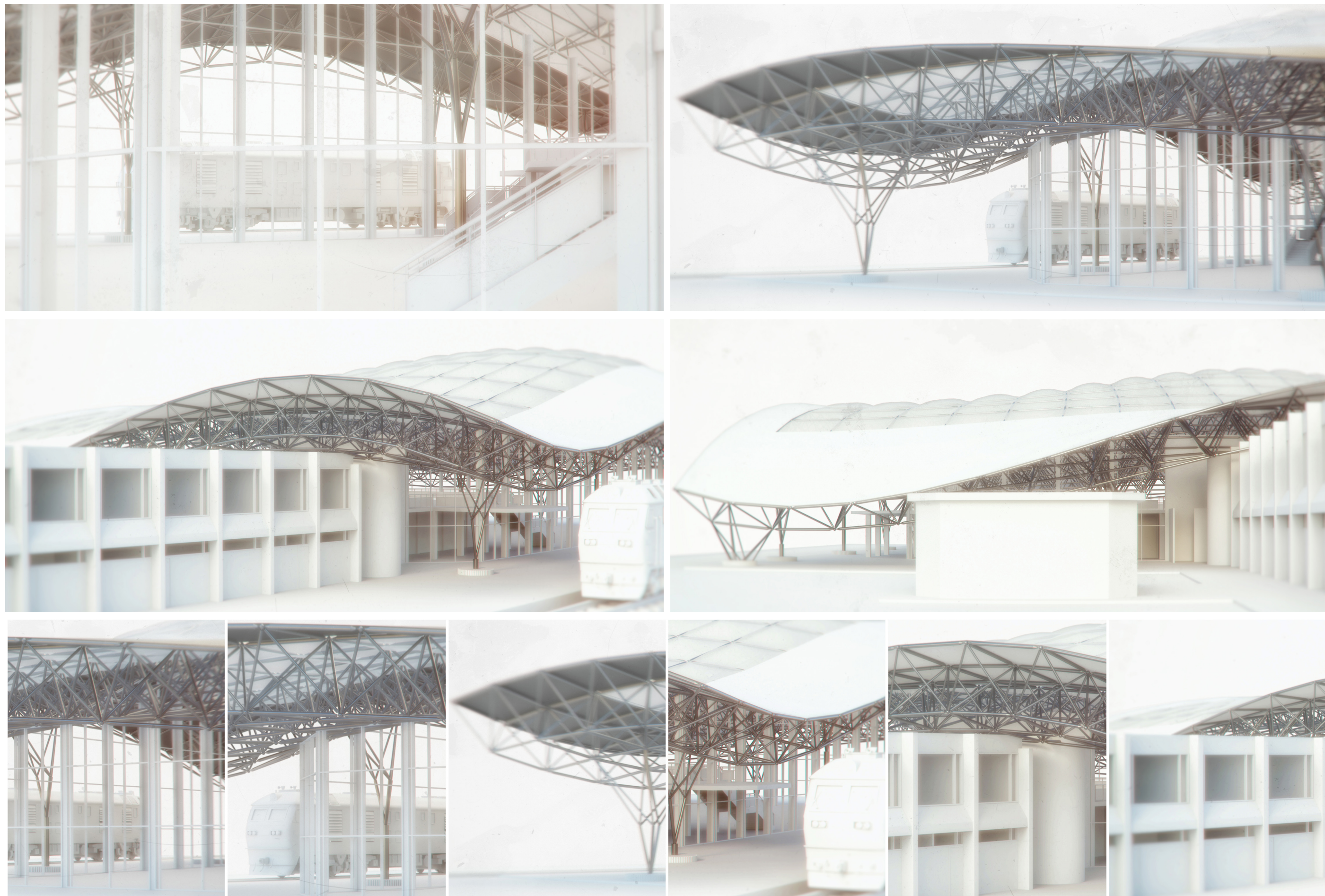
ЗД ПРЕСЈЕК З - З



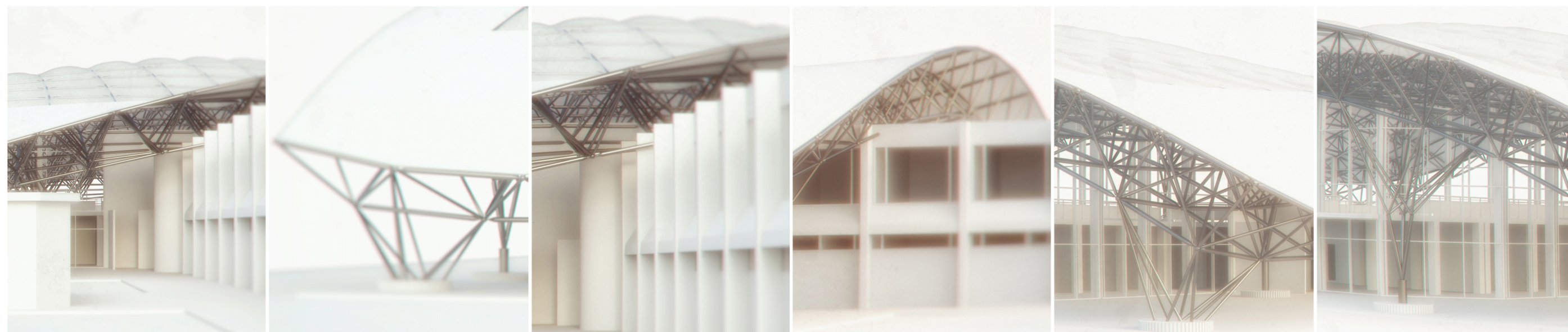
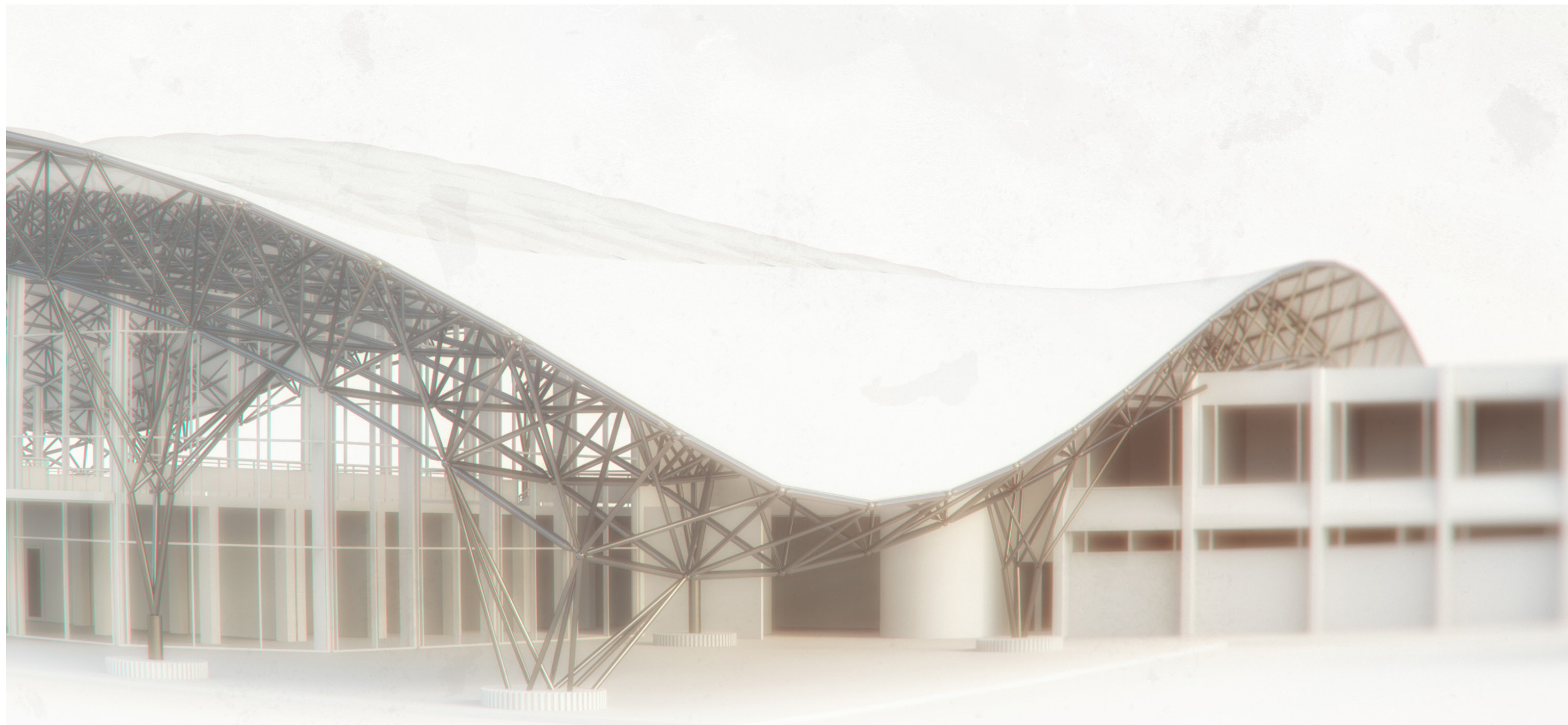




Слика 165. Истраживање обликовања кровне конструкције. Приказ концептуалног рјешења кровне конструкције жељезничке станице у Бањој Луци. Илустрација М. Кољанчић.



Слика 166. Истраживање обликовања кровне конструкције. Приказ концептуалног рјешења кровне конструкције жељезничке станице у Бањој Луци. Илустрација М. Кољанчић.



Слика 167. Истраживање обликовања кровне конструкције. Приказ концептуалног рјешења кровне конструкције жељезничке станице у Бањој Луци. Илустрација М. Кољанчић.



IV ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА



12.0 АРХИТЕКТОНСКЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ ДИГИТАЛНОГ ПРОЈЕКТОВАЊА И ЗАКЉУЧАК

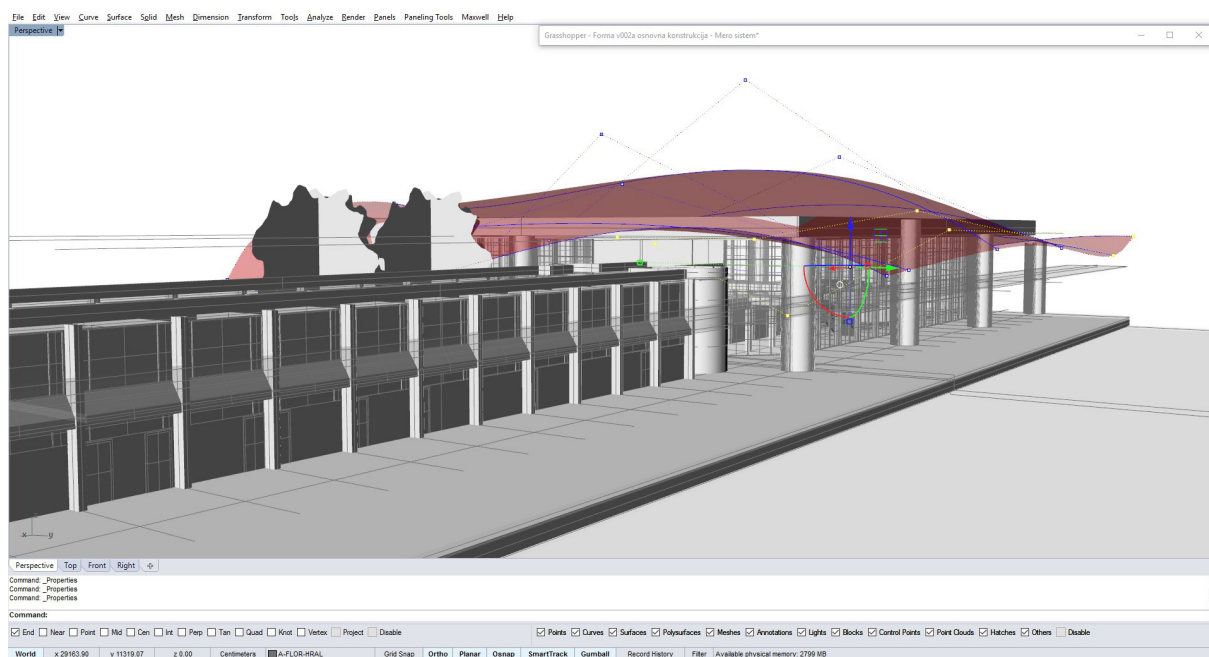
12.1 ПРАКТИЧНА УПОТРЕБА ПРОЦЕДУРАЛНОГ МОДЕЛОВАЊА ПРОСТОРНЕ РЕШЕТКЕ НА СЛОБОДНОЈ АРХИТЕКТОНСКОЈ ФОРМИ

Узимајући у обзир комплексност геометрије конструкције, лако се може закључити да традиционални приступ дводимензионалног документовања дизајна неће дати жељене резултате. Да би се обезбједила ефикасност у раним фазама тражења оптималне форме, па све до израде техничке документације и доласка до потребних информација директно са модела конструкције, намеће се потреба за тражењем ефикаснијег приступа. Кроз истраживање историјских и савремених примјера конструкција просторне решетке на слободним формама идентификовани су изазови на које се може одговорити изградом дигиталног прототипа и примјеном приступа процедуралног моделовања.

Просторне решетке захтијевају изузетно висок ниво прецизности и контроле улазних параметара. Самим тим скрипте за процедурално моделовање потребно је разложити на низ мањих геометријских проблема примјеном *Divide and Conquer* приступа. Потребно је сагледати холистички саставне дијелове система у контексту већег проблема, у овом случају основне елементе конструкције у контексту цјелокупне конструкције и интеракција елемената попут штапова и чворних елемената. У наредном кораку битно је идентификовати улазне параметре у систем који се могу контролисати како би се дефинисале жељене карактеристике дизајна и испуниле све унапријед дефинисане особине стабилности, као и естетске карактеристике конструкције.

Кључни приступ изради студије случаја, пројекта реконструкције крова жељезничке станице, примијењен је систем процедуралног моделовања у одабраним дигиталним апликацијама, *Rhinoceros*, *Grasshopper 3D*, и *Revit*. Процедурална скрипта је у потпуности развијена у *Grasshopper 3D* апликацији. Ова апликација је одабрана јер је скалабилан систем са уграђеном подршком за све основне математичке операције рада са геометријом, подацима и скуповима.

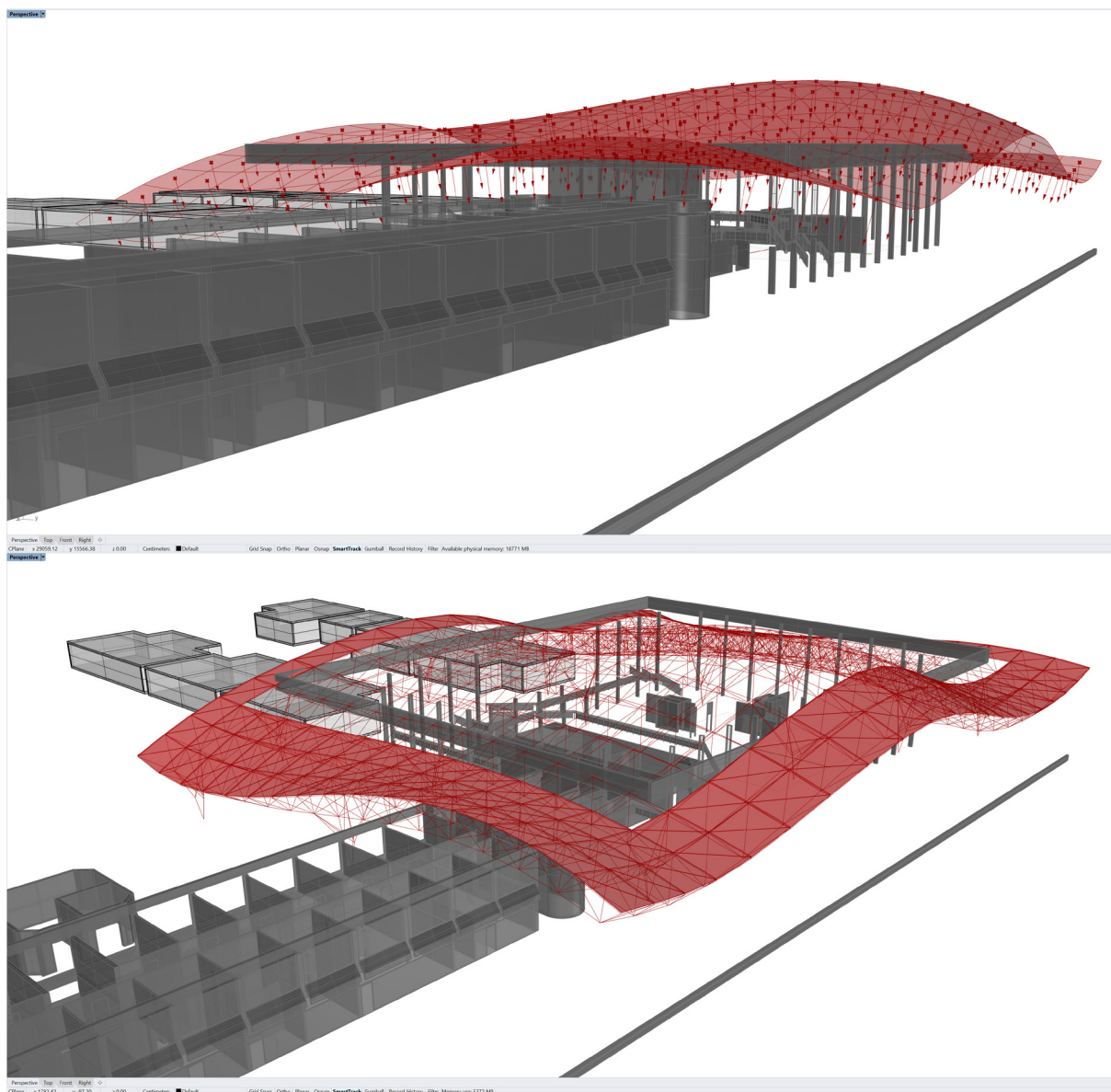
Први корак при моделовању комплексне просторне формације штапова и спојних елемената је дефинисање улазних параметара. Постоје двије врсте параметара који дефинишу улазне информације, геометријски и нумерички. Детаљним истраживањем



Слика 168. Процес израде процедуралног модела крова станице. Дефинисање архитектонског обликовања и избор првог улазног параметра, односно генератора система. Израдио Марко Кољанчић.

система двослојне просторне решетке и постављањем жељених критеријума које треба да испуни кров станице уочено је да је потребно прво математички дефинисати форму крова и да је први улазни низ промјенљивих геометријски. Геометријски параметри су у функцији дефинисања форме крова коју ће пратити просторна решетка. Састоји се од ограниченог низа равних или кривих линија које представљају попречне пресеке будуће форме крова. Потребне су минимално двије линије пресека. Ова форма ће бити подијељена на нумерички контролисан број поља која ће чинити основу за дефинисање димензија поља просторне решетке (слика 168). Скрипти се додјељује низ (минимум двије) криве које могу бити просторно закривљене у све три димензије. Представљају попречне пресеке минималне математичке површи у простору. Затим се површ дијели на низ поља која узимају у обзир закривљеност и позицију основне форме.

Параметри који дефинишу број подјела, односно, број поља, горњег слоја решетке су нумерички (цјелобројне вриједности). Циљ је формирање жичаног линијског модела (слика 169) који зависи од горе наведених улазних информација. Подјела аморфне површи резултира низом сличних површи које имају закривљене ивице. Да би се формирали правилни геометријски облици и уједначила дужина штапова потребно је свести закривљену форму на подјелу уједначених поља. Потребно је превести осовине штапова

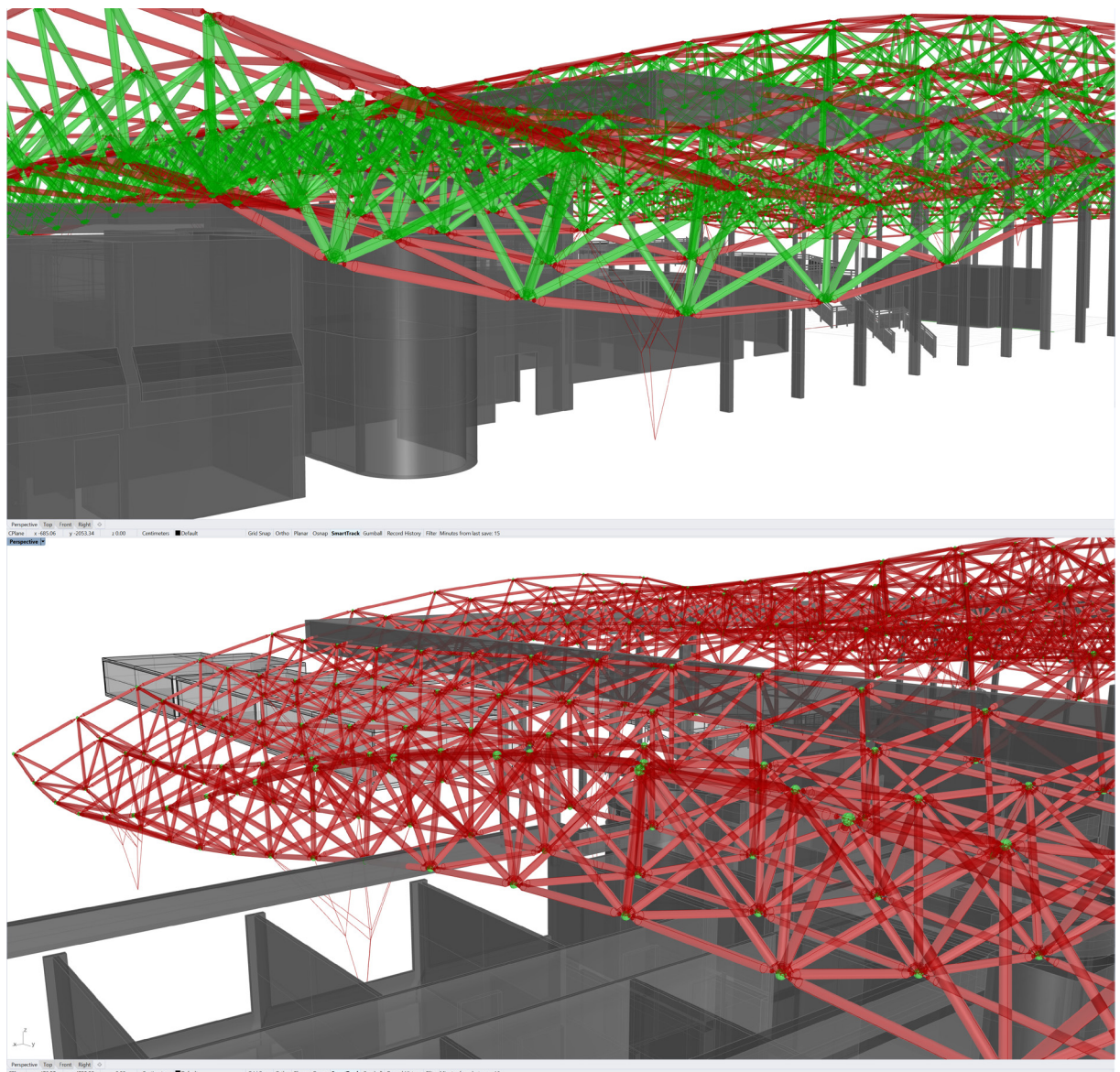


Слика 169. Процес израде процедуралног модела крова станице. Формирање жичаног модела просторне решетке на основу закривљене форме крова станице. Израдио Марко Кољанчић.

горње зоне у равне линијске облике, односно дужи да би опонашали закривљење форме крова. Наредни корак је тестирање и анализирање аморфних површи поља у простору са циљем проналаска центроида и вектора ортогоналног у односу на посматрано тежиште. Вектор нормале је јединични што га чини идеалним за проналажење одговарајућих тачака доњег слоја на начин да се тежишта горњих поља просторно транслатирају увођењем параметра магнитуде вектора нормале. Ова нумеричка улазна вриједност дефинише дубину просторне решетке у домену цијеле површине форме. Спајањем одговарајућих индексираних тачака добија се “жичани модел” (слика 169) аморфне двослојне просторне решетке.

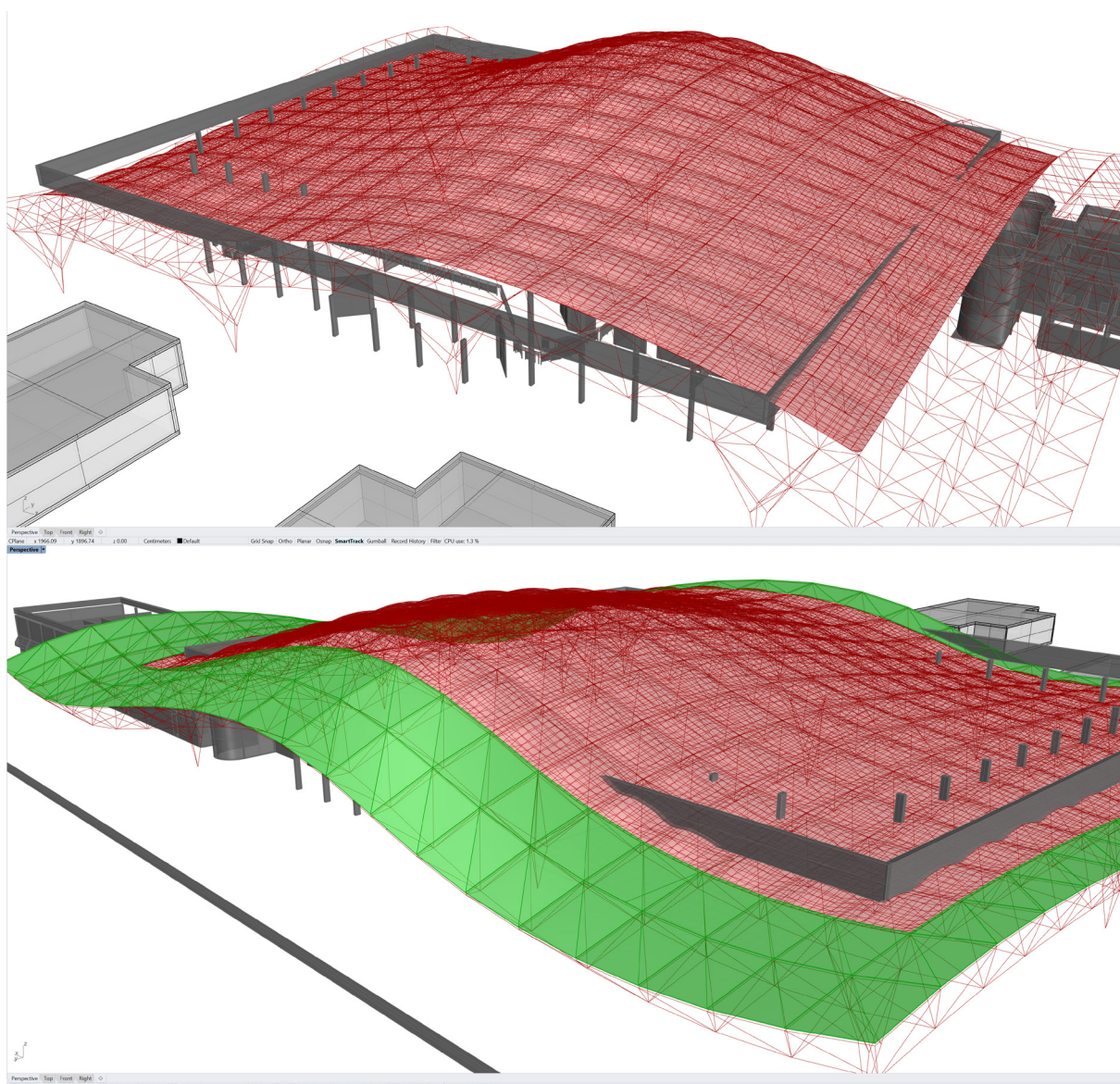
На основу овог модела могуће је додавати индивидуалне мање система као што је процедурално моделовање штапа просторне решетке заснованог на дужи у простору. Када се сви блокови процедуралних скрипти примјене и добије жељени резултат тада се могу, између њих, имплементирати разни алгоритми за провјеравање грешке, ограничавање вриједности параметара у дозвољеним распонима и алгоритми за оптимизацију дизајна као што су генетички алгоритми са еволуционом стратегијом за проналажење најправилније подјеле просторно закривљене површи на четвороуглове.

Трећи корак чини низ процедура за аутоматизовано процедурално моделовање



Слика 170. Процес израде процедуралног модела крова станице. Метро ТК штапови и чворни елементи процедурално моделовани и примјењени на жичани модел просторне решетке. Израдио Марко Кољанчић.

коначне геометрије штапова и чворних елемената просторне решетке. Овај корак је могућ јер у претходном је дефинисан жичани модел и позиције чворних елемената. С обзиром да је конструкција система Метро ТК, потребно је моделовати индивидуалне елементе штапова у слојевима и одвојено штапове који спајају слојеве конструкције. Скрипте за индивидуално моделовање ових конструктивних елемената су базиране тако да као улазни геометријски параметар користе дуж орјентисану у простору. Овај приступ обезбједио је да се скрипте за моделовање Метро ТК елемената система могу примјенити на цијели модел и дати жељене резултате аутоматски (слика 170). Примјер који се може видјети на слици (слици 170) састоји се од 2600 штапова приближно једнаких димензија. Идентичне димензије није могуће добити јер форма крова је двоструко закривљена неправилна површ.



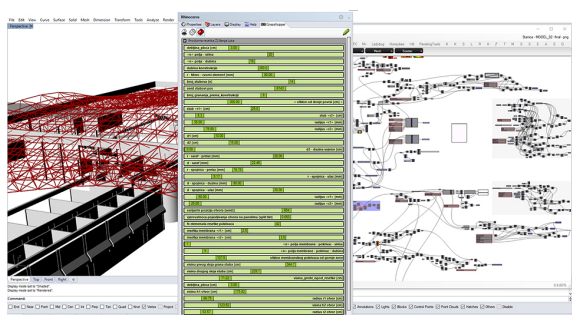
Слика 171. Процес израде процедуралног модела крова станице. ЕТФЕ кровни покривач изнад хола станице. Израдио Марко Кољанчић.

Мембрански ЕТФЕ покривач је употребљен како би се обезбједило дифузно зенитално освјетљење у холу станице. Овај елемент виртуелног модела је такође процедурално моделован и ограђен у скрипту. ЕТФЕ јастучасти покривач у пољима конструкције процедурално је дефинисан употребом “*Smart Form*” алоритма. .

Процедуралне скрипте врло брзо могу постати непрегледне и изузетно комплексне са стране одржавања и разумјевања свих зависности великог броја параметара. Из тог практичног разлога потребно је планирати систем и разложити га у цјелине који рјешавају конкретне мање проблеме и чији генератори алгорита су једноставни параметри као што је дуж у простору, одређена бројевна вриједност, нпр. радиус чворног елемента у односу на радијус штапа. Из овог разлога “*Divide and Conquer*” алгоритам је усвојен као најоптималнији приступ проблематици.

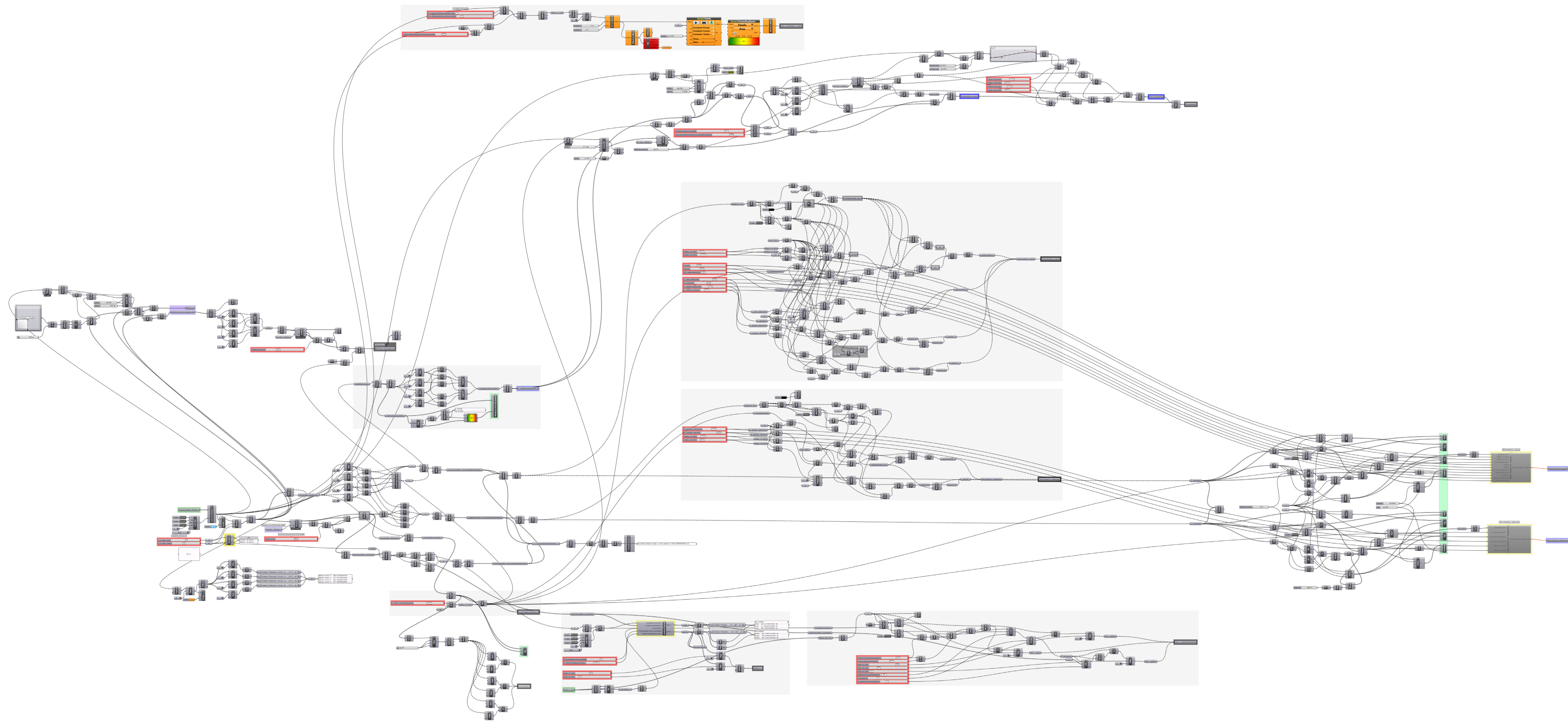
Процедурална скрипта развијена у склопу пројекта кровне конструкције (слика 173) подржава значајан број параметара који се могу унјети у систем и добити нове варијанте

дизајна, величине елемената, и тиме добити пуну контролу над дигиталним прототипом конструкције. Детаљи параметара могу се сагледати на слици 172.

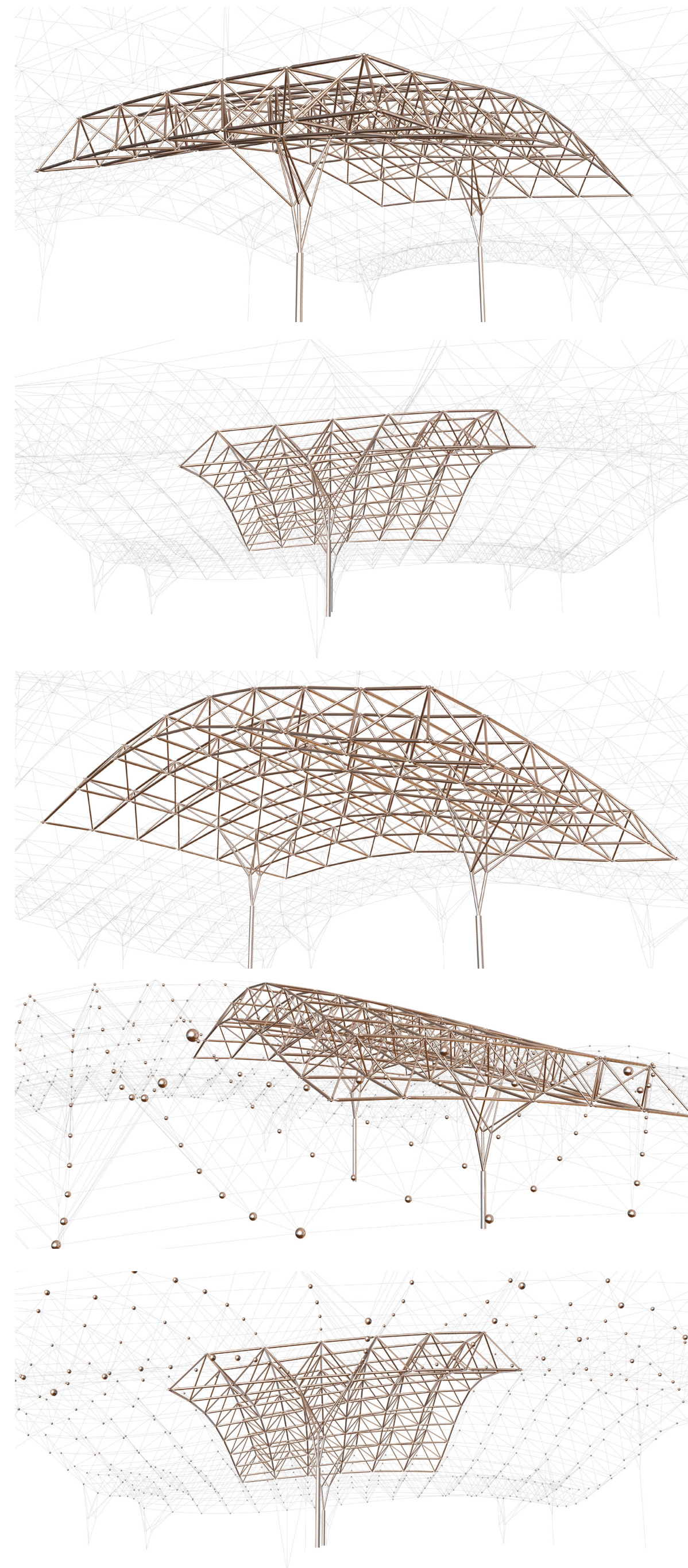


debljina_ploca [cm]	3.00
<n> polja - sirina	20
<n> polja - dubina	16
dubina konstrukcije	250.0
r - Mero - cvorni element [mm]	80.00
broj_stubova [n]	14
seed_stubovi_pos	6143
broj_grananja_prema_konstrukciji	8
	300.00 < otklon od donje povrsi [cm] >
stub <r1> [cm]	25.0
8.3	stub <r2> [cm]
35.00	radius <r1> [mm]
75.00	radius <r2> [mm]
d1 [cm]	10.00
d2 [cm]	15.00
0.00	d3 - duzina sojnice [cm]
r - saraf - prelaz [mm]	30.00
d - saraf [mm]	22.45
r - spojnica - prelaz [mm]	16.19
9.17	r - spojnica - ulaz [mm]
d - spojnica - duzina [mm]	80.00
d - spojnica - ulaz [mm]	30.00
50.00	radius <r1> [mm]
25.00	radius <r2> [mm]
varijante pozicija otvora (seed)	654
vjerovatnoca pojavljivanja otvora na panelima (split list)	0.650
N elemenata resetke pokrivaca	42
resetka membrana <r1> [cm]	2.5
resetka membrana <r2> [cm]	3.5
1	<n> polja membrane - pokrivac - sirina
5	<n> polja membrane - pokrivac - dubina
107.5	otklon membranskog pokrivaca od gornje zone
visina prvog sloja grana stuba [cm]	344.7
visina drugog sloja stuba [cm]	229.7
71.22	visina_grede_ispod_resetke [cm]
debljina_ploca [cm]	3.00
visina h1 otvor [cm]	175.92
66.75	radius r1 otvor [cm]
123.52	visina h2 otvor [cm]
63.57	radius r2 otvor [cm]

Слика 172. Приказ скрипте за дефинисање аморфне двослојне просторне решетке. На слици се могу видјети “*Rhino*” и “*Grasshopper 3D*” апликације. Нумерички улазни параметри у систем су приказани увећано на доњој слици. Израдио М. Кољанчић.



Слика 173. Коначна логичка процедурална скрипта за моделовање двослојне просторне решетке слободне форме крова жељезничке станице у Бањој Луци са свим припадајућим елементима.Скрипту израдио М. Кољанчић.

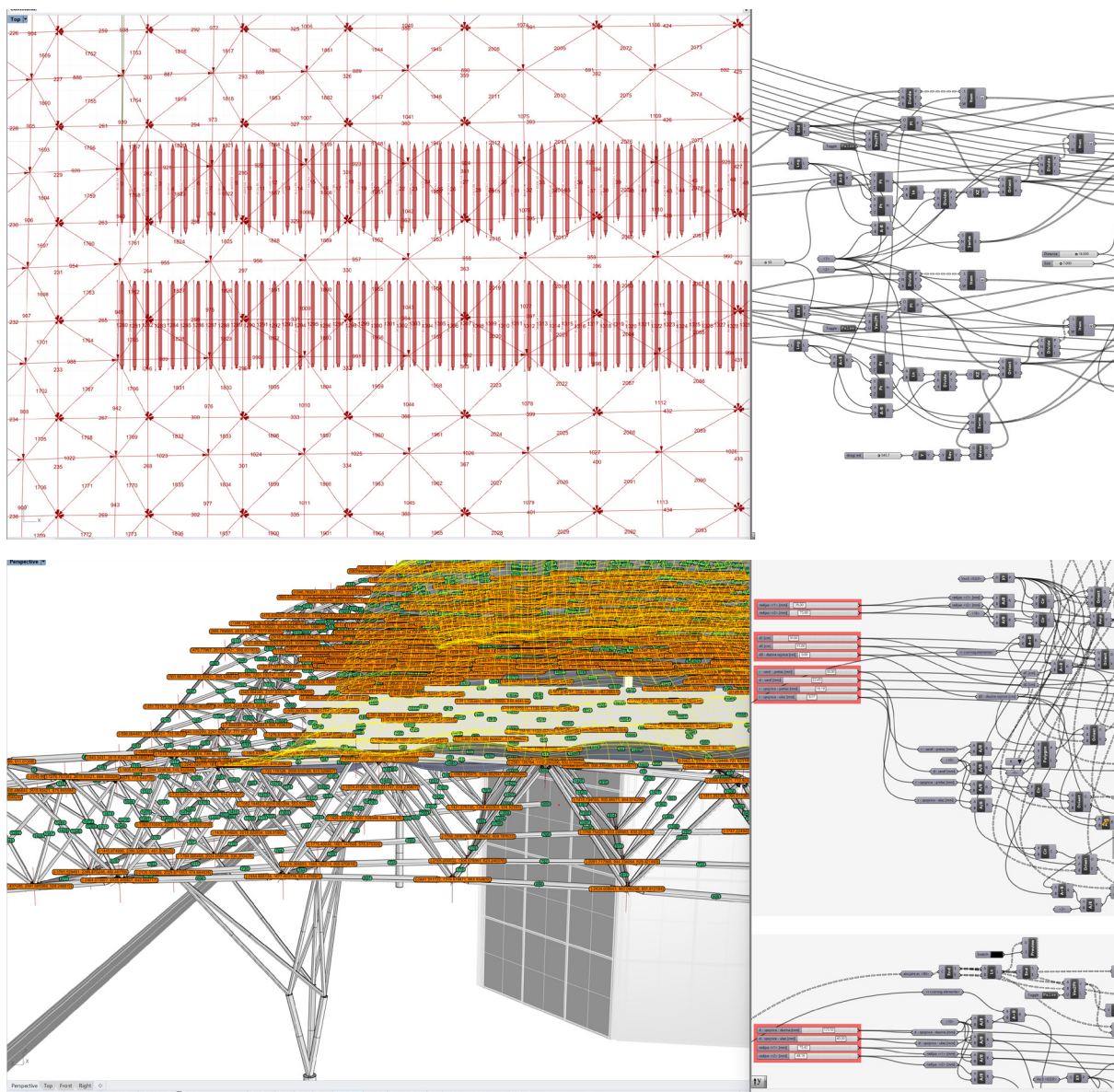


Слика 170. Изолован сегмент конструкције аморфне просторне решетке посматран у контексту жичаног модела осовина свих аксијалних елемената. Примјер је резултат моделовања просторне решетке на крову жељезничке станице у Бањој Луци. Модел израдио М. Кољанчић.

12.2 МОГУЋНОСТИ ПРОЦЕДУРАЛНОГ ДОЛАСКА ДО ДОДАТНИХ ИНФОРМАЦИЈА О КОНСТРУКЦИЈИ

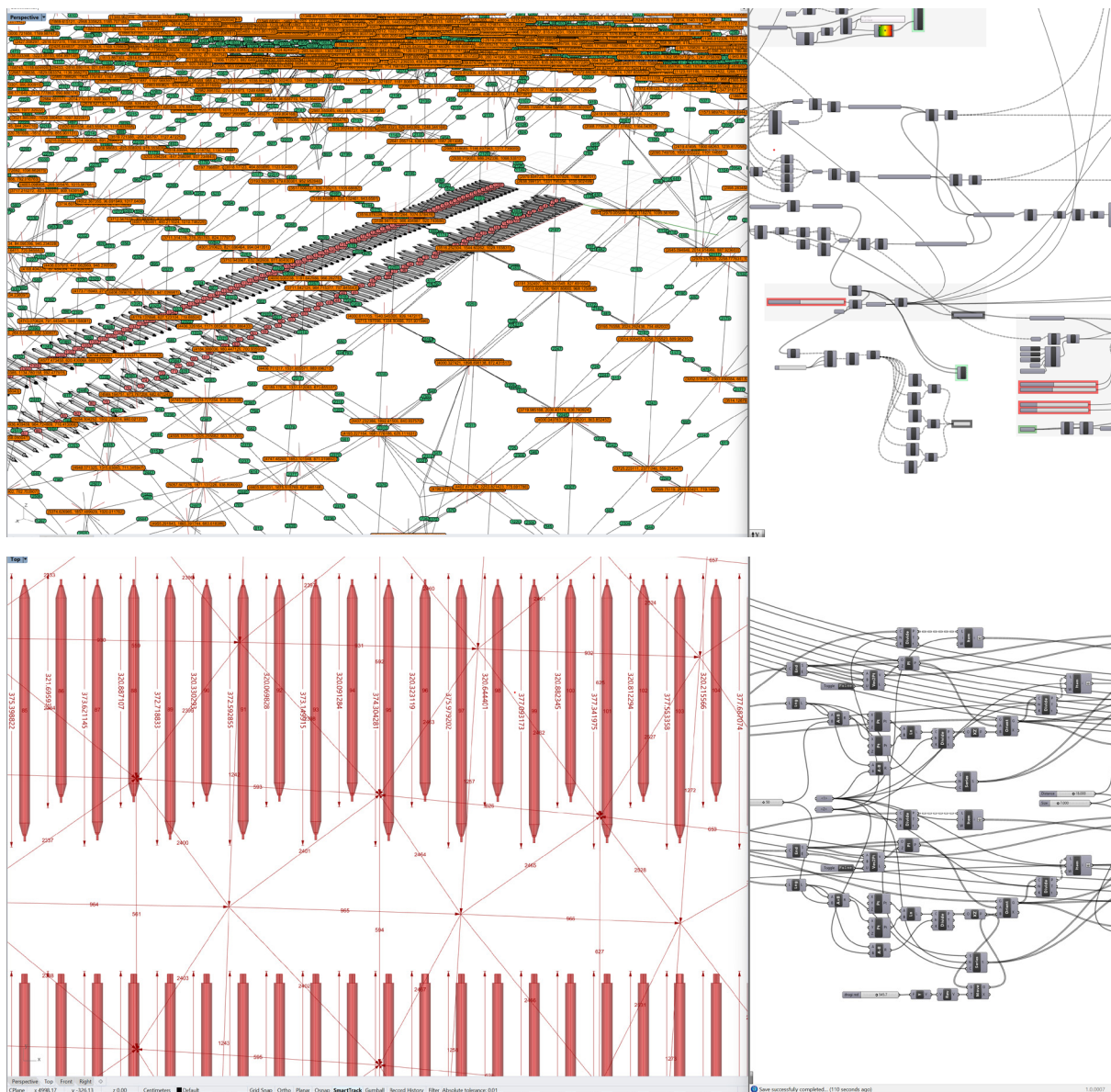
С обзиром на комплексност форме која за резултат има велики број елемената неуједначених дужина, учена је потреба за развијањем додатног нивоа аутоматизованих процедура. Да би се идентификовали сви индивидуални елементи и израдила техничка документација, скрипта је обogaћена процедурама које аутоматски документују штапове решетке. На сликама се може примјетити да сваки, од 2600 штапова, нумерисан у равни и позицији у конструкцији јединственим редним бројем, да су сви димензионисани, и класификовани по позицијама у слојевима и унутрашњости конструкције.

Прецизност дефинисања позиција и секвенцијално нумерисање су битни са аспекта подизања и уградње елемената конструкције. Наредне слике показују само неке од могућности приказа информација које се могу добити са процедурално креираних модела конструкција, координате чворних елемената, нумерисани елементи конструкције приказани у самом контексту склопа. Многе друге релевантне информације се могу идентификовати, уградити као процедуре у скрипту и приказати у 3Д и 2Д



Слика 174. Процес израде процедуралног модела крова станице. Приказ додатних информација на моделу конструкције, и аутоматско документовање штапова решетке. Израдио Марко Кољанчић.

документацији. Овај вид документовања је прецизан, проширив, и има велики утицај на дефинисање потреба са аспекта фабрикације, уградње и подизања решетке. Просторне решетке на слободним формама су комплексе из разлога што је потребно прецизно знати број, позицију, геометријске карактеристике и остале атрибуте да би се могле поручити, произвести и уградити на коначну локацију. Из тих разлога низови процедура који аутоматски генеришу ове информације и техничке цртеже су изузетно битни. Могу смањити грешку при пројектовању на теоретски минимум, и олакшати сам процес израде конструкција просторне решетке на слободним формама.



Слика 175. Процес израде процедуралног модела крова станице. Аутоматско котирање и нумерисање штапова просторне решетке. Може се примјетити да процедурална скрипта има могућност обарања и класификовања штапова решетке у раван ради лакше израе техничке документације. Израдио Марко Кољанчић.

12.3 ЗАКЉУЧАК

Савремена архитектонска пракса захтјева иновативне приступе када је у питању однос конструкције и архитектонске форме. Просторна решетка на слободној форми је један од система који је на располагању пројектантима. Ови системи су један од одговора савремених инжењера на проблем односа распона, обликовања, затварања простора и слободе пројектовања. Кроз историју помјеране су границе да би се дизајнирали грандиозни и хумани простори за човјека. Примјеном просторне решетке на аморфним формама отварају се нове могућности.

Тема просторне решетке је сама по себи комплексна проблематика чије истраживање још није у потпуности завршено. Потребно је одговорити на све изазове које носи са собом употреба оваквих конструкција. Почевши од концепта до проналажења оптималног система за моделовање и документовање дизајна рачунајући на велики број итерација. Уочена је и велика могућност оптимизације да би се директно утицало на економску компоненту пројекта. Узимајући у обзир физичке карактеристике материјала, контракције, експанзије, силе које се јављају у штаповима и спојним елементима, прецизност при фабрикацији и логистички изазови овај процес материјализације карактеришу као мултидисциплинарни напор инжењера разних дисциплина.

Хипотеза 1: Конструкције просторне решетке су примјенљиве на слободним архитектонским формама.

Истражујући историјски контекст па све до савремених примјера грандиозних конструкција може се закључити да је хипотеза тачна. Пројектовање аморфних архитектонских обликовања носи изазове од саме фазе дизајнирања па све до материјализације и одржавања. Кроз преглед историјског контекста па све до савремених употреба просторне решетке проучени су и извучени закључци. Импликације избора система просторне решетке за материјализацију слободних аморфних форми могу се уочити у фази дизајна, али и изградње. Систематично дизајнирати и документовати сваки елемент система засебно и холистички анализирати у контексту цјелокупног контекста је захтијеван задатак. Велика већина оваквих конструкција у прошлости дизајнирана је и документована употребом 2Д цртачких алата.

Савремена пракса и потреба да се од дизајна до фабрикација дође у што краћем року са малом толеранцијом на грешку утиче да се истражују други приступи. Савремени стандардни системи са дискретним елементима система, као што је Метро, Орона СЕО, Нодус, и слични подржавају спојеве штапова у чворним елементима на начин да се формирају просторне решетке слободне форме. Постоје одређена ограничења у смислу броја штапова који се могу спојити у једном чвору и у виду углова под којим се спајају. Када се узму у обзир ова ограничења стандардних система, тада се могу пројектовати просторне решетке на слободним формама, и најважније ове конструкције се могу прорахунати и елементи димензионисати.

Хипотеза 2: Аморфне форме конструктивно материјализоване просторном решетком могу да премосте велике распоне, отворе, покрију и дефинишу простор.

Просторне решетке могу да премосте велике распоне и ослободе архитектонске основе. Ова хипотеза је такође доказана истраживањем. Посматрајући сам систем у коме се користи минимална количина материјала да би се силе спровеле кроз елементе решетке може се закључити да су просторне решетке лагани конструктивни системи. Узимајући да је инспирација за ове конструктивне системе дошла посматрањем природних структура,

које дјелују у правцу минималног напора, инжењери су користили ове особине како би премостили изузетно велике распоне. Посматрајући аеродромске хангаре, велике тржне центре, аеродромске терминале, спортске стадионе, и сличне објекте може се закључити да конструкције просторне решетке могу да премосте значајне распоне.

Постоји значајан број стандардних система који су на располагању у савременој пракси. Метро, Орона СЕО, Нодус, и слични прошли су пут од првих употреба на мањим објектима до употребе на великим халама. Ови системи су тестирани и емпиријски прорачунати, како би се могли безбједно користити. Ослобађање форме даје велику флексибилност при дизајнирању простора. Посуђени концепти из природе показали су се оптималним и дали су нову димензију пројектовања и обезбедили да архитекти лакше могу да савладају јаз између слободе форме у основи и премоштавања великих распона.

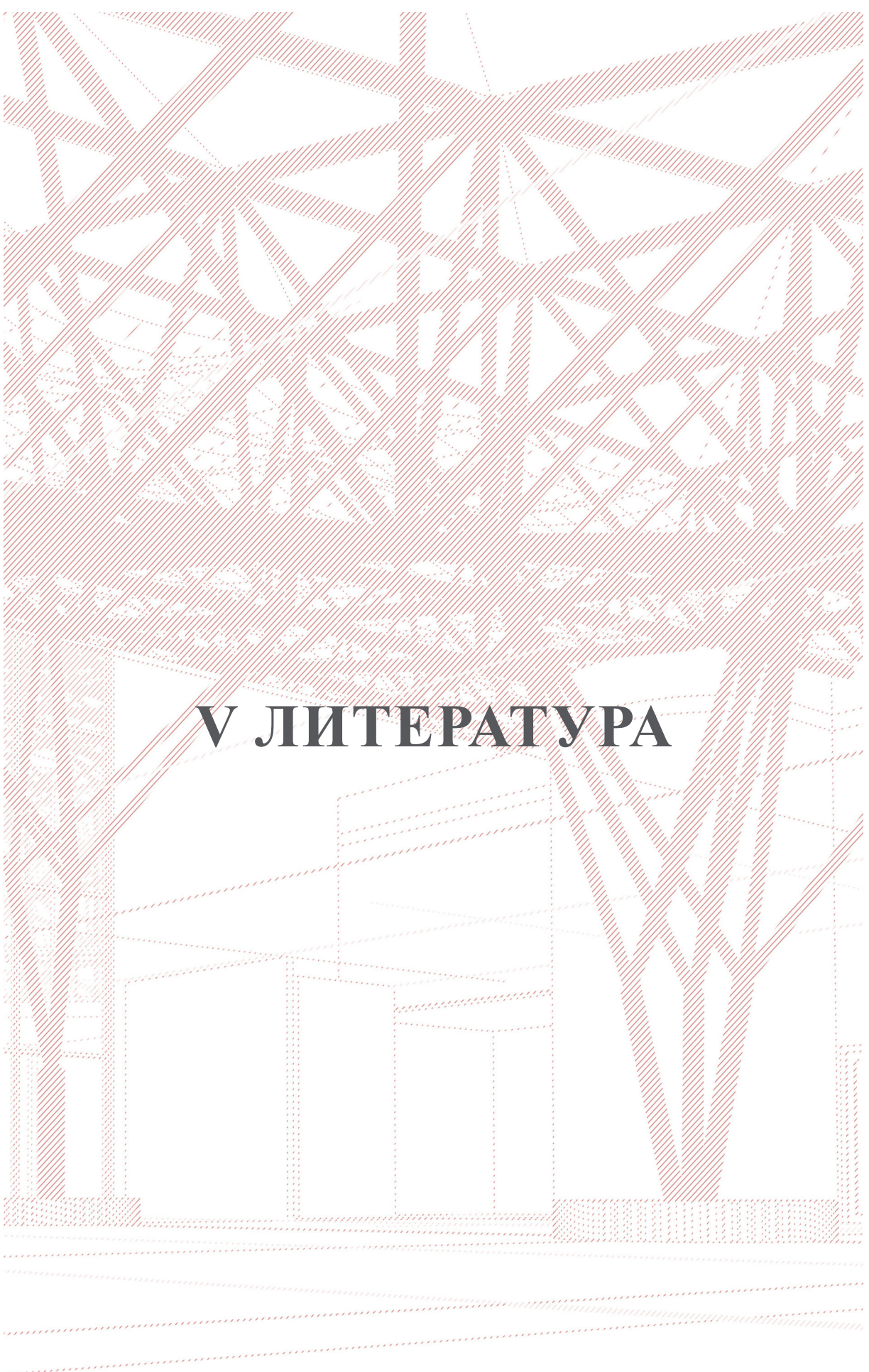
Хипотеза 3: Израдом дигиталних прототипа системом процедуралног логичко-математичког моделовања могуће је креирати системе и алате за дефинисање неограниченог броја варијанти дигиталног модела система просторне решетке, оптимизовати исти и олакшати процес фабрикације и материјализације

Кроз студију случаја на пројекту реконструкције крова жељезничке станице у Бањој Луци истражен је приступ процедуралног 3Д моделовања. Приступ директног ручног дефинисања елемената просторне решетке је неефикасан метод. Могућност грешке, комплексност и број позиција у простору захтијевају другачију парадигму дизајнирања. Потреба се сама наметнула да се приступи дизајнирању процедуралног система па затим, дефинисању форме, и потом извлачењу информација потребних за потенцијалну фабрикацију и материјализацију конструкције. Овај метод се показао успјешним.

Значајно је примјетити да скрипта са оваквом алгоритамском имплементацијом може да се примјени и на другим формама тако да систем развијен за једну конструкцију може да се употреби за дизајн и пројектовање много сличних будућих конструкција. Логика скрипте може да се примјени на било коју форму која се материјализује употребом двослојне просторне решетке и има систем понављања квадрат на смакнутом квадрату. Скрипта је дизајнирана за пројектовање и моделовање типова решетки са дискретним елементима, тј. индивидуалним штаповима и чворним елементима конструкције.

Просторне решетке на слободним архитектонски формама долазе са одређеним потенцијалним ограничењима. Једно је цијена коштања која је значајнија од сличних планарних конструкција. Сама неуједначеност елемената захтјева комплексне прорачуне стабилности јер скоро сви штапови решетке могу да буду различитих геометријских карактеристика. Процес монтаже игра значајну улогу, и потребно је узети у обзир у раној фази пројектовања. Челик и његове легуре су најчешћи материјали за материјализацију просторне решетке, међутим премоштавање великих распона захтјева специјалне материјале који су релативно лагани, али имају добре физичке карактеристике.

Наредна истраживања треба да се баве аутоматизацијом дизајна и фабрикације, те самом интеракцијом ова два домена у процесу грађења аморфних просторних решетки. Стандардни системи за материјализацију просторне решетке су прецизни, али њихова уједначеност поставља ограничења у фази пројектовања. Укључити процес фабрикације, оптимизације форме и елемената решетке, као и статичке прорачуне у фазу дизајна је наредни корак. Имати све релевантне информације унутар дигиталног прототипа ће значајно скратити вријеме процеса пројектовања, изградње и одржавања оваквих форми. Технологије и алгоритамски процедурални дизајн, као и напредак у фабрикацији и роботизацији фабричких постројења су тренутно у тачки гдје је ово могуће. Потребно је у наредним истраживањима поставити циљеве за достизање веће интеграције процеса фабрикације у раним фазама пројектовања.



V ЛИТЕРАТУРА

- [1] **Architecture in Detail** (*Graham Bizley*), Architectural Press, Oxford, 2008.
- [2] **Analysis, design and construction of steel space frames** (*G.S. Ramaswamy, M. Eekhout, G.R. Suresh*), Thomas Telford, London, 2002.
- [3] **Architectural Geometry** (*Pottman H.*), Bently Institute Press, Exton, 2007.
- [4] **Analysis, Design and Construction of Braced Domes** (*Makowski Z. S.*), Granada Press, London, 1984.
- [5] **Conceptual Design and Analysis of Membrane Structures** (*Erica Henrysson*), Chalmers University of Technology, Goteborg, 2012.
- [6] **Civil and Structure Design of the Eden Project** (*Alan Jones*), International Symposium on Widespan Enclosures at the University of Bath, 2000.
- [7] **Cost-Effective Design of Space Structure Joints: A Review, International Jurnal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering** (*Mohamed I. Ali, Feng Fan, Peter N. Khakina, Ma H. H.*), London, 2013.
- [8] **Dynamic Space Frame Structures** (*Michael Bujisen*), TU Delft, Delft, 2011.
- [9] **Deployable Structures** (*Pellegrino S.*), Springer, Wien, 2001.
- [10] **Determination of Parameters of Crystal Latticed Surfaces Composed of Hexagonal Plane Facets** (*Pavlov G. N.*), International Jurnal of Space Structures, 1990.
- [11] **Engineering a New Architecture** (*Robin T.*), Yale University Press, 1996.
- [12] **Freeform Architecture - from Concept to Completion** (*Sishcka J, Schnaider B, Ziegler R.*), Waagner-Biro, Stahlbau, 2012.
- [13] **Functional Webs for Freeform Architecture** (*Deng B, Pottmann H, Wallner J.*), Eurographics Symposium on Geometry Processing, Wien, 2011.
- [14] **Historical and Modern Structures at the Railway Stations** (*Ewa, Maria Kido*), Architectural Press, Tokyo, 2012.
- [15] **How Space Frames are Connected** (*Klimke H.*), IASS, Madrid, 1999.
- [16] **Историја архитектуре** (*Janson H. W.*), Издавачки завод Југославија, 1966.
- [17] **Lightweight Structures in Civil Engineering** (*Obreski J. B.*), Magat, Warsaw, 1995.
- [18] **Методологија научних истраживања** (*Проф. др Михајловић, Добривоје*), Београд, 1996.
- [19] **Practical aspects determining the modelling of the space structure for the free-form envelope enclosing Baku's Heydar Aliyev Cultural Centre** (*Jaime Sanchez-Alvarez*), Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009, Valencia
- Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures, 1976.
- [20] **Railway Stations - The Borderline Between Architecture and Structure** (*Ewa, Maria Kido*), Architectural Press, Tokyo, 2015.
- [21] **Shells Membranes and Space Frames** (*Heki K.*), Elsevier, 1986.
- [22] **Space Grid Structures** (*John Chilton*), Oxford Architectural Press, Oxford, 2000.
- [23] **Structure in Nature is a Strategy for Design** (*Pearce P.*), MIT Press, Boston, 1990.
- [24] **Spatial Structures at the Turn of the Millenium** (*Wester T. Medowski, S. J. Mogensen*), Kunstakademie Forlag Arkiteksholen, 1999.
- [25] **Space Frame Structures** (*Tien T. Lan*), International Journal of Space Structures, 1985.
- [26] **Spatial Lattice and Tension Structures** (*Borego J.*), MIT Press, Boston, 1968.
- [27] **Space Feeling** (*Klaus Knebel, Jaime Sanchez-Alvarez, Stefan Zimmermann*), University of Wollongong, Sidney, 2001.
- [28] **Structure and Architecture** (*Angus J. Macdonald*), Architectural Press, Edinburgh, 2001.
- [29] **The Dome Builder's Handbook** (*Fuller R. B.*), Running Press, Philadelphia, 1973.

- [30] **Argument Against Parametric Design in Architecture** (pristupio 17.11.2023.)
<https://www.fastcompany.com/3063655/the-most-convincing-argument-against-parametric-design-yet>
- [31] **Birdair, Tensile Architecture** (pristupio 20.12.2023.)
<http://www.birdair.com/tensile-architecture/history>
- [32] **Design Parameters to Parametric Design** (pristupio 03.09.2022.)
<http://www.patrikschumacher.com/Texts/AU%20Parametricism.html>
- [33] **History of Parametric Design** (pristupio 24.08.2023.)
<http://www.danieldavis.com/a-history-of-parametric/>
- [34] **Investigation into the Stability Behavior of Free Form Space Structure**
(pristupio 24.08. 2016.) <http://www.iass-structures.org/index.cfm/proceedings.article?pID=8&cID=9&aID=89>
- [35] **KAIA, King Abdulaziz International Airport** (pristupio 05.08.2023.)
<https://mero-tsk.de/en/construction-systems-hidden/32-references/36-space-structures/725-jeddah-airport-en.html>
- [36] **New Forms That Functions Better** (pristupio 12.04.2023.)
<https://www.technologyreview.com/s/517596/new-forms-that-function-better/>
- [37] **Parametric Design for Generative Form in Architecture** (pristupio 30.03.2021.)
<https://www.digitalbluefoam.com/post/parametric-design-how-is-it-applied-in-architecture>
- [38] **Parametric Design: How is It Applied in Architecture?** (pristupio 19.12.2023.)
<http://www.aiacc.org/2012/06/25/parametric-design-a-brief-history/>
- [39] **Structure and Form Analysis System** (pristupio 17.05.2023.)
http://www.setareh.arch.vt.edu/safas/002_knowledgebase.html
- [40] **Space Structures MERO** (pristupio 14.10.2023.)
<http://www.mero.de/index.php/en/construction-systems/references-en/space-structures-en>
- [41] **The Secret Life of Parameters** (pristupio 02.10.2023.)
<https://www.shapediver.com/blog/the-secret-life-of-parameters>
- [42] **Nowofol** (pristupio 16.08.2023.)
<https://www.nowofol.com/en/etfe-architecture/etfe-membrane/>



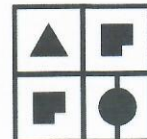
VI БИОГРАФИЈА

Марко Кољанчић је професионалац са више од 12 година искуства у ИТ сектору, са фокусом на развоју софтвера и дигиталној трансформацији архитектонско грађевинских компанија.

Као *Service Delivery Manager* у Symphony, Босна и Херцеговина, он је надгледао успјешну испоруку услуга компаније клијентима, координирајући процесе сервиса од почетка до завршетка пројеката и континуиране подршке. У *DiRoots Limitada*, Португал, као *Chief Technology Officer*, Марко је представљао технолошку страну компаније, успјешно управљајући и ширећи портфолио производа, дефинишући и примјењујући план развоја производа за иновације и раст. Током његовог мандата, база активних корисника апликације *DiRootOne* порасла је са 2000 на приближно 200000 корисника, доказујући његову ефикасност у вођењу и иновирању. За успјех на овом пројекту номинован је међу 12 звијезда у успону у *AEC/O* индустрији од стране *London Construction Awards*. 2022. године. У *DiRoots Limited, UK*, као *Digital Technology Manager*, управљао је цјелокупним циклусом развоја софтвера од истраживања до одржавања након издавања, унапрјеђујући тимски капацитет и водећи стратешки развој компаније. У *GeoINNOVA* informatički inženjering, БиХ, као *BIM* специјалиста и руководилац *ATC/ACC* центра, водио је обуку и имплементацију прилагођених *BIM* и *GIS* рјешења. Обучио је преко 800 инжењера за разне *CAD*, *BIM* и *GIS* софтверска рјешења.

Поседује бројне професионалне сертификације укључујући *PMP®*, *ITIL® 4*, *Professional Scrum Master™* и *Professional Scrum Product Owner™* и многе друге професионалне сертификате за *Autodesk AutoCAD*, *Revit*, и *3Ds Max*.

Марко је страствен у развоју софтвера, 3Д процедуралном моделовању и анимацији, као и примјени свога искуства и знања у савременим архитектонско праксама широм свијета. Марко је учествовао као тутор на три радионице љетње школе архитектуре, гдје је преносио своје знање процедуралног моделовања студентима Архитектонско-грађевинско-геодетског факултета у Бањој Луци.



СТУДИЈСКИ ПРОГРАМ АРХИТЕКТУРА

На основу члана 61. Закона о високом образовању ("Службени гласник Републике Српске", број 67/20) и члана 54. Статута Универзитета у Бањој Луци а на приједлог Вијећа СП Архитектура, Научно-наставно вијеће Архитектонско-грађевинско-геодетског факултета је на 02. сједници одржаној 16.11.2023. године донијело одлуку број: 14/3.1842/23 од 16.11.2023. године о именовању Комисије за преглед и оцјену завршног рада II циклуса студија, Студијског програма Архитектура, кандидата **Марко (Миле) Кољанчић, број индекса 114М – 11** под називом:

**АРХИТЕКТОНСКО ОБЛИКОВАЊЕ, ТЕХНОЛОГИЈЕ ПРОЈЕКТОВАЊА И ПРИМЈЕНЕ ПРОСТОРНЕ
РЕШЕТКЕ НА СЛОБОДНИМ АРХИТЕКТОНСКИМ ФОРМАМА**

Именована је Комисија у сљедећем саставу:

1. Проф. др Биљана Антуновић, Универзитет у Бањој Луци, Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет, ужа научна област: Општа физика – председник;
2. Проф. др Саша Чворо, Универзитет у Бањој Луци, Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет, ужа научна област Архитектонске технологије - ментор и члан;
3. Доц. др Тијана Вујичић, Универзитет у Бањој Луци, Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет, ужа научна област: Урбанизам и планирање простора – члан.

Комисија је прегледала, анализирала завршни рад и установила да је кандидат **Марко (Миле) Кољанчић, број индекса 114М – 11** испунио све формалне услове, и предао текст завршног рада II циклуса у прописаној форми, те Научно-наставном-научном вијећу подноси сљедећи

ИЗВЈЕШТАЈ

О ПРЕГЛЕДУ И ОЦЕНИ ЗАВРШНОГ РАДА

II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

Лични подаци

Име и презиме:	Марко Кољанчић
Датум рођења:	15.11.1987.године
Мјесто рођења:	Бања Лука
Адреса становања:	Вида Симурџића 40, Бања Лука
Мјесто боравка:	Бања Лука
Број телефона:	+387 65 976 483
E-mail:	marko.koljancic@gmail.com
Држављанство:	Босна и Херцеговина

Образовање

2006. – 2011. године	Образовна институција: Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет, Универзитет у Бањој Луци Смјер: Звање: Дипломирани инжењер архитектуре (240 ЕЦТС) Тема завршног рада првог циклуса студија: Пројекат зграде архива Републике Српске, Оцјењен _____ оцјеном: 10,00 Просјечна оцјена током студија: 8,25.
2002. – 2004. године	Образовна институција: Грађевинска Школа, Бања Лука Смјер: Грађевински Звање: Грађевински техничар за високоградњу Одличан ученик
1994. – 2003. године	Образовна институција: Основна школа Бранко Радичевић, Бања Лука

Радно искуство

012.2022. – тренутно	Послодавац: Symphony Digital d.o.o. Позиција на послу: Delivery Manager
03.2022. – 11.2022. г.	Послодавац: DiRoots Limited Позиција на послу: Chief Technology Officer
10.2019. – 03.2022. г.	Послодавац: DiRoots Limited Позиција на послу: Digital Technology Manager
02.2012. – 9.2019. г.	Послодавац: INOVA informaticki inzenjering, d.o.o. Позиција на послу: Head of Autodesk Training and Certification Center

Личне вјештине

Матерњи језик:	Српски језик
Страни језици:	Енглески језик
Информатичка писменост:	AutoCAD, Revit, ArchiCAD, 3Ds Max, Vray, Photoshop, AfterEffects, Indesign, Unreal Engine, Rhinoceros, Grasshopper 3D, Blender 3D, Houdini Fx, C#, JavaScript, React, Three.js, Windows, Linux, IOS
Возачка дозвола:	Категорија Б

II ПОДАЦИ О ЗАВРШНОМ РАДУ

Кандидат **Марко (Миле) Кољанчић**, број индекса **114М – 11** определијелио се за истраживачки и стручни рад у области: Архитектонске технологије

Мастер рад је провјерен путем званичног софтвера за откривање плагијата дана 12.01.2024.године.

Завршни рад носи назив „Архитектонско обликовање, технологије пројектовања и примјене просторне решетке на слободним архитектонским формама“, и обухвата 182 странице од чега је 149 страница текста са описом теоријског и практичног истраживања, а 33 странице прилога. Списак коришћене литературе од 42 наслова.

Предметни завршни - мастер рад кандидата **Марко (Миле) Кољанчић**, структуриран је у двије основне цјелине - теоријско-хипотетички дио рада и истраживачки дио рада, са сљедећим садржајем:

I УВОД

- 1.1. Образложење теме
- 1.2. Хипотезе и претпоставке за истраживање
- 1.3. Научне методе истраживања
- 1.4. Очекивани допринос истраживања

II ТЕОРИЈСКИ ОКВИР ИСТРАЖИВАЊА

- 2.0. Просторна решетка у савременој архитектури
 - 2.1. Увод - потенцијали употребе просторне решетке
 - 2.2. Рани развој просторних решетки - историјски преглед
 - 2.3. Просторна решетка у архитектонском контексту - потенцијали обликовања
- 3.0. Основне особине просторне решетки
 - 3.1. Врсте просторних решетки и прелиминарно планирање
 - 3.2. Двослојне просторне решетки
 - 3.2.1. Избор типа двослојне решетки
 - 3.2.2. Параметри при дизајнирању двослојних просторних решетки
 - 3.2.3. Методе подизања двослојних просторних решетки - утицај на планирање
 - 3.3. Комплексне архитектонске форме за материјализацију просторним решеткама
 - 3.3.1. Цилиндричне љуске
 - 3.3.2. Куполе
 - 3.3.3. Хиперболични параболоид - форма љуске
 - 3.3.4. Комбиноване форме и добијање комплексних обликовања
 - 3.4. Геометријске особине модуларних склопова - геометријска стабилност
- 4.0 Просторне решетки - системи и особине
 - 4.1 Увод у савремене системе просторне решетки
 - 4.2 Спојни елементи - чворне тачке конструкције
 - 4.3 Метро КК систем
 - 4.4 Орона CEO систем
 - 4.5 Нодус систем
 - 4.6 Триодетски систем
 - 4.7 Униструт или Модуспан систем
 - 4.8 Системи без чворних елемената
 - 4.9 Харли Кондер систем

- 4.10 "MAI SKY" и "CATRUS" системи
- 4.11 Модуларни "SPACE DECK" систе
- 4.12 "UNIBAT" и "SPACEgrid" системи
- 4.13 "ABBA Space Structures" модуларни системи
- 4.14 "CUBIC" систем модуларних просторних решетки
- 4.15 Материјали за материјализацију просторних решетки
- 5.0 Кровни покривачи - еластичне текстилне мембране
 - 5.1 Затегнути текстилни покривачи – архитектонски и историјски контекст
 - 5.2 Обликовање и проналажење оптималне форме
 - 5.3 Материјали мембранских покривача
- 6.0 Стабилност и разни утицаји на просторне решетки
 - 6.1 Сопствено и покретно оптерећење и атмосферски утицаји
 - 6.2 Утицај вјетра
 - 6.3 Утицај топлоте и отпорност на пожар
 - 6.4 Сеизмички утицаји и решетки у трусним зонама
- 7.0 Дигитални прототипи и анализа просторних решетки на слободним формама
 - 7.1 Интегрисани дизајн и техничка комплексност пројектовања аморфних просторних решетки
 - 7.2 Алгоритамски приступ процедуралном моделовању и оптимизацији
 - 7.3 Процедурално моделовање и принципи интегрисаног пројектовања
 - 7.4. Комерцијални системи просторне решетки за материјализацију слободних форми
- 8.0 Анализа употребе просторних решетки на слободним формама у савременој пракси
 - 8.1 "FERRARI WORLD" - концепт и анализа обликовања и конструкције
 - 8.2 "HEYDAR ALYEV" културни центар – концепт и анализа обликовања и конструкције
 - 8.3 Еден пројекат - концепт и анализа обликовања и конструкције
- 9.0 Обликовање савремених жељезничких станица
 - 9.1 Жељезничке станице са аспекта обликовања и избора конструкције

III СТУДИЈА СЛУЧАЈА

- 10.0 Контекст и концепт
 - 10.1 Анализа контекста – макро локација
 - 10.2 Микро локација
 - 10.3 Постојећа жељезничка станица у Бањој Луци
 - 10.4 Концепт реконструкције крова
 - 10.5 Материјализација нове кровне конструкције жељезничке станице
- 11.0 Пилот пројекат реконструкције крова жељезничке станице у Бањој Луци
 - 11.1 Основа приземља 1 : 200
 - 11.2 Основа првог спрата 1 : 200
 - 11.3 Основа конструкције просторне решетки 1 : 200
 - 11.4 Основа крова 1 : 200
 - 11.5 Пресјеци 1 : 200
 - 11.6 Изгледи конструкције 1 : 200
 - 11.7 Тродимензионални пресјеци
 - 11.8.1 Погледи из ентеријера и екстеријера
 - 11.9 3Д прикази

IV ЗАКЉУЧАК

12.0 Архитектонске технологије дигиталног пројектовања и закључак

12.1 Практична употреба процедуралног моделовања просторне решетке на слободној архитектонској форми

12.2 Могућности процедуралног доласка до додатних информација о конструкцији

12.3 Закључак

V ЛИТЕРАТУРА

VI БИОГРАФИЈА

III ПРИКАЗ И АНАЛИЗА ЗАВРШНОГ РАДА

ПРЕДМЕТ ИСТРАЖИВАЊА

Узимајући у обзир технолошки напредак и инжењерску иновативност посљедњих двадесет година довели су до тога да одређени конструктивни системи постану далеко економски оправданији него што је то био случај раније. Доступност нових материјала, напредни процеси фабрикације, те креирање виртуелних прототипа редефинисали су основне принципе процеса пројектовања и подигли су на већи ниво мултидисциплинарну сарадњу. То је довело да изградња комплексних конструктивних система постане значајно мањи изазов него раније ако се употребе технологије и праксе које су сазријевале деценијама.

Системи просторних решетки прошли су дуг историјски пут примјене, тестирања, учења на грешкама из прошлости и унапређивања да би постали саставни дио арсенала конструктивних система савремене праксе. Од примјене на мостовима, архитектонским објектима, слободностојећим надстрешницама терминала, у авионској индустрији, бродоградњи и многим другим областима ови системи су коришћени као основни склопови под разним условима у којима ће бити употребљени. Кроз истраживање је сагледано које су све могућности које нуди употреба аморфне просторне решетке на само пројектовање и ослобађање форме, као и проблеме који ће се појавити.

Фокус истраживања је базиран на конструктивној употреби и истраживању примјене система просторне решетки на конструкцијама слободне форме и самим технологијама пројектовања и документовања које укључују израду дигиталних прототипа и специјализованих алата за аутоматизовано моделовање дигитално моделовање. Процедурални системи моделовања могу ослободити пројектанта неефикасног и ручног документовања и оставити им више времена да се баве проналаском оптималне форме, естетским квалитетима и сагледавањем више варијанти дизајна и система ефикасније. Са друге стране документовање рјешења може бити значајно убрзано у поређењу са традиционалним методама. Чак и на глобалном нивоу, теоријски материјал који на озбиљном научном нивоу истражује потенцијале процедуралне израде дигиталних, математичко-логичких виртуелних модела је веома ограничен. Они се могу примијенити на оптимизацији фабрикационих система елемената решеткастих конструкција и унапређењу мултидисциплинарног пројектовања.

ХИПОТЕЗЕ СА ОБРАЗЛОЖЕЊЕМ

Истраживање је фокусирано на просторне решетки у контексту слободних архитектонских форми са једне стране и технологијама оптимизације процеса дизајна,

пројектовања, фабрикације и израде техничке документације. Базира се на проналажењу одговора на три постављене хипотезе. Циљ истраживања је показати могућност примјене у посматраном поднебљу, оправданост са свих релевантних аспеката савременог градитељства, као и израдити основни материјал за едукацију и унапрјеђење знања из области примјене и имплементације конструктивних система просторних решетки на слободним архитектонским формама.

- Хипотеза 1: Конструкције просторне решетки су примјениве на слободним архитектонским формама.

На посматраном подручју није чест случај употребе конструкција просторне решетки на слободној форми. Истраживање доводи до закључка да су ови системи примјениви, сигурни и изведиви у пракси. Испитивање конструктивних карактеристика оваквих система је један од предуслова за прихватање и едукацију инжењерског кадра укљученог у планирање и пројектовање, а самим тим и мотивацију за употребу оваквих система.

- Хипотеза 2: Аморфне форме конструктивно материјализоване просторном решетком могу да премосте велике распоне, отворе, покрију и дефинишу простор.

Велики затворени простори су одличан примјер за употребу просторних решетки. Њихова могућност обликовања и прилагођавања формама, као и потенцијал отварања великих фронтова визура чини их идеалним за овакве просторе. Кроз истраживање и израду пројекта доградње и реконструкције крова постојеће жељезничке станице у Бањој Луци указано је на све потенцијале и проблеме које носи употреба аморфних просторних решетки, као и одговоре на проблеме. Први утисак са одређеном урбаном средином се може остварити атрактивношћу амбијента при првом контакту. жељезничку станицу у Бањој Луци сматра се једном од таквих потенцијалних амбијенталних цјелина, односно “капијом града”.

- Хипотеза 3: Израдом дигиталних прототипа системом процедуралног логичко-математичког моделовања могуће је креирати системе и алате за дефинисање неограниченог броја варијанти дигиталног модела система просторне решетки, оптимизовати исти и олакшати процес фабрикације и материјализације.

Приликом пројектовања просторних решетки на слободним формама основни проблем је сама геометријска комплексност структуре. Традиционални приступ пројектовању и дизајнирању форме и конструкције је неефикасан. Рјешавање ове проблематике може дубоко утицати на оправданост избора и имплементације просторних решетки, као и популаризацију у савременој инжењерској пракси нашег поднебља.

ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА

Истраживање се бави конструкцијама просторне решетки на слободним формама, која представљају значајан аспект у савременом архитектонском и инжењерском дизајну. Циљ је истражити и разумјети просторне решетки, тачније предности и мане ових система у контексту слободног архитектонског обликовања.

Поред самог система, истраживање се бави и технологијама пројектовања, и анализира приступе које савремена пракса нуди при пројектовању комплексних просторних решетки. Истраживање се базира на историјском контексту, сагледава примјену у савременој пракси и анализира свеукупни домет употребе просторних решетки

Конкретни циљеви рада су:

- Указивање на изазове и проблеме који се јављају како са конструктивног становишта, тако и са аспекта ослобађања форми у процесу пројектовања просторне решетке на слободним формама.
- Анализа савремених система просторне решетке, њиховој примјени у слободним архитектонским формама, материјалима конструкције и кровних покривача.
- Анализа материјала за материјализацију елемената просторне решетке.
- Анализа вањских утицаја на конструкције просторне решетке.
- Употреба процедуралног дигиталног моделовања за израду виртуелних прототипа и олакшавање израде техничке документације.
- Истраживање употребљивости и оправданости употребе система процедуралног дигиталног моделовања.
- Демонстрација оправданости употребе система просторне решетке у савременом градитељству.
- Израда едукативног материјала за примјену и имплементацију просторних решетки.
- Провјера хипотеза кроз детаљно истраживање и демонстрирање практичне примјењивост и оправданост употребе система просторне решетке у конструктивном и естетском смислу.

МЕТОДЕ ИСТРАЖИВАЊА

Истраживање прве хипотезе односи се на анализе екстерних утицаја на просторне решетке, али и на естетске квалитете конструкција на слободним формама. Заснива се на методи критичке анализе садржаја. Проучавањем доступне литературе, ранијег градитељског искуства и примјера презентоваће се релевантни подаци унутар предметне области овог дијела истраживања. Затим се синтезом релевантних података, добијених истраживањем, презентује примјењивост конструктивног система просторне решетке на слободним архитектонским формама са историјског и савременог аспекта. У циљу испитивања ове хипотезе извршина је анализа три савремена репрезентативна примјера архитектонских објеката чија слободна форма је подржана конструкцијом просторне решетке. Анализа се врши путем методе студије случаја – индивидуална дескрипција. Након анализе врши се компаративна анализа наведених студија случаја ради упоређивања ранијих искустава, идеја, концепата, приступа проблематици, конструктивних карактеристика аморфних просторних решетки и анализе оправданости. Из ове анализе и синтезе се методом индукције (закључујући од појединачног ка општем) дефинишу конструктивне карактеристике просторне решетке на слободним формама и њихова употребљивост на истим.

Кроз испитивање друге хипотезе дефинисане су разне сложене форме које се могу материјализовати употребом просторне решетке. Кроз израду идејног рјешења пројекта нове кровне конструкције жељезничке станице у Бањој Луци, као и методом прикупљања података *in situ*, анализом локације и теоријским истраживањем дефинисано је оптимално обликовање, позиција и габарити конструкције у складу са раније дефинисаним циљевима и предметним контекстом. Испитан је однос форме и конструкције, као и њихов заједнички однос при уклапању и дефинисању амбијента. Самим архитектонским моделом конструкције у контексту унапређивања постојеће станице, као и сагледавањем његовог уклапања у постојећу амбијенталну цјелину испитана је поставка друге хипотезе.

Трећа хипотеза дефинише претпоставку да је могуће оптимизовати и олакшати процес израде конструкције, кроз израду процедуралног дигиталног прототипа. Истраживање тестира разне варијанте форме, стандардизацију и припрему свих елемената решетке. Мултидисциплинарни процес сарадње и пројектовање захтјева висок ниво детаља конструкције и саме форме. То укључује атрибуте склопа као што су позиције у простору, број и геометријске карактеристике елемената, идентификовање сличности између елемената система и документовање индивидуалних компоненти, као што су штапови и чворни елементи.

ОЧЕКИВАНИ РЕЗУЛТАТИ И ДОПРИНОС ИСТРАЖИВАЊА

Научни допринос истраживања обухвата:

- Синтезу и интеграцију свих релевантних знања из изучаване области.
- Отварање нових путева и могућности за наставак истраживања.

Практични допринос истраживања укључује:

- Примјену система просторне решетке при дизајнирању слободних форми.
- Мотивацију за дубље исцрпно разматрање могућности примјене склопова просторне решетке на слободним формама.
- Унапрјеђење и модернизацију жељезничке станице у Бањој Луци, доприносећи повећању урбанитета посматране градске зоне и трансформацији амбијента.
- Синтезу релевантног едукативног материјала који може послужити као ресурс за све учеснике у процесу планирања и пројектовања, пружајући им интегрисан приказ свих релевантних знања и закључака из предметне области.
- Примјену детаљних информација из дефинисане области у процесу урбанистичког и архитектонског пројектовања и планирања.

МАТИЧНОСТ ПРЕДЛОЖЕНЕ ТЕМЕ

Предложена тема припада ужој научној области Архитектонске технологије за коју је матичан Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет Универзитета у Бањој Луци.

IV ЗАКЉУЧАК

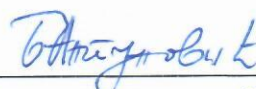
На основу оствареног циља и задатака истраживања, као и доказаних радних хипотеза истраживања, евидентно је да је постигнут научни и стручни допринос изучавању архитектонског обликовања, технологија пројектовања и примјене просторне решетке на слободним архитектонским формама.

Комисија истиче да је тема савремена, актуелна, са теоријског и практичног становишта. Кандидат Марко Кољанчић, дипл. инж. арх., испунио је постављени циљ истраживања, реализовао све постављене задатке истраживања и доказао постављене радне хипотезе истраживања. Завршни рад је урађен у складу са темом.

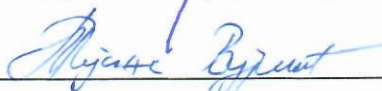
На основу свега наведеног Комисија предлаже Научно-наставном вијећу да одобри одбрану завршног (мастер) рада кандидата **Марко (Миле) Кољанчић, број индекса 114М – 11** под називом: **„АРХИТЕКТОНСКО ОБЛИКОВАЊЕ, ТЕХНОЛОГИЈЕ ПРОЈЕКТОВАЊА И ПРИМЈЕНЕ ПРОСТОРНЕ РЕШЕТКЕ НА СЛОБОДНИМ АРХИТЕКТОНСКИМ ФОРМАМА“**.

У Бањој Луци, 12.01.2024. године

Потпис чланова Комисије


Проф. др Биљана Антуновић, предсједник


Проф. др Саша Чворо, ментор и члан


Доц. др Тијана Вујичић, члан

УНВЕРЗИТЕТУ У БАЊОЈ ЛУЦИ

ПОДАЦИ О АУТОРУ ОДБРАЊЕНОГ МАСТЕР РАДА

Име и презиме аутора мастер рада:

Марко Кољанчић

Датум, мјесто и држава рођења аутора:

15.11.1987. Бања Лука, БиХ (РС)

Назив завршеног факултета аутора и година дипломирања:

Архитектонско-грађевински факултет, Универзитет у Бањој Луци, 2011. године

Датум одбране завршног/дипломског рада аутора:

1.7.2011. године

Наслов завршног/дипломског рада аутора:

ПРОЈЕКАТ ЗГРАДЕ АРХИВА РЕПУБЛИКЕ СРПСКЕ

Академско звање коју је аутор стекао одбраном завршног/дипломског рада:

Дипломирани инжењер архитектуре – 240 ECTS

Наслов завршног/дипломског рада аутора:

АРХИТЕКТОНСКО ОБЛИКОВАЊЕ, ТЕХНОЛОГИЈЕ ПРОЈЕКТОВАЊА И ПРИМЈЕНЕ ПРОСТОРНЕ РЕШЕТКЕ НА СЛОБОДНИМ АРХИТЕКТОНСКИМ ФОРМАМА

Академско звање коју је аутор стекао одбраном мастер рада:

Магистар архитектуре – 300 ECTS

Научна област мастер/магистарског рада према CERIF шифрарнику: Т 240

Научна област: Архитектонске технологије

Научно поље: Архитектура и урбанизам

Имена ментора и чланова комисије за одбрану мастер рада:

Проф. др Биљана Антуновић, Универзитет у Бањој Луци, Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет, ужа научна област: Општа физика – председник;

Проф. др Саша Чворо, Универзитет у Бањој Луци, Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет, ужа научна област Архитектонске технологије - ментор и члан;

Доц. др Тијана Вујичић, Универзитет у Бањој Луци, Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет, ужа научна област: Урбанизам и планирање простора – члан.

У Бањој Луци, дана 16.02.2024.



Декан

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је
мастер/магистарски рад

Наслов рада АРХИТЕКТОНСКО ОБЛИКОВАЊЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ ПРОЈЕКТОВАЊА И ПРИМЕНЕ
ПРОСТОРНЕ РЕШАЊЕ НА СЛОБОДНИМ АРХИТЕКТУРСКИМ ФОРМАМА,

Наслов рада на енглеском језику ARCHITECTURAL DESIGN, DESIGN TECHNOLOGIES AND
APPLICATION OF SPATIAL TRUSS ON FREE ARCHITECTURAL
FORMS.

- ☒ резултат сопственог истраживачког рада,
- ☒ да мастер/магистарски рад, у цјелини или у дијеловима, није био предложен за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- ☒ да су резултати коректно наведени и
- ☒ да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

У Бањој Луци 16.02.2024.

Потпис кандидата

Изјава којом се овлашћује АГГФ факултет/ Академија умјетности
Универзитета у Бањој Луци да мастер/~~магистарски~~ рад учини јавно доступним

Овлашћујем АГГФ факултет/ Академију умјетности Универзитета у Бањој
Луци да мој мастер/~~магистарски~~ рад, под насловом

АРХИТЕКТОНСКО ОБЛИКОВАЊЕ, ТЕХНОЛОГИЈЕ ПРОЈЕКЦОВАЊА И ПРИМЕНЕ
ПРОСТОРНЕ РЕШЕТКЕ НА СЛОБОДНИЈ АРХИТЕКТОНСКИЈ ФОРМАТУ

који је моје ауторско дјело, учини јавно доступним.

Мастер/~~магистарски~~ рад са свим прилозима предао/~~ла~~ сам у електронском формату,
погодном за трајно архивирање.

Мој мастер/~~магистарски~~ рад, похрањен у дигиталним репозиторијум Универзитета
у Бањој Луци, могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце
Креативне заједнице (*Creative Commons*), за коју сам се одлучио/~~ла~~.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
- ☒ 3. Ауторство - некомерцијално - без прераде
4. Ауторство - некомерцијално - дијелити под истим условима
5. Ауторство - без прераде
6. Ауторство - дијелити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је
на полеђини листа).

У Бањој Луци 16.02.2024.

Потпис кандидата



ТИПОВИ ЛИЦЕНЦИ КРЕАТИВНЕ ЗАЈЕДНИЦЕ

Ауторство (CCBY)

Дозвољава умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дјела, и прераде, ако се наведе име аутора, на начин одређен од аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

Ауторство - некомерцијално (CC BY-NC)

Дозвољава умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дјела и прераде, ако се наведе име аутора, на начин одређен од аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дјела.

Ауторство - некомерцијално - без прерада (CC BY-NC-ND)

Дозвољава умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дјела, без промјена, преобликовања или употребе дјела у свом дијелу, ако се наведе име аутора, на начин одређен од аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дјела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дјела.

Ауторство - некомерцијално - дијелити под истим условима (CC BY-NC-SA)

Дозвољава умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дијела, и прераде, ако се наведе име аутора, на начин одређен од аутора или даваоца лиценце, и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дјела и прерада

Ауторство - без прерада (CC BY-ND)

Дозвољава умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дјела, без промјена, преобликовања или употребе дјела у свом дијелу, ако се наведе име аутора, на начин одређен од аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дјела.

Ауторство - дијелити под истим условима (CC BY-SA)

Дозвољава умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дјела, и прераде, ако се наведе име аутора, на начин одређен од аутора или даваоца лиценце, и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дјела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.

Напомена: Овај текст није саставни дио изјаве аутора.

Више информација на линку: <http://creativecommons.org.rs/>

Изјава 3

Изјава о идентичности штампане и електронске верзије
мастер/магистарског рада

Име и презиме аутора МАРКО КОЛАНУЛИ

Наслов рада АРХИТЕКТОНСКО ОБИШЉИВАЊЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ ПРОЈЕКТОВАЊА И ПРИМЕНЕ
ПРОСТОРНО РЕШЕТКЕ НА СЛОБДНИМ АРХИТЕКТОНСКИМ ФИГУРАМА.

Ментор ПРОФ. ДР. СЛАВА УБОРО

Изјављујем да је штампана верзија мог мастер/магистарског рада идентична електронској верзији коју сам предао/ла за дигитални репозиторијум Универзитета у Бањој Луци.

У Бањој Луци 16.02.2024.

Потпис кандидата

