

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Ана С. Петровић

**МОДЕЛСКО ИСПИТИВАЊЕ
ЧВРСТОЋЕ СТРУКТУРА СЛОЖЕНЕ
ПРОСТОРНЕ ГЕОМЕТРИЈЕ**

докторска дисертација

Београд, 2017.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Ana S. Petrovic

**MODEL ANALYSIS OF COMPLEX
SPATIAL STRUCTURES' STRENGTH**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2017.

Ментор докторске дисертације

др Ташко Манески, редовни професор

Универзитет у Београду, Машински факултет

Чланови комисије за одбрану докторске дисертације:

др Ташко Манески, редовни професор

Универзитет у Београду, Машински факултет

др Момчило Дуњић, редовни професор

Универзитет у Београду, Машински факултет

др Весна Милошевић-Митић, редовни професор

Универзитет у Београду, Машински факултет

др Наташа Тришовић, ванредни професор

Универзитет у Београду, Машински факултет

др Драган Игњатовић, редовни професор

Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет

Датум одбране:

ПРЕДГОВОР

Реализацију овог рада у лабораторијско-експерименталном делу, израдом лабораторијског испитног модела, омогућио је ЈП ЕПС, Огранак РБ Колубара. Сходно томе, захваљујем:

- г-дину Слободану Митровићу, извршном директору за техничке послове производње угља ЈП ЕПС;
- г-дину Миомиру Радишићу, директору сектора за одржавање ЈП ЕПС;
- г-дину Дејану Милијановићу, директору за производњу угља РБ Колубара;
- г-дину Драгану М. Јовановићу, директору ОЦ Колубара-Метал;
- г-дину Драгану Стојановићу, руководиоцу за производњу ОЦ Колубара-Метал;
- г-дину Милану Ђурђевићу, шефу техничке припреме ОЦ Колубара-Метал;
- г-ђи Бојани Зарић, технологу за машинску обраду ОЦ Колубара-Метал;
- г-дину Драгану Ј. Јовановићу, директору погона за ремонт ОЦ Колубара-Метал;
- г-дину Милораду Пантелићу.

Посебну захвалност дугујем г-дину Дејану Бугарчићу и г-дину Срећку Сарићу, врхунским мајсторима, који су израдили испитни модел, на изузетној креативности и пожртвовању.

Посебну захвалност дугујем професору Драгану Милковићу на изузетном колегијалном односу и несебичној помоћи. Захваљујем колеги Николи Момчиловићу на другарској помоћи. Велико хвала Катедри за отпорност конструкција на помоћи и подршци током израде овог рада.

Аутор

МОДЕЛСКО ИСПИТИВАЊЕ ЧВРСТОЋЕ СТРУКТУРА СЛОЖЕНЕ ПРОСТОРНЕ ГЕОМЕТРИЈЕ

Резиме:

Могућности испитивања реалних конструкција често су ограничене, посебно уколико се ради о великим конструкцијама. Једно од решења је прављење умањеног модела са циљем да се предвиди понашање реалне конструкције, на основу понашања модела, довољне тачности. Испитивање на моделу уместо на стварној конструкцији у већини случајева резултира великом уштедом новца и времена. Осим тога, експериментални подаци добијени за једну структуру могу се искористити за предвиђање понашања групе сличних структура, односно, савремено пројектовање захтева универзалност у приступу.

Циљ овог рада је да се покаже да је могуће моделско испитивање сложених структура са аспекта чврстоће конструкција, односно да се на основу напонског и деформационог стања модела предвиди напонско и деформационо стање реалне конструкције. Као испитна (огледна) конструкција усвојена је конструкција доње градње (постоља), обртне платформе и доњег дела стубова роторног багера SchRs 630, јер је за функционисање овако сложене машине од круцијалног значаја познавати напонско стање њене носеће конструкције.

Дакле, полазна хипотеза ове дисертације подразумевала је, да је конструкције сложене просторне геометрије, које се састоје доминантно од плоча као конструктивних елемената, могуће испитивати моделски. Са циљем доказивања ове претпоставке, прво су урађени нумерички прорачуни, применом Методе коначних елемената, једне стварне конструкције и њеног умањеног модела. Умањеном структуром названа је структура која је од стварне структуре мања 10 пута по димензијама и по дебљинама конструктивних елемената. Умањена структура је у односу на стварну структуру оптерећена 100 пута мањим оптерећењем (у складу са поставкама Теорије сличности). У оквиру статичког прорачуна, спроведена је анализа пресликавања напона по групама градње предметне конструкције и формулисани су коефицијенти пресликавања за сваку од њих. Генерално говорећи, закључено је да је веза напона умањене структуре и стварне структуре линеарна. Дијагностиковано је доминантно мембранско

напрезање структуре које има за последицу коефицијент пресликавања близак 1. У идентификованим зонама концентрације напона, у којима је доминантан смицајни мембрански напон, коефицијент пресликавања је 1,22. Веза померања умањене структуре и стварне структуре је такође линеарна. То значи да закључци о померањима, деформацијама и напонима стварне структуре могу бити директно изведени само на основу прорачуна умањене структуре, за било која оптерећења. Урађен је и динамички прорачун стварне и умањене структуре. У односу на прорачун стварне структуре, сопствене фреквенце умањене структуре су 10 пута веће (што је у потпуној сагласности са Теоријом сличности).

Затим, урађена је комплетна радионичка документација и технологија за израду физичког умањеног модела и израђен је физички модел, који је подвргнут експерименталним испитивањима. Експериментална испитивања су рађена са циљем верификације нумеричког модела умањене конструкције. Извршено је паралелно снимање модела мерним тракама и системом за бесконтактно мерење померања и деформације. Добијена су висока поклапања резултата, како читавања мерних трака и система за бесконтактно мерење померања и деформација, тако и нумеричког прорачуна, на свим изабраним местима и може се закључити да је нумерички модел верификован на овај начин. Поред тога, виšekратно поновљеним симултаним снимањима методом мерних трака и системом за бесконтактно мерење померања и деформације, потврђена је употребљивост, поузданост и веродостојност методе за бесконтактно мерење померања и деформације у испитивању сложених плочастих структура.

Физички модел и успешни експерименти спроведени на њему, заиста показују да се овакве структуре могу испитивати моделски, без великих ограничења и са довољном тачношћу. Пошто је потврђено велико подударње нумеричког модела умањене конструкције са резултатима експеримента, то практично значи да је и нумерички модел стварне конструкције добар (нумерички модел умањене конструкције је добијен директним скалирањем из нумеричког модела стварне конструкције). Резултати добијени на овој конструкцији применљиви су и на другим конструкцијама сличног типа и намене.

Као један од продуката овог рада, развијен је комплетан нумерички прорачунски модел доње градње, обртне платформе, стубова и аксијалног лежаја конструкције багера SchRs 630 (целовита конструкција) на основу техничке документације произвођача опреме, укључујући све делове конструкције који утичу на крутост. Јасно су идентификоване зоне концентрација напона целе конструкције, као резултат статичког прорачуна. Исто тако, урађен је динамички прорачун стварне конструкције који је значајан како са аспекта идентификације динамичког понашања, тако и као помоћ приликом идентификације слабих места конструкције, јер динамички прорачун заправо представља одговор на питање, како би конструкција реаговала под неким хипотетичким оптерећењем одређеног правца.

Овај нумерички и физички модел представљају само почетак у реализацији формирања базе нумеричких и физичких (умањених) модела сложених структура, која би била значајна и са аспекта науке и са аспекта практичне примене у привреди. Коришћењем сазнања током израде модела и извођења лабораторијског експеримента на овом моделу, моделско испитивање неке друге конструкције било би знатно олакшано.

Кључне речи:

Моделско испитивање, реална структура, умањена структура, метода коначних елемената, чврстоћа, коефицијент пресликавања, физички модел, метода мерних трака, метода за дигиталну корелацију слика (систем за бесконтактно мерење померања и деформација).

Научна област: област техничких наука, машинство

Ужа научна област: отпорност конструкција

УДК број: 539.3/4:624.04(043.3)

MODEL ANALYSIS OF COMPLEX SPATIAL STRUCTURES' STRENGTH

Abstract:

The possibilities of testing real constructions are often limited, especially in case of large constructions. One of the solutions is to create a sub-scaled model in order to anticipate the behavior of the real construction, regarding the behavior of the model, with sufficient accuracy. In most cases, testing on the model instead of the actual construction results in a great saving of money and time. Beside that, the experimental data which are obtained for one structure can be used further to predict the behavior of a group of similar structures, that is, modern design requires the universality in approach.

The aim of this dissertation is to demonstrate that model testing of the complex structures is possible, from the aspect of the strength of the constructions, i.e. it is possible to predict the stresses and deformations of the real structure regarding the stresses and deformations of the model. As a test example, the construction of the substructure, the slewing platform and the lower part of the pylons of the bucket wheel excavator SchRs 630 is taken, because strength of supporting structure has a crucial importance for proper functioning of these machines.

Thus, the starting hypothesis of this dissertation implied that, the constructions of complex spatial geometry, consisting mostly of plates as constructive elements, can be subjected to model testing. In order to prove this assumption, firstly, numerical calculations of a real construction and its sub-scaled model were performed using the Finite Element Method. Sub-scaled structure is 10 times scaled real structure (in size and plates thickness). Sub-scaled structure is loaded with load 100 times lower than the real structure (according to similarity method). Within the static calculation, the analysis of the stress mapping from sub-scaled model to real structure was carried out, by partial groups of construction. The coefficients connecting stresses of sub-scaled model and stresses of real construction were formulated, by partial groups of construction. Generally speaking, it was concluded that the functional dependence between the stress of the sub-scaled structure and the stress of the real structure is linear. The dominant membrane strain of the structure was diagnosed and it results in the coefficient of mapping the stresses of the sub-scaled structure to the stresses of the real structure close to 1. In the identified stress concentration zones, in which the predominant shear

membrane stress is present, the coefficient of mapping is 1.22. The relation between the displacement of the sub-scaled structure and the displacement of the real structure is also linear. This means that the conclusions about displacements, deformations, and stresses of the real structure can be made based on calculations of sub-scaled model, for any load. Dynamic calculations of sub-scaled model and real structure were performed. Comparing these two calculations, eigenvalue frequencies of sub-scaled model are 10 times higher than eigenvalue frequencies of the real structure (in accordance to the similarity method).

Then, complete technical documentation and technology for the production of a physical sub-scaled model were developed, and a physical model was produced. Produced model was subjected to experimental testing. Experimental testing was performed in order to verify the numerical model of the sub-scaled structure. A parallel testing of the model with strain gauges and a system for non-contact measurement of displacement and deformation was performed. High matching results were obtained, of strain gauges and systems for non-contact measurement of displacement and deformation on one side, and numerical calculations on the other side, in all selected spots. It can be concluded that the numerical model is verified in this way. In addition, multiple times repeated simultaneous measurements using the strain gauge method and the system for non-contact measurement of displacement and deformation, the usability, reliability and credibility of the method for non-contact measurement of displacement and deformation, in the examination of complex plate structures, has been confirmed.

The physical model and the successful experiments carried out on it, really show that these structures can be subjected to model testing, without important constraints and with sufficient accuracy. Since matching of the numerical model of the sub-scaled construction with the results of the experiment has been confirmed, this practically means that the numerical model of the real construction is accurate (the numerical model of the sub-scaled construction is obtained by direct scaling from the numerical model of the real construction). The results obtained on this construction are also applicable to other structures of similar type and purpose.

As one of the products of this dissertation, a complete numerical calculation model of the substructure, the slewing platform, the pylons and axial bearing of the bucket wheel

excavator SchRs 630 (including all parts of the construction that affect the rigidity) has been developed, based on the technical documentation of the equipment manufacturer. Stress concentration zones in the entire construction are identified, as a result of the static calculation. Dynamic calculation of the complete structure was also performed. Dynamic calculation is significant both from the aspect of identifying dynamic behavior, and as help in identifying weak construction spots, because the dynamic behavior gives the answer how the construction would react under some hypothetical load of arbitrary direction.

This numerical and physical model represent only the beginning in the realization of data base of numerical and physical sub-scaled models of complex structures, which would be significant both from the aspect of science and from the aspect of practical application in industry. Using the knowledge during the development of the model and the performance of the laboratory experiment on this model, model testing of some other construction would be significantly facilitated.

Keywords:

Model testing, real structure, sub-scaled structure, finite element method, strength, the mapping coefficient, physical model, strain gauges, optical systems for non-contact measurement of displacement and deformation.

Scientific field: Technical sciences-Mechanical engineering

Narrow scientific field: Strength of constructions

UDC number: 539.3/.4:624.04(043.3)

САДРЖАЈ

1	Увод	1
1.1	Моделско испитивање и Теорија сличности, преглед литературе.....	2
1.2	Челичне мегаструктуре, преглед литературе	4
1.2.1	Закључци на основу прегледа литературе и мотиви за прављење умањеног модела	18
1.3	Метода коначних елемената и Метода за дигиталну корелацију слика (Арамис систем), преглед литературе	21
1.3.1	Метода коначних елемената, преглед литературе	21
1.3.2	Метода за дигиталну корелацију слика (Арамис систем), преглед литературе	22
1.4	План истраживања	26
2	Нумеричка метода коначних елемената	29
2.1	Теоријске основе методе	29
2.1.1	Глобална матрица крутости и решење глобалне матричне једначине	30
2.1.2	Извођење матрице крутости коначног елемента	34
2.2	Глобална концепција рачунарских програма на бази Методе коначних елемената и препоруке за моделирање	41
2.2.1	Глобална концепција програма на бази МКЕ	41
2.2.2	Коришћење рачунарских програма на бази МКЕ у корацима	42
2.2.3	МКЕ моделирање	43
2.3	Прорачун носећих структура применом Методе коначних елемената.....	46
2.3.1	Статички прорачун	46
2.3.2	Динамички прорачун	47
2.3.3	Расподела кинетичке и потенцијалне енергије на главним облицима осциловања	50
2.4	Софтверски пакет КОМИПС	50
3	Експерименталне методе	52
3.1	Метода мерних трака	52

3.2	Метода за дигиталну корелацију слика (систем ARAMIS), основне поставке	52
3.2.1	Оснвни принципи функционисања система ARAMIS, принцип “малих површина”	52
3.2.2	Процедуре мерења	54
4	Поставке Теорије сличности	60
5	Нумерички прорачун стварне предметне конструкције	63
5.1	Прорачунски модел конструкције	63
5.1.1	Доња градња (постоље багера), прорачунски модел.....	65
5.1.2	Горња градња (обртна платформа) са доњим делом стубова, прорачунски модел	70
5.1.3	Лежај, прорачунски модел	77
5.2	Статички прорачун стварне конструкције	78
5.2.1	Оптерећење стварне конструкције	80
5.2.2	Резултати нумеричке анализе стварне конструкције	82
5.3	Динамички прорачун стварне конструкције	92
6	Нумерички прорачун умањене структуре	93
6.1	Статички прорачун умањене структуре	93
6.2	Динамички прорачун умањене структуре	111
7	Израда лабораторијског умањеног модела	113
8	Нумерички прорачун лабораторијског модела	116
8.1	Статички прорачун лабораторијског модела	116
8.2	Динамички прорачун лабораторијског модела	125
8.3	Статички прорачун лабораторијског модела - вертикално оптерећење	128
9	Поставка експерименталног испитивања	136
9.1	Експерименталне методе коришћене приликом мерења и припрема за њихово коришћење	136
9.2	Позиционирање модела	142
9.3	Поступак мерења	144
10	Експериментални резултати и њихова анализа	145
11	Нумерички прорачун целовите конструкције	159

11.1	Прорачунски модел целовите конструкције	159
11.2	Статички прорачун целовите конструкције	167
11.2.1	Случајеви оптерећења целовите конструкције, шеме оптерећења и прорачунски модели	170
11.2.2	Резултати нумеричке анализе целовите конструкције	179
11.3	Упоредни преглед целовите конструкције и стварне конструкције	194
11.4	Динамички прорачун целовите конструкције	201
12	Закључак	210
	Литература	216

СПИСАК СЛИКА

Слика 1.1 Шематски приказ методологије истраживања

Слика 1.2 Полазна идеја

Слика 2.1 Колинеарни елементи гредног типа [98]

Слика 2.2 Формирање глобалне матрице крутости од матрица елемената [99]

Слика 2.3 Глобална концепција програмских пакета, шематски приказ [99]

Слика 2.4 Уопштен изглед могуће конвергенције решења померања и напона методом коначних елемената у зависности од броја елемената [98]

Слика 2.5 Зависност укупне грешке од рачунске и грешке методе [99]

Слика 3.1 Систем ARAMIS [66]

Слика 3.2 Промена мале површине пре и после деформисања [66]

Слика 3.3 Подешавање сензорске јединице за одређену мерну запремину [66]

Слика 3.4 Различити калибрациони објекти за мале, средње и велике мерне објекте [66]

Слика 3.5 Две различите методе прерачунавања деформације, графички приказ [66]

Слика 5.1 Роторни багер SchRs 630

Слика 5.2 Горња плоча доње градње са издвојеним коначним елементима

Слика 5.3 Доња плоча доње градње са издвојеним коначним елементима

Слика 5.4 Унутрашњи и спољашњи цилиндар доње градње са издвојеним коначним елементима

Слика 5.5 Обруч који укрућује спољашњи цилиндар доње градње са издвојеним коначним елементима, половина модела

Слика 5.6а Вертикална укрућења између две плоче доње градње са издвојеним коначним елементима, пројекција на хоризонталну раван

Слика 5.6б Вертикална укрућења између две плоче доње градње са издвојеним коначним елементима, просторни изглед

Слика 5.7 Доња градња са издвојеним елементима, цео модел

Слика 5.8 Горња плоча обртне платформе са издвојеним коначним елементима

Слика 5.9 Доња плоча обртне платформе са издвојеним коначним елементима

Слика 5.10 Унутрашњи и спољашњи цилиндар обртне платформе са издвојеним коначним елементима

Слика 5.1а Вертикална укрућења између две плоче обртне платформе са издвојеним коначним елементима, пројекција на хоризонталну раван

Слика 5.1б Вертикална укрућења између две плоче обртне платформе са издвојеним коначним елементима, просторни изглед

Слика 5.12 Укрућења по ободу горње плоче обртне платформе, половина модела

Слика 5.13 Обруч који укрућује спољашњи цилиндар обртне платформе са издвојеним коначним елементима, половина модела

Слика 5.14 Укрућења доње плоче обртне платформе са издвојеним коначним елементима, половина модела

Слика 5.15 Греда облика I профила која међусобно укрућује стубове са издвојеним коначним елементима, цео модел

Слика 5.16 Обртна платформа са издвојеним коначним елементима, цео модел

Слика 5.17 Доњи део стубова са косницима и чворном плочом, издвојени коначни елементи

Слика 5.18 Обртна платформа са доњим делом стубова

Слика 5.19 Лежај, прорачунски модел

Слика 5.20а Прорачунски модел са ослонцима стварне конструкције доње градње, обртне платформе и доњег дела стубова, пројекција на хоризонталну раван

Слика 5.20б Прорачунски модел са ослонцима стварне конструкције доње градње, обртне платформе и доњег дела стубова, бочна раван

Слика 5.20в Прорачунски модел са ослоњцима стварне конструкције доње градње, обртне платформе и доњег дела стубова, просторни изглед

Слика 5.21а Прорачунски модел стварне конструкције, ослоњци и оптерећења

Слика 5.21б Прорачунски модел стварне конструкције, раван пресека (нумерисане тачке пресека у којима су унета оптерећења, поглед одозго)

Слика 5.22а Деформација модела стварне конструкције, бочни поглед

Слика 5.22б Деформација модела стварне конструкције, чеони поглед

Слика 5.22в Деформација модела стварне конструкције, просторни изглед

Слика 5.23 Напонско поље целог модела стварне конструкције

Слика 5.24 Доња градња, напонско поље, стварна конструкција

Слика 5.25 Доња и горња плоча доње градње, напонско поље, стварна конструкција

Слика 5.26 Вертикалне плоче и цилиндри доње градње, напонско поље, стварна конструкција

Слика 5.27 Обртна платформа, напонско поље, стварна конструкција

Слика 5.28 Доња и горња плоча обртне платформе, напонско поље, стварна конструкција

Слика 5.29 Вертикалне плоче и цилиндри обртне платформе, напонско поље, стварна конструкција

Слика 5.30 Доњи део стубова, напонско поље, стварна конструкција

Слика 5.31 Вертикално померање тачака доње стазе лежаја, стварна конструкција

Слика 6.1 Деформација модела умањене структуре

Слика 6.2 Напонско поље модела умањене структуре

Слика 6.3а Напонско поље радијалних плоча доње градње, умањена структура

Слика 6.3б Напонско поље радијалних плоча доње градње, умањена структура, плоча десно

Слика 6.3в Напонско поље радијалних плоча доње градње, умањена структура, плоча лево

Слика 6.4 Напонско поље радијалних плоча горње градње, умањена структура

Слика 6.5а Напонско поље горње плоче доње градње, умањена структура

Слика 6.5б Напонско поље доње плоче доње градње, умањена структура

Слика 6.6а Напонско поље горње плоче обртне платформе, умањена структура

Слика 6.6б Напонско поље доње плоче обртне платформе, умањена структура

Слика 6.7а Напонско поље цилиндара доње градње, умањена структура

Слика 6.7а Напонско поље цилиндара доње градње, умањена структура

Слика 6.7б Напонско поље цилиндара обртне платформе, умањена структура

Слика 7.1 Доња градња у завршној фази израде, радионица Колубара-Метала

Слика 7.2 Обртна платформа у току израде, радионица Колубара-Метала

Слика 8.1 Плоча која “спреже” стубове, издвојени елементи

Слика 8.2 Прорачунски модел са ослонцима и оптерећењима, лабораторијски модел

Слика 8.3 Померање чворних тачака лабораторијског модела

Слика 8.4 Напонско поље лабораторијског модела

Слика 8.5 Слободне осцилације, први мод осциловања, лабораторијски модел

Слика 8.6 Разлика потенцијалне и кинетичке енергије, први мод осциловања, лабораторијски модел

Слика 8.7 Слободне осцилације, други мод осциловања, лабораторијски модел

Слика 8.8 Разлика потенцијалне и кинетичке енергије, други мод осциловања, лабораторијски модел

Слика 8.9 Прорачунски модел са ослонцима и оптерећењима, лабораторијски модел, вертикална оптерећења

Слика 8.10 Деформација лабораторијског модела

Слика 8.11 Напонско поље лабораторијског модела, вертикална оптерећења (напон изражен у $[kN/cm^2]$)

Слика 8.12 Вертикално померање тачака доње стазе лежаја, лабораторијски модел, редукована вертикална оптерећења

Слика 9.1 Позиције мерних трака T1-T4, радијално ребро и цилиндар доње градње

Слика 9.2 Позиција мерне траке T5, горња плоча доње градње

Слика 9.3 Позиција мерних трака T6, T7 и T9, радијално ребро и цилиндар обртне платформе

Слика 9.4 Позиција мерне траке T8, горња плоча обртне платформе

Слика 9.5 Позиција мерне траке T10, косник

Слика 9.6 Диспозиција мерне опреме

Слика 9.7 Локације мерних трака и коресподентних поља за снимање Системом за бесконачно мерење померања и деформације

Слика 9.8 Мерно место X, корен стуба

Слика 9.9 Изглед стохастичке шаре “чепова”

Слика 9.10 Резултати калибрације за већу и мању калибрациону плочу

Слика 9.11 Позиционирање модела у раму за испитивање

Слика 9.12 Унос оптерећења

Слика 10.1 Дијаграм сила за једно мерење

Слика 10.2 Дијаграм читавања мерних трака за једно мерење

Слика 10.3 Позиција мерне опреме приликом снимања, ММ 1-3

Слика 10.4 Поље добијено системом за бесконачно мерење померања и деформације, лева и десна камера, ММ 1-3

Слика 10.5 Поље вертикалних померања добијено системом за бесконачно мерење померања и деформације, растерећено и крајње оптерећено стање, ММ 1-3

Слика 10.6 Вертикално померање тачке у пољу кроз фазе оптерећивања, ММ 1-3

Слика 10.7 Поље вертикалних померања добијено системом за бесконтактно мерење померања и деформације, дуж у вертикалном правцу, крајње оптерећено стање, ММ 1-3

Слика 10.8 Позиција мерне опреме приликом снимања, ММ6

Слика 10.9 Поље добијено системом за бесконтактно мерење померања и деформације, лева и десна камера, ММ6

Слика 10.10 Поље вертикалних померања добијено системом за бесконтактно мерење померања и деформације, крајње оптерећено стање, ММ6

Слика 10.11 Поље добијено системом за бесконтактно мерење померања и деформације, десна камера, без прорачуске маске, ММ9

Слика 10.12 Вертикално померање тачке у пољу кроз фазе оптерећивања, ММ X

Слика 10.13 Поље добијено системом за бесконтактно мерење померања и деформације, лева камера, ММ10

Слика 10.14 Поље вертикалних померања добијено системом за бесконтактно мерење померања и деформације, крајње оптерећено стање, ММ10

Слика 10.15 Вертикално померање тачке у пољу кроз фазе оптерећивања, ММ 10

Слика 10.16 Поље еквивалентних померања добијено системом за бесконтактно мерење померања и деформације, дуж у правцу косника, крајње оптерећено стање, ММ10

Слика 10.17 Позиција мерне опреме приликом снимања “чепова”

Слика 10.18 Бројеви кугли лежаја физичког и нумеричког модела

Слика 10.19 Вертикално померање тачке у пољу кроз фазе оптерећивања, “чепови”

Слика 11.1 Главни део стубова са издвојеним коначним елементима

Слика 11.2 Подужна укрућења (стопе) стубова са издвојеним коначним елементима

Слика 11.3 Улежиштење стреле радног точка са издвојеним коначним елементима, половина модела (један стуб)

Слика 11.4 Конзолни носачи стреле кабине багеристе и њених затега са издвојеним коначним елементима

Слика 11.5 Платформа са лежајем Траке 2 са издвојеним коначним елементима, половина модела (један стуб)

Слика 11.6 Носач непокретног пакета котурача са издвојеним коначним елементима, половина модела (један стуб)

Слика 11.7 Основна носећа структура стубова са издвојеним коначним елементима

Слика 11.8а Стубови багера са издвојеним коначним елементима, поглед од радног точка

Слика 11.8б Стубови багера са издвојеним коначним елементима, просторни изглед

Слика 11.9 Обртна платформа са комплетним стубовима

Слика 11.10а Прорачунски модел са ослонцима целовите конструкције доње градње, обртне платформе и комплетних стубова багера SchRs 630, пројекција на хоризонталну раван

Слика 11.10б Прорачунски модел са ослонцима целовите конструкције доње градње, обртне платформе и комплетних стубова багера SchRs 630, бочна раван

Слика 11.10в Прорачунски модел са ослонцима целовите конструкције доње градње, обртне платформе и комплетних стубова багера SchRs 630, просторни изглед

Слика 11.11 Упрошћена шема оптерећења багера, сопствене тежине елемената који се “каче” на стубове

Слика 11.12 Шема оптерећења стреле кабине багеристе

Слика 11.13 Прорачунски модел за први случај оптерећења, ослонци и оптерећења

Слика 11.14 Упрошћена шема оптерећења багера, сопствене тежине елемената који се “каче” на стубове и радно оптерећење

Слика 11.15 Шема оптерећења хоризонталне равни стреле багера, утицај бочне силе копања

Слика 11.16 Прорачунски модел за други случај оптерећења, ослонци и оптерећења

Слика 11.17 Деформација модела, први случај оптерећења

Слика 11.18 Напонско поље целог модела, први случај оптерећења

Слика 11.19 Доња градња, напонско поље, први случај оптерећења

Слика 11.20 Обртна платформа, напонско поље, први случај оптерећења

Слика 11.21 Стубови, напонско поље, први случај оптерећења

Слика 11.22 Вертикално померање тачака доње стазе лежаја, први случај оптерећења

Слика 11.23а Деформација модела, други случај оптерећења, бочна и чеона раван

Слика 11.23б Деформација модела, други случај оптерећења, просторни изглед

Слика 11.24 Напонско поље целог модела, други случај оптерећења

Слика 11.25 Доња градња, напонско поље, други случај оптерећења

Слика 11.26 Обртна платформа, напонско поље, други случај оптерећења

Слика 11.27 Стубови, напонско поље, други случај оптерећења

Слика 11.28 Вертикално померање тачака доње стазе лежаја, други случај оптерећења

Слика 11.29 Коначни елемент са линије пресека, мембрански напони преведени у оптерећења

Слика 11.30 Коначни елемент са линије пресека, савојно напрезање

Слика 11.31 Прорачунски модел са ослонцима стварне конструкције доње, горње градње и стубова багера SchRs 630, динамички прорачун

Слика 11.32 Слободне осцилације, први мод осциловања, целовита конструкција

Слика 11.33 Разлика потенцијалне и кинетичке енергије, први мод осциловања, целовита конструкција, просторни изглед и бочна раван

Слика 11.34 Слободне осцилације, други мод осциловања, целовита конструкција

Слика 11.35 Разлика потенцијалне и кинетичке енергије, други мод осциловања, целовита конструкција

Слика 11.36 Слободне осцилације, трећи мод осциловања, целовита конструкција

Слика 11.37 Разлика потенцијалне и кинетичке енергије, трећи мод осциловања, целовита конструкција

СПИСАК ТАБЕЛА

Табела 4.1 Закони сличности [1]

Табела 5.1 Оптерећења стварне редуковане структуре

Табела 5.2 Померање чворних тачака горње и доње стазе аксијалног лежаја, стварна конструкција

Табела 5.3 Прва три мода осциловања, стварна конструкција

Табела 6.1 Структура напона у елементима радијалних плоча доње градње, модел стварне структуре и умањене структуре

Табела 6.2 Структура напона у елементима радијалних плоча горње градње, модел редуковане структуре и умањене редуковане структуре

Табела 6.3 Структура напона у елементима горње и доње плоче доње градње, модел стварне структуре и умањене структуре

Табела 6.4 Структура напона у елементима горње и доње плоче горње градње, модел редуковане структуре и умањене редуковане структуре

Табела 6.5 Структура напона у елементима спољашњих цилиндара доње градње и обртне платформе, модел стварне структуре и умањене структуре

Табела 6.6 Померање чворних тачака горње и доње стазе аксијалног лежаја стварне структуре и умањене структуре

Табела 6.7 Прва три мода осциловања, умањена структура

Табела 8.1 Резултујуће силе у пресеку стубова и њихова места дејства

Табела 8.2 Вредности еквивалентног напона у елементима радијалних плоча доње градње, лабораторијски модел и модел умањене структуре

Табела 8.3 Вредности еквивалентног напона у елементима радијалних плоча обртне платформе, лабораторијски модел и модел умањене структуре

Табела 8.4 Померање чворних тачака горње и доње стазе аксијалног лежаја умањене структуре и лабораторијског модела

Табела 8.5 Вредности еквивалентног напона у елементима радијалних плоча доње градње, лабораторијски модел, вертикална оптерећења

Табела 8.6 Вредности еквивалентног напона у елементима радијалних плоча обртне платформе, лабораторијски модел, вертикална оптерећења

Табела 8.7 Померање чворних тачака доње стазе аксијалног лежаја лабораторијског модела, вертикална оптерећења

Табела 8.8 Вредности еквивалентног напона у елементима радијалних плоча доње градње, лабораторијски модел, редукована вертикална оптерећења

Табела 8.9 Вредности еквивалентног напона у елементима радијалних плоча обртне платформе, лабораторијски модел, редукована вертикална оптерећења

Табела 8.10 Померање чворних тачака доње стазе аксијалног лежаја лабораторијског модела, редукована вертикална оптерећења

Табела 10.1 Поређење резултата добијених мерењем мерним тракама и системом за бесконтактно мерење померања и деформације и резултата нумеричког прорачуна, максимално оптерећење, ММ 1-3

Табела 10.2 Поређење резултата добијених мерењем мерним тракама и системом за бесконтактно мерење померања и деформације и резултата нумеричког прорачуна, максимално оптерећење, ММ6

Табела 10.3 Поређење резултата добијених мерењем мерним тракама и системом за бесконтактно мерење померања и деформације и резултата нумеричког прорачуна, маскимално оптерећење, ММ9

Табела 10.4 Поређење резултата добијених мерењем мерним тракама и системом за бесконтактно мерење померања и деформације и резултата нумеричког прорачуна, максимално оптерећење, ММ X

Табела 10.5 Поређење резултата добијених мерењем мерним тракама и системом за бесконтактно мерење померања и деформације и резултата нумеричког прорачуна, максимално оптерећење, ММ10

Табела 10.6 Поређење резултата добијених мерењем системом за бесконтактно мерење померања и деформације и резултата нумеричког прорачуна, максимално оптерећење, “чепови”

Табела 11.1 Сопствене тежине свих елемената који се “каче” на стубове [107]

Табела 11.2 Спољашња оптерећења стубова, излазни податак шеме оптерећења, први случај оптерећења

Табела 11.3 Сила копања и запрљање радног точка [107]

Табела 11.4 Спољашња оптерећења стубова, излазни податак шема оптерећења, други случај оптерећења

Табела 11.5 Померање чворних тачака горње и доње стазе аксијалног лежаја, први случај оптерећења

Табела 11.6 Померање чворних тачака горње и доње стазе аксијалног лежаја, други случај оптерећења

Табела 11.7 Вредности еквивалентног напона у елементима радијалних плоча доње градње, модел целовите структуре и модел стварне структуре

Табела 11.8 Вредности еквивалентног напона у елементима радијалних плоча обртне платформе, модел целовите структуре и модел стварне структуре

Табела 11.9 Померање чворних тачака доње стазе аксијалног лежаја, модел целовите структуре и модел стварне структуре

1 УВОД

Са развојем индустрије уочен је значај тестирања готовог производа пре његовог пуштања у употребу. Исто је и са машинама и машинским деловима. Значај испитивања прототипа је велики, али су могућности његовог испитивања често ограничене посебно уколико се ради о великим конструкцијама. Уместо прављења прототипа, једно од решења је прављење (умањеног) модела са циљем да се предвиди понашање стварне конструкције на основу понашања модела довољне тачности. Испитивање на моделу уместо на стварној конструкцији у већини случајева резултира великом уштедом новца и времена. Осим тога, експериментални подаци добијени за једну структуру могу се искористити за предвиђање понашања групе сличних структура, односно савремено пројектовање захтева универзалност у приступу.

Циљ овог рада је да се покаже да је могуће моделско испитивање сложених структура са аспекта чврстоће конструкција, односно да се на основу напонског и деформационог стања модела предвиди напонско и деформационо стање стварне конструкције. Моделско испитивање омогућава тестирање у лабораторијској “чистој” средини, што омогућава и примену осетљиве опреме за испитивање. Таква опрема је нпр. систем за бесконтактно мерење напона и деформација (Aramis system) који поседује Лабораторија за отпорност конструкција. Пошто је то још увек нов и модеран систем, могуће га је још једном ставити на пробу мерењима на сложеном примеру. Дакле, овај систем ће бити коришћен за мерење померања и одеђивање концентрације деформација (напона). Изведене закључке могуће је применити на нека будућа мерења.

Као испитна (огледна) конструкција усвојена је конструкција доње градње (постоља), горње градње (обртне платформе) и дела стубова роторног багера SchRs 630. Са становишта Отпорности конструкција ова структура је значајна из следећих разлога:

– то је конструкција јако сложене геометрије састављена од плоча као конструктивних елемената; плоче су неправилног распореда, различите просторне оријентације и различите функције;

- оптерећења овакве конструкције су изразито динамичког карактера (стохастичка су), а прорачуни структуре по стандарду су са статичким оптерећењима;
- конструктивно припада тзв. “multibody machines”, што значи да се састоји од више група градње, при чему је јако сложени пренос оптерећења са једне на другу групу градње преко великог аксијалног лежаја;
- за функционисање овако сложене машине од круцијалног значаја је познавати напонско стање носеће структуре;
- роторни багери су изузетно значајне и одговорне машине, а баш овај модел роторних багера је широко заступљен на коповима у нашој земљи.

1.1 Моделско испитивање и Теорија сличности, преглед литературе

Моделско испитивање структура, као што је претходно речено, почиње да узима примат над испитивањем прототипа при решавању проблема чврстоће конструкција [1]. Међутим, структуре које су до сада испитиване су углавном једноставног дизајна и геометрије, а циљ овог рада је да се покаже могућност примене на структуре сложене геометрије.

У раду [2] показана је примена Теорија сличности на скалирање отпора ломљењу леда (ширење прслине). То је рад написан 1974. године, а идеја свих тих ранијих радова је била проналажење неких бројева (бездимензионе групе) као што су већ постојали у механици флуида (Raynolds, Froude, Cauchy), који би омогућили скалирање резултата добијених на малом моделу (у лабораторији) на стварни проблем. Закључци овог рада су, да је брзина раста прслине у прототипу (стварне конструкције) већа него у моделу, до појаве прслине може доћи пре појаве течења у великој структури, док исти материјал може да покаже течење у малим структурама и већа је брзина ширења прслине на стварној конструкцији него на моделу.

У радовима [3] и [4] тежиште је на дизајну умањеног модела за пресликавање проблема вибрација, односно који су то закони скалирања и фактори који утичу на тачност модела. Закључци су демонстрирани на примеру равне и закривљене луске направљене од композитних материјала. Тачније, циљ је да се предвиди

понашање стварне конструкције на основу понашања модела са довољном тачношћу. Овде је још једном истакнуто колико је значајно испитивање на моделу уместо на стварној конструкцији и посебно велика уштеда новца и времена. Такође, наглашена је могућност да се експериментални подаци добијени за једну структуру, искористе за предвиђање понашања групе сличних структура. У другом раду, параметри чији утицај је испитиван су: број слојева, распоред слојева и дисторзија у дужини и радијусу љуске, између стварне конструкције и модела. Закључак овог последњег је да за одговарајући опсег радијуса, модел различите дужине од прототипа који није геометријски скалиран, може да предвиди понашање прототипа све док оба имају исту фреквенцу.

У раду [5] приказана је експериментална анализа вибрација скалираног модела троспратне решеткасте конструкције.

Аутори радова [6] и [7], као и већина осталих аутора који се баве сличношћу и скалирањем користе “ π теорему” која комбинује променљиве у погодне групе. У првом раду нумеричка валидација је изведена на горњој плочи поклопаца нуклеарног реактора. Поређени су напони добијени Методом коначних елемената на моделу и прототипу на 15 различитих локација, одступања су била око 3% у близини ослонаца, а на осталим местима нижа. У другом раду је испитиван цео поклопац нуклеарног реактора, статички оптерећен. Ту се апострофира да је разлог за прављење модела заправо димензија стварног поклопаца, који је пречника преко 12m. Овде је поред нумеричке анализе, рађена и експериментална анализа модела. Притом је добијен знатно већи угиб, него угиб добијен нумеричким путем (разлика 20%). Као разлог за то наводи се, условно речено, лоша израда модела, који је направљен од аралдита, а везивно средство је смањило крутост.

Рад [8] је заправо савремена студија на тему сличности и скалирања. Још једном се наводе сва ограничења испитивања великих конструкција, као и ограничења приликом испитивања њихових модела где од својстава материјала, прецизности израде и технике оптерећивања зависи тачност измерених резултата. У овом раду испитана је могућност примене теорије сличности за испитивање ушки као једног од најкритичнијих структуралних елемената.

У раду [9] приказана је примена теорије сличности на испитивање динамички оптерећених структура и још једном су табеларно дате битне физичке карактеристике. Још једном се поставља питање како смањити величину конструкције, а да се не изгубе битне карактеристике у понашању и наглашава да мале варијације могу бити критичне за интерпретацију резултата.

У раду [10] приказана је примена теорије сличности за испитивање посуде под притиском.

1.2 Челичне мегаструктуре, преглед литературе

Роторни багери су гигантске машине за површинску експлоатацију угља. Повољна расподела напона и деформација носеће структуре, без неких великих концентрација напона, од виталног је значаја за њихов рад. У овом поглављу биће дат преглед актуелних трендова испитивања структура роторних багера, са акцентом на трендове у региону. Литература [11, 12] даје основе за изучавање ових машина у смислу конструкције и пројектовања, док стандард [13] даје законска ограничења за пројектовање и експлоатацију.

У раду [14] апострофиран је значај машина за површинску експлоатацију угља и њихово правилно функционисање. Из тога произлази да број отказа ових машина треба свести на минималну могућу меру. Са економске тачке гледишта отказ овакве машине подразумева двоструки “трошак”, трошак поправке и трошак као последица тога што машина стоји. При томе је доминантнији овај други, што прерачунато на услове из 2011. године значи да само један сат застоја роторног багера кошта 11 000 евра. Даље, аутор рада [14] каже да када већ дође до отказа машине, примарно треба открити шта је изазвало отказ да би се спречило понављање отказних ситуација. Затим, из тог отказа се нешто “научи” и то знање се можда имплементира у стандарде. Дакле, аутор овог рада закључује да се о конструкцији најбоље може научити нешто из радног века те конструкције и да се примењена знања могу применити на те и сличне конструкције.

Готово сви аутори се слажу око редоследа корака у случају отказа једне овакве машине, како би се машина што пре оспособила и вратила у експлоатацију. Наиме, када дође до отказа прво је потребно наћи узрок зашто је то тако. Узрок може бити један од следећа четири: грешка у дизајну (геометрији) одређеног дела

структуре, грешка у производњи делова (грешка у материјалу или у завареним спојевима), грешка у експлоатацији, или непредвиђене околности (неочекивана радна оптерећења). Узрок се тражи тако што се из материјала узимају узорци који подлежу даљем испитивању ради идентификације грешке у материјалу или завареном споју. Са друге стране ради се нумерички прорачун и ако се места највећих концентрација напона поклопе са појавом прелина које су водиле до отказа, констатује се да је узрок отказа лоше дизајнерско решење неког дела структуре. Ако је то случај, даје се предлог санације и редизајна тог дела структуре. Када се ради редизајн предлог редизајна треба да буде такав да се постигне одређено напонско стање у структури (да се смање концентрације напона), да је време за извођење радова што краће и да све то може да се обави на терену из минимално могуће демонтирање делова машине. Потврду предложеног решења (предложено на основу прорачуна Методом коначних елемената) и изведеног на конструкцији багера, најчешће пружа одређени број циклуса рада без отказа (посредни докази). Уколико је потребно, може се извршити верификација изведеног решења методом мерних трака (тај тзв. експеримент се може извести једино у току рада багера са тренутним радним оптерећењем).

У раду [15] дато је објашњење појма интегритет конструкција. Почетком 21. века то је била релативно нова научна и инжењерска дисциплина која обухвата анализу стања и дијагностику понашања и попуштања, као и процену чврстоће и преосталог радног века и могућност ревитализације конструкција. У радовима [16-18] приказана је процедура нумеричко-експерименталне дијагностике чврстоће сложених челичних конструкција. У раду [16] даје се тумачење доброг понашања конструкције у експлоатацији, односно индикатори доброг понашања. Као индикатори доброг понашања наводе се велика разлика између највећег радног напона и напона течења, равномерна расподела деформације, напона и енергије, мање присуство концентрације напона, даљи одзив конструкције од побуде, виша прва фреквенца и нижи динамички фактор појачања. У раду [17] дата је комплетна методологија за анализу и дијагностику понашања структура. Ово се односи на идентификацију и решење проблема лошег дизајна структуре. За разлику од аутора свих претходних радова који као показатељ слабих места на структури апострофирају напон (и деформацију), аутор овог рада апострофира да

је за стицање целокупне слике понашања структуре потребно још познавати и њене сопствене фреквенце, расподелу кинетичке и потенцијалне енергије по главним модовима осциловања, као и удео мембранских и савојних напона у укупној вредности напона. Као и у претходном раду дате су препоруке шта значи добро понашање структуре, нпр. да је прва сопствена фреквенца што виша и да је размак између суседних фреквенци што већи, да су напони у структури доминантно мембрански и нормални, итд. Препоруке су показане на примерима. Аутори рада [18] наводе да је развој интегритета и века конструкција проистекао из тренутног стања опреме домаће индустрије и да се методе дијагностике користе у сврху реконструкције, санације, поправке, ревитализације, побољшања, промене режима рада, процене преосталог радног века, али и наручивања нове опреме. Поново се наглашава да је нумеричко-експериментални приступ неопходан, односно, да је мерења и прорачун потребно спроводити итеративно.

Дијагностика описана у претходним радовима кроз низ процедура демонстрирана је на примерима роторних багера [19, 20] и транспортера и одлагача [21] као међусобно јако сродних типова конструкција. У раду [19] још једном се наглашава да су сложеност конструкције, висока цена и трошкови отказа и одржавања, главни разлози за истраживање и развијање ефикасног система за дијагностику. То су већ претходно описане процедуре за дијагностику челичних конструкција уопште, само мало прилагођене типу и условима рада ових конструкција. Истиче се да је поступак дијагностике итеративан, односно “аутоексперименталан”, “аутокорективан”, односно за циљ има не само решавање конкретног проблема, него и учење о сличним конструкцијама. У раду [20] приказани су решени проблеми чврстоће конструкција роторних багера. На радном месту багера С700с десила са хаварија, попуцали су везни лимови точка и вратила. Установљено је присуство високих напона смицања на том месту услед недовољне дебљине спољашње плоче. То је решено увођењем кружног прстена. Динамичко понашање одложне стреле истог багера је било лоше и решено је додавањем нових затега. На истом багеру је требало решити проблем пуцања везе стуба и цилиндра на горњој градњи. То је решено повећањем дебљина горње и доње хоризонталне плоче. На доњој градњи истог багера уочено је пуцање везних носача доње градње и транспорта багера. Проблем је решен додавањем

вертикалних плоча, док је повећање дебљина хоризонталних плоча и цилиндра, иако делује разумно са аспекта чврстоће, технички потпуно неоправдано, па то није ни урађено. У свим случајевима, реконструкција је рађена на бази нумеричког прорачуна Методом коначних елемената за најнеповољнији случај оптерећења конструкције. На горњој градњи багера 800 јављала су се стална пуцања, у једном тренутку је уочена прлина на споју цилиндра и доње хоризонталне плоче дужине 2 m. Интересантно је да је овде приликом прорачуна горње градње додата и доња градња, како би се тачно пренело оптерећење између горње и доње градње кроз лежај. Приказани су и доминантно динамички оптерећени делови као што су погон копања багера SRs 2000, погонски систем и стрела радног точка багера SchRs 1300. Осим тога приказана су и дизајнерски различита решења облика ведрица багера SchRs 800 и SchRs 630. У раду [21] приказани су примери решених проблема на конструкцијама транспортера и одлагача, иначе конструкција јако сличних конструкцијама роторних багера. На доњој градњи одлагача ARs 1400 дијагностикована је концентрација напона у вертикалној критичној плочи и проблем је решен додавањем вертикалних укрућења. Сличан проблем се јавио и на вертикалној плочи горње градње истог одлагача. Проблем стуба истог одлагача је решен продужењем појасног лима до врха стуба. Приказан је и проблем ослонаца самоходног транспортера BRS/ARS. Прорачун је спроведен за три различита случаја оптерећења. У истом раду анализирана је и погонска станица ЈИР POL/MAG за коју је закључено да има недовољну просторну крутост и сопствене фреквенце блиске побудним фреквенцама што има глобални карактер, а проблем је донекле решен локалним ојачањима. У раду [22] детаљно је анализиран проблем одложне стреле багера С700s споменут у раду [20]. На стрели су се појавиле прлине, урађен је нумерички прорачун, мерења на самој конструкцији и дијагностиковано лоше динамичко понашање као узрок прлина (измерене амплитуде до 60 cm). Оптимизација конструкције је урађена, а верификацију изведеног решења представља то што није накнадно дошло до појаве прлина. У раду [23] анализирана је појава прлина на горњој градњи роторног багера SchRs 800. Изведен је нумерички прорачун ове структуре Методом коначних елемената којим су потврђена слаба места конструкције, али прорачунски напон на тим

местима није био довољно висок да би се могао сматрати узроком појаве прслине. Међутим, сада долази до изражаја то што је багер динамички оптерећена машина (изложена цикличном променљивом оптерећењу). Наиме, мерена су убрзања на идентификованом лошем месту конструкције и њихов ниво је показао да би на тим местима прорачунска оптерећења требало увећати 1,25-1,5 пута да би се добила права слика понашања и да је појава концентрације напона узрок појаве прслине. Предлог редизајна је изведен на конструкцији, напонско стање целе конструкције је поправљено, а афирмацију представља дужина радног века без отказа после реконструкције. У раду [24] истих аутора приказана су два примера динамички оптерећених конструкција. Први пример представља тракасти транспортер са погонском групом, на ком је приказана методологија дијагностике понашања динамички оптерећених структура. Дакле, прво је направљен нумерички модел за прорачун, а затим су рађена мерења на самој структури. Структура је побуђена и снимљен је одзив структуре, а све у циљу верификације нумеричког модела. На другом примеру погонске групе применом исте методологије идентификована су слаба места структуре. Урађена је реконструкција, а поновљена мерења су верификовала успешност. У раду [25] дати су примери дијагностике понашања погонских јединица радног точка багера SRs 400, SRs 1300 и SRs 2000. Методологија је иста као у претходном раду [24]. Рад [26] представља верификацију значаја познавања расподеле кинетичке и потенцијалне енергије по главним модовима осциловања као што је наглашено у раду [17]. На познавању ове расподеле базира се метода реанализе, технике кроз коју се поправља динамички одзив структуре, а локално се поправљају лоши делови конструкције. У овом раду дате су препоруке како редизајнирати неку зону у зависности од тога јесу ли у тој зони кинетичка и потенцијална енергија обе високе или је једна од те две доминантна. Илустровано је више предлога побољшања структуре доње градње једног роторног багера.

У раду [27] приказан је проблем идентификације модалних облика када се ради о динамичком прорачуну сопствених фреквенца на примеру једног претоварног моста (решеткаста конструкција). Аутор овог рада истиче да овакав проблем захтева и нумеричку и експерименталну анализу, јер су ове две методе комплементарне. Аутор истиче да уколико се ради само нумерички прорачун у

овом случају, може доћи до погрешног препознавања модова. Што се мерења тиче, као проблем се намеће то што, да би се спровела мерења, односно, да би се увела побуда, машина мора да се заустави. Осим тога, мерења су спроведена у 9 тачака у два правца, са посебним освртом на то где се очекују превојне тачке динамичког модела, а аутор опет истиче како је ради боље идентификације понашања требало извршити мерења на већем броју места. Све то говори о сложености интерпретације експерименталних резултата.

Аутор радова [28, 29] у раду [28] бавио се мерењем сопствених фреквенца осциловања и поређењем добијених резултата на два различита роторна багера, SchRs 1320 и К 2000. Аутор истиче да су роторни багери екстремно оптерећене машине код којих се интеракција између радног точка и материјала рефлектује на челичну структуру као вибрације. Да би се вибрације смањиле потребно је добро подешавање динамичких својстава машине кроз добар дизајн. Даље, аутор слично као аутор рада [17] истиче да су сопствене фреквенце структуре смернице за добар дизајн, а да је за њихову верификацију потребно извести мерење на самој структури. Ова два поређена багера су сличне конструкције, а разлике су те које су битне за динамички одзив структуре. Постоје разлике у димензијама основне структуре: у распореду обе стреле; на првом затеге су челична ужад, а на другом профили; радни точак првог има 26 кашика, другог 15 и већег је пречника. Разлике су битне за поређење динамичког понашања ових структура јер положај маса има доминантан утицај на сопствене фреквенце. Маchine су заустављене, експеримент је изведен на машинама за два различита случаја када радни точак не додирује и када додирује етажу, да би се узео у обзир утицај пригушења. Побуда је изведена тако што је на стрелу радног точка окачен баласт у виду пластичног експлозива који у једном тренутку експлодира, а све је мерено акцелерометрима у 3 правца на 11 различитих места на структури. Циљ је био да се оно “научено” кроз ове експерименте употреби приликом пуштања у рад роторног багера КК 1300. У раду [29] приказана је анализа вибрација SchRs 1320 у раду, током процеса копања.

Кроз радове [30-41] група аутора бави се различитим проблемима отказа носеће структуре и делова структуре рударске механизације. У раду [30] дат је још једном хронолошки распоред корака у случају отказа како би се машина што пре

оспособила и вратила у експлоатацију. Готови сви аутори се слажу какве акције треба предузети када дође до отказа овакве машине и да приступ свакако треба да буде нумеричко-експериментални. Аутори овог рада наглашавају да увек треба имати на уму да су рачунска оптерећења хипотетичке природе и да резултати добијени са тим оптерећењима морају бити проверени.

Ова група аутора кроз већи део својих радова спроводи ову процедуру у случају отказа конструкције. Од целе ове групе радова истих аутора, са аспекта конструкције којом се баве, а у светлу теме овог доктората, можда најинтересатнији је рад [31]. У том раду анализирана је појава прслине на омотачу обртне платформе горње градње багера O&K SchRs 630, око отвора за каблове. Урађен је нумерички прорачун конструкције горње градње, при чему су оптерећења унета по стандарду [13]. Прорачун је верификован тако, што се места највећих концентрација напона заиста поклапају са местима на којима су се физички појавиле прслине. Уклоњен је део цилиндра захваћен прслинама и постављен је нови, редизајниран. На нови елемент дела цилиндра постављена је мерна трака због верификације изведеног решења; измерени напони у радним условима су били 10% мањи него што су добијени прорачуном. У раду [32] анализирано је напонско-деформационо стање обртне платформе багера SRs 1200. Наиме, на датој конструкцији уочене су прслине у зони ослањања задњих стубова пилоне. Ту је направљен кинематски модел, за различите положаје стреле одређен је утицај отпора копања и одређена је зависност силе у затегама од положаја среде ротора (за разлику од прорачунског оптерећења по стандарду [13]). Дакле, на ушкама које служе за везу унето је неравномерно оптерећење (оно које је добијено на основу кинематског модела). Урађен је прорачун за 36 различитих случајева оптерећења. Аутори наводе да је нумерички модел за анализу Методом коначних елемената “формиран тако да у свим детаљима одговара стварној конструкцији”. Урађена је упоредна анализа неколико варијантних решења реконструкције пре усвајања коначног изведеног решења. Аутори на крају овог рада апострофирају да набавка нове опреме изискује знатан материјална средства, а да је ревитализација најрационалнији пут очувања и подизања перформанси тешке рударске механизације у нашој земљи. У раду [33] анализирана је иста конструкција као у претходном раду [32] (обртна платформа

багера SRs 1200). Овде је осим анализе напонског стања конструкције обртне платформе акценат стављен на предложена решења за редизајн и приказан је поступак реконструкције. Напони измерени у реконструисаној зони су 12% мањи од прорачунски добијених, а аутори то објашњавају стохастичким карактером оптерећења и расподелом радног оптерећења по кашикама радног точка (прорачуном узето да оптерећење делује на једну кашику на максималном удаљењу од центра круга обртне платформе). Реконструкција, осим што је била ефикасна, била је и брза - урађена је у току ремонта. Иста конструкција анализирана је у раду [34], у којем је детаљно описано враћање те конструкције у експлоатацију после хаварије, у регуларно стање експлоатације. Овде се наводи честа појава прслина на конструкцијама доње градње и обртне платформе оваквих конструкција, као последица грешака у дизајну конструкције, односно у геометрији. Хаварија је искоришћена да се и осим пуког враћања у експлоатацију, уради и редизајн обртне платформе. Осим реконструкције озбиљно оштећене обртне платформе, инсталирани су и нови, боље дизајнирани елементи у критичним зонама, који елиминишу концентрацију напона на тим местима. У раду [35] анализирана структура је доње постоље роторног багера С-700S. Наиме, током низа година експлоатације уочене су прслине на доњем постољу. Покушај интуитивне репарације додавањем вертикалних плоча се лоше завршио, јер су после кратког времена уочене прслине како на оригиналној структури, тако и на придодатим плочама. То је захтевало прављење детаљнијег плана реконструкције. Најпре је урађен нумерички прорачун. Конструкција је оптерећена прорачунским оптерећењима по стандарду [13]. Нумерички прорачун је показао да се прслине заиста јављају на местима концентрације напона и показао правац у коме би требало спровести реконструкцију. Реконструкција је спроведена на структури, а верификацију датог решења представља број радних сати без отказа.

У радовима [36-40] анализирани су неки елементи конструкције роторних багера (локално). У раду [36] анализиран је отказ ослонца котурача багера SchRs 1760, у раду [37] отказ гусеничних колица истог багера, у раду [38] отказ потпорне решетке стреле противтега багера ERs 1000, у раду [39] отказ карике ланца гусеница багера SchRs 1760, а у раду [40] отказ карике ланца гусеница претоварне машине ARs 2000. Спроведена је иста методологија тражења узрока отказа у свим

случајевима како је већ објашњено у раду [30]. Спроведен је нумерички прорачун свих конструкција, оптерећења су унета према стандарду [13]. Узет је узорак за испитивање материјала у зони отказа. У случају [36] установљено је, да је отказ био резултат суперпозиције негативних ефеката изазваних неадекватним обликом, дебљином и димензијама дела и дефектима метала заварене структуре. У случају [37] показано је, да је отказ последица лошег дизајна и дат је предлог редизајна. И дизајнирана и редизајнирана конструкција су испитане на специјално направљеном испитном столу, оригинална структура је показала пластичне деформације као у раду, на редизајнираној није било нежељених појава. Случај [38] такође представља пример лошег дизајна елемента конструкције. У случајевима [39, 40] показано је да прслине јесу у прорачунски добијеним зонама највећих напона, али ти напони нису довољно високи да би довели до појаве прслина. Показано је постојање грешака у материјалу. У раду [41] представљени су још неки примери лоше геометрије (дизајна) који су били узрок отказа роторних багера.

У раду [42] анализиран је отказ ослонца котурача багера SchRs 1760 (исти догађај анализирали су други аутори у раду [36]). Аутори овог рада наглашавају да кључ разумевања отказа елемената роторних багера представља променљиво оптерећење које зависи од много фактора заједно са концентрацијама напона на критичним местима. Идентификовано је, да је дошло до заморног лома у завареном споју, а појаву прслине су могле да изазову грешка у дизајну и грешка у завареном споју. У овом раду приказана је иницијација и раст прслине, идентификоване су зоне лома. Аутори овог рада истичу како се у инжењерској пракси најчешће ослања на године искуства, а да постоји мањак студија случаја.

У раду [43] аутори су анализирали узроке лома затега стреле противтега роторног багера KWK-1400. До лома је дошло у завареном споју затега и њене ушке. Овај случај је, по геометрији и функционалности, јако сличан случају описаном у радовима [36, 42]. Направљен је прорачунски МКЕ модел, напони су прорачунати за два случаја оптерећења по стандарду [13]. Међутим, аутори овог рада ипак узимају у обзир то да је оптерећење багера динамичко и уводе појам “амплитуде промене напона”. Тестиран је и материјал у зони лома. Ови аутори су сагласни са методологијом процедуре тражења узрока отказа као и сви претходни аутори.

Закључак је и овде, да је узрок отказа суперпонирање негативних ефеката лошег дизајна и грешке у завареном споју. Ови аутори за превенцију отказа полагају наде у мониторинг и “state-of-the-art” компјутерске симулације.

У раду [44] приказана је анализа лома вратила гусеничног погона роторног багера SchRs 630. Током редовног ремонта на прелазу између два пречника уочена су оштећења по целом обиму вратила. Таква оштећења су се јављала на пет различитих вратила током експлоатације. Покушај, да се вратила не би мењала тако често, је представљало репарационо заваривање, што се није показало као ефикасно. Аутори овог рада су показали да нема нехомогености и грешака у материјалу, иако је одмах било јасно да је узрок отказа грешка у дизајну. Метода коначних елемената је показала концентрацију напона баш на месту прслине, довољно велику да би могла да изазове прслину. Улазно оптерећење за прорачун је снимљено на самом багеру. Као предлог редизајна предложено је повећање радијуса заобљења на прелазу између два пречника. Методом коначних елемената урађена је и анализа замора. Иста група аутора у раду [45] анализира лом осовине и отказ багера SRs 2000. Код овог типа багера радни точак је закачен на осовину која пролази кроз шупље вратило. У покушају елиминисања несаосности два елемента, додата је бронзана чаура, што је повећало напон три пута (показано Методом коначних елемената) у односу на основни случај. Оптерећење је унето по стандарду [13].

У раду [46] аутори анализирају узрок лома вратила радног точка роторног багера KWK 1200 M. Наизглед овај проблем је сличан проблему описаном у раду [44], у оба случаја је до лома вратила дошло на прелазу два пречника. Међутим, када се овде сумирају напони који потичу од торзије (сила копања) и савијања (сопствена тежина) добија се напон 2,5 пута мањи од оног који би могао да изазове појаву прслине. Нумерички прорачун спроведен је на основу оптерећења измерених у раду. Дакле, начелни закључак је да узрок појаве прслине овде није последица дизајна. Међутим, аутори овог рада постављају питање да ли треба као референтни напон узимати границу течења или “fatigue limit”. Закључак је, да је појава прслине резултат замора, грешке у материјалу и завареном споју. Аутори овог рад користе систем FALANCS за прорачун замора и процену радног века.

У раду [47] анализирано је напонско стање елемената шасије транспортера A2RsB 12500 нумеричким и експерименталним путем. Све то је рађено у циљу процене техничког стања. Рађен је нумерички прорачун шасије и погонског вратила кретања покретног пара гусеница. Прорачунско оптерећење је унето по стандарду [13] и урађен је прорачун за пет различитих шема оптерећења шасије и две шеме оптерећења погонског вратила. Тако су идентификована слаба места конструкције и на њих су залепљене мерне траке. Мерењима је показано да је управљачка сила током скретања 3 пута већа него прорачунска. Овај рад представља још један пример зашто је неопходно радити и нумерику и експеримент (верификацију).

Аутори рада [48] анализирају носач радног точка роторног багера SRs (H) 220 на коме је уочена појава прлина. Спроведен је нумерички прорачун, прорачунско оптерећење је унето по стандарду [13]. Као узрок појаве прлина идентификовано је постојање концентрације напона у зонама појаве прлина. Додавањем укрућења изведено је ојачање критичних зона (редизајн).

Аутори рада [49] уочили су прлину на кочници једне рударске машине и елиминисали раст прлине ојачањима. Решење је пронађено коришћењем Методе коначних елемената.

У раду [50] приказано је тестирање главних носећих делова репарираниог багера SH630 методом мерних трака. Методом коначних елемената су дефинисана мерна места и на тим местима су позициониране мерне траке. Мерења су спроведена за све могуће фазе рада (сва вероватна оптерећења).

У раду [51] решен је проблем појаве прлине на чворној плочи косника стубова багера SchRs630. Иста методологија је примењена као и у претходним радовима који се баве сличним конструкцијама, што првенствено подразумева израду нумеричког прорачуна. Нумерички прорачун је обухватио конструкцију стубова и горње и доње градње багера, да би се стекао утисак о понашању целе конструкције. Првобитно је нумерички прорачун урађен за два случаја оптерећења, оптерећење од сопствене тежине и за радно оптерећење (укључене су и сопствене тежине). За те случајеве прорачуна, уочено је да не постоји концентрација напона на месту појаве прлине. Дакле, потребно је било идентификовати које оптерећење доводи до појаве прлине на датом месту. То је

урађено уз помоћ динамичког прорачуна, јер практично главни модови осциловања показују како се конструкција понаша под неким могућим оптерећењем. У трећем моду осциловања, који представља увијање стубова (смицање стубова једног у односу на други), ово место је идентификовано као угрожено. Тада се дошло до закључка, да је критичан тренутак у радном циклусу багера, тренутак кочења кружног кретања багера, када велике масе стреле радног точка и стреле противтега на великом краку, изазивају инерцијалне силе. Као последица дејства тих инерцијалних сила долази до појаве концентрације напона (потврђено нумеричким прорачуном) и појаве прслине на датом месту. Метода реанализе презентована у раду [26] искоришћена је као смерница за проналажење решења за редизајн тог дела структуре. На основу расподеле разлике потенцијалне и кинетичке енергије, закључено је да је место појаве прслине место погодно за редизајн и да треба повећати крутост тог дела структуре. На најједноставнији могући начин, повећањем дебљине чворне плоче, напон у елементима плоче смањен је за више од 20% и на вредност далеко испод напона течења. Осим захтева реконструкције после отказа, већ описана методологија може се искористити за побољшање перформанси неке будуће машине. Значи, технолошки захтеви су главни разлози за редизајн. Тако је у раду [52] анализирана могућност продужења стреле багера SchRs740 као последица технолошког захтева за што дужом стрелом. На основу статичког и динамичког прорачуна, аутори су дошли до закључка да би оптимално било продужити стрелу за 5 m. Свако даље продужење изазива експоненцијалан скок померања и напона, а пад сопствених фреквенца осциловања, односно смањује се и статичка и динамичка крутост целе конструкције.

Као што је већ поменуто, роторни багери (и сродне конструкције) су “multibody machines”, што значи да се састоје од конструктивних целина међусобно повезаних (великим) лежајевима. Таквим једним лежајем, повезане су доња градња и обртна платформа депонијске машине LZKS 1600, а то је приказано у раду [53]. Наиме, аутори овог рада баве се проблемом идентификације расподеле оптерећења у овом великом лежају. Аутори кажу да постоји нераскидив утицај крутости горње и доње градње, на расподелу оптерећења у лежају. Последично неравномерна расподела оптерећења има утицаја на расподелу напона у доњој

градњи (то је узрочно-последични однос). Осмишљени су специјални сензори облика ваљка на који су залепљене мерне траке. Мерена је расподела оптерећења по обиму лежаја, а лежај је био оптерећен тежином горње градње и узет је у обзир утицај ветра (5 m/s). Поређени су резултати експеримента са нумерички добијеним резултатима. Аутори кажу да је последица неравномерне расподеле оптерећења то, што се лежај пластично деформише, јер тежи униформној расподели оптерећења. Проблематиком лежаја бави се и аутор магистарског рада [54]. У овом раду моделирана је доња градња баш багера SchRs 630 и анализирана коришћењем Методе коначних елемената. Полазна претпоставка аутора при разматрању добијених напона и померања кружног прстена, за који је везан аксијални лежај, је да се доња градња одликује неравномерном крутошћу. Израчуната је деформација (депланација) прстена услед дејства оптерећења.

У раду [55] приказане су методе за верификацију виртуалног прототипа рударских машина на основу критеријума чврстоће. Мада функција и тип машине нису блиско повезани са темом доктората, а овде је у питању машина држач свода која штити рударе у подземним рудницима угља, ово је један веома значајан рад. Наиме, овде је сам прототип машине тестиран непосредно после производње. Аутор овог рада изводи закључке који су значајни за испитивање било које машине било ког типа. Одмах наглашава да рачунски модел мора да буде верификован експериментом, што је најједноставније извести методом мерних трака. То се изводи итеративним модификацијама модела да резултати добијени тако буду упоредиви са резултатима добијеним експериментом. Даље аутор наводи проблеме једне и друге методе. Проблем методе мерних трака је, како јој веровати, када је трака залепљена у зонама где је велики градијент промене напона (само лоцирање мерне траке има велики утицај на резултате). Са друге стране, што се нумеричких метода тиче, ту су незаобилазне грешке дискретизације структуре на коначне елементе, па је потребно правити и глобални и локални модел дела структуре. Рачунски модел се прави на основу документације, а у физичком моделу су присутне и грешке производње, грешке у материјалу, као и нелинеарно понашање материјала изнад границе течења. Ова конструкција је такође испитивана ударним оптерећењем. Излаз овог рада био би критеријум за прорачунски модел.

У раду [56] приказане су предности система за мониторинг и имплементација истог на надзору роторног багера SRs 1300. Стално мерење деформација и вибрација треба да остварује функције заштите, надзора и дијагностике. Као највећи недостатак оваквог система наводи се што је константно потребан надзор професионалца. Овакве машине су добри кандидати за имплементирање система за надзор јер су висококритичне и изложене великим динамичким оптерећењима која нису узета у обзир приликом дизајнирања. Систем за мониторинг би био још бољи када би претходно “научио” нешто о машини. У раду [57] се апострофира да се, што се рударске механизације тиче, захтева велика поузданост елемената, те је стога потребно уградити систем надзора. Дата је принципијелна шема контролног центра и студија на основу које се укупни трошкови једног копа за радни век од 27 година смањују за 6% уградњом система за надзор.

У раду [58] аутори још једном прегледно наводе проблеме у дизајнирању и пројектовању машина за површинску експлоатацију угља. Са овим проблемима се сусрећу и сви претходни аутори, јер су проблеми исти, било да се ради о пројектовању нове машине, или утврђивању узрока зашто је дошло до отказа машине у експлоатацији и њеном довођењу у радне услове. У овом раду се наводи још једном како за пројектовање машина не треба користити само стандарде [13], него и нови приступ, у коме велику улогу играју нумеричка и експериментална анализа. Тај нови приступ постаје све популарнији у пројектовању динамички оптерећених машина. Када се о нумеричким прорачунима ради, потребно је достићи довољну тачност (физичку интерпретацију конструкције) коришћењем што једноставнијег модела и увек остаје као питање, да ли модел добро репрезентује дату конструкцију. Начелно искуство каже, да модел за прорачун чврстоће мора да има већу дискретизацију него за модалну анализу, односно да је битно за коју сврху се модел прави. Аутори кажу да верификација нумеричког модела захтева мерења на самој конструкцији. То је између осталог потребно, јер су подструктуре међусобно повезане лежајевима и треба их правилно спојити у нумеричком моделу да би модел репрезентовао стварно функционисање машине и да би се оптерећење исправно преносило. Исто тако, динамички прорачун је јако осетљив на упрошћења, односно фреквенце могу да се разликују доста од стварних, што опет захтева мерење стварних фреквенци, односно мерења на

терену. Осим тога, аутор још једном истиче колико је проблематично побудити машину (вибрације је могуће снимати једино у току рада машине). Осим тога, као проблем се намеће огроман број акцелерометара којима све то треба снимити. Закључак је, као и много пута до сада, да нумерику и експеримент треба користити симултано. Аутор још једном истиче значај мониторинга, као и прављење базе резултата за одређени период, па екстраполације тих резултата у циљу предвиђања понашања конструкције у будућности, што практично још једном представља случај учења из радног века машине.

У радовима [59-61] приказан је концепт процене преосталих радних могућности роторних багера на основу правила фази алгебре. У овим радовима се истиче још једном, сложеност роторног багера као техничког система, који обилује разноврсношћу у дизајну. Пошто су багери на нашим коповима старији од 25 година, колико износи оптималан животни век према препорукама произвођача, предузимају се кораци ревитализације, редизајна и модернизације са циљем продужења радног века. Између осталог, зато је и тема о процени преосталих радних могућности актуелна. На бази фази теорије скупова, формиран је математички модел за процену поузданости, који на најкомплекснији могући начин сагледава употребни квалитет одређеног техничког система. Модел се заснива на дефинисању хијерархије структура роторног багера, анализи појединих система (челична структура и систем копања имају приоритет) и синтези свих података, до нивоа целог система. Експерти дају своје мишљење о стању сваког система појединачно, а затим се ради и синтеза тих мишљења (статистичка обрада података). У раду [60] приказана је процена радног века багера SchRs 630, принципом избора максимума међу претходно изабраним минимумима експертских мишљења. У раду [61] уведен је емпиријски корективни фактор на основу понашања машине у експлоатацији (број радних сати, застоја).

1.2.1 Закључци на основу прегледа литературе и мотиви за прављење умањеног модела

О досадашњим истраживањима о напонском и деформационом стању челичних конструкција роторних багера, из претходно наведене литературе, може се закључити следеће :

- савремени приступ дијагностике понашања представља спрегу нумеричког прорачуна и експерименталних истраживања који се примењују симултано;
- најчешће се методе дијагностике користе у циљу проналажења узрока отказа конструкције; са аспекта чврстоће најинтересантнији су откази услед грешака у дизајну (геометрији) конструкције или дела конструкције;
- праћењем радног века конструкција роторних багера уочена је честа појава прслина на конструкцији доње градње и обртне платформе;
- о конструкцији се учи из отказа, праћењем радног века и екстраполацијом добијених резултата на преостали радни век те конструкције, а постоји мањак студија случаја;
- сваки отказ овакве конструкције представља двојаки трошак, трошак поправке и губитак у производњи, јер машина стоји;
- што се нумерике тиче, никада се не може у потпуности ослонити само на резултате нумерике, јер се увек поставља питање колико нумерички модел верно репрезентује физички;
- нумерички модел се најчешће оптерећује прорачунским оптерећењима по стандарду [13], у радовима [32] и [51] рађен је кинематски модел да се одреди стварна расподела оптерећења, негде се као прорачунско оптерећење узима оптерећење измерено у току рада [46];
- прорачунска оптерећења по стандарду не узимају у обзир то, да је оптерећење роторних багера динамичко, што је у раду [43] узето као “амплитуда промене напона”, а у раду [23] као коефицијент којим је потребно помножити прорачунску силу, да би се добило реално стање;
- у прорачунима није узета у обзир неравномерна расподела оптерећења у лежају који повезује обртну платформу и доњу градњу, а има утицаја на појаву концентрација напона у конструкцији доње градње, исто као што крутост доње градње има удела у томе што је расподела оптерећења по обиму лежаја неравномерна;

- верификацију нумеричког модела најчешће представљају прслине (после отказа) на местима највећих концентрација напона добијених нумеричким прорачуном, или, после редизајна критичног дела структуре, број радних сати без отказа (посредни доказ);
- некада се за верификацију нумеричког модела врше мерења на самој конструкцији; проблем је што су резултати мерења последица тренутног радног оптерећења, различитог од прорачунског;
- ретко је могуће као у раду [37] тестирати оригинални и редизајниран део, а овде је то било могуће јер је део погодних димензија за постављање на испитни сто, а у случају оштећења дела губици су занемарљиви;
- осим напонско-деформационог стања конструкције, као показатељи крутости могу се користити још и сопствене фреквенције, расподела кинетичке и потенцијалне енергије по главним модовима осциловања, удео мембранских и савојних напона;
- када се за идентификацију сопствених фреквенци користи само нумерика, постоје проблеми идентификације главних облика осциловања;
- мала упрошћења нумеричког модела доводе до великих промена вредности сопствених фреквенци;
- код експерименталних испитивања динамичког понашања, као проблем се појављује увођење побуде, што подразумева заустављање и прекид рада машине, интерпретација експерименталних резултата је сложена, захтева постојање великог броја мерних места;
- свако експериментисање на самој конструкцији (са неуобичајеним оптерећењима) може довести до отказа конструкције;
- најбоље би било направити прототип конструкције и њега тестирати (када је то рационално и могуће).

Због свега претходно реченог, дошло се на идеју прављења умањеног модела саме конструкције, који ће пружити могућност нумеричко-експерименталног “учења” о чврстоћи и крутости ове и сличних конструкција. Излаз овог истраживања би

требало да буде функционална зависност понашања конструкције и њеног умањеног модела. Што се модела тиче, направљен је умањени модел (10 пута мањи у односу на реалну конструкцију) доње градње и обртне платформе са кореном стубова челичне конструкције роторног багера SchRs 630. Донета је одлука да се изradi модел само са доњим делом стубова. Ова одлука није имала суштинске последице на квалитет целокупног испитивања, јер кроз године праћења оваквих конструкција није уочена појава неких крупнијих отказа у тим зонама (негде локално долази до појаве концентрације напона, што ће и бити показано нумеричким прорачунима). Осим тога, на умањеном моделу је могуће добијање комплетног напонског поља коришћењем најсавременије дијагностике (Aramis system) у “чистим” радним условима и без вибрација које би онемогућиле употребу овог система.

1.3 Метода коначних елемената и Метода за дигиталну корелацију слика (Арамис систем), преглед литературе

1.3.1 Метода коначних елемената, преглед литературе

Као што је већ речено, прорачуни напонског и деформационог стања, динамички прорачуни и одређивања расподеле кинетичке и потенцијалне енергије огледног модела конструкције рађени су применом Методе коначних елемената.

Ова метода у оном облику у којем се данас користи, презентована је 1956. године кроз примену простих коначних елемената (штап и троугаона плоча са оптерећењем у равни) за анализу структуре авиона, а аутори су јој M.J. Turner, R.W. Clough, H.C. Martin и L.J. Торр [62]. Важније радове из ове области објавио је и O.C. Zienkiewicz. Данашња литература из ове области је бројна. Постоји литература која се бави овом методом са математичке тачке гледишта и литература која се бави овом методом као алатком за структуралну анализу. Са аспекта савременог пројектовања, значајнији је овај други аспект, а савремено пројектовање се не може замислити без примене ове методе. Тако је и са аспекта пројектовања и дијагностике рударских машина за површинску експлоатацију угља, ова метода јако значајна као што се може видети из литературе [14-58]. Готово да је у свим радовима [14-58] апострофиран значај ове методе приликом испитивања конструкција овог типа. У неким радовима су приказани резултати

прорачуна Методом коначних елемената и дати предлози за редизајн, па редизајнирана конструкција опет прорачуната коришћењем исте методе, док је у другим (у радовима типа студија) наведена као незаобилазан алат за дијагностику.

То је жива материја која се непрестано мења и надограђује, било да је разлог за то краће време које корисник проводи за рачунаром, или боље искоришћење ресурса (време рада рачунара).

Готово сваку конструкцију је могуће прорачунавати на овај начин. Могу се прорачунавати било структуре од челика, неког другог материјала, или структуре направљене од композитних материјала. Поред добро познатих примена ове методе за прорачунавање структура бродова, авиона, железничких возила, мостова, посуда под притиском, као егзотичнији примери могу се навести прорачуни аутомобилских гума, воденог млаза под високим притиском, завртњева, готских катедрала, карабинера на опреми за пењање, продора метка у балистички желатин, ископавање тунела, итд. Осим тога, ова метода налази примену и у биоинжењерингу (прорачунаван је људски душник, кукови, вештачка помагала, имплантати, итд.).

1.3.2 Метода за дигиталну корелацију слика (Арамис систем), преглед литературе

Дигитална корелација слике као метода за бесконтактно мерење померања, а затим и деформација и напона, почела је да се развија осамдесетих година прошлог века. Неки од првих радова из ове области су [63-65]. У раду [64] детаљно су објашњени основни принципи методе и нумеричке процедуре. На примеру конзоле оптерећене силом на крају, демонстрирана је могућност њене примене за добијање целокупног поља померања неког раванског објекта. Наиме, метода се заснива на нумеричком повезивању “малих површина” недеформисаног и деформисаног објекта. Дакле, прво се сниме површина недеформисаног, а затим и деформисаног објекта. На површину претходно мора да се нанесе нека неправилна шара (најчешће су то црне тачке на белој површини). Тако је на основу те шаре могуће одредити положај “малих површина” пре и после деформисања. Нови положај се описује претходним положајем, вектором помераја и градијентом деформације. “Мале површине” морају бити довољно

мале да праве линије као границе површина остају праве и после деформисања. У овом раду приказана је и процедура обраде прикупљених података. Рад [65] нуди три излаза: први је како се комбинују теорија о деформацијама и дигитална корелација слика да чине мерну технику, други се односи на интерполационе методе уполмене да прошире опсег мерења, а трећи обухвата четири експеримента на којима је показана одрживост методе за актуелна мерења транслација и ротација (крутог тела) и деформација. За анализу подскупова површина, односно за обраду података писани су програми. Као што се у случају Методе коначних елемената данас не пишу програми за сваки појединачни проблем, тако је и процедура обраде података у овој методи сада имплементирана у софтверски систем, односно користе се готови софтверски пакети, а један од њих је Aramis-system [66]. У раду [67] приказан је напредак у области дводимензионалне и тродимензионалне корелације слике. Опсег употребе ових метода убрзано расте, како научници и инжењери почињу све боље да разумеју њихове могућности. Наравно, и развој рачунара је саставни део шире слике. У раду [68] приказана је примена ове методе на проблему затезања. У раду [69] приказана је нови аспект примене дигиталне корелације слика на испитивање гумастих материјала. Иако се метода појавила још осамдесетих година и стекла велику популарност, године 2009. и даље је постојао проблем са недостатком карактеризације ове методе. Тако настају радови који се баве проценом грешке [70, 71]. Осим раније тестираних параметара као што је шара, величина “малих површина”, функције облика подскупова, сада се разматра утицај кодирања слике и засићења. У раду [71] показано је да смањење у енкодирању (узорковању) погоршава мерење два пута, а превелико излагање осветљењу погоршава мерење десет пута. Одређивање грешке мерења овог система је актуелно и у 2015. години. У раду [72] аутори нису покушали да идентификују узроке грешке мерења, него да калибришу цео систем мерном траком. Направили су плочу са отворима и по контурама залепили мерне траке. На тај начин одређена мерна несигурност, омогућава поуздано веровање овом систему приликом будућих мерења. Овде је новитет и то што је снимана чиста површина метала (без шаре), а аутори су се ослонили само на храпавост површине за идентификацију положаја “малих површина”.

Бројни примери показују да је коришћењем дигиталне корелације слике могуће испитивати практично било који проблем. У раду [73] анализиран је спој алуминијумских лимова уз помоћ хибридног везног лепка и закивака. Испитиван је утицај распореда закивака на расподелу напона применом нумеричке МКЕ методе и бесконтактне оптичке методе за дигиталну корелацију слика. Применом обе методе добијени су слични резултати. У раду [74] приказано је испитивање гужвања појаса симулацијом судара, што је интересантно јер не представља утицајни фактор који се може држати под контролом. Појас је оптерећен квазистатичким оптерећењем. Претходно је шара формирана уз помоћ слојева силиконске фарбе, јер би било која друга попуцала. Значи, нешто што би било тешко испитивати неком другом методом, јер се мора узети у обзир и трење, и савијање појаса (када би се нумерички испитивао морао би да буде третиран као композитни материјал) и проблем нестабилности, све то је било могуће “ухватити” методом дигиталне корелације слика. Осим тога, овом методом могуће је снимити оштећене зоне и ширење прслине [75-79]. У раду [75] испитиван је утицај две прслине једне на другу, аналитички, нумерички и експериментално. У раду [79] аутори су радили на унапређивању тачности мерења прслине, при чему је сваком пикселу придодат коефицијент у зависности од његовог квалитета (нпр. ивични пиксели су некавалитетни). Разлика у односу на традиционалну дигиталну корелацију слике је, што је унапређена тачност пиксела у околини оштећења. Овом методом, а уз помоћ брзих камера, могуће је снимити деформације метала и композита изазване ударним оптерећењем [80, 81].

У примени Методе дигиталне корелације слика небитно је какав је материјал који се испитује. Било да су то већ спомињани метали и композити, бетон [82], цигла и малтер, глина [83], дрво, керамика, тканина [74, 84], ткиво или биоматеријали, ова метода даје резултате. Све то омогућава најразличитије примене како у машинству и грађевини, тако и у медицини и стоматологији.

У наставку ће акценат бити стављен на примере примене дигиталне корелације слика код нас. Наиме, стекли су се услови за примену ове методе када је Катедра за отпорност конструкција опремљена системом за дигиталну корелацију слика (Aramis-system) [66]. Једно од подручја примене је било за мерење напона и деформација посуда под притиском [85, 86]. У раду [85] анализирано је кућиште

вентила оптерећено унутрашњим притиском. Циљ је био да се добије целокупно напонско и деформационо поље које би се користило евентуално у побољшању дизајна. У раду [86] анализирана је рачва јако сложене геометрије. Није било могуће другим методама проценити фактор концентрације напона у завареном споју у зони највећег геометријског дисконтинуитета. Дигитална корелација слика се показала као незаменљива метода за одређивање деформација и напона у зонама великих геометријских дисконтинуитета и у зонама високог градијента промене напона. Осим тога, ова метода се јако добро показала у испитивању заварених спојева [87, 88]. Ранија алтернатива јој је била метода мерних трака, која је подразумевала лепљење ланаца мерних трака по епрувети. Осим тога због малих површина механичке карактеристике неких зона је једино могуће одредити бесконтактним методама. У раду [87] анализирана су локална затезна својства зоне утицаја топлоте, на узорку са и без иницијалне прслине. У раду [88] наглашава се колико је за прецизне прорачуне заварених структура битно познавати механичке карактеристике материјала у завареном споју. И на испитивању заварених спојева се ова метода добро показала. Исти аутори су имали искорак применом ове методе на биоматеријале. Када су у радовима [89, 90] успели да сниме цело поље доње вилице човека, у раду [91] је приказано поређење разлике утицаја фиксне парцијалне протезе и протезе која се скида, на кост доње вилице. У раду [92] исти аутори анализирали су зубарске имплантате.

Као главна метода за испитивање биомедицинских имплантата у раду [93] наводи се Метода за дигиталну корелацију слика (осим незаобилазне Методе коначних елемената). Аутори су у овом раду испитивали плочице од титанијумске легуре за повезивање поломљених голеничних кости (цеваница) током периода зарастања. Идентификована су места концентрације напона коришћењем ове методе, при чему је то било немогуће урадити неком другом стандардном методом. Још једном су дошле до изражаја могућности ове методе.

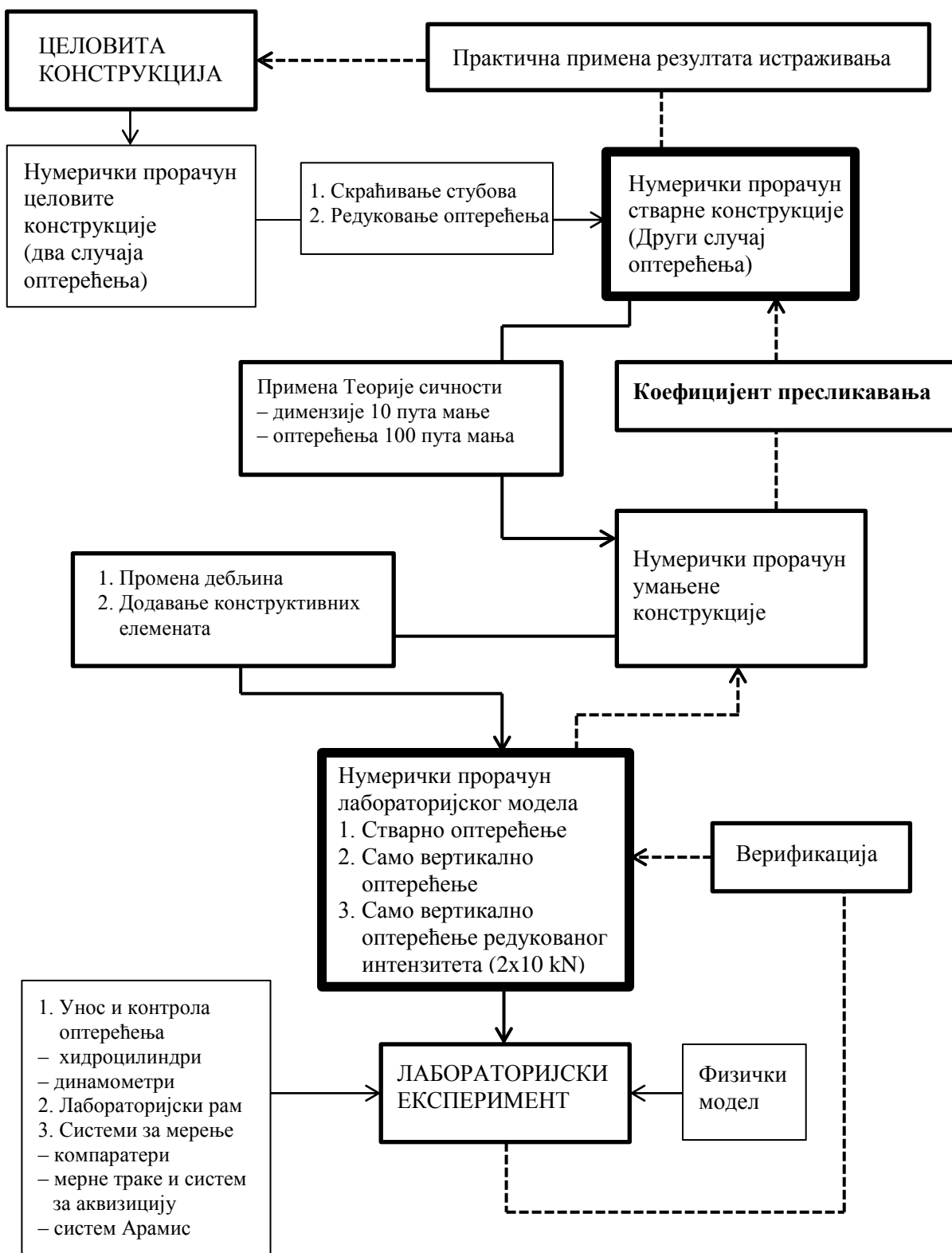
И у свету су бројене примене ове методе на испитивање узорака у медицини, јер су могућности испитивања готово неограничене, односно, не зависе од материјала, величине и геометрије узорка. Неке од можда најегзотичнијих примена у медицини и биологији су испитивање говеђе кости [94], интеракције

између артерије и стента [95] и померање зуба здравог човека под малим оптерећењима [96].

У овом докторату мерна опрема за дигиталну корелацију слика ће бити коришћена приликом експерименталне анализе за процену нивоа напона на местима великих геометријских дисконтинуитета и високог градијента промене напона. Осим тога, користиће се за одређивање померања одређених зона, са циљем “мапирања” физичког модела. Мерења ће симултано бити извођена коришћењем методе мерних трака и методе за дигиталну корелацију слика, са циљем верификације Методе за дигиталну корелацију слика и резултата нумеричког прорачуна применом Методе коначних елемената.

1.4 План истраживања

На Слици 1.1 је приказана предвиђена методологија овог испитивања. Биће урађен нумерички прорачунски модел стварне сложене просторне плочасте конструкције (у даљем тексту: целовита структура) за два случаја оптерећења: први, само утицај сопствене тежине, и други, утицај сопствене тежине и радног оптерећења. Због очекиваних објективних ограничења лабораторијске реализације експеримента, биће урађен нумерички прорачунски модел стварне редуковане конструкције (због великих димензија и отежаног уноса оптерећења извршиће се скраћивање стубова), одлучено, само за Други случај оптерећења (у даљем тексту: стварна конструкција). Након тога, биће урађен нумерички прорачунски модел умањене структуре. Умањена структура се од стварне структуре разликује по томе што су све димензије умањене 10 пута, а оптерећења умањена 100 пута (по поставкама Теорије сличности). Затим, биће урађен нумерички прорачун лабораторијског модела. Лабораторијски модел се од умањене структуре разликује по томе што су извршене корекције дебљине појединих елемената у циљу унификације и олакшавања практичне реализације физичког модела. Осим тога, биће додати и помоћни конструктивни елементи који ће омогућити унос оптерећења приликом реализације експеримента, а не утичу битно на опште понашање испитног модела. Паралелно са развојем свих ових нумеричких модела, биће развијена радионичка документација за израду физичког модела, који ће бити коришћен за реализацију експеримента.



Слика 1.1 Шематски приказ методологије истраживања

Успешном реализацијом лабораторијског експеримента биће верификован нумерички прорачун лабораторијског модела, а уједно, и сви прорачуни пре њега. Крајњи циљ је добијање коефицијента пресликавања умањеног модела и стварне конструкције, чиме би сва сазнања добијена проучавањем модела могла бити примењена на стварној, реалној конструкцији. Квалитетни резултати целокупног истраживања би потврдили полазну хипотезу, да се сложене плочасте просторне структуре могу испитивати моделски, са свим предностима које моделско испитивање доноси.

Полазна идеја је била да се компаративним методама формулише зависност између нумеричких прорачуна стварне и умањене конструкције (лабораторијског модела), са једне стране, и експерименталних сазнања добијених на лабораторијском моделу, са друге стране. Зависност ће бити формулисана у виду коефицијената зависности, по функционалним целинама. Захваљујучи успешној реализацији тог посла, по претходно формулисаој методологији, и извођењу универзалних закључака, може се и за неке друге случајеве оптерећења, и за неке сличне конструкције, говорити о понашању стварне конструкције само на основу испитивања понашања лабораторијског модела (Слика 1.2).



Слика 1.2 Полазна идеја

2 НУМЕРИЧКА МЕТОДА КОНАЧНИХ ЕЛЕМЕНАТА

У овом поглављу биће коришћени изводи из литературе на нашем језику [97-99] која се бави Методом коначних елемената као инжењерском алатком за структуралну анализу. Осим тога коришћена је фундаментална литература из области Теорије еластичности и Теорије плоча и љуски [100, 101], која је у потребном обиму поменута и у [97-99].

2.1 Теоријске основе методе

Метода коначних елемената је нумеричка метода за структуралну анализу. Анализом чврстоће неке структуре треба описати њено понашање тако што треба успоставити везу између непознатих параметара нпр. померања и свих оних параметара који на њих утичу нпр. спољашња оптерећења, гранични услови. Темељи се на постулатима Теорије еластичности и Теорије плоча, а проистекла је управо из немоћи ове две науке приликом покушаја прорачуна геометријски сложенијих конструкција.

Теорија еластичности је основна подобласт Механике деформабилног тела, а проучава везе сила и деформација користећи сложен математички апарат. Теорија еластичности даје основне једначине које су потребне у примени Методе коначних елемената. Тих једначина има 15 и оне су потребне и довољне да се одреди 15 непознатих величина у Линеарној теорији еластичности, а то су 3 померања, 6 напона и 6 деформација. Практично дефинише се 6 једначина које повезују деформације и померања, 6 једначина које повезују напоне и деформације и 3 једначине равнотеже (или кретања) [100].

Теорија плоча нуди решења за израчунавање деформација и напона за мембрански напрегнуту плочу (равно стање напона) и савијену плочу за неке случајеве ослањања (одређене контурне услове).

Проблем ових теорија и оваквог аналитичког решавања проблема је у томе што тај приступ подразумева издвајање елементарног делића из структуре, представљање утицаја преосталог дела структуре на тај делић одговарајућим силама и моментима и постављање услова равнотеже за тај делић. Управо то издвајање елементарног делића структуре води у инфинитезимални рачун,

односно као опис понашања такве структуре добијају се диференцијалне једначине. Једначина еластичне линије савијене греде је диференцијална једначина другог реда, а неорребрене плоче парцијална диференцијална једначина четвртог реда чија решења је могуће наћи за специјалне случајеве. Понашање орребрене плоче описано је парцијалном диференцијалном једначином осмог реда, која је практично нерешива. За компликованије моделе једначине се не могу ни извести.

Ту на сцену ступа Метода коначних елемената, јер најситнији делићи до којих је структура замишљено разложена, остају коначних димензија. Тако добијен модел је само апроксимација полазне структуре, али сада, уместо парцијалним диференцијалним једначинама, понашање структуре је описано системом алгебарских једначина. Заједничка тачка коначних елемената назива се “чвор” и он има особину да је померање свих тачака у њему исто, односно понашање тог дела структуре је описано преко те чворне тачке. Тако се понашање целе структуре описује преко чворних тачака добијених поделама, чије се понашање претпоставља одговарајућим полиномима (Метод помераја).

Метода коначних елемената која се данас користи презентована је 1956. године кроз примену простих коначних елемената (штап и троугаона плоча са оптерећењем у равни) за анализу структуре авиона. Аутори овакве методе су M.J. Turner, R. Clough, H.C. Martin и L.J. Topp.

2.1.1 Глобална матрица крутости и решење глобалне матричне једначине

Описати понашање коначног елемента, са аспекта методе коначних елемената, значи успоставити везу између свих карактеристичних величина у његовим чворовима. То значи да треба успоставити везу између свега што може деловати у чворној тачки (три компонентне силе праваца оса координатног система и три компонентна момента) и свега што се може десити чворној тачки (3 транслације и 3 ротације, укупно 6 генералисаних померања). Дакле, опис понашања коначног елемента који има n чворова биће систем од $6n$ једначина, који повезује све генералисане силе и померања његових чворова, односно написано у матричном облику:

$$\{f\}_e = [k]_e \{u\}_e, \quad (2.1)$$

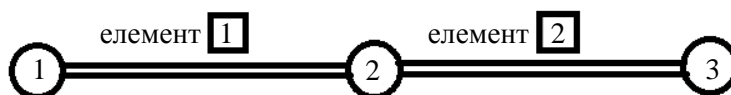
где је

$\{f\}_e$ – вектор колоне b и компоненталних спољашњих сила,

$\{u\}_e$ – вектор колоне b и генералисаних померања чворова,

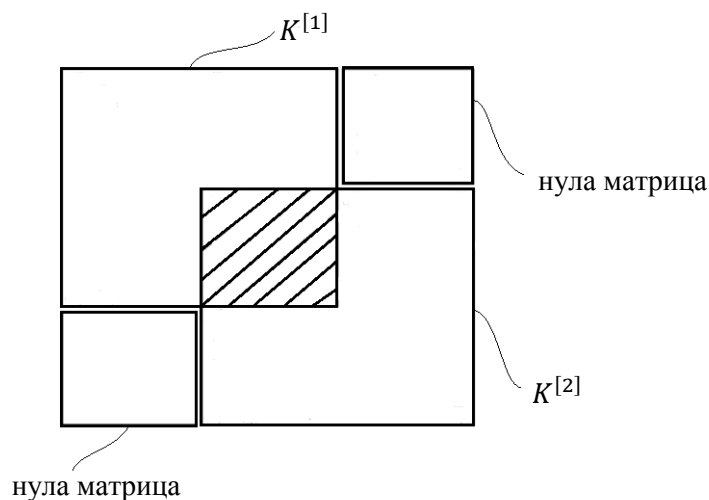
$[k]_e$ – матрица крутости коначног елемента.

Када су матрице крутости свих елемената који чине модел познате, а треба пронаћи опис понашања целе конструкције, практично треба пронаћи систем једначина који повезује све њене чворне величине. Матрица која описује понашање целе конструкције зове се глобална матрица крутости. Пример колинеарних елемената гредног типа приказан је на Слици 2.1.



Слика 2.1 Колинеарни елементи гредног типа [98]

У примеру са претходне слике глобална матрица крутости система формира се простим преклапањем матрица крутости појединачних елемената преко њихових субматрица које се односе на заједнички чвор што је сликовито приказано на Слици 2.2.



Слика 2.2 Формирање глобалне матрице крутости од матрица елемената [99]

У општем случају суседни елементи нису колинеарни. Тада пре него што се матрице крутости сложе у глобалну матрицу крутости, матрице крутости свих

коначних елемената написане у њиховим локалним координатним системима, морају се трансформисати у облик који одговара једном заједничком координатном систему који је усвојен као глобални. Ове трансформације дефинисане су угловима које заклапају осе локалних координатних система са одговарајућим осама глобалног координатног система. Ако су велика слова резервисана за појмове везане за глобални координатни систем, а мала слова за појмове везане за локални координатни систем, може се успоставити геометријска веза између померања у глобалном и померања чвора у локалном координатном систему:

$$\{u\}_e = [T]\{U\}_e, \quad (2.2)$$

где је

$\{U\}_e$ – вектор померања елемента у глобалном координатном систему,

$\{u\}_e$ – вектор померања елемента у локалном координатном систему,

$[T]$ – матрица трансформације.

Убацујући у једначину (2.2) у једначину (2.1) и изједначавајући ту једначину са једначином

$$\{f\}_e = [T]\{F\}_e, \quad (2.3)$$

добива се

$$[k]_e [T]\{U\}_e = [T]\{F\}_e. \quad (2.4)$$

Множећи претходну једначину са леве стране инверзном матрицом трансформације, добија се:

$$[T]^{-1}[k]_e [T]\{U\}_e = \{F\}_e = [k_G]_e \{U\}_e,$$

одакле се види да је

$$[k_G]_e = [T]^{-1}[k]_e [T], \quad (2.5)$$

где је

$[k_G]_e$ – матрица крутости елемента описана у глобалном координатном систему.

Матрица кротости целог система $[K_G]$ добија се преклапањем у чворовима матрица крутости сваког елемента појединачно $[k_G]_e$.

Глобална матрична једначина целог система сада гласи:

$$[K_G]\{U\} = \{F\}, \quad (2.6)$$

где је

$\{U\}$ – вектор колона генералисаних померања свих чворова модела (глобални вектор померања),

$\{F\}$ – вектор колона спољашњих оптерећења која делују на модел (глобални вектор оптерећења).

Коначни циљ МКЕ анализе је да се на основу задатих вредности спољашњих сила у чворовима модела одреде сва непозната чворна померања. На први поглед, та решења се експлицитно и лако добијају из једначине:

$$\{U\} = [K_G]^{-1}\{F\}. \quad (2.7)$$

Међутим, глобална матрица крутости система је увек сингуларна (њена детерминанта је једнака нули) што онемогућава одређивање њој инверзне матрице. Решавање овог проблема се постиже увођењем граничних услова. Гранични услови се формулишу на основу постојања ослонаца конструкције, јер конструкција није слободна у простору већ ослонци репрезентују физичка ограничења кретања модела, која да не постоје дошло би до кретања модела као крутог тела (кинематски проблем). Дакле, проблем се решава тако што се у матричној једначини која описује понашање целог система (2.6) интерпретирају ослонци конструкције. Притом, генералисане силе које одговарају овим померањима нису познате (задате) спољашње силе него реактивне силе или моменти ослонаца, које исто тек треба израчунати. Укратко, прецртају се редови и колоне који одговарају реакцијама ослонаца и тако се добија субматрица глобалне матрице $[K'_G]$ која није сингуларна.

Треба још напоменути да Метода коначних елемената може да узме у обзир само спољашње генералисане силе које делују у чворовима. Континуална оптерећења се представљају статички еквивалентним пакетом чворних генералисаних сила,

што ће пореметити слику померања, напона и деформација, само у непосредној околини дејства ових сила.

2.1.2 Извођење матрице крутости коначног елемента

У претходном поглављу када се помињала матрица крутости коначног елемента $[k]_e$ прећутно је подразумевано да се она познаје. Одређивање ове матрице за поједине типове коначних елемената је суштина МКЕ. Коефицијенти те матрице у себи носе геометријско–физичке карактеристике коначног елемента, јер управо оне диктирају функционалну зависност појединих генералисаних сила од појединих генералисаних померања.

У овом поглављу ће матрица крутости коначног елемента бити експлицитно дефинисана применом принципа виртуалног рада (општији у односу на нпр. директну методу).

Ако се шест генералисаних сила и шест генералисаних померања било ког i -тог чвора коначног елемента са n чворова означе са

$$\{f_i\}_{6 \times 1} = \begin{Bmatrix} F_{xi} \\ F_{yi} \\ F_{zi} \\ M_{xi} \\ M_{yi} \\ M_{zi} \end{Bmatrix} \quad \{u_i\}_{6 \times 1} = \begin{Bmatrix} u_{xi} \\ u_{yi} \\ u_{zi} \\ \theta_{xi} \\ \theta_{yi} \\ \theta_{zi} \end{Bmatrix}, \quad (2.8)$$

тада понашање елемента описује матрична једначина

$$\begin{Bmatrix} \{F_1\}_{6 \times 1} \\ \{F_2\}_{6 \times 1} \\ \vdots \\ \{F_i\}_{6 \times 1} \\ \vdots \\ \{F_n\}_{6 \times 1} \end{Bmatrix}_{6n \times 1} = [k]_{6n \times 6n} \begin{Bmatrix} \{u_1\}_{6 \times 1} \\ \{u_2\}_{6 \times 1} \\ \vdots \\ \{u_i\}_{6 \times 1} \\ \vdots \\ \{u_n\}_{6 \times 1} \end{Bmatrix}_{6n \times 1}, \quad (2.9)$$

у којој је непозната $[k]$ матрица крутости елемента која се тражи.

Нека је тачка са координатама (x, y, z) произвољна тачка посматраног коначног елемента чија померања су:

$$\{u(x, y, z)\}_{6 \times 1} = \begin{Bmatrix} u_x(x, y, z) \\ u_y(x, y, z) \\ u_z(x, y, z) \\ \theta_x(x, y, z) \\ \theta_y(x, y, z) \\ \theta_z(x, y, z) \end{Bmatrix}. \quad (2.10)$$

Дакле, први корак у поступку одређивања матрице крутости је дефинисање везе померања било које тачке елемента и померања чворова:

$$\{u(x, y, z)\}_{6 \times 1} = [N]_{6 \times 6n} \begin{Bmatrix} \{u_1\}_{6 \times 1} \\ \{u_2\}_{6 \times 1} \\ \vdots \\ \{u_i\}_{6 \times 1} \\ \vdots \\ \{u_n\}_{6 \times 1} \end{Bmatrix}_{6n \times 1}, \quad (2.11)$$

$$\begin{Bmatrix} u_x(x, y, z) \\ u_y(x, y, z) \\ u_z(x, y, z) \\ \theta_x(x, y, z) \\ \theta_y(x, y, z) \\ \theta_z(x, y, z) \end{Bmatrix}_{6 \times 1} = \begin{bmatrix} N_{1,1} & N_{1,2} & \cdots & N_{1,6n} \\ N_{2,1} & N_{2,2} & \cdots & N_{2,6n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ N_{6,1} & N_{6,2} & \cdots & N_{6,6n} \end{bmatrix}_{6 \times 6n} \begin{Bmatrix} \{u_1\}_{6 \times 1} \\ \{u_2\}_{6 \times 1} \\ \vdots \\ \{u_i\}_{6 \times 1} \\ \vdots \\ \{u_n\}_{6 \times 1} \end{Bmatrix}_{6n \times 1}, \quad (2.12)$$

у којој су чланови матрице N очигледно функције x, y, z и зову се функције облика, јер практично дефинишу нови деформисани облик елемента.

Сваки од ових чланова $N_{1,1}, N_{1,2} \dots$ апроксимира се полиномом по координатама x, y, z и та апроксимација је утолико тачнија, уколико је полином потпунији. Међутим, непознати коефицијенти тог полинома могу се добити само поистовећивањем произвољне тачке са самим чворовима елемената, што систем једначина своди на $6n$ једначина, па је практично могуће добити максимално $6n$ непознатих коефицијената. Функције облика су апроксимативне, њима се не може у општем случају постићи довољна тачност и решења нису једнозначна (зависе од броја изабраних коефицијената).

Ако су 6 компонентних напона у било којој тачки еластичног тела

$$\{\sigma\}_{6x1} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix}, \quad (2.13)$$

и 6 одговарајућих деформација на том месту

$$\{\varepsilon\}_{6x1} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix}, \quad (2.14)$$

онда Хуков закон гласи (Линеарна теорија еластичности):

$$\{\sigma\}_{6x1} = [D]_{6x6}\{\varepsilon\}_{6x1} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & (1-\nu) & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & (1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} \end{bmatrix} \{\varepsilon\}_{6x1}, \quad (2.15)$$

где је

$[D]_{6x6}$ – матрица еластичних коефицијената.

Веза деформација, дилатација и клизања, и померања, може се представити у матричном облику као:

$$\{\varepsilon\}_{6x1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \{u\}_{6x1} = [L]_{6x6}\{u\}_{6x1}, \quad (2.16)$$

где је

$[L]_{6 \times 6}$ – матрица линеарних оператора.

Користећи једначину (2.11) и једначину (2.16) добија се:

$$\{\varepsilon\}_{6 \times 1} = [L]_{6 \times 6} [N]_{6 \times 6n} \begin{Bmatrix} \{u_1\}_{6 \times 1} \\ \{u_2\}_{6 \times 1} \\ \vdots \\ \{u_i\}_{6 \times 1} \\ \vdots \\ \{u_n\}_{6 \times 1} \end{Bmatrix}_{6n \times 1} = [B]_{6 \times 6n} \begin{Bmatrix} \{u_1\}_{6 \times 1} \\ \{u_2\}_{6 \times 1} \\ \vdots \\ \{u_i\}_{6 \times 1} \\ \vdots \\ \{u_n\}_{6 \times 1} \end{Bmatrix}_{6n \times 1}. \quad (2.17)$$

Замењујући ово у једначину (2.15) добија се:

$$\{\sigma\}_{6 \times 1} = [D]_{6 \times 6} [B]_{6 \times 6n} \begin{Bmatrix} \{u_1\}_{6 \times 1} \\ \{u_2\}_{6 \times 1} \\ \vdots \\ \{u_i\}_{6 \times 1} \\ \vdots \\ \{u_n\}_{6 \times 1} \end{Bmatrix}_{6n \times 1}. \quad (2.18)$$

Сада се примењује принцип виртуалног рада, односно рад спољашњих сила на виртуалним (замишљеним малим) померањима њихових нападних тачака се изједначава са унутрашњим радом на деформацијама еластичног тела. Рад спољашњих сила је:

$$A^S = \left(d \begin{Bmatrix} \{u_1\}_{6 \times 1} \\ \{u_2\}_{6 \times 1} \\ \vdots \\ \{u_i\}_{6 \times 1} \\ \vdots \\ \{u_n\}_{6 \times 1} \end{Bmatrix}_{6n \times 1} \right)^T \begin{Bmatrix} \{F_1\}_{6 \times 1} \\ \{F_2\}_{6 \times 1} \\ \vdots \\ \{F_i\}_{6 \times 1} \\ \vdots \\ \{F_n\}_{6 \times 1} \end{Bmatrix}_{6n \times 1}, \quad (2.19)$$

а унутрашњих запреминских:

$$\begin{aligned}
A^U &= \iiint (d(\{\varepsilon\}_{6 \times 1}))^T \{\sigma\}_{6 \times 1} dV = \\
&\iiint \left(d \left([B]_{6 \times 6n} \begin{Bmatrix} \{u_1\}_{6 \times 1} \\ \{u_2\}_{6 \times 1} \\ \vdots \\ \{u_i\}_{6 \times 1} \\ \vdots \\ \{u_n\}_{6 \times 1} \end{Bmatrix} \right) \right)^T \{\sigma\}_{6 \times 1} dV = \\
&\iiint \left(d \left(\begin{Bmatrix} \{u_1\}_{6 \times 1} \\ \{u_2\}_{6 \times 1} \\ \vdots \\ \{u_i\}_{6 \times 1} \\ \vdots \\ \{u_n\}_{6 \times 1} \end{Bmatrix} \right) \right)^T ([B]_{6 \times 6n})^T \{\sigma\}_{6 \times 1} dV. \tag{2.20}
\end{aligned}$$

Изједначавањем израза (2.19) и (2.20) добија се:

$$\begin{aligned}
&\left(d \begin{Bmatrix} \{u_1\}_{6 \times 1} \\ \{u_2\}_{6 \times 1} \\ \vdots \\ \{u_i\}_{6 \times 1} \\ \vdots \\ \{u_n\}_{6 \times 1} \end{Bmatrix} \right)^T \begin{Bmatrix} \{F_1\}_{6 \times 1} \\ \{F_2\}_{6 \times 1} \\ \vdots \\ \{F_i\}_{6 \times 1} \\ \vdots \\ \{F_n\}_{6 \times 1} \end{Bmatrix} = \\
&\iiint \left(d \left(\begin{Bmatrix} \{u_1\}_{6 \times 1} \\ \{u_2\}_{6 \times 1} \\ \vdots \\ \{u_i\}_{6 \times 1} \\ \vdots \\ \{u_n\}_{6 \times 1} \end{Bmatrix} \right) \right)^T ([B]_{6 \times 6n})^T \{\sigma\}_{6 \times 1} dV, \tag{2.21}
\end{aligned}$$

односно коришћењем једначине (2.18), добија се:

$$\begin{Bmatrix} \{F_1\}_{6 \times 1} \\ \{F_2\}_{6 \times 1} \\ \vdots \\ \{F_i\}_{6 \times 1} \\ \vdots \\ \{F_n\}_{6 \times 1} \end{Bmatrix}_{6n \times 1} = \iiint ([B]_{6 \times 6n})^T [D]_{6 \times 6} [B]_{6 \times 6n} \begin{Bmatrix} \{u_1\}_{6 \times 1} \\ \{u_2\}_{6 \times 1} \\ \vdots \\ \{u_i\}_{6 \times 1} \\ \vdots \\ \{u_n\}_{6 \times 1} \end{Bmatrix}_{6n \times 1} dV. \tag{2.22}$$

Поређећи добијени резултат са једначином (2.9) види се да је:

$$[k]_{6n \times 6n} = \iiint ([B]_{6 \times 6n})^T [D]_{6 \times 6} [B]_{6 \times 6n} dV, \tag{2.23}$$

што је и био циљ одредити.

Матрице крутости су у литератури изведене за све могуће типове коначних елемената. Овде ће илустративно бити показане матрице крутости за елемент греде и елемент плоче, јер ће управо ти елементи бити коришћени за моделирање конструкције која је предмет дискусије. Тим елементима је моделирана структура јер управо они најбоље описују њено физичко понашање.

Код гредних елемената коефицијенти матрице крутости могу се пронаћи и директним поступком коришћењем елементарне теорије греда, што је детаљно приказано у литератури [99]. Овде је дата матрица крутости гредног елемента у коначном облику:

$$[k]_e = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12B_Z}{l^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6B_Z}{l^2} & 0 & -\frac{12B_Z}{l^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6B_Z}{l^2} \\ 0 & 0 & \frac{12B_Y}{l^3} & 0 & -\frac{6B_Y}{l^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{12B_Y}{l^3} & 0 & -\frac{6B_Y}{l^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GI_X}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GI_X}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6B_Y}{l^2} & 0 & \frac{4B_Y}{l} & 0 & 0 & 0 & \frac{6B_Y}{l^2} & 0 & \frac{2B_Y}{l} & 0 \\ 0 & \frac{6B_Z}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4B_Z}{l} & 0 & -\frac{6B_Z}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2B_Z}{l} \\ -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12B_Z}{l^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6B_Z}{l^2} & 0 & \frac{12B_Z}{l^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6B_Z}{l^2} \\ 0 & 0 & -\frac{12B_Y}{l^3} & 0 & \frac{6B_Y}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{12B_Y}{l^3} & 0 & \frac{6B_Y}{l^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GI_X}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GI_X}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6B_Y}{l^2} & 0 & \frac{2B_Y}{l} & 0 & 0 & 0 & \frac{6B_Y}{l^2} & 0 & \frac{4B_Y}{l} & 0 \\ 0 & \frac{6B_Z}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2B_Z}{l} & 0 & -\frac{6B_Z}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4B_Z}{l} \end{bmatrix}, \quad (2.24)$$

где је

B_Z – крутост греде на савијање у xu равни (око z -правца),

GI_X – торзиона крутост греде.

Што се елемента плоче тиче у литератури [97-99] се одвојено говори о елементу плоче оптерећеном у равни плоче (мембранско оптерећење) и о елементу плоче оптерећеном управно на равни плоче (савојно оптерећење). У Методу коначних елемената су имплементирани једначине Теорије еластичности и Теорије плоча и љуски.

Елемент плоче оптерећене у својој равни практично представља дводимензионални проблем (Равно стање напона) описан детаљно у литератури из Теорије еластичности [100]. Матрица крутости (2.23) таквог елемента сада постаје:

$$[k] = \iiint [B]^T [D][B]dV = t \iint [B]^T [D][B]dA, \quad (2.25)$$

јер у том случају матрице $[B]$ и $[D]$ не зависе од дебљине плоче t и она може да се извуче испред интеграла. Матрица $[D]$ представља везу напона и деформација и за равно стање напона износи:

$$[D] = \frac{E}{(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix}. \quad (2.26)$$

Матрица $[B]$ представља матрицу веза деформације и померања, а носи информације о функцијама облика и линеарним операторима, што спада у математичку формулацију Методе коначних елемената.

У случају савијања плоче користе се добро познати прорачунски модели из Теорије плоча и љуски [101], где је веза спољашњих оптерећења и угиба w савијене плоче дата изразима:

$$M_x = -\frac{E}{(1-\nu^2)} \frac{t^3}{12} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right), \quad (2.27)$$

$$M_y = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right), \quad (2.28)$$

$$M_{xy} = -M_{yx} = (1-\nu)D \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}, \quad (2.29)$$

где је

$$D = \frac{E}{(1-\nu^2)} \frac{t^3}{12} - \text{крутост плоче на савијање и зависи од дебљине на трећи степен.}$$

Практично, када се мембранско и савојно оптерећење посматрају одвојено не прави се велика грешка, а много компликација би донело њихово спрегнуто посматрање. У коначном облику се сада може писати [101]:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = t \begin{bmatrix} C_{11}^m & C_{12}^m & 0 \\ C_{21}^m & C_{22}^m & 0 \\ 0 & 0 & C_{66}^m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}, \quad (2.30)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{t^3}{12} \begin{bmatrix} C_{11}^s & C_{12}^s & 0 \\ C_{21}^s & C_{22}^s & 0 \\ 0 & 0 & C_{66}^s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix}, \quad (2.31)$$

где је у коефицијентима C сакривена информација о функцијама облика и уопште математичкој формулацији Методе коначних елемената.

2.2 Глобална концепција рачунарских програма на бази Методе коначних елемената и препоруке за моделирање

2.2.1 Глобална концепција програма на бази МКЕ

Савремена инжењерска пракса не подразумева програмирање сваког појединачног проблема, него се у ту сврху користе готови (комерцијални) програмски пакети. Њихова глобална концепција (Слика 2.3) и опције су углавном исти за све.



Слика 2.3 Глобална концепција програмских пакета, шематски приказ[99]

Процесорски део је “срце” свих ових програма, а чине га програми и подпрограми који обављају практично све операције које су споменуте у оквиру теоријских основа МКЕ. Може се рећи да процесор:

- садржи библиотеку матрица крутости различитих типова коначних елемената, записаних у општим бројевима и уврштавањем бројних вредности конкретног модела, формира матрице крутости свих коначних елемената који чине модел за прорачун,
- трансформише матрице крутости свих елемената у један, глобални координатни систем и слаже их у глобалну матрицу крутости система,
- формира и решава глобалну матричну једначину,
- на основу израчунатих чворних померања, одређује непознате реакције у ослонцима, генералисане чворне силе и напоне.

Да би могао да обави све описане радње, процесор мора располагати прецизном сликом модела, а тиме се подразумевају елементарни подаци о чворовима и коначним елементима. Сваком чвору мора се дефинисати редни број, три координате и шест степени слободе (да ли је слободан или, неким ослонцем, спречен). Сваком коначном елементу морају се дефинисати тип (гредни, плочасти...), редни број, чворови који описују његову контуру, геометријске карактеристике (дебљине плочастих елемената, површине попречног пресека, моменти инерције и отпорни моменти гредних елемената ...) и физичке карактеристике материјала (модул еластичности, Поасонов коефицијент, густина). Тако се формира датотека улазних података из које процесор узима податке. Дефинисање свих ових ових параметара ради конструктор уз помоћ претпроцесорских команди.

Све резултате прорачуна (транслације и ротације слободних чворова, реакције ослонаца, напони) процесор уписује у одговарајућу датотеку. Постпроцесор чини скуп програма и подпрограма који омогућавају кориснику да што ефикасније прегледа датотеку излазних података.

2.2.2 Коришћење рачунарских програма на бази МКЕ у корацама

Практично, Метода коначних елеманата која се најчешће користи у анализи конструкција, може се илустративно описати у пар корака.

Корак 1 Моделирање, идеализација и дискретизација структуре

Моделирање представља комплексан процес пресликавања физичког модела у рачунарски, применом идеализације. Физички модел, са својом геометријом и граничним условима (ослонци и оптерећења), и претпостављена врста и распоред померања, деформације и напона по моделу, чине полазну основу процеса моделирања. Моделирање се остварује кроз избор типа, броја, величине коначних елемената за дискретизацију, степена слободе чворова и граничних услова, као и увођење идеализација и упрошћења. Дакле, при моделирању посебну пажњу треба обратити на тип елемента који ће бити коришћен за представљање дате конструкције, затим на локацију чворова, величину и број елемената, степене слободе чвора, граничне услове и идеализације и упрошћења.

Од корисника методе зависи Корак 1 прорачуна, односно претпроцесорски део у којем се ствара прецизна (релевантна) слика физичког модела. Сви остали кораци су ствар рачунарског програма на бази МКЕ (процесор и постпроцесор) и подразумевају:

Корак 2 Избор правог интерполационог модела за поље померања.

Корак 3 Формирање матрице крутости и вектора оптерећења коначних елемената.

Корак 4 Састављање укупне (глобалне) матрице крутости, вектора оптерећења и граничних услова структуре.

Корак 5 Решавање непознатих померања чворова из једначина статичке равнотеже.

Корак 6 Израчунавање деформације и напона коначних елемената.

Корак 7 Израчунавање напона тачака структуре.

2.2.3 МКЕ моделирање

Као што је већ речено, моделирање представља комплексан процес пресликавања физичког модела у рачунарски модел, применом различитих идеализација. Модел се скоро увек разликује од реалне конструкције и по облику. Неке од тих разлика су мала и уобичајена геометријска упрошћења, али су често присутне и озбиљније апроксимације (у анализама глобалне чврстоће већих структура, у моделу се потпуно изостављају елементи локалне чврстоће). У компликованијим проблемима, спољашња оптерећења и контурни услови модела, такође су само апроксимација стварних услова у којима се налази конструкција. Модел је, дакле, само апроксимација реалне конструкције и резултати који се добијају његовим прорачуном су само приближно тачни. Значи моделирање није једнозначно, односно једна структура се може моделирати на различите начине и за различите моделе се добијају резултати различите тачности. Сваки конкретни задатак се мора анализирати итеративним поступком – прорачуном неколико модела, различитог нивоа сложености и тачности.

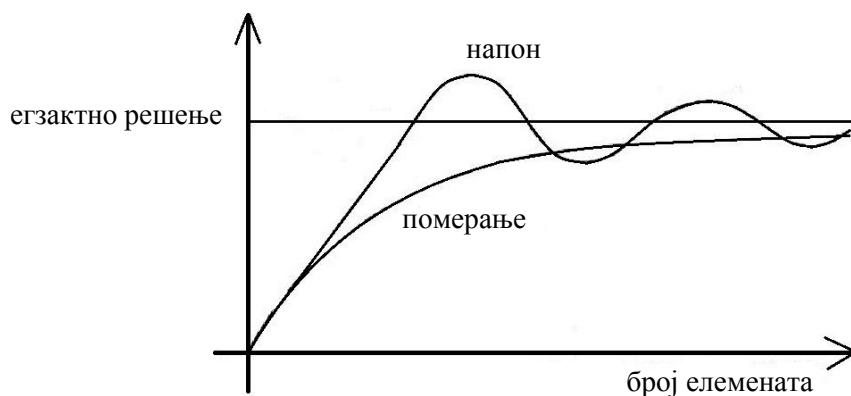
Нека елементарна правила коректног моделирања ипак постоје:

1. **Тип елемента** који се усваја за моделирање конструкције мора да поседује особине и функцију којима се физички модел може најбоље опистати уз одговарајућу идеализацију. То зависи од дужине (l), ширине (b) и висине (h) елемента, односно ако су ове три димензије приближно исте вредности (реда величине) треба применити 3D модел кратке греде; ако је једна димензија већа од друге две, треба применити 1D модел дуге греде или штапа; а ако су две димензије истог реда величине, веће од треће димензије, користи се 2D елемент плоче (дебела, танка и врло танка). У принципу, једна иста конструкција може се моделирати на различите начине, у зависности од жељених резултата.

2. **Облик коначног елемента** треба да буде што правилнији. Разлог за то је што су матрице крутости које се користе у прорачуну за тај тип коначног елемента изворно изведене за неке правилне облике раванских фигура (квадрат, једнакокраки правоугли троугао). Што се коначни елемент више разликује од тих еталона – примењена матрица крутости мање тачно описује његово понашање. Начелно, треба тежити правилним фигурама и избегавати “игличасте” фигуре.

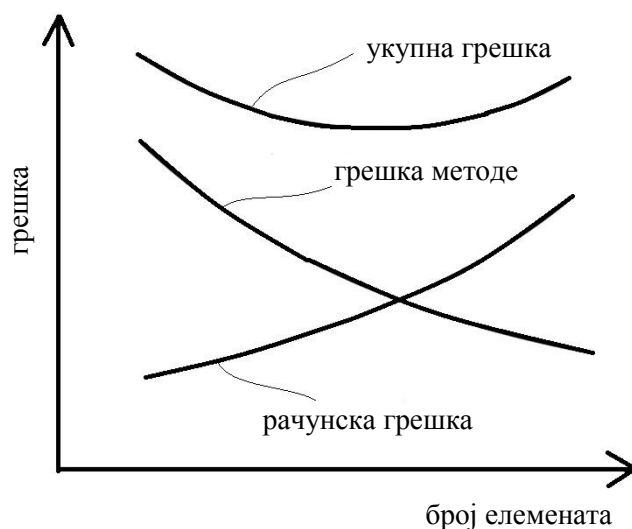
3. **Комбиновање различитих типова елемената** је дозвољено, али треба водити рачуна при комбиновању типова елемената који немају исти број степени слободне чворова (треба исправно моделирати везу елемената и преношења оптерећења).

4. **Густина мреже** треба да буде оптимална. Потребно је да мрежа буде довољно густа (подела довољно уситњена) да се постигне одговарајући ниво тачности, односно да решење конвергира тачном решењу (Слика 2.4).



Слика 2.4 Уопштен изглед могуће конвергенције решења померања и напона методом коначних елемената у зависности од броја елемената [98]

Дакле, негативни ефекти већине апроксимација које захтева МКЕ (грешка методе), смањују се са уситњавањем поделе, али и ту постоје ограничења. Осим што компликује инжењерски рад, уситњавањем мреже се не може повећавати тачност добијених резултата. Укупна грешка прорачуна, осим грешке методе, садржи и рачунску грешку, која прогресивно расте са бројем обављених рачунских операција чији број расте са повећањем броја чворова у моделу (Слика 2.5).



Слика 2.5 Зависност укупне грешке од рачунске и грешке методе [99]

Проблем се решава применом различите густине мреже. У околини дејства концентрисаних сила, контура отвора у плочама и свим другим зонама у којима из било ког разлога очекује велики градијент напона, мрежа се уситњава.

5. **Контурни услови** треба да репрезентују физичка ограничења кретања дате конструкције, а исто тако мора се проверити да ли су контурним условима спречени свих шест степени слободе кретања модела као крутог тела морају бити спречени, јер су у супротном случају еластична померања чворова неодређена. Свака translација или ротација модела као крутог тела, спречена је, ако је макар једном чвору спречен тај степен слободе.

6. Ако конструкција има раван **симетрије** (симетрија мора бити потпуна, полазна структура мора бити симетрична и у погледу геометрије, и у погледу оптерећења и контурних услова) може се моделирати само једна половина (четвртина, ако има две равни симетрије), а утицај преосталог дела се симулира “ослонцима

симетрије”. Односно, чворови у тој равни не смеју доживети трансляцију у правцу осе управне на ту раван нити ротације око праваца преостале две осе правоуглог координатног система.

7. **Идеализације и упрошћења** се могу увести за глобални модел, али под условом, да се за локални модел (исечени сегмент структуре) примени моделирање без већег упрошћавања.

2.3 Прорачун носећих структура применом Методе коначних елемената

2.3.1 Статички прорачун

У статичком прорачуну носећих структура потребно је одредити померање тачака и напонско стање за задат случај статичког оптерећења. Основна статичка једначина равнотеже у матричном облику и глобалном координатном систему, дата је изразом (2.6) и гласи (још једном):

$$[K_G]\{U\} = \{F\}, \quad (2.32)$$

чији су сви елементи детаљно дефинисани и објашњени.

Овде је потребно још дефинисати напон и деформацију као излазне величине. Вектор напона је дат изразом:

$$\{\sigma\} = [D](\{\varepsilon\}_e - \{\varepsilon_0\}_e) = [D]([B]\{u\}_e - \{\varepsilon_0\}_e), \quad (2.33)$$

где је

$\{\varepsilon\}_e = [B]\{u\}_e$ – вектор деформације коначног елемента,

$\{\varepsilon_0\}_e$ – иницијална деформација елемента (нпр. температура),

а све остале величине су претходно дефинисане.

Осим тога треба напоменути да се глобални вектор оптерећења чворне тачке $\{F\}$ (састоји се од три силе и три момента) може генерисати од спољашњег глобалног концентрисаног оптерећења чвора и локалног оптерећења елемента (температура, површинско и запреминско оптерећење).

Методe за решавање глобалне матричне једначине деле се на директне и итеративне. У директне спадају методе Гаусове елиминације и декомпозиције

Чолески, док у итеративне (мање се примењују) спадају Гаус-Сејделова метода и градијентна метода.

2.3.2 Динамички прорачун

Статички прорачун представља специјални случај динамичког прорачуна у ком су спољашња оптерећења непроменљива у времену. При динамичкој анализи поред статичких, на коначни елемент делују још и динамичке силе (инерцијалне и пригушујуће силе). У усвајању динамичког модела конструкције полази се од статичког модела и већ формиране матрице крутости система.

Диференцирањем једначине (2.11) која представља померање било које тачке коначног елемента у функцији померања чворова, добија се брзина било које тачке елемента у функцији брзина чворних тачака:

$$\{\dot{f}\} = [N]\{\dot{u}\}_e, \quad (2.34)$$

где је

$\{\dot{f}\}$ – брзина било које тачке елемента (извод померања било које тачке елемента по времену),

$\{\dot{u}\}_e$ – брзина чворова елемента (извод померања чворова по времену).

Кинетичка енергија, функција расипања и потенцијална енергија за коначни елемент гласе:

$$e_k = \frac{1}{2} \left(\iiint \{\dot{f}\}^T \rho \{\dot{f}\} dV \right)_e, \quad (2.35)$$

$$r_e = \frac{1}{2} \left(\iiint \{\dot{f}\}^T \beta \{\dot{f}\} dV \right)_e, \quad (2.36)$$

$$e_p = \frac{1}{2} \left(\iiint \{\varepsilon\}^T \rho \{\sigma\} dV - \iint \{f\}^T \{p_A\} dA - \iiint \{f\}^T \{p_V\} dV \right)_e, \quad (2.37)$$

где је

ρ – густина, као карактеристика материјала коначног елемента,

β – коефицијент пропорционалности,

$\{p_A\}, \{p_V\}$ – оптерећење по једници површине, односно запремине,

$\{f\}, \{\dot{f}\}$ – померање и брзина било које тачке коначног елемента.

Сумирањем претходних израза (2.35), (2.36), (2.37) за све коначне елементе модела и коришћењем израза (2.34), добијају се кинетичка енергија, функција расипања и потенцијална енергија за цео модел, у облику:

$$E_k = \frac{1}{2} \{\dot{\delta}(t)\}^T [M] \{\dot{\delta}(t)\}, \quad (2.38)$$

$$R = \frac{1}{2} \{\dot{\delta}(t)\}^T [Y] \{\dot{\delta}(t)\}, \quad (2.39)$$

$$E_p = \frac{1}{2} \{\delta(t)\}^T [K] \{\delta(t)\} - \{\delta(t)\}^T \{F(t)\}. \quad (2.40)$$

где је

$[M] = \sum [m]_e + [M]_c$ – глобална матрица маса,

$[m]_e = (\iiint \{N\}^T \rho \{N\} dV)_e$ – матрица маса коначног елемента,

$[M]_c$ – матрица спољашњих концентрисаних маса,

$[Y] = \sum \iiint \{N\}^T \beta \{N\} dV$ – глобално пригушење (уобичајено се обележава словом В, међутим овде је обележено другим словом да се не би мешало са матрицом веза деформација и померања),

$\{F(t)\}$ – глобални вектор сила,

$\{\ddot{\delta}(t)\}$, $\{\dot{\delta}(t)\}$, $\{\delta(t)\}$ – глобални вектор убрзања, брзине и померања у функцији времена.

Лагранжова функција дефинише се као разлика кинетичке и потенцијалне енергије целог система:

$$L = E_k - E_p = \frac{1}{2} \{\dot{\delta}(t)\}^T [M] \{\dot{\delta}(t)\} - \frac{1}{2} \{\delta(t)\}^T [K] \{\delta(t)\} + \{\delta(t)\}^T \{F(t)\}. \quad (2.41)$$

Динамичка једначина кретања структуре гласи:

$$\frac{d}{dt} \left\{ \frac{\partial L}{\partial \dot{u}} \right\} - \left\{ \frac{\partial L}{\partial u} \right\} + \left\{ \frac{\partial R}{\partial \dot{u}} \right\} = \{0\}. \quad (2.42)$$

Коришћењем (2.38), (2.39), (2.40), (2.41) претходна једначина постаје:

$$[M] \{\ddot{\delta}(t)\} + [Y] \{\dot{\delta}(t)\} + [K] \{\delta(t)\} = \{F(t)\}, \quad (2.43)$$

и представља основну динамичку једначину принудних пригушених осцилација у матричном облику и глобалном систему у свом најчешћем облику.

За дефинисање матрице маса, најчешће се користи метода концентрисаних маса по којој се маса елемента равномерно расподељује по чворовима коначног елемента (концентрише се по чворовима).

Једначина слободних непригушених осцилација се добија из претходне једначине када се склоне побуда и пригушење и она гласи:

$$[M]\{\ddot{\delta}(t)\} + [K]\{\delta(t)\} = \{0\}. \quad (2.44)$$

Када се претходна једначина помножи са леве стране инверзном матрицом маса добија се:

$$\{\ddot{\delta}(t)\} + [M]^{-1}[K]\{\delta(t)\} = \{\ddot{\delta}(t)\} + [H]\{\delta(t)\} = \{0\}, \quad (2.45)$$

где је

$$[H] = [M]^{-1}[K] - \text{динамичка матрица система.}$$

Решење ове једначине претпоставља се у одговарајућем облику за овај тип диференцијалне једначине, без обзира што се овде ради о матричној једначини. Сопствене вредности ове једначине представљају сопствене фреквенце система. Број сопствених фреквенци система једнак је броју степени слободе система, али практични значај има само неколико најнижих фреквенци. На основу сопствених фреквенци одређују се главни облици осциловања.

Методe за решавање динамичке једначине подељене су на трансформационе (Јакобијева) и итеративне (Рејли–Риц, метода тражења детерминанти) методe.

Главни облици осциловања приказују понашање модела под неким *фиктивним* оптерећењем (најлошије понашање се приказује првим обликом осциловања) и служе да се идентификују *слаба* места на конструкцији. Конструкција има добро динамичко понашање ако је прва фреквенца висока и ако је размак између фреквенци велики. Висока прва фреквенца постиже се најкрућом конструкцијом

најмање масе ($\omega = \sqrt{\frac{c}{m}}$).

2.3.3 Распoдела кинетичке и потенцијалне енергије на главним облицима осциловања

Излазни подаци динамичког прорачуна су сопствене вредности λ_i и сопствени вектори $\{Q_i\}$, односно, i -ти сопствени парови, који следе из решења диференцијалне једначине (2.44) за i -ти мод осциловања, у облику:

$$([K] - \lambda_i[M])\{Q_i\} = \{0\}. \quad (2.46)$$

Ако се претходна једначина помножи са леве стране транспонованим i -тим сопственим вектором и подели са 2, добија се:

$$\frac{1}{2}\{Q_i\}^T[K]\{Q_i\} = \frac{1}{2}\lambda_i\{Q_i\}^T[M]\{Q_i\}, \quad (2.47)$$

што представља једначину биланса кинетичке и потенцијалне енергије конструкције при главним облицима осциловања. То значи да су кинетичка и потенцијална енергија система:

$$E_{k,i} = \frac{1}{2}\lambda_i\{Q_i\}^T[M]\{Q_i\}, \quad (2.48)$$

$$E_{p,i} = \frac{1}{2}\{Q_i\}^T[K]\{Q_i\}, \quad (2.49)$$

и представљају збир кинетичких и потенцијалних енергија свих коначних елемената којима је структура дискретизована.

На основу расподеле кинетичке и потенцијалне енергије може бити селектована група елемената погодна за динамичку реанализу, чиме се, на пример, бави аутор [102].

2.4 Софтверски пакет КОМИПС

Софтверски пакет КОМИПС (Компјутерско моделирање и прорачун структура) развијен је на Машинском факултету у Београду у оквиру дисертације [103]. Представља скуп рутина и процедура које омогућавају све савремене статичке, динамичке и термичке прорачуне, као и израчунавање кинетичке и потенцијалне енергије. Сличан је осталим програмима за моделирање, али осим тога омогућава и неке напредне функције. Осим што захтева од корисника да сам формира мрежу коначних елемената (а тиме му даје и потпуну контролу над мрежом), даје могућност програмирања нпр. новог коначног елемента. Такав један елемент

приказан је у [104]. Наиме, у питању је неоребрена плоча еквивалентна оребреној, која је потребно да буде представљена коначним елементом једне дебљине, када је спољашње оптерећење мембранско, а коначним елементом друге дебљине, када је оптерећење савојно.

Упутство за моделирање и примери структура моделираних и прорачунаваних у овом софтверу дати су у [98] и [105].

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНЕ МЕТОДЕ

Идеја моделског испитивања подразумева прављење умањеног модела који ће бити подвргнут експерименталним испитивањима у лабораторији. Овакав приступ омогућава апликацију најразличитијих могућих оптерећења, без опасности да се стварна конструкција угрози. Осим тога, пружа могућности за примену софистициране опреме, нпр. система за дигиталну корелацију слика који није могуће применити на терену.

3.1 Метода мерних трака

Метода мерних трака је једна од класичних метода које се примењују за мерење деформација (и напона) челичних конструкција. Што се претходне литературе тиче, готово сви аутори који се баве челичним мегамашинама када мисле на експериментално мерење напонско-деформационог стања конструкције, мисле на мерења методом мерних трака, као нпр. у раду [50].

Литература из области мерних трака је бројна [106]. Ова метода мерења заснива се на принципу промене отпора жице се њеним издужењем и смањењем пресека док се трака деформише заједно са конструкцијом на коју је постављена.

Једини недостатак ове методе представља то, што се мерним тракама мери напон у тачки, што посебно није добро у зонама великог градијента промене напона, где локација мерне траке може утицати на измерени резултат.

3.2 Метода за дигиталну корелацију слика (систем Aramis), основне поставке

У овом поглављу ће бити дати изводи из упутства за коришћење система ARAMIS [66] и искуства стечена коришћењем.

3.2.1 Основни принципи функционисања система ARAMIS, принцип “малих површина”

ARAMIS је систем фирме GOM [66], који служи за бесконтактно мерење померања, деформација и напона. Заснива се на методи дигиталне корелације слика. Наиме, снимом се објекат у недеформисаном и деформисаном стању, систем упоређује слике и израчунава тражене деформације (и напоне). Упоређивање се врши тако што систем прати сваку од “малих површина” (пиксела) кроз различита

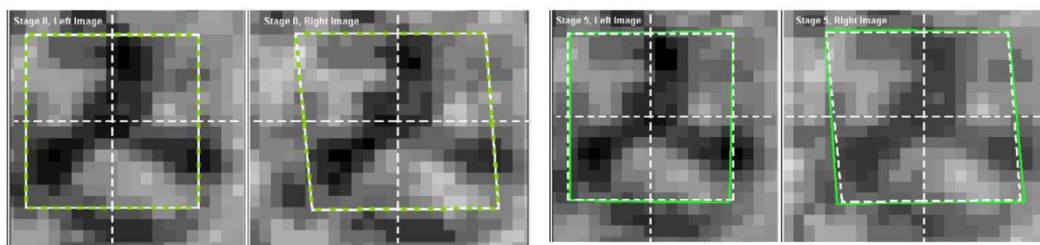
стања. То је могуће захваљујући стохастичкој шари (црне тачке на белој позадини) која омогућава систему да препозна тражени пиксел.

Систем чине две камере (тродимензионално мерење), сталак за фиксирање камера, контролни систем за напајање камера, РС систем високих перформанси, ARAMIS софтвер и USB dongle који садржи лиценцу произвођача без које цео систем не може да ради (Слика).



Слика 3.1 Систем ARAMIS [66]

Целокупно мерење се заснива на томе да систем посматра површину узорка (са стохастичком шаром) кроз различите стадијуме деформисања (кроз слике), кроз маску која се састоји од “малих површина” (фазета, пиксела). Величина пиксела се може мењати у зависности од захтева мерења. На слици 3.2 приказана је промена “мале површине” пре и после деформисања, где је зеленом линијом приказано деформисано стање.



Слика 3.2 Промена мале површине пре и после деформисања [66]

Увек се мора дефинисати почетна тачка. Почетна тачка је “мала површина” од које почиње упоређивање и прерачунавање осталих. На основу њеног положаја софтвер зна позицију осталих тачака, а у идентификацији тачака помаже стохастичка шара, која мора бити ситнија од величине саме “мале површине”. Када софтвер заврши прорачун координата свих тачака у једном кораку (стејду), прелази на следећи стејд.

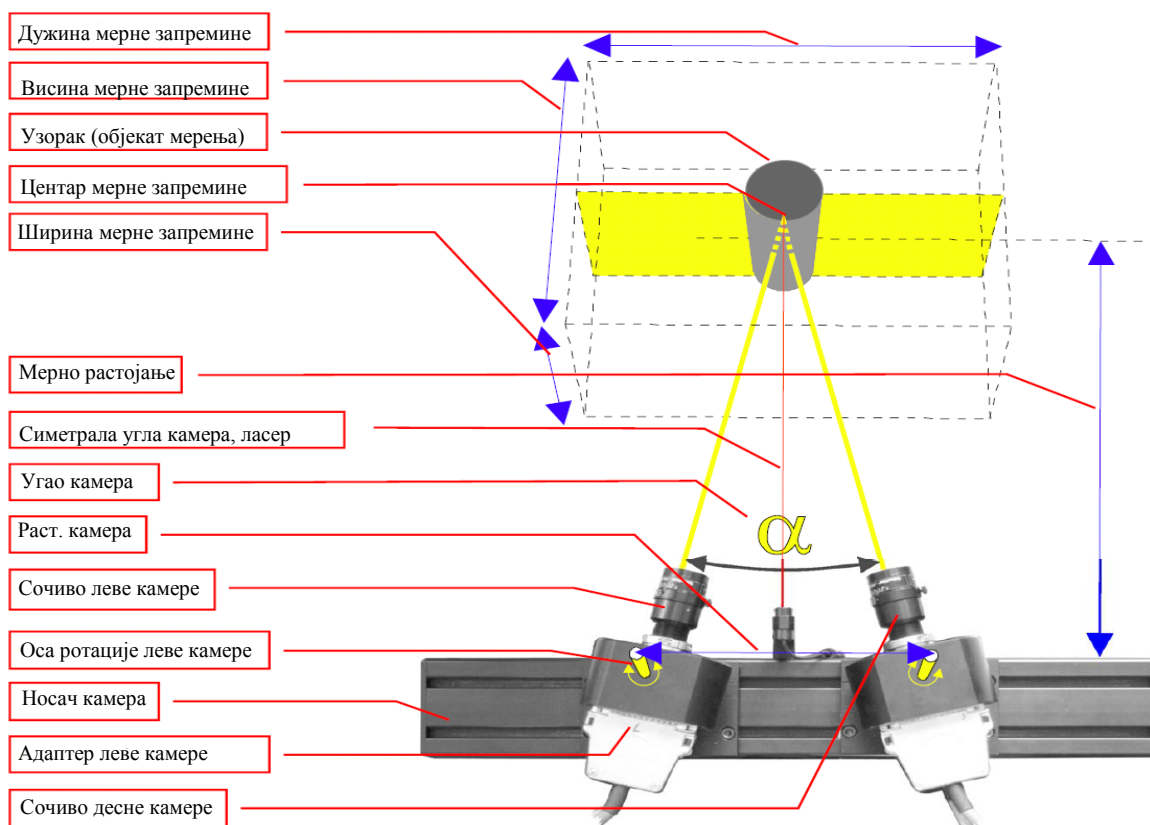
3.2.2 Процедуре мерења

Мерења обухвата три групе различитих корака односно процедура које је потребно спровести за успешно добијање напонско–деформационог стања мерног објекта. Прву групу чине све оне процедуре које је потребно спровести пре самог мерења, као што су избор мерне запремине, а према њој и подешавања система и калибрација мерне запремине, припрема узорка, отварање новог “пројекта” и дефинисање параметара. Другу групу чини само мерење, односно снимање слика. Трећу групу чине све оне процедуре обраде и презентације снимљених резултата, у које спадају дефинисање величине “малих површина” и прорачунске маске, дефинисање почетне тачке, прорачун “пројекта”, обрада података ради уклањања сметњи при мерењу, избор начина приказивања резултата и дефинисање елемената за анализу, као и прављење извештаја мерења.

Избор одговарајуће мерне запремине, подешавања система и сензорске мерне јединице

У зависности од величине објекта који се анализира бира се мерна запремина. Некада није могуће анализирати цео објекат, него се анализира део објекта (област). Важно је да објекат (или област која се анализира) остаје унутар мерне запремине и после деформисања.

За одређену мерну запремину потребно је изабрати (из одговарајуће табеле) и подесити одговарајућа сочива, међусобно удаљење камера и удаљење сензора од објекта. На тај начин је последично подешен угао гледања камера α (Слика 3.3).

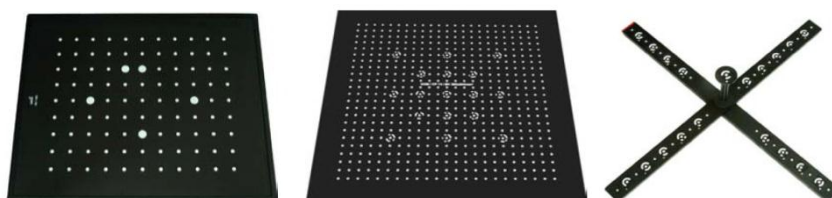


Слика 3.3 Подешавање сензорске јединице за одређену мерну запремину [66]

Добра подешавања сензора су предуслов за добру калибрацију, а после и за добро мерење.

Калибрација

Калибрација је процедура којом се мерни систем уз помоћ калибрационих објеката подешава тако да је је осигурана димензионална конзистентност мерног система. Калибрациони објекти су калибрационе плоче направљене од керамике за мање мерне запремине и калибрациони крстови за веће мерне запремине, приказани на Слици 3.4.



Слика 3.4 Различити калибрациони објекти за мале, средње и велике мерне објекте [66]

Поставља се питање када треба урадити калибрацију, или поновну калибрацију система. Калибрацију треба урадити пре првог мерења. Ако се подешавање сочива или позиција камера једне у односу на другу мења, систем захтева да буде калибрисан поново. И трећи случај када је калибрација неизбежна је, када се систем декалибрисао, а што се може уочити присуством жутих тачака на сликама после прорачуна (поље треба да буде зелено).

Калибрацију представља низ слика калибрационог објекта, на којима се мења положај објекта у односу на камере на начине како захтева калибрациона процедура. Софтвер у сваком кораку препознаје и нумерише референтне тачке на калибрационој плочи. Да би калибрација могла да се сматра успешном, одступање мора да буде између 0,01 и 0,04 пиксела. Одступање калибрације је израчунато као средње одступање свих тачака током процеса калибрације.

Припрема узорка

Узорак мора бити посебно припремљен за снимање. Површина узорка треба да буде чиста и одмашћена, а осим тога треба да има шару која омогућава тачно одређивање положаја сваког пиксела. Шара мора да буде таква да прати деформацију узорка и не сме се обрисати нити сломити пре краја експеримента. У раду наведеном под редним бројем [74] из прегледа литературе приликом испитивања гужвања сигурносног појаса, шара је формирана уз помоћ слојева силиконске фарбе, јер би било која друга попуцала. Оптимална мерна површина је глатка. Међутим, некада, као нпр. у раду [72], може се снимати чиста површина метала и ослонити се само на храпавост површине за идентификацију положаја “малих површина”, али, изразито храпаве површине могу правити проблеме приликом идентификације “малих површина”. Шара на узорку мора имати добар контраст, а површина на узорку мора бити мат. Појава рефлексije није пожељна јер изазива лош контраст и разлику у осветљењу између леве и десне камере што онемогућава прорачун пиксела у тој области.

Са једне стране, величина шаре (црних тачака на белој позадини) треба да буде довољно фина (црне тачке морају да буду мање од “малих површина”), а са друге стране довољно крупна да би била у потпуности препознатљива за камере. Додатно, шара не сме имати велике области истог нивоа осветљења (крупне

тачке), тако да су најпогодније шаре са променљивим областима сиве боје које настају насумичним наношењем шаре. Произвођач мерне опреме је дефинисао изглед шаре за различите мерне запремине и то представља последњу проверу узорка пред мерење.

Снимање слика током мерења

Дефинисање “малих површина”, почетне тачке и прорачун пројекта

Још једном, систем “посматра” узорак кроз шаблон “малих површина”. Шаблон је дефинисан величином “малих површина” и њиховим међусобним растојањем. Уобичајена “мала површина” од 15x15 пиксела и корака између, од 2 пиксела преклапања, је оптимално решење између тачности резултата и времена прорачуна. Веће вредности фазета и мањи кораци преклапања дају тачније резултате, док мање смањују време трајања прорачуна. Што се облика фазета тиче, препорука је да се за узорке изложене високом нивоу деформација користе правоугаоне фазете.

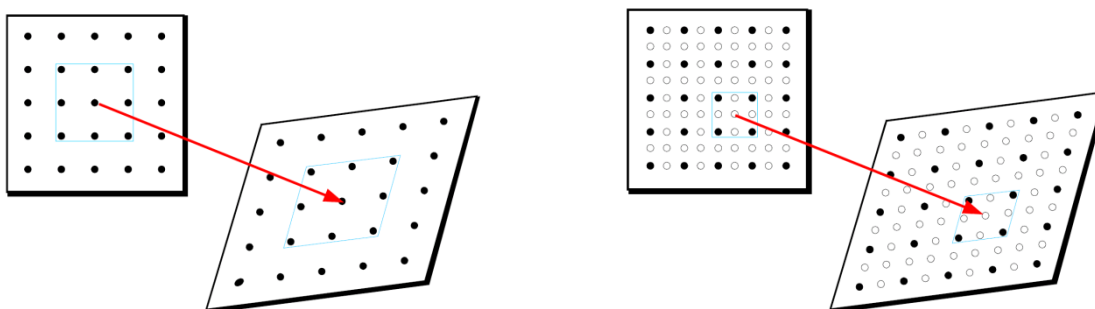
Понекада је потребно дефинисати прорачунску маску тако да само области релевантне за деформацију буду прорачунате. Тако се нпр. искључују ивице отвора (граничне површине које “збуњују” прорачун), јер их лева и десна камера не виде под једнаким углом.

Пре почетка прорачуна почетна тачка мора бити дефинисана. Почетна тачка је “мала површина” од које почиње упоређивање и прорачунавање осталих. Препорука је да се почетна тачка задаје у области где се очекују најмања померања уколико се задаје ручно. Она се дефинише у неоптерећеном стању, а кроз остале кораке може бити дефинисана ручно или полуаутоматски. Аутоматско дефинисање почетне тачке се користи у аутоматизованим мерењима већег броја узорака. Ако се узорак поломи приликом испитивања, потребно је дефинисати по једну почетну тачку за сваки од поломљених делова, како би се добиле њихове деформације.

Прорачун деформација и напона

Дакле, систем мери померање “малих површина” као последицу деформисања мерног објекта. Уколико је потребно систем прорачунава деформацију. За

прерачунавање деформације систем користи једну од две методе, линеарну или “spline strain computation” (Слика 3.5). Уобичајено је да се користи линеарна метода прорачуна деформације (Слика 3.5 лево), док се у изузетним случајевима, нпр. када жели да се анализира област малих радијуса заобљења, користи ова друга метода (Слика 3.5 десно).



Слика 3.5 Две различите методе прерачунавања деформације, графички приказ [66]

Црним тачкама на Слици 3.5 лево приказане су “мале површине”. Квадратом 3x3 тачке (пиксела) дефинисано је да се деформација мерне тачке у средини израчунава на основу постојећег поља померања околних фазета. Чак и ако не постоје све суседне мерне тачке, деформација мерне тачке у средини се опет може израчунати. Број неопходних мерних тачака да би се извео прорачун се уноси софтверски и најчешће се поставља услов (квота) да мора постојати минимум 55% мерних тачака. Предности ове методе су брз прорачун деформација, низак ниво шума (сметње), а стварно снимљене тачке су референтне за прорачун деформације.

Црним тачкама на Слици 3.5 десно приказане су мерне тачке директно изведене из постојећих “малих површина” са забележене слике, а беле су добијене интерполацијом црних тачака. Дакле, прорачун деформације се врши и на основу вредности интерполираних белих тачака. Време прорачуна је дуже, а виши је и ново шума при мерењу. Међутим, предност ове методе је могућност добијања деформација за све случајеве облика узорка.

Комплетно напонско поље је могуће добити уношењем у мерни систем карактеристика материјала од кога је узорак направљен, као и податка о дебљини материјала.

Приказивање резултата и дефинисање елемената за анализу, креирање извештаја

Осим већ поменутих поља померања, деформација и напона, резултате је могуће интерпретирати и на друге начине. То је могуће нпр. коришћењем пресека различитих облика који се састоје од великог броја тачака и омогућавају приказивање вредности померања (деформације, напона) сваке од тачака пресека на дијаграму.

Снимљени резултати могу бити филтрирани ради уклањања шума или наглашавања локалних ефеката.

Исто тако, уколико постоје пиксели на слици који нису снимљени из неког разлога (нпр. лоша шара на том месту), празнине се могу попунити интерполацијом на основу постојећих пиксела.

Исто тако бројни су елементи за анализу када је потребно сазнати напон у тачки или деформацију између две одређене тачке узорка, одступање из равни приликом деформисања (депланацију) или угаону деформацију.

Статистичка обрада снимљених резултата је такође могућа.

Систем Аримис омогућава презентацију снимљених резултата на најразличитије могуће начине у виду извештаја, табела и дијаграма који укључују већ поменуте елементе за анализу, затим, у виду серија снимљених слика у облику филма, итд.

4 ПОСТАВКЕ ТЕОРИЈЕ СЛИЧНОСТИ

У овом поглављу ће бити приказани основни концепти сличности конструкције и њеног (умањеног) модела [1]. На самом почетку треба да буду постављена питања: ако су два физичка феномена слична, шта очекивати, под којим условима су слични и са колико особина треба да се опише физички феномен. Након тога, поставља се питање како детерминисати фактор скалирања (колико пута смањити конструкцију), односно како дизајнирати модел. Пре свих ових питања, требало је да буде постављено питање зашто користити модел. Као што је претходно речено, а за разлику од стварне конструкције (која је великих димензија, одговорна, скупа, значајна, и ако се на било који начин угрози, материјална штета је велика), модел је добар за испитивање, јер пружа следеће погодности:

- лако се прави и инсталира у лабораторији,
- прављење модела није скупо,
- лакше се може тестирати,
- пружа боље разумевање локалних и глобалних феномена и понашања, а и
- резултати су врло прецизни у еластичној области.

Са друге стране може бити јако тешко да се измоделирају детаљи на моделу, али често и не постоји друга алтернатива.

Прављење модела је јако значајно када се развија нов производ и уместо да се тестира прототип, тестира се умањени модел.

У експерименталној механици се одавно користи теорија сличности, чија суштина се своди на појам “пропорционално”. Прва теорема појављује се 1848. године (Bertrand) и каже да: ако су два физичка феномена слична, њихове одговарајуће особине морају бити такође сличне. Друга теорема (Vaschy 1892., Riabouchinsky 1911., Buckingham 1914.) је позната као “ π теорема” која има широку примену. Трећа теорема је инверзна теорија сличности (Купнхев, 1930.).

“ π теорема”

Ова теорема се заснива на теорији сличности и служи да се успоставе релације између модела конструкције и реалне конструкције (прототипа). Потребно је дефинисати физичке особине којима се описују модел и конструкција, као и основне димензије (маса, димензије и време). Разлика броја усвојених физичких особина и броја фундаменталних особина, заправо представља број π бездимензионих коефицијената. Ти бездимензиони коефицијенти су једнаки за модел и конструкцију, са циљем да се успостави функционална зависност између њих. Укратко, процедура се своди на проналажење одређених физичких законитости, писању тих законитости у бездимензионој форми и извлачењу одређених фактора скалирања. Најчешћи проблеми који се могу јавити приликом избора правих фактора за скалирање су занемаривање неког значајног физичког квалитета, додавање небитног физичког квалитета, као и то да се физичке величине истих димензија се тешко разликују (напон, притисак) итд. У следећој табели дате су физичке законитости и одговарајући изведени фактори скалирања појединих величина, ако су димензије модела умањене λ_1 пута у односу на димензије стварне конструкције. Фактори силе, масе и површине редом су обележени као λ_F , λ_m , λ_A . Фактори запреминске густине, Јунговог модула еластичности и вискозности су $\lambda_\rho = \lambda_E = \lambda_\nu = 1$, ако се за израду модела и саме конструкције, користи исти материјал. Како се модел и конструкција налазе у истом гравитационом пољу, тако су фактори гравитационог убрзања и убрзања су $\lambda_g = \lambda_a = 1$.

Табела 4.1 Закони сличности [1]

Параметар	Физички закон	Фактор скалирања
Површина попречног пресека	$A = L^2$	$\lambda_A = \lambda_1^2$
Момент инерције	$I = L^4$	$\lambda_I = \lambda_1^4$
Запремина	$V = L^3$	$\lambda_V = \lambda_1^3$
Густина	$\rho = \frac{m}{V} = \frac{F}{a \cdot V} = \frac{E}{a \cdot L}$	$\lambda_\rho = \frac{\lambda_E}{\lambda_a \cdot \lambda_1}$
Маса	$m = \rho \cdot V$	$\lambda_m = \lambda_\rho \cdot \lambda_V = \lambda_\rho \cdot \lambda_1^3$
Сила	$F = m \cdot a$	$\lambda_F = (\lambda_\rho \cdot \lambda_V) \cdot \lambda_a = \lambda_E \cdot \lambda_1^2$
Напон		$\lambda_\sigma = \lambda_E = 1$

Деформација	$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$	$\lambda_\varepsilon = \frac{\lambda_E}{\lambda_E} = 1$
Кругост	$k = \frac{E \cdot I}{L^3}$	$\lambda_k = \frac{\lambda_E \cdot \lambda_1^4}{\lambda_1^3} = \frac{\lambda_E}{\lambda_1}$
Фреквенца	$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$	$\lambda_\omega = \sqrt{\frac{\left(\frac{\lambda_E}{\lambda_1}\right)}{(\lambda_\rho \cdot \lambda_1^3)}} = \frac{1}{\lambda_1} \cdot \sqrt{\frac{\lambda_E}{\lambda_\rho}}$
Енергија	$e = F \cdot L$	$\lambda_e = \lambda_F \cdot \lambda_1 = \lambda_E \cdot \lambda_1^2 \cdot \lambda_1$

Ово су законитости изведене за греду, али се успешно примењују на скоро све типове конструкција. Односно, за сваки тип конструкције се мора урадити валидација закона скалирања.

5 НУМЕРИЧКИ ПРОРАЧУН СТВАРНЕ ПРЕДМЕТНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ

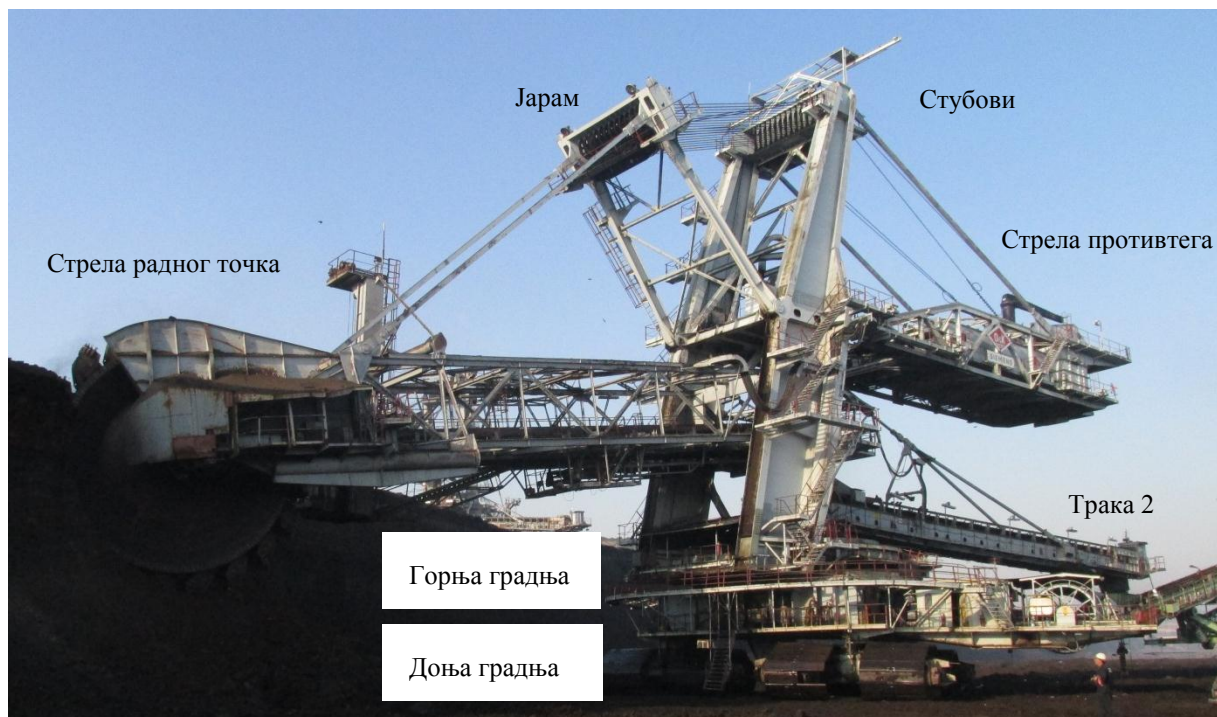
У овом поглављу биће приказан нумерички прорачун конструкције доње градње, обртне платформе и доњег дела стубова роторног багера SchRs 630 коришћењем Методе коначних елемената. Нумерички прорачун је урађен коришћењем већ поменутог софтверског пакета КОМИПС [98] и [103].

5.1 Прорачунски модел конструкције

Предуслов за успешну употребу Методе коначних елемената за решавање неког проблема, представља формирање релевантног прорачунског модела дате конструкције у процесу моделирања. Наиме, потребно је физички модел неке конструкције успешно пресликати у прорачунски модел, односно узети у обзир све елементе дате конструкције који су релевантни са аспекта крутости те конструкције. Приликом тог процеса у принципу треба се држати већ споменутих препорука за моделирање. Осим тога када се говори о принципима доброг моделирања, најчешће се мисли и на исправну физичку интерпретацију понашања одређеног конструктивног елемента и правилан избор типа коначног елемента. У том смислу су за моделирање конструкције овог багера коришћени елементи плоча и греда. Нумерички модел је урађен на основу пројектне документације произвођача ове опреме [107].

Што се челичне конструкције роторног багера SchRs 630 тиче, она је јако сложена (Слика 5.1). Могу се уочити следеће подструктуре, а о којима је било речи и у претходним поглављима: доња градња, горња градња са стубовима, решеткаста конструкција стреле радног точка и решеткаста конструкција стреле противтега. Осим тога, уочавају се и други елементи који утичу на крутост целе структуре, односно елементи који својом тежином представљају оптерећења конструкције, као нпр. Трака 2. Оно што се назива доња градња практично представља постоље багера које се ослања на гусенице које служе за транспорт. Горњу градњу представља обртна платформа са стубовима, на којима се налазе улежиштења стреле радног точка и противтега, а о којима висе затеге за које се стреле каче. Осим тога, на конструкцију стубова се преко лежаја качи хидроцилиндар на коме виси Трака 2, која се такође преко лежаја ослања на горњу градњу (обртну платформу). На стубовима се такође може уочити практично једини

конструктивно несиметрични део, конзолни носач који представља улежиштење стреле кабине багеристе. Горња и доња градња су повезане аксијалним лежајем преко кога се преноси оптерећење са горње градње и стубова на доњу градњу.



Слика 5.1 Поторни багер SchRs 630

Конструкција која ће бити предмет даљих разматрања обухвата конструкције доње, горње градње и доњег дела стубова до изнад првог косника који укрућује стубове. Прављење оваквог прорачунског модела директна је последица одлуке о прављењу умањеног модела конструкције багера и њеним даљим моделским испитивањем. О томе ће бити више речи у наредним поглављима, а овакав прорачунски модел само представља припрему за завршно формирање и испитивање модела. Наиме, одлучено је да се направи умањена конструкција без стубова. Први разлог за то је, што стубови сами по себи нису интересантни са аспекта концентрације напона (што се може видети на основу прорачуна из Поглавља 11). Ти прорачунски модели укључују стубове да би се што прецизније “ухватио” пренос оптерећења преко стубова на горњу и доњу градњу, а одатле је добијено и прорачунско оптерећење овог модела са скраћеним стубовима. Други разлог зашто стубови нису укључени у физички модел је тај, што би конструкција

модела беспотребно била знатно гломазнија, а отежан би био и унос оптерећења (у свако улежиштење би било потребно уносити његова оптерећења).

Дакле, усвојени прорачунски модел садржи практично четири подструктуре, а то су доња градња (постоље багера), горња градња (обртна платформа), доњи део стубова и лежај.

5.1.1 Доња градња (постоље багера), прорачунски модел

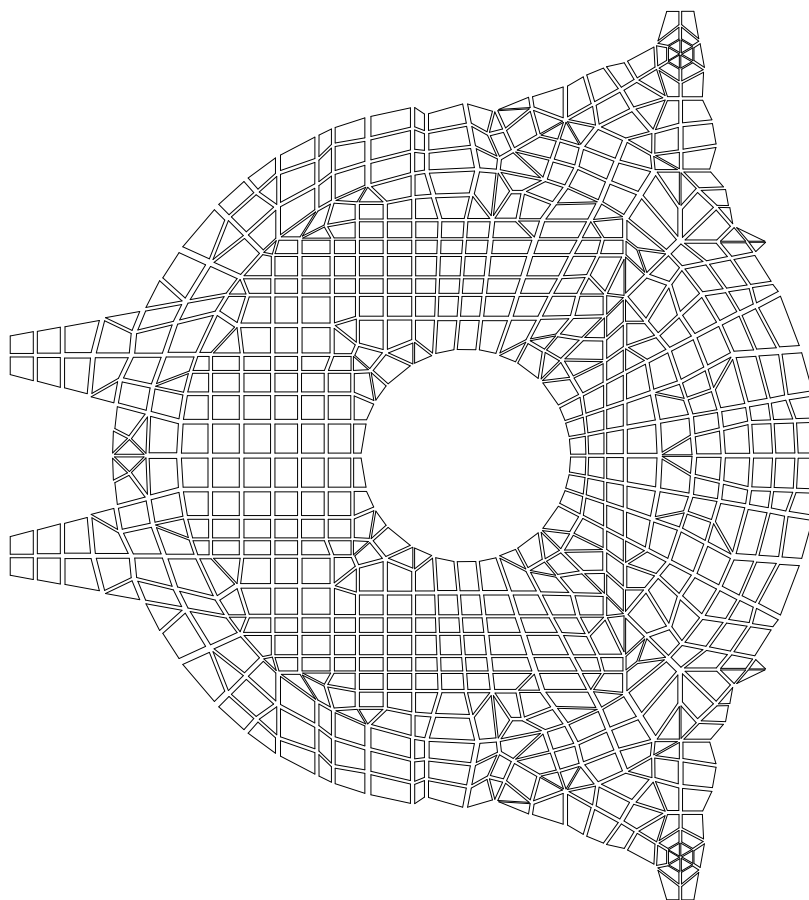
На основу техничке документације, а коришћењем већ споменутих препорука за добро моделирање, за моделирање доње градње багера SchRs 630 коришћен је коначни елемент плоче.

Наиме, моделирани су сви елементи плоча од којих је направљена доња градња багера. Елементи греде, доминантно L профили, који се налазе на горњој и доњој плочи доње градње и служе да спрече кривљење плоче, у овом прорачуну нису укључени у нумеричку анализу. Исто тако, L профили на вертикалним плочама и цилиндрима нису узети у разматрање. Разлози за овакву одлуку приликом моделирања биће дати у наредним поглављима. Уколико би ипак било неопходно да се наведени гредни елементи укључе у прорачун то би било лако изводљиво, јер се приликом прављења поделе горње и доње плоче, односно мреже коначних елемената, водило рачуна о простирању како вертикалних плоча које су укључене у прорачун, тако и искључених греда. Дакле, при формирању мреже, водило се рачуна о линијском повезивању чворова, тако да би релативно лако било могуће да се на те позиције-правце, поставе и изостављена гедна ојачања плоча.

Такође, на основу техничке документације може се уочити да је конструкција доње градње роторног багера SchRs 630 практично симетрична, па ће у том светлу бити моделирана само половина њене конструкције. Међутим, оптерећење конструкције није симетрично, па ће за прорачун бити коришћен цео модел, који се генерише применом функције симетрије.

Може се уочити да конструкцију доње градње чине две паралелне хоризонталне плоче, међусобно спојене вертикалним цилиндрима (унутрашњи и спољашњи цилиндар) и вертикалним укрућењима.

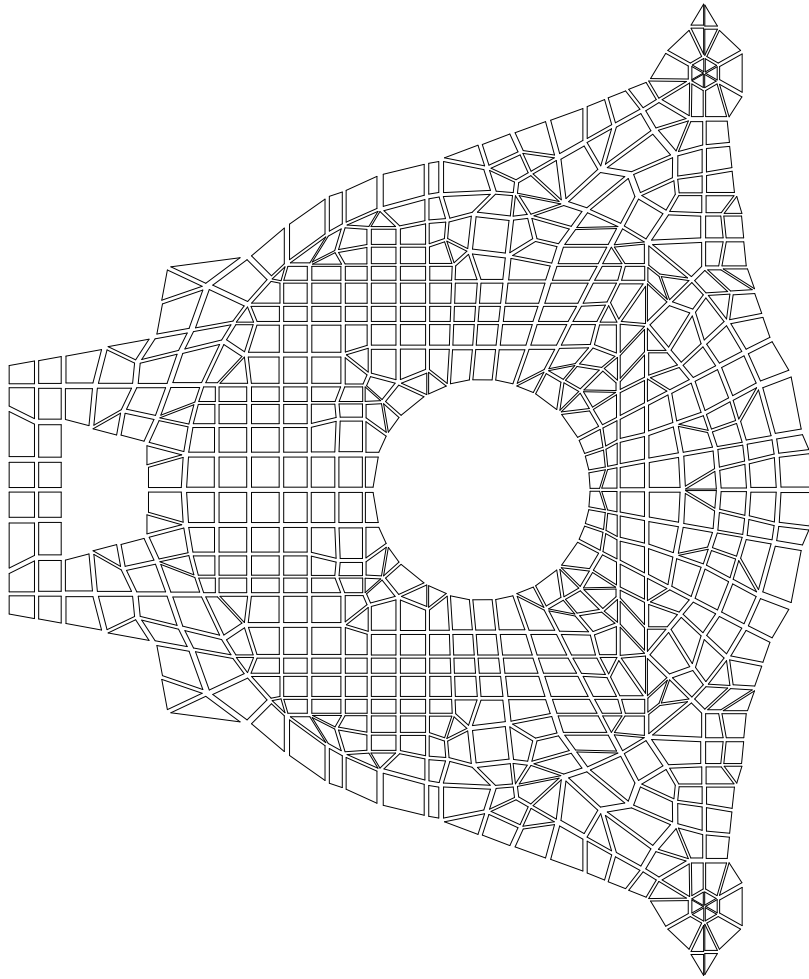
На Слици 5.2 приказана је горња плоча доње градње, са издвојеним коначним елементима.



Слика 5.2 Горња плоча доње градње са издвојеним коначним елементима

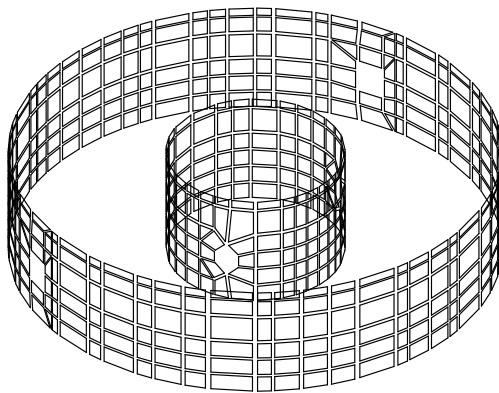
Као што се са претходне слике може уочити, приликом моделирања се тежило да се испоштују препоруке доброг моделирања приликом формирања мреже коначних елемената, у оном обиму у ком је то било могуће. Тежило се да елементи буду четвороугаони, што правилнијег облика, а да се ипак “ухвате” све чворне тачке у којима ће бити везане и вертикалне плоче или укрућења. Треба још једном нагласити да су два конструктивна елемента међусобно повезана, само уколико им се по линији подударају број и координате чворова. Уколико један од ова два услова није испоштован, на том месту је вештачки направљена прслина. Уочава се зато, да је негде ипак било неопходно коришћење и троугаоних коначних елемената.

На Слици 5.3 приказана је доња плоча доње градње са издвојеним елементима.



Слика 5.3 Доња плоча доње градње са издвојеним коначним елементима

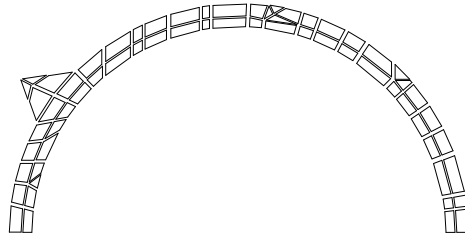
На Слици 5.4 приказани су вертикални цилиндри који спајају горњу и доњу плочу доње градње са издвојеним коначним елементима.



Слика 5.4 Унутрашњи и спољашњи цилиндар доње градње са издвојеним коначним елементима

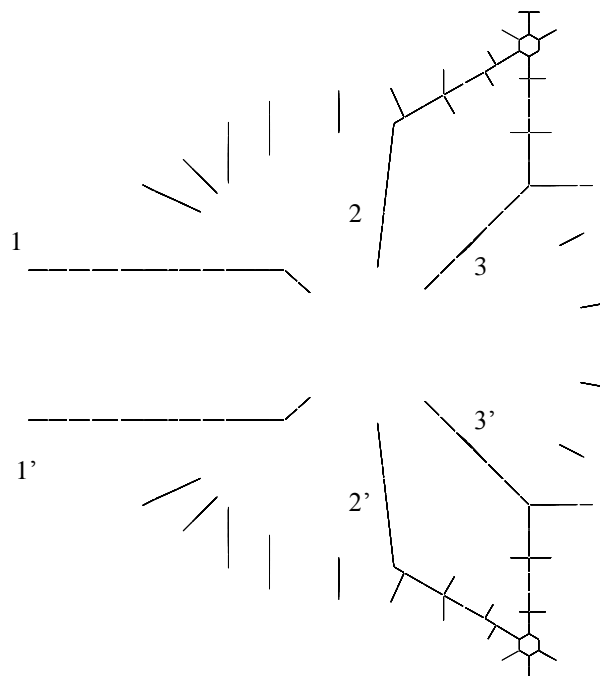
На цилиндрима се могу уочити технички отвори, који су због своје величине, евентуалног утицаја на крутост целог цилиндра, или на евентуалну локалну појаву концентрације напона, ипак узети у обзир приликом моделирања.

На Слици 5.5 приказана је половина обруча (у потпуности је симетричан) који се пружа око спољашњег цилиндра са спољашње стране, непосредно испод горње плоче, а има функцију да укрути спољашњи цилиндар.

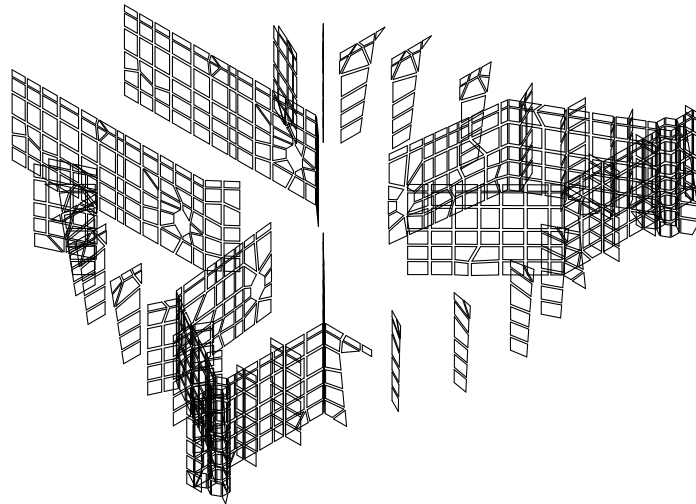


Слика 5.5 Обруч који укрућује спољашњи цилиндар доње градње са издвојеним коначним елементима, половина модела

На Слици 5.6 приказана су вертикална радијална укрућења између две плоче. На Слици 5.6а приказана је пројекција на хоризонталну раван, а на Слици 5.6б приказан је просторни изглед радијалних укрућења.



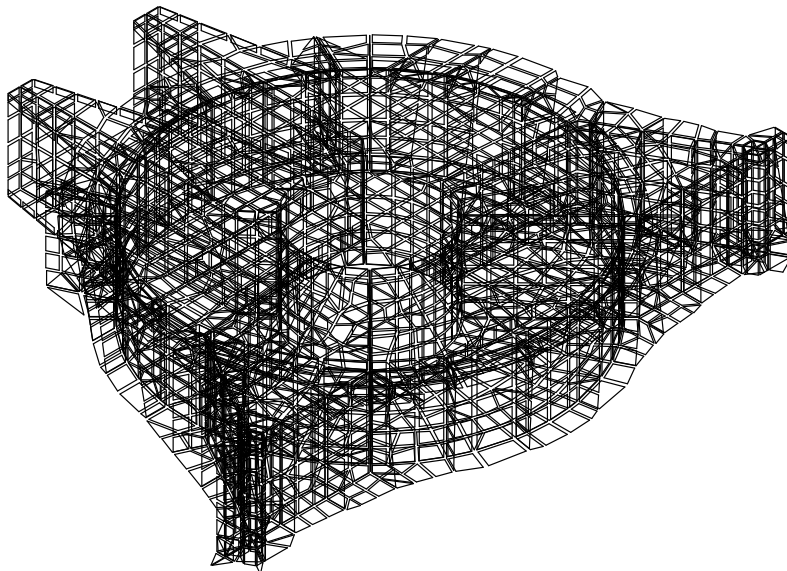
Слика 5.6а Вертикална укрућења између две плоче доње градње са издвојеним коначним елементима, пројекција на хоризонталну раван



Слика 5.66 Вертикална укрућења између две плоче доње градње са издвојеним коначним елементима, просторни изглед

Осим ових главних елемената, моделирана су и укрућења по ободу плоча, као и помоћне плоче које затварају краке конструкције и нека укрућења доње плоче доње градње. Ова укрућења имају изглед плоче (једна димензија много мања од друге две) и понашање плоче (пренос оптерећења), па су и она моделирана коначним елементом плоче и укључена су у модел.

На Слици 5.7 приказан је цео модел доње градње багера SchRs 630 са издвојеним елементима.



Слика 5.7 Доња градња са издвојеним елементима, цео модел

5.1.2 Горња градња (обртна платформа) са доњим делом стубова, прорачунски модел

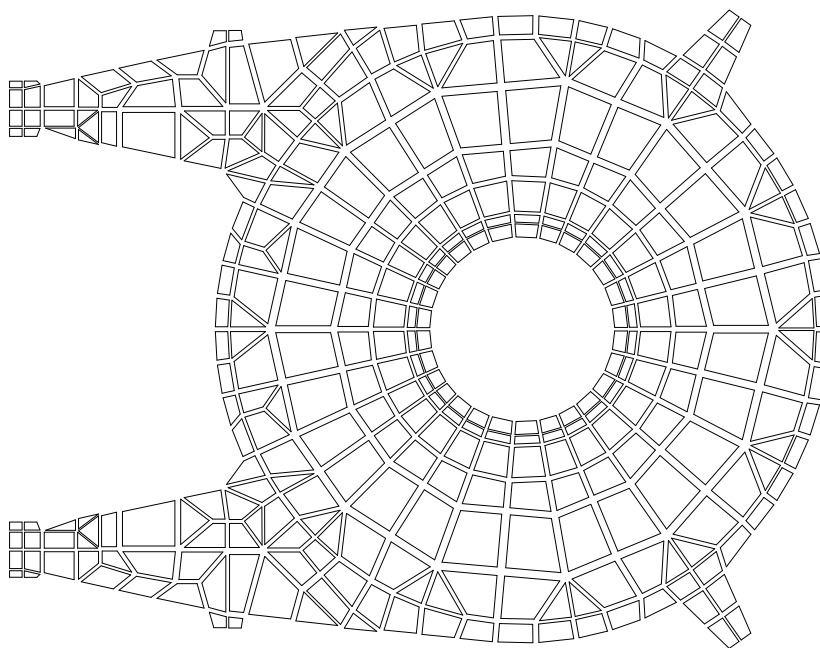
Обртна платформа, прорачунски модел

На основу техничке документације произвођача опреме израђен је нумерички модел обртне платформе багера SchRs 630.

По томе од каквих се конструктивних елемената састоји, обртна платформа је јако слична доњој градњи. Такође је симетрична, такође се састоји од горње и доње плоче које су међусобно спојене вертикалним цилиндрима и вертикалним радијално распоређеним плочама.

Горња и доња градња су међусобно спојене аксијалним лежајем који омогућава ротацију горње градње са стубовима у односу на постоље (доњу градњу), а преко њега се преноси оптерећење са стубова и горње градње на доњу градњу. У том светлу подеони круг и горње и доње градње који одговара позицији лежаја (спољашњи цилиндар) и на горњој и на доњој градњи има једнак број подела у мрежи модела.

На Слици 5.8 приказана је горња плоча горње градње са издвојеним коначним елементима.

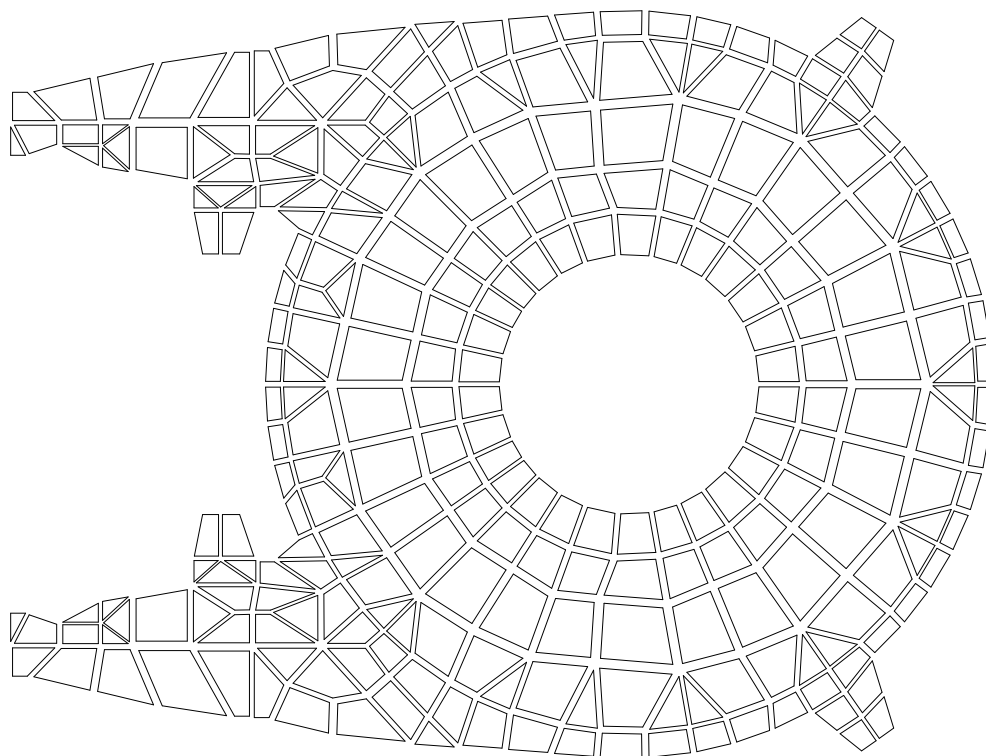


Слика 5.8 Горња плоча обртне платформе са издвојеним коначним елементима

Као главна разлика у односу на претходно описани модел хоризонталне плоче доње градње, може се уочити да је подела мреже овде радијална. Узрок је тај што се ребра доње градње (L профили који нису моделирани) простиру као шрафура под правим углом са једног на други крај плоче, а на хоризонтаним плочама горње градње су та ребра (као и сви остали конструктивни елементи) радијална.

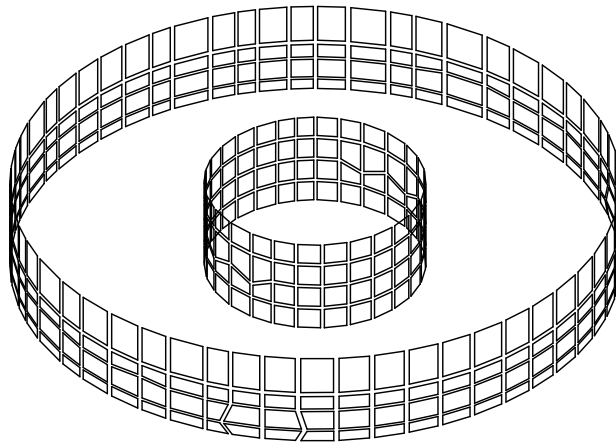
На претходној слици (Слика 5.8) може се уочити велики број подела око унутрашњег отвора. Разлог за то је, што се близу један другом налазе, подеони круг у коме се са доње стране качи унутрашњи цилиндар, и подеони круг у коме се са горње стране качи лежај Траке 2. Опет, они нису толико довољно близу, па није реално апроксимирати их само једним подеоним кругом.

Слична горњој је и доња плоча горње градње, са сличним поделама и радијалним ребрима (Слика 5.9)



Слика 5.9 Доња плоча обртне платформе са издвојеним коначним елементима

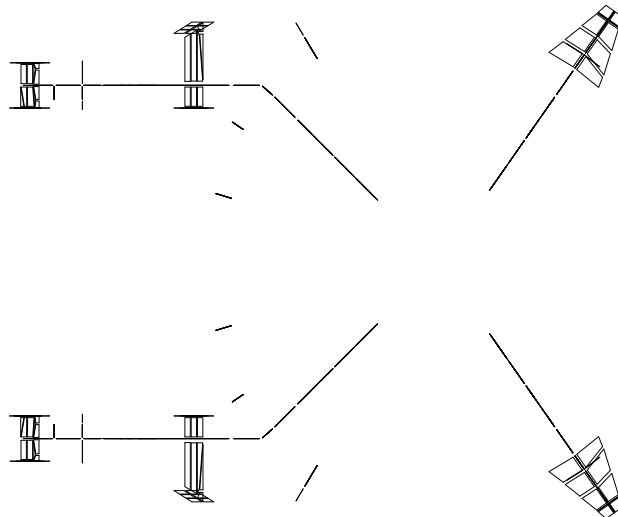
Спољашњи и унутрашњи цилиндар горње градње са издвојеним коначним елементима приказани су на Слици 5.10.



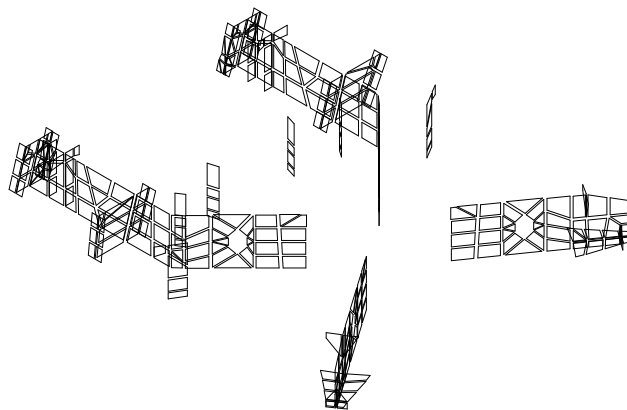
Слика 5.10 Унутрашњи и спољашњи цилиндар обртне платформе са издвојеним коначним елементима

Са претходне слике и Слика 5.4 може се уочити да је висина горње градње знатно мања него висина доње.

На Слици 5.11 приказане су вертикалне плоче између горње и доње плоче горње градње. На Слици 5.11а приказана је пројекција на хоризонталну раван, а на Слици 5.11б приказан је просторни изглед радијалних укрућења горње градње.



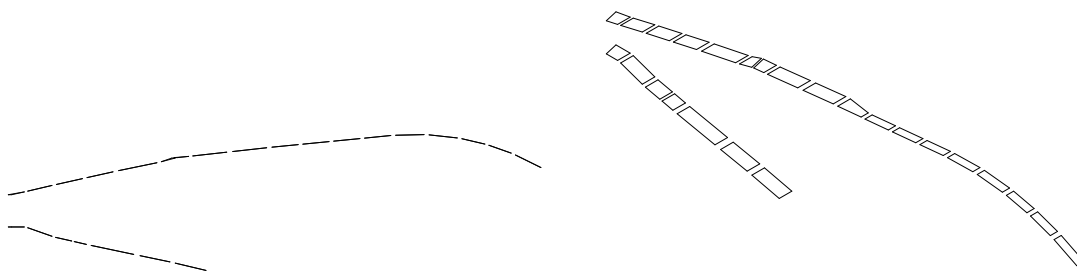
Слика 5.11а Вертикална укрућења између две плоче обртне платформе са издвојеним коначним елементима, пројекција на хоризонталну раван



Слика 5.11б Вертикална укрућења између две плоче обртне платформе са издвојеним коначним елементима, просторни изглед

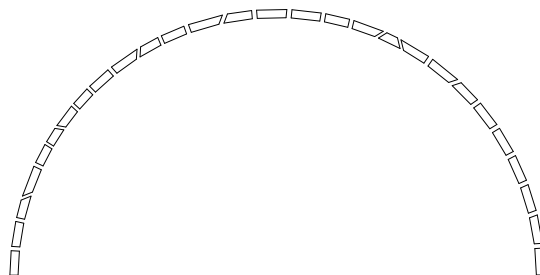
Плоча лево, са својим припадајућим гранањима, заправо представља корен стуба, пролази кроз горњу плочу горње градње и изнад ње се наставља као стуб.

На Слици 5.12 приказана су укрућења по ободу горње плоче горње градње (у пројекцији на хоризонталну раван и у простору).



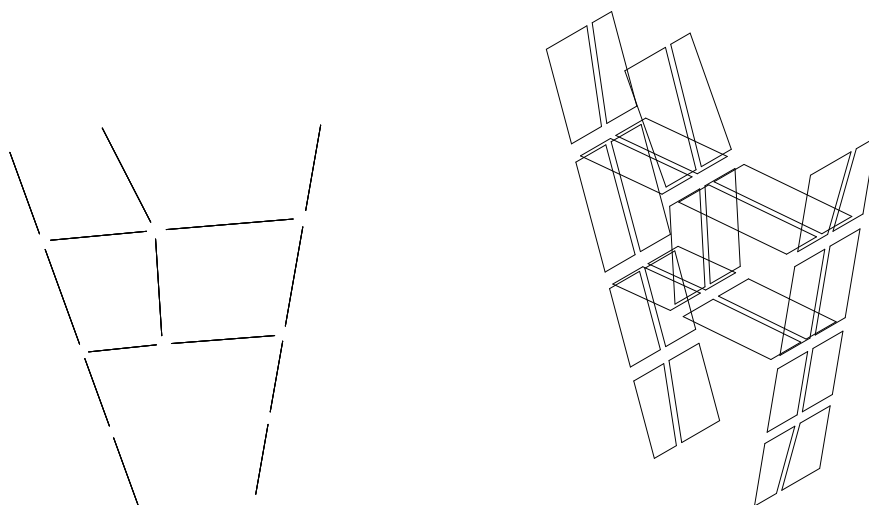
Слика 5.12 Укрућења по ободу горње плоче обртне платформе, половина модела

На Слици 5.14 приказана је половина обруча који се пружа око спољашњег цилиндра са унутрашње стране, непосредно изнад доње плоче.



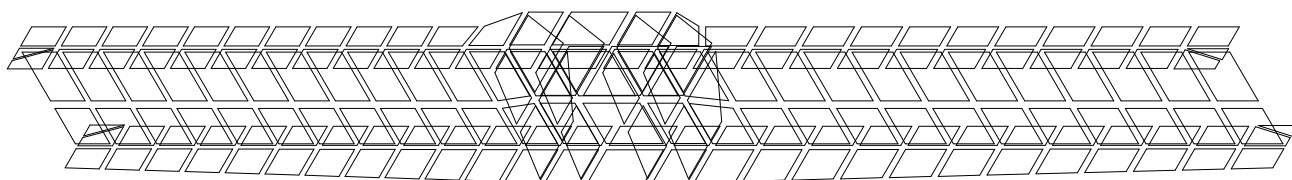
Слика 5.13 Обруч који укрућује спољашњи цилиндар обртне платформе са издвојеним коначним елементима, половина модела

Укрућења доње плоче горње градње приказана су на Слици 5.14 (у пројекцији на хоризонталну раван и у простору).



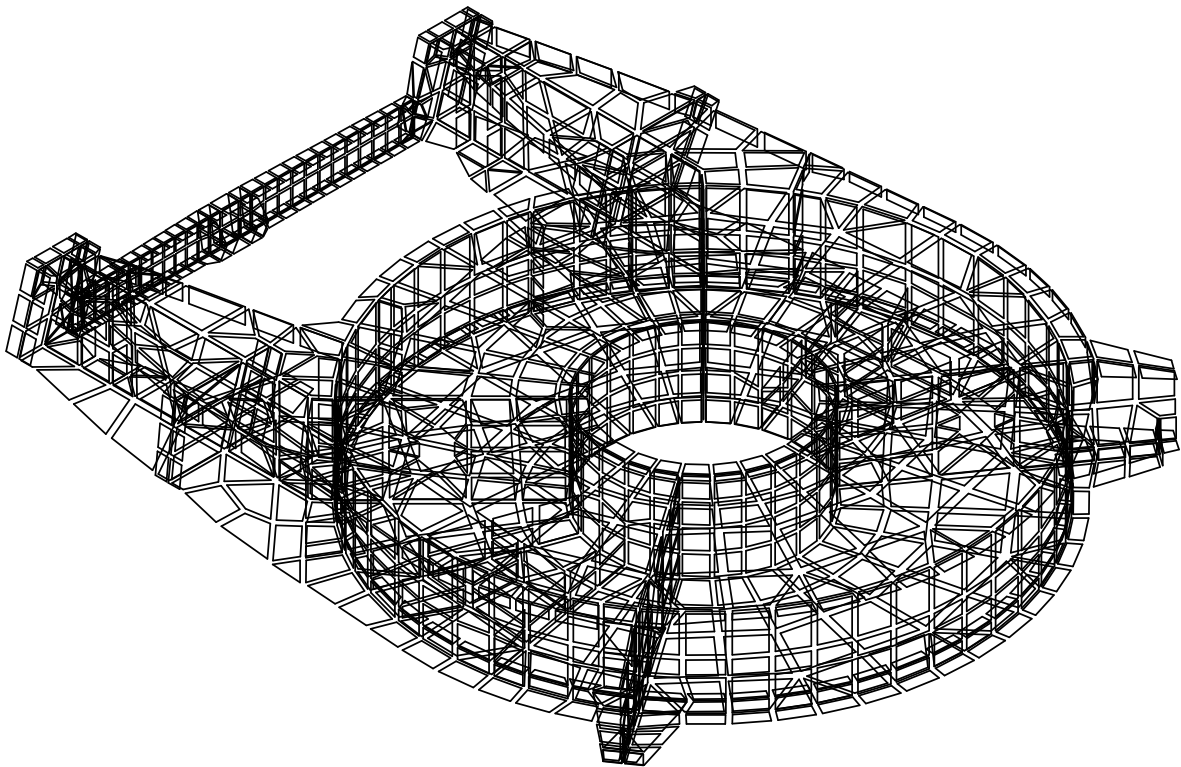
Слика 5.14 Укрућења доње плоче обртне платформе са издвојеним коначним елементима, половина модела

На следећој слици приказана је греда (глобално гледано, моделирана елементима плоча) која међусобно укрућује стубове багера (Слика 5.15). Приближно је облика I профила и није симетрична у односу на осу симетрије целе конструкције. На њу се у једној тачки качи редуктор.



Слика 5.15 Греда облика I профила која међусобно укрућује стубове са издвојеним коначним елементима, цео модел

На Слици 5.16 приказан је цео модел горње градње багера SchRs 630 са издвојеним елементима.



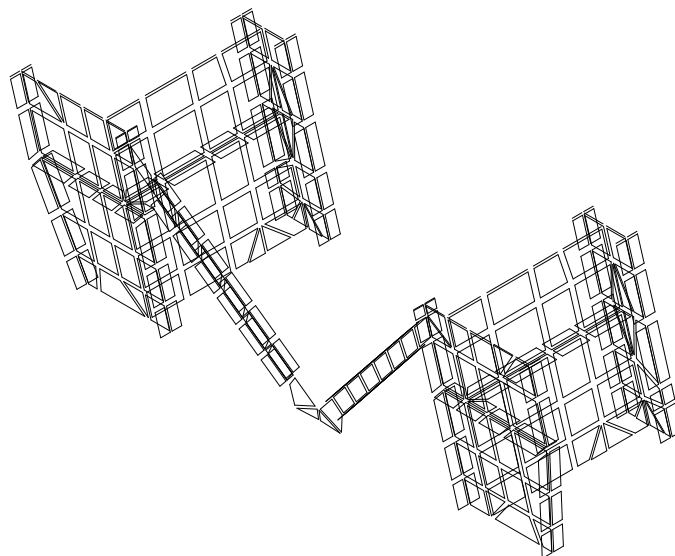
Слика 5.16 Обртна платформа са издвојеним коначним елементима, цео модел

Доњи део стубова, прорачунски модел

На основу техничке документације произвођача опреме израђен је нумерички модел доњег дела стубова багера SchRs 630. И ови елементи су моделирани тако да нумерички модел што реалније представља физички модел, односно, у обзир су узети сви елементи конструкције који утичу на крутост стубова, њихове димензије и дебљине. Коришћен је коначни елемент плоче за моделирање конструкције стубова.

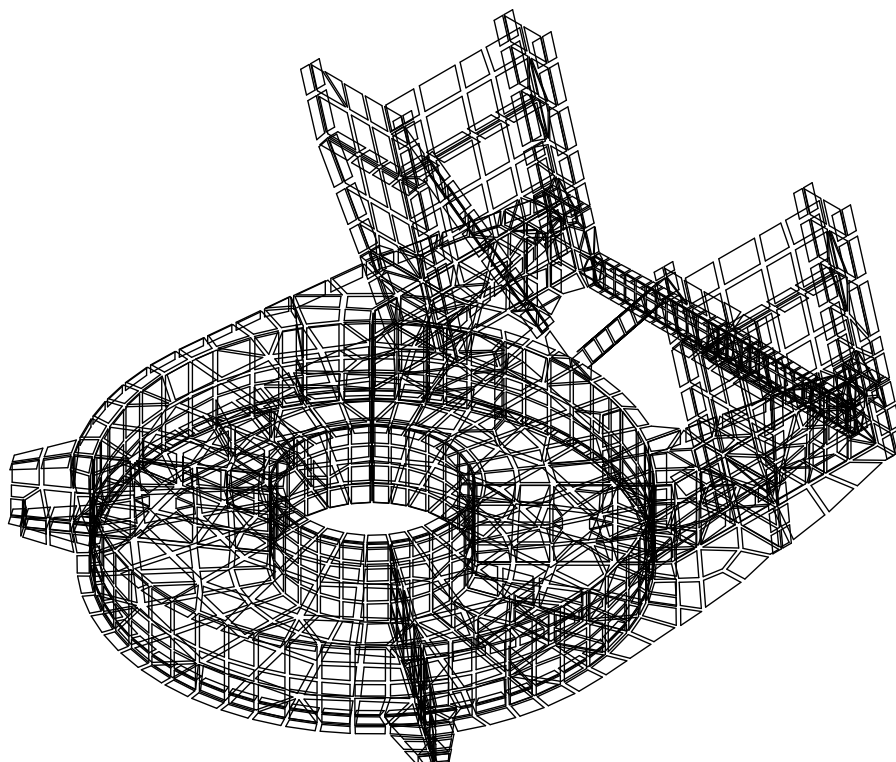
На Слици 5.17 приказан је доњи део стубова. Стубови су скраћени изнад првог косника, а испод носача стреле кабине багеристе и прилично испод улежиштења стреле. На месту ових пресека стубова додата је крута греда да би се избегли проблеми великих померања и концентрација напона због начина уноса оптерећења у чворовима. Прорачун је претходно урађен без круте греде и показало се да та крута греда само “реша” проблем одсецања стубова, односно уноса и преношења оптерећења, а нема утицаја на напонско стање преосталог

дела структуре. У модел су укључени и косници са чворном плочом, која се везује за горњу плочу обртне платформе.



Слика 5.17 Доњи део стубова са косницима и чворном плочом, издвојени коначни елементи

На Слици 5.18 приказан је модел обртне платформе са доњим делом стубова.

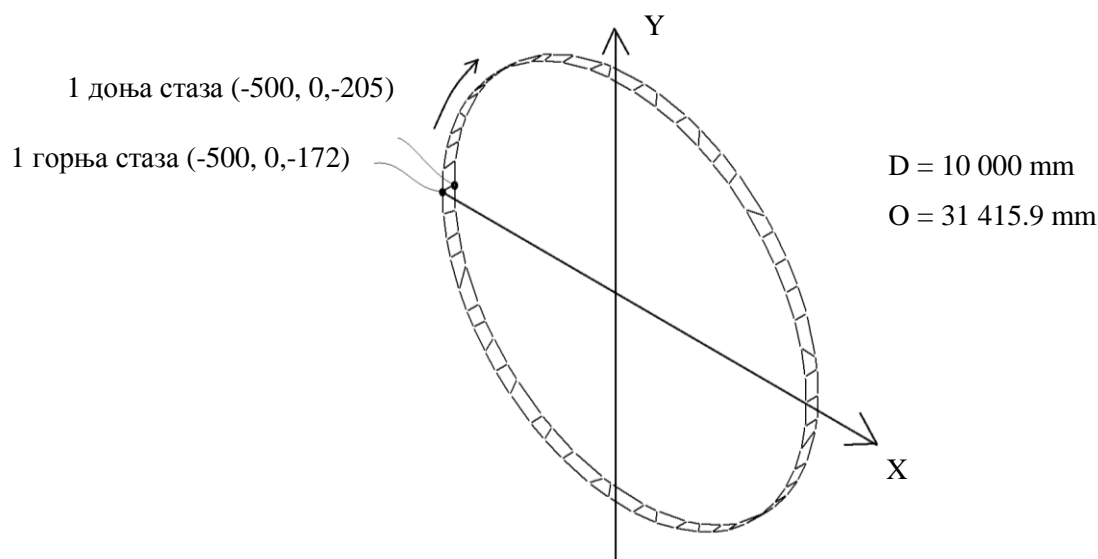


Слика 5.18 Обртна платформа са доњим делом стубова

5.1.3 Лежај, прорачунски модел

Као што је већ речено, горња и доња градња су међусобно спојене аксијалним лежајем, који омогућава ротацију горње градње са стубовима у односу на постоље (доњу градњу), а преко њега се преноси оптерећење са стубова и горње градње на доњу градњу.

Лежај је моделиран линијским коначним елементима због својих физичких карактеристика (Слика 5.27).



Слика 5.19 Лежај, прорачунски модел

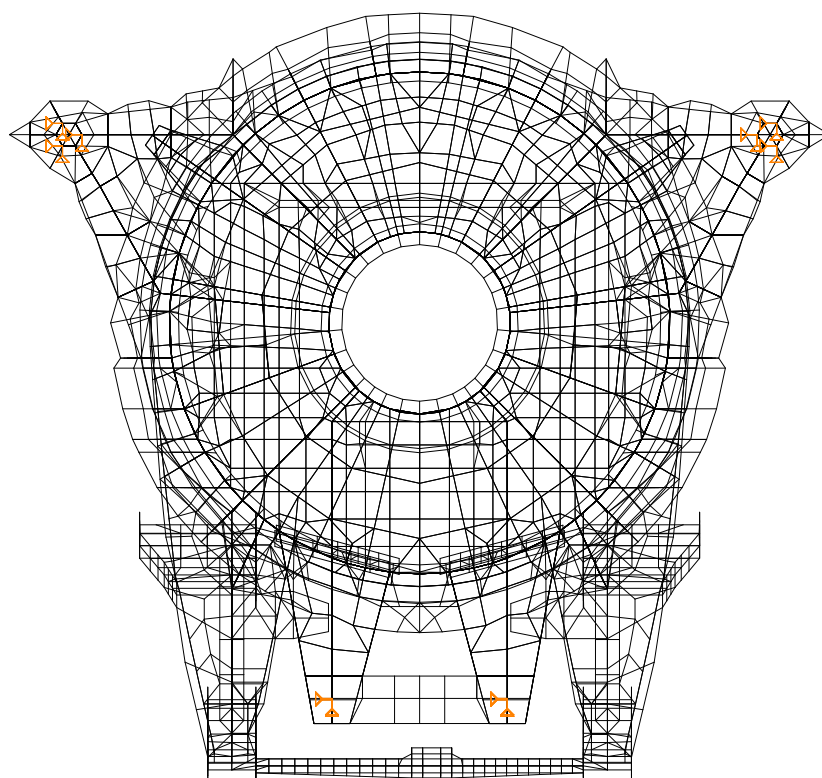
Стазе су моделиране гредним коначним елементима. Кугле лежаја представљене су елементима штапа који су сферним зглобовима спојени за стазе, што одговара реалном физичком стању ствари.

За разлику од постојећег лежаја на овој конструкцији који има 144 кугле (36 кавеза по 4 кугле) прорачунски модел садржи 56 штапова. Тај број је био диктиран бројем подела на подеоним круговима на месту лежаја горње плоче доње градње и доње плоче горње градње. То што је број кугли (тачака додира) промењен у односу на стварно стање ствари не игра никакву улогу у преносу оптерећења са горње на доњу градњу. Тачније, овај број кугли је усвојен на основу подеоних кругова горње плоче доње градње и доње плоче горње градње, са надом да ће бити “ухваћена” неравномерност расподеле оптерећења по зонама лежаја.

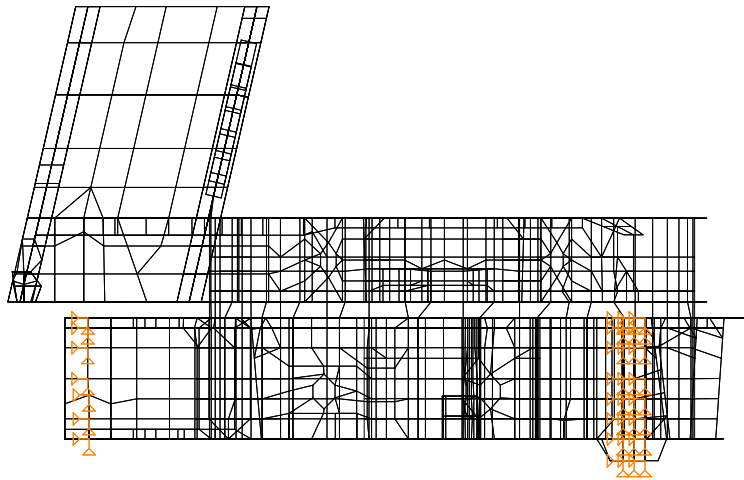
Са претходне слике се такође може уочити да се координате чворова на подеоном кругу лежаја горње плоче доње градње и доње плоче горње градње не подударају, јер су диктиране распоредом укрућења који је за сваку од ових плоча другачији. То је резултовало тиме, да су штапови који симулирају кугле коси, што нема неког великог утицаја на цео прорачун.

5.2 Статички прорачун стварне конструкције

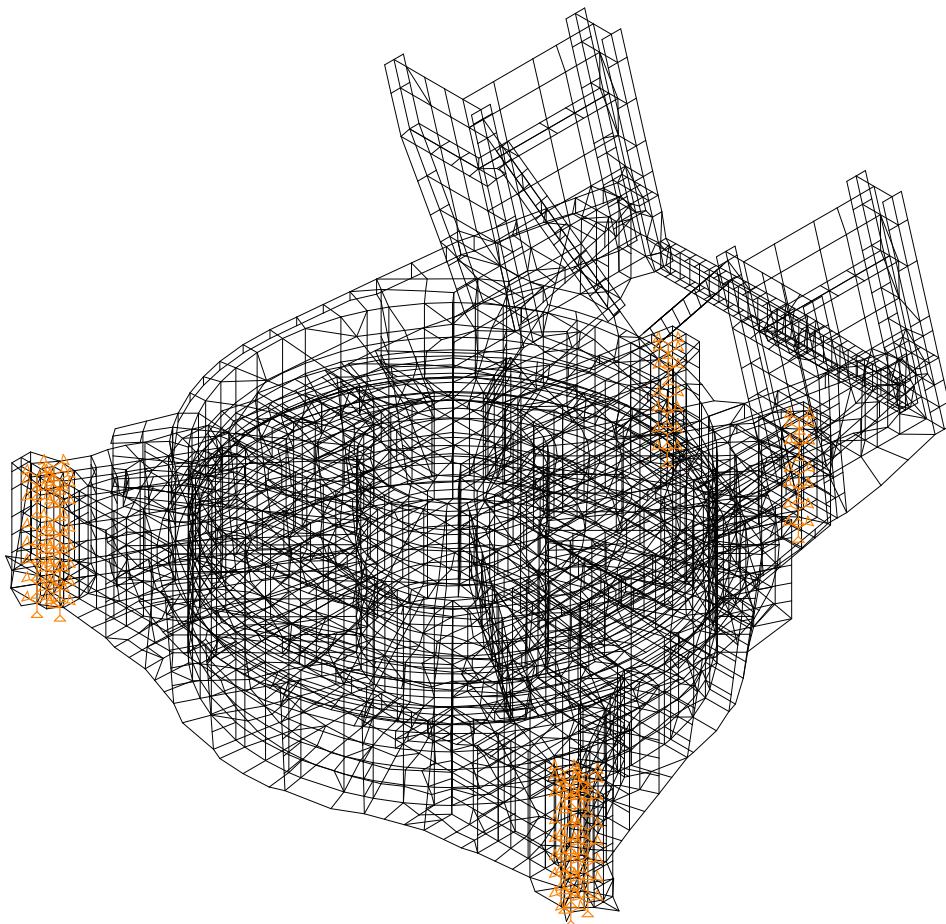
Статички прорачун ове конструкције урађен је за један случај оптерећења. Ослонци прорачунског модела стварне конструкције су на местима гусеница, на местима физичких ослонаца конструкције. На слици 5.20 приказан је прорачунски модел конструкције (са ослонцима) доње и горње градње са доњим делом стубовима багера SchRs 630, које су међусобно спојене лежајем.



Слика 5.20а Прорачунски модел са ослонцима стварне конструкције доње градње, обртне платформе и доњег дела стубова, пројекција на хоризонталну раван



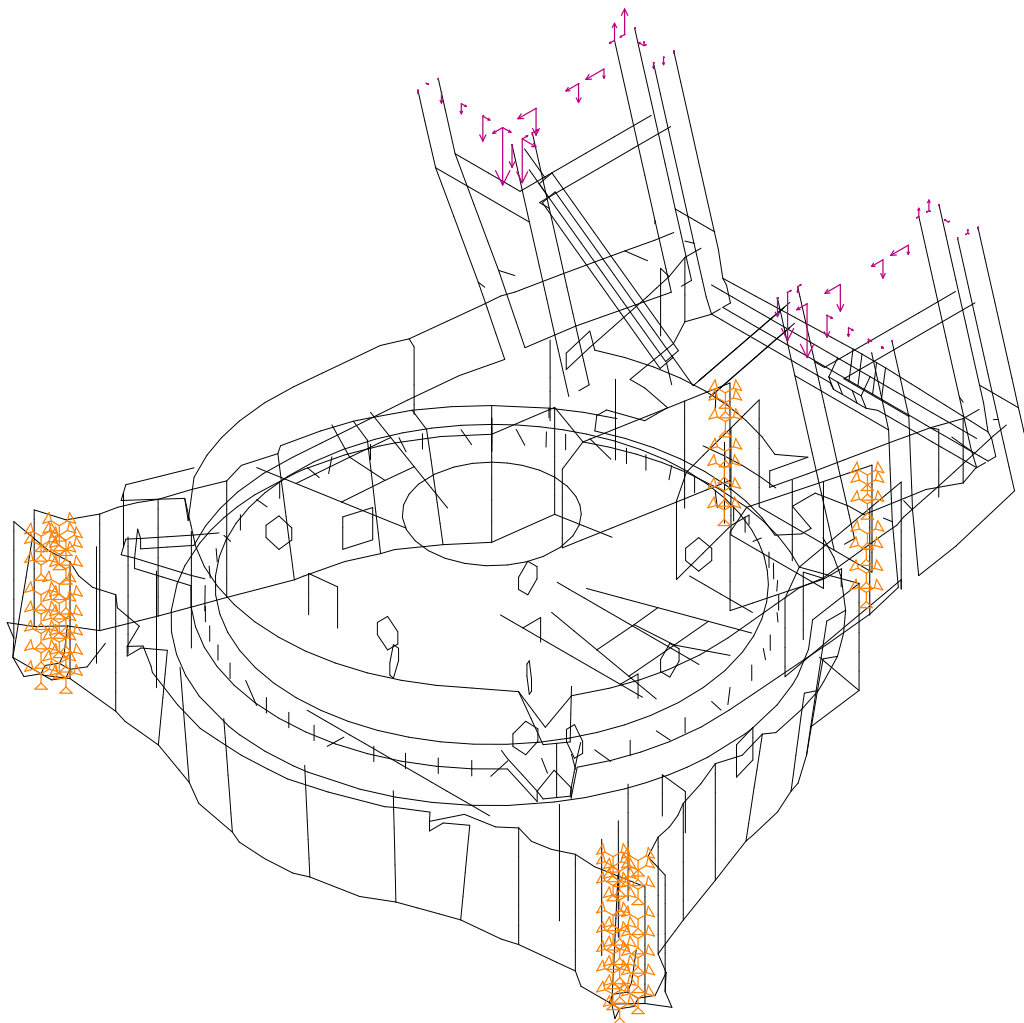
Слика 5.20б Прорачунски модел са ослонцима стварне конструкције доње градње, обртне платформе и доњег дела стубова, бочна раван



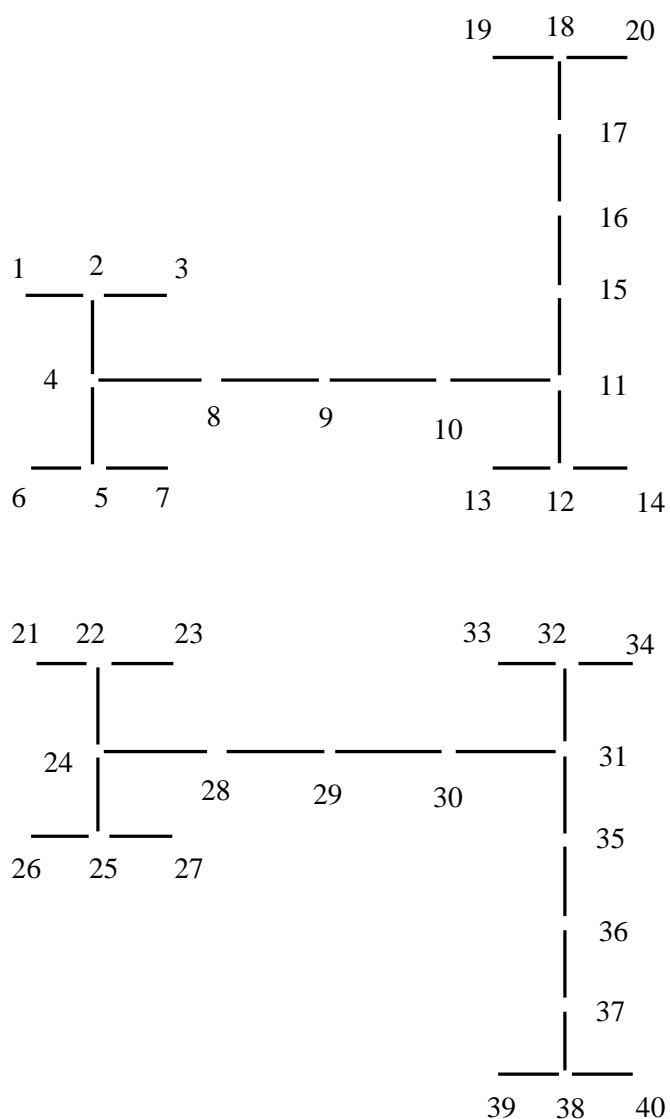
Слика 5.20в Прорачунски модел са ослонцима стварне конструкције доње градње, обртне платформе и доњег дела стубова, просторни изглед

5.2.1 Оптерећење стварне конструкције

На Слици 5.21 приказан је прорачунски модела стварне конструкције доње градње, обртне платформе и доњег дела стубова са унетим оптерећењима. Оптерећење је просторно и несиметрично (деталније у Поглављу 11).



Слика 5.21а Прорачунски модел стварне конструкције, ослонци и оптерећења



Слика 5.21б Прорачунски модел стварне конструкције, раван пресека (нумерисане тачке пресека у којима су унета оптерећења, поглед одозго)

У Табели 5.1 приказане су вредности сила у правцима оса глобалног координатног система у свим чворним тачкама на линији пресека, односно оптерећења стварне конструкције.

Табела 5.1 Оптерећења стварне редуковане структуре

Број чвора (са Сlike 6.5)	Интензитет силе [kN]			Број чвора (са Сlike 6.5)	Интензитет силе [kN]		
	Оса X	Оса Y	Оса Z		Оса X	Оса Y	Оса Z
1	-7,222	8,575	-27,998	21	-11,099	7,67	-37,016
2	47,998	23,031	67,776	22	1,871	14,495	-149,1

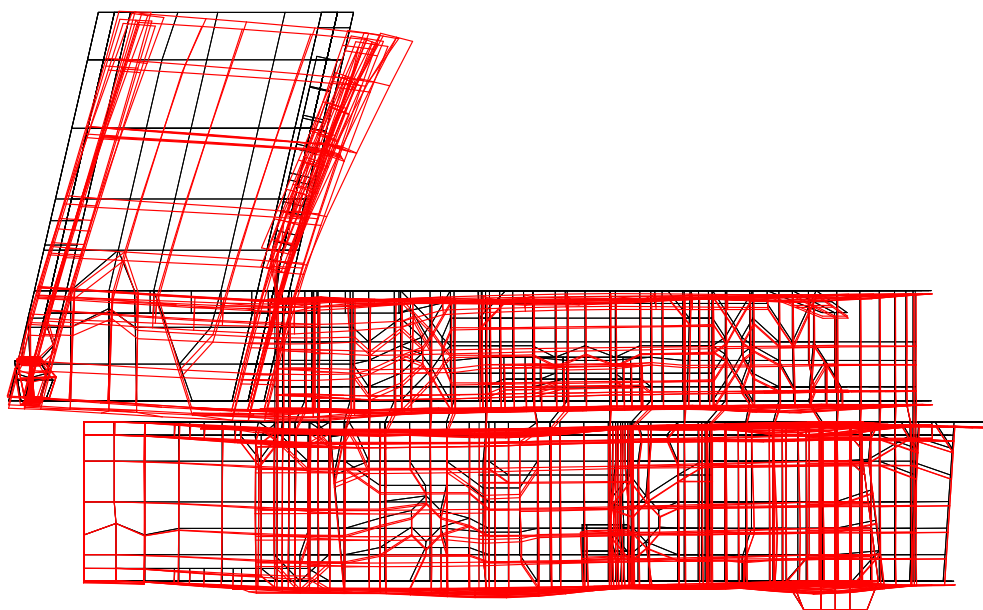
3	7,255	0,046	26,23	23	-11,464	7,33	-100,502
4	-21,849	-88,872	4,149	24	-41,422	-127,763	77,294
5	53,931	29,723	203,626	25	97,944	4,879	493
6	-5,088	-3,996	-17,514	26	-19,512	-2,485	15,17
7	51,269	-6,055	160,618	27	112,304	-3,526	330,03
8	393,309	3,52	-179,86	28	405,515	0,908	-176,835
9	256,764	-1,21	-350,997	29	281,648	3,246	-364,922
10	341,663	1,776	-515,157	30	402,631	5,365	-517,721
11	231,483	2,26	-1039,798	31	220,199	183,785	-1109,086
12	-77,271	-4,82	-927,286	32	-122,4	308,117	-845,411
13	-73,657	-2,09	-114,59	33	-131,915	-1,833	-37,214
14	-24,395	-6,982	-351,759	34	-5,515	-5,386	-434,621
15	3,067	119,165	-422,759	35	-17,098	156,501	-484,379
16	1,171	101,377	-167,851	36	1,214	111,333	-195,317
17	-0,33	73,583	-71,564	37	-0,058	6,018	-213,603
18	-7,571	39,651	-26,771	38	-5,539	-42,834	11,425
19	-5,55	-1,184	-1,806	39	-2,692	1,953	-22,528
20	1,901	-0,006	-12,408	40	-4,18	1,592	-53,494

Хоризонтална оса X глобалног координатног система има правац уздужне осе багера, смер од стубова ка центру, а оса Z је вертикална смера супротног од смера силе Земљине теже.

Претходна табела је тако дата, да се упоредо могу пратити оптерећења тачака десног стуба и њихових коресподентних тачака на левом стубу (као слика у огледалу).

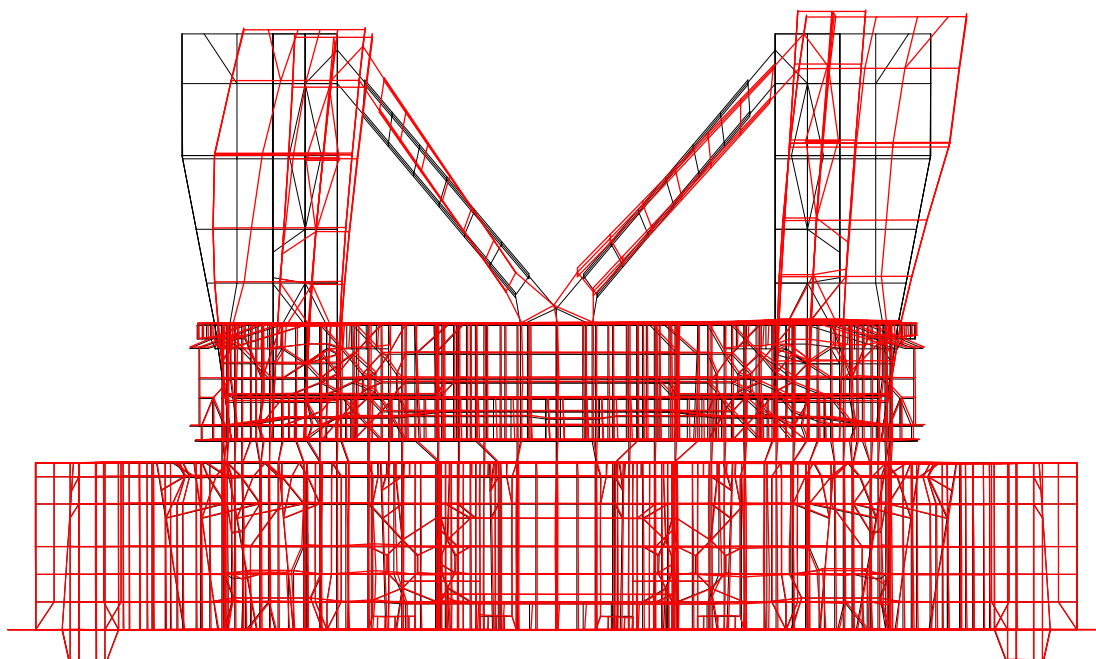
5.2.2 Резултати нумеричке анализе стварне конструкције

Резултати нумеричке анализе стварне конструкције приказани су на следећим сликама. На Слици 5.22 приказано је померање чворних тачака модела стварне конструкције.

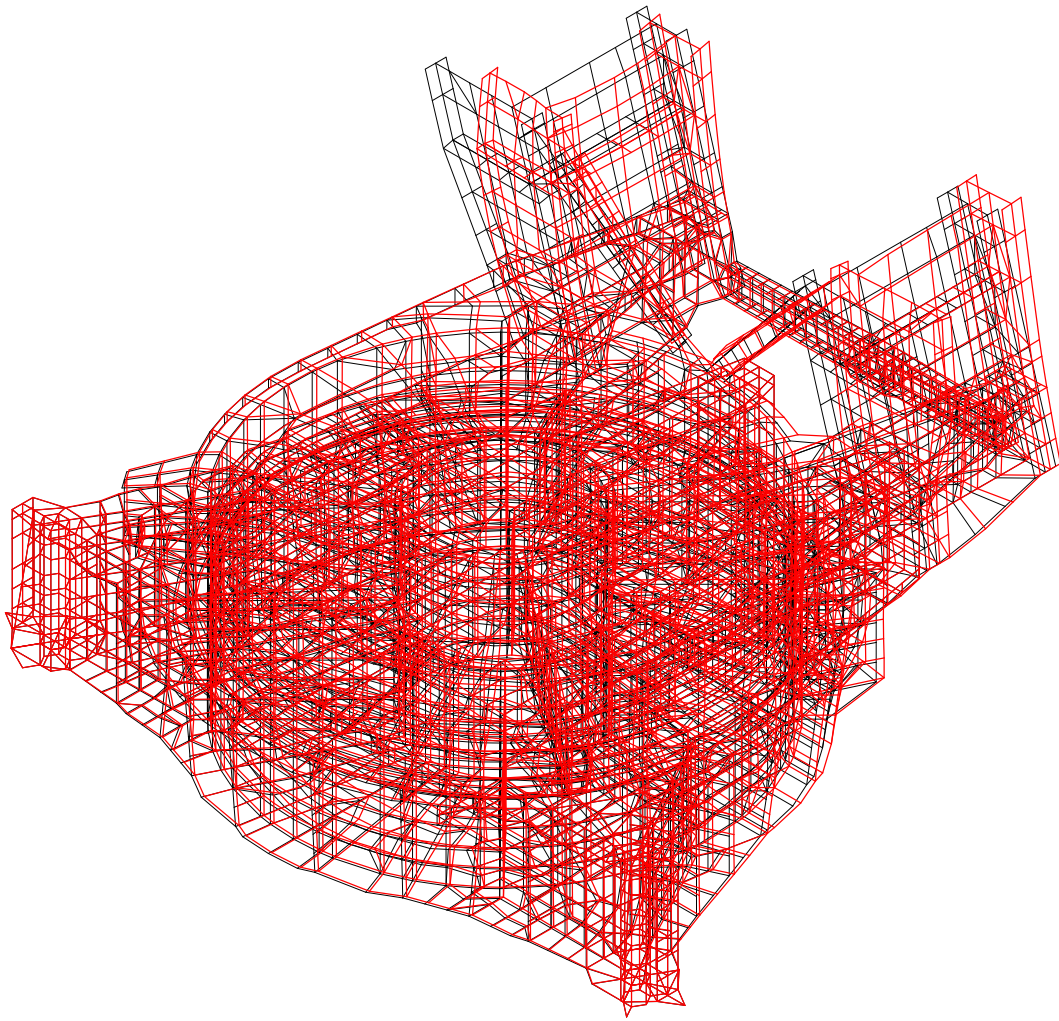


Максимална деформација износи 2,117 cm

Слика 5.22a Деформација модела стварне конструкције, бочни поглед

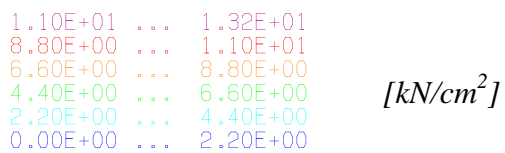
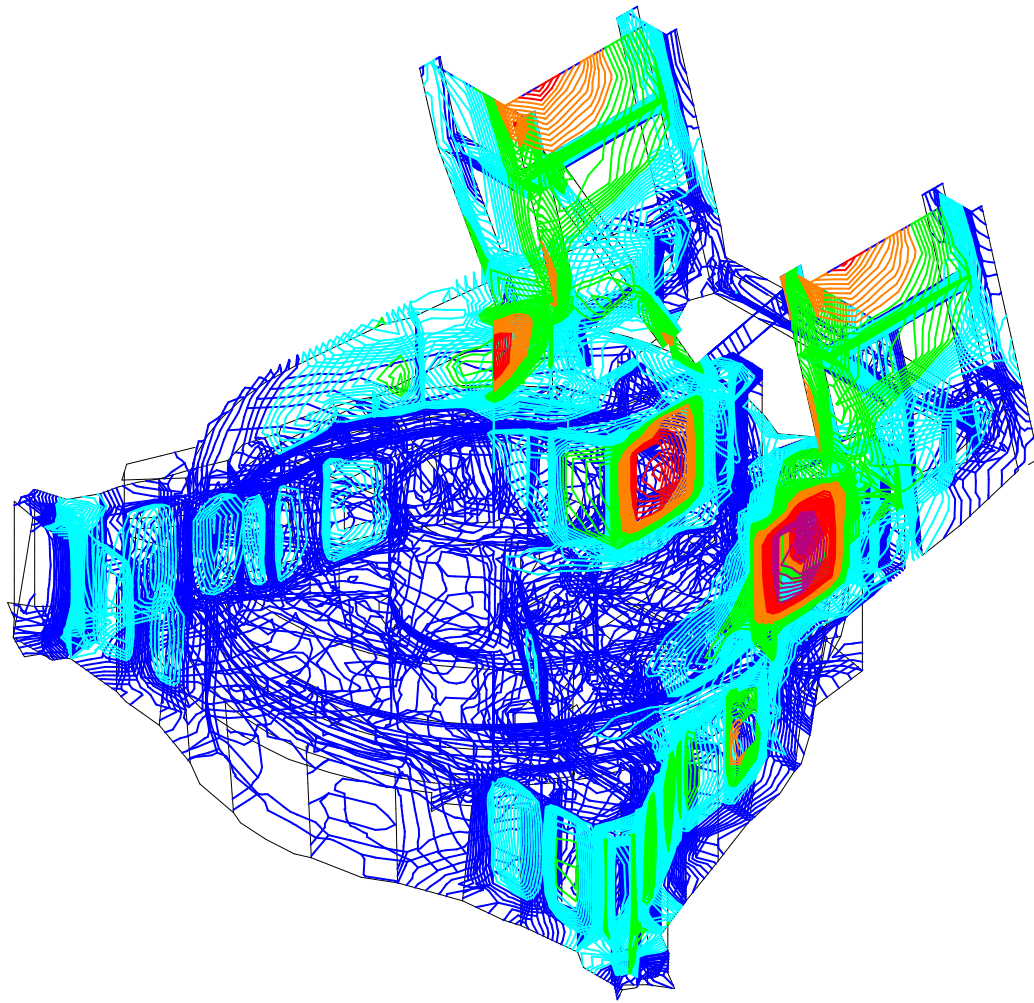


Слика 5.22б Деформација модела стварне конструкције, чеони поглед



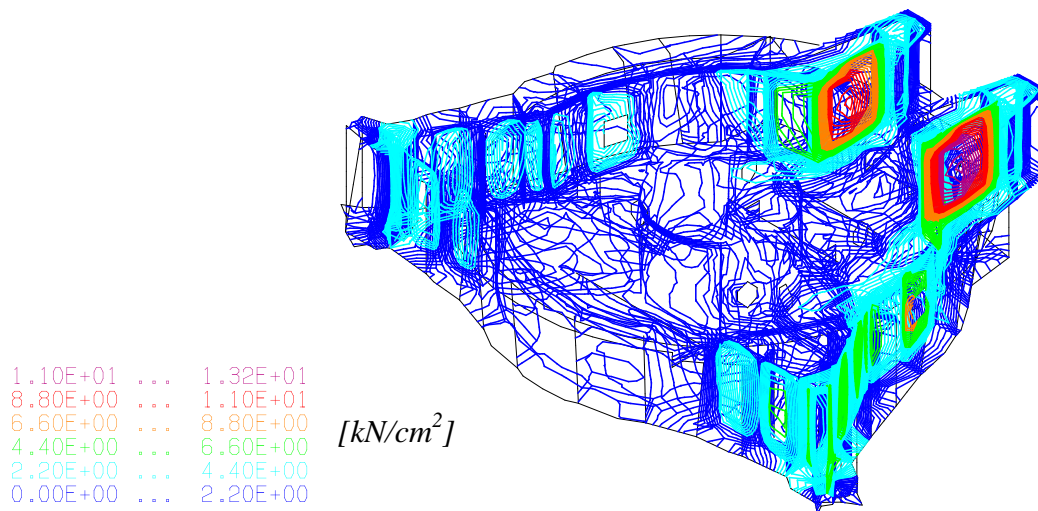
Слика 5.22в Деформација модела стварне конструкције, просторни изглед

На Слици 5.23 приказано је напонско поље целог модела стварне конструкције.

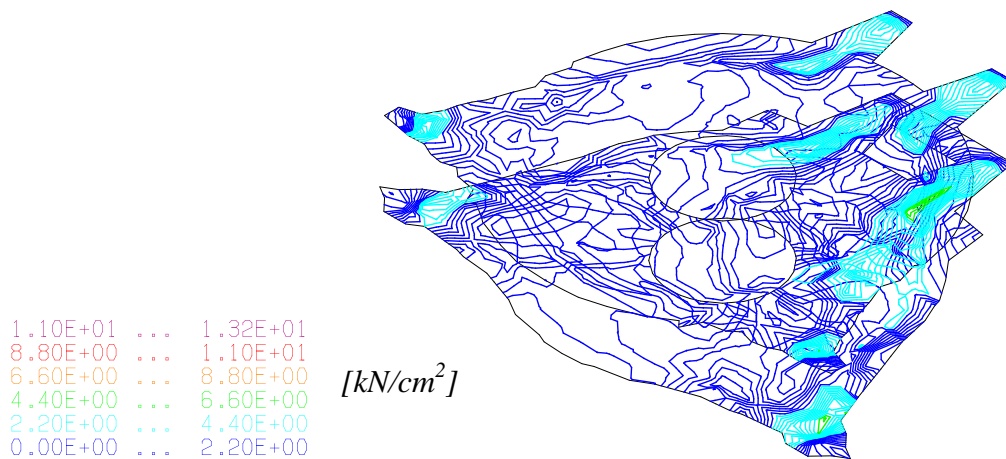


Слика 5.23 Напонско поље целог модела стварне конструкције

Напонско поље је несиметрично, што је у складу са унетим оптерећењем. На следећим сликама приказано је напонско поље издвојених функционалних целина.

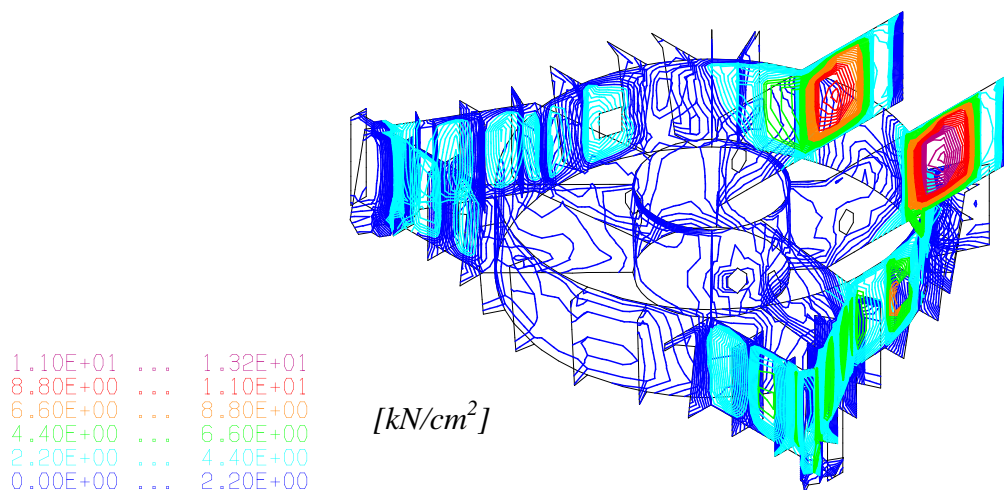


Слика 5.24 Доња градња, напонско поље, стварна конструкција



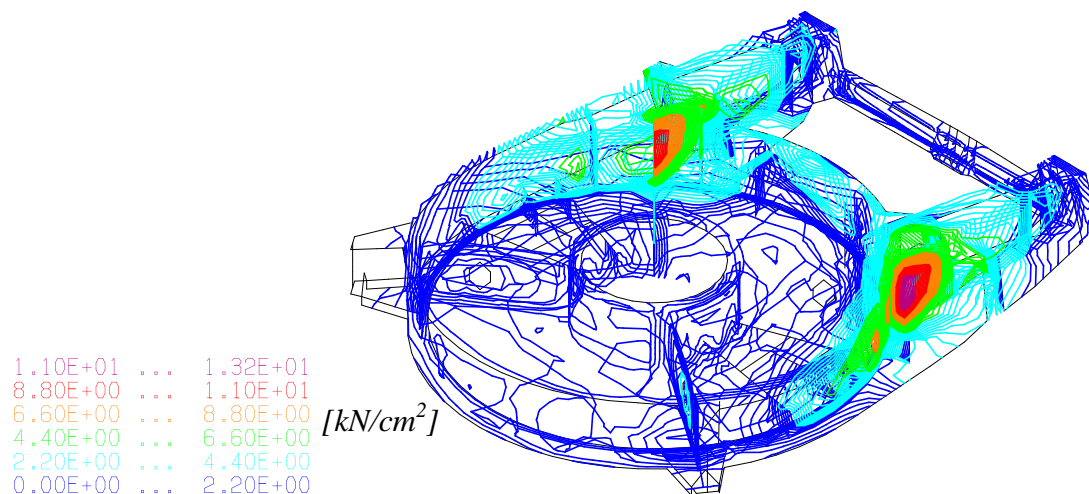
Слика 5.25 Доња и горња плоча доње градње, напонско поље, стварна конструкција

Као што се може уочити (Слика 5.25) ове плоче немају проблематична места са аспекта концентрације напона. На местима везивања неких вертикалних укрућења у плочу (на месту ослонаца) уочава се скок напона, али је тај напон ипак незнатног интензитета (градијент промене напона није велики).



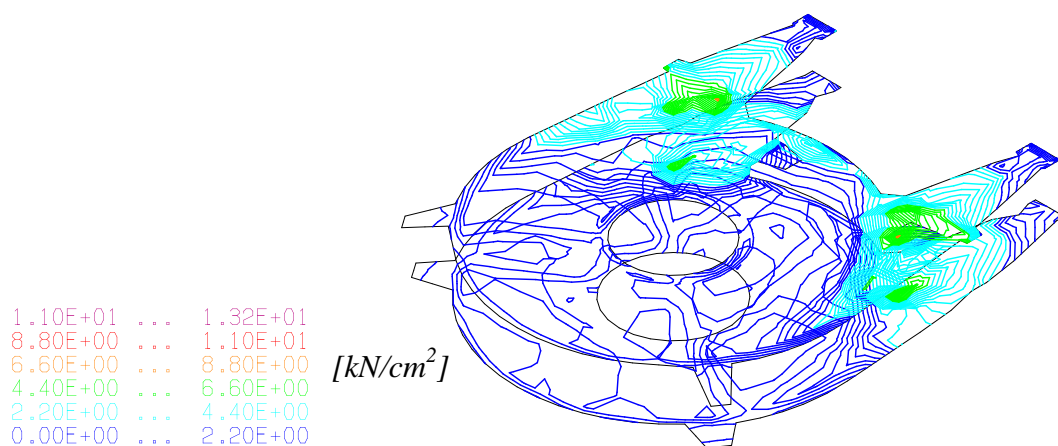
Слика 5.26 Вертикалне плоче и цилиндри доње градње, напонско поље, стварна конструкција

Види се да је концентрација напона на вертикалним плочама са спољашње стране спољашњег цилиндра изнад крутог ослонца гусенице (тзв. “самица”). То је уједно и место највеће концентрације напона на целом моделу доње градње.



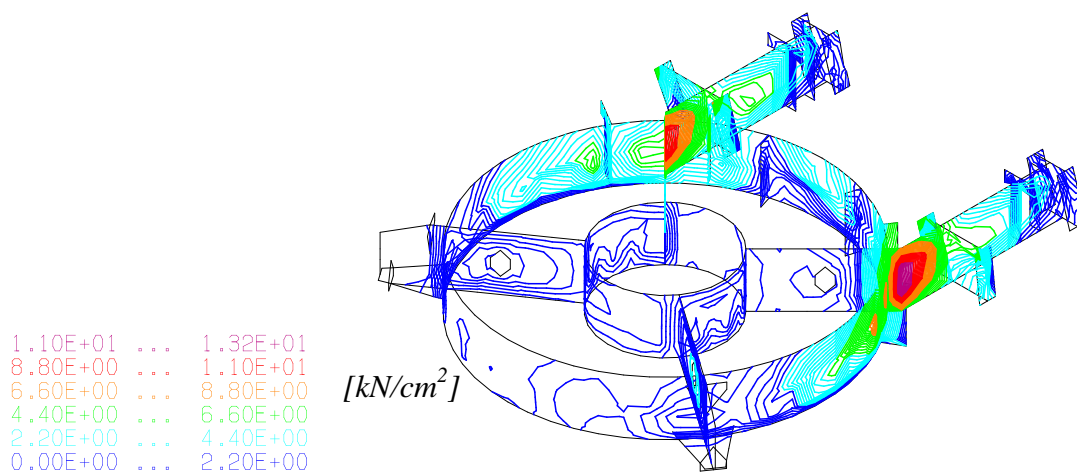
Слика 5.27 Обртна платформа, напонско поље, стварна конструкција

Са претходне слике (као и у анализи доње градње) као места концентрације напона се идентификују радијална ребра, такође на споју ребара и спољашњег цилиндра.



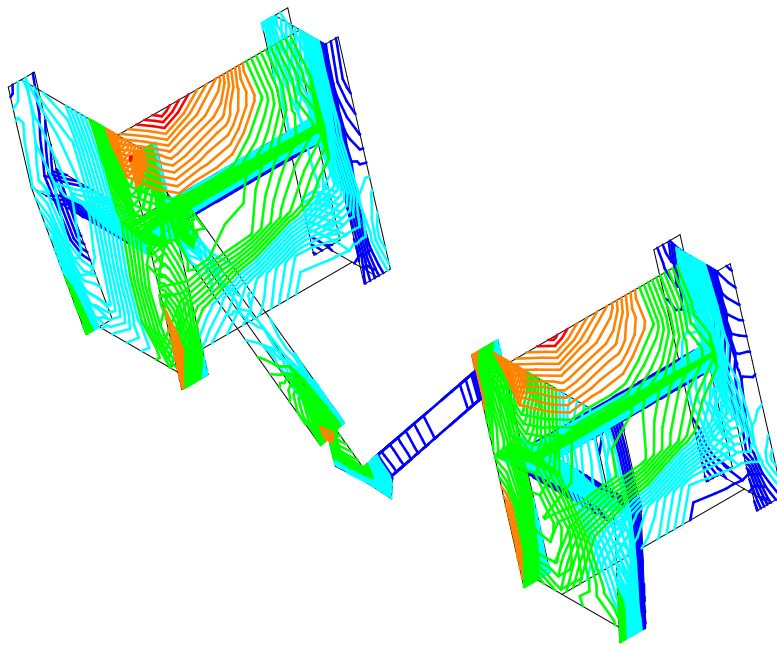
Слика 5.28 Доња и горња плоча обртне платформе, напонско поље, стварна конструкција

Са претходне слике могу се уочити концентрације напона на месту везивања проблематичне вертикалне плоче у хоризонталне плоче (мало већи напон је на горњој), али напони на тим местима нису високог интензитета.



Слика 5.29 Вертикалне плоче и цилиндри обртне платформе, напонско поље, стварна конструкција

На претходној слици се јасно виде зоне концентрације напона на вертикалним плочама са спољашње стране спољашњег цилиндра. Уз она претходно поменута ребра доње градње, представљају места највеће концентрације напона целог модела.



Слика 5.30 Доњи део стубова, напонско поље, стварна конструкција

Осим поља померања и напона, интересантан излаз статичког прорачуна, представља и померање тачака аксијалног лежаја. У Табели 5.2 приказано је померање чворних тачака горње и доње стазе аксијалног лежаја на местима везивања штапова (кугли). Почетна тачка је тачка на оси симетрије машине са координатама $(-500,0)$, а нумерација иде у смеру казаљке на сату (Слика 5.19). Смерови оса су усвојени за модел целе машине и о њима је било речи раније.

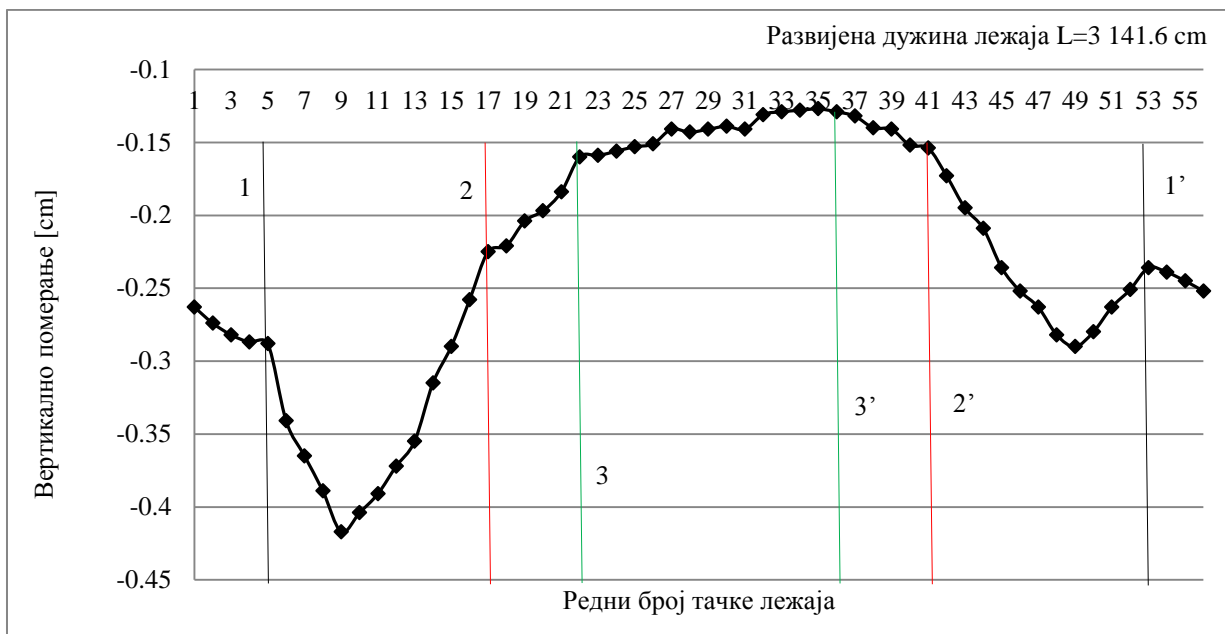
Табела 5.2 Померање чворних тачака горње и доње стазе аксијалног лежаја, стварна конструкција

Редни број тачке (Слика 5.19)	Померање тачке [cm]					
	Доња стаза			Горња стаза		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1.	0,022	0,028	-0,263	0,044	0,045	-0,264
2.	0,025	0,026	-0,274	0,047	0,043	-0,272
3.	0,029	0,024	-0,282	0,049	0,040	-0,282
4.	0,031	0,023	-0,287	0,051	0,038	-0,289
5.	0,032	0,023	-0,288	0,053	0,034	-0,317
6.	0,024	0,029	-0,341	0,050	0,032	-0,343
7.	0,021	0,029	-0,365	0,049	0,032	-0,366
8.	0,018	0,029	-0,389	0,050	0,032	-0,401

9.	0,015	0,027	-0,417	0,052	0,032	-0,423
10.	0,014	0,026	-0,404	0,051	0,038	-0,423
11.	0,012	0,021	-0,391	0,050	0,043	-0,393
12.	0,012	0,019	-0,372	0,051	0,044	-0,388
13.	0,012	0,012	-0,355	0,052	0,045	-0,356
14.	0,013	0,002	-0,315	0,052	0,046	-0,311
15.	0,014	0	-0,290	0,052	0,045	-0,315
16.	0,008	-0,015	-0,258	0,054	0,045	-0,262
17.	0,008	-0,021	-0,225	0,054	0,045	-0,254
18.	0,006	-0,021	-0,221	0,055	0,046	-0,225
19.	0,007	-0,019	-0,204	0,056	0,046	-0,219
20.	0,006	-0,016	-0,197	0,057	0,046	-0,202
21.	0,005	-0,015	-0,184	0,058	0,045	-0,188
22.	0,007	-0,015	-0,160	0,057	0,043	-0,168
23.	0,010	-0,011	-0,159	0,055	0,040	-0,160
24.	0,014	-0,005	-0,156	0,053	0,037	-0,156
25.	0,019	0,001	-0,153	0,051	0,034	-0,154
26.	0,022	0,005	-0,151	0,048	0,031	-0,151
27.	0,025	0,010	-0,141	0,046	0,029	-0,153
28.	0,026	0,010	-0,143	0,044	0,028	-0,144
29.	0,027	0,012	-0,141	0,041	0,027	-0,141
30.	0,027	0,013	-0,139	0,040	0,027	-0,139
31.	0,027	0,014	-0,141	0,038	0,026	-0,129
32.	0,024	0,016	-0,131	0,037	0,027	-0,131
33.	0,022	0,017	-0,129	0,037	0,027	-0,129
34.	0,019	0,020	-0,128	0,036	0,026	-0,128
35.	0,016	0,024	-0,127	0,036	0,025	-0,127
36.	0,015	0,027	-0,129	0,035	0,024	-0,123
37.	0,012	0,027	-0,132	0,035	0,024	-0,138
38.	0,011	0,029	-0,140	0,034	0,026	-0,145
39.	0,010	0,033	-0,141	0,033	0,027	-0,155
40.	0,009	0,036	-0,152	0,032	0,029	-0,154
41.	0,007	0,040	-0,154	0,031	0,030	-0,171
42.	0,007	0,038	-0,173	0,030	0,032	-0,176
43.	0,009	0,033	-0,195	0,028	0,033	-0,206
44.	0,009	0,033	-0,209	0,028	0,033	-0,208
45.	0,008	0,030	-0,236	0,026	0,034	-0,237

46.	0,009	0,028	-0,252	0,024	0,035	-0,256
47.	0,009	0,028	-0,263	0,023	0,036	-0,264
48.	0,012	0,027	-0,282	0,023	0,040	-0,283
49.	0,013	0,027	-0,290	0,023	0,045	-0,292
50.	0,017	0,027	-0,280	0,021	0,044	-0,278
51.	0,019	0,028	-0,263	0,019	0,044	-0,264
52.	0,022	0,029	-0,251	0,020	0,044	-0,251
53.	0,027	0,034	-0,236	0,025	0,044	-0,236
54.	0,026	0,033	-0,239	0,033	0,046	-0,240
55.	0,023	0,031	-0,245	0,037	0,046	-0,246
56.	0,021	0,029	-0,252	0,041	0,046	-0,255

Из претходне табеле може се уочити да су се одговарајуће тачке (парови) доње и горње стазе готово једнако помериле у вертикалном правцу. Извесна одступања појединих тачака се догађају због тога што тачке горње и доње стазе немају исте координате (нису сви штапови вертикални). Ова одступања нису велика и тачно прате промену померања по зони лежаја, што је и био циљ да се идентификује. Дакле, та одступања нису велика и никако нису индикација “отварања” лежаја у појединим зонама, горња и доња стаза се паралелно транслирају у вертикалном правцу. Што се попречних померања тиче (смицање горње у односу на доњу стазу), она су последица постојања бочних сила. Оно што је извесно је то, да се све тачке једне стазе нису једнако помериле у вертикалном правцу, него су та одступања знатна и представљају јасну индикацију депланације (кривљења) лежаја. Када би се повукла раван лежаја кроз тачку са највећим померањем и две тачке са најмањим померањем, остале тачке би, мање или више, одступале од те равни. На Слици 5.31 графички је приказано вертикално померање тачака доње стазе лежаја. Позиција вертикалних плоча доње градње приказана је на дијаграму (нумерација плоча узета са Слике 5.6а).



Слика 5.31 Вертикално померање тачака доње стазе лежаја, стварна конструкција

5.3 Динамички прорачун стварне конструкције

Динамички прорачун стварне конструкције представља прорачун сопствених фреквенци осциловања доње, горње градње и доњег дела стубова. Ослонци прорачунског модела су исти као у статичком прорачуну јер они представљају стварне ослонце конструкције. У Табели 5.3 приказане су вредности сопствених фреквенци за прва три мода осциловања.

Табела 5.3 Прва три мода осциловања, стварна конструкција

Мод осциловања	Вредност сопствене фреквенце осциловања [Hz]
1	20,49
2	21,43
3	21,90

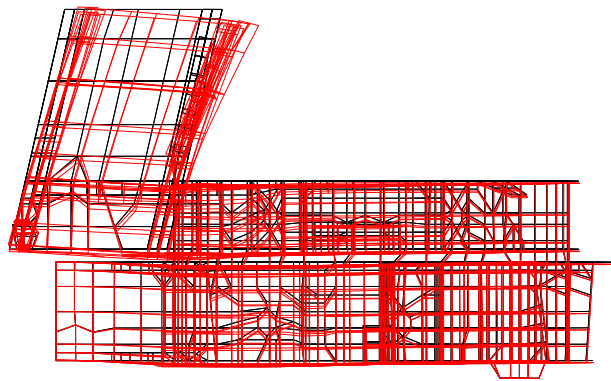
6 НУМЕРИЧКИ ПРОРАЧУН УМАЊЕНЕ СТРУКТУРЕ

Оно што ће убудуће бити звано умањеном структуром је конструкција доње градње, обртне платформе и доњег дела стубова до изнад првог косника који укрућује стубове, умањена 10 пута (и демензије и дебљине) у односу на своју стварну величину.

Као што је за модел у претходном поглављу рађена нумеричка анализа, коришћењем методе коначних елемената (статички и динамички прорачун), тако ће у овом поглављу бити нумерички анализирана умањена структура. Резултати добијени на умањеном моделу ће бити упоређивани са резултатима из претходног поглавља (где је разматрана стварна структура). Знања из Теорије сличности ће овде бити примењена са циљем добијања упоредивих резултата на конструкцији и њеном (умањеном) моделу.

6.1 Статички прорачун умањене структуре

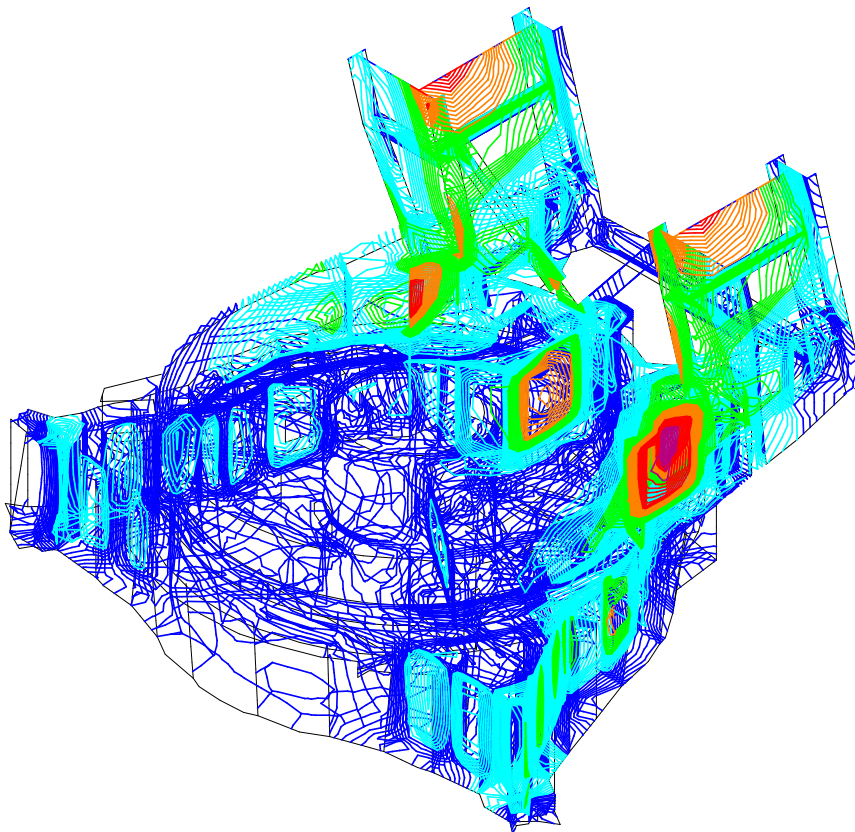
Позивајући се на претходно поменуто Теорију сличности успостављају се релације између структуре и њеног умањеног модела. Наиме, све димензије и дебљине су смањене 10 пута (без корекција због расположивости само одређених дебљина лимова) и тако је добијен умањени модел структуре. Поставља се питање како би требало оптеретити тај модел да би се добили упоредиви резултати (померња и напони) са резултатима добијеним нумеричким прорачуном стварне структуре. Теорија сличности даје решење по коме, уколико су димензије модела смањене 10 пута, силе треба смањити 100 пута, да би се добиле исте (упоредиве) вредности померања и напона, као нумеричким прорачуном стварне структуре. Прорачунски модел је исти као на Слици 5.21, осим што су све димензије и дебљине смањене 10 пута, а силе 100 пута. Резултати нумеричке анализе дати су на Сликама 6.1 и 6.2 (упоредити их са Сликама 5.22 и 5.23). На Слици 6.1 приказано је померање чворних тачака модела умањене структуре. Упоређујући Сliku 6.1 и Сliku 5.22 уочава се да је облик деформације оба модела готово исти, а вредност максималног померања на умањеној структури је реда величине 10 пута мања него на стварној структури, као што је и очекивано.



Максимална деформација износи 0,2172 cm

Слика 6.1 Деформација модела умањене структуре

На Слици 6.2 приказано је напонско поље умањеног модела стварне структуре.



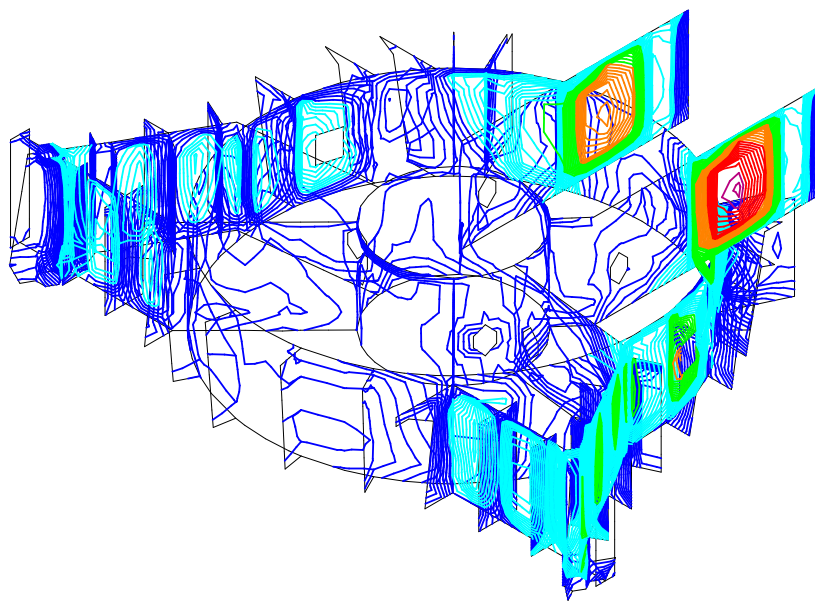
1.06E+01	...	1.27E+01	
8.47E+00	...	1.06E+01	
6.35E+00	...	8.47E+00	
4.23E+00	...	6.35E+00	
2.12E+00	...	4.23E+00	
0.00E+00	...	2.12E+00	

[kN/cm²]

Слика 6.2 Напонско поље модела умањене структуре

Поредећи одговарајућа места на моделу стварне структуре и на умањеном моделу, на први поглед се уочава апсолутно поклапање поља напона (Слика 5.23 и Слика 6.2) и деформација ова два модела. Међутим, вредности ипак нису апсолутно исте.

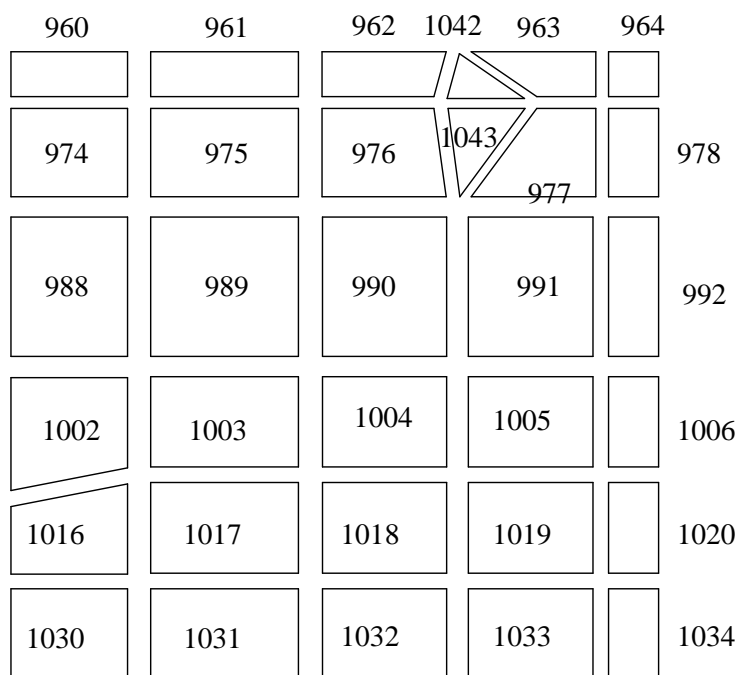
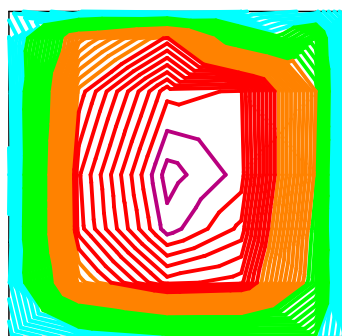
На местима највеће концентрације напона (спој вертикалне плоче и цилиндра испод стубова и на горњој и на доњој градњи) даје се упоредни приказ резултата оба прорачунска модела графички и табеларно (Слике 6.3 и 6.4 и Табеле 6.1 и 6.2).



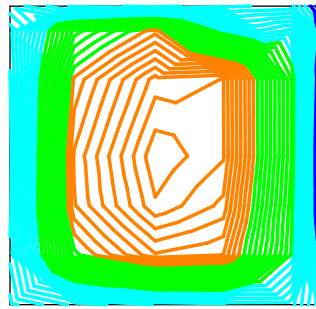
1.06E+01	...	1.27E+01	
8.47E+00	...	1.06E+01	
6.35E+00	...	8.47E+00	
4.23E+00	...	6.35E+00	
2.12E+00	...	4.23E+00	
0.00E+00	...	2.12E+00	

[kN/cm²]

Слика 6.3а Напонско поље радијалних плоча доње градње, умањена структура



Слика 6.36 Напонско поље радијалних плоча доње градње, умањена структура, плоча десно



2494	2495	2496	2576	2497	
					2498
2508	2509	2510	2577	2511	2512
2522	2523	2524		2525	2526
2536	2537	2538		2539	2540
2550	2551	2552		2553	2554
2564	2565	2566		2567	2568

Слика 6.3в Напонско поље радијалних плоча доње градње, умањена структура, плоча лево

Графички прикази обе структуре су готово исти, само се вредности напона разликују. У табелама ће, осим вредности еквивалентних напона, бити приказана и структура напона сваког од елемената. Удео мембранских и савојних напона, практично представља, структуру напона одређеног елемента. Пошто су савојни напони у свим овим елементима, за ред величине мањи од мембранских (прочитано из резултата прорачуна), неће бити приказани у табели. Исто тако, сви напони мањи од 1 [kN/cm²] неће бити приказани.

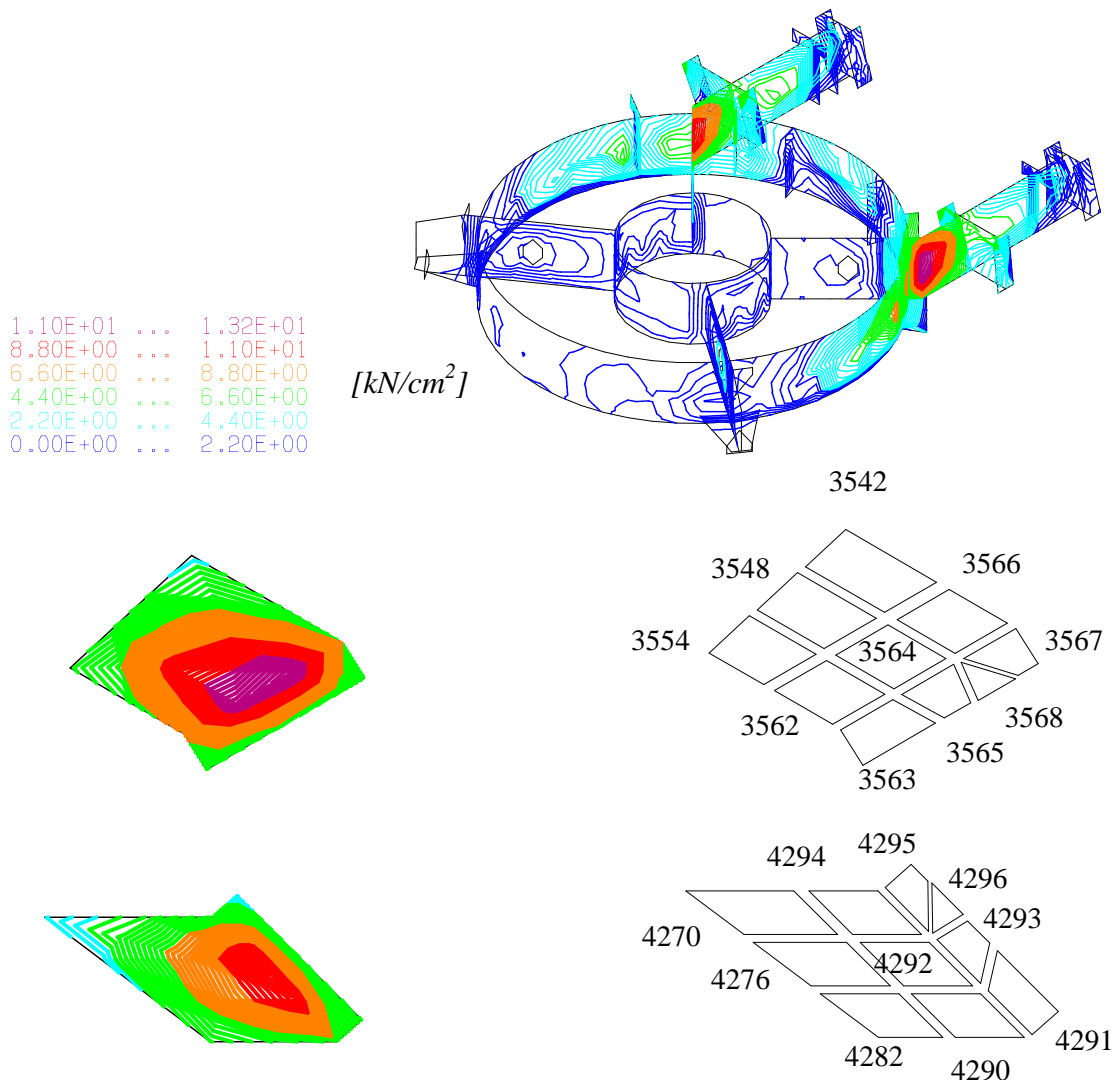
Табела 6.1 Структура напона у елементима радијалних плоча доње градње, модел стварне структуре и умањене структуре

Број елемента (са Сlike 6.3)	Стварна структура				Умањена структура				Разлика између еквивалентних напона, рачунато у односу на вредност напона за модел умањене структуре [%]
	Мембрански напон [kN/cm ²]			Еквивалентни напон [kN/cm ²]	Мембрански напон [kN/cm ²]			Еквивалентни напон [kN/cm ²]	
	σ_x	σ_y	τ_{xy}		σ_x	σ_y	τ_{xy}		
960	3,89	-	2,45	5,757	3,38	-	2,04	4,892	17,68
961	2,44	-	4,92	8,902	2,17	-	4,11	7,475	19,09
962	-	-	5,12	8,927	-	-	4,29	7,479	19,36
1042	5,15	5,42	2,19	9,985	4,32	4,52	1,86	8,372	19,27
963	2,66	3,21	7,16	12,8	2,18	2,63	5,98	10,69	19,74
964	2,66	3,10	2,59	5,435	2,25	2,55	2,30	4,763	14,11
974	2,74	-	3,75	7,063	2,39	-	3,15	5,966	18,39
975	1,94	-	6,21	10,97	1,75	-	5,22	9,226	18,90
976	-	-	6,57	11,41	-	-	5,51	9,57	19,23
1043	6,57	8,49	-	13,17	5,52	7,08	-	11,02	19,51
977	7,28	3,73	4,75	12,76	6,06	3,17	3,99	10,7	19,25
978	-	2,56	1,21	3,121	-	2,11	1,15	2,765	12,88
988	1,02	-	4,55	7,968	-	-	3,83	6,715	18,66
989	-	-	7,42	12,9	-	-	6,25	10,86	18,78
990	-	-	7,39	12,84	-	-	6,23	10,81	18,78
991	-	1,48	7,02	12,27	-	1,22	5,92	10,35	18,55
992	-	1,7	-	1,912	-	1,41	-	1,678	13,94
1002	1,18	-	4,55	8,095	-	-	3,83	6,816	18,76
1003	-	-	7,64	13,24	-	-	6,44	11,16	18,64
1004	-	-	7,38	12,8	-	-	6,23	10,81	18,41
1005	-	-	6,78	11,81	-	-	5,74	9,999	18,11
1006	1,10	-	-	1,767	1,01	-	-	1,516	16,56
1016	2,24	-	4,18	7,718	1,82	-	3,52	6,507	18,61
1017	-	-	7,16	12,45	-	-	6,05	10,5	18,57
1018	-	-	6,93	12,03	-	-	5,87	10,18	18,17
1019	-	-	6,44	11,28	-	-	5,47	9,575	17,81
1020	1,79	-	-	2,098	1,60	-	-	1,831	14,58
1030	2,73	-	3,53	6,71	2,22	-	2,98	5,618	19,44

1031	1,57	-	6,00	10,52	1,23	-	5,08	8,895	18,27
1032	-	-	5,99	10,45	-	-	5,09	8,868	17,84
1033	1,89	-	5,94	10,54	1,67	-	5,05	8,967	17,54
1034	3,63	-	-	3,596	3,19	-	-	3,157	13,90
2494	3,28	-	1,89	4,627	2,77	-	1,48	3,767	22,83
2495	1,99	-	3,90	7,075	1,72	-	3,09	5,647	25,29
2496	-	-	4,09	7,12	-	-	3,27	5,673	25,51
2576	4,3	4,37	1,76	8,159	3,47	3,47	1,42	6,547	24,62
2497	2,29	3,17	5,97	10,72	1,80	2,59	4,79	8,608	24,54
2498	1,84	2,96	2,16	4,611	1,44	2,41	1,87	3,933	17,24
2508	2,31	-	3,01	5,718	1,96	-	2,41	4,623	23,68
2509	1,62	-	4,99	8,824	1,42	-	3,98	7,084	24,56
2510	-	-	5,31	9,204	-	-	4,24	7,362	25,02
2577	5,39	7,00	-	10,82	4,34	5,59	-	8,677	24,70
2511	6,18	3,05	3,70	10,40	4,96	2,49	2,95	8,341	24,68
2512	-	2,29	-	2,644	-	1,84	-	2,278	16,07
2522	-	-	3,69	6,484	-	-	2,97	5,23	23,98
2523	-	-	5,99	10,44	-	-	4,82	8,402	24,26
2524	-	-	5,98	10,38	-	-	4,81	8,358	24,19
2525	-	1,25	5,61	9,827	-	-	4,52	7,909	24,25
2526	-	1,42	-	1,633	-	1,12	-	1,368	19,37
2536	-	-	3,68	6,562	-	-	2,97	5,283	24,21
2537	-	-	6,18	10,7	-	-	4,98	8,623	24,09
2538	-	-	5,94	10,31	-	-	4,79	8,322	23,89
2539	-	-	5,41	9,438	-	-	4,37	7,628	23,73
2540	-	-	-	1,468	-	-	-	1,197	22,64
2550	1,87	-	3,37	6,281	1,45	-	2,72	5,04	24,62
2551	-	-	5,78	10,04	-	-	4,66	8,097	24,00
2552	-	-	5,56	9,646	-	-	4,49	7,805	23,60
2553	-	-	5,15	9,013	-	-	4,17	7,311	23,28
2554	1,43	-	-	1,674	1,23	-	-	1,394	20,09
2564	2,33	-	2,83	5,394	1,82	-	2,28	4,333	24,49
2565	1,37	-	4,80	8,456	1,03	-	3,88	6,827	23,86
2566	-	-	4,79	8,339	-	-	3,88	6,76	23,36
2567	1,50	-	4,76	8,449	1,28	-	3,86	6,875	22,89
2568	2,82	-	-	2,782	2,38	-	-	2,334	19,19

Процентуалне разлике у напонима, у вертикалним плочама доње градње, умањене структуре и стварне структуре се крећу од 12,88% до 25,51%, рачунато у односу на напон умањене структуре. Може се закључити да је зависност напона умањене и стварне структуре линеарна и формулисати коефицијент зависности 1,22. То значи, да напон добијен на умањеној структури у вертикалним ребрима доње градње, треба помножити коефицијентом 1,22 да би се добио напон у вертикалним ребрима доње градње стварне структуре.

На Слици 6.4 приказане су вертикалне плоче обртне платформе умањене структуре.



Слика 6.4 Напонско поље радијалних плоча горње градње, умањена структура

У Табели 6.2 приказана је структура напона у елементима радијалних плоча горње градње. Овде су, такође, напони доминантно мембрански.

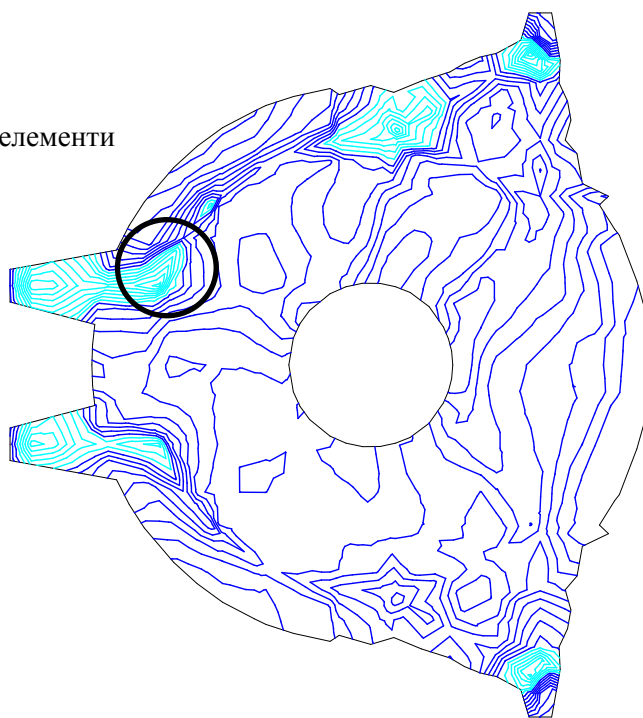
Табела 6.2 Структура напона у елементима радијалних плоча горње градње, модел редуковане структуре и умањене редуковане структуре

Број елемента (са Сlike 6.4)	Стварна структура			Еквивалентни напон [kN/cm ²]	Умањена структура			Еквивалентни напон [kN/cm ²]	Разлика између еквивалентних напона, рачунато у односу на вредност напона за модел умањене структуре [%]
	Мембрански напон [kN/cm ²]				Мембрански напон [kN/cm ²]				
	σ_x	σ_y	τ_{xy}		σ_x	σ_y	τ_{xy}		
3554	2,85	3,91	4,14	8,554	2,89	3,88	3,99	8,283	3,27
3562	1,95	-	6,43	11,67	2,03	-	6,12	11,16	4,57
3563	3,77	4,05	4,89	11,09	3,66	3,89	4,66	10,62	4,42
3548	-	2,51	3,12	6,531	-	2,48	2,98	6,268	4,20
3564	-	-	8,04	14,37	-	-	7,76	13,87	3,60
3565	3,03	2,56	6,36	12,49	2,90	2,47	6,05	11,98	4,26
3542	2,92	1,10	1,95	5,359	2,97	1,09	1,82	5,17	3,66
3566	1,62	-	6,85	12,23	1,72	-	6,52	11,67	4,80
3567	7,99	3,71	5,26	14,07	7,51	3,58	5,05	13,38	5,16
3568	5,37	2,53	5,91	12,46	5,15	2,48	5,61	11,91	4,62
4282	2,91	3,71	3,37	7,119	2,96	3,68	3,21	6,858	3,80
4290	2,17	-	5,03	9,326	2,25	-	4,72	8,834	5,57
4291	3,38	3,38	3,88	9,228	3,27	3,23	3,64	8,764	5,29
4276	-	2,37	2,43	5,225	-	2,35	2,29	4,974	5,05
4292	-	-	6,66	12,03	-	-	6,37	11,53	4,34
4293	2,52	2,27	4,99	10,22	2,39	2,18	4,69	9,71	5,25
4270	2,92	1,01	1,36	4,533	2,97	-	1,23	4,378	3,54
4294	1,83	-	5,38	9,791	1,93	-	5,04	9,234	6,03
4295	5,71	3,40	4,09	10,88	5,22	3,27	3,88	10,2	6,67
4296	4,34	2,55	4,51	9,891	4,13	2,49	4,22	9,335	5,96

Процентуалне разлике у напонима, у вертикалним плочама горње градње, умањене структуре и стварне структуре се крећу од 3,27% до 6,67%, рачунато у односу на напон умањене структуре. Може се закључити да је зависност напона умањене и стварне структуре линеарна и формулисати коефицијент зависности 1,05. То значи, да напон добијен на умањеној структури у вертикалним ребрима горње градње, треба помножити коефицијентом 1,05 да би се добио напон у вертикалним ребрима горње градње стварне структуре.

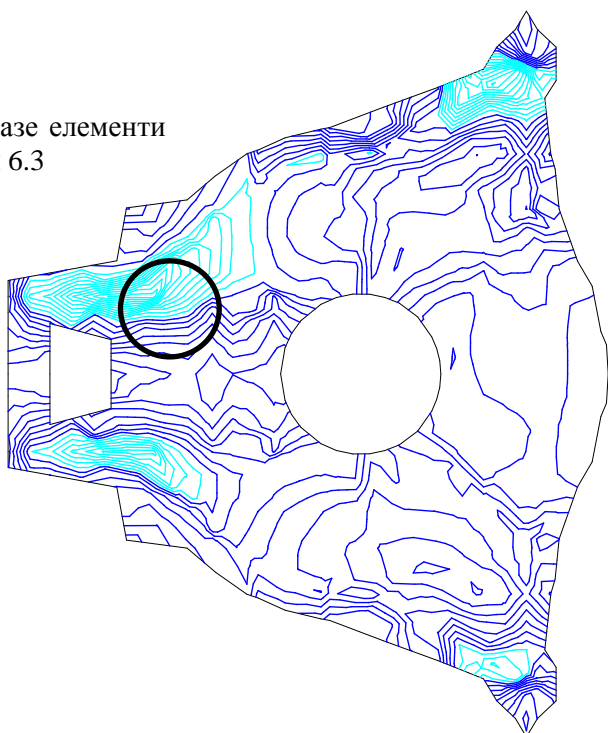
У Табели 6.3 приказана је структура напона у изабраним елементима горње и доње плоче доње градње (у осталим елементима напони су јако ниског интензитета). Позиција изабраних елемената приказана је на Слици 6.5. И ови напони су доминантно мембрански, односно савојни напони су за ред величине мањи у односу на мембранске.

Зона у којој се налазе елементи приказани у Табели 6.3



Слика 6.5а Напонско поље горње плоче доње градње, умањена структура

Зона у којој се налазе елементи приказани у Табели 6.3



Слика 6.5б Напонско поље доње плоче доње градње, умањена структура

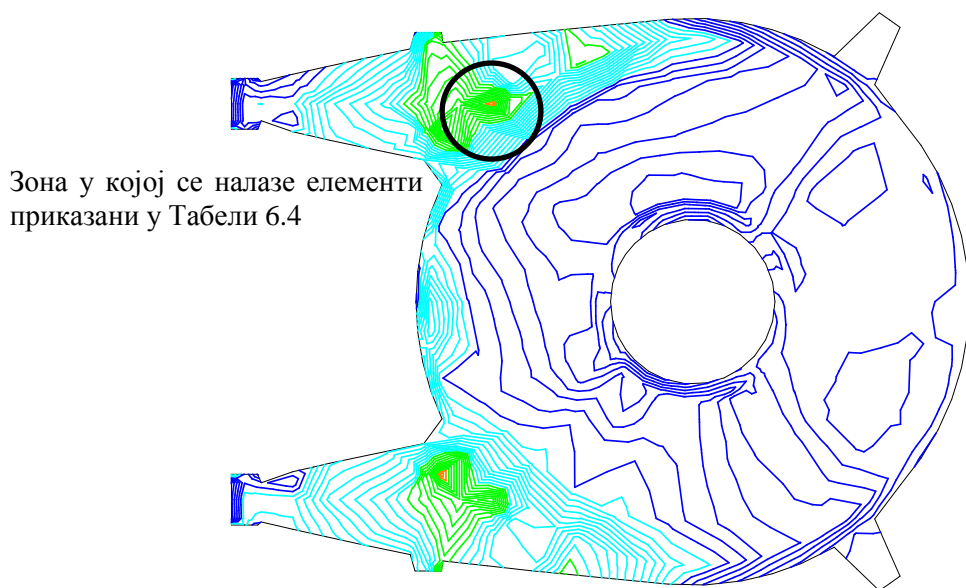
Табела 6.3 Структура напона у елементима горње и доње плоче доње градње, модел стварне структуре и умањене структуре

Број елемента (са Сlike 6.5)	Стварна структура			Еквивалентни напон [kN/cm ²]	Умањена структура			Разлика између еквивалентних напона, рачунато у односу на вредност напона за модел умањене структуре [%]	
	Мембрански напон [kN/cm ²]		Еквивалентни напон [kN/cm ²]		Мембрански напон [kN/cm ²]		Еквивалентни напон [kN/cm ²]		
	σ_x	σ_y		τ_{xy}	σ_x	σ_y		τ_{xy}	
49	-	1,09	-	1,667	-	-	-	1,468	13,56
50	1,60	-	1,06	2,578	1,28	-	-	2,156	19,20
51	-	-	1,20	2,636	-	-	-	2,278	15,72
57	1,34	-	-	1,605	1,10	-	-	1,344	19,42
387	-	1,31	-	1,807	-	1,16	-	1,613	12,03
388	1,31	-	1,89	3,79	1,15	-	1,63	3,271	15,87

389	1,03	1,04	1,21	2,756	-	-	1,04	2,351	17,23
390	1,67	-	-	1,936	1,46	-	-	1,697	14,08
391	-	-	-	1,461	-	-	-	1,292	16,42
392	-	1,52	1,17	2,863	-	1,35	-	2,457	16,52
393	1,28	-	1,40	2,987	1,10	-	1,21	2,558	16,77
394	1,66	-	-	2,071	1,45	-	-	1,811	14,36
395	1,32	-	-	2,374	1,14	-	-	2,049	16,10

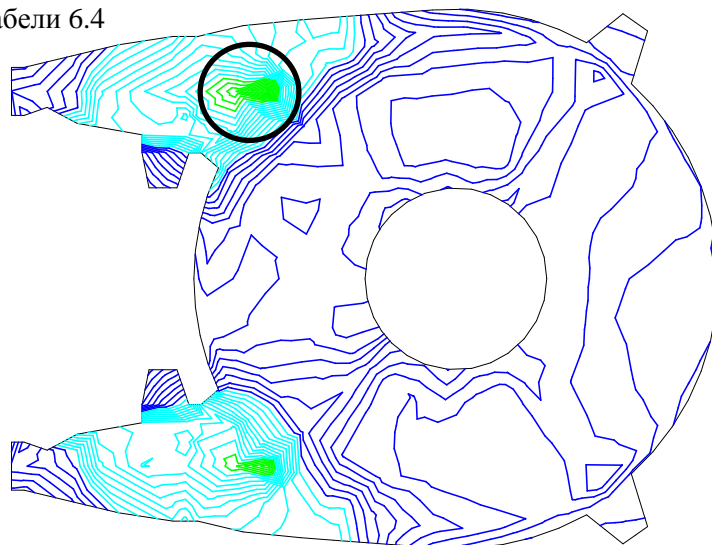
Процентуалне разлике у напонима, у хоризонталним плочама доње градње, умањене структуре и стварне структуре се крећу од 13,56% до 19,42%, рачунато у односу на напон умањене редуковане структуре. Може се закључити да је зависност напона умањене и стварне структуре линеарна и формулисати коефицијент зависности 1,15. То значи, да напон добијен на умањеној структури у хоризонталним плочама, треба помножити коефицијентом 1,15 да би се добио напон у хоризонталним плочама доње градње стварне структуре.

У Табели 6.4 приказана је структура напона у изабраним елементима горње и доње плоче обртне платформе (у осталим елементима напони су јако ниског интензитета). Позиција изабраних елемената приказана је на Слици 6.6. У овим елементима присутни су и савојни напони.



Слика 6.6а Напонско поље горње плоче обртне платформе, умањена структура

Зона у којој се налазе елементи приказани у Табели 6.4



Слика 6.6б Напонско поље доње плоче обртне платформе, умањена структура

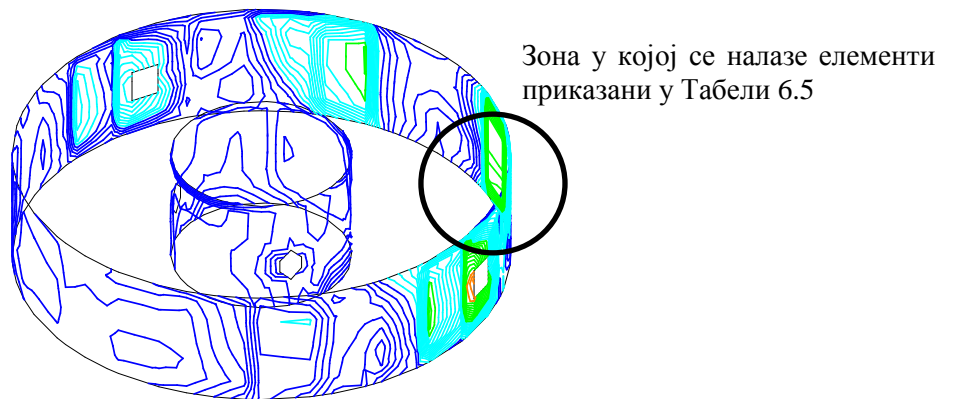
Табела 6.4 Структура напона у елементима горње и доње плоче горње градње, модел редуковане структуре и умањене редуковане структуре

Број елемента (са Сlike 6.6)	Структура	Мембрански напон [kN/cm ²]			Савојни напон [kN/cm ²]			Еквивалентн и напон [kN/cm ²]
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	σ_x	σ_y	τ_{xy}	
3192	Стварна структура	1,40	-	-	-	-	-	2,537
	Умањена структура	1,41	-	1,08	-	-	-	2,591
3194	Стварна структура	1,36	1,54	1,36	-	-	-	3,37
	Умањена структура	1,42	1,61	1,45	-	-	-	3,524
3196	Стварна структура	3,52	-	-	1,63	-	-	5,412
	Умањена структура	3,61	-	-	1,61	-	-	5,475
3197	Стварна структура	2,49	-	-	-	-	-	3,424
	Умањена структура	2,59	-	1,00	-	-	-	3,522
3216	Стварна структура	-	1,78	1,22	-	1,69	-	3,974
	Умањена структура	-	1,91	1,20	-	1,54	-	4,068
3217	Стварна структура	-	3,18	1,76	-	4,43	-	8,866
	Умањена структура	-	3,33	1,73	1,09	3,97	-	8,604
3218	Стварна структура	3,26	1,03	-	3,88	1,81	-	7,114
	Умањена структура	3,34	1,00	-	3,73	1,69	-	7,06
3219	Стварна структура	3,09	-	-	-	-	-	4,326

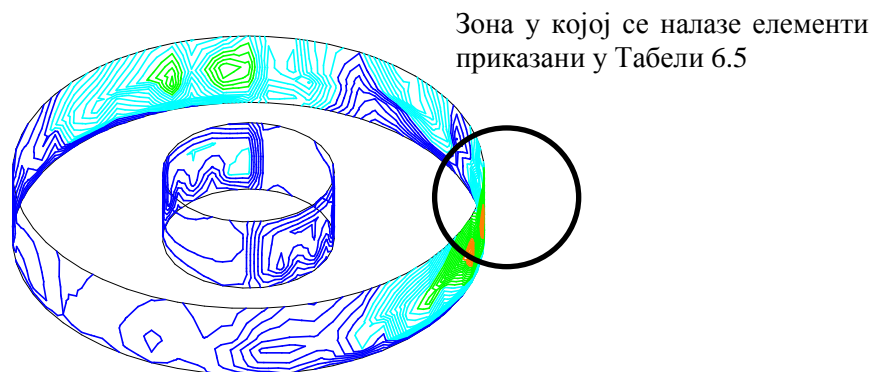
	Умањена структура	3,17	-	-	-	-	-	4,347
3332	Стварна структура	-	-	-	-	-	-	1,889
	Умањена структура	-	-	-	-	-	-	2,136
3334	Стварна структура	-	1,73	1,01	-	-	-	2,550
	Умањена структура	-	1,81	1,13	-	-	-	2,714
3337	Стварна структура	3,90	-	1,20	-	-	-	5,007
	Умањена структура	3,99	-	1,21	-	-	-	5,071
3338	Стварна структура	1,62	-	1,33	-	-	-	3,375
	Умањена структура	1,69	-	1,39	-	-	-	3,490
3348	Стварна структура	-	1,57	1,14	-	-	-	3,886
	Умањена структура	-	1,76	1,14	-	-	-	3,901
3349	Стварна структура	2,29	-	-	-	-	-	3,338
	Умањена структура	2,42	-	-	-	-	-	3,441
3352	Стварна структура	-	2,63	1,45	2,47	-	-	4,882
	Умањена структура	-	2,63	1,53	2,18	-	-	4,624
3353	Стварна структура	-	1,27	2,24	-	1,45	-	4,505
	Умањена структура	1,00	1,41	2,23	-	1,34	-	4,493

Разлике у напонима, у хоризонталним плочама обртне платформе, умањене структуре и стварне структуре, скоро и да не постоје. Стога, коефицијент зависности је 1 (и овај коефицијент је на страни сигурности).

У Табели 6.5 приказана је структура напона дела спољашњих цилиндара доње и горње градње, у зонама између вертикалних плоча. Изабрани елементи су приказани на Слици 6.7, а то су уједно и једини елементи ових конструктивних елеменета који поседују одређени ниво напона. Напони су доминантно мембрански (савојни напони су за ред величине мањи од мембранских). Ниво напона унутрашњих цилиндара је јако низак, па нису ни узети у разматрање.



Слика 6.7а Напонско поље цилиндара доње градње, умањена структура



Слика 6.7б Напонско поље цилиндара обртне платформе, умањена структура

Табела 6.5 Структура напона у елементима спољашњих цилиндара доње градње и обртне платформе, модел стварне структуре и умањене структуре

Број елемента (са Сlike 6.7)	Стварна структура			Еквивалентни напон [kN/cm ²]	Умањена структура			Разлика између еквивалентних напона, рачунато у односу на вредност напона за модел умањене структуре [%]	
	Мембрански напон [kN/cm ²]				Мембрански напон [kN/cm ²]				
	σ_x	σ_y	τ_{xy}		σ_x	σ_y	τ_{xy}		
722	-	3,39	3,71	7,171	-	2,84	3,32	6,335	13,20
751	-	2,69	3,91	7,491	-	2,27	3,51	6,660	12,48
780	-	1,95	4,05	7,555	-	1,67	3,62	6,729	12,28
809	-	1,31	4,01	7,334	-	1,13	3,57	6,524	12,42

837	-	-	3,95	6,970	-	-	3,52	6,196	12,49
866	-	-	3,59	6,489	-	-	3,19	5,790	17,25
3392	-	-	4,60	8,080	-	-	4,64	8,138	
3393	-	2,62	2,74	5,696	-	2,43	2,35	5,733	
3420	-	-	3,99	7,704	-	-	4,05	7,755	
3421	-	1,77	3,68	7,131	-	1,63	3,75	7,186	
3448	-	-	3,72	6,924	-	-	3,85	7,013	
3449	-	1,26	4,11	7,602	-	1,16	4,16	7,659	
3476	1,08	-	4,04	7,697	1,07	-	4,09	7,763	
3477	1,11	-	4,10	7,636	1,06	-	4,17	7,720	

У Табели 6.5 напони у елементима цилиндара између плоча и доње градње и обртне платформе су доминантно мембрански. Доминантни су смицајни мембрански напони код готово свих елемената, а код елемената који се налазе на месту везивања вертикалних плоча за цилиндрице јављају се и нормални мембрански напони.

Процентуалне разлике у напонима, у спољашњем цилиндру доње градње, умањене структуре и стварне структуре се крећу од 12,28% до 17,25%, рачунато у односу на напон умањене структуре. Може се закључити да је зависност напона умањене и стварне структуре линеарна и формулисати коефицијент зависности 1,15. То значи, да напон добијен на умањеној структури у спољашњем цилиндру доње градње, треба помножити коефицијентом 1,15 да би се добио напон у спољашњем цилиндру доње градње стварне структуре.

Разлике у напонима, у спољашњем цилиндру обртне платформе, умањене структуре и стварне структуре, скоро и да не постоје. Стога, коефицијент зависности је 1 (и овај коефицијент је на страни сигурности).

Из целокупне претходне анализе по групама градње (Табела 6.1-Табела 6.5), може се закључити да се напонско стање умањене структуре на напонско стање стварне структуре пресликава, по групама градње, на следећи начин:

- хоризонталне плоче и цилиндри доње градње са коефицијентом 1,15;
- вертикалне плоче (ребра) доње градње са кефицијентом 1,22;

– горизонталне плоче и цилиндри обртне платформе са коефицијентом 1 (на страни сигурности);

– вертикалне плоче (ребра) обртне платформе са коефицијентом 1,05.

Из свега претходно наведеног, општи коефицијент пресликавања напона са умањене структуре на стварну структуру је 1,22. У процесу пројектовања неке нове плочасте структуре овог типа (који би укључивао и претходно моделско испитивање), напони добијени нумеричким прорачуном модела (и експерименталним испитивањем) би применом овог коефицијента зависности били пренети на реалну структуру, и тако створили здраву основу за добијање квалитетне и функционалне реалне структуре. На тај начин добијена структура је на страни сигурности и може се тврдити да су зоне идентификованих концентрација напона преликане на исправан начин. Та конструкција свакако треба да прође процес оптимизације “неугрожених” зона (по већ дефинисаним групама градње).

У Табели 6.6 приказано је вертикално померање чворних тачака горње и доње стазе аксијалног лежаја на местима везивања штапова (кугли) за модел стварне конструкције (подаци узети из Табеле 5.2) и умањени модел. Очекивано је да померања умањене структуре буду 10 пута мања у односу на померања стварне структуре. Та померања су 10 и нешто пута мања, а разлика се у последњој колони Табеле 6.6 даје у односу на 10 пута мања померања која су очекивана.

Табела 6.6 Померање чворних тачака горње и доње стазе аксијалног лежаја стварне структуре и умањене структуре

Редни број тачке (са Сlike 5.19)	Вертикално померање тачке [cm]				Разлика између померања тачака доње стазе, рачунато у односу на вредност померања за модел умањене структуре у односу на 10 пута мање померање стварне структуре [%]
	Стварна структура		Умањена структура		
	Доња стаза	Горња стаза	Доња стаза	Горња стаза	
1.	-0,263	-0,264	-0,022	-0,022	19,54
2.	-0,274	-0,272	-0,023	-0,023	19,13
3.	-0,282	-0,282	-0,024	-0,024	17,5

4.	-0,287	-0,289	-0,024	-0,024	19,58
5.	-0,288	-0,317	-0,024	-0,027	20,00
6.	-0,341	-0,343	-0,029	-0,029	17,59
7.	-0,365	-0,366	-0,031	-0,031	17,74
8.	-0,389	-0,401	-0,034	-0,035	14,41
9.	-0,417	-0,423	-0,036	-0,037	15,83
10.	-0,404	-0,423	-0,035	-0,037	15,43
11.	-0,391	-0,393	-0,034	-0,034	15,00
12.	-0,372	-0,388	-0,032	-0,034	16,25
13.	-0,355	-0,356	-0,031	-0,031	14,52
14.	-0,315	-0,311	-0,027	-0,027	16,67
15.	-0,290	-0,315	-0,025	-0,027	16,00
16.	-0,258	-0,262	-0,022	-0,023	17,27
17.	-0,225	-0,254	-0,019	-0,022	18,42
18.	-0,221	-0,225	-0,019	-0,019	16,32
19.	-0,204	-0,219	-0,017	-0,019	20,00
20.	-0,197	-0,202	-0,017	-0,017	15,88
21.	-0,184	-0,188	-0,016	-0,016	15,00
22.	-0,160	-0,168	-0,014	-0,014	14,29
23.	-0,159	-0,160	-0,013	-0,013	22,31
24.	-0,156	-0,156	-0,013	-0,013	20,00
25.	-0,153	-0,154	-0,013	-0,013	17,69
26.	-0,151	-0,151	-0,013	-0,013	16,15
27.	-0,141	-0,153	-0,012	-0,013	17,50
28.	-0,143	-0,144	-0,012	-0,012	19,17
29.	-0,141	-0,141	-0,012	-0,012	17,50
30.	-0,139	-0,139	-0,011	-0,011	26,36
31.	-0,141	-0,129	-0,012	-0,010	17,50
32.	-0,131	-0,131	-0,011	-0,010	19,09
33.	-0,129	-0,129	-0,010	-0,010	29,00
34.	-0,128	-0,128	-0,010	-0,010	28,00
35.	-0,127	-0,127	-0,010	-0,010	27,00
36.	-0,129	-0,123	-0,010	-0,010	29,00
37.	-0,132	-0,138	-0,010	-0,011	31,00
38.	-0,140	-0,145	-0,011	-0,012	27,27
39.	-0,141	-0,155	-0,011	-0,012	28,18
40.	-0,152	-0,154	-0,012	-0,012	26,67

41.	-0,154	-0,171	-0,012	-0,014	28,33
42.	-0,173	-0,176	-0,014	-0,014	23,57
43.	-0,195	-0,206	-0,016	-0,017	21,88
44.	-0,209	-0,208	-0,017	-0,017	22,94
45.	-0,236	-0,237	-0,019	-0,019	24,21
46.	-0,252	-0,256	-0,020	-0,021	26,00
47.	-0,263	-0,264	-0,021	-0,021	25,24
48.	-0,282	-0,283	-0,023	-0,023	22,61
49.	-0,290	-0,292	-0,024	-0,024	20,83
50.	-0,280	-0,278	-0,023	-0,022	21,74
51.	-0,263	-0,264	-0,021	-0,021	25,24
52.	-0,251	-0,251	-0,020	-0,020	25,50
53.	-0,236	-0,236	-0,019	-0,019	24,21
54.	-0,239	-0,240	-0,019	-0,019	25,79
55.	-0,245	-0,246	-0,020	-0,020	22,50
56.	-0,252	-0,255	-0,021	-0,021	20,00

У претходној табели процентуалне разлике померања умањене структуре у односу на померања стварне структуре, варирају мало и због заокруживања померања умањене структуре на три децимале.

Померања су 20-25% мања у односу на померања која дефинише Теорија сличности (фактор скалирања плус 20-25%) рачунато у односу на померања умањене структуре. То би значило да би могло да се говори о померањима и деформацијама стварне структуре, само на основу прорачуна умањене структуре, за било која оптерећења.

6.2 Динамички прорачун умањене структуре

Модел за динамички прорачун исти је као у Поглављу 5, осим што су димензије и дебљине модела смањене 10 пута. Теорија сличности каже да би у случају 10 пута умањеног модела требало очекивати сопствене фреквенце 10 пута веће, него у случају прорачуна стварне структуре. Такви резултати су и добијени динамичким прорачуном умањене редуковане структуре и приказани су у Табели 6.7.

Табела 6.7 Прва три мода осциловања, умањена структура

Мод осциловања	Вредност сопствене фреквенце осциловања [Hz]
1	204,93
2	214,31
3	218,98

У случају динамичког прорачуна ове структуре, поставке Теорије сличности су потвђене, за модел умањен 10 пута у односу на стварну конструкцију, добијене су фреквенце 10 пута веће.

7 ИЗРАДА ЛАБОРАТОРИЈСКОГ УМАЊЕНОГ МОДЕЛА

Оно што је названо умањеном структуром, за коју је нумерички прорачун урађен у претходном поглављу, послужило је као основа за прављење лабораторијског модела. Прво, показано је нумеричким прорачуном да се овакве структуре могу испитивати моделски, односно да, уколико се димензије и дебљине конструкције смање 10 пута, а оптерећења 100 пута, напони у обе конструкције ће бити упоредиви. Друго, сопствене фреквенце осциловања умањене структуре биће 10 пута веће у односу на сопствене фреквенце осциловања стварне конструкције (спроведен динамички прорачун обе структуре). На основу ових закључака прављење умањене конструкције се показало као смислено и оправдано. Наиме, као што је већ речено да се нумерички и експериментални резултати међусобно допуњују (“поправљају”), идеја је “поправити” нумеричку анализу модела умањене конструкције и стварне конструкције, на основу експеримената на моделу.

Када је утврђено да је моделско (и принципски говорећи, лабораторијско) испитивање оваквог модела могуће, а да су добијени резултати применљиви на стварној конструкцији, израђена је комплетна радионичка документација и технологија за израду умањеног модела. Модел је израђен у погону Колубара-Метал, Огранак РБ Колубара. Припрема за израду модела, осим разраде оригиналне техничке документације произвођача, обухватила је и одлуке шта ће бити израђено (оно што утиче на крутост, а обухваћено је нумеричким моделом). Материјал од кога је конструкција израђена је челик S355J2+N. Пошто су у питању танки лимови (све дебљине треба да буду смањене 10 пута у односу на оне на стварној конструкцији) због ограничене расположивости истих, направљени су компромиси што се тиче дебљина. Са једне стране, због расположивости само одређених дебљина лимова, са друге, због превише мале укупне површине лимова појединих дебљина, одлучено је да се користе лимови дебљина 1, 1.5, 2, 3, 4, 5 и 6 mm. Усвојено је да се уместо лима од 1.2 mm користи лим од 1 mm, уместо 1.8 и 2.5 користи се лим од 2 mm, уместо 3.5 користи се 3, уместо 4.5 користи се 4, уместо 7 користи се лим дебљине 6 mm. Једноставно,

коришћени су лимови чије дебљине одступају за до максимално 20% од дебљина које су добијене десетоструким умањењем димензија.

Технологија израде умањеног модела је наменски прилагођена оваквој структури. Заварени спојеви су израђени у заштитној атмосфери аргона, применом жице дебљине 0,8 mm, како би се обезбедио што мањи унос топлоте у структуру. И поред тога, неминовно је долазило до витоперења танких лимова који чине структуру модела. Неопходно је било исправљање и поравнавање лимова након заваривања, уз перманентну контролу глобалне геометрије модела. Завршном контролом, након бојења, установљена је усаглашеност модела са изврном радионичком документацијом, чиме је потврђена исправност модела.

Доња градња и обртна платформа са доњим делом стубова у различитим фазама израде приказане су на следећим сликама (Слика 7.1 и Слика 7.2). Израђени модел има масу од приближно 230 kg и оквирне габарите 1550x1650x950 mm.



Слика 7.1 Доња градња у завршној фази израде, радионица Колубара-Метала



Слика 7.2 Обртна платформа у току израде, радионица Колубара-Метала

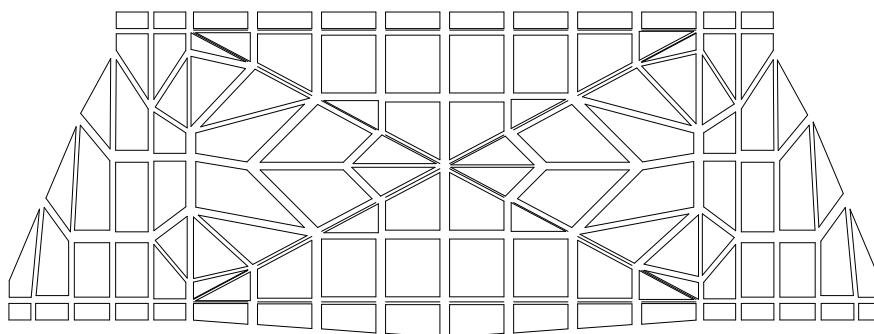
Осим у дебљинама, лабораторијски модел се од умањене структуре разликује у једном делу структуре. Наиме, у претходном поглављу може се уочити проблем “одсечених” стубова и уноса оптерећења на том месту. Локално, овакав унос оптерећења доводи до великих напона и деформација у зони “остатка” стубова. Зато је одлучено да се изради оребрена плоча која би својом конструкцијом “спрегла” конструкције одсечених стубова и омогућила даљи квалитетнији унос оптерећења.

8 НУМЕРИЧКИ ПРОРАЧУН ЛАБОРАТОРИЈСКОГ МОДЕЛА

Као што је за претходне моделе у претходним поглављима рађена нумеричка анализа коришћењем методе коначних елемената (статички и динамички прорачун), тако ће у овом поглављу бити анализиран лабораторијски модел. Резултати добијени на лабораторијском моделу ће бити упоређивани са резултатима из Поглавља 6 где је разматрана умањена структура.

8.1 Статички прорачун лабораторијског модела

Као што је речено у претходном поглављу лабораторијски модел подразумева умањену структуру са коригованим дебљинама и плочом која “спреже” стубове. Тако је прорачунском моделу скалиране редуковане структуре додата поменута плоча (Слика 8.1) и промењене су дебљине. Оребрења ове плоче моделирана су гредним елементима, а поделе плоче су прилагођене поделама ребара.



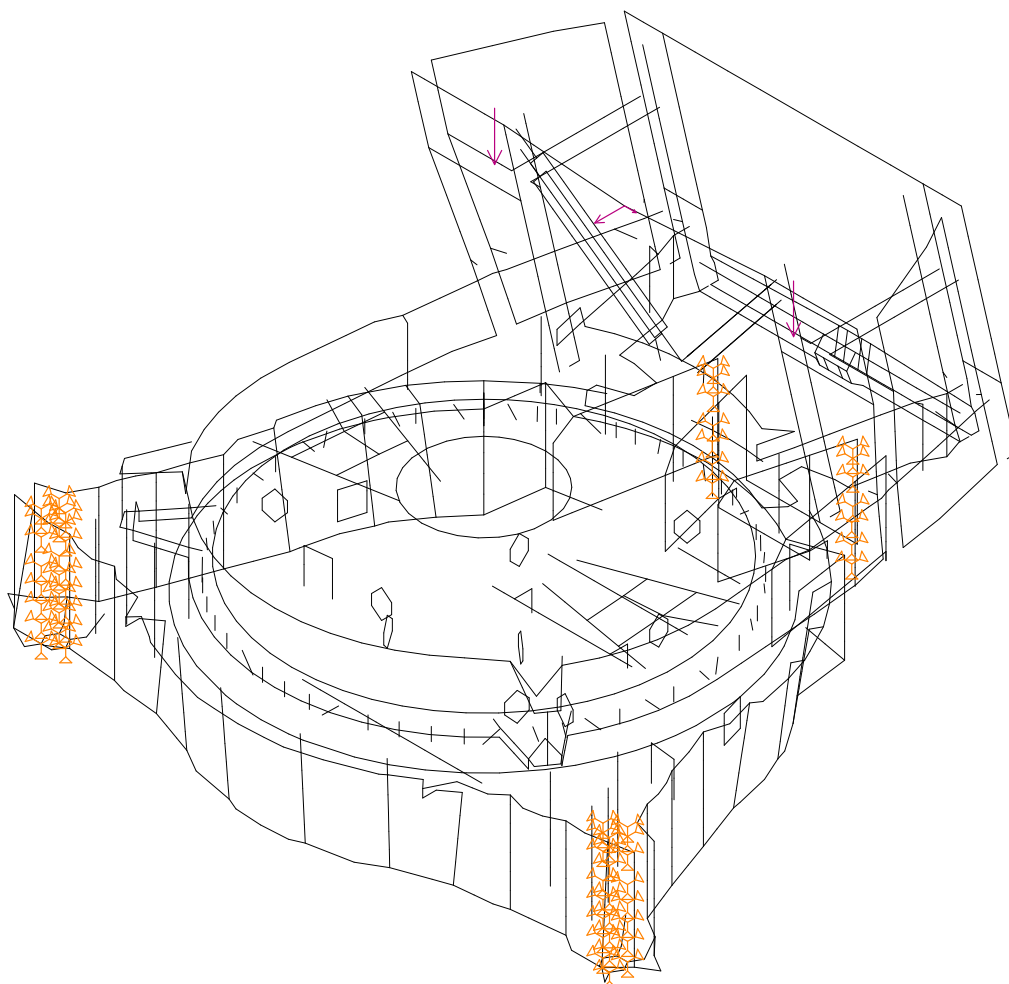
Слика 8.1 Плоча која “спреже” стубове, издвојени елементи

У овом прорачуну је урађена и корекција оптерећења у односу на умањену структуру, где је оптерећење прорачунато у чворове елемената стубова на пресеку као неравномерно оптерећење (Слика 5.21 и Табела 5.1). Оптерећење је Варињоновом теоремом сведено у “тежиште” пресека, са циљем да се у лабораторији што лакше изведе унос оптерећења, јер је контуално оптерећење тешко симулирати. Као “усвојена замењујућа нападна тачка” сила (две хоризонталне у равни пресека у правцу оса X и Y и вертикална у правцу Z) усваја се тачка у којој се све, нпр. вертикалне силе, могу свести само на своју резултанту (а моменти се поништавају). У Табели 8.1 приказане су добијене вредности резултантних сила и њихове тачке дејства.

Табела 8.1 Резултујуће силе у пресеку стубова и њихова места дејства

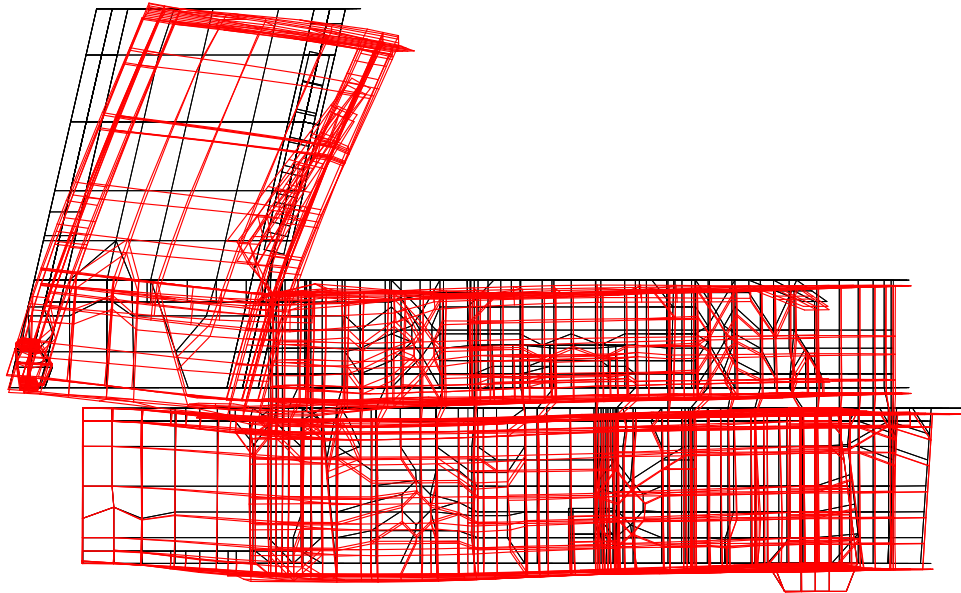
Правац дејства силе	Интензитет силе [kN]	Прорачунска тачка у којој треба да делује сила [mm]	Усвојена тачка дејства силе [mm]
Оса X	23,14	$Y_T = -4,038$	(-352.84,0,434)
Оса Y	9,17	$X_T = -352,84$	
Оса Z, десни стуб	-37,66	$X_T = -403,974$	(-402.87,375,434)
		$Y_T = 375,734$	
Оса Z, леви стуб	-38,15	$X_T = -384,071$	(-402.87,-375,434)
		$Y_T = -367,287$	

Нумерички прорачунски модел лабораторијског модела дат је на Слици 8.2.



Слика 8.2 Прорачунски модел са ослоњцима и оптерећењима, лабораторијски модел

Резултати нумеричке анализе дати су на Сликама 8.3 и 8.4 (упоредити са Сликама 6.1 и 6.2). На Слици 8.3 приказано је померање чворних тачака лабораторијског модела добијено нумеричким прорачуном.

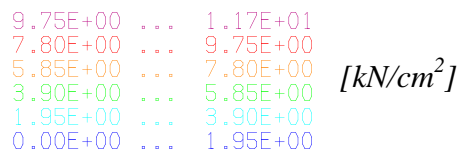
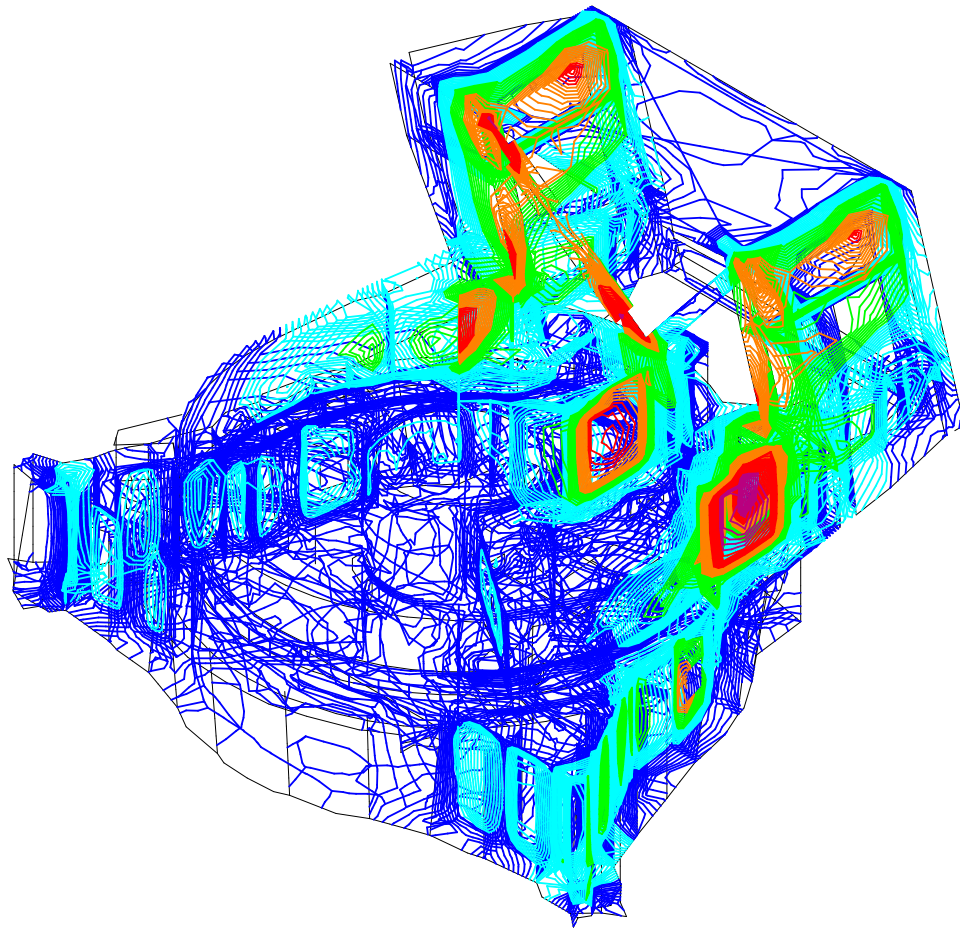


Максимално померање чворних тачака износи 0,1173 cm

Слика 8.3 Померање чворних тачака лабораторијског модела

Са претходне слике може се уочити да је максимално померање овог модела у односу на онај модел из Поглавља 6 (Слика 6.1) знатно мање што одговара очекиваној ситуацији, односно “решено” је померање тачака на линији пресека стубова додавањем плоче која “спреже” стубове. Ова додатна плоча је решила проблем уноса оптерећења на модел у лабораторији.

На Слици 8.4 приказано је напонско поље лабораторијског модела.



Слика 8.4 Напонско поље лабораторијског модела

Поредећи одговарајућа места на моделу умањене структуре и на лабораторијском моделу, на први поглед се уочава апсолутно поклапање поља напона и деформација ова два модела, осим што је решен проблем великих деформација и напона на линији пресека додавањем плоче која “спреже” стубове.

На местима највеће концентрације напона (спој вертикалне плоче и цилиндра испод стубова и на доњој градњи и на обртној платформи) даје се упоредни приказ резултата оба прорачунска модела табеларно (Табеле 8.2 и 8.3). Графички прикази обе структуре су готово исти, само се вредности напона разликују.

Табела 8.2 Вредности еквивалентног напона у елементима радијалних плоча доње градње, лабораторијски модел и модел умањене структуре

Број елемента (са Сlike 6.3)	Умањена структура		Лабораторијски модел	
	Еквивалентни напон [kN/cm ²]	Дебљина [mm]	Еквивалентни напон [kN/cm ²]	Дебљина [mm]
960	4,892	2,5	6,036	2,0
961	7,475	1,5	7,677	1,5
962	7,479	1,5	7,721	1,5
1042	8,372	1,5	8,535	1,5
963	10,69	1,5	10,72	1,5
964	4,763	1,0	4,602	1,0
974	5,966	2,5	7,344	2,0
975	9,226	1,5	9,241	1,5
976	9,57	1,5	9,595	1,5
1043	11,02	1,5	10,94	1,5
977	10,7	1,5	10,67	1,5
978	2,765	1,0	2,803	1,0
988	6,715	2,5	8,154	2,0
989	10,86	1,5	10,73	1,5
990	10,81	1,5	10,68	1,5
991	10,35	1,5	10,26	1,5
992	1,678	1,0	1,73	1,0
1002	6,816	2,5	8,282	2,0
1003	11,16	1,5	10,99	1,5
1004	10,81	1,5	10,65	1,5
1005	9,999	1,5	9,877	1,5
1006	1,516	1,0	1,474	1,0
1016	6,507	2,5	7,944	2,0
1017	10,5	1,5	10,34	1,5
1018	10,18	1,5	10,08	1,5
1019	9,575	1,5	9,491	1,5
1020	1,831	1,0	1,751	1,0
1030	5,618	2,5	6,802	2,0
1031	8,895	1,5	8,883	1,5
1032	8,868	1,5	8,925	1,5
1033	8,967	1,5	9,016	1,5
1034	3,157	1,0	2,953	1,0

2494	3,767	2,5	4,752	2,0
2495	5,647	1,5	5,999	1,5
2496	5,673	1,5	6,061	1,5
2576	6,547	1,5	6,905	1,5
2497	8,608	1,5	8,936	1,5
2498	3,933	1,0	3,99	1,0
2508	4,623	2,5	5,838	2,0
2509	7,084	1,5	7,304	1,5
2510	7,362	1,5	7,628	1,5
2577	8,677	1,5	8,919	1,5
2511	8,341	1,5	8,602	1,5
2512	2,278	1,0	2,419	1,0
2522	5,23	2,5	6,52	2,0
2523	8,402	1,5	8,545	1,5
2524	8,358	1,5	8,516	1,5
2525	7,909	1,5	8,087	1,5
2526	1,368	1,0	1,461	1,0
2536	5,283	2,5	6,602	2,0
2537	8,623	1,5	8,748	1,5
2538	8,322	1,5	8,452	1,5
2539	7,628	1,5	7,761	1,5
2540	1,197	1,0	1,19	1,0
2550	5,04	2,5	6,335	2,0
2551	8,097	1,5	8,223	1,5
2552	7,805	1,5	7,96	1,5
2553	7,311	1,5	7,462	1,5
2554	1,394	1,0	1,364	1,0
2564	4,333	2,5	5,403	2,0
2565	6,827	1,5	7,034	1,5
2566	6,76	1,5	7,018	1,5
2567	6,875	1,5	7,123	1,5
2568	2,334	1,0	2,237	1,0

Табела 8.3 Вредности еквивалентног напона у елементима радијалних плоча
обртне платформе, лабораторијски модел и модел умањене структуре

Број елемента (са Сlike 6.4)	Умањена структура		Лабораторијски модел	
	Еквивалентни напон [kN/cm ²]	Дебљина [mm]	Еквивалентни напон [kN/cm ²]	Дебљина [mm]
3554	8,283	6,0	7,652	6,0
3562	11,16	3,0	10,23	3,0
3563	10,62	3,0	9,816	3,0
3548	6,268	6,0	5,709	6,0
3564	13,87	3,0	12,87	3,0
3565	11,98	3,0	11,04	3,0
3542	5,17	6,0	4,808	6,0
3566	11,67	3,0	10,79	3,0
3567	13,38	3,0	12,31	3,0
3568	11,91	3,0	10,96	3,0
4282	6,858	6,0	6,297	6,0
4290	8,834	3,0	8,037	3,0
4291	8,764	3,0	8,06	3,0
4276	4,974	6,0	4,553	6,0
4292	11,53	3,0	10,67	3,0
4293	9,71	3,0	8,92	3,0
4270	4,378	6,0	4,079	6,0
4294	9,234	3,0	8,552	3,0
4295	10,2	3,0	9,342	3,0
4296	9,335	3,0	8,615	3,0

Као што се може уочити из претходних табела разлике у напону одговарајућих елемената структуре јављају се зато што су кориговане дебљине неких лимова (наглашено у Табели 8.2). Напони су доминантно мембрански и ако је стара дебљина лима 2.5 mm, а нова дебљина лима 2 mm то значи да би напон добијен на одређеном месту лабораторијског модела приликом прерачунавања на напон умањене структуре требало помножити са 0,8 (2/2,5). Међутим, код неких елемената, којима није промењена дебљина лима, уочавају се знатне разлике у напону код једног и код другог модела. То је последица тога што је промењена

дебљина околних лимова, па је дошло и до другачије прерасподеле оптерећења (крутости). Свакако, одступања су мала и ови модели су упоредиви.

У Табели 8.4 приказано је вертикално померање чворних тачака горње и доње стазе аксијалног лежаја на местима везивања штапова (кугли) за умањену структуру (подаци узети из Табеле 6.6) и лабораторијски модел.

*Табела 8.4 Померање чворних тачака горње и доње стазе аксијалног лежаја
умањене структуре и лабораторијског модела*

Редни број тачке (са Сlike 5.19)	Вертикално померање тачке [cm]			
	Умањена структура		Лабораторијски модел	
	Доња стаза	Горња стаза	Доња стаза	Горња стаза
1.	-0,022	-0,022	-0,024	-0,024
2.	-0,023	-0,023	-0,025	-0,024
3.	-0,024	-0,024	-0,025	-0,025
4.	-0,024	-0,024	-0,025	-0,026
5.	-0,024	-0,027	-0,025	-0,028
6.	-0,029	-0,029	-0,029	-0,030
7.	-0,031	-0,031	-0,033	-0,031
8.	-0,034	-0,035	-0,036	-0,034
9.	-0,036	-0,037	-0,036	-0,036
10.	-0,035	-0,037	-0,034	-0,036
11.	-0,034	-0,034	-0,033	-0,033
12.	-0,032	-0,034	-0,031	-0,033
13.	-0,031	-0,031	-0,030	-0,030
14.	-0,027	-0,027	-0,027	-0,026
15.	-0,025	-0,027	-0,024	-0,027
16.	-0,022	-0,023	-0,022	-0,022
17.	-0,019	-0,022	-0,019	-0,021
18.	-0,019	-0,019	-0,018	-0,019
19.	-0,017	-0,019	-0,017	-0,018
20.	-0,017	-0,017	-0,016	-0,017
21.	-0,016	-0,016	-0,015	-0,016
22.	-0,014	-0,014	-0,013	-0,014
23.	-0,013	-0,013	-0,013	-0,013
24.	-0,013	-0,013	-0,013	-0,013

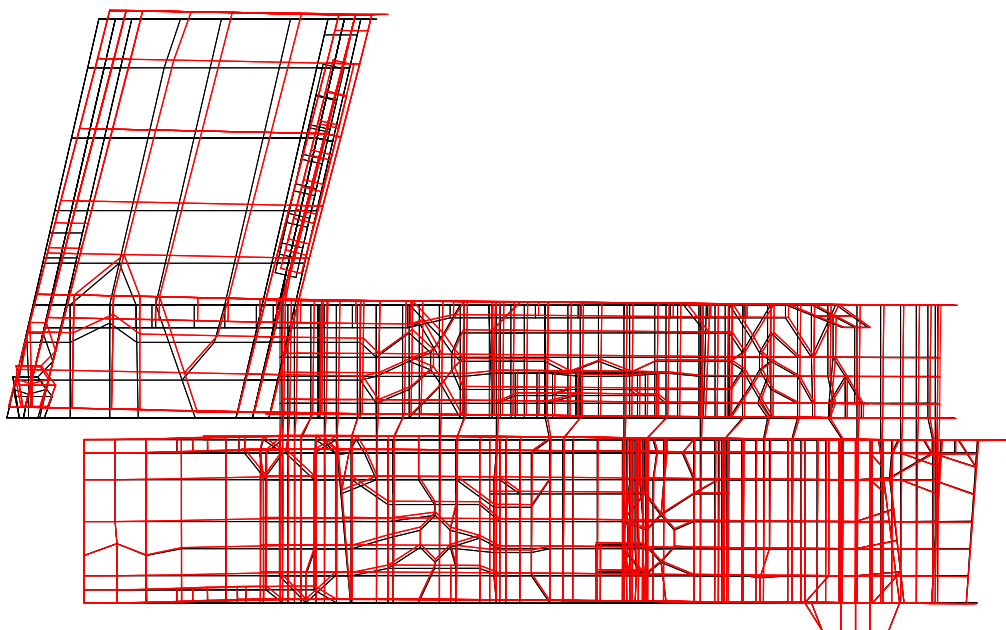
25.	-0,013	-0,013	-0,012	-0,012
26.	-0,013	-0,013	-0,012	-0,012
27.	-0,012	-0,013	-0,011	-0,012
28.	-0,012	-0,012	-0,011	-0,011
29.	-0,012	-0,012	-0,011	-0,011
30.	-0,011	-0,011	-0,011	-0,011
31.	-0,012	-0,010	-0,011	-0,010
32.	-0,011	-0,010	-0,010	-0,010
33.	-0,010	-0,010	-0,010	-0,010
34.	-0,010	-0,010	-0,010	-0,010
35.	-0,010	-0,010	-0,010	-0,010
36.	-0,010	-0,010	-0,010	-0,010
37.	-0,010	-0,011	-0,010	-0,011
38.	-0,011	-0,012	-0,011	-0,011
39.	-0,011	-0,012	-0,011	-0,012
40.	-0,012	-0,012	-0,012	-0,012
41.	-0,012	-0,014	-0,012	-0,014
42.	-0,014	-0,014	-0,014	-0,014
43.	-0,016	-0,017	-0,015	-0,016
44.	-0,017	-0,017	-0,017	-0,017
45.	-0,019	-0,019	-0,019	-0,019
46.	-0,020	-0,021	-0,020	-0,021
47.	-0,021	-0,021	-0,021	-0,021
48.	-0,023	-0,023	-0,023	-0,023
49.	-0,024	-0,024	-0,024	-0,024
50.	-0,023	-0,022	-0,023	-0,023
51.	-0,021	-0,021	-0,023	-0,022
52.	-0,020	-0,020	-0,021	-0,021
53.	-0,019	-0,019	-0,020	-0,020
54.	-0,019	-0,019	-0,021	-0,021
55.	-0,020	-0,020	-0,022	-0,022
56.	-0,021	-0,021	-0,023	-0,023

Из претходне табеле се види да умањена структура и лабораторијски модел имају готово иста померања тачака. Из ове табеле најважније је уочити померања тачака

лабораторијског модела, јер ће она бити упоређивана са померањима тачака лежаја измереним у лабораторији.

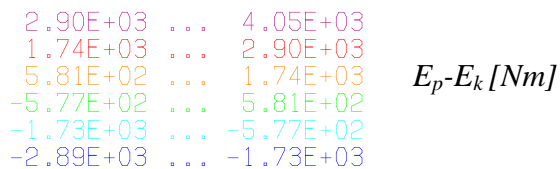
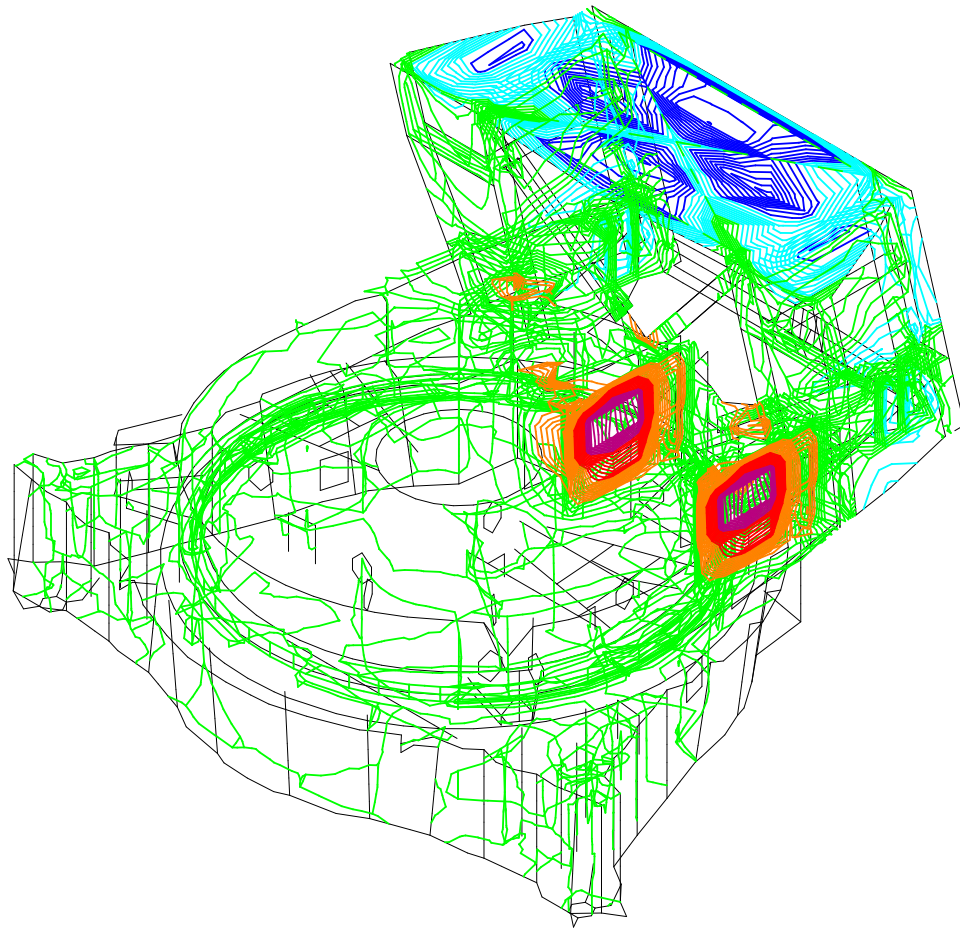
8.2 Динамички прорачун лабораторијског модела

Динамички прорачун лабораторијског модела спроведен је за модел са ослонцима који представљају стварне ослонце конструкције и без концентрисаних маса. У наставку ће бити приказани резултати динамичког прорачуна за прва два мода осциловања.



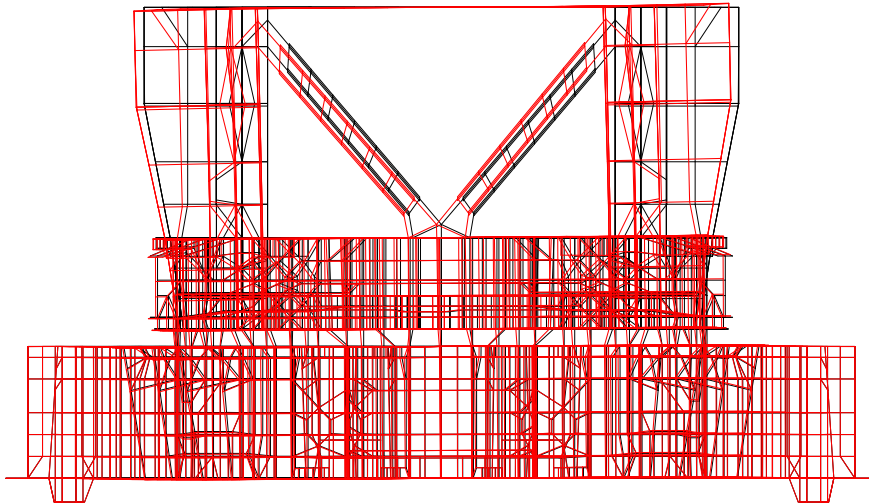
Фреквенца осциловања 175,32 Hz

Слика 8.5 Слободне осцилације, први мод осциловања, лабораторијски модел



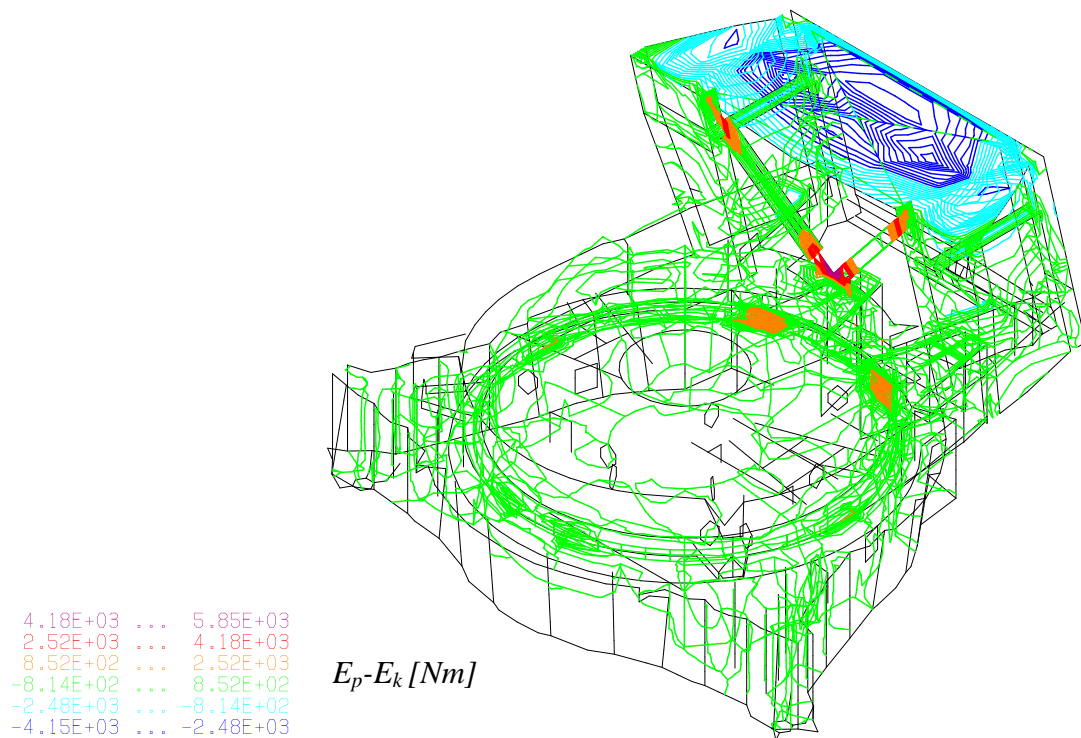
Слика 8.6 Разлика потенцијалне и кинетичке енергије, први мод осциловања, лабораторијски модел

Први мод осциловања представља савијање преосталог дела стубова у правцу пружања стреле радног точка (и противтега). На основу расподеле разлике потенцијалне и кинетичке енергије уочава се да је место за редизајн радијална плоча доње градње (иста плоча која при статичком прорачуну показује највећу концентрацију напона).



Фреквенца осциловања 177,35 Hz

Слика 8.7 Слободне осцилације, други мод осциловања, лабораторијски модел



Слика 8.8 Разлика потенцијалне и кинетичке енергије, други мод осциловања, лабораторијски модел

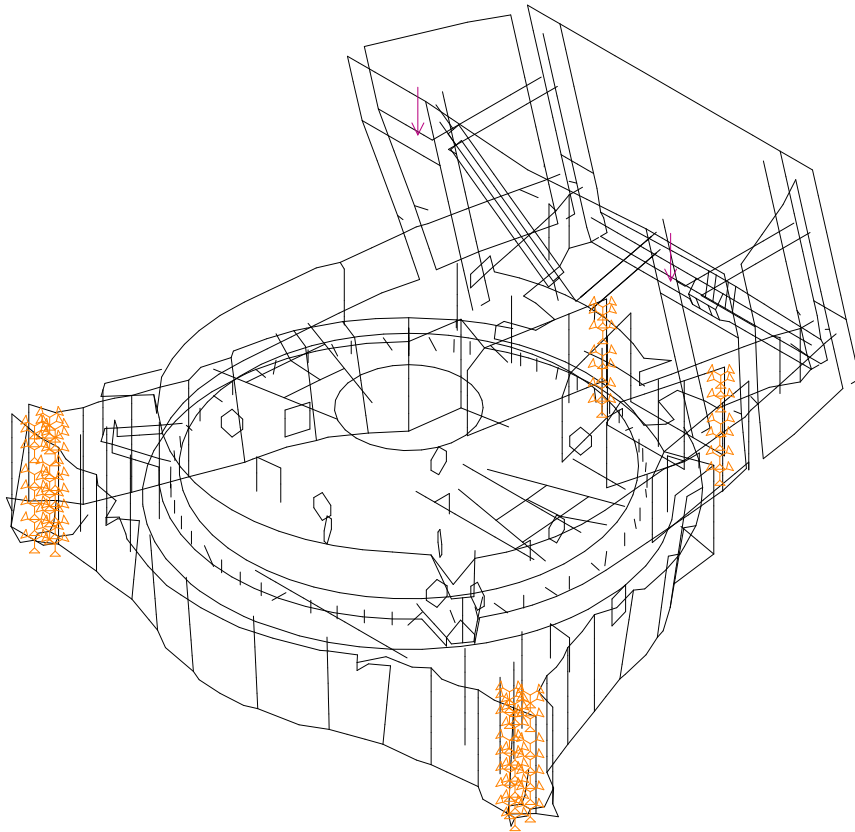
Други мод осциловања представља савијање стубова у равни управној на правац пружања стреле радног точка. Под оваквим фиктивним оптерећењем (које би изазвало то савијање) као проблематична, уочава се чворна плоча доњих косника стубова, која се везује у горњу плочу горње градње.

У нашим лабораторијским условима није могуће изазвати побуду овако високе фреквенце, тако да се од динамичких испитивања одустало. Динамички прорачун је искоришћен да се још једном идентификују слаба места конструкције, јер динамички прорачун заправо и показује како би конструкција реаговала под таквим фиктивним оптерећењем.

8.3 Статички прорачун лабораторијског модела - вертикално оптерећење

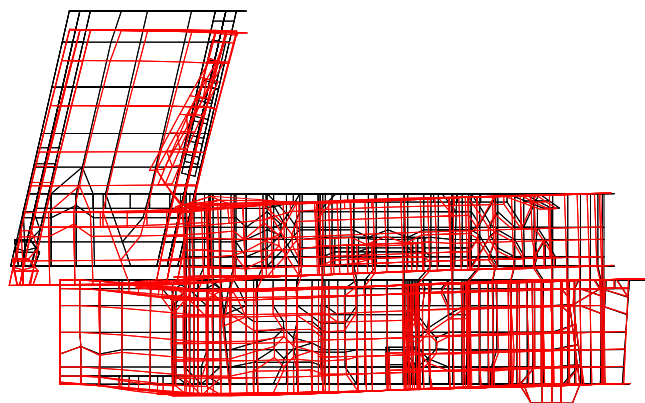
Како у релативно лимитираним лабораторијским условима није било могуће изазвати вишеосно оптерећивање модела, одлучено је да се модел оптерећује једнаким вертикалним силама (симетрично). Симетрично оптерећење је омогућило (уз већ постојећу симетричност саме конструкције) паралелно мерење: мерним тракама и оптичким системом за дигитану корелацију слика. Одлучено је да се све мерне траке поставе у изабране тачке на истој половини конструкције, а да друга половина буде искоришћена за снимање коресподентних поља камерама. Симултано снимање једне исте тачке овим два метода је непогодно због преклапања мерних трака и поља снимања (траке би онемогућиле опажање самог места на ком је она позиционирана, а управо то место је најинтересантније за мерење).

Одлучено је да се модел оптерећује вертикалним силама од по 38 kN у тачкама пресека вертикалних плоча стубова (вертикалне резултујуће силе у одговарајућим тачкама-Табела 8.1). Прорачунски модел дат је на Слици 8.9.



Слика 8.9 Прорачунски модел са ослоњцима и оптерећењима, лабораторијски модел, вертикална оптерећења

Резултати нумеричке анализе дати су на Сликама 8.10 и 8.11 (упоредиво са Сликама 8.3 и 8.4). На Слици 8.10 приказано је померање чворних тачака лабораторијског модела оптерећеног само вертикалним силама.

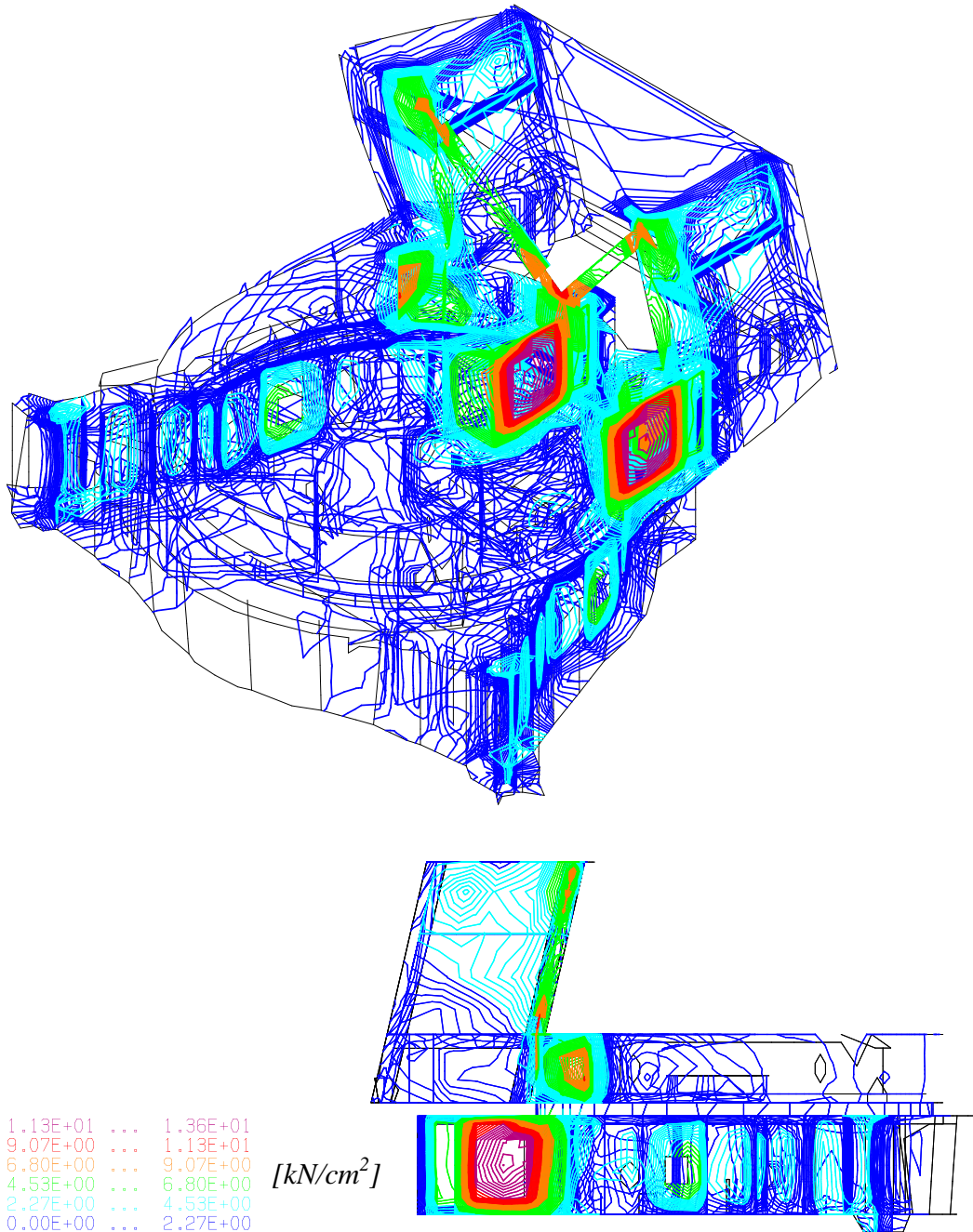


Максимална деформација износи 0,134261 cm

Слика 8.10 Деформација лабораторијског модела

У поређењу са претходним моделом (Слика 8.3) који је оптерећен вишеосно померања су већа нарочито у зони горње градње испод стубова, јер се ту утицаји вертикалних сила и чеоне одузимају.

На Слици 8.11 приказано је напонско поље лабораторијског модела оптерећеног само вертикалним силама.



Слика 8.11 Напонско поље лабораторијског модела, вертикална оптерећења
(напон изражен у $[kN/cm^2]$)

Поредећи одговарајућа места на нумеричком лабораторијском моделу оптерећеном вишеосно (Слика 8.4) и нумеричком лабораторијском моделу оптерећеном само вертикалним силама, уочавају се разлике изазване сабирањем, односно одузимањем ефеката оптерећења различитих праваца дејства.

На местима највеће концентрације напона (спој вертикалне плоче и цилиндра испод стубова и на горњој и на доњој градњи) даје се табеларни приказ резултата прорачуна лабораторијског модела са вертикалним оптерећењима (Табеле 8.5 и 8.6). Приказани су резултати само за једну половину модела због симетрије.

Табела 8.5 Вредности еквивалентног напона у елементима радијалних плоча доње градње, лабораторијски модел, вертикална оптерећења

Број елемента (са Сlike 6.3)	Еквивалентни напон [kN/cm ²]	Број елемента (са Сlike 6.8)	Еквивалентни напон [kN/cm ²]	Број елемента (са Сlike 6.8)	Еквивалентни напон [kN/cm ²]
960	7,469	978	4,573	1016	10,05
961	10,11	988	10,25	1017	12,95
962	10,3	989	13,63	1018	12,46
1042	11,56	990	13,72	1019	11,53
963	15,33	991	13,05	1020	2,057
964	7,27	992	2,651	1030	8,555
974	9,124	1002	10,45	1031	11,06
975	11,91	1003	13,83	1032	10,94
976	12,78	1004	13,34	1033	10,96
1043	15,12	1005	12,16	1034	3,441
977	14,39	1006	1,861		

Табела 8.6 Вредности еквивалентног напона у елементима радијалних плоча обртне платформе, лабораторијски модел, вертикална оптерећења

Број елемента (са Сlike 6.4)	Еквивалентни напон [kN/cm ²]	Број елемента (са Сlike 6.9)	Еквивалентни напон [kN/cm ²]	Број елемента (са Сlike 6.9)	Еквивалентни напон [kN/cm ²]
3554	5,841	3564	9,816	3567	10,1
3562	8,514	3565	8,814	3568	8,96
3563	7,956	3542	3,709		
3548	4,534	3566	9,037		

Из Табела 8.2-8.3 и Табела 8.5-8.6, може се уочити да су у плочама доње градње напони већи у односу на прорачун са оптерећењем у три правца (бочна, чеона и вертикалне силе). У прорачуну са оптерећењем у три правца се утицаји вертикалних сила и чеоне силе одузимају (присутан је релаксирајући утицај чеоне силе), а у прорачуну само са вертикалним оптерећењима, нема чеоне силе. Такође, нема бочне силе која доминантно уноси асиметрију. Напони у вертикалним плочама обртне платформе су мањи у прорачуну са само вертикалним силама, јер се овде утицај вертикалних сила и чеоне силе сабирају (обе теже да савију стубове).

У Табели 8.7 приказано је вертикално померање чворних тачака доње стазе аксијалног лежаја на местима везивања штапова (кугли) за лабораторијски модел оптерећен само вертикалним оптерећењем.

Табела 8.7 Померање чворних тачака доње стазе аксијалног лежаја лабораторијског модела, вертикална оптерећења

Редни број тачке	Вертикално померање тачке доње стазе [cm]	Редни број тачке	Вертикално померање тачке доње стазе [cm]	Редни број тачке	Вертикално померање тачке доње стазе [cm]
1.	-0,033	11.	-0,032	21.	-0,007
2.	-0,033	12.	-0,030	22.	-0,004
3.	-0,033	13.	-0,027	23.	-0,003
4.	-0,032	14.	-0,023	24.	-0,002
5.	-0,031	15.	-0,021	25.	-0,001
6.	-0,033	16.	-0,017	26.	0
7.	-0,034	17.	-0,015	27.	0,001
8.	-0,036	18.	-0,012	28.	0,001
9.	-0,036	19.	-0,010	29.	0,001
10.	-0,035	20.	-0,008		

У Табели 8.7 приказана је само доња стаза аксијалог лежаја, јер је кроз претходне моделе уочено да се доња и горња стаза померају паралелно (нема “отварања” лежаја ни на једном месту).

У првом тренутку се мислило да ће ово бити коначни прорачун који ће бити упоређиван са експериментаним резултатима. Међутим, у лабораторијским

условима није било могуће унети силе од 38 kN по стубу (укупно 76 kN). Испоставило се да је могуће унети силу од 10 kN по стубу (укупно 20 kN). Разлози су детаљно објашњени у Поглављу 9.2. У наставку ће бити дати резултати и тог прорачуна. Овај прорачун са укупном силом од 76 kN је приказан, јер је упоредив са претходним прорачуном са троосним оптерећењем и јасно се виде утицаји различитих оптерећења.

Лабораторијски модел, редукована вертикална оптерећења

Под редукованим оптерећењем ће бити подразумевано оптерећење од укупно 20 kN. Суштински, померања чворних тачака и напонско стање модела су исти као и у прорачуну са вертикалним силама од по 38 kN (Слике 8.10 и 8.11). Како је прорачун линеаран, вредности померања и напона би требало да буду дељене са 7,6 и множене са 2 (20/76). Ипак, вредности напона су незнатно веће, јер и један и други прорачун подразумевају утицај сопствене тежине модела (једнака је у оба прорачуна). У наставку су дате вредности напона и померања чворних тачака доње стазе лежаја, табеларно. Те вредности су поређене са вредностима измереним у лабораторији. Приказ је дат за половину модела (симетрија конструкције и оптерећења).

Табела 8.8 Вредности еквивалентног напона у елементима радијалних плоча доње градње, лабораторијски модел, редукована вертикална оптерећења

Број елемента (са Слике 6.3)	Еквивалентни напон [kN/cm ²]	Број елемента (са Слике 6.3)	Еквивалентни напон [kN/cm ²]	Број елемента (са Слике 6.3)	Еквивалентни напон [kN/cm ²]
960	2,075	978	1,244	1016	2,792
961	2,803	988	2,848	1017	3,596
962	2,857	989	3,784	1018	3,459
1042	3,206	990	3,808	1019	3,202
963	4,245	991	3,622	1020	0
964	1,985	992	0	1030	2,374
974	2,535	1002	2,902	1031	3,07
975	3,305	1003	3,841	1032	3,035
976	3,515	1004	3,702	1033	3,041
1043	4,19	1005	3,379	1034	0
977	3,989	1006	0		

Табела 8.9 Вредности еквивалентног напона у елементима радијалних плоча обртне платформе, лабораторијски модел, редукована вертикална оптерећења

Број елемента (са Сlike 6.4)	Еквивалентни напон [kN/cm ²]	Број елемента (са Сlike 6.4)	Еквивалентни напон [kN/cm ²]	Број елемента (са Сlike 6.4)	Еквивалентни напон [kN/cm ²]
3554	1,564	3564	2,63	3567	2,724
3562	2,29	3565	2,367	3568	2,411
3563	2,139	3542	0		
3548	1,218	3566	2,434		

Табела 8.10 Померање чворних тачака доње стазе аксијалног лежаја лабораторијског модела, редукована вертикална оптерећења

Редни број тачке	Вертикално померање тачке доње стазе [cm]	Редни број тачке	Вертикално померање тачке доње стазе [cm]	Редни број тачке	Вертикално померање тачке доње стазе [cm]
1.	-0,009	11.	-0,01	21.	-0,002
2.	-0,009	12.	-0,009	22.	-0,002
3.	-0,009	13.	-0,008	23.	-0,001
4.	-0,009	14.	-0,008	24.	-0,001
5.	-0,009	15.	-0,006	25.	0
6.	-0,009	16.	-0,006	26.	0
7.	-0,01	17.	-0,005	27.	0
8.	-0,01	18.	-0,004	28.	0
9.	-0,01	19.	-0,003	29.	0
10.	-0,01	20.	-0,003		

На Слици 8.12 приказано је вертикално померање тачака доње стазе лежаја лабораторијског модела за редукована вертикална оптерећења.



Слика 8.12 Вертикално померање тачака доње стазе лежаја, лабораторијски модел, редукована вертикална оптерећења

9 ПОСТАВКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОГ ИСПИТИВАЊА

Циљ експерименталних испитивања је био да се верификује нумерички прорачун лабораторијског модела на физичком (претходно израђеном) лабораторијском моделу. Испитивањем физичког модела је коначно потврђено да се овакве структуре реално могу испитивати и моделски, док је нумерички прорачун само упућивао да се овакве структуре, у теорији, могу испитивати и моделски.

Експеримент је изведен у Лабораторији за мерење напона и деформација Катедре за отпорност конструкција на Машинском факултету Универзитета у Београду.

Експерименталне методе које су коришћене су метода мерних трака и метода за бесконтактно мерење напона и деформација. Симетрично оптерећење је омогућило (уз већ постојећу симетричност саме конструкције) паралелно мерење мерним тракама и оптичким системом за дигитану корелацију слика. Одлучено је да се све мерне траке поставе у изабране тачке на истој половини конструкције, а да друга половина буде искоришћена за снимање коресподентних поља камерама. Поново се наглашава, да је симултано снимање једне исте тачке овим два метода непогодно због преклапања мерних трака и поља снимања (траке би онемогућиле опажање самог места на ком је она позиционирана, а управо то место је најинтересантније за поређење).

Механички компаратери су коришћени за потврду симетрије оптерећивања (обе стране се исто спуштају) и потврду да ослонци остају непокретни током оптерећивања модела.

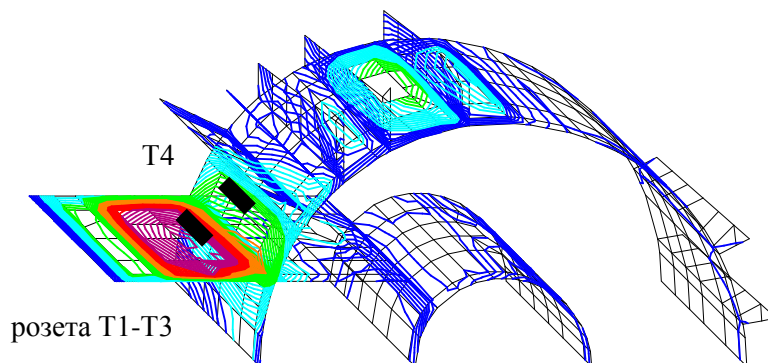
9.1 Експерименталне методе коришћене приликом мерења и припрема за њихово коришћење

Метода мерних трака

Испитивање конструкције методом мерних трака, подразумева позиционирање мерних трака на претходно изабрана кључна места, са циљем “мапирања” модела. Позиције мерних трака (Т) на доњој и горњој градњи приказане су на Сликама 9.1 до 9.4.

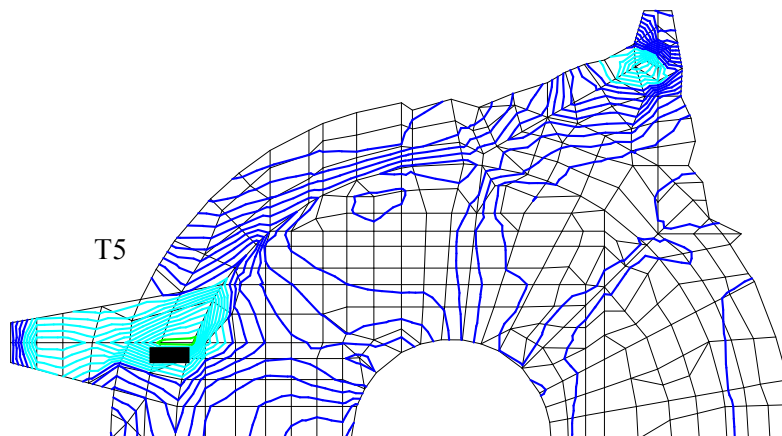
На Слици 9.1 приказана је позиција розете (Т1-Т3) модел 10/120 RY11. Она је позиционирана на вертикалној плочи доње градње испод стубова у зони

концентрације напона. Правац розете T2 подудар се са вертикалним правцем. Трака T4 позиционирана је на цилиндру, са спољашње стране места уласка ребра у цилиндар. Трака T4 и све остале траке су модел 6/120 LY11.



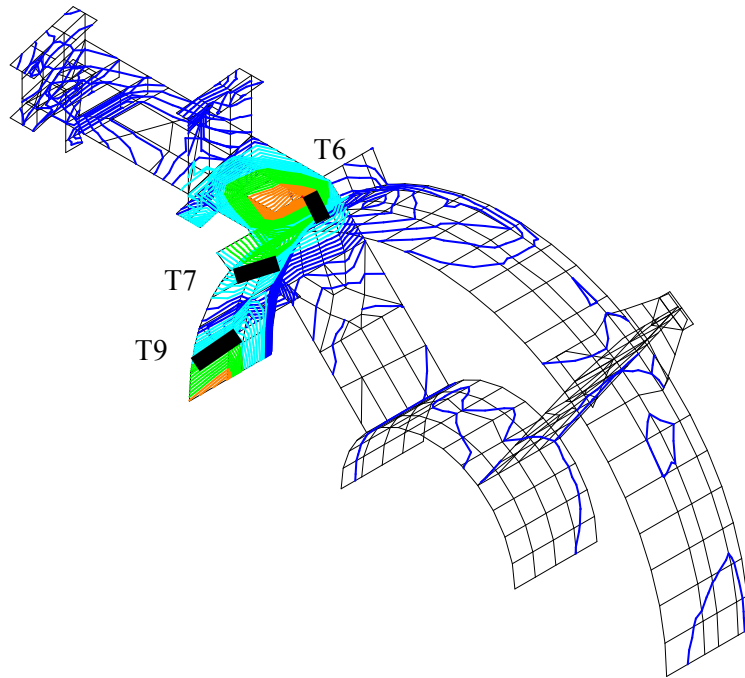
Слика 9.1 Позиције мерних трака T1-T4, радијално ребро и цилиндар доње градње

Мерна трака T5 позиционирана је на горњој плочи доње градње у правцу пружања радијалног ребра, са унутрашње стране.



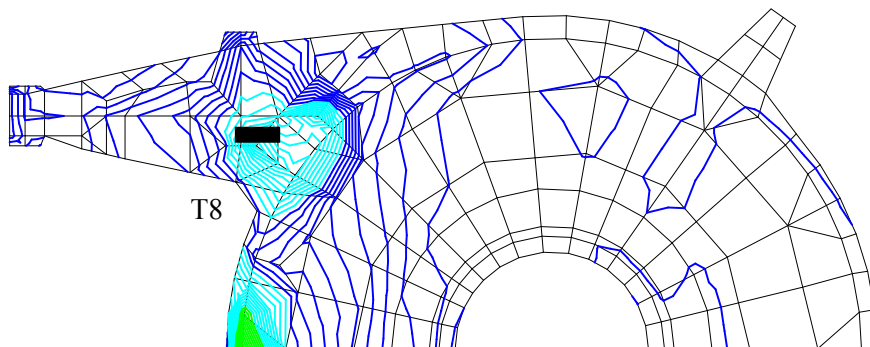
Слика 9.2 Позиција мерне траке T5, горња плоча доње градње

На Слици 9.3 приказане су позиције трака T6, T7 и T9. Трака T6 позиционирана је на радијалном ребру доње градње у хоризонталном правцу, јер је то правац највеће компоненте напона у тој зони. Трака T7 је вертикално постављена на цилиндру са унутрашње стране уласка ребра у цилиндар, мало померена од цилиндра тако да буде у зони концентрације напона. Трака T9 позиционирана је у вертикалном правцу у зони везивња чворне плоче косника у цилиндар.



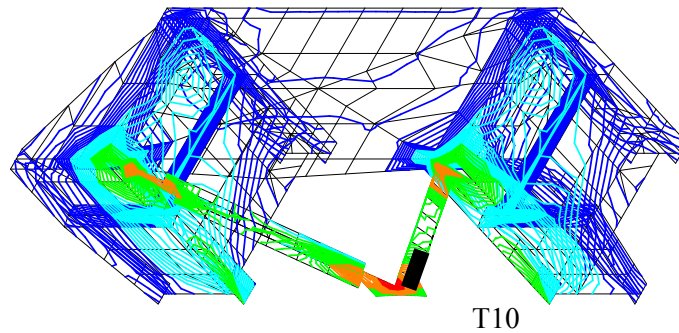
Слика 9.3 Позиција мерних трака T6, T7 и T9, радијално ребро и цилиндар обртне платформе

Трака T8 позиционирана је на горњој плочи обртне платформе са унутрашње стране стубова.



Слика 9.4 Позиција мерне траке T8, горња плоча обртне платформе

Трака T10 позиционирана је на коснику, на чворној плочи која везује коснике са цилиндром и горњом плочом обртне платформе.

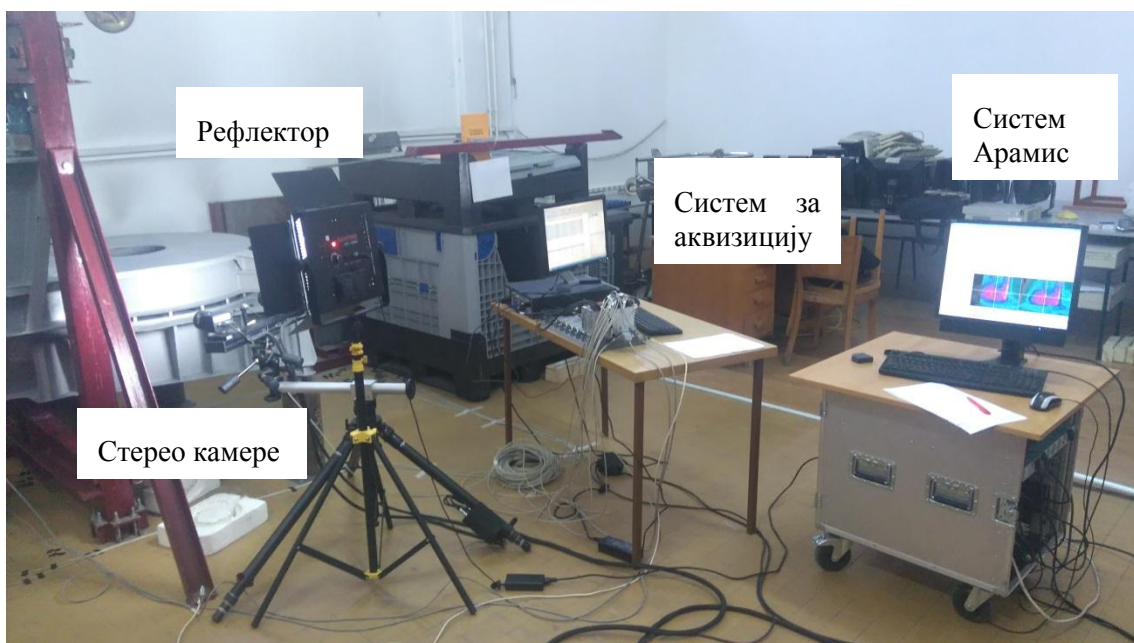


Слика 9.5 Позиција мерне траке T10, косник

Мерне траке су повезане са уређајем за аквизицију QuantumX. Уређај QuantumX MX1615 истовремено прави допуну до пуног моста и појачава сигнал. Софтвер коришћен за запис података је satmanA5 V4.1.1. Систем за аквизицију приказан је на Слици 9.6.

Метода за дигиталну корелацију слика

Систем за бесконтактно оптичко мерење померања и деформација састоји се од сетова стерео камера и сочива. Систем чини још и постоље, уређај за напајање и РС систем са инсталираним софтвером Aramis. Диспозиција целокупне мерне опреме примењене током извођења експеримента приказана је на Слици 9.6.



Слика 9.6 Диспозиција мерне опреме

Рад система базира се на дигиталној корелацији слика, која је објашњена у Поглављу 3. Овај систем може да мери померања до 0,001 mm.

Намера је била да се системом за бесконтактно мерење померања и деформација сниме места највећих померања и деформација, која су симетрична местима на којима су позициониране мерне траке (Слика 9.7). Ограничење представља максимална величина поља које може бити снимљено (105x80x55 mm), тако да су мерења извршена по зонама.



Слика 9.7 Локације мерних трака и коресподентних поља за снимање Системом за бесконтактно мерење померања и деформације

Осим тога планирано је да се сниме место корена стуба, за које је нумеричким прорачуном добијено да има велика померања.



Слика 9.8 Мерно место X, корен стуба

Осим тих места, планирано је да се сниме “чепови”, који апроксимирају кугле лежаја, са циљем да се провери да ли се оптерећење правилно преноси са горње на доњу градњу модела. Осим тога, то су места која су коришћена као реперна за међусобно упоређивање прорачунских модела.

У припрему за коришћење ове методе са једне стране, спада припрема мерне површине, а са друге стране, калибрација камера за мерење одређене мерне запремине.

Све мерне површине су очишћене од нечистоћа, нанесен је слој беле мат боје и на белу површину су нанете фино дисперзоване црне тачке. Црне тачке се наносе да би се добила стохастичка шема. Наиме, систем за бесконтактно мерење функционише тако што прати одређене пикселе у неоптерећеном и оптерећеном стању. Стохастичка шема му омогућава идентификацију одређених пиксела. Притом, морала је постојати разлика приликом наношења шаре на велика мерна места и на “чепове”. То су различите мерне запремине, па осим што захтевају другачија подешавања и положаје камера, мање мерне запремине захтевају и финију шару.

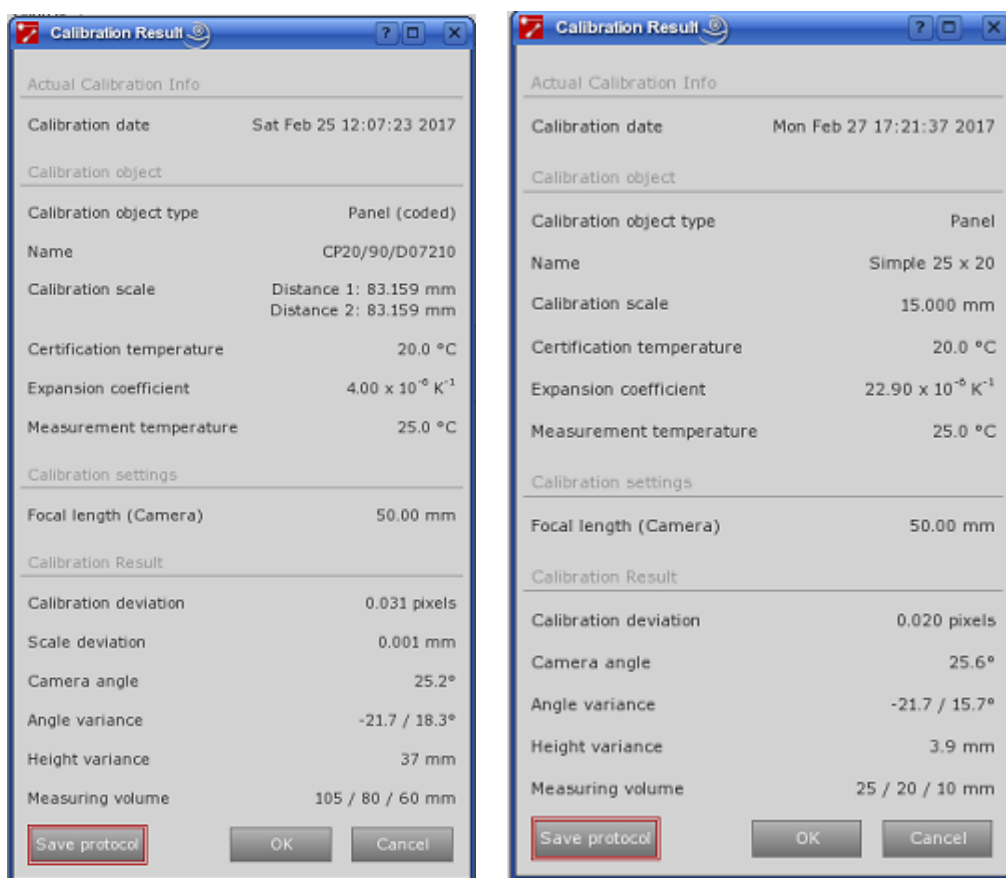


Слика 9.9 Изглед стохастичке шаре “чепова”

Избор сензора врши се на основу мерне запремине, а у оба случаја коришћена су сочива од 50 mm, само са различитим осталим подешавањима, у смислу растојања између камера и растојања камера од мереног објекта. Подешавања за мерење веће мерне запремине подразумевају да је растојање између камера 370 mm, а удаљеност кемера од мереног објекта да је 800 mm. Подешавања за мерење мање

мерне запремине “чепова” подразумева да је растојање између камера 130 mm, а растојање од мереног објекта 280 mm.

Такође, две различите величине мерних запремина захтевале су две различите калибрације. Дакле, камере су биле подешене и калибрисане за већу мерну запремину и извршена је та група мерења. Затим су биле подешене и калибрисане за мању мерну запремину и извршена је та група мерења. На Слици 9.10 приказани су резултати калибрације за већу и мању калибрациону плочу.



Слика 9.10 Резултати калибрације за већу и мању калибрациону плочу

9.2 Позиционирање модела

Модел је позициониран на место за испитивање. У ту сврху искоришћен је крути рам. Предњи ослонац модела је ослоњен на крути рам, док су задњи ослонци направљени од цеви повезаних прирубницама (задњи ослонци анкерисани су у под). Планирано је да се вертикалне силе изазову хидроцилиндрима ослоњеним о горњу хоризонтану греду. Идеја је била да се оптерећење задржи у затвореној контури крутог рама (две хоризонталне греде рама и вертикалне греде чине

затворену контуру). Међутим, то није било могуће јер би на тај начин, на месту предњег ослонаца био формиран еластични, а не крути ослонац. Зато се од тога одустало, а предњи ослонац је претворен у крути ослонац. То је за последицу имало, да оптерећење не остаје у затвореној контури рама, што би изазвало превелико оптерећење анкера рама и њихово “чупање” из подлоге. Због тога се, уместо планираном укупном силом од 76 kN, оптерећивање вршило укупном силом од 20 kN.



Слика 9.11 Позиционирање модела у раму за испитивање

9.3 Поступак мерења

Свако од изведених мерења је подразумевало поступни унос силе коришћењем хидроцилиндара у две тачке модела (симетрично), са кораком од 2 kN по појединачном месту уноса, односно, у пару 4 kN укупно. За очитавање и контролу уноса силе коришћени су динамометри НВМ U5 100 kN.



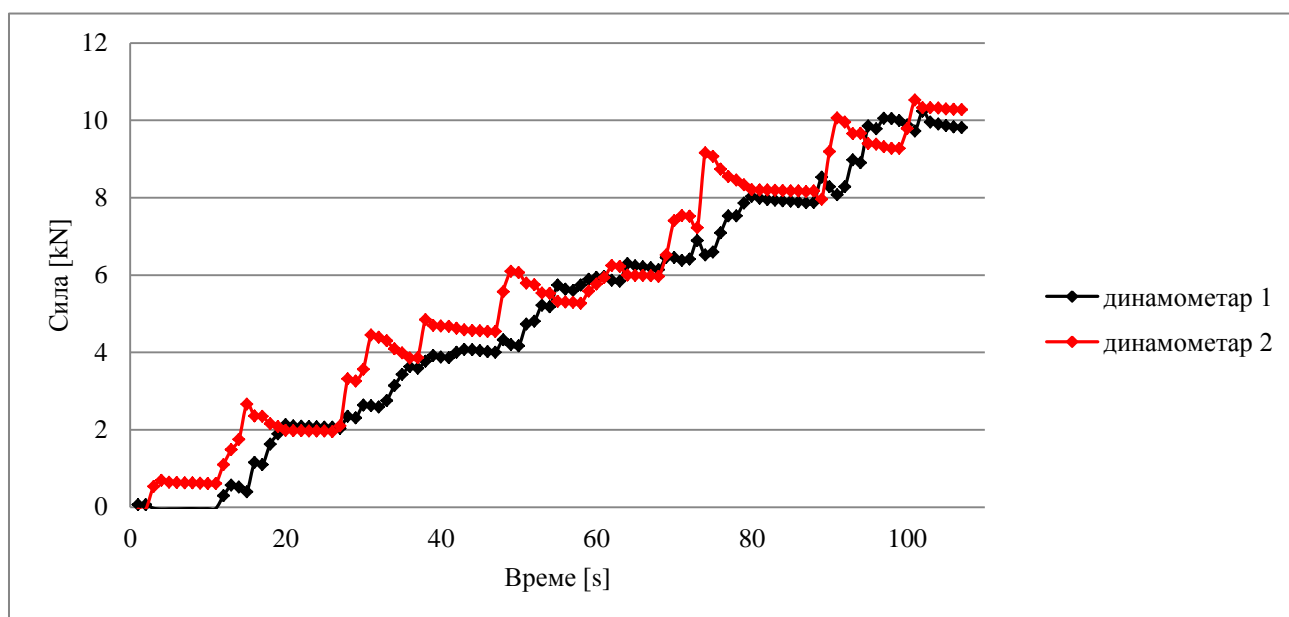
Слика 9.12 Унос оптерећења

Системом за аквизицију за свако појединачно мерење записивана су очитавања мерних трака. Мерења су понављана онолико пута, колико је различитих места било потребно снимити системом за бесконтактно мерење померања и деформације. За свако застајање у оптерећивању, снимљена је по једна фотографија, што значи да свако мерење подразумева шест снимљених фотографија (неоптерећено стање, 4, 8, 12, 16, 20 kN укупно). Када је једно мерење завршено, вршено је растерећење конструкције, а систем Арамис је био позициониран на следеће мерно место и цео циклус је потом понављан.

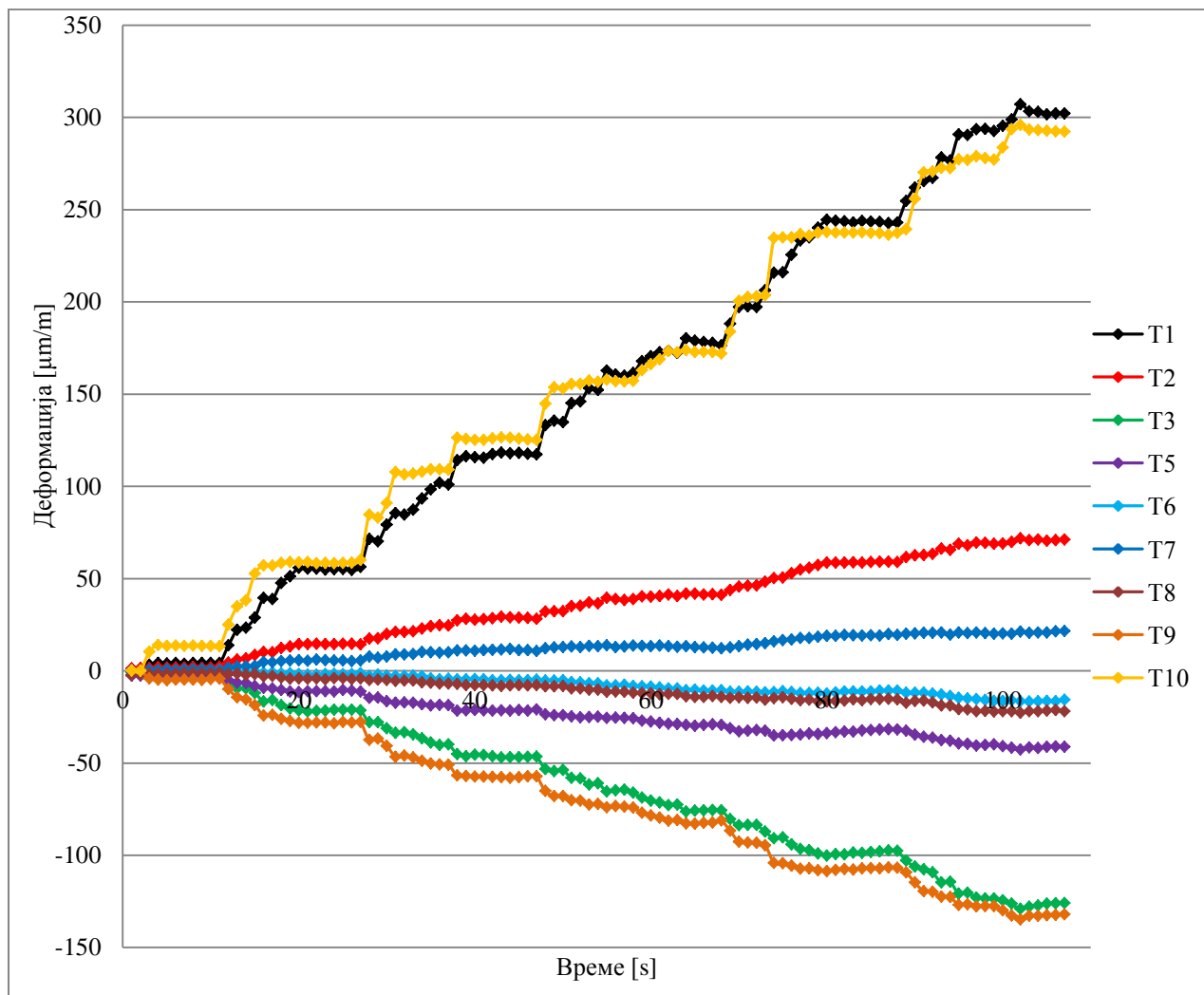
10 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ И ЊИХОВА АНАЛИЗА

У овом поглављу биће дати упоредо, како резултати експеримента добијени на два начина, мерним тракама и системом за бесконтактно мерење померања и деформација, тако и резултати добијени нумеричким прорачуном.

Приликом сваког оптерећивања конструкције модела, записивани су подаци о примењеном оптерећњу и подаци о деформацијама снимљеним мерним тракама. Анализом снимљених података уочава се поновљивост и линеарност мерења. Такође се уочава велико поклапање резултата добијених мерним тракама са резултатима нумеричког прорачуна (биће приказано у наставку). На Слици 10.1 и Слици 10.2 приказани су дијаграми сила и дијаграми читавања мерних трака за једно од мерења.



Слика 10.1 Дијаграм сила за једно мерење



Слика 10.2 Дијаграм очитавања мерних трака за једно мерење

На дијаграму није приказано очитавање траке T4, јер из неког разлога трака није била активна током мерења. Са дијаграма очитавања мерних трака може се уочити да очитавања трака T5, T6, T7 и T8, иако прате оптерећивање модела, нису употребљива, јер су вредности измерених издужења у границама грешке мерења. Ово је и било очекивано на основу резултата прорачуна, јер је због ограничења извођења експеримента усвојено редуковано вертикално оптерећење које није довољног интензитета да све траке “оживе”. Резултати су практично сведени на резултате трака T1, T2 и T3 које чине розету и трака T9 и T10, што се показало као довољно за анализу и извођење закључака. Што се система за бесконтактно оптичко мерење тиче, искористиви су резултати са мерног места MM 1-3, које је

симетрично у односу на место постављања розете, са мерног места ММ6 (симетрично са Т6), са мерног места ММ9 (симетрично са Т9), са ММ10 (симетрично са Т10), ММ Х (Слика 9.8) и мерења “чепова” у доступним зонама лежаја.

Мерно место ММ 1-3

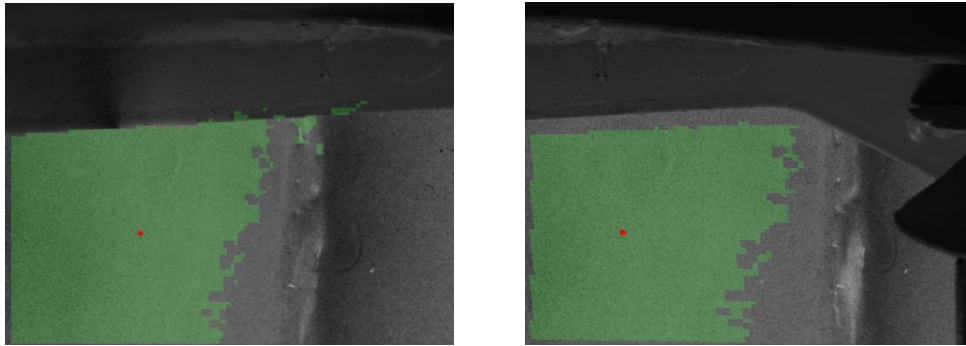
Резултати мерења мерних трака на овом месту су употребљиви за анализу.

Неки од резултата добијених мерним системом Арамис за ово мерно место приказани су на следећим сликама. На Слици 10.3 дата је позиција мерне опреме за снимање.



Слика 10.3 Позиција мерне опреме приликом снимања, ММ 1-3

Ово место је тешко приступачно, морало је да буде осветљено са доње стране (што се види по положају рефлектора); поље на следећој слици је објективно најбоље могуће, које је могло бити добијено приликом снимања овог места.



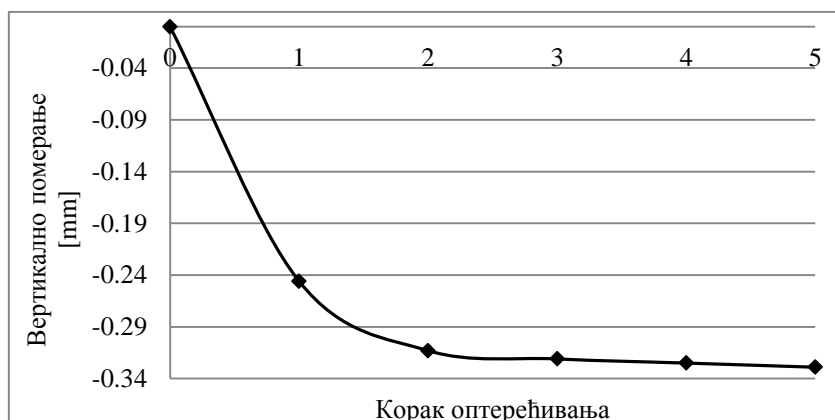
Слика 10.4 Поље добијено системом за бесконтактно мерење померања и деформације, лева и десна камера, ММ 1-3

Црвена тачка на претходним сликама је почетна тачка за прорачун, коју систему треба задати у некој “чистој” зони поља, која ће бити видљива камерама и у неоптерећеном и у оптерећеном стању.



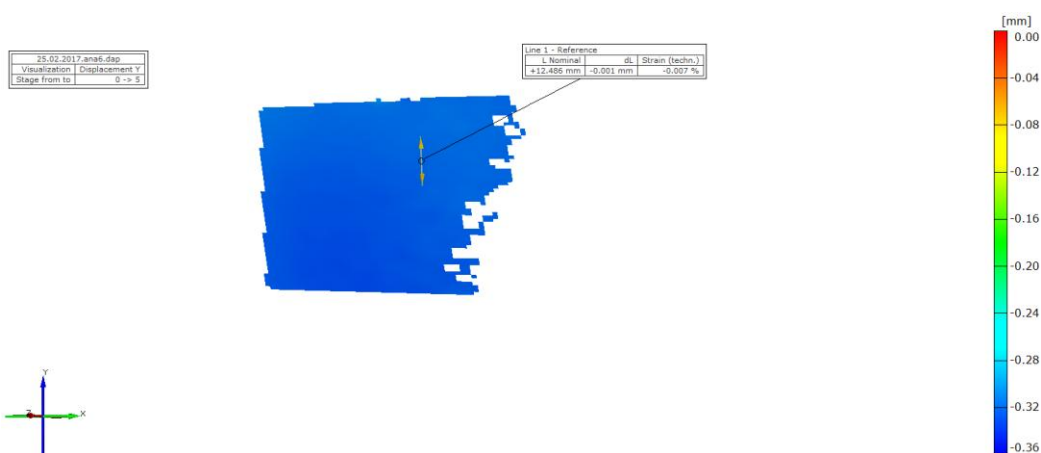
Слика 10.5 Поље вертикалних померања добијено системом за бесконтактно мерење померања и деформације, растерећено и крајње оптерећено стање, ММ 1-3

1-3



Слика 10.6 Вертикално померање тачке у пољу кроз фазе оптерећивања, ММ 1-3

Са претходног дијаграма се уочава прилично линеарна промена померања између корака оптерећивања 1 (укупно оптерећење 4 kN) и корака оптерећивања 5 (укупно оптерећење 20 kN). Између корака 0 и корака 1 уочава се велико померање, које треба приписати почетном померању услед попуњавања зазора (између хидроцилиндара и плоча на које се ослањају, плоча и обртне платформе, обртне платформе, “чепова” и доње градње). Зато је овде меродавно померање између корака оптерећивања 1 и корака 5.



Слика 10.7 Поље вертикалних померања добијено системом за бесконтактно мерење померања и деформације, дуж у вертикалном правцу, крајње оптерећено стање, ММ 1-3

На претходној слици приказана је дуж која “опонаша” мерну траку. Наиме софтвер пружа могућност одређивања растојања између било које две тачке у било ком тренутку. Тако је овде повучена дуж у вертикалном правцу у зони розете, која практично опонаша траку Т2. Промена њене дужине је 1 μm , а дужина дужи у недеформисаном стању је 12,486 mm, па издужење може лако бити прерачунато.

Табела 10.1 Поређење резултата добијених мерењем мерним тракама и системом за бесконтактно мерење померања и деформације и резултата нумеричког прорачуна, максимално оптерећење, ММ 1-3

Мерно место ММ 1-3	Мерне траке	Систем за бесконтактно мерење померања и деформације	Метода коначних елемената (Поглавље 9)
Вертикално померање [mm]	/	0,083	0,06
Деформација, вертикални правац [$\mu\text{m}/\text{mm}$]	70,1	80,1	/
Напон, вертикални правац [kN/cm^2]	1,40	1,60	1,34
Напон, хоризонтални правац [kN/cm^2]	1,84	/	1,53

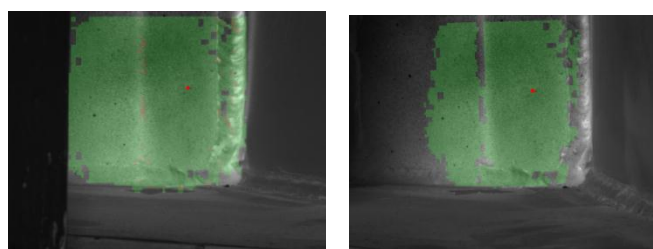
Из претходне табеле може се уочити високо поклапање резултата експеримента и нумеричког прорачуна. Такође се може уочити да све што се може измерити мерним тракама, може се измерити и системом за бесконтактно мерење померања и деформације, и то брже и ефикасније. Притом, пошто су ухваћена цела поља напона и деформација, нема ограничења што се тиче позиционирања дужи као фиктивне мерне траке, практично она се може позиционирати у зону највећих померања.

Мерно место ММ6

Резултати мерења на овом мерном месту биће дати у наставку. На следећој слици је дата позиција мерне опреме за снимање.

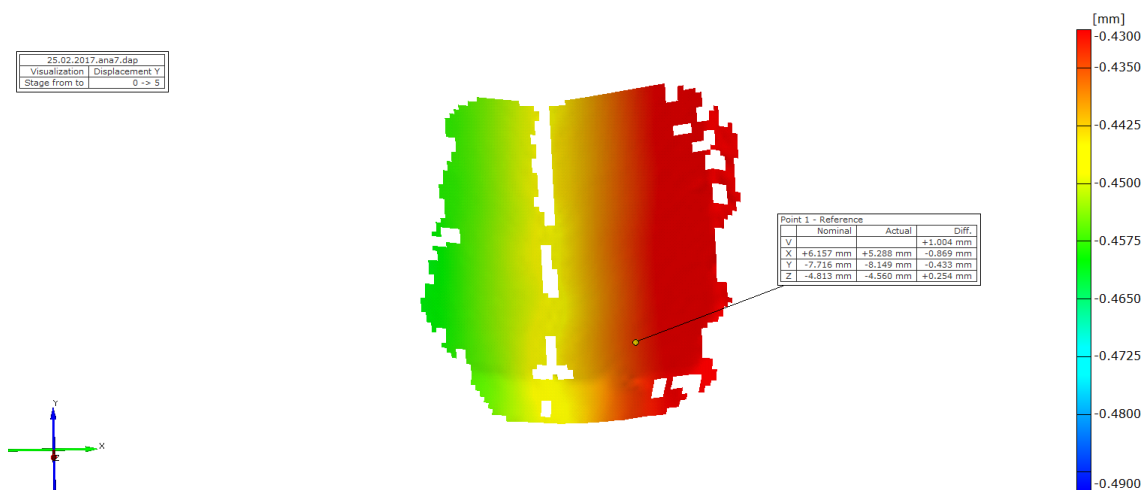


Слика 10.8 Позиција мерне опреме приликом снимања, ММб



Слика 10.9 Поље добијено системом за бесконтактно мерење померања и деформације, лева и десна камера, ММб

На следећој слици приказана су поља вертикалног померања тачака на овом мерном месту.



Слика 10.10 Поље вертикалних померања добијено системом за бесконтактно мерење померања и деформације, крајње оптерећено стање, ММб

Са Сlike 10.10 се може уочити поље вертикалних померања које је у потпуности усклађено са пољем добијеним нумеричким прорачуном, јер је ово тачка око које

стубови “ломе” горњу градњу. Овај резултат представља још једну у низу могућности система за бесконтактно мерење померања и деформације.

Као и у претходном примеру, линеарна промена померања постоји између корака оптерећивања 1 (укупно оптерећење 4 kN) и корака оптерећивања 5 (укупно оптерећење 20 kN) и та разлика је усвојена као меродавна.

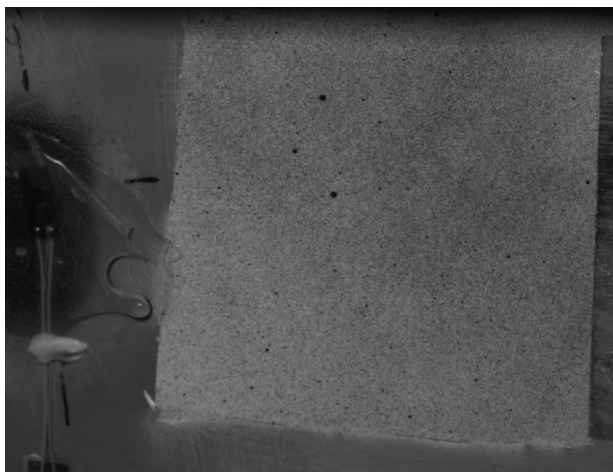
На овом месту напони нису били довољно високи да би их било могуће измерити (било којом од метода), па се у наредној табели приказују резултати померања.

Табела 10.2 Поређење резултата добијених мерењем мерним тракама и системом за бесконтактно мерење померања и деформације и резултата нумеричког прорачуна, максимално оптерећење, ММ6

Мерно место ММ6	Мерне траке	Систем за бесконтактно мерење померања и деформације	Метода коначних елемената (Поглавље 8)
Вертикално померање [mm]	/	0,095	0,11

Мерно место ММ9

У наставку су приказани резултати мерења овог мерног места.



Слика 10.11 Поље добијено системом за бесконтактно мерење померања и деформације, десна камера, без прорачуске маске, ММ9

На Слици 10.11 се јасно може видети како треба да буде напрскано поље да би снимање системом за бесконтактно мерење померања и деформације било могуће.

И овде су резултати анализирани као и у претходним примерима. Праћено је вертикално померање једне тачке, а у зони која се налази симетрично од траке, постављена је произвољна дуж. Системом Арамис је утврђено да је њена дужина 14,131 mm у неоптерећеном стању, а њено укупно издужење је 2 μm .

Табела 10.3 Поређење резултата добијених мерењем мерним тракама и системом за бесконтактно мерење померања и деформације и резултата нумеричког прорачуна, максимално оптерећење, ММ9

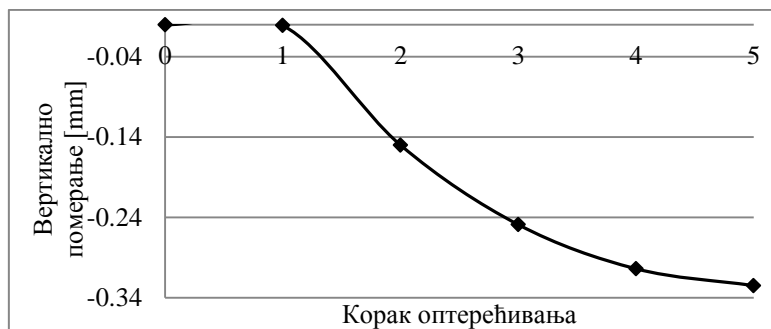
Мерно место ММ9	Мерне траке	Систем за бесконтактно мерење померања и деформације	Метода коначних елемената (Поглавље 8)
Вертикално померање [mm]	/	0,065	0,10
Деформација, вертикални правац [$\mu\text{m}/\text{mm}$]	139,4	141,5	/
Напон, вертикални правац [kN/cm^2]	2,79	2,83	1,58

На овом месту се уочава прилична разлика између нумеричког прорачуна и експерименталних резултата. Узрок томе су масивни заварени спојеви у близини овог места, јер се ту спајају цилиндар, горња плоча горње градње и чворна плоча косника. Заварени спој са једне стране, повећава крутост овог места, а са друге, може узроковати концентрацију напона унуту заваривањем.

Мерно место ММ X

Ово мерно место је практично слободан крај корена стубова који конзолно “виси” ван круга лежаја. Ово место је мерено јер је приступачно, а показује знатна померања (Слика 8.10).

Резултате овог мерења представља вертикално померање тачке.



Слика 10.12 Вертикално померање тачке у пољу кроз фазе оптерећивања, ММ X

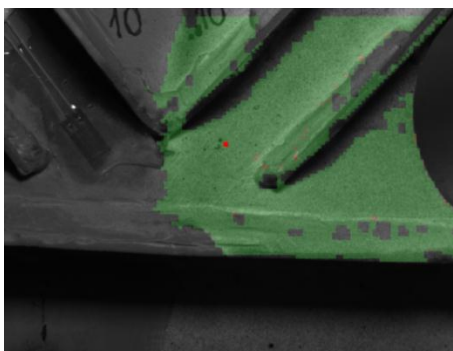
Са дијаграма (Слика 10.12) може се уочити да тек после корака оптерећивања 2, померање постаје линеарно. Разлог што ове тачке имају велика померања у почетној фази оптерећивања је попуњавање раније објашњених зазора, док још конструкција није примила оптерећење. Зато се као референтно почетно стање узима корак оптерећивања 2.

Табела 10.4 Поређење резултата добијених мерењем мерним тракама и системом за бесконтактно мерење померања и деформације и резултата нумеричког прорачуна, максимално оптерећење, ММ X

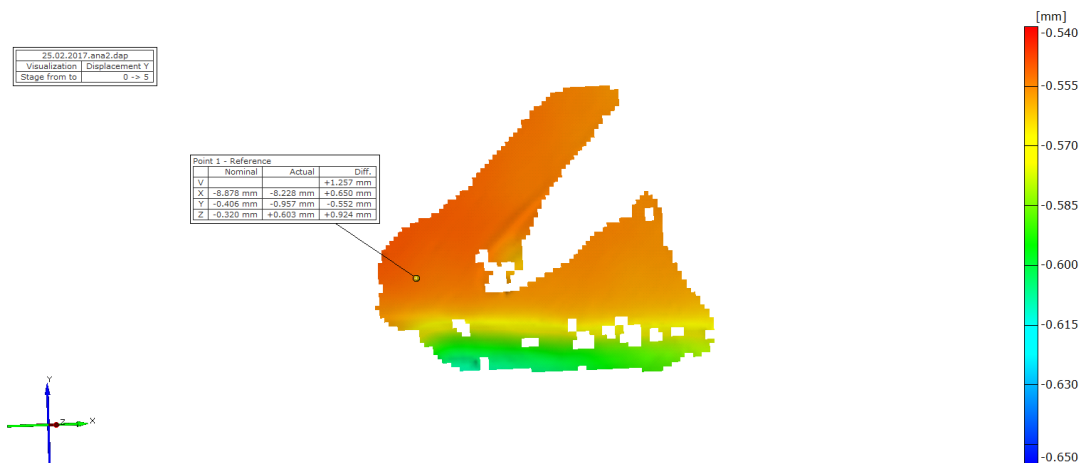
Мерно место ММ X	Мерне траке	Систем за бесконтактно мерење померања и деформације	Метода коначних елемената (Поглавље 8)
Вертикално померање [mm]	/	0,175	0,16

Мерно место ММ10

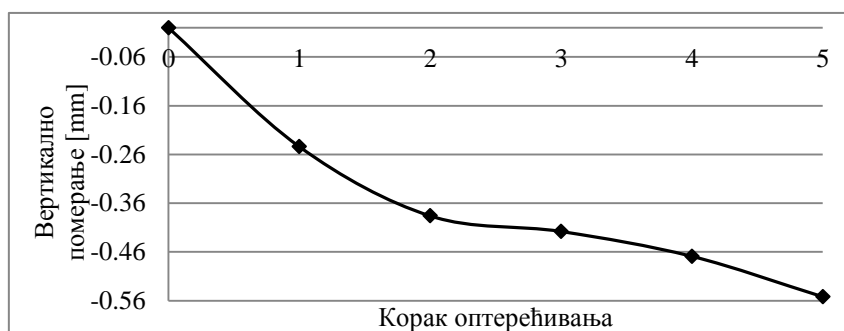
У наставку су приказани резултати мерења чворне плоче косника.



Слика 10.13 Поље добијено системом за бесконтактно мерење померања и деформације, лева камера, ММ10

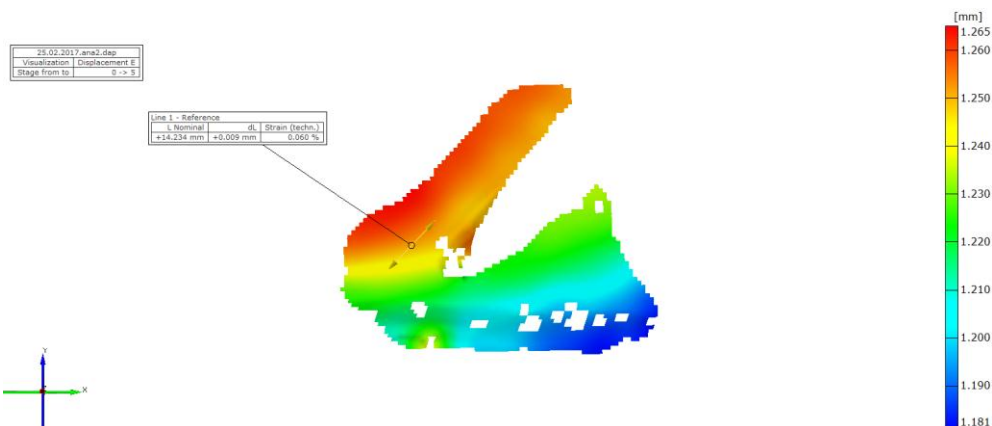


Слика 10.14 Поље вертикалних померања добијено системом за бесконачно мерење померања и деформације, крајње оптерећено стање, MM10



Слика 10.15 Вертикално померање тачке у пољу кроз фазе оптерећивања, MM 10

Као и у претходном случају, меродаван је корак оптерећивања 2, померање почиње да има линеаран карактер.



Слика 10.16 Поље еквивалентних померања добијено системом за бесконачно мерење померања и деформације, дуж у правцу косника,, крајње оптерећено стање, MM10

Табела 10.5 Поређење резултата добијених мерењем мерним тракама и системом за бесконтактно мерење померања и деформације и резултата нумеричког прорачуна, максимално оптерећење, ММ10

Мерно место ММ10	Мерне траке	Систем за бесконтактно мерење померања и деформације	Метода коначних елемената (Поглавље 8)
Вертикално померање [mm]	/	0,166	0,11
Деформација, правац косника [µm/mm]	299,2	632,3	/
Напон, правац косника [kN/cm ²]	5,98	12,65	4,18

На овом месту идентификована је знатна концентрација напона. Мерне траке показују напон за 42,97% већи у односу на нумерички прорачун, а систем за бесконтактно мерење померања и деформација показује напон за 111,36% већи него мерне траке. Узрок овога је концентрација напона изазвана присуством завареног споја, који је велики, у поређењу са димензијама ове зоне (објективна грешка приликом израде модела). То је и узрок различитих (несиметричних) показивања мерних трака и система за бесконтактно мерење померања и деформација. Објашњење ових појава је једноставно: ова зона је конструктивно ближа макети него моделу и није погодна за моделска испитивања.

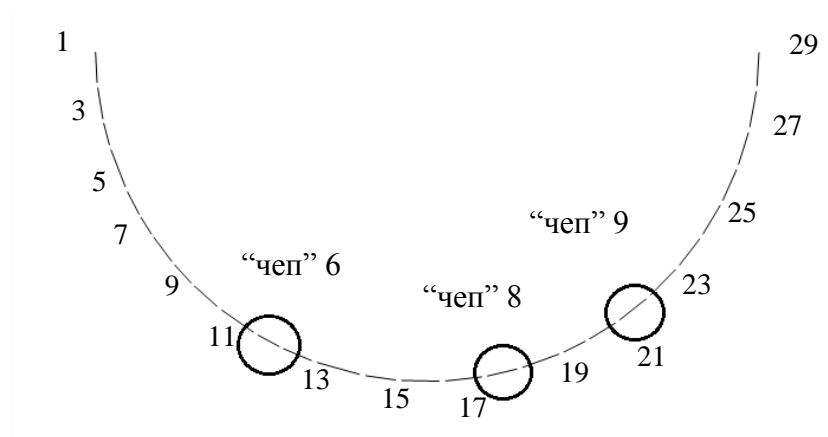
“Чепови”

У овом поглављу биће дати резултати мерења померања тачака “чепова” који апроксимирају кугле аксијалног лежаја. Снимљени су “чепови” са бочне стране модела (они којима је приступ био физички могућ).



Слика 10.17 Позиција мерне опреме приликом снимања “чепова”

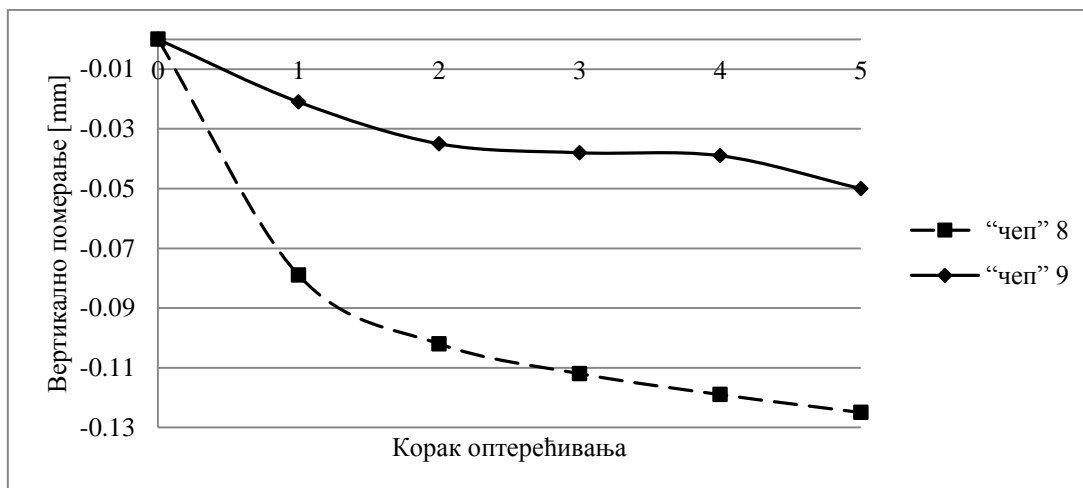
“Чепови” служе да се оптерећење пренесе са горње на доњу градњу, оптерећени су аксијално, напон у њима је незнатан. Зато је овде мерено само померање произвољне тачке поља (померања свих тачака поља су приближно иста). Дати су резултати померања “чепова” 6, 8 и 9, а идентификовано је да су 11 и 12 непокретни. Приликом поређења са резултатима нумеричких прорачуна, усклађене су ознаке по зонама, јер се број “чепића” физичког и нумеричког модела разликује (Слика 10.18).



Слика 10.18 Бројеви кугли лежаја физичког и нумеричког модела

Види се да “чепу” 6 одговара зона тачака лежаја 11 и 12 (из нумеричког прорачуна), “чепу” 8 одговара зона тачака 17 и 18, док “чепу” 9 одговара зона тачака 20 и 21.

На дијаграму су представљена померања тачака “чепова” кроз фазе оптерећивања.



Слика 10.19 Вертикално померање тачке у пољу кроз фазе оптерећивања, “чепови”

Померање “чеп” 6 одмах има линеарни пораст, док код осталих линеарни пораст померања почиње од корака оптерећивања 1 (Слика 10.19). Узрок тога је што се “чеп” 6 налази у зони скоро испод стубова, близу тежишта горње градње и практично цела сопствена тежина горње градње пада на њега (па нема попуњавања зазора).

Табела 10.6 Поређење резултата добијених мерењем системом за бесконтактно мерење померања и деформације и резултата нумеричког прорачуна, максимално оптерећење, “чепови”

Редни број “чеп” на физичком моделу	Вертикално померање [mm]	
	Систем за бесконтактно мерење померања и деформације	Метода коначних елемената (Поглавље 8)
6	0,092	0,090
8	0,046	0,045
9	0,029	0,025

11 НУМЕРИЧКИ ПРОРАЧУН ЦЕЛОВИТЕ КОНСТРУКЦИЈЕ

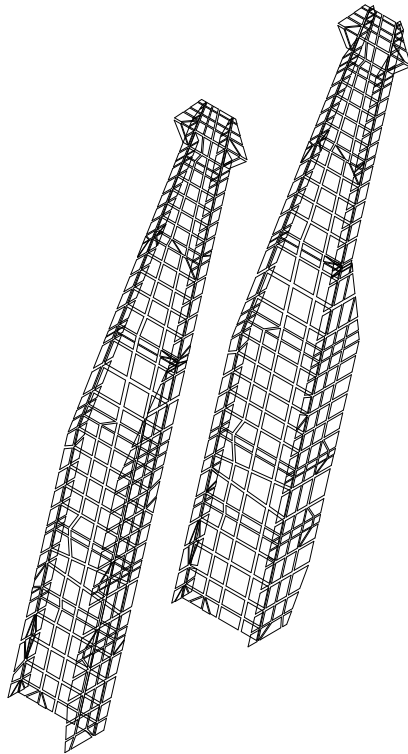
У претходним поглављима доказана је могућност моделског испитивања сложених просторних структура овог типа. У циљу практичне примене сазнања до којих се дошло, урађен је нумерички модел целокупне угледне конструкције који обухвата доњу градњу, обртну платформу и целовите стубове.

Нумеричка анализа овог модела обухватила је статички прорачун за два карактеристична случаја оптерећења и динамички прорачун конструкције. Прелиминарни статички прорачуни ове структуре су искоришћени у Поглављу 5, за дефинисање улазних параметара.

11.1 Прорачунски модел целовите конструкције

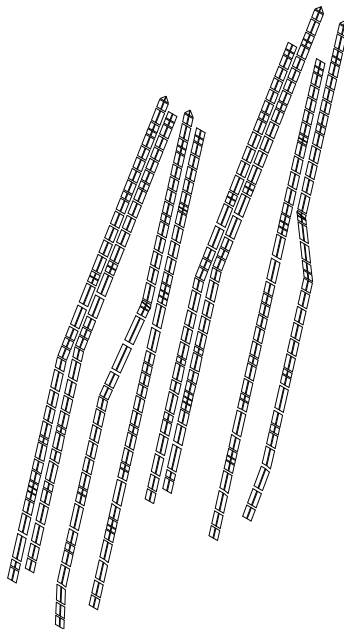
Прорачунски модел објашњен у Поглављу 5 допуњен је конструкцијом стубова. На основу техничке документације произвођача опреме израђен је нумерички модел стубова горње градње багера SchRs 630. И стубови су, као и доња градња и обртна платформа, моделирани тако да нумерички модел што реалније представља физички модел, односно, у обзир су узети сви елементи конструкције који утичу на крутост стубова, њихове димензије и дебљине. Коришћен је коначни елемент плоче за моделирање конструкције стубова. Гредни елементи (два L профила која се пружају дуж стубова) нису моделирани, али су поделе направљене тако да се и ови елементи могу лако прикључити постојећем моделу.

На Слици 11.1 приказан је главни део стубова багера.



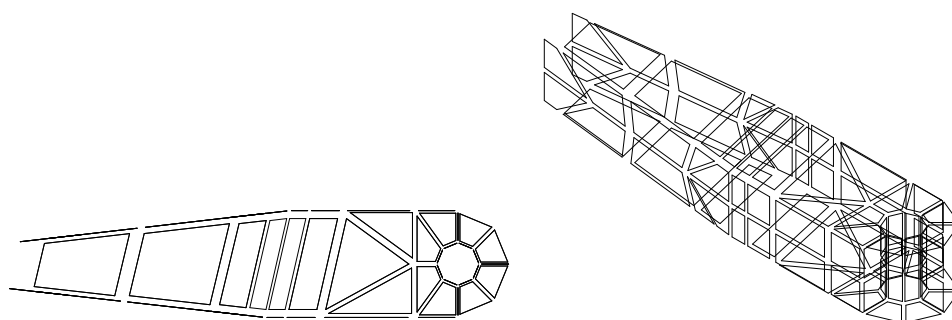
Слика 11.1 Главни део стубова са издвојеним коначним елементима

На Слици 11.2 приказана су подужна укружења стубова, односно стопе (“појасеви”) ових I профила који су међусобно спојени главном плочом стуба.

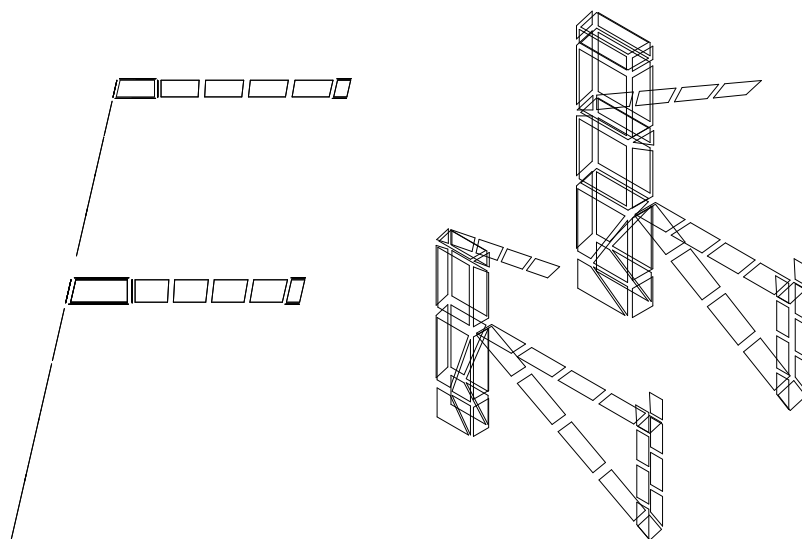


Слика 11.2 Подужна укружења (стопе) стубова са издвојеним коначним елементима

Као најзначајнији елементи стубова, који утичу на крутост, или преко којих се преноси оптерећење, моделирани су још и: кутијасто улежиштење стреле, конзолни носачи стреле кабине багеристе и њених затега, платформа са лежајем који носи хидроцилиндар Траке 2, косници и плоче (укрућења) и носач непокретног пакета котурача (сам врх стуба). Модели свих ових конструкција са издвојеним коначним елементима приказани су на следећим сликама.

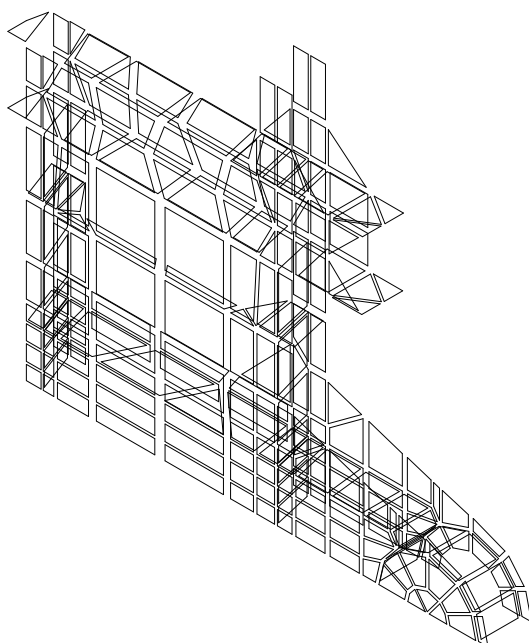


Слика 11.3 Улежиштење стреле радног точка са издвојеним коначним елементима, половина модела (један стуб)

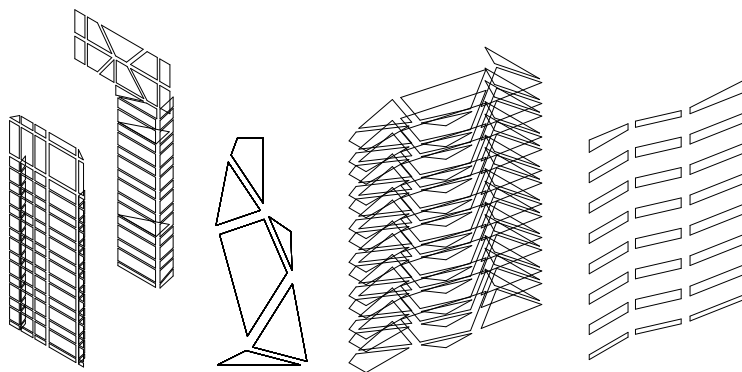


Слика 11.4 Конзолни носачи стреле кабине багеристе и њених затега са издвојеним коначним елементима

Кабина багеристе се везује само за десни стуб (гледано ка стрели радног точка), односно представља једини несиметричан елемент укључен у модел стубова.

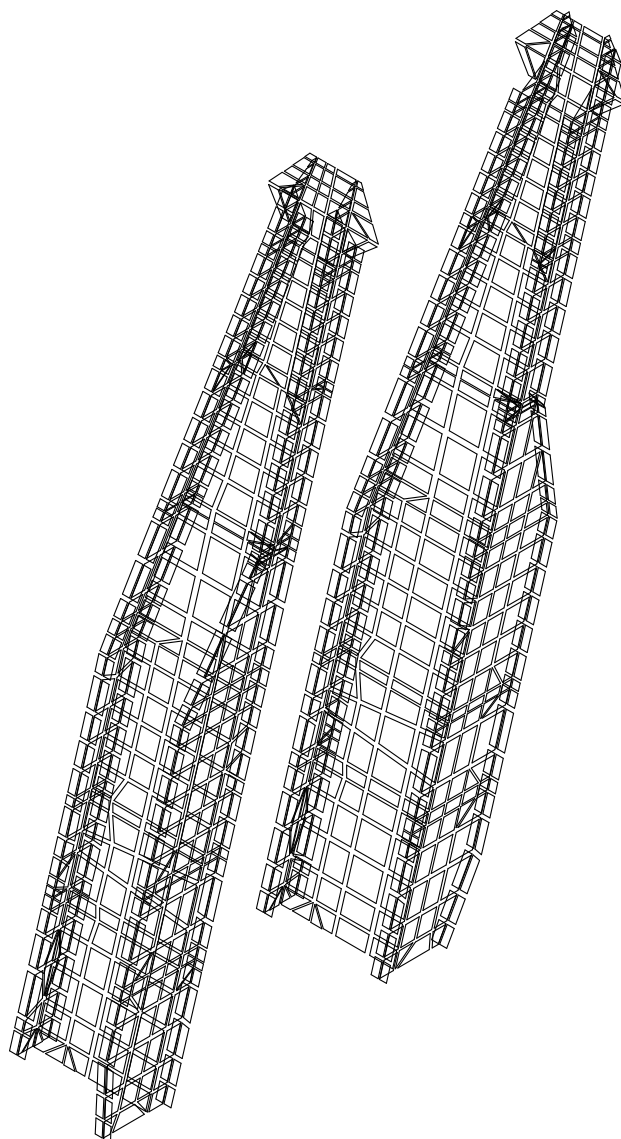


Слика 11.5 Платформа са лежајем Траке 2 са издвојеним коначним елементима, половина модела (један стуб)



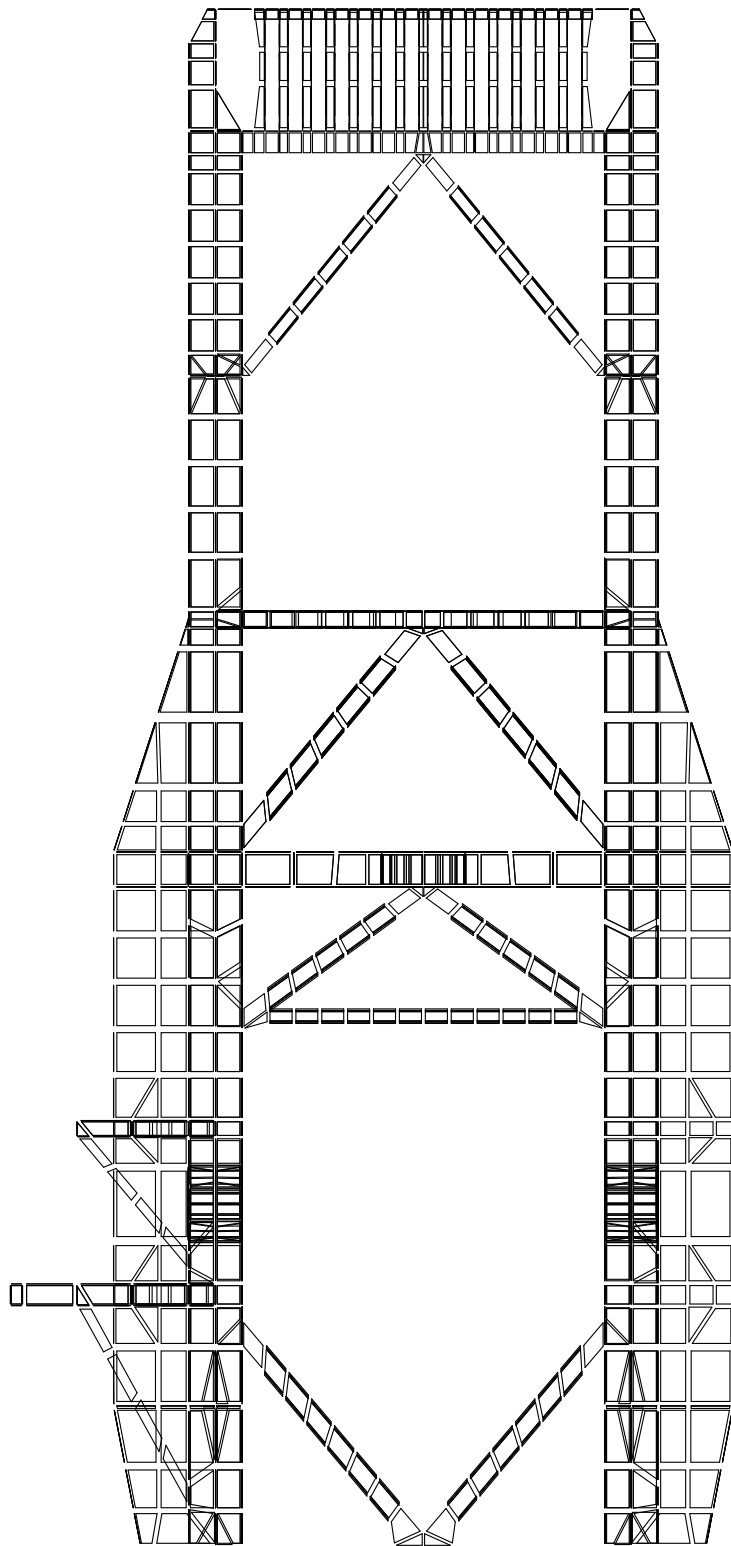
Слика 11.6 Носач непокретног пакета котурача са издвојеним коначним елементима, половина модела (један стуб)

На Слици 11.7 приказана је основна носећа структура стубова багера SchRs 630.

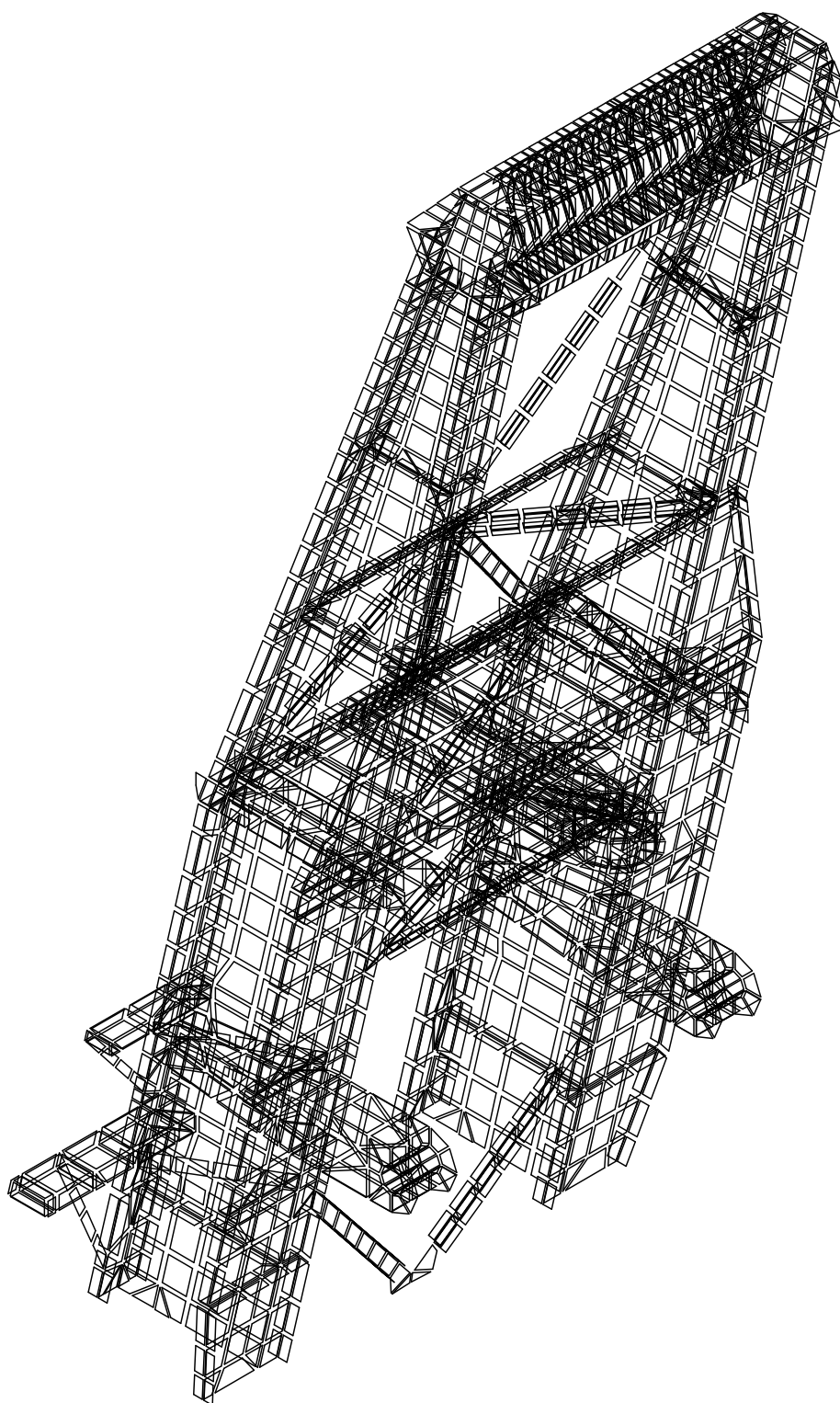


*Слика 11.7 Основна носећа структура стубова са издвојеним коначним
елементима*

На Слици 11.8 приказани су стубови багера SchRs 630 са свим припадајућим елементима који утичу на крутост стубова као носеће конструкције, као и елементима потребним за унос оптерећења.

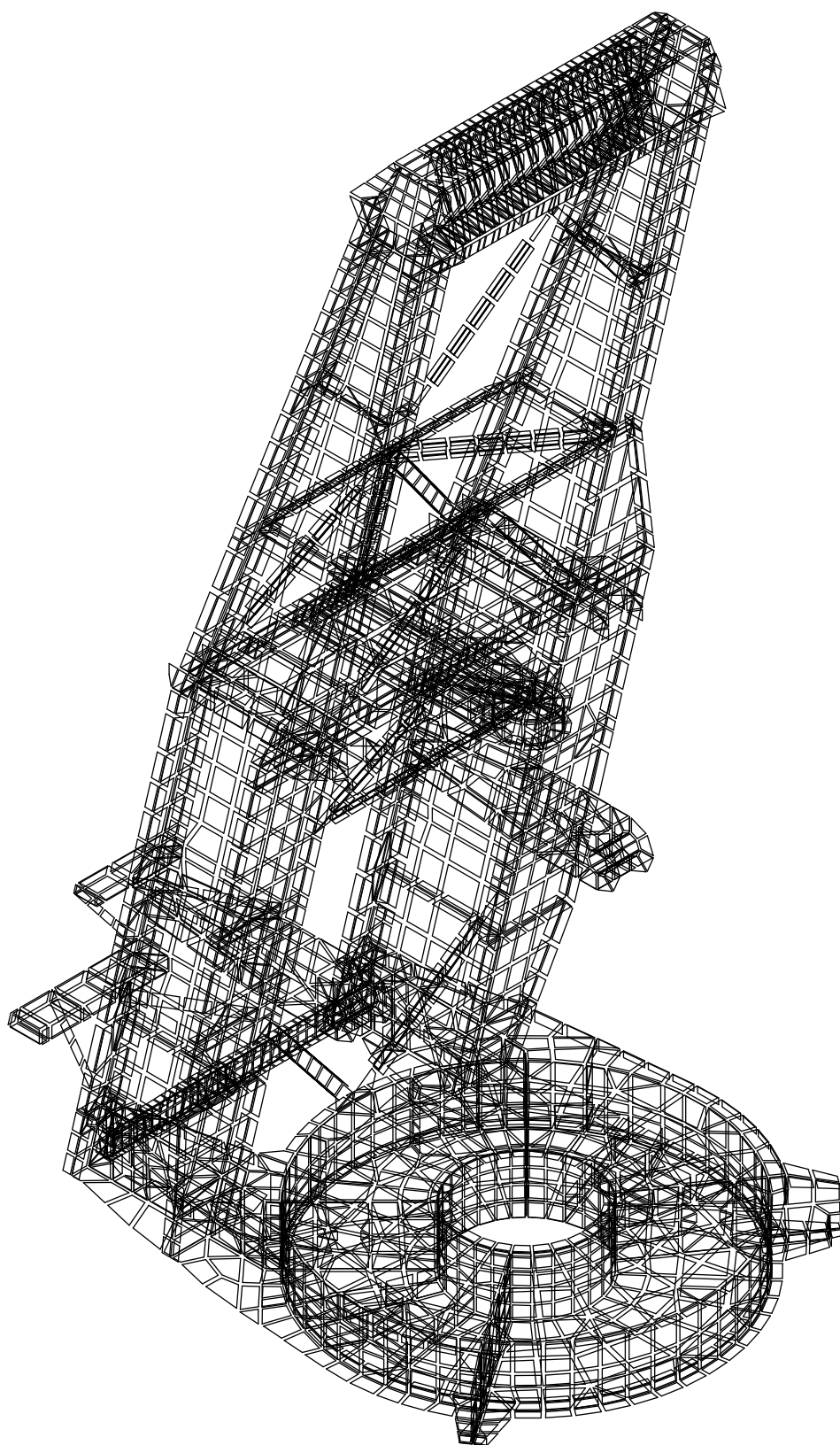


*Слика 11.8а Стубови багера са издвојеним коначним елементима, поглед од
радног точка*



Слика 11.86 Стубови багера са издвојеним коначним елементима, просторни изглед

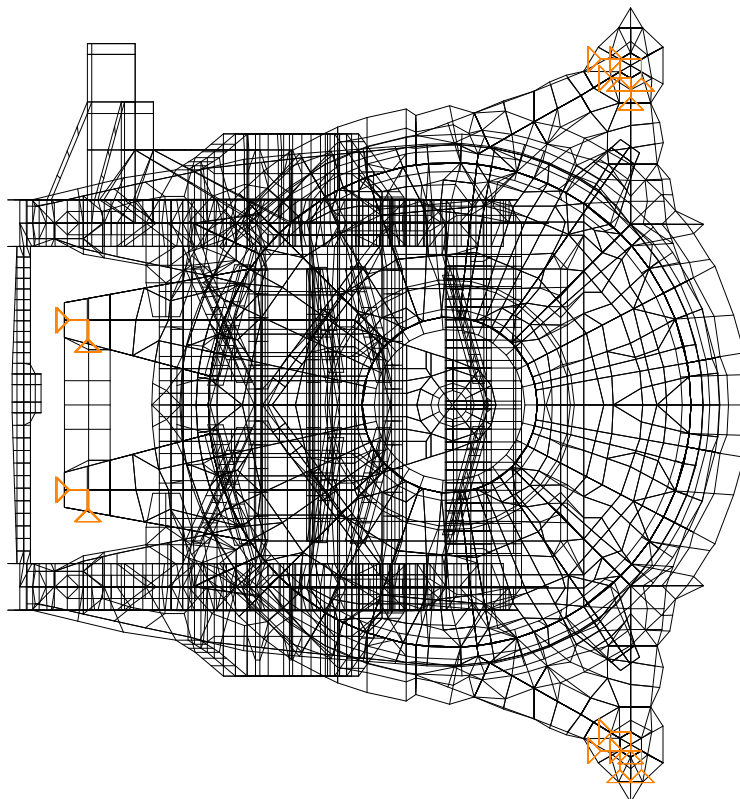
На Слици 11.9 приказани су обртна платформа и комплетни стубови.



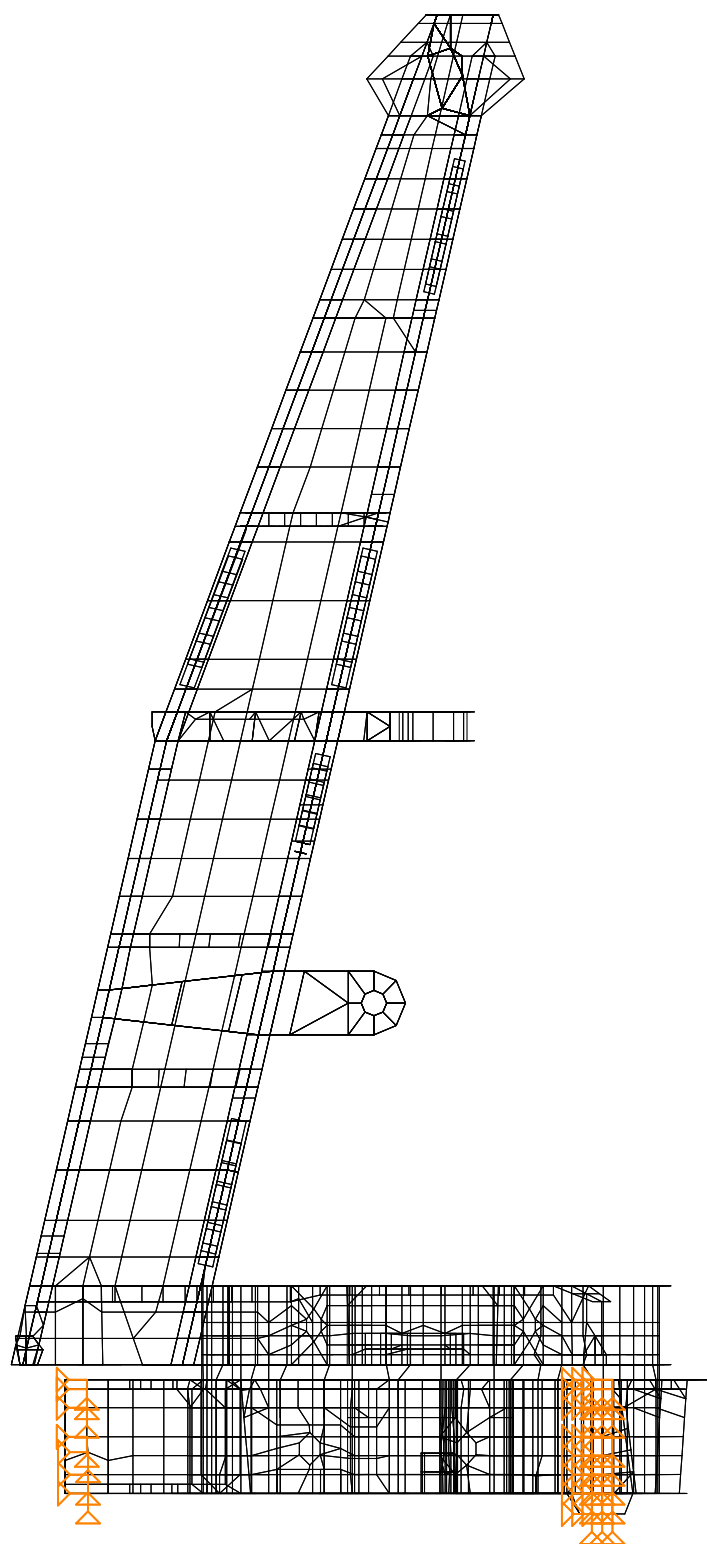
Слика 11.9 Обртна платформа са комплетним стубовима

11.2 Статички прорачун целовите конструкције

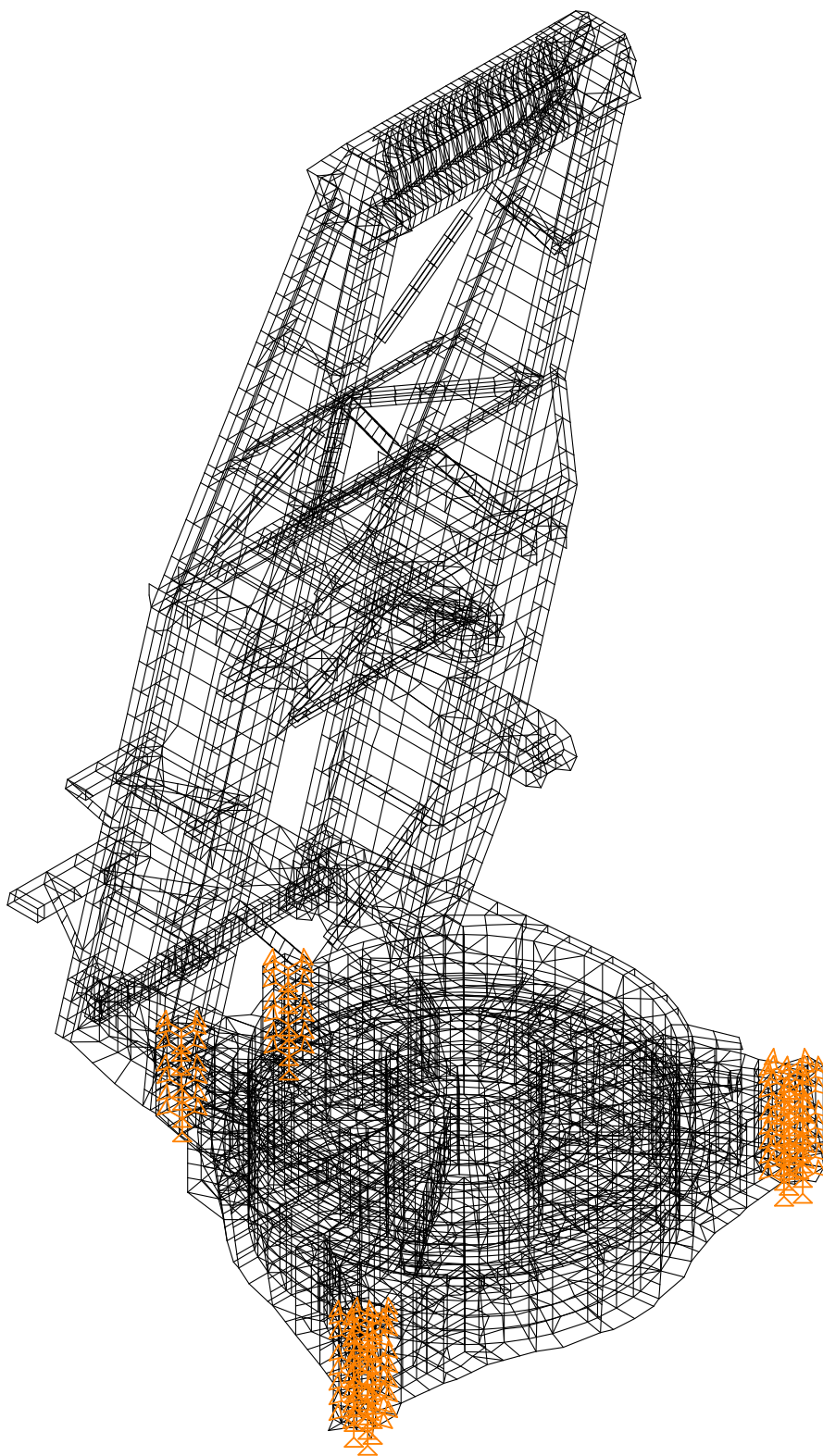
На слици 11.10 приказан је прорачунски модел целовите конструкције (са ослонцима) доње градње и обртне платформе са комплетним стубовима багера SchRs 630, које су међусобно спојене лежајем.



Слика 11.10а Прорачунски модел са ослонцима целовите конструкције доње градње, обртне платформе и комплетних стубова багера SchRs 630, пројекција на хоризонталну раван



Слика 11.10б Прорачунски модел са ослоњцима целовите конструкције доње градње, обртне платформе и комплетних стубова багера SchRs 630, бочна раван



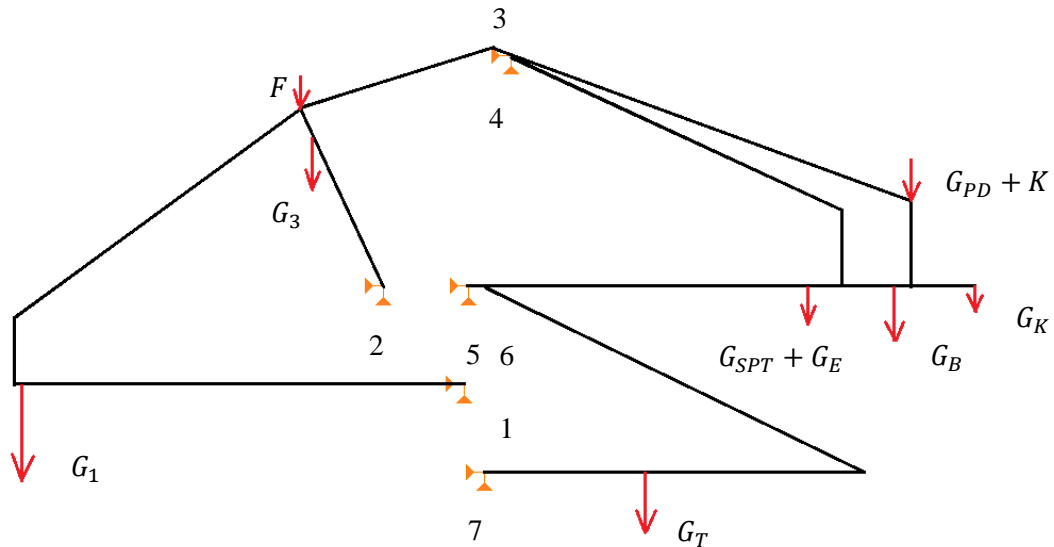
Слика 11.10в Прорачунски модел са ослоњцима целовите конструкције доње градње, обртне платформе и комплетних стубова багера SchRs 630, просторни изглед

11.2.1 Случајеви оптерећења целовите конструкције, шеме оптерећења и прорачунски модели

Статички прорачун ове конструкције је рађен за два случаја оптерећења. Првим прорачунским случајем обухваћено је оптерећење од сопствене тежине свих важнијих елемената који се “каче” на стубове багера и за овај прорачунски модел представљају спољашња оптерећења. Осим тога, овим случајем оптерећења обухваћено је оптерећење од сопствене тежине стубова, горње, доње градње и лежаја. Други прорачунски случај обухвата све што је обухваћено првим прорачунским случајем, а додато је и радно оптерећење у виду силе копања и запрљања радног точка.

Први случај оптерећења, шема оптерећења и прорачунски модел

Још једном, као први случај оптерећења узете су сопствене тежине свих елемената који се “каче” на стубове багера и сопствене тежине стубова, горње, доње градње и лежаја. Сопствене тежине елемената који се “каче” на стубове багера за усвојени прорачунски модел који се састоји од стубова, горње и доње градње багера представљају спољашња оптерећења која делују на одређеним местима (најчешће су то лежајеви). Да би се израчунали интензитети тих сила формирана је упрошћени (раванска) шема оптерећења (Слика 11.11). Оно што је овде названо шемом оптерећења, подразумева један дискретни тренутак у кретању (раду) када су стрела радног точка и стрела противтега хоризонталне (основни положај при прорачунавању стабилности багера).



Слика 11.11 Упростићена шема оптерећења багера, сопствене тежине елемената који се “каче” на стубове

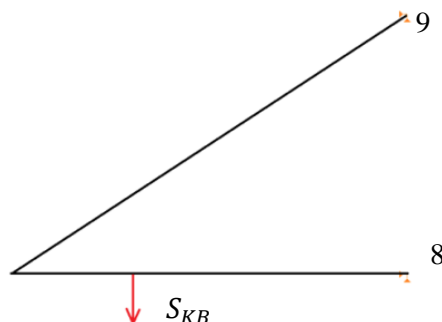
На претходној слици ослонац обележен бројем 1 је улежиштење стреле радног точка, бројем 2 улежиштење јарма, бројем 3 непокретни пакет котурача оптерећен ужадима, бројем 4 место “качења” затега стреле противтега, бројем 5 улежиштење стреле противтега, бројем 6 улежиштење хидроцилиндра на ком виси Трака 2, бројем 7 лежај Траке 2 на горњој плочи горње градње. Циљ прављења кинематског модела јесте да се добију реакције у овим ослонцима и да се оне унесу на прорачунски модел као спољашња оптерећења.

Стрела радног точка и јарам су моделирани као круте греде, затега стреле радног точка су моделиране елементом штапа, а њихова површина попречног пресека је прочитана из пројектне документације. Између пакета покретних котурача (на јарму) и пакета непокретних котурача (на врху стуба) ушнирана су ужад (укупан број кракова је 24). Она су такође моделирана елементом штапа чија је укупна површина попречног пресека збир површина попречних пресека свих кракова. Затезе стреле противтега (пар) и ужад стреле противтега (2 крака) такође су моделирани елементом штапа. Стрела противтега и Трака 2 моделиране су као круте греде, а хидроцилиндар и уже на којем виси Трака 2 моделирани су елементом штапа.

Сопствене тежине појединих елемената унете су у њиховим тежиштима. Са G_1 обележена је сопствена тежина стреле радног точка (носећа конструкција стреле,

оба погона, радни точак, транспортер T1, итд.), са G_3 обележена је сопствена тежина јарма, а са F сопствена тежина ужета лево од тачке 3, која представља позицију непокретног пакета котурача. Ознаком G_{SPT} обележена је сопствена тежина стреле противтега са газиштима, а G_E представља сопствену тежину електро постројења на стрели противтега и ова оптерећења су унета у истој тачки. Осим ова два, на стрелу противтега делују још и G_B сопствена тежина баласта, G_{PD} сопствена тежина погона дизања, G_K сопствена тежина крана и K сопствена тежина ужета десно од тачке 3. Ознаком G_T обележена је сопствена тежина Траке 2 (носећа структура, транспортер T2 итд.). Вредности свих ових сила (и њихова места дејства) прочитане су из пројектне документације за хоризонтални положај стреле радног точка и за случај када је Трака 2 у оси багера. Њихове вредности ће бити приказане табеларно (Табела 5.1).

Шема оптерећења стреле кабине багеристе, приказана је на Слици 5.30.



Слика 11.12 Шема оптерећења стреле кабине багеристе

Стрела кабине багеристе моделирана је крутом гредом, а затеге су моделиране као елемент штапа (површина попречног пресека узета из пројектне документације). Ознакама 8 и 9 обележено је улежиштење стреле кабине багеристе и тачка качења затега стреле кабине багеристе (непокретни ослонци). Ознаком S_{KB} на претходној слици обележена је сопствена тежина стреле кабине багеристе, а њена вредност је приказана у Табели 11.1. Треба напоменути да оптерећење од сопствене тежине кабине багеристе представља једино асиметрично оптерећење за овај случај оптерећења, а делује на десни стуб (гледано ка радном органу).

Табела 11.1 Сопствене тежине свих елемената који се “каче” на стубове [107]

Сопствена тежина елемента (ознака)	Интензитет силе [kN]
G_1	2200,4
G_3	305,14
F	11,171
$G_{SPT} + G_E$	387
G_B	1281
$G_{PD} + K$	305,055
G_K	64,5
G_T	1050
S_{KB}	123,333

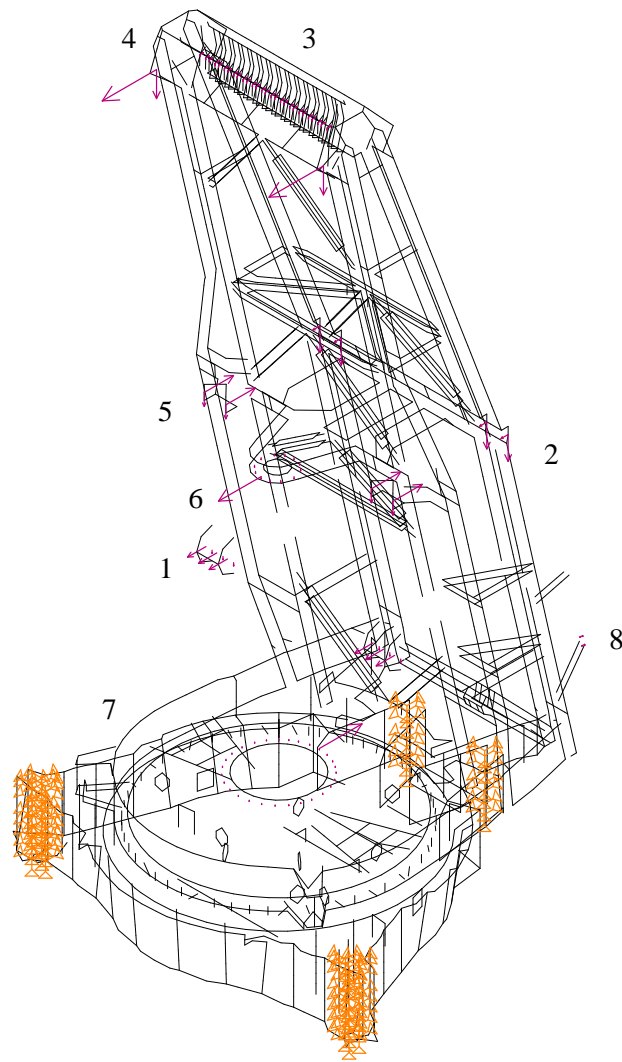
Из упрошћене шеме оптерећења, нумеричким прорчуном, добијене су реакције у већ поменутих ослоњцима (Слика 11.11), као и у улежиштењу стреле кабине багеристе (Слика 11.12). Реакције су дате у виду сила у односу на осе коначног елемента коме припада одговарајући чвор (ослонац), а накнадним прерачунавањем дошло се до вредности сила у правцу хоризонталне осе X (правац осе багера, смер од стубова ка центру) и вертикалне осе Z (правац силе Земљине теже, смер супротан ос смера силе Земљине теже). Добијене вредности реакција ослонаца преведене у спољашња оптерећења стубова као излазни податак шеме оптерећења, као и број чворова на конструкцији у које се расподељују ове силе дат је у Табели 11.2.

Табела 11.2 Спољашња оптерећења стубова, излазни податак шеме оптерећења, први случај оптерећења

Место дејства оптерећења	Правац и смер	Број тачака дејства	Интензитет оптерећења у тачки [kN]	Укупан интензитет [kN]
1. Улежиштење стреле радног точка	X	6	389,8	2338,8
	$-Z$	6	61,6	369,6
2. Улежиштење јарма	X	4	149,75	599
	$-Z$	4	495,5	1982

3. Непокретни пакет котурача	$-X$	28	77,7	2175,6
	$-Z$	28	33,5	938
4. Затеге стреле противтега	X	2	1159	2318
	$-Z$	2	535,5	1071
5. Улежиштење стреле противтега	$-X$	4	625,5	2502
	$-Z$	4	256	1024
6. Улежиштење хидроцилиндра	X	1	907	907
	$-Z$	12	36,9	442,8
7. Лежај “траке 2”	$-X$	1	909	909
	$-Z$	28	21,68	607,04
8. Улежиштење кабине багеристе	X	2	64,85	129,7
	$-Z$	2	18,78	37,56

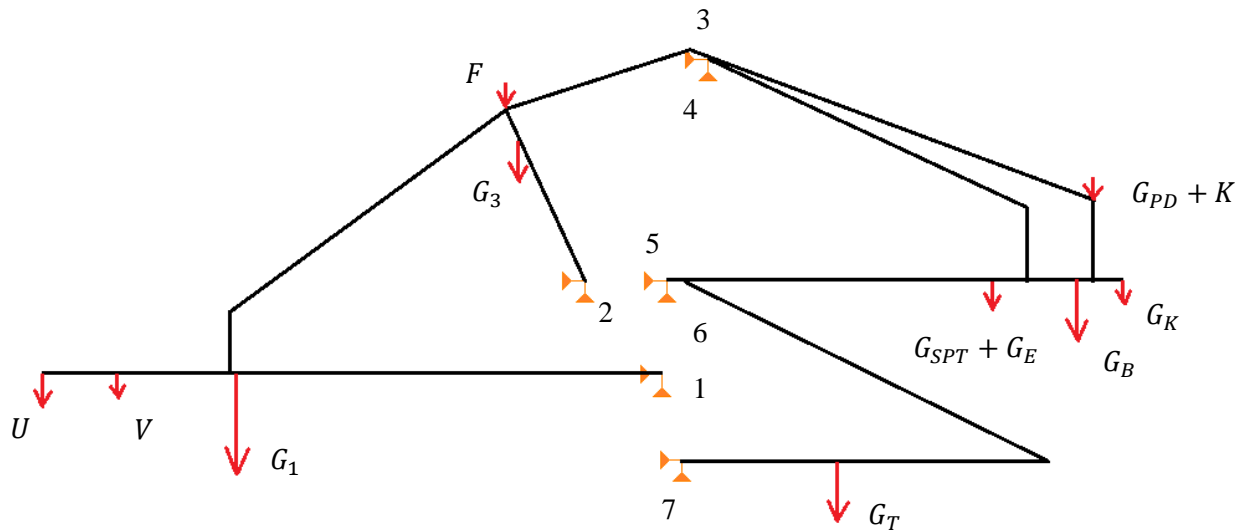
Ове силе унете су као спољашња оптерећења у прорачунски модел (приказан на Слици 11.13) на којем су бројевима означена места дејства оптерећења из претходне табеле. На слици, као и из табеле, може се уочити да су хоризонталне силе хидроцилиндра и Траке 2 унете као концентрисане силе у тачки, што локално може изазвати концентрацију напона у тим тачкама, а нема битнији утицај на цео прорачун.



Слика 11.13 Прорачунски модел за први случај оптерећења, ослонци и оптерећења

Други случај оптерећења, шема оптерећења и прорачунски модел

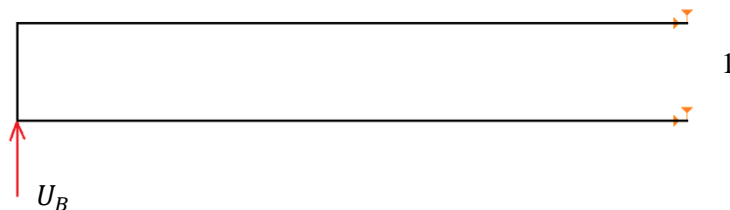
Други прорачунски случај обухвата све што је обухваћено првим случајем (сопствене тежине свих елемената који се “каче” на стубове багера и сопствене тежине стубова, горње, доње градње и лежаја), као и радно оптерећење у виду силе копања и запрљања радног точка. Упростијена раванска шема оптерећења је приказана на Слици 11.14.



Слика 11.14 Упростићена шема оптерећења багера, сопствене тежине елемената који се “каче” на стубове и радно оптерећење

На претходној слици задржане су исте ознаке одговарајућих елемената као на Слици 11.11. Одговарајуће сопствене тежине елемената (Табела 11.1) усвојене су и за први и за други случај оптерећења. На Слици 11.14 ознаком U обележена је обимна сила копања коју машина може да пружи, а обухвата нормални отпор копања и дизање материјала. Ознаком V означено је запрљање радног точка.

Осим ове шеме оптерећења и шеме оптерећења стреле кабине багеристе (Слика 11.12), која је иста за оба случаја оптерећења, овде је потребно направити још једну врло једноставну шему оптерећења због бочне силе копања. Наиме, укупна сила копања расподељује се у реалним односима на три силе (вертикална 1, обимна 0,3 и чеона 0,15) [11, 12]. Кинематски модел стреле багера у хоризонталној равни приказан је на Слици 11.15.



Слика 11.15 Шема оптерећења хоризонталне равни стреле багера, утицај бочне силе копања

На Слици 11.15, рам који представља стрелу багера моделиран је крутим гредама са циљем да се добију реакције ослонаца који представљају улежиштења стреле.

Сила обележена као U_B представља бочну силу копања и може бити смера као на слици, или супротног, у зависности од тога да ли багер копа у једну или у другу страну. Сви даљи прорачуни биће рађени са усвојеним смером копања као на Слици 11.15.

Чеона сила копања U_{ζ} делује у правцу стреле багера, у смеру од блока ка улежиштењу стреле. Она је само пренета у улежиштење стреле, као хоризонтална сила у правцу осе X .

Вредности ових сила приказане су у Табели 11.3.

Табела 11.3 Сила копања и запрљање радног точка [107]

Сила (ознака)	Интензитет силе [kN]
U	216
V	70,68
U_B	64,8
U_{ζ}	32,4

Спољашња оптерећења стубова за други случај оптерећења приказана су у Табели 11.4.

Табела 11.4 Спољашња оптерећења стубова, излазни податак шема оптерећења, други случај оптерећења

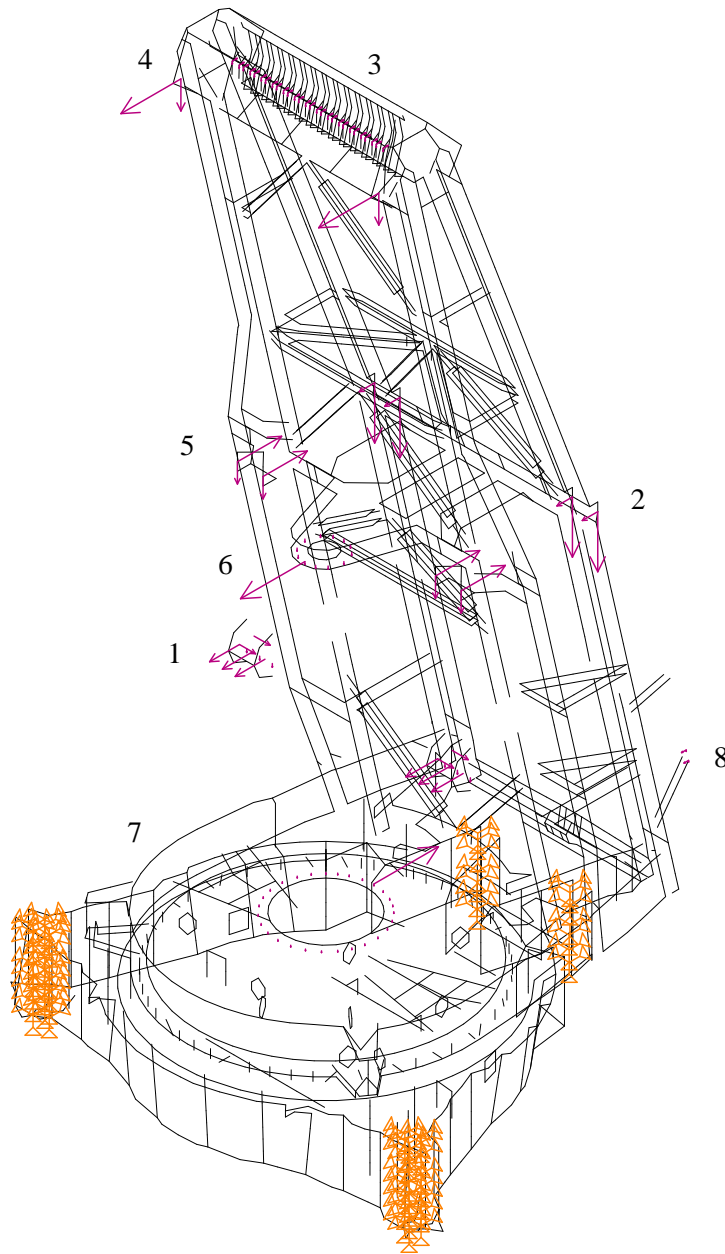
Место дејства оптерећења	Правац и смер	Број тачака дејства	Интензитет оптерећења у тачки [kN]	Укупан интензитет [kN]
1. Улежиштење стреле радног точка	X	3	443,4	2594,4
		3	421,4	
	Y	4	226	904
	$-Z$	6	48	288
2. Улежиштење јарма	X	4	217	868
	$-Z$	4	735	2940
3. Непокретни пакет котурача	$-X$	28	68,6	1920,8
	$-Z$	28	37,5	1050
4. Затеге стреле противтега	X	2	846,5	1693
	$-Z$	2	391	782

5. Улежиштење стреле противтега	$-X$	4	622,5	2490
	$-Z$	4	272,25	1089
6. Улежиштење хидроцилиндра	X	1	907	907
	$-Z$	12	36,9	442,8
7. Лежај “траке 2”	$-X$	1	909	909
	$-Z$	28	21,68	607,04
8. Улежиштење кабине багеристе	X	2	64,85	129,7
	$-Z$	2	18,78	37,56

Из претходне табеле може се уочити да су лево и десно (гледано ка радном органу) улежиштења стреле радног точка оптерећена силама различитих интензитета. Разлог за то је што су реакције улежиштења стреле од бочне силе у X правцу (Слика 11.15) истих интензитета, а супротних смерова. Тако се у левом ослонцу сабирају реакције ослонца од вертикалне и чеоне силе копања, а одузима се реакција од бочне силе копања, док се у десном ослонцу све ове реакције сабирају. У улежиштењу стреле додата је и сила у Y правцу која потиче од бочне силе копања.

Може се такође уочити, упоређивањем Табеле 11.4 са Табелом 11.2, да се реакције у улежиштењу хидроцилиндра и Траке 2 нису промениле, а непромењене су остале и реакције у улежиштењу стреле кабине багеристе.

Силе из Табеле 11.4, унете су као спољашња оптерећења у прорачунски модел, приказан на Слици 11.16. Бројевима су означена места дејства ових оптерећења.



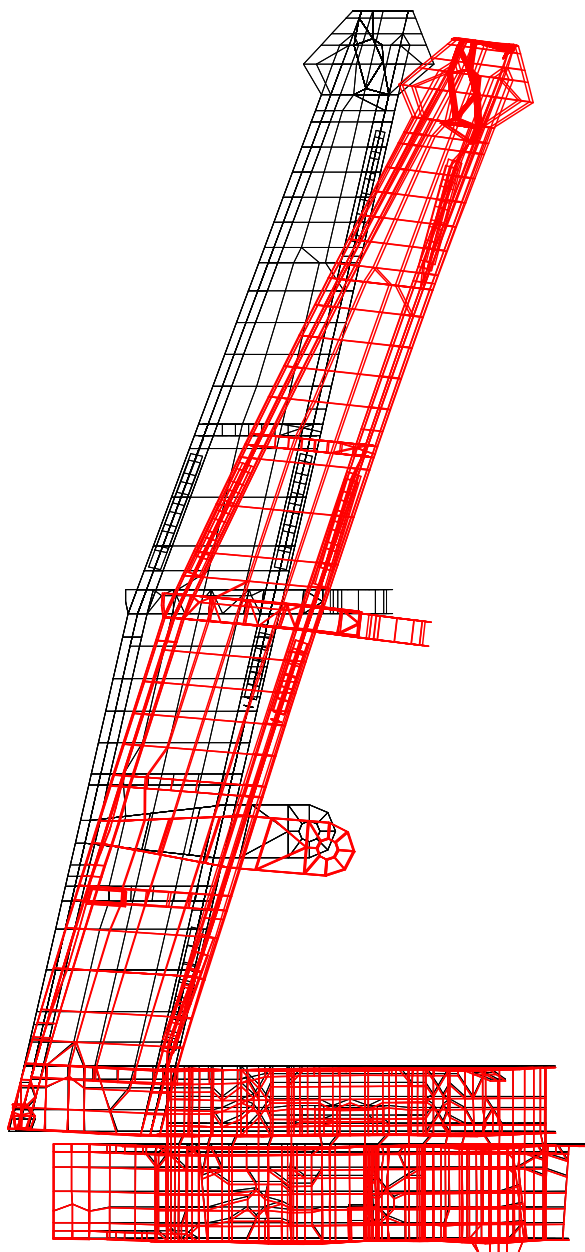
Слика 11.16 Прорачунски модел за други случај оптерећења, ослонци и оптерећења

11.2.2 Резултати нумеричке анализе целовите конструкције

Резултате статичког прорачуна представљају поља померања, деформација и напона структуре под задатим статичким оптерећењем.

Први случај оптерећења, резултати нумеричке анализе

На Слици 11.17 приказано је померање чворних тачака модела услед дејства сила које представљају сопствене тежине свих елемената који се “каче” на стубове и сопствене тежине стубова, горње и доње градње (то подразумева први случај оптерећења).

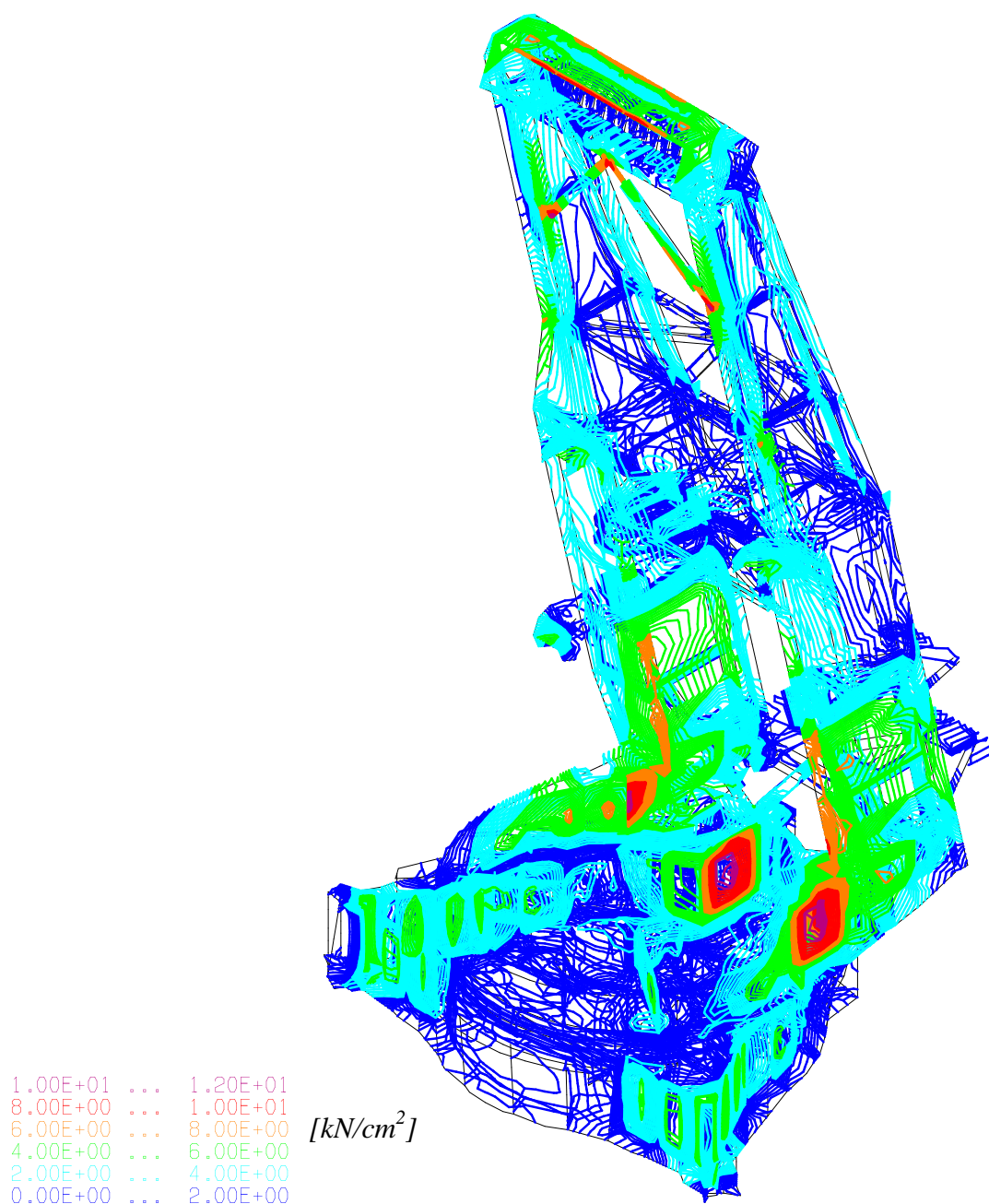


Максимална деформација (врх стубова) износи 8,896 cm

Слика 11.17 Деформација модела, први случај оптерећења

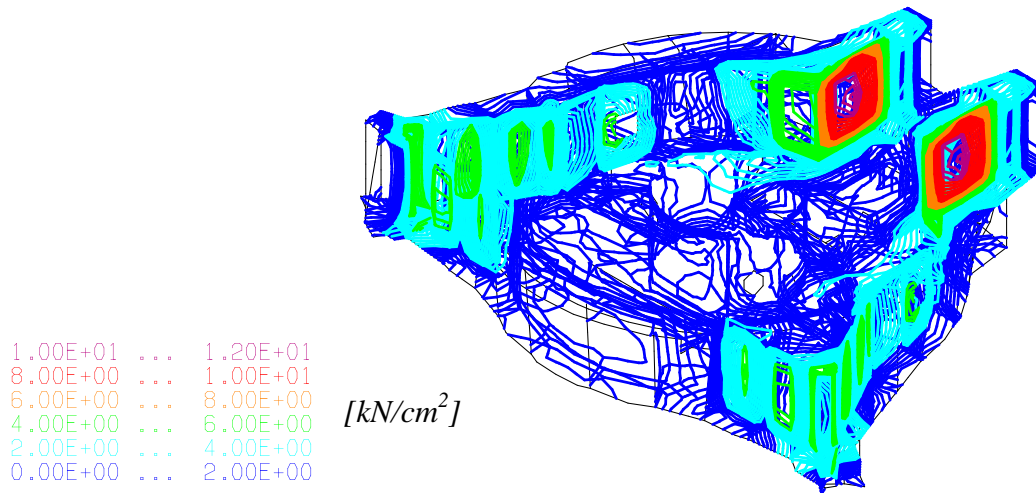
Са претходне слике може се уочити да су практично највећа померања тачака врха стуба, што је у складу са физикалношћу посматраног проблема. Осим врха стуба знатна померања имају тачке платформе на коју се качи хидроцилиндар Траке 2.

Поље напона за први прорачунски случај оптерећења приказано је на Слици 11.18.



Слика 11.18 Напонско поље целог модела, први случај оптерећења

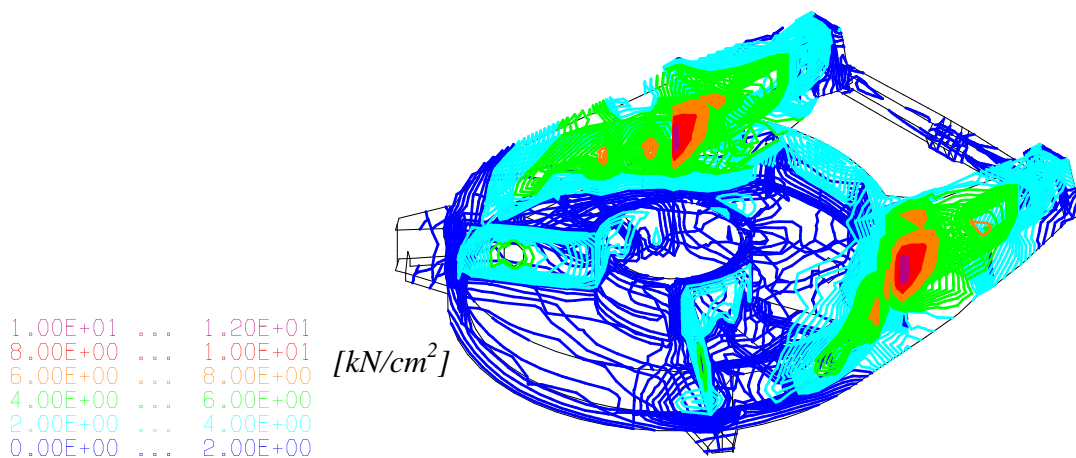
Напонско поље са претходне слике је симетрично, као што је и очекивано, јер је оптерећење у овом случају готово симетрично (једино асиметрично оптерећење је сопствена тежина стреле кабине багеристе). У наставку ће бити приказана напонска слика сваке од група градње. Напонско поље целе доње градње приказано је на Слици 11.19.



Слика 11.19 Доња градња, напонско поље, први случај оптерећења

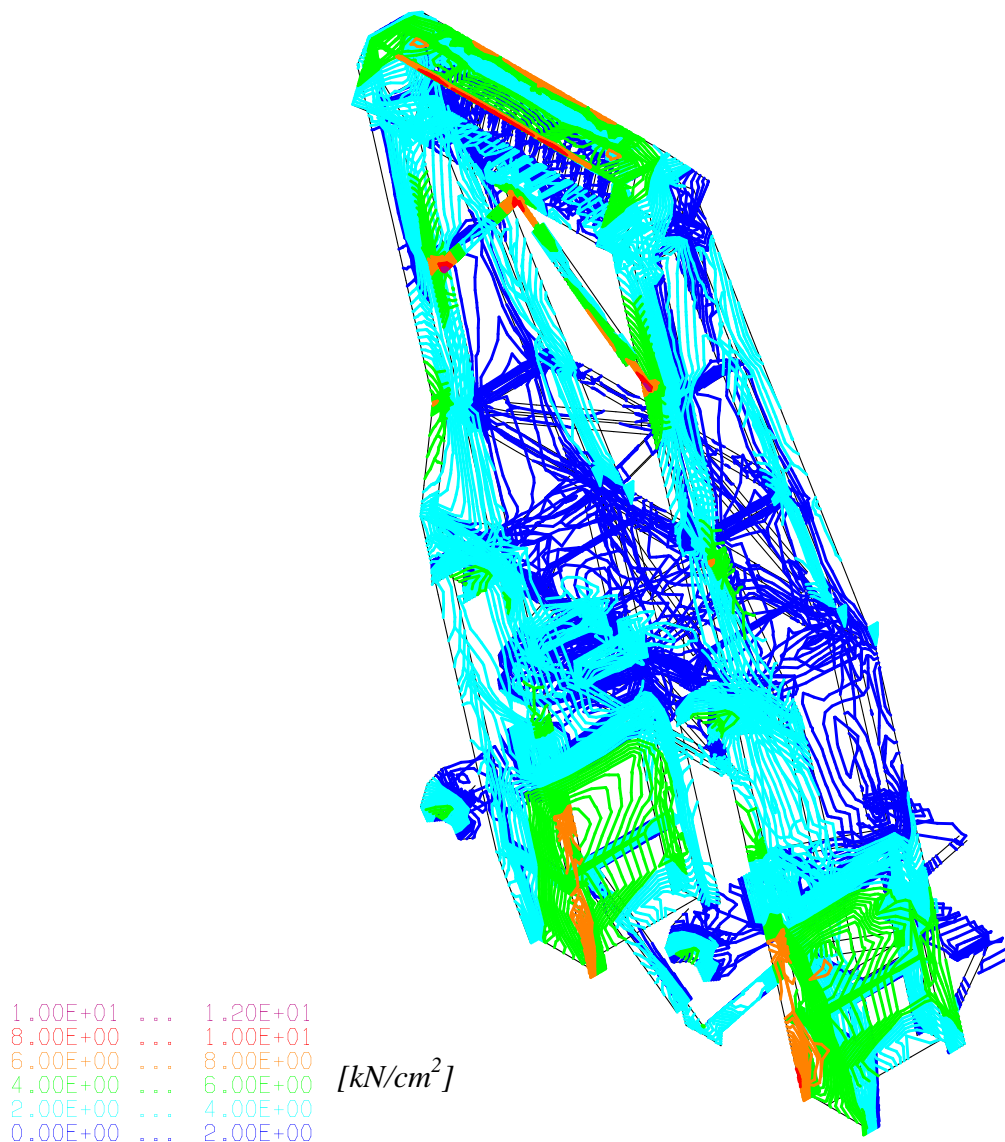
Са претходне слике може се уочити да проблематичну зону (место велике концентрације напона) представљају вертикална ребра изнад ослонца гусенице (“самица”).

На Слици 11.20 приказано је напонско поље обртне платформе (горња градња без стубова).



Слика 11.20 Обртна платформа, напонско поље, први случај оптерећења

На Сlici 11.21 приказано је напонско поље конструкције стубова.



Слика 11.21 Стубови, напонско поље, први случај оптерећења

Са Сlike 11.21 може се уочити концентрација напона на споју горњих косника и главне конструкције стубова. Та концентрација напона је локалног карактера и може се приписати чворној плочи којом се косник везује за стуб. На главној конструкцији стубова уочавају се извесне концентрације напона у доњој зони на бочном лиму, на месту везивања доњег косника који се везује у стубове и горњу плочу горње градње, на месту сужења бочних плоча стубова и на месту везивања горњег косника. Сви ти напони нису критичног интензитета. Извесна проблематична концентрација напона уочава се на самом врху стуба (пакет

непокретних котурача), изразито је локалног карактера и приписује се лошем уносу оптерећења (концентрисано оптерећење уместо континуалног) и недовољно прецизном локалном моделирању те зоне.

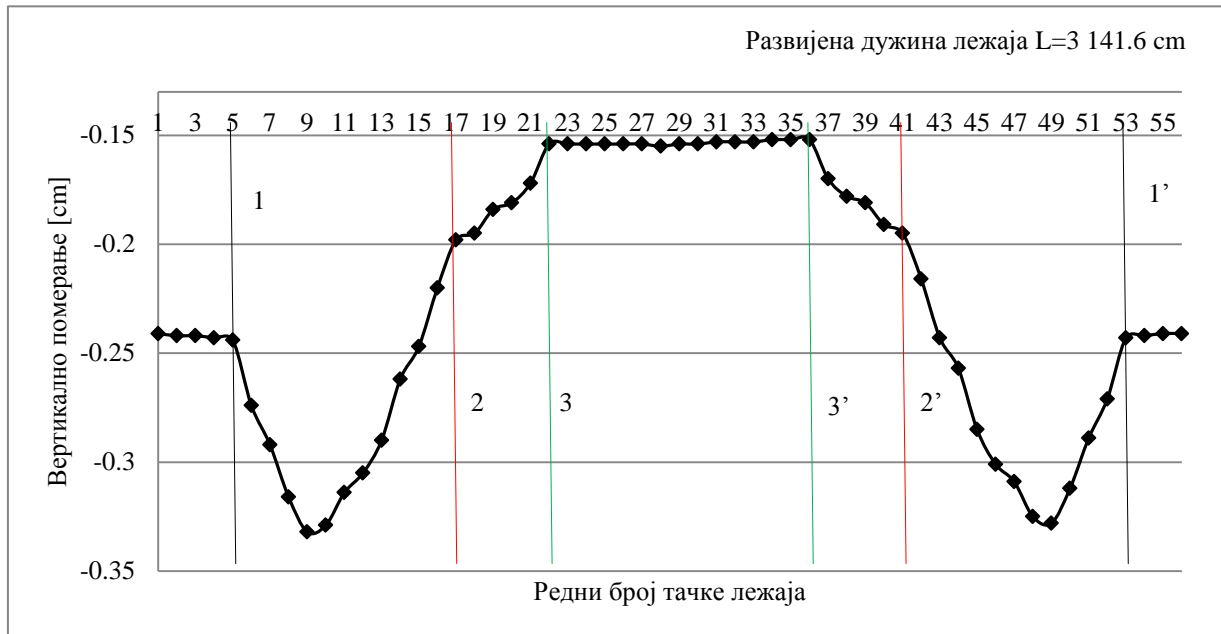
У Табели 11.5 приказано је померање чворних тачака горње и доње стазе аксијалног лежаја на местима везивања штапова (кугли) за први случај оптерећења.

Табела 11.5 Померање чворних тачака горње и доње стазе аксијалног лежаја, први случај оптерећења

Редни број тачке (са Сlike 5.19)	Померање тачке [cm]					
	Доња стаза			Горња стаза		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1.	0,016	0,002	-0,241	0,001	0,003	-0,241
2.	0,017	-0,001	-0,242	0,001	0,003	-0,242
3.	0,019	-0,003	-0,242	-0,001	0,002	-0,243
4.	0,022	-0,005	-0,243	-0,003	0,003	-0,244
5.	0,022	-0,006	-0,244	-0,009	0,005	-0,251
6.	0,014	0	-0,274	-0,015	0,005	-0,274
7.	0,010	0,001	-0,292	-0,016	0,005	-0,292
8.	0,006	0,001	-0,316	-0,015	0,005	-0,314
9.	0,002	0,001	-0,332	-0,012	0,005	-0,335
10.	-0,001	0,001	-0,329	-0,010	0,009	-0,330
11.	-0,004	0	-0,314	-0,007	0,013	-0,315
12.	-0,005	-0,001	-0,305	-0,003	0,013	-0,308
13.	-0,006	-0,003	-0,290	0,002	0,012	-0,290
14.	-0,006	-0,008	-0,262	0,007	0,010	-0,261
15.	-0,006	-0,010	-0,247	0,009	0,009	-0,257
16.	-0,009	-0,018	-0,220	0,012	0,008	-0,223
17.	-0,009	-0,022	-0,198	0,014	0,008	-0,214
18.	-0,009	-0,020	-0,195	0,015	0,009	-0,197
19.	-0,008	-0,019	-0,184	0,017	0,010	-0,193
20.	-0,008	-0,017	-0,181	0,018	0,010	-0,184
21.	-0,008	-0,017	-0,172	0,020	0,011	-0,176
22.	-0,006	-0,019	-0,154	0,018	0,009	-0,160

23.	-0,005	-0,017	-0,154	0,016	0,005	-0,155
24.	-0,001	-0,012	-0,154	0,014	0,003	-0,154
25.	0,002	-0,009	-0,154	0,012	0,001	-0,154
26.	0,004	-0,006	-0,154	0,009	-0,001	-0,154
27.	0,006	-0,003	-0,154	0,008	-0,001	-0,155
28.	0,007	-0,002	-0,155	0,006	-0,001	-0,155
29.	0,007	-0,001	-0,154	0,006	-0,001	-0,154
30.	0,006	0	-0,154	0,006	-0,001	-0,154
31.	0,006	0,001	-0,153	0,007	-0,001	-0,155
32.	0,003	0,004	-0,153	0,008	-0,002	-0,153
33.	0,001	0,007	-0,153	0,010	-0,003	-0,153
34.	-0,003	0,011	-0,152	0,011	-0,005	-0,153
35.	-0,006	0,016	-0,152	0,013	-0,007	-0,153
36.	-0,008	0,018	-0,152	0,015	-0,010	-0,158
37.	-0,010	0,016	-0,170	0,016	-0,012	-0,173
38.	-0,010	0,016	-0,178	0,015	-0,011	-0,180
39.	-0,010	0,018	-0,181	0,013	-0,010	-0,189
40.	-0,011	0,019	-0,191	0,011	-0,009	-0,193
41.	-0,012	0,021	-0,195	0,010	-0,008	-0,209
42.	-0,011	0,018	-0,216	0,008	-0,007	-0,219
43.	-0,009	0,010	-0,243	0,005	-0,007	-0,252
44.	-0,008	0,009	-0,257	0,003	-0,008	-0,257
45.	-0,008	0,005	-0,285	-0,002	-0,009	-0,285
46.	-0,007	0,003	-0,301	-0,006	-0,009	-0,302
47.	-0,006	0,002	-0,309	-0,010	-0,008	-0,310
48.	-0,002	0,002	-0,325	-0,012	-0,005	-0,325
49.	0	0,001	-0,328	-0,014	-0,001	-0,331
50.	0,005	0,002	-0,312	-0,016	0	-0,310
51.	0,009	0,002	-0,289	-0,018	0	-0,289
52.	0,013	0,004	-0,271	-0,016	0,001	-0,271
53.	0,022	0,009	-0,243	-0,010	0,001	-0,249
54.	0,021	0,008	-0,242	-0,004	0,003	-0,243
55.	0,019	0,007	-0,241	-0,001	0,003	-0,242
56.	0,016	0,004	-0,241	0,001	0,003	-0,242

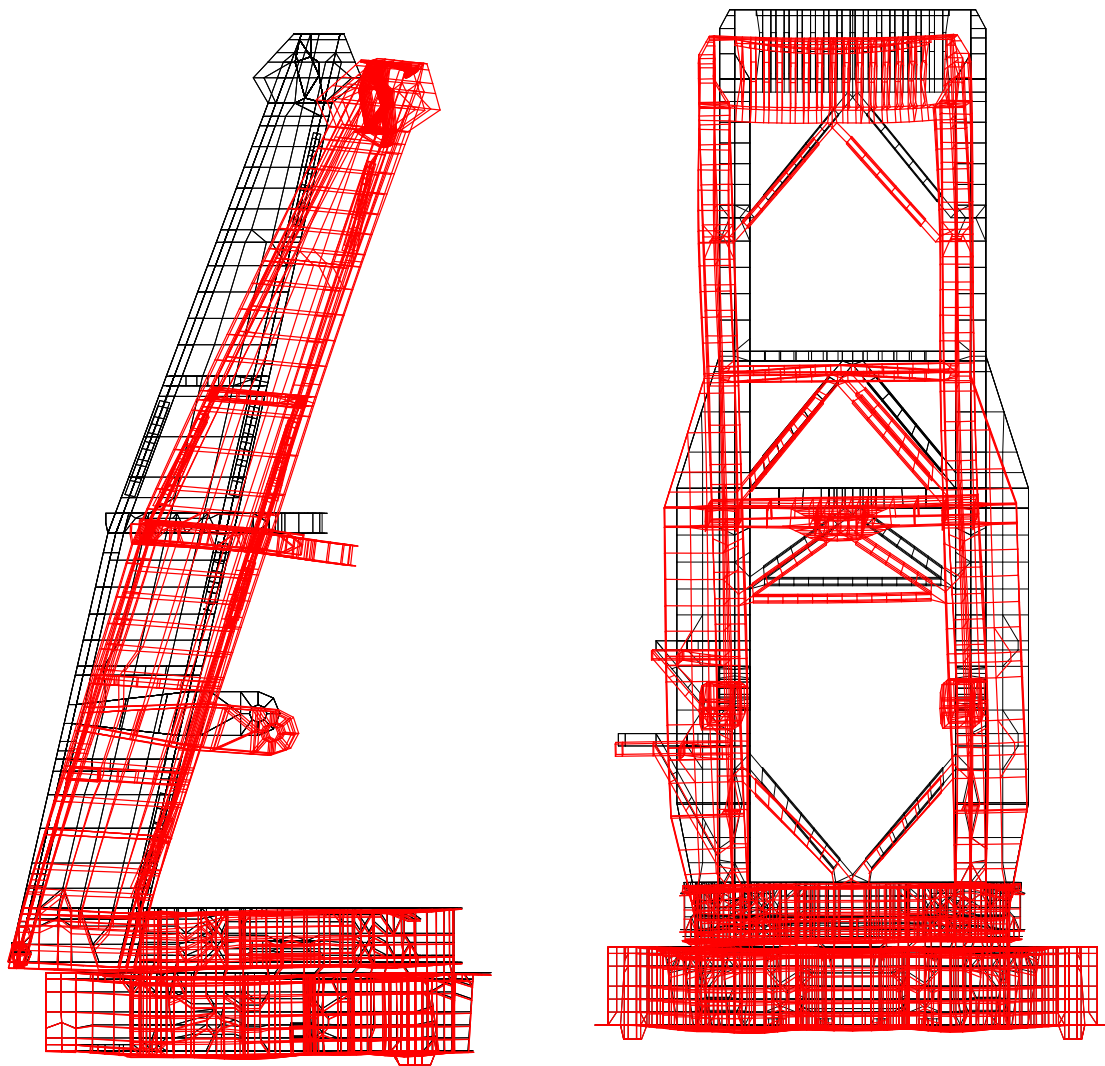
На Слици 11.22 графички је приказано вертикално померање тачака доње стазе лежаја.



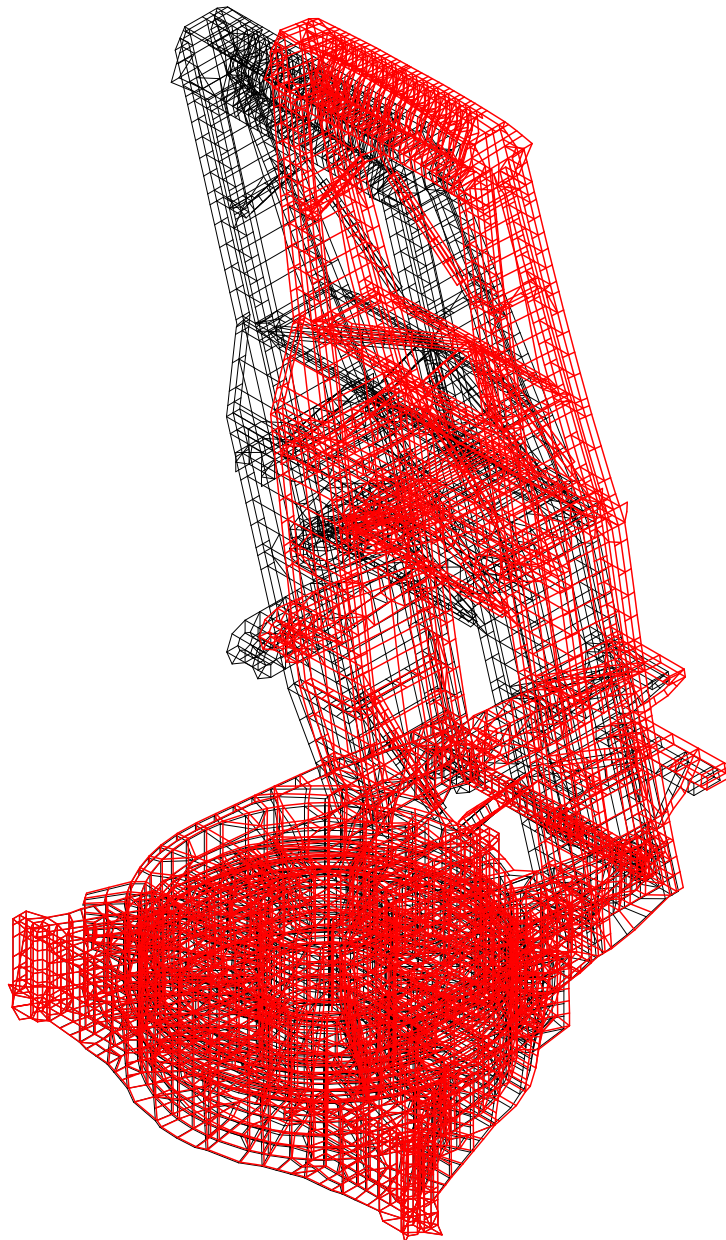
Слика 11.22 Вертикално померање тачака доње стазе лежаја, први случај оптерећења

Други случај оптерећења, резултати нумеричке анализе

На Слици 11.23 приказано је померање чворних тачака модела услед оптерећења названог другим случајем оптерећења. Осим дејства сила које представљају сопствене тежине свих елемената који се “каче” на стубове и сопствене тежине стубова, горње и доње градње (то подразумева први случај оптерећења), други случај оптерећења укључује и силу копања и запрљање радног точка.



Слика 11.23а Деформација модела, други случај оптерећења, бочна и чеона раван



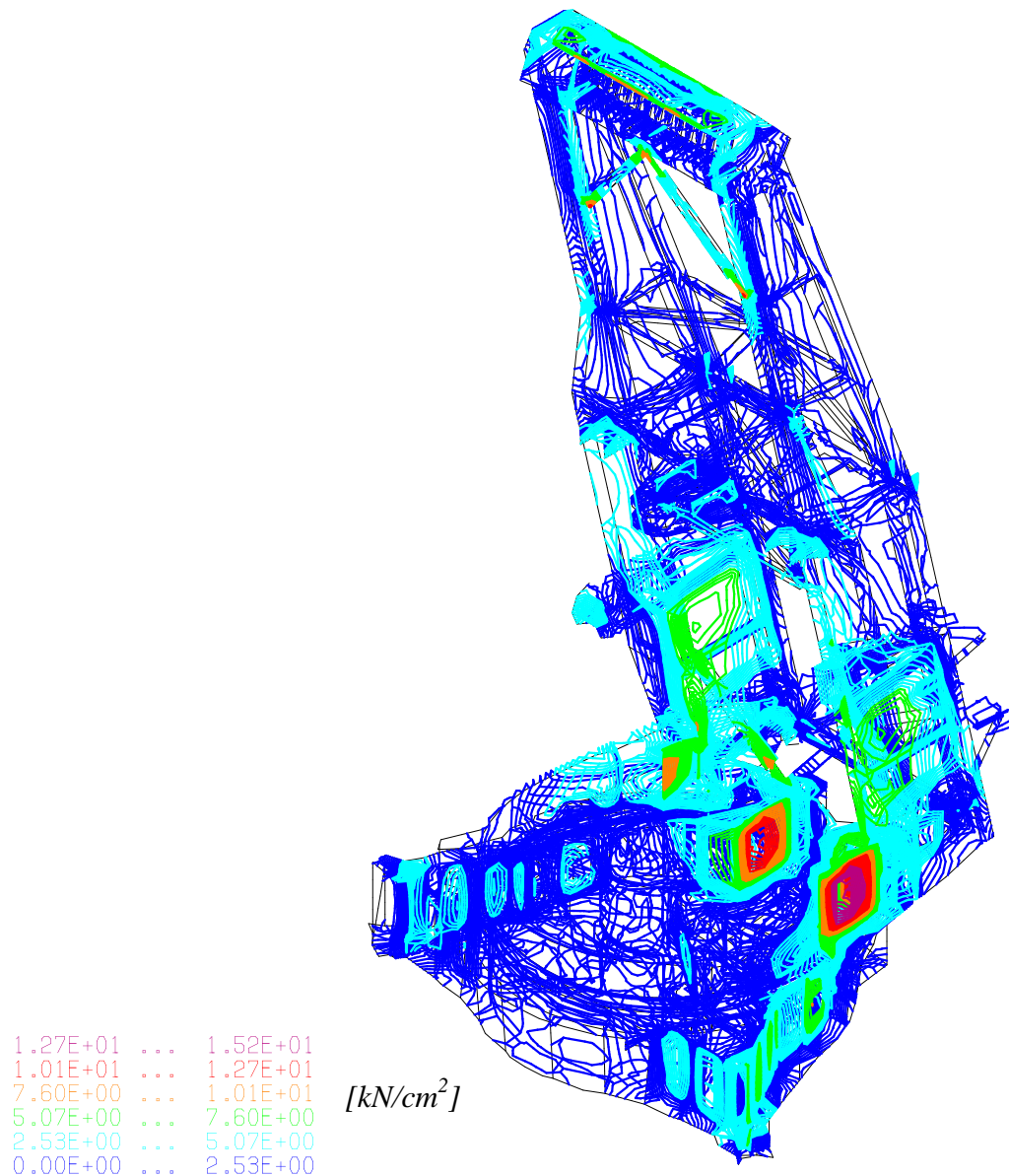
Максимална деформација (врх стубова) износи 5,962 cm

Слика 11.23б Деформација модела, други случај оптерећења, просторни изглед

Упоредјујући Сliku 11.23а,б и Сliku 11.17 (која представља померање модела под оптерећем сопствених тежина, без радног оптерећења) уочава се да су померања врха стуба мања у случају када делује радно оптерећење. То је у складу са физикалношћу проблема, јер вертикална сила копања тежи да “исправи” савијени стуб. Осим тога, уочава се знатно савијање стубова у равни стубова (Слика 11.23а, десно), којег није било у претходном случају оптерећења, а ово савијање је

последица бочне силе. Долази и до увијања стубова, као последица дејства спрега у хоризонталној равни који тежи да “смакне” стубове један у односу на други.

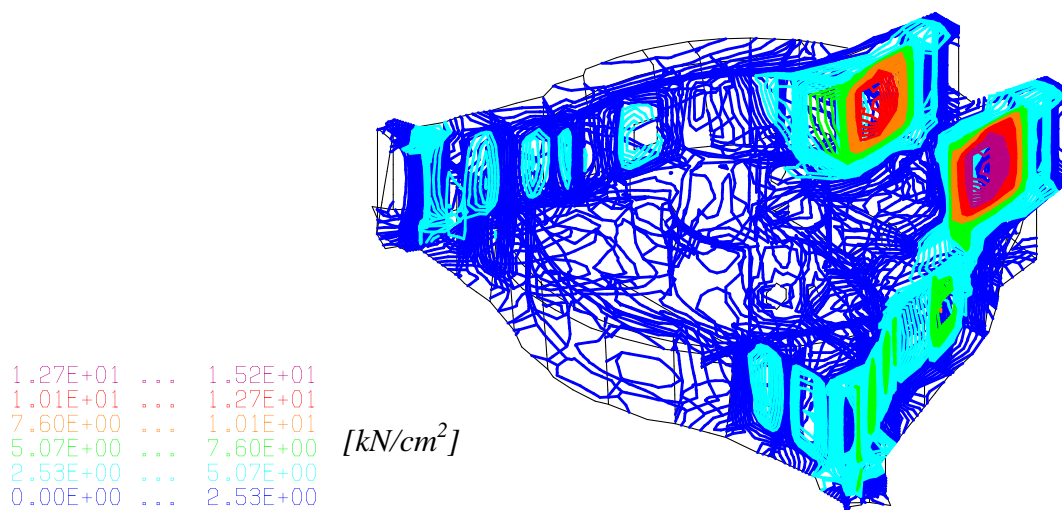
Поље напона за други прорачунски случај оптерећења приказано је на Слици 11.24.



Слика 11.24 Напонско поље целог модела, други случај оптерећења

Напонско поље са Сlike 11.24 је несиметрично, што је изазвано утицајем бочне силе (не рачунајући незнатан утицај сопствене тежине стреле багеристе). У случају да је сила супротног смера, напонско поље би било као “слика у

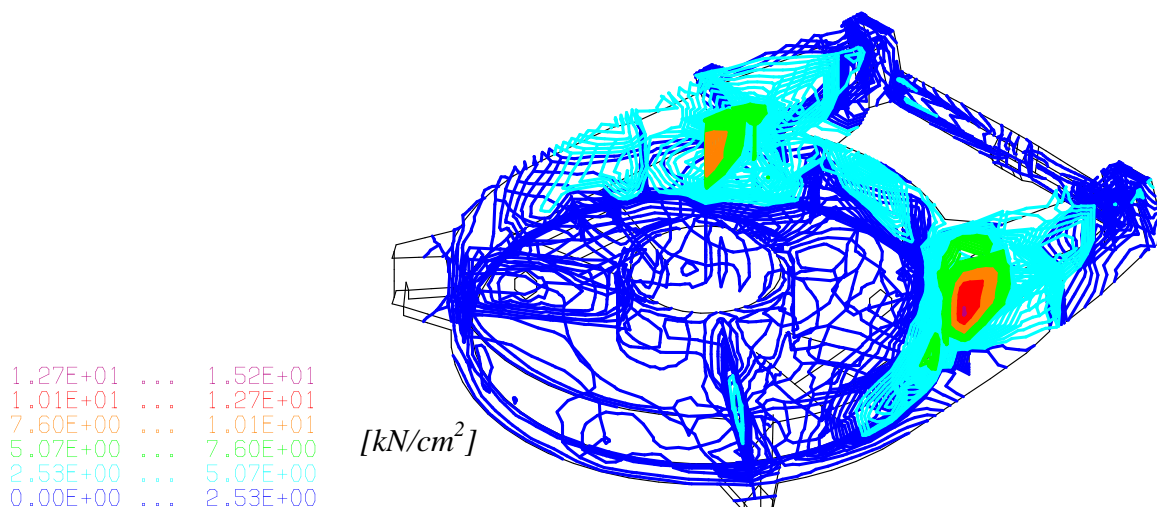
огледалу”. У наставку ће бити приказана напонска слика сваке од група градње. Напонско поље целе доње градње приказано је на Слици 11.25.



Слика 11.25 Доња градња, напонско поље, други случај оптерећења

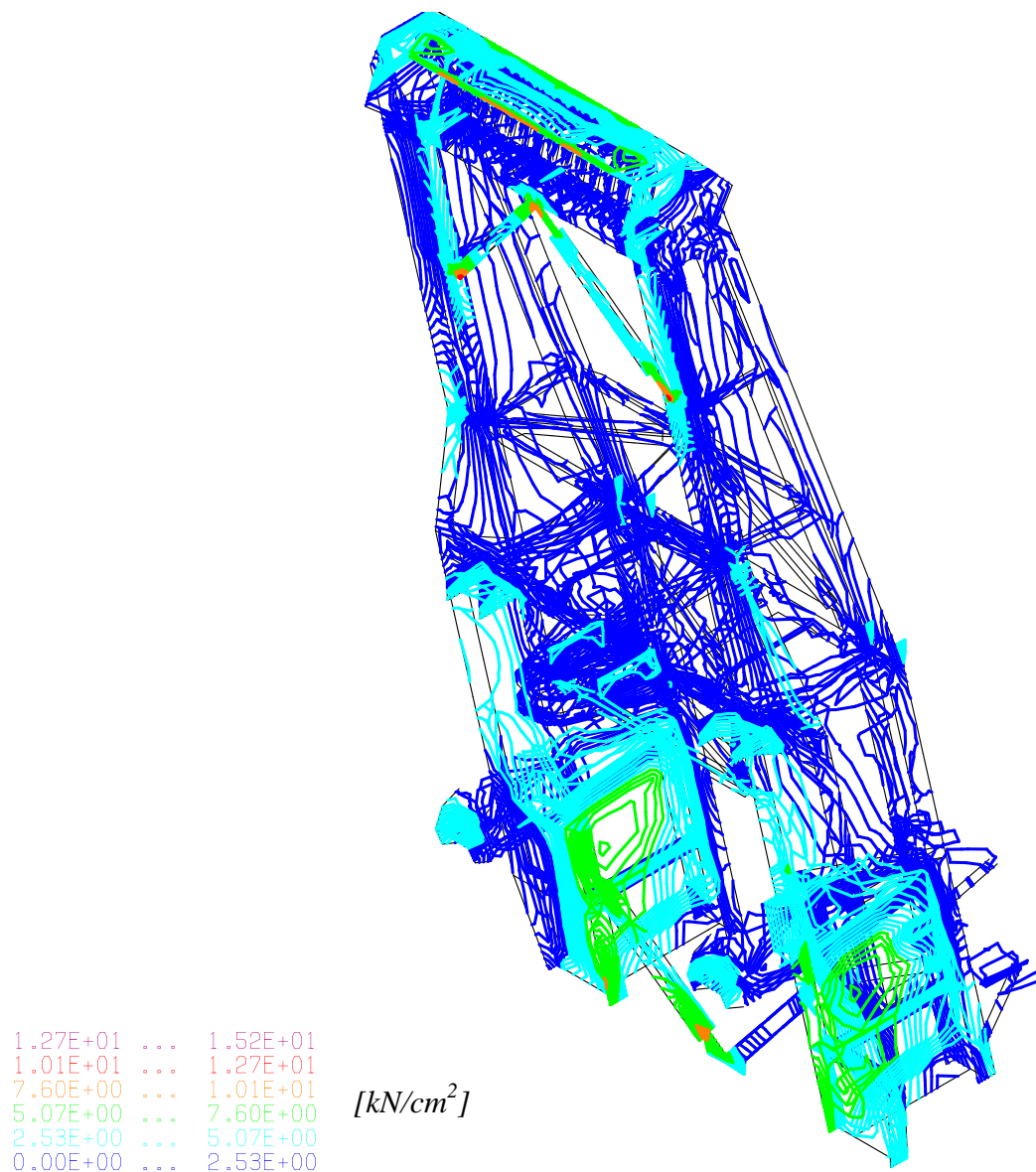
Исто као и у Првом случају оптерећења, проблематичну зону (место велике концентрације напона) представљају радијална ребра, осим што су сада нивои напона мало виши у односу на претходни случај. Може се констатовати да је ситуација слична као у Првом случају оптерећења, осим што симетрија није потпуна због утицаја бочне силе.

На Слици 11.26 приказано је напонско поље обртне платформе (горња градња без стубова).



Слика 11.26 Обртна платформа, напонско поље, други случај оптерећења

На Слици 11.27 приказано је напонско поље конструкције стубова.



Слика 11.27 Стубови, напонско поље, други случај оптерећења

Може се уочити да је у односу на Први случај оптерећења (Слика 11.21) ситуација са локалном концентрацијом напона непромењена, чак је можда и мало повољнија у Другом случају оптерећења.

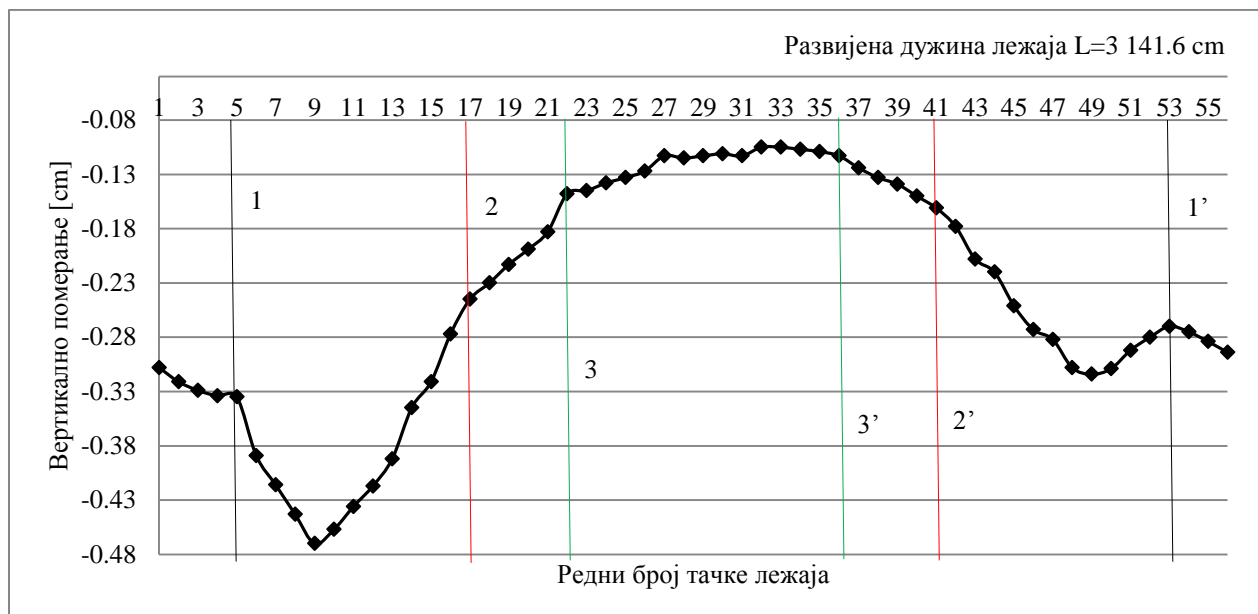
У Табели 11.6 приказано је померање чворних тачака горње и доње стазе аксијалног лежаја на местима везивања штапова (кугли), за други случај оптерећења.

Табела 11.6 Померање чворних тачака горње и доње стазе аксијалног лежаја,
други случај оптерећења

Редни број тачке	Померање тачке [cm]					
	Доња стаза			Горња стаза		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1.	0,017	0,027	-0,308	0,002	0,043	-0,309
2.	0,020	0,024	-0,321	0,005	0,042	-0,319
3.	0,024	0,021	-0,329	0,008	0,041	-0,330
4.	0,026	0,019	-0,334	0,009	0,039	-0,337
5.	0,027	0,018	-0,335	0,011	0,037	-0,361
6.	0,014	0,026	-0,389	0,008	0,035	-0,391
7.	0,009	0,027	-0,416	0,008	0,034	-0,416
8.	0,004	0,028	-0,443	0,010	0,034	-0,451
9.	-0,002	0,028	-0,470	0,012	0,035	-0,475
10.	-0,006	0,027	-0,457	0,011	0,040	-0,470
11.	-0,010	0,025	-0,436	0,011	0,044	-0,438
12.	-0,011	0,023	-0,417	0,011	0,046	-0,427
13.	-0,012	0,019	-0,392	0,013	0,047	-0,393
14.	-0,012	0,011	-0,345	0,013	0,048	-0,343
15.	-0,012	0,009	-0,321	0,012	0,047	-0,336
16.	-0,017	-0,004	-0,277	0,014	0,048	-0,281
17.	-0,017	-0,009	-0,245	0,015	0,049	-0,263
18.	-0,017	-0,010	-0,230	0,016	0,049	-0,233
19.	-0,017	-0,009	-0,213	0,017	0,050	-0,219
20.	-0,018	-0,008	-0,199	0,018	0,050	-0,201
21.	-0,019	-0,008	-0,183	0,019	0,050	-0,184
22.	-0,019	-0,009	-0,148	0,017	0,047	-0,162
23.	-0,017	-0,007	-0,145	0,015	0,044	-0,146
24.	-0,012	-0,001	-0,138	0,012	0,040	-0,139
25.	-0,009	0,004	-0,133	0,010	0,038	-0,133
26.	-0,006	0,008	-0,127	0,007	0,035	-0,128
27.	-0,003	0,013	-0,113	0,004	0,033	-0,128
28.	-0,002	0,013	-0,115	0,002	0,032	-0,116
29.	-0,001	0,014	-0,113	0	0,032	-0,113
30.	0	0,015	-0,111	-0,002	0,032	-0,110
31.	0	0,016	-0,113	-0,003	0,031	-0,101

32.	-0,002	0,016	-0,105	-0,004	0,032	-0,105
33.	-0,003	0,017	-0,105	-0,004	0,032	-0,105
34.	-0,005	0,019	-0,107	-0,003	0,031	-0,107
35.	-0,007	0,022	-0,109	-0,003	0,030	-0,109
36.	-0,008	0,023	-0,113	-0,003	0,029	-0,111
37.	-0,009	0,021	-0,124	-0,002	0,028	-0,127
38.	-0,010	0,022	-0,133	-0,003	0,029	-0,135
39.	-0,011	0,024	-0,139	-0,004	0,030	-0,145
40.	-0,012	0,026	-0,150	-0,005	0,031	-0,151
41.	-0,014	0,030	-0,161	-0,006	0,031	-0,167
42.	-0,014	0,028	-0,178	-0,007	0,032	-0,180
43.	-0,013	0,025	-0,208	-0,009	0,032	-0,209
44.	-0,013	0,025	-0,220	-0,010	0,032	-0,221
45.	-0,012	0,024	-0,251	-0,013	0,031	-0,251
46.	-0,011	0,024	-0,273	-0,016	0,031	-0,269
47.	-0,010	0,024	-0,282	-0,018	0,032	-0,282
48.	-0,005	0,026	-0,308	-0,019	0,035	-0,301
49.	-0,002	0,026	-0,314	-0,020	0,038	-0,316
50.	0,003	0,028	-0,309	-0,022	0,038	-0,302
51.	0,008	0,029	-0,292	-0,024	0,038	-0,292
52.	0,013	0,031	-0,280	-0,023	0,038	-0,280
53.	0,022	0,038	-0,270	-0,018	0,038	-0,265
54.	0,021	0,036	-0,275	-0,009	0,042	-0,276
55.	0,018	0,033	-0,284	-0,005	0,043	-0,285
56.	0,016	0,030	-0,294	-0,001	0,043	-0,298

У односу на Први случај оптерећења, може се уочити да су разлике у померањима између појединих тачака исте стазе знатно већа (израженија је депланација лежаја). Израженије је и смицање горње, у односу на доњу стазу (због утицаја бочне силе). На Слици 11.28 графички је приказано вертикално померање тачака доње стазе лежаја.



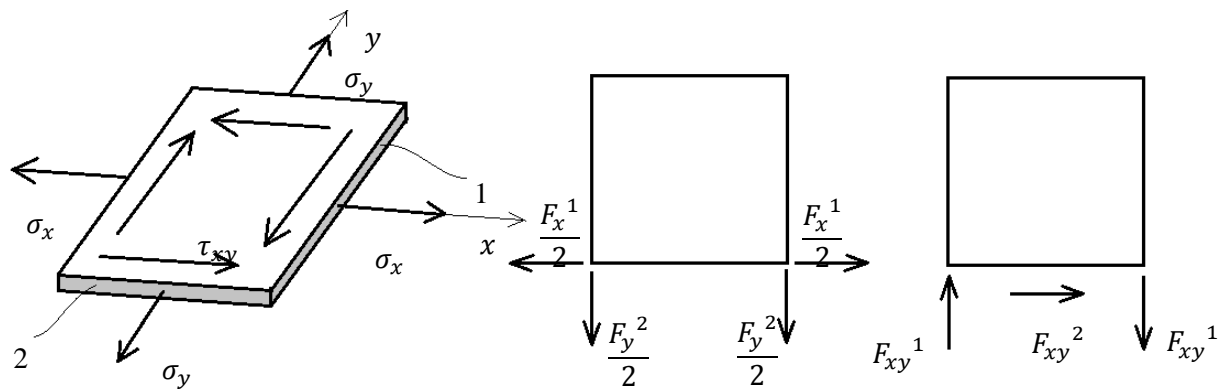
*Слика 11.28 Вертикално померање тачака доње стазе лежаја, други случај
оптерећења*

Са претходне слике може се уочити да је овде депланација лежаја још израженија него за претходни случај оптерећења.

11.3 Упоредни преглед целовите конструкције и стварне конструкције

Као меродаван усвојен је Други случај оптерећења, као комплекснији и ближи реалном режиму рада ове конструкције. У складу са одлуком о изради лабораторијског модела ове конструкције, неминовно је било скраћење стубова до зоне изнад чворних плоча косника. Скраћивањем стубова, целовита конструкција је постала стварна конструкција (Поглавље 5).

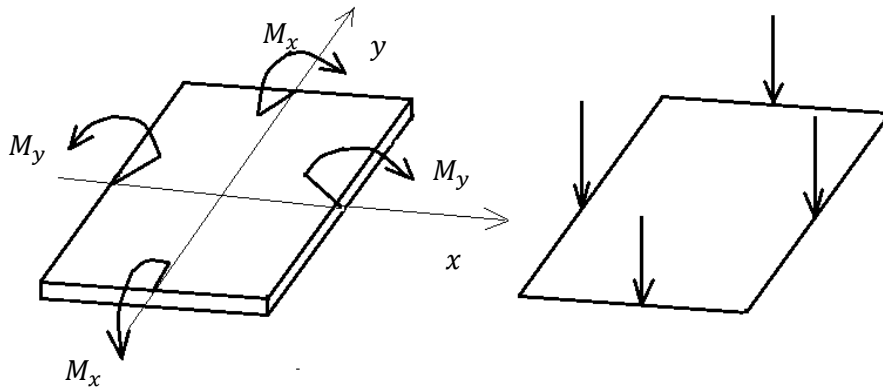
У Другом случају оптерећења целовите конструкције, унос оптерећења на стубове је вршен тако што су из шема оптерећења целе конструкције која се “качи” на стубове, израчунате силе (реакције ослонаца) које практично представљају оптерећења стубова. Из напонског стања елемената стубова у зони одсецања (одстрањених елемената) прерачунате су вредности оптерећења за стварну конструкцију (Поглавље 5). Практично, њихово напонско стање представља утицај уклоњеног дела конструкције (са својим оптерећењима) на задржани део конструкције. На Слици 11.29 приказан је један типичан “уклоњени” елемент изложен мембранском напрезању.



Слика 11.29 Коначни елемент са линије пресека, мембрански напони преведени у оптерећења

Дакле, овде се отвара питање еквивалентних оптерећења, којима треба заменити утицај “одбачених” стубова на “остатак” конструкције. Одговор на ово питање је урађен следећим корацима. Прво, као део излазних података прорачунског модела са стубовима, а за Други случај оптерећења (Слика 11.24), за сваки од “пресечних” коначних елемената прочитани су нормални напони од истезања и савијања, као и смичући напони од истезања и савијања силама. Напон $\sigma_x^{membranski}$ представља последицу истезања у x правцу (оса обележена на претходној слици). Како напон представља “силу по јединици површине”, а идеја је да се добије оптерећење овог елемента у његовим чворним тачкама (оптерећење које ће се пренети на елемент испод њега), овај напон се преводи у силу, множењем са површином 1 (обележена на Сlici 11.29). Та сила се расподељује на два чвора (чворови који ограничавају ту страницу коначног елемента), тако да се у сваки чвор уноси половина те силе. Слична је ситуација са $\sigma_y^{membranski}$, који делује по површини 2. Што се тангенсијалног напона τ_{xy} тиче, то је напон клизања у равни коначног елемента који тежи да деформише праве углове коначног елемента. Преводи се у силе, множењем напона са површином на којој делује (површина 1 или површина 2).

На Сlici 11.30 приказан је типичан коначни елемент са линије пресека изложен савојном оптерећењу.



Слика 11.30 Коначни елемент са линије пресека, савојно напрезање

Друго, на Слици 11.30 приказани су моменти савијања око оса x и y . Уколико би се, уместо моментима, савијање вршило силама, појавио би се и напон τ_{xy}^{sav} који је последица смицања у равни дејства силе (управно на раван плоче). Сви ови напони су мали, за ред величине мањи у односу на претходно поменуте мембранске напоне и зато нису укључени у прерачунавање оптерећења на преосталом делу конструкције. Њихово укључивање у прорачун би изазвало компликације приликом прерачунавања еквивалентних сила, а не би имало готово никакав утицај на резултат.

Упоредни преглед напонских стања целовите и стварне конструкције

Упоредјујући напонска поља стварне конструкције (чије је оптерећење добијено прерачунавањем) и целовите конструкције (Слика 5.23 и Слика 11.24), уочава се потпуно подударање слика напонских.

У Табелама 11.7 и 11.8 приказане су вредности еквивалентних напона у вертикалним плочама доње градње и обртне платформе, упоредо за оба прорачунска модела.

Табела 11.7 Вредности еквивалентног напона у елементима радијалних плоча доње градње, модел целовите структуре и модел стварне структуре

Број елемента (са Слике 6.3)	Еквивалентни напон [kN/cm ²]	
	Целовита структура	Стварна структура
960	6,543	5,757
961	10,71	8,902
962	10,82	8,927

1042	12,13	9,985
963	15,94	12,8
964	6,902	5,435
974	8,182	7,063
975	13,02	10,97
976	13,82	11,41
1043	16,19	13,17
977	15,48	12,76
978	3,996	3,121
988	9,309	7,968
989	15,19	12,9
990	15,22	12,84
991	14,51	12,27
992	2,306	1,912
1002	9,501	8,095
1003	15,53	13,24
1004	14,97	12,8
1005	13,74	11,81
1006	1,89	1,767
1016	9,084	7,718
1017	14,56	12,45
1018	13,97	12,03
1019	13	11,28
1020	2,208	2,098
1030	7,897	6,71
1031	12,26	10,52
1032	12,05	10,45
1033	12,08	10,54
1034	3,975	3,596
2494	5,159	4,627
2495	8,437	7,075
2496	8,557	7,12
2576	9,716	8,159
2497	13,01	10,72
2498	5,48	4,611
2508	6,52	5,718
2509	10,34	8,824

2510	11,01	9,204
2577	13,03	10,82
2511	12,38	10,40
2512	3,151	2,644
2522	7,462	6,484
2523	12,11	10,44
2524	12,12	10,38
2525	11,46	9,827
2526	1,823	1,633
2536	7,589	6,562
2537	12,35	10,7
2538	11,87	10,31
2539	10,83	9,438
2540	1,469	1,468
2550	7,282	6,281
2551	11,56	10,04
2552	11,03	9,646
2553	10,25	9,013
2554	1,669	1,674
2564	6,25	5,394
2565	9,67	8,456
2566	9,463	8,339
2567	9,567	8,449
2568	2,964	2,782

*Табела 11.8 Вредности еквивалентног напона у елементима радијалних плоча
обртне платформе, модел целовите структуре и модел стварне структуре*

Број елемента (са Сlike 6.4)	Еквивалентни напон [kN/cm ²]	
	Целовита структура	Стварна структура
3554	8,396	8,554
3562	11,74	11,67
3563	10,95	11,09
3548	6,483	6,531
3564	14,13	14,37
3565	12,4	12,49
3542	5,349	5,359

3566	12,24	12,23
3567	14,09	14,07
3568	12,42	12,46
4282	6,607	7,119
4290	8,628	9,326
4291	8,457	9,228
4276	4,83	5,225
4292	11,11	12,03
4293	9,454	10,22
4270	4,233	4,533
4294	9,057	9,791
4295	10,03	10,88
4296	9,192	9,891

Из Табеле 11.7 може се закључити да су напони у радијалним плочама доње градње модела са “скраћеним” стубовима до нешто мањи у односу на напоне у истим елементима модела са стубовима. Из Табеле 11.8 може се закључити да су напони у радијалним плочама обртне платформе приближно исти за оба модела (чак су мало виши у моделу са “скраћеним” стубовима). Уочава се мала разлика између модела у преносу оптерећења са горње на доњу градњу. Главну улогу у преносу оптерећења са горње на доњу градњу има лежај и у Табели 11.9 приказано је померање чворних тачака доње стазе аксијалног лежаја на местима везивања штапова (кугли) за модел целовите структуре и модел са “скраћеним” стубовима.

Табела 11.9 Померање чворних тачака доње стазе аксијалног лежаја, модел целовите структуре и модел стварне структуре

Редни број тачке (Слика 5.19)	Верикално померање тачке доње стазе [cm]	
	Целовита структура	Стварна структура
1.	-0,308	-0,263
2.	-0,321	-0,274
3.	-0,329	-0,282
4.	-0,334	-0,287

5.	-0,335	-0,288
6.	-0,389	-0,341
7.	-0,416	-0,365
8.	-0,443	-0,389
9.	-0,470	-0,417
10.	-0,457	-0,404
11.	-0,436	-0,391
12.	-0,417	-0,372
13.	-0,392	-0,355
14.	-0,345	-0,315
15.	-0,321	-0,290
16.	-0,277	-0,258
17.	-0,245	-0,225
18.	-0,230	-0,221
19.	-0,213	-0,204
20.	-0,199	-0,197
21.	-0,183	-0,184
22.	-0,148	-0,160
23.	-0,145	-0,159
24.	-0,138	-0,156
25.	-0,133	-0,153
26.	-0,127	-0,151
27.	-0,113	-0,141
28.	-0,115	-0,143
29.	-0,113	-0,141
30.	-0,111	-0,139
31.	-0,113	-0,141
32.	-0,105	-0,131
33.	-0,105	-0,129
34.	-0,107	-0,128
35.	-0,109	-0,127
36.	-0,113	-0,129
37.	-0,124	-0,132
38.	-0,133	-0,140
39.	-0,139	-0,141
40.	-0,150	-0,152
41.	-0,161	-0,154

42.	-0,178	-0,173
43.	-0,208	-0,195
44.	-0,220	-0,209
45.	-0,251	-0,236
46.	-0,273	-0,252
47.	-0,282	-0,263
48.	-0,308	-0,282
49.	-0,314	-0,290
50.	-0,309	-0,280
51.	-0,292	-0,263
52.	-0,280	-0,251
53.	-0,270	-0,236
54.	-0,275	-0,239
55.	-0,284	-0,245
56.	-0,294	-0,252

Наиме, у тачкама са великим вертикалним померањем померања су мања на моделу са “скраћеним” стубовима, док су у тачкама са нижим вредностима померања померања већа на моделу са “скраћеним” стубовима у односу на модел са стубовима.

Сва претходно уочена одступања модела са “скраћеним” стубовима у односу на модел са стубовима последице су упрошћења уведених приликом прерачунавања оптерећења модела са “скраћеним” стубовима на основу напонског стања елемената стуба на месту пресека (прочитано из модела са стубовима). Резултати су међусобно упоредиви, напонске слике су скоро идентичне. Разлика у интензитету добијених напона је последица несавршености методе пресека код нужног “одстрањивања” дела стубова. Она као таква не угрожава веродостојност и поузданост урађених прорачуна (није битан сам интензитет напона, већ његова расподела по моделу).

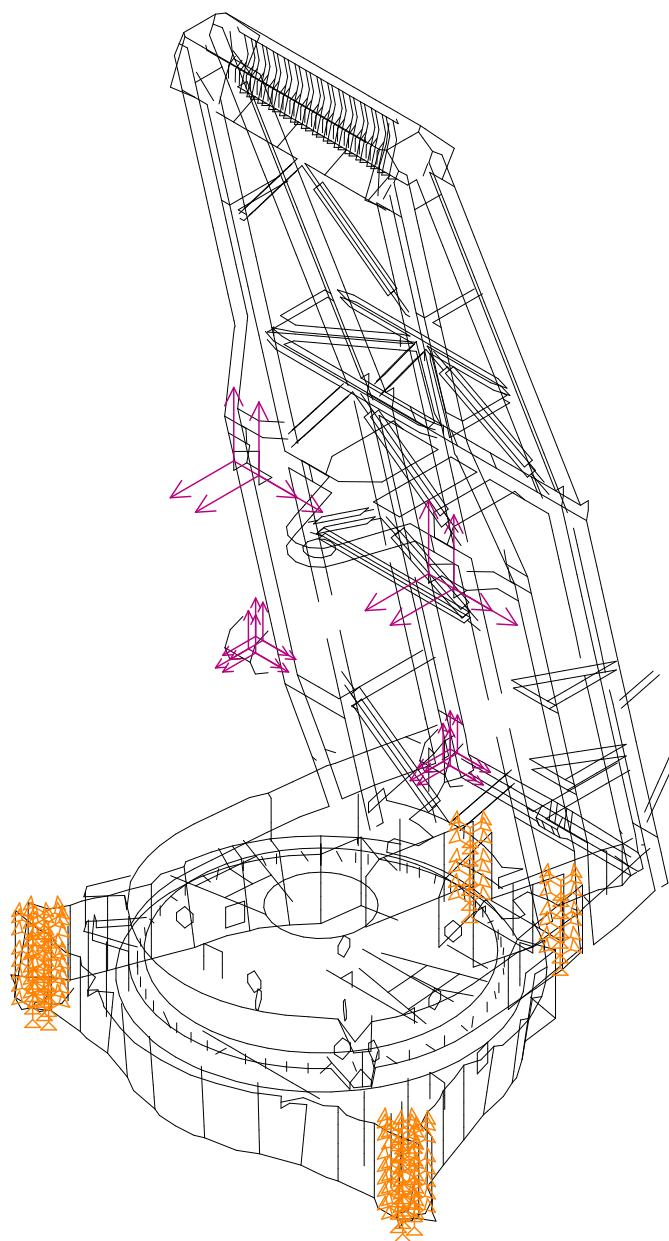
11.4 Динамички прорачун целовите конструкције

У оквиру динамичког прорачуна целовите конструкције биће одређене сопствене фреквенце и облици (изглед) основних модова осциловања. Главни облици осциловања приказују понашање модела под неким фиктивним оптерећењем и

служе да се идентификују слаба места на конструкцији. Конструкција има добро динамичко понашање ако је прва фреквенца висока (и далеко од фреквенце побуде) и ако је размак између фреквенци велики. Висока прва фреквенција се постиже најкрућом конструкцијом најмање масе ($\omega = \sqrt{\frac{c}{m}}$) [98].

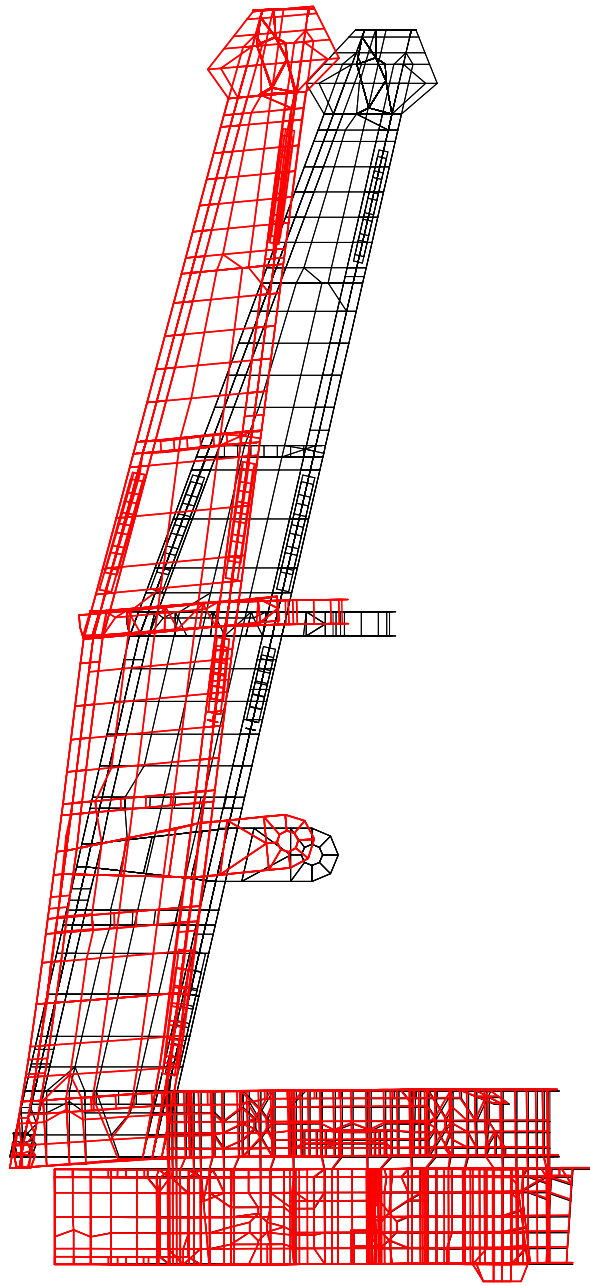
Анализираће се расподела (разлике) потенцијалне и кинетичке енергије по главним облицима осциловања, јер је и то један од показатеља слабих места конструкције. Наиме, као што је у претходној литератури показано, у зависности од односа потенцијалне и кинетичке енергије може се извршити редизајн дате структуре (или одређених места на структури). Места на којима су и кинетичка и потенцијална енергија ниског нивоа, нису за редизајн (то су најчешће места у близини ослонаца или места велике крутости). Местима на којима је потенцијална енергија доминантна, треба повећати крутост, а местима на којима је кинетичка енергија доминантна треба смањити масу (а повећати крутост). Све ово су основе на којима се заснива Метода реанализе [102].

На Слици 11.31 приказан је модел за динамички прорачун целе конструкције доње, и горње градње, и стубова багера SchRs 630. Ослонци конструкције су исти као за статички прорачун, јер је то стварни начин ослањања конструкције. У прорачун су укључене концентрисане масе стреле радног точка и стреле противтега, јер су то највеће масе које “висе” на стубовима и самим тим утичу знатно на динамички прорачун. Концентрисане масе не утичу на облик модова осциловања, али утичу на фреквенцу осциловања (снижавају је). Концентрисане масе стреле радног точка (процењено: 220 000 kg) и стреле противтега (процењено: 212 000 kg) унете су у улежиштењима ових елемената у три правца.



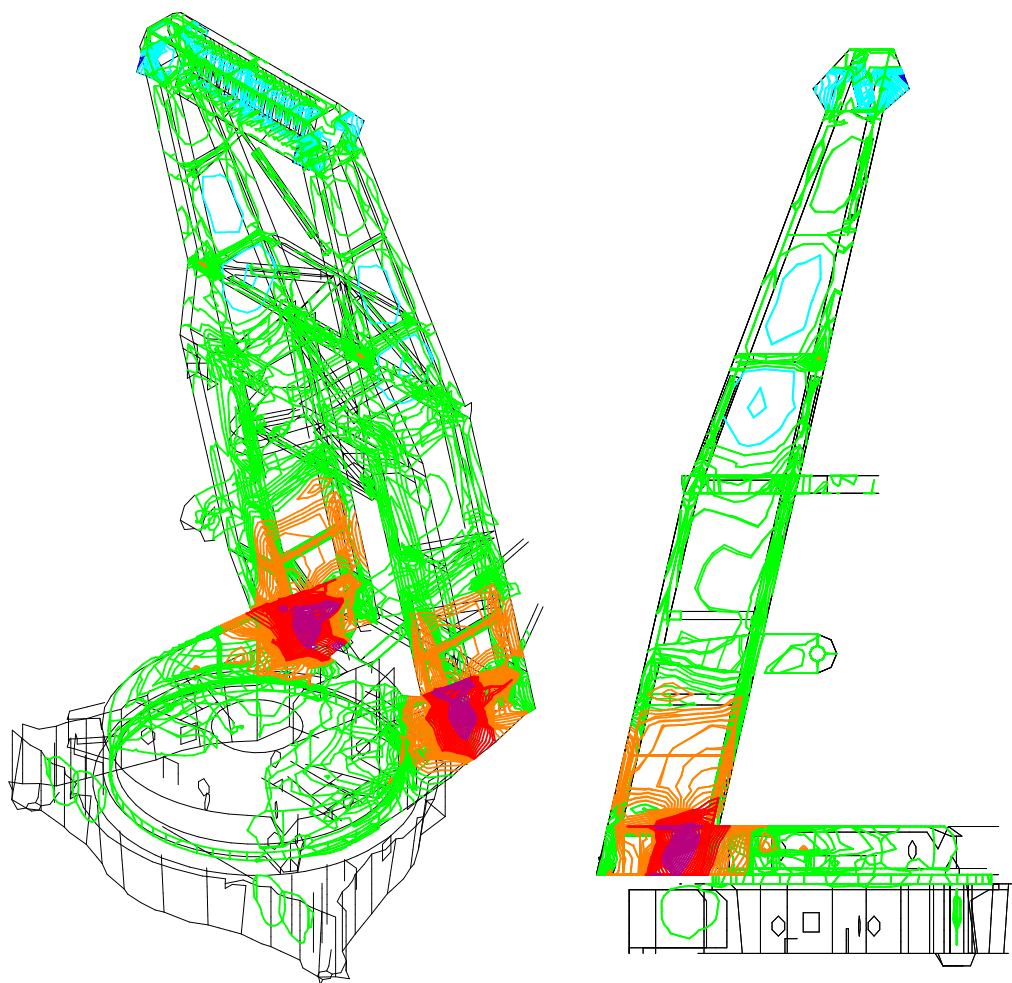
Слика 11.31 Прорачунски модел са ослонцима стварне конструкције доње, горње градње и стубова багера SchRs 630, динамички прорачун

На следећим сликама приказани су резултати динамичког прорачуна за прва три мода осциловања. Резултати неће бити приказани за остале облике осциловања, јер ова три облика покривају најзначајније појаве, односно савијање стубова у две равни и увијање стубова (смицање стубова једног у односу на други), а остали облици представљају комбинације прва три.



Фреквенца осциловања 2,2 Hz

Слика 11.32 Слободне осцилације, први мод осциловања, целовита конструкција

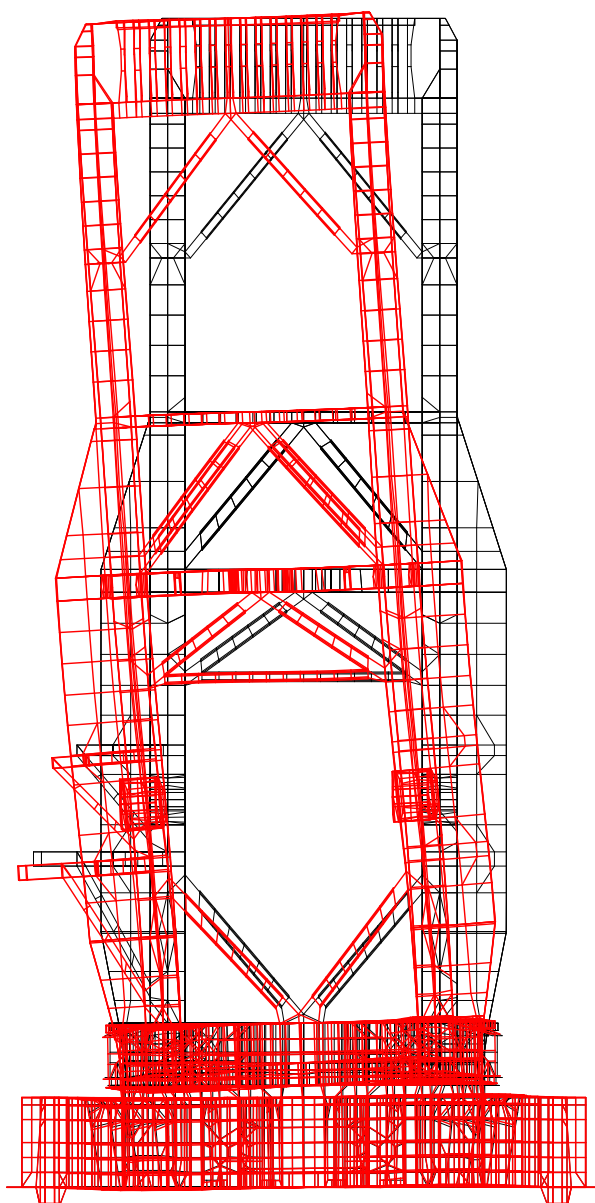


2.86E-01	...	3.93E-01	
1.79E-01	...	2.86E-01	
7.15E-02	...	1.79E-01	
-3.57E-02	...	7.15E-02	
-1.43E-01	...	-3.57E-02	
-2.50E-01	...	-1.43E-01	

$E_p - E_k [Nm]$

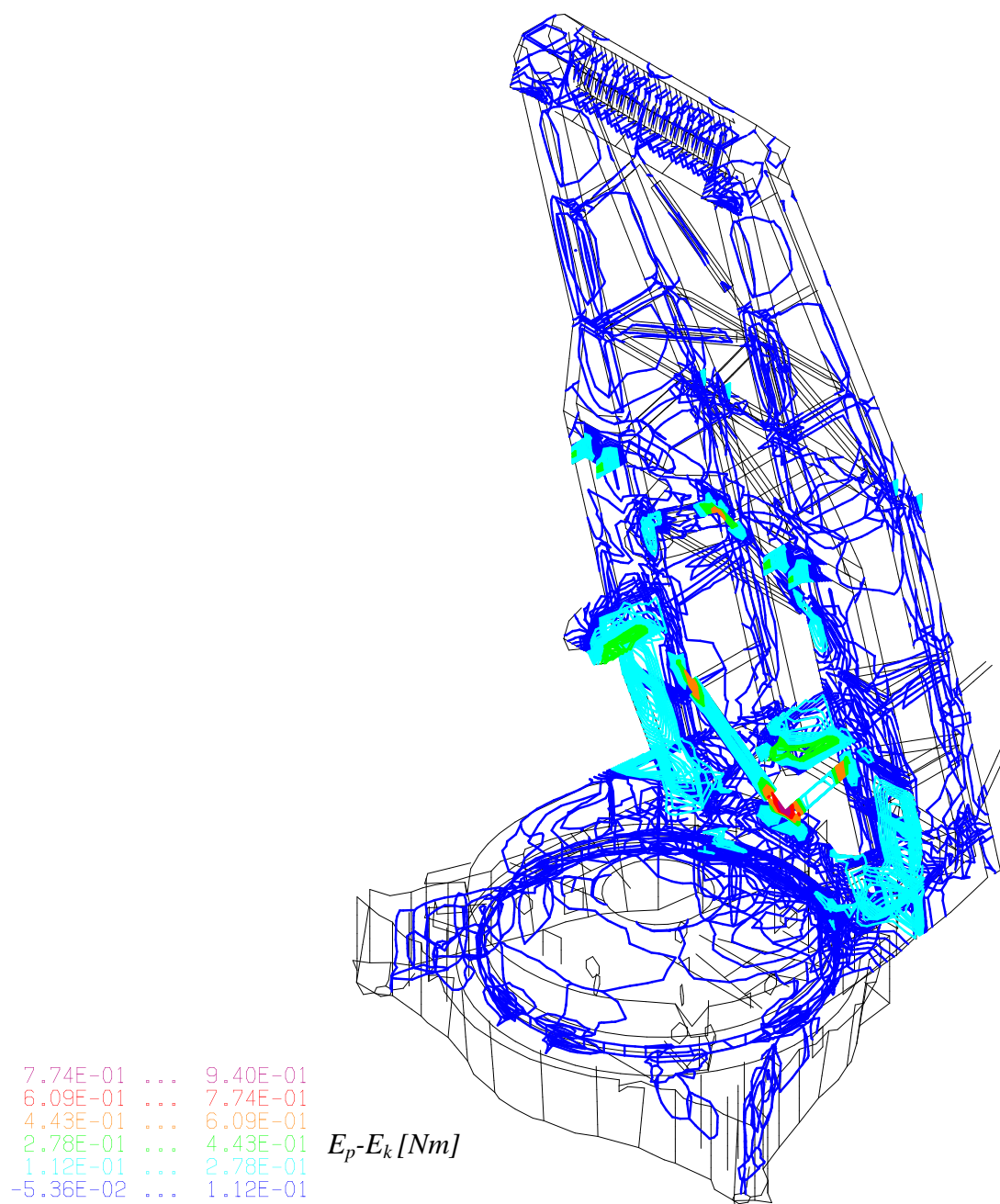
Слика 11.33 Разлика потенцијалне и кинетичке енергије, први мод осциловања, целовита конструкција, просторни изглед и бочна равна

Први мод осциловања представља савијање стубова у правцу пружања стреле радног точка (и противтега). На основу расподеле разлике потенцијалне и кинетичке енергије, уочава се да је место за редизајн вертикална плоча горње градње одмах испод стубова (иста плоча, али ближе цилиндру, има проблем са концентрацијом напона по статичком прорачуну), као и горња и доња плоча горње градње, на местима везивања са овом вертикалном плочом.



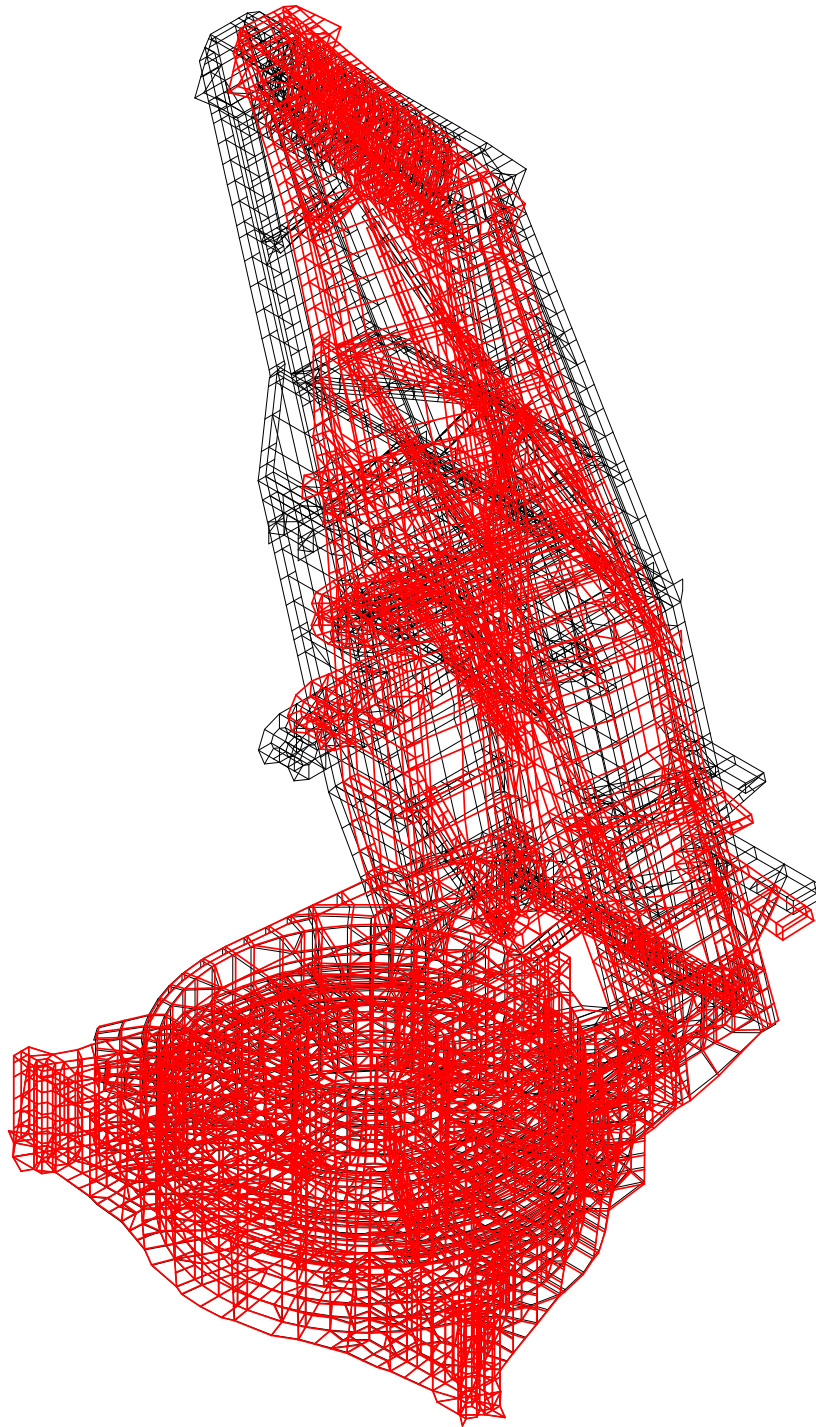
Фреквенца осциловања 2,6 Hz

Слика 11.34 Слободне осцилације, други мод осциловања, целовита конструкција



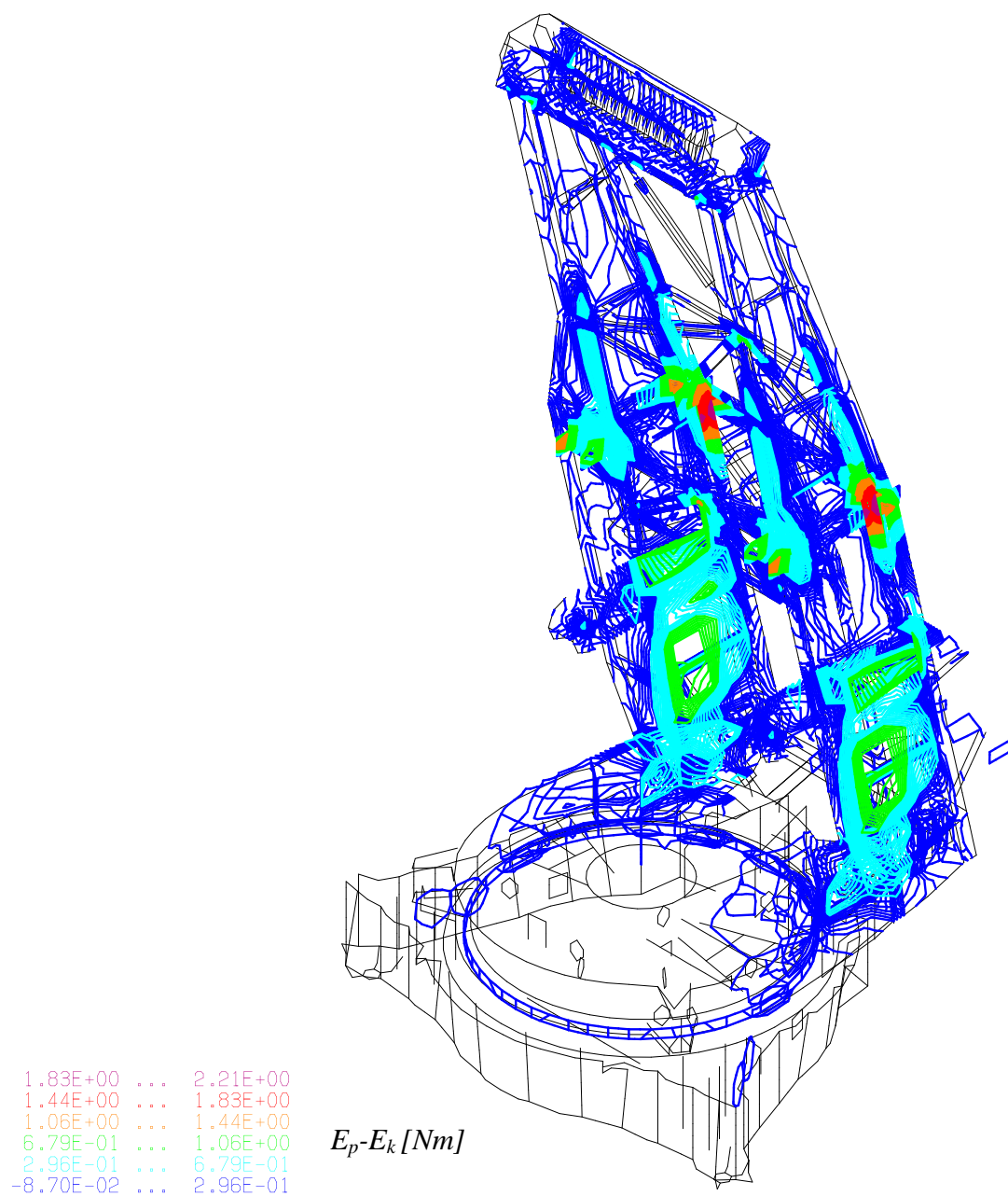
Слика 11.35 Разлика потенцијалне и кинетичке енергије, други мод осциловања, целовита конструкција

Други мод осциловања представља савијање стубова у равни управној на правац пружања стреле радног точка. Под оваквим фиктивним оптерећењем (које би изазвало то савијање) као проблематична, уочава се чворна плоча доњих косника стубова, која се везује у горњу плочу обртне платформе.



Фреквенца осциловања 5,4 Hz

Слика 11.36 Слободне осцилације, трећи мод осциловања, целовита конструкција



Слика 11.37 Разлика потенцијалне и кинетичке енергије, трећи мод осциловања, целовита конструкција

Трећи мод осциловања представља увијање стубова, односно смицање стубова једног у односу на други. Очекивано, места за ридизајн су места везе стубова и решетке која их укрућује у хоризонталној равни.

12 ЗАКЉУЧАК

Полазна хипотеза ове дисертације подразумевала је, да је конструкције сложене просторне геометрије, које се састоје доминантно од плоча као конструктивних елемената, могуће испитивати моделски. Са циљем доказивања ове претпоставке, урађени су нумерички прорачуни једне стварне сложене конструкције и њеног умањеног модела. Поред тога, израђен је умањени физички модел те конструкције, који је подвргнут експерименталним испитивањима. Експериментална испитивања су рађена са циљем верификације нумеричког модела умањене конструкције. Физички модел и успешни експерименти спроведени на њему, заиста показују да се овакве структуре могу испитивати моделски, без великих ограничења и са довољном тачношћу. Пошто је потврђено велико подударање нумеричког модела умањене конструкције са резултатима експеримента, то практично значи да је и нумерички модел стварне конструкције добар (нумерички модел умањене конструкције је добијен директним скалирањем из нумеричког модела стварне конструкције). Са једне стране, пружена је могућност извођења закључака о стварној конструкцији само на основу прорачуна базираног на њеном нумеричком моделу, а без експериментисања на стварној конструкцији. Са друге стране, могуће је тврдити какво ће понашање саме конструкције бити без икаквог нумеричког прорачуна, само на основу сазнања добијених из експерименталних спроведених на њеном умањеном моделу. То је могуће, јер је на основу нумеричких прорачуна обе конструкције, изведен коефицијент зависности померања, напона и сопствених фреквенци осциловања између стварне конструкције и њеног умањеног модела. За испитну конструкцију изабран је главни носећи део конструкције багера SchRs 630, а резултати добијени на овој конструкцији применљиви су и на другим конструкцијама сличног типа и намене.

У оквиру дисертације урађено је следеће:

– Дата су почетна разматрања која обухватају садашње стање науке у области моделског испитивања и Теорије сличности. С обзиром на изабрану испитну конструкцију, дат је и преглед литературе из области челичних сложених структура. Пошто је преглед досадашње литературе из ових области оправдао

почетне хипотезе и дао даљу мотивацију за израду умањеног модела, размотрене су методе дијагностике чврстоће које ће бити коришћене. Ту су неизбежне метода коначних елемената, као нумеричка, и метода мерних трака и метода за дигиталну корелацију слика, као експерименталне методе. Дат је приказ досадашње примене ових метода на основу доступне литературе.

– Развијен је комплетан нумерички прорачунски модел доње градње, обртне платформе, стубова и аксијалног лежаја конструкције багера SchRs 630 (целовита конструкција) на основу техничке документације произвођача опреме, укључујући све делове конструкције који утичу на крутост. Урађена је анализа оптерећења стварне конструкције и за два случаја оптерећења (1-сопствена тежина; 2-сопствена тежина и радно оптерећење) спроведен је статички прорачун. Добијени су резултати у виду померања и напонских поља. Јасно су идентификоване зоне концентрација напона. Урађен је динамички прорачун стварне конструкције са концентрисаним масама стреле радног точка и стреле противтега, израчунате су сопствене фреквенце осциловања и расподела разлике потенцијалне и кинетичке енергије по модовима. Ова расподела је значајна као помоћ приликом идентификације слабих места конструкције, јер динамички прорачун заправо представља одговор на питање, како би конструкција реаговала под неким хипотетичким оптерећењем одређеног правца.

– Урађен је статички прорачун модела који је назван стварна структура и она је референтна за даља истраживања. Стварном структуром је названа збирна структура доње градње, обртне платформе и доњег дела стубова (стубови су “скраћени” до зоне чворних плоча косника). Овакво упрошћење није имало утицаја на истраживање, јер сами стубови нису интересентни пошто се у њима не очекује лоше понашање. Ова констатација произилази из нумеричке анализе целовите конструкције. Стога су стубови “скраћени” и разматрана је конструкција која има унос оптерећења у равни пресецања стубова. На основу претходног нумеричког прорачуна, а за један од два разматрана случаја оптерећења, прерачунато је оптерећење у равни пресека, на основу напонског стања структуре у тој равни (добито је задовољавајуће поклапање поља напона и померања модела структура са и без стубова). Као референтне тачке за упоређивање померања (за овај и будуће прорачунске моделе), усвојене су чворне тачке лежаја,

јер их садрже сви модели, далеко су од места уноса оптерећења и дефинишу начин на који се оптерећење преноси са горње градње на доњу градњу. Урађен је и динамички прорачун ове структуре.

– Урађен је статички прорачун умањене структуре. Умањеном структуром названа је структура која је од стварне структуре мања 10 пута, по димензијама и по дебљинама конструктивних елемената. Умањена структура је у односу на стварну структуру оптерећена 100 пута мањим оптерећењем (у складу са поставкама Теорије сличности). Спроведена је анализа пресликавања напона по групама градње предметне конструкције и формулисани су коефицијенти пресликавања за сваку од њих. Закључено је да је веза напона умањене структуре и стварне структуре линеарна. Дијагностиковано је доминантно мембранско напрезање структуре које има за последицу коефицијент пресликавања близак 1, али су и идентификоване зоне концентрације напона у којима је доминантан смицајни мембрански напон, тако да је у тим зонама процењен коефицијент пресликавања 1,22. Померања умањене структуре и стварне структуре разликују се за 20-25% (рачунато у односу на померања умањене структуре). То значи да закључци о померањима, деформацијама и напонима стварне структуре могу бити директно изведени само на основу прорачуна умањене структуре, за било која оптерећења. Урађен је и динамички прорачун умањене структуре. У односу на прорачун стварне структуре, сопствене фреквенце умањене редуковане структуре су 10 пута веће (што је у потпуној сагласности са Теоријом сличности).

– Урађена је комплетна радионичка документација и технологија за израду физичког умањеног модела.

– Спроведен је и нумерички прорачун изведеног лабораторијског модела, који се од умањене структуре разликује по хоризонталној плочи која везује скраћене стубове и по селективно промењеним дебљинама појединих лимова. Овоме се прибегло због потребе за објективно што већом унификацијом и оптимизацијом примењених материјала. Оптерећења у равни пресека којима би требало оптеретити лабораторијски модел, редуковано је на три силе по правцима главних оса. Ове измене су узрок незнатних разлика у резултатима прорачуна ова два прорачунска модела. Урађен је и динамички прорачун лабораторијског модела.

Раније поменута несавршеност лабораторијских услова довела је до одлуке, да се уместо троосног оптерећивања модела усвоји оптерећивање само вертикалним силама (симетрично), а редукованих интензитета.

– Физички лабораторијски умањени модел је у лабораторији припремљен за тестирање. Симетрија оптерећења је омогућила паралелно тестирање модела мерним тракама и системом за бесконтактно мерење померања и деформације (једна половина модела је снимана мерним тракама, а друга системом за бесконтактно мерење померања и деформација). То је обухватило са једне стране, позиционирање мерних трака и припрему система за аквизицију, а са друге, припрему стохастичких шара на местима предвиђеним за снимање, уз калибрацију камере на одређену мерну запремину.

– Мерења су спровођена симултано, мерним тракама и системом за бесконтактно мерење померања и деформације. То је значило, да је приликом оптерећивања камера позиционирана за снимање једног од изабраних места, а истовремено је бележено читавање мерних трака. Затим је камера премештана на следеће поље предвиђено и припремљено за снимање, а поступак је понављан. Резултати мерења су обрађени, анализирани и упоређени са резултатима нумеричког прорачуна. Добијена су висока поклапања резултата на свим изабраним местима и може се закључити да је нумерички модел верификован на овај начин. Исто тако, дата су упоредна мерења методе мерних трака и система за бесконтактно мерење померања и деформације, којима су демонстриране предности и недостаци једне и друге методе.

На основу свега претходно урађеног могу се извести следећи закључци:

- сложене просторне структуре, које се састоје од плоча као конструктивних елемената, могу се испитивати моделски (важе претпоставке Теорије сличности);
- веза напона скалиране (умањене) и стварне структуре је линеарна, са коефицијентом пропорционалности 1,22 у зонама где је идентификована концентрација напона;
- веза померања скалиране и стварне структуре је линеарна;

- сопствена фреквенца умањене структуре је онолико пута већа колико је умањена структура модела мања од стварне;
- израда квалитетног, репрезентативног, оптимално умањеног физичког модела намењеног лабораторијском испитивању је апсолутно оправдана за структуре овог типа (нпр. омогућава примену високософистицираних дијагностичких метода испитивања, које у реалним условима није могуће применити);
- лабораторијско испитивање физичког модела даје могућност подробнијег упознавања слабих места, као и идентификацију и решавање евентуалних критичних понашања стварне структуре;
- на основу виšekратно поновљених симултаних снимања померања и напона методом мерних трака и бесконтактном оптичком методом, као и анализом добијених резултата, потврђена је употребљивост, поузданост и веродостојност методе за бесконтактно мерење померања и деформације у испитивању сложених плочастих структура (без примене било какве друге контролне методе).

Остварени научни допринос докторске дисертације:

- формиран је поуздан нумеричко-експериментални модел просторне структуре роторног багера за потребе моделског испитивања;
- развијена је комплексна иновативна методологија моделског испитивања чврстоће структуре сложене просторне геометрије, која би могла бити имплементирана у процес пројектовања нових сличних конструкција;
- детаљном нумеричко-експерименталном дијагностиком утврђене су зоне лошег понашања моделске структуре са аспекта високе вредности напона и његове концентрације;
- нумерички је утврђено и доказано да је зависност напона и деформације стварне и умањене моделске конструкције линеарна;
- процењени су коефицијенти пресликавања напонских стања између умањене и стварне конструкције по групама градње;
- дијагностиковано је доминантно мембранско напрезање структуре које има за последицу коефицијент пресликавања близак 1, али су и идентификоване зоне

концентрације напона у којима је доминантан смицајни мембрански напон, тако да је у тим зонама процењени коефицијент пресликавања 1,22;

– на геометријски сложеном примеру доказана је употребљивост, поузданост и веродостојност методе за бесконтактно мерење померања и деформација;

– доказано је да се овако унапређена и побољшана методологија моделског испитивања чврстоће сложених структура може успешно реализовати, без великих ограничења и са довољном тачношћу.

Као једно од ограничења приликом израде докторске дисертације појавила се немогућност вишеосног оптерећивања лабораторијског модела. План је да се у будућности обезбеде квалитенији лабораторијски услови и изведу сетови експеримената са најразличитијим улазним подацима на постојећем физичком моделу. Такође, постоји план да се модел догради додавањем структуре стубова. Тиме би било омогућено “мапирање” понашања ове комплетне носеће структуре у лабораторијски симулираним технолошким условима рада и понуђена квалитетна решења за елиминисање евентуалних отказних појава (велики број машина овакве носеће структуре ради на површинским коповима у Србији). Овај нумерички и физички модел представљају само почетак у реализацији формирања базе нумеричких и физичких модела сложених структура, која би била значајна и са аспекта науке и са аспекта практичне примене у привреди. На основу досадашњих сазнања током израде модела и извођења лабораторијског експеримента на овом моделу, при изради неких нових физичких модела других конструкција, биће избегнути негативни утицаји конвенционалних метода израде (превелики унос топлоте, заостали напони, итд.) и израда новог модела ће бити знатно олакшана.

Литература

- [1] Liang Z., Reinhorn A.M., *Experimental Methods in Structural Engineering, Chapter 2 - Modeling and Similitude*, <http://civil.eng.buffalo.edu/cie616/2-LECTURES/Lecture 2 - Modeling and Scaling/Chapter2.pdf>
- [2] Atkins A., Caddell R., *The laws of similitude and crack propagation*, Int. J. mech. Sci. Pergamon Press, Vol. 16, 541-548, 1974.
- [3] Rezaeepazhand J., Simites G.J., *Design of scaled down models for predicting shell vibration response*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 195, No. 2, 301-311, 1996.
- [4] Simites G.J., *Structural similitude for flat laminated surfaces*, Composite Structures, Vol. 51, 191-194, 2001.
- [5] Castillo E.F., Cruchaga M.A., *Experimental vibration analysis for a 3D scaled model of a three-floor steel structure*, Latin American Journal of Solids and Structures Vol. 9, 597-613, 2012.
- [6] Ramu M., Prabhu Raja V., Thyla P.R., *Establishment of Structural Similitude for Elastic Models and Validation of Scaling Laws*, KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 17, No. 1, 139-144, 2013.
- [7] Prabhu Raja V., Ramu M., Thyla P.R., *Analytical and numerical validation of the developed structural similitude for elastic model*, Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, Vol. 20, 492-496, 2013.
- [8] Shehadeha M., Shennawya Y., El-Gamalb H., *Similitude and scaling of large structural elements: Case study*, Alexandria Engineering Journal, Vol. 54, No. 2, 147-154, 2015.
- [9] Rastogi G., Moin K., Abbas S.M., *Dimensional Analysis and Development of Similitude Rules for Dynamic Structural Models*, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Vol. 5, No. 3, 68-72, 2015.
- [10] Batul B., Sohail A., *Structural Similitude and Scaling of a Pressure Vessel*, https://www.researchgate.net/publication/271310961_Structural_Similitude_And_Scaling_Of_A_Pressure_Vessel

- [11]Rasper L., *Der Schaufelradbagger (The Bucket Wheel Excavator)*, Trans Tech Publications, 1973.
- [12]Durst W., Vogt W., *Bucket Wheel Excavator*, Trans Tech Publications, 1988.
- [13]DIN 22261-2 *Excavators, spreaders and auxiliary equipment in opencast lignite mines - Part 2: Calculation principles*
- [14]Dreyer E., *Cost-effective prevention of equipment failure in the mining industry*, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 61, No. 2-3, Failures '94 An International Symposium on Risk, Economy and Safety, Failure Minimisation and Analysis, 329-347, 1995.
- [15]Maneski T., Sedmak A., *Analiza stanja, dijagnostika ponašanja, procena čvrstoće i preostalog radnog veka, revitalizacija*, Structural integrity and life, Vol. 1, No. 2, 107-110, 2001.
- [16]Maneski T., Ignjatović D., *Structural performance diagnostics*, Structural integrity and life, Vol. 4, No. 1, 3-7, 2004.
- [17]Maneski T., *Structure Behavior Analysis and Diagnostic*, FME Transactions 33, 89-95, 2005.
- [18]Maneski T., Milošević-Mitić V., *Numerical and experimental diagnostics of structural strength*, Structural integrity and life, Vol. 10, No. 1, 3-10, 2010.
- [19]Daničić D., Maneski T., Ignjatović D., *Structural diagnostics and behaviour of bucket wheel excavators*, Structural integrity and life, Vol. 10, No. 1, 53-59, 2010.
- [20]Maneski T., Ignjatović D., *Repair and reconstruction of bucket wheel excavators*, Structural integrity and life, Vol. 4, No. 1, 9-28, 2004.
- [21]Maneski T., Ignjatović D., *Repair and reconstruction of belt wagons and stackers*, Structural integrity and life, Vol. 4, No. 1, 29-38, 2004.
- [22]Daničić D., Maneski T., *The structure failure of discharge boom of bucket wheel excavator C700s due to dynamic effects*, Structural integrity and life, Vol. 12, No. 1, 43-46, 2012.

- [23]Jovančić P., Ignjatović D., Tanasijević M., Maneski T., *Load-bearing steel structure diagnostics on bucket wheel excavator, for the purpose of failure prevention*, Engineering Failure Analysis, Vol. 18, No. 4, 1203-1211, 2011.
- [24]Maneski T., Jovančić P., Ignjatović D., Milošević-Mitić V., Maneski M., *Condition and behaviour diagnostics of drive groups on belt conveyors*, Engineering Failure Analysis, Vol. 22, 28-37, 2012.
- [25]Jovančić P., Ignjatović D., Maneski T., *Behaviour Diagnostics of Drive Units on Bucket Wheel Excavators*, Machine Design, University of Novi Sad, 155-162, 2009.
- [26]Allaboudi E., Maneski T., Trišović N., Ergić T., *Improving Structure Dynamic Behaviour Using a Reanalysis Procedures Technique*, Technical Gazette, Vol. 20, No. 2, 297-304, 2013.
- [27]Rusiński E., Czmochowski J., Pietrusiak D., *Problems of steel construction modal models identification*, Maintenance and Reliability, Vol. 14, No. 1, 2012.
- [28]Gottvald J., *Measuring and Comparison of Natural Frequencies of Bucket Wheel Excavators SchRs 1320 and K 2000*, GEMESD '11 Proceedings of the 4th WSEAS international conference on Energy and development - environment - biomedicine, 335-340, 2011.
- [29]Gottvald J., *Analysis of Vibrations of Bucket Wheel Excavator Schrs1320 During Mining Process*, FME Transactions 40, 165-170, 2012.
- [30]Bošnjak S., Zrnić N., *Dynamics, failures, redesigning and environmentally friendly technologies in surface mining systems*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 12, No. 3, 348-359, 2012.
- [31]Bošnjak S., Pantelić M., Zrnić N., Gnjatović N., Đorđević M., *Failure analysis and reconstruction design of the slewing platform mantle of the bucket wheel excavator O&K SchRs 630*, Engineering Failure Analysis, Vol. 18, No. 2, 658-669, 2011.
- [32]Bošnjak S., Petković Z., Matejić P., Zrnić N., Petrić S., Simonović A., *Analysis of Stress-Strain State of Bucket Wheel Excavator Revolving Platform Structure – Fundament of Efficient Reconstruction*, Structural Integrity and Life, Vol. 5, No. 3, 129–142, 2005.

- [33]Bošnjak S., Petković Z., Zrnić N., Simić G., Simonović A., *Cracks, repair and reconstruction of bucket wheel excavator slewing platform*, Engineering Failure Analysis, Vol. 16, No. 5, 1631-1642, 2009.
- [34]Bošnjak S., Savićević S., Gnjatović N., Milenović I., Pantelić M., *Disaster of the bucket wheel excavator caused by extreme environmental impact: Consequences, rescue and reconstruction*, Engineering Failure Analysis, Vol. 56, 360-374, 2015.
- [35]Bošnjak S., Petković Z., Simonović A., Zrnić N., Gnjatović N., *'Designing-in' failures and redesign of bucket wheel excavator undercarriage*, Engineering Failure Analysis, Vol. 35, 95-103, 2013.
- [36]Bošnjak S., Zrnić N., Simonović A., Momčilović D., *Failure analysis of the end eye connection of the bucket wheel excavator portal tie-rod support*, Engineering Failure Analysis, Vol. 16, No. (Issue) 3, 740-750, 2009.
- [37]Bošnjak S., Petković Z., Zrnić N., Pantelić M., Obradović A., *Failure analysis and redesign of the bucket wheel excavator two-wheel bogie*, Engineering Failure Analysis, Vol. 17, No. 2, 473-485, 2010.
- [38]Bošnjak S., Petković Z., Atanasovska I., Milojević G., Mihajlović V., *Bucket chain excavator: Failure analysis and redesign of the counterweight boom supporting truss columns*, Engineering Failure Analysis, Vol. 32, 322-333, 2013.
- [39]Bošnjak S., Momčilović D., Petković Z., Pantelić M., Gnjatović N., *Failure investigation of the bucket wheel excavator crawler chain link*, Engineering Failure Analysis, Vol. 35, 462-469, 2013.
- [40]Bošnjak S., Arsić M., Zrnić N., Odanović Z., Đorđević M., *Failure Analysis of the Stacker Crawler Chain Link*, Procedia Engineering, Vol. 10, 11th International Conference on the Mechanical Behavior of Materials (ICM11), 2244-2249, 2011.
- [41]Bošnjak S., Zrnić N., Gnjatović N., *Geometry of the Substructure as a Cause of Bucket Wheel Excavator Failure*, Machine Design, University of Novi Sad, 135-140, 2009.
- [42]Daničić D., Sedmak S., Ignjatović D., Mitrović S., *Bucket Wheel Excavator Damage by Fatigue Fracture – Case Study*, Procedia Materials Science, Vol. 3, 20th European Conference on Fracture, 1723-1728, 2014.

- [43]Rusiński E., Czmochowski J., Iluk A., Kowalczyk M., *An analysis of the causes of a BWE counterweight boom support fracture*, Engineering Failure Analysis, Vol. 17, No. 1, Papers presented at the 25th meeting of the Spanish Fracture Group, 179-191, 2010.
- [44]Savković M., Gašić M., Petrović D., Zdravković N., Pljakić R., *Analysis of the drive shaft fracture of the bucket wheel excavator*, Engineering Failure Analysis, Vol. 20, 105-117, 2012.
- [45]Savković M., Gašić M., Arsić M., Petrović R., *Analysis of the axle fracture of the bucket wheel excavator*, Engineering Failure Analysis, Vol. 18, No. 1, 433-441, 2011.
- [46]Rusiński E., Harnatkiewicz P., Kowalczyk M., Moczko P., *Examination of the causes of a bucket wheel fracture in a bucket wheel excavator*, Engineering Failure Analysis, Vol. 17, No. 6, 1300-1312, 2010.
- [47]Maślak P., Smolnicki T., Pietrusiak D., *Strain gauges measurements and FEM analysis of elements of chassis of open cast mining machines*, Technical Gazette Vol. 20, No. 4, 655-658, 2013.
- [48]Sprečić D., Mulahalilović F., Mrkaljević F., *Identification the Stress on the Working Wheel Carrier of the Loading System the Bucket-Wheel Excavator*, MTTER Volume 2, No. 1, 24-28, 2013.
- [49]Yurchenko E.V., Mehtiev A.D., Yugai V.V., Bulatbayev F.N., *Using of science technologies for mining machinery constructions' strength improvement*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 81, 2015.
- [50]Vukojević N., Hadžikadunić F., Imamović M., *Evaluation of stress-strain state of repaired bucket wheel excavator SH630*, 17th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" TMT 2013, 449-452, 2013.
- [51]Petrović A., Maneski T., Trišović N., Ignjatović D., Dunjić M., *Identification of crack initiation cause in pylons construction of the excavator SchRs630*, Technical Gazette, DOI Number 10.17559/TV-20160919123405

- [52] Petrović B., Petrović A., Ignjatović D., Grozdanović I., Kozak D., Katinić M., *Assessment of the maximum possible extension of bucket wheel SchRs740 boom based on static and dynamic calculation*, Technical Gazette, Vol. 23, No. 4, 1233-1238, 2016.
- [53] Smolnicki T., Stańco M., Pietrusiak D., *Distribution of loads in the large size bearing - problems of identification*, Technical Gazette Vol. 20, No. 5, 831-836, 2013.
- [54] Живанчевић Д., Прилог пројектовању кугличних стаза на тешким машинским системима, Машински факултет, Београд, 1997.
- [55] Tokarczyk J., *Methods for Verification of Virtual Prototypes of Mining Machines for Strength Criterion*, Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2011 Vol II, San Francisco, USA, 2011.
- [56] Zuber N., Ličen H., Klačnja-Miličević A., *Remote online condition monitoring of the bucket wheel excavator SRs1300 – a case study*, Journal of Applied Engineering Science, Vol. 7, No. 25, 31-40, 2009.
- [57] Jovančić P., Ignjatović D., *Proactive monitoring system for main mining mechanization at open cast mines*, Structural integrity and life, Vol. 10, No. 1, 11-19, 2010.
- [58] Rusiński E., Czmochowski J., Pietrusiak D., *Selected Problems in Designing and Constructing Surface Mining Machinery*, FME Transactions 40, 153-164, 2012.
- [59] Tanasijević M., Ivezić D., *Quality of Service Evaluation for Bucket Wheel Excavator*, FME Transactions 35, 141-148, 2007.
- [60] Tanasijević M., Ivezić D., Jovančić P., *Estimation of bucket wheel excavator dependability using fuzzy algebra rules*, Structural integrity and life, Vol. 10, No. 1, 43-52, 2010.
- [61] Polovina D., Ivković S., Ignjatović D., Tanasijević M., *Remaining operational capabilities evaluation of bucket wheel excavator by applying expert assessment method with empirical correction factor*, Structural integrity and life, Vol. 10, No. 1, 31-41, 2010.

- [62]Turner M.J., Clough R.W., Martin H.C., Topp L.J., *Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures*, Journal of the Aerospace Sciences, 23 (9), Sept. 1956.
- [63]Peters W, Ranson W., *Digital imaging techniques in experimental stress analysis*, Optical Engineering, Vol. 21, No. 3, 427-31, 1982.
- [64]Sutton M., Wolters W., Peters W., McNeill S., *Determination of displacements using an improved digital correlation method*, Image and Vision Computing, Vol. 1, No. 3, 133-139, 1983.
- [65]Chu T.C., Ranson W.F., Sutton M.A., *Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics*, Experimental Mechanics, Vol. 25, No. 3, 232-244, 1985.
- [66]***, *Aramis – 3D Deformation Analysis, систем за оптичко мерење*, GOM, Немачка, <http://www.gom.com/metrology-systems/systemoverview/aramis.html>.
- [67]Sutton M.A., McNeill S.R., Helm J.D., Chao Y.J., *Advances in Two-Dimensional and Three-Dimensional Computer Vision*, Photomechanics, Vol. 77 of the series Topics in Applied Physics, 323-372, 2000.
- [68]Wattrisse B., Chrysochoos A., Muracciole J.-M., Némoz-Gaillard M., *Analysis of strain localization during tensile tests by digital image correlation*, Experimental Mechanics, Vol. 41, No. 1, 29-39, 2001.
- [69]Chevalier L., Calloch S., Hild F., Marco Y., *Digital image correlation used to analyze the multiaxial behavior of rubber-like materials*, European Journal of Mechanics - A/Solids, Vol. 20, No. 2, 169-187, 2001.
- [70]Bornert M., Brémand F., Doumalin P., Dupré J.C., Fazzini M., Grédiac M., Hild F., Mistou S., Molimard J., Orteu J.J., Robert L., Surrel Y., Vacher P., Wattrisse B., *Assessment of Digital Image Correlation Measurement Errors: Methodology and Results*, Experimental Mechanics, Vol. 49, No. 3, 353-370, 2009.
- [71]Fazzinia M., Mistou S., Dalvernaya O., Robert L., *Study of image characteristics on digital image correlation error assessment*, Optics and Lasers in Engineering, Vol. 48, No. 3, 335-339, 2010.

- [72]Sebastian C., Patterson E.A., *Calibration of a Digital Image Correlation System*, Experimental Techniques, Vol. 39, No. 1, 21-29, 2015.
- [73]Sadowski T., Zarzeka-Raczkowska E., *Hybrid Adhesive Bonded and Riveted Joints - Influence of Rivet Geometrical Layout on Strength of Joints*, Archives of Metallurgy and Materials, Vol. 57, No. 4, 1127-1135, 2012.
- [74]Dubois D., Zellmer H., Markiewicz E., *Experimental and numerical analysis of seat belt bunching phenomenon*, International Journal of Impact Engineering, Vol. 36, No. (Issue) 6, 763-774, 2009.
- [75]Sadowski T., Marsavina L., Craciun E.M., Kneć M., *Modelling and experimental study of parallel cracks propagation in an orthotropic elastic material*, Computational Materials Science, Vol. 52, No. 1, 231-235, 2012.
- [76]Xavier J., Sousa A.M.R., Morais J.J.L., Filipe V.M.J., Vaz M.A., *Measuring displacement fields by cross-correlation and a differential technique: experimental validation*, Optical Engineering, Vol. 51, No. 4, 2012.
- [77]Ribeiro J., Vaz M., Lopes H., De Melo F.Q., Monteiro J., *Assessment of the Displacement Field Along a Surface Crack in a Flat Plate Using Optical Techniques*, Experimental Techniques, Vol. 39, No. 5, 10-20, 2015.
- [78]Gentile D., Iannitti G., Bonora N., *Experimental measurement and model validation of COD in pipe under bending with off-centered circumferential crack*, Frattura ed Integrità Strutturale, Vol. 28, 42-50, 2014.
- [79]Liang Z., Yin B., Liu H., Mo J., Wang S., *Displacement measurement of specimen surfaces with damaged areas by digital image correlation*, Measurement, Vol. 76, 183-188, 2015.
- [80]Eriksen R., Berggreen C., Boyd S.W., Dulieu-Barton J.M., *Towards high velocity deformation characterisation of metals and composites using Digital Image Correlation*, EPJ Web of Conferences 6, 31013, 2010.
- [81]Schmidt T., Tyson J., Galanulis K., Revilock D., Melis M., *Full-field dynamic deformation and strain measurements using high-speed digital cameras*, Proceedings of the SPIE 26th International Congress on High-speed photography and photonics, Alexandria, Virginia, 2004.

- [82]Gajewski T., Garbowski T., *Calibration of concrete parameters based on digital image correlation and inverse analysis*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 1, 170-180, 2014.
- [83]Hu Q., Yang X., Cai Q., Huang C., *Application of ARAMIS Digital Speckle In Clay Interlayer Deformation Measurement*, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 20, 2015.
- [84]Dridi S., Morestin F., Dogui A., *Use of Digital Image Correlation to Analyse the Shearing Deformation in Woven Fabric*, Experimental Techniques, Vol. 36, No. (Issue) 5, 46-52, 2012.
- [85]Mitrović N., Milošević M., Momčilović N., Petrović A., Sedmak A., Maneski T., Zrilić M., *Experimental and numerical analysis of local mechanical properties of globe valve housing*, Chemicke Listy, Vol. 106, No. 1, s491-s494, 2012.
- [86]Maneski T., Bajić D., Momčilović N., Mitrović N., Milošević M., Petrović A., Balać M., *Analysis of the stress field in a model of pipe branches*, Proceedings of TEAM 2015, 7th International Scientific and Expert Conference of the International TEAM Society, 402-405, 2015.
- [87]Milošević M., Mitrović N., Jovičić R., Sedmak A., Maneski T., Petrović A., Aburuga T., *Measurement of local tensile properties of welded joint using Digital Image Correlation method*, Chemicke Listy, Vol. 106, No. 1, s485-s488, 2012.
- [88]Milošević M., Milošević N., Sedmak S., Tatić U., Mitrović N., Hloch S., Jovičić R., *Digital image correlation in analysis of stiffness in local zones of welded joints*, Technical Gazette, Vol. 23, No.1, 19-24, 2016.
- [89]Mitrović N., Milošević M., Sedmak A., Petrović A., Prokić-Cvetković R., *Application and Mode of Operation of Non-Contact Stereometric Measuring System of Biomaterials*, FME Transactions 39, 55-60, 2011.
- [90]Sedmak A., Milošević M., Mitrović N., Petrović A., Maneski T., *Digital image correlation in experimental mechanical analysis*, Structural integrity and life, Vol. 12, No. 1, 39-42, 2012.
- [91]Tanasić I., Milić-Lemić A., Tihašek-Šojić Lj., Stančić I., Mitrović N., *Analysis of the compressive strain below the removable and fixed prosthesis in the posterior*

mandible using a digital image correlation method, Biomechanics and Modeling in Mechanobiology 11, 751-758, 2012.

- [92] Tanasić I., Šarac D., Mitrović N., Tihašek-Šojić Lj., Mišković Ž., Milić-Lemić A., Milošević M., *Digital Image Correlation Analysis of Vertically Loaded Cylindrical Ti-Implants With Straight and Angled Abutments*, Experimental Techniques, 2015.
- [93] Tatić U., Čolić K., Sedmak A., Mišković Ž., Petrović A., *Evaluation of the Locking Compression Plates stress-strain fields*, Technical Gazette, DOI Number 10.17559/TV-20170420121538
- [94] Yuxi Chen, Diansen Yang, Yongshang Ma, XianJun Tan, Zhan Shi, Taoran Li, and Haipeng Si, *Experimental Investigation on the Mechanical Behavior of Bovine Bone Using Digital Image Correlation Technique*, Applied Bionics and Biomechanics, 2015.
- [95] Zhao S., Gu L., Froemming S.R., *Experimental investigation of the stent-artery interaction*, Journal of Medical Engineering & Technology, Vol. 37, 463-469, 2013.
- [96] Goellner M., Schmitt J., Karl M., Wichmann M., Holst S., *Photogrammetric measurement of initial tooth displacement under tensile force*, Medical Engineering & Physics, Vol. 32, 883–888, 2010.
- [97] Калајџић М., *Метод коначних елемената*, Институт за машине и алате, Београд, 1978.
- [98] Манески Т., *Компјутерско моделирање и прорачун структура*, Машински факултет, Београд, 1998.
- [99] Моток М., *Чврстоћа брода: одабрана поглавља статичке анализе*, Машински факултет, Београд, 2005.
- [100] Timoshenko S., *Theory of elasticity*, McGraw-Hill, New York, 1951.
- [101] Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S., *Theory of plates and shells*, McGraw–Hill, New York, 1959.

- [102]Тришовић Н., *Модификација динамичких карактеристика у структуралној реанализи механичких система*, докторска дисертација, Машински факултет, Београд, 2007.
- [103]Манески Т., *Прилог развоју система пројектовања применом рачунара носећих структура машина алатки*, докторска дисертација, Машински факултет, Београд, 1991.
- [104]Момчиловић Н., *Моделирање чврстоће ортотропних панела бродске конструкције еквивалентним неоребреним плочама*, докторска дисертација, Машински факултет, Београд, 2014.
- [105]Манески Т., Милошевић-Митић В., Острић Д., *Поставке чврстоће конструкција*, Машински факултет, Београд, 2002.
- [106]Hoffmann K., *An Introduction to Stress Analysis and Transducer Design using Strain Gauges*, www.hbm.com
- [107]Техничка документација багера SchRs630 произвођача O&K Orenstein&KoppelAG, власништво ЈП ЕПС, огранак РБ Колубара

БИОГРАФСКИ ПОДАЦИ АУТОРА

Ана Петровић рођена је 23.01.1988. године у Београду. Након завршене основне школе уписала је Четврту гимназију у Београду (природно-математички смер), коју је завршила 2006. године као Ђак генерације. Машински факултет Универзитета у Београду уписала је 2006. године. Основне академске студије (B.Sc.) завршила је 2009. године, а Дипломске академске студије (M.Sc.) 2011. године са укупном просечном оценом 10/10.

Докторске академске студије уписала је 2011. године на истом факултету. Осим обавезних предмета, положила је изборне предмете: Теорија еластичности, Термоелеастичност, Метода коначних елемената, Компјутерско моделирање и прорачун структура, Мерење напона и деформације. Радила је на великом броју експеримената у оквиру Лабораторије за Отпорност конструкција.

Запослена је на Машинском факултету од 15.12.2011. године као асистент на Катедри за Отпорност конструкција. Учествоје у настави из предмета Отпорност материјала, ID: 0020 и Основи отпорности конструкција, ID: 0021. Током школске 2016/2017. године, ангажована је у настави на Рударско-геолошком факултету Универзитета у Београду из предмета Механика 1 и Отпорност материјала. Од школске 2014/2015. године, члан је Комисије за маркетинг студија Машинског факултета.

Служи се програмима за цртање, моделирање и нумеричке прорачуне КОМИПС, Catia, Rhinoceros. Течно говори енглески, а служи се француским језиком.

Учествоје у раду на пројекту TP35040 „Развој савремених метода дијагностике и испитивања машинских структура“. У претходном периоду учествовала је и на пројекту научне и технолошке сарадње Републике Србије и Народне Републике Кине за период 2013-2015. године, број 2-14.

Аутор је и коаутор на више од 15 стручних и научних радова, од којих је 5 штампано у међународним часописима који имају импакт фактор на SCI листи.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписана Ана С. Петровић

број индекса D34/11

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

МОДЕЛСКО ИСПИТИВАЊЕ ЧВРСТОЋЕ СТРУКТУРА СЛОЖЕНЕ ПРОСТОРНЕ ГЕОМЕТРИЈЕ

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршила ауторска права и користила интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 23.06.2017.

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Ана С. Петровић

Број индекса D34/11

Студијски програм

Наслов рада МОДЕЛСКО ИСПИТИВАЊЕ ЧВРСТОЋЕ СТРУКТУРА СЛОЖЕНЕ
ПРОСТОРНЕ ГЕОМЕТРИЈЕ

Ментор проф. др Ташко Манески

Потписана Ана С. Петровић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предала за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 23.06.2017.

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

МОДЕЛСКО ИСПИТИВАЊЕ ЧВРСТОЋЕ СТРУКТУРА СЛОЖЕНЕ ПРОСТОРНЕ ГЕОМЕТРИЈЕ

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предала сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучила.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

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

Потпис докторанда

У Београду, 23.06.2017.

1. Ауторство - Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство – без прераде. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.