

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

**A. Meļņikovs**

**Metamodelēšanas pielietojums konstrukciju  
elementu formas optimizācijai**

**PROMOCIJAS DARBS**

**2013**

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**  
Transporta un mašīnzinību fakultāte  
Mehānikas institūts

**Anatolijs MEĻNIKOVS**

Doktora studiju programmas „Inženiertehnika, mehānika un mašīnbūve” doktorants

**METAMODELĒŠANAS PIELIETOJUMS  
KONSTRUKCIJU ELEMENTU FORMAS  
OPTIMIZĀCIJAI**

**Promocijas darbs**

Zinātniskais vadītājs  
Dr. sc. ing., profesors  
**A.JANUŠEVSKIS**

**Rīga 2013**



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā «Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai».

## ANOTĀCIJA

Šajā darbā izstrādāta metodika konstrukciju elementu formas optimizācijai, izmantojot metamodeļus. Metodika paredz NURBS atbalsta vai mezgla punktu izmantošanu konstrukcijas elementu formas uzdošanai, to izvietojuma plānošanu, metamodeļu būvēšanu un pielietojumu formas optimizācijai. Tiek apskatītas tikai konstrukcijas elementu gludas formas, kuras tiek uzdotas ar NURBS. Negludas formas netiek apskatītas un ir izslēgtas no optimizācijas procesa. Iegūtās konstrukciju elementu formas ir viegli tehnoloģiski realizējamas, un tai pašā laikā formas optimizāciju ir iespējams veikt ar parastu vidējas skaitļošanas jaudas datoru. Metodika paredz komerciālās CAD programmatūras, kā arī RTU izstrādātās programmas EDAOpt eksperimentu plānošanai, metamodeļu būvēšanai un optimizācijai pielietojumu.

Pirmajā nodaļā ir pamatota izvēlētās tēmas aktualitāte, apskatīti NURB splineu formas uzdošanas galvenie paņēmieni, klasiskās formas optimizācijas metodes, jaunākie pētījumi dotā virzienā un problēmas ar kurām saskaras citi autori. Noformulēts pētījumu mērķis un uzdevumi, kā arī parādītas problēmas, kuras ir nepieciešams atrisināt, lai izveidotā formas optimizācijas metodika būtu efektīva.

Otrajā nodaļā ir izstrādāta formas optimizācijas metodika. Tā tiek pārbaudīta uz divu testa uzdevumu bāzes. Pirmajā uzdevumā tiek optimizēta plāksnītes forma pie lieces sloojuma un ierobežojuma uz pārvietojumu, bet otrajā – pie divasu stiepes sloojuma un ierobežojuma uz maksimālo ekvivalento spriegumu. Atrastās optimālās formas salīdzinātas ar citu autoru darbos iegūtajām. Tiek analizēta trīs formas uzdošanas paņēmieni efektivitāte. Parādīts, ka, izmantojot izstrādāto metodiku, un uzdodot formu ar NURB splaina daudzstūra atbalsta punktiem, var iegūt labākus optimizācijas rezultātus nekā ar darbietilpīgo homogenizācijas metodi. Pirmā uzdevuma rezultāti tiek validēti, veicot naturālos eksperimentus.

Nākošajās nodaļās izstrādātā metodika tiek izmantota reālu konstrukciju elementu optimizācijai. Katrā apskatītajā gadījumā ir ievērotas optimizācijas uzdevuma īpatnības un tiek atrasts atbilstošs risinājums. 3. un 5. nodaļās aprakstītās optimizācijas problēmas un konkrēto objektu projektēšanas uzdevumi ir saņemti no Latvijas uzņēmumiem - SIA "Baltijas Testēšanas centrs" un SIA "Merpro".

Trešajā nodaļā ir risināta diska formas optimizācijas problēma. Šim noņemamam diskam tiek piestiprināts aprīkojums, kurš tiek izmantots vilcienu vagonu riteņpāru monitoringam. Aprēķini tiek veikti uz kravas vagona ratiņu riteņpāra piemēra bāzes.

Izstrādāts noņemamais mērīšanas aprīkojums, kas nodrošina iespēju veikt mērījumus vagona vai lokomotīves sistēmas ritenis–sliede monitoringa laikā, izmantojot štata ritenpāri kā tenzometrisko. Tas atļauj izvairīties no štata ritenpāra maiņas uz speciālo tenzometrisko, lai samazinātu izmēģinājumu izdevumus. Tiek iegūtas diska šķērsriezuma formas ar 3 to uzdošanas paņēmieniem, izmantojot tikai 3 optimizācijas parametrus. Atrasta mērīšanas sistēmas noņemamā diska optimālā forma pie uzdotajiem stiprības un tehnoloģiskajiem ierobežojumiem.

Ceturtajā nodaļā tiek risināts uzdevums – doba betona bloka formas optimizācija. Tiek parādīts, ka izstrādātai metodikai ir plašs pielietojums. Izmantojot izstrādāto metodiķu parādījās iespēja formulēt risināmo uzdevumu, ievērojot raksturīgos Latvijas ekspluatācijas apstākļus. Tiek meklēta doba betona bloka forma, izvērtējot materiālu izlietojumu no stiprības un siltumizolācijas viedokļiem. Kā bloka termomodelis kalpo viens bloks, kurā ievērtēta bloka materiālu siltumvadāmība un konvekcijas process uz bloka ārsienas. Kā bloka stiprību aprakstošie modeļi kalpo viena bloka modelis ar dažādiem robežnoteikumiem un dažāda mūrējuma sienu modeļi. Optimizācijas rezultāti parādīja, ka ir iespējams samazināt bloka masu, izmantojot atrasto alternatīvā bloka izgriezuma formu.

Piektajā nodaļā izskatīts metodikas pielietojums vieglā automobiļa un autobusa kontroles mērinstrumentu paneļu (KMP) elementu formas optimizācijai. KMP jāapmierina vairākas svarīgas prasības: pieļaujamo spriegumu līmenis, stinguma, masas un precizitātes raksturojumi, kā arī KMP dzīves ciklam jābūt ar minimālu negatīvo ietekmi uz apkārtējo vidi. Izstrādāti 3D ģeometriskie KMP modeļi, aprēķināti statistiskie un dinamiskie raksturojumi. Tiek izanalizēti KMP ietekmes uz apkārtējo vidi rādītāji: summārās nepieciešamās ražošanas enerģijas izmaksas, oglekļa dioksīda un skābes izmeši atmosfērā un ūdens tilpņu eutrofikācija. KMP dinamiskā uzvedība atrastai alternatīvai konstrukcijai tiek pārbaudīta, risinot pilno GE modeli gan gadījumam ar determinēto ierosmi, gan gadījumam ar gadījuma ierosmi. Tālāk tiek risināts autobusa KMP kronšteina stiprības uzdevums. Parādīts, ka ievērojot ievētos ierobežojumus, ir iespējams iegūt optimālo risinājumu autobusa KMP kronšteina formai.

Sestajā nodaļā veikta tetrapodu elementa formas optimizācija. Pamatojoties uz iepriekš atrastām tā mehānisko īpašību priekšrocībām, piemēram, augsts stingums pie spiedes slodzēm, tiek definēta optimizācijas problēma. Izmantojot izstrādāto metodiķu, sākumā veikta tetrapoda formas efektīva parametrizācija ar 3 mainīgajiem. Tiek atrasts vienkāršots tetrapodu konstrukcijas GE modelis, ar kuru ir iespējams aprakstīt tetrapoda slodzes uzņemšanas raksturu lielākām konstrukcijām. Tālāk tiek veikta tetrapoda formas optimizācija,

maksimizējot tā stiprību pie ierobežojuma uz konstrukcijas tilpumu. Parādīts, ka iegūtos rezultātus ir iespējams izmantot jaunu nestandarta atbalsta konstrukciju radīšanai.

Promocijas darbs satur 6 nodaļas, secinājumus un literatūras sarakstu ar atsaucēm uz 120 literatūras avotiem. Darbā iekļautas 13 tabulas un 112 attēli. Promocijas darba kopējais apjoms ir 143 lappuses.

## АННОТАЦИЯ

В данной работе разработана методика оптимизации формы элементов конструкций с использованием метамоделей. Методикой предусматривается планирование расположения контрольных точек полигона или узловых точек NURB сплайнов, задающих проектируемую форму, и построение соответствующих метамоделей, используемых в дальнейшем для оптимизации. При использовании данной методики получаются только гладкие формы задаваемые NURB сплайнами. Негладкие формы не анализируются и исключаются из процесса оптимизации. Полученные формы технологически легко реализуемы и в тоже время для проектирования не требуется огромных вычислительных ресурсов, следовательно, оптимизацию можно проводить с помощью обычного персонального компьютера. Методика предусматривает использование коммерческих CAD программ, а также созданной в РТУ программы EDAOpt для планирования экспериментов, построения метамоделей и оптимизации.

В первой главе обоснована актуальность выбранной темы, рассмотрены главные приёмы задавания формы с помощью NURB сплайнов, классические методы оптимизации формы, новые исследования в данном направлении и проблемы с которыми сталкиваются авторы других работ. Сформулированы цели исследования и задачи, а также проблемы, которые необходимо решить, чтобы разработанная методика была эффективна.

В 2 главе методика проверяется на двух тестовых задачах. В первом случае оптимизируется форма пластины при ее изгибе и ограничениях на перемещения, во втором - при ее двухосном растяжении и ограничениях на эквивалентные напряжения. Полученные результаты оптимизации формы выреза сравниваются с результатами других авторов. Анализируется эффективность 3 приемов задания граничной формы. Показано, что используя разработанную методику и задавая форму контрольными точками полигона NURB сплайнов достигнуты наилучшие результаты, которые превосходят результаты полученные классическим методом гомогенизации. Результаты первого случая валидированы – проведены натуральные эксперименты.

В следующих главах данная методика эффективно применяется для оптимизации формы элементов реальных конструкций. В каждом случае детально учитывается специфика решаемой задачи оптимизации и находятся соответствующие

решения. Проблемы проектирования и оптимизации глав и 3 и 5 были получены от латвийских предприятий ООО „Балтийский Испытательный Центр” и ООО „Мерпро”.

В 3 главе решается проблема оптимизации формы диска предназначенного для крепления измерительной системы колесной пары вагона. Расчёты выполнены на примере колесной пары тележки грузового вагона. Разработано оборудование, обеспечивающее возможность выполнять измерения по мониторингу системы колесо-рельс на вагоне либо локомотиве, используя его штатную колесную пару. Отсутствие необходимости замены колесной пары на специальную тензометрическую сокращает затраты и время на проведение испытаний. Рассмотрены и сравнены 3 приёма задания формы поперечного сечения диска, используя только 3 параметра. Найдена оптимальная форма поперечного сечения съёмного диска измерительной системы вагона при заданных прочностных и технологических ограничениях.

В 4 главе решается вторая практическая задача: оптимизация формы пустотелого бетонного блока. Показано, что разработанная методика имеет широкую область применения. Используя разработанную методику оптимизации, появилась возможность конкретизировать решаемую задачу и учитывать характерные для Латвии эксплуатационные условия. Оптимизируется форма пустотелого бетонного блока, учитывая расход материала с точки зрения прочности и теплоизоляции. В качестве термомодели служит одинарный блок, который учитывает теплопроводность материалов блока и конвекционный процесс на наружной стенке блока. В качестве прочностных моделей служит модель одинарного блока с различными граничными условиями и модели стен различной кладки. Результаты оптимизации показали возможность уменьшить массу блока, используя, полученную альтернативную форму выреза.

В 5 главе рассмотрено применение данной методики для оптимизации формы элементов корпуса автомобильного и автобусного приборного щитка, которые должны удовлетворять многие требования – такие как допустимый уровень напряжений, жесткостные, весовые и точностные характеристики. При этом должны быть минимальные вредные воздействия на окружающую среду. Разработаны трехмерные геометрические модели приборных щитков, рассчитаны статические и динамические характеристики, а также оценены такие показатели воздействия на окружающую среду как суммарные энергетические затраты, выбросы диоксида углерода и кислотные выбросы в атмосферу, эвтрофикация водоемов. Динамическое поведение приборного

щитка для найденных альтернативных решений конструкции, проверяется решением полных КЭ моделей как для случая детерминированного, так и стационарного случайного возбуждения. Далее решается проблема прочности кронштейнов приборного щитка автобуса. Показано, что, используя введённые ограничения, есть возможность найти соответствующие оптимальные решения для формы кронштейна приборного щитка автобуса.

В 6 главе проведена оптимизация формы элемента-тетрапода. Принимая во внимание, ранее найденные, такие преимущества элемента как высокая жёсткость при сжимающих нагрузках, определена проблема оптимизации. Используя разработанную методику, сначала проведена эффективная параметризация формы элемента с помощью 3 параметров. Найдена упрощенная модель КЭ конструкции, с помощью которой, возможно описать характер нагружения элемента-тетрапода в более громоздких конструкциях. Далее максимизируется прочность элемента при ограничении на его объём. Показано, что найденные решения возможно использовать для новых конструкций.

Данная работа содержит 6 глав, 13 таблиц, 112 иллюстраций, выводы и 120 ссылок на источники литературы. Общий объём диссертации с приложениями 143 стр.

## ANNOTATION

In this thesis the shape optimization technique is elaborated by using metamodels. The technique consists of designing location of the control points of polygon or knot points of NURB splines for the shape definition and building of the appropriate metamodels of responses for subsequent optimization. The smooth shapes defined by NURB splines are obtained using proposed technique. The jagged shapes are not analyzed and are excluded from the optimization process. The obtained shapes are implemented in a technologically easy way. Additionally, the design and optimization methods do not require large computational resources and can be realized by ordinary personal computer. The technique is based on using the commercial CAD software as well as the original code EDAOpt developed in RTU for design of experiments, approximation and optimization.

In the 1st chapter the actuality of the thesis is discussed; shape definition techniques with NURB splines, classical shape optimization methods, recent literature of the topic are discussed. The objectives and aim of the research are stated. Actual problems and efficiency that had to be solved for proposed technique of the shape optimization are formulated.

In the second chapter, the proposed technique of the shape optimization is described and verified on the base of two test problems. The first is concerned with the shape optimization of the plate bending problem with displacement constraints and the second – of the plate biaxial tension problem with equivalent stress constraints. The optimization results are compared with results of other authors. The efficiency of the three procedures of the shape definition is analyzed. It is shown that the utilization of the proposed technique and the definition of a shape by procedure of the polygon control points of NURB spline give better results than the results obtained by classical homogenization method. The results of the first test problem are validated by natural experiments.

Next, the proposed technique is applied for shape optimization of real constructions elements. In each case problem is particularly considered taking into account the specific and appropriate solution that is proposed. The problems of chapters 3rd and 5th are given by Latvian enterprises Ltd “Baltic Testing Center” and Ltd “Merpro”.

In the 3rd chapter the shape optimization of mounting disk for wheel pair measurements system fastening is solved. The task is developed on the basis of the wheel pair of railway freight wagon. The proposed equipment allows perform measurements for monitoring of a wagon or locomotive wheel–railing system using standard wheel pairs. The possibility to use the standard wheel pair with removable measurement equipment as

tensometric wheel pair reduce the material and time expenses required for testing. Three procedures of the of the disk shape definition using only 3 design variables are considered. The optimal shape of the cross section for measurement system mounting disk is founded taking into account mechanical and technological constraints.

In the 4th chapter the optimization problem of a hollow concrete block is solved. Such solutions have wide range of application for Latvian maintenance conditions. The problem consists of finding optimal shape of a hollow block considering material consumption, strength and thermo insulation. Single block is used for a thermal model which take into account heat conduction of a block materials and convection process on block external wall. Single block model with different boundary conditions and wall models with different stacking are used for strength calculations. As a result of the optimization an alternative cutout shape is obtained which can save block material.

The developed shape optimization technique is applied for automobile and bus gage panel (GP) optimization in the 5th chapter. The GP must meet many requirements starting from appropriate design style and precisely measurable functional characteristics, stiffness, stress levels, weight and minimal pollution of environment. Geometrical models of GP are elaborated. Dynamic, static and also environmental impact responses, such as, carbon footprint, water eutrophication, air acidification and total energy consumed in the GP life cycle are obtained. Dynamic behaviors of the obtained alternative GP design solution are verified by analysis of the full FEM model in case of random and harmonic excitations. Next, the problems of GP brackets are solved. It is shown, that using defined restraints, the appropriate cross section shapes of solutions for bus GP brackets can be obtained.

In the 6th chapter the shape optimization of the tetrapod-shaped element is performed. As was shown in the previous works, lattice of tetrapod-shaped elements have advantage properties for compressing loads. According to this, the problem of shape optimization of the tetrapod-shaped element was defined. Using developed technique the tetrapod object boundary shape effective parameterization with 3 parameters is proposed. The simplified FE model was chosen for shape optimization, which could describe behavior of tetrapod element in larger constructions. The objective maximization of tetrapod element strength with restrained volume is carried out. It is shown that obtained result could be used for new construction designs.

This thesis consists of 6 chapters, conclusions and 120 references of the literature. The thesis has 13 tables and 112 figures. The thesis total size, including attachment, is 143 pages.

## SATURS

<b>1.</b>	<b>LITERATŪRAS APSKATS</b> .....	15
	1.1. 2D līkņu formas uzdošana.....	18
	1.1.1. B - splainu līknes.....	19
	1.1.2. Polinomiālās splainu līknes.....	20
	1.1.3. NURBS līkne.....	24
	1.2. Optimizācijas metožu pārskats.....	27
	1.2.1. Formas optimizācijas metodes (problēma).....	30
	1.2.2. Topoloģijas optimizācija.....	32
	1.2.3. Izmēru optimizācija.....	37
	1.2.4. Formas optimizācija.....	38
	<b>NODAĻAS SECINĀJUMI</b> .....	42
<b>2.</b>	<b>FORMAS OPTIMIZĀCIJAS METODIKA UN TESTI</b> .....	43
	2.1. Metodika un tās pārbaude uz testa piemēriem.....	46
	2.1.1. Liektas plāksnītes izgriezuma formas optimizācija.....	46
	2.1.2. Stieptas plāksnītes izgriezuma formas optimizācija.....	51
	2.2. Liektas plāksnītes formas optimizācijas aprēķina rezultātu validācija ar fizikālajiem eksperimentiem.....	56
	<b>NODAĻAS SECINĀJUMI</b> .....	62
<b>3.</b>	<b>VAGONA MĒRĪŠANAS SISTĒMAS ELEMENTU KONSTRUKTĪVĀS FORMAS OPTIMIZĀCIJA</b> .....	63
	3.1. Ievads.....	63
	3.2. Riteņpāra slodzes.....	64
	3.2.1. Spriegumu sadalījums.....	64
	3.2.2. Slodzes uz noņemamo aparatūru.....	65
	3.3. Diska stiprības aprēķinu modelis.....	66
	3.4. Spriegumi diska sākotnējā konstrukcijā.....	68
	3.5. Eliptiskā diska šķērsriezuma formas optimizācija.....	69
	<b>NODAĻAS SECINĀJUMI</b> .....	76
<b>4.</b>	<b>CELTNIECĪBAS BLOKA DOBUMA FORMAS OPTIMIZĀCIJA</b> .....	77
	4.1. Ievads.....	77

4.2. Izmantotais stiprības kritērijs.....	77
4.3. Optimizācijas uzdevuma nostādne. Bloka izgriezuma formas definēšana .....	78
4.4. Stacionārais bloka termoaprēķins. Atbilžu aproksimācija un bloka izgriezuma formas optimizācija.....	80
4.5. Aprēķinu modeļa izveide mūra stiprības pārbaudei.....	83
4.5.1. Mūra centrālā bloka galveno spriegumu analīze.....	84
4.5.2. Mūra centrālā bloka drošības koeficients FOS un tā optimizācijas rezultāti.....	85
4.6. Mūrēšanas tehnoloģijai atbilstošais aprēķinu modelis.....	87
<b>NODAĻAS SECINĀJUMI.....</b>	<b>91</b>
<b>5. KONTROLES MĒRINSTRUMENTU PANEĻU ELEMENTU FORMAS OPTIMIZĀCIJA UN DINAMIKAS ANALĪZE.....</b>	<b>92</b>
5.1. Ievads.....	92
5.2. Viegļā automobiļa KMP.....	92
5.2.1. Viegļā automobiļa KMP stiprības aprēķini.....	93
5.2.2. KMP frekvenču analīze.....	95
5.2.3. KMP stacionāro svārstību analīze pie harmoniskas ierosmes....	95
5.2.4. KMP pārejas procesu analīze.....	99
5.2.5. KMP stacionāro gadījuma svārstību analīze.....	99
5.2.5. Viegļā automobiļa KMP analīzes rezultātu kopsavilkums.....	101
5.3. Autobusa KMP formas optimizācija.....	101
5.3.1. KMP stiprības aprēķini.....	103
5.3.2. Autobusa KMP frekvenču analīze.....	105
5.3.3. KMP ilgspējības analīze.....	105
5.3.4. Autobusa KMP kronšteinu formas optimizācija.....	106
<b>NODAĻAS SECINĀJUMI.....</b>	<b>114</b>
<b>6. TETRAPODA FORMAS OPTIMIZĀCIJA.....</b>	<b>115</b>
6.1. Ievads.....	115
6.2. Cauruļu savienojumu stiprība.....	116

6.3. Tetrapoda konstrukciju stiprības aprēķinu modeļi.....	117
6.4. Tetrapoda formas parametrizēšana.....	121
6.5. Tetrapoda formas optimizācija.....	122
<b>NODAĻAS SECINĀJUMI.....</b>	<b>126</b>
<b>KOPĒJIE SECINĀJUMI.....</b>	<b>127</b>
<b>LITERATŪRA.....</b>	<b>129</b>
<b>PIELIKUMI.....</b>	<b>136</b>
1) Izstrādātā makrosa kods.....	137
2) Liekta plāksnīte.Latīņu hiperkuba (LH) eksperimentu plāni un atbildes plāksnītes formas optimizācijai.....	140
3) Liekta plāksnītes fizikālo eksperimentu rezultāti.....	143

## 1. LITERATŪRAS APSKATS

Konstrukciju elementu formas optimizācijas problēma ir bijusi aktuāla jau gadsimtiem ilgi. Praktiskā pieredze rāda, ka vienmēr tiek meklēti tādi konstrukciju risinājumi, kuri dod iespēju lietderīgāk izmantot ierobežotos resursus. Pēdējā laikā formas optimizācijas algoritmi [Nocedal, 2006; Christensen, 2009; Deb, 2013] attīstās īpaši intensīvi.

Parādās iespējas veikt precīzus aprēķinus sarežģītām konstrukcijām. Tas dod iespēju meklēt gan jaunus „vieglus” materiālus, gan progresīvus risinājumus konstrukciju elementu formai [Bendsoe, 2007; Rao, 2012]. Tomēr klasiskās formas optimizācijas metodēm vēl joprojām ir nepieciešami milzīgi skaitļošanas resursi. Tāpēc tiek meklētas alternatīvas metodes, ar kurām ir iespējams realizēt formas optimizācijas procedūru pie daudz mazākiem nepieciešamiem resursiem. Pašlaik viens no aktuālākajiem virzieniem ir metodes, kuras plaši izmanto parametriskās un neparimetriskās aproksimācijas iespējas, līdz ar to daudzkārt samazinot uzdevumu darbietilpību.

Pēdējās desmitgadēs strauji pieaugusi datoru skaitļošanas jauda. Ir attīstījušās galīgo elementu metodes (GEM) pielietošanas iespējas [Zienkiewicz, 2005], ar kuru tagad var aprēķināt stiprību sarežģītām konstrukcijām ar lielu komponentu skaitu, izmantojot mūsdienu personālā datora jaudu. Datorizētā projektēšana (CAD) un datorizēto aprēķinu (CAE) process [Miltiadis, 2010; Finkelstein, 2011] kļuvis par neatdalāmu posmu jebkura jauna produkta radīšanai. Tas dod iespēju samazināt projektēšanas laiku un ievērojami uzlabot jauno produktu kvalitātes rādītājus.

Mūsdienu lielajā konkurences tirgū pirms jebkura jauna produkta ražošanas uzsākšanas ir jāizvērtē visi ekonomiskie aspekti. No ekonomiskā viedokļa jauno produktu ir nepieciešams ieviest tirgū pārdošanai pēc iespējas ātrāk un tam jābūt vienlaikus ar augstu funkcionalitāti, kvalitatīvi saražotam, labi iepakotam (piegādes aspekti patērētājam), izturīgam, viegli remontējam un resursu efektīvam (to var demontēt un pārstrādāt) [Kalpakjian, 2006]. Funkcionālo efektivitāti bieži vien nosaka produkta svars un izmēri. Problēma ir īpaši aktuāla, kad nepieciešams izveidot vieglu un stipru konstrukciju. Šajā gadījumā parādās formas, izmēru un topoloģijas optimizācijas problēmas.

Pēdējos gados ir palielinājušās iespējas plašāk pielietot skaitliskās formas optimizācijas metodes, kurām ir nepieciešama liela rēķināšanas jauda, piemēram, topometrijas optimizāciju [Leiva, 2004; Vanderplaats, 2004]. Izmantojot lielu parametru skaitu, zinot kinemātiskos robežnoteikumus un optimizācijas ierobežojumus, ar jaudīgu mūsdienu skaitļošanas tīklu palīdzību ir iespējams atrast optimālo formu reāliem industriālajiem

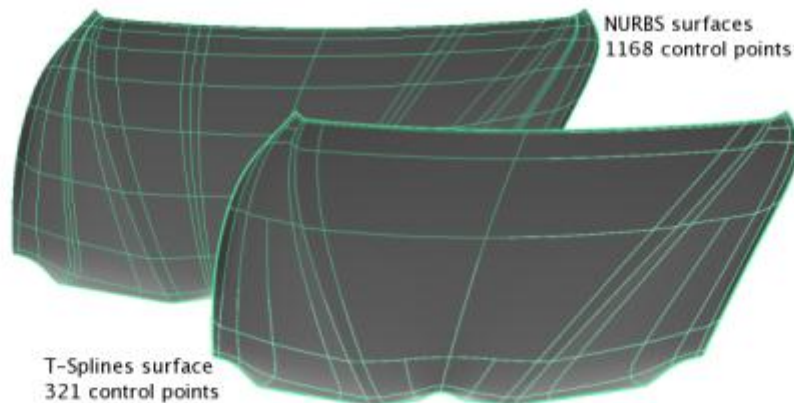
objektiem. Atrastās optimālās formas var būt tehnoloģiski grūti realizējamas, kā rezultātā ražošanas izmaksas var strauji palielināties. Tomēr ir skaidrs, ka šī pieeja ir dārga un būs ekonomiski izdevīga tikai lieliem ražotājiem pie atbilstošiem ražošanas apjomiem. Latvijā sastopami vairums vidēja un maza izmēra uzņēmumi, kuriem jābūt nodrošinātiem ar viegli integrējamiem risinājumiem. Pēdējā laikā pasaulē ir parādījusies tendence meklēt alternatīvas formas optimizācijas metodes, kurām pamatā ir neliels optimizācijas parametru skaits un atbilstošu aproksimāciju izmantošana [Gano, 2006; Lee, 2006; Song, 2010]. Plaši tiek lietota dažādu industriālu objektu izmēru optimizācija [Belegundu, 2011 uc.]. Tomēr konstrukcijas kļūst arvien sarežģītākas, īpaši gadījumos, kad ir nepieciešams izveidot unikālus objektus, piemēram, Pekinas Nacionālais ūdenssporta centrs [Pohl, 2008], kur ir nepietiekami aprobežoties tikai ar izmēra optimizācijas pieeju.

Formas optimizācijas alternatīvā pieeja ietver metamodelēšanas pielietojumu, kas bāzējas uz eksperimentu plānošanas un aproksimācijas metožu izmantošanu. Šajā gadījumā, izmantojot nelielu optimizācijas parametru skaitu, ir iespējams atrast optimālo risinājumu [Liao, 2007; Lee, 2007]. Rezultātā nav nepieciešama milzīga rēķināšanas jauda, jo tiek izveidots objekta vienkāršots, bet tomēr augstas kvalitātes metamodelis [Schmidt, 1994; Montgomery, 2001; Myers, 2009].

3D produkta vai konstrukcijas modeļus var uzreiz pēc projektēšanas beigām fizikāli izgatavot ar ciparu vadības darbapaldiem, izmantojot datorizēto ražošanu (CIM) [Radhakrishnan, 2008]. Ar mūsdienu darbapaldiem un ražošanas tehnoloģijām ir iespējams izveidot gandrīz jebkuru sarežģītu formu elementus. Tas dod iespēju veidot jaunas formas optimizācijas metodes un 3D modeļu sarežģītās ģeometrijas aprakstīšanai izmantot tādas līknes kā splaini. Mūsdienās jebkura konkurētspējīga CAD programmatūra nodrošina iespēju ģeometrijas veidošanai ar NURB splainiem [Rogers, 2000]. NURBS lielāko izplatījumu ieguva gludu sarežģītas brīvas formas virsmu veidošanai. Par lielāko NURBS priekšrocību uzskata, ka tā aprakstīto formu var viegli lokāli modificēt, izmantojot vairākus paņēmienus, ko, piemēram, nevar nodrošināt ar zemas kārtas Bežjē (Bezier) līknēm [Prautzsch, 2010]. Splaina līknes formas uzdošanas paņēmiens ar NURBS daudzstūra atbalsta punktiem tiek uzskatīts par galveno paņēmieni, ja nepieciešams iegūt pēc iespējas gludāku formu [Lombard, 2008].

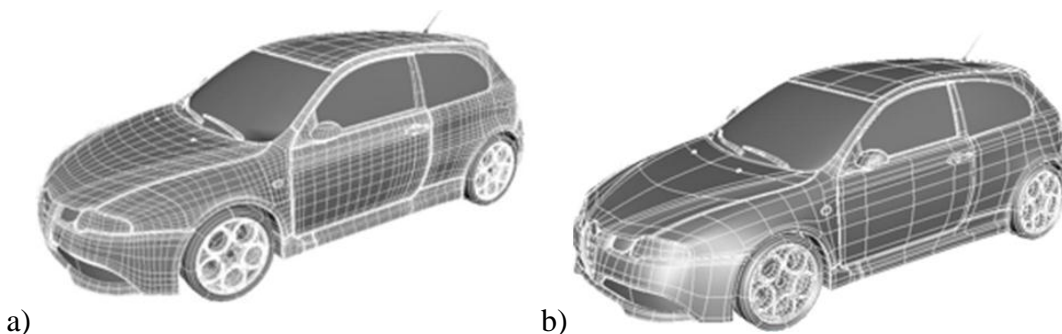
Šodien NURBS plaši izmanto 3D skicēšanai [Tran, 2010], veidojot sarežģītas formas virsmu elementus, piemēram, lidmašīnas korpusu. Šajā gadījumā, splains ir ļoti spēcīgs

instruments, tomēr jāņem vērā, ka šo formu daudz sarežģītāk kontrolēt salīdzinājumā ar 2D skicēšanu un ir nepieciešami inženieri-konstruktori ar visaugstāko kvalifikāciju.



1.1. att. T-Spline programmatūra virsmas ģeometrijas veidošanai ar vienkāršotu NURBS [T-Spline, 2012]

Tāpēc pašlaik plašu pielietojumu iegūst vienkāršoti un efektīvi paņēmieni, ar kuriem ir iespējams kontrolēt NURB splainu veidoto virsmu, piemēram, att. 1.1. Galvenā ideja ir tā, ka lietotājs pats izvēlas virsmas vietas, kur ir nepieciešams detalizētāk kontrolēt formu, pievienojot papildus NURBS līkņu segmentus. Formas modificēšana notiek ar NURBS līkņu krustšanās punktu („star points”) palīdzību. Tas ir īpaši aktuāli veidojot vieglā automobiļa sarežģīto korpusa ģeometriju [Kutscherauer, 2011], kad nepieciešams kontrolēt sarežģītu virsmu pāreju gludumu. Att. 1.2. ir redzams, ka ar T-Spline [T-Spline, 2012] programmatūru izveidotu ģeometriju var viegli importēt CAD programmatūrā. Rezultātā ir daudz vieglāk kontrolēt virsmas formu, jo NURBS parametru skaits ir mazs un virsmas formas kontrole notiek tikai nepieciešamajās vietās.



1.2 att. Ar T- Spline programmatūru izveidotais vieglā automobiļa korpusa 3D modelis: a) klasiskā pieeja virsmas uzdošanai ar NURBS, b) vienkāršotā NURBS virsma [T-Spline, 2012]

Šai gadījumā līknes formu ir iespējams kontrolēt tikai ar dažiem mainīgiem. Tāpēc sākumā apskatīsim dažu līkņu un NURBS uzdošanas un modificēšanas paņēmienus, lai atrastu piemērotāko izstrādājamai metodikai, cenšoties izvairīties no liela parametru skaita.

## 1.1. 2D līkņu formas uzdošana

Klasiskajā pieejā, lai izveidotu vajadzīgo līkni, parasti vispirms tiek skicēta līknes galvenā kontūra, kuru pēc tam lokāli modificējot, tiek iegūta līkne ar nepieciešamo formu.

Pastāv daži galvenie līknes modificēšanas paņēmieni [Piegl, 1997]:

a) Lokāla jebkura līknes segmenta modifikācija ar daudzstūra atbalsta punktu izvietojuma atbilstošām izmaiņām, tai pat laikā nemainot globālo līknes formu visos pārējos segmentos.

b) Mainot atbalsta punktu skaitu attiecībā pret polinoma pakāpi: līkne atbilstošā segmentā tiek aprakstīta ar zemāku polinoma pakāpi, bet tiek saglabāts tas pats atbalsta punktu skaits. Līdz ar to iespējams precīzāk modificēt līknes formu.

c) Līknes formas detalizēta uzdošana, ievēdot papildus mezglus. Šis paņemiens dod papildus iespējas lokāli modificēt līknes formu.

Kompozītām Fergusonā līknēm [Ferguson, 1964] ir dabiska  $C^1$  nepārtrauktība segmentu savienojuma punktos. Lai to realizētu, ir nepieciešams definēt pirmās kārtas (slīpuma) informāciju kopā ar datu punktiem. Priekš  $C^2$  nepārtrauktām (liekuma nepārtrauktība) Fergusonā līknēm slīpuma informāciju ir nepieciešams definēt pēdējos divos segmentu punktos. Šai līknei nav lokālas kontroles iespējas – mainot vienu no lokāliem datu punktiem, visu pārējo līknes formu jāpārveido, ievērojot starpposmu slīpumus.

Kompozītās Bezzē līknes segmentus arī nevar lokāli modificēt [Salomon, 2006]. Vēl viens trūkums ir tas, ka Bezzē segments sasaista viena aiz otra sekojošo segmentu punktu izvietojumu. Piemēram, lai panāktu slīpuma nepārtrauktību savienojuma punktā, tad ir nepieciešams, lai savienojuma punkts un tā blakus punkti būtu kolineāri.  $C^2$  nepārtrauktībai jau ir nepieciešams sasaistīt četrus datu punktus, kas atrodas pie segmentu savienojuma punkta. Līdz ar to segmentos jāizmanto augstas kārtas (parasti no 6 līdz 8) Bezzē līknes [Marsh, 2004].

### 1.1.1. B - splainu līknes

Splaina līknes plaši pielieto sarežģītas formas virsmu modelēšanai CAD un citās 3D ģeometrijas modelēšanas programmatūrās [Dempski, 2003] (Piemēram, Rhino3D [Cheng, 2007]; Autodesk Maya [Derakhshani, 2010]). Galvenā priekšrocība B-splainu līknēm salīdzinot ar iepriekš apskatītām zemas kārtas Bežjē līknēm ir tā, ka lokāli modificējot mezgla punktu, izmainās B-splaina forma tikai dotajā segmentā [Kalpakjian, 2006].



1.3. att. Shematiska pieeja splainu līnijas zīmēšanai un atbalstītas sijas modelis [Saxena, 2005]

Splaina termins radies no analogijas tam, kā piespiest elastīgu metālisko vai koka sloksni iet caur noteikti izvietotiem punktiem (attēls 1.3. pa kreisi). Pieņemsim, ka jebkurš segments starp 2 punktiem ir atbalstīta sija (attēls 1.3. pa labi), kuras lieces moments mainās lineāri. Uzrakstīsim Eilera - Bernulli vienādojumu mazu deformāciju gadījumam [Edwards, 2007]:

$$EI\chi = EI \frac{d^2 y}{dx^2}, \text{ vai} \quad (1.1)$$

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = Ax + B$$

kur  $EI$  ir sijas lieces stingums;

$\chi$  ir sijas liekums;

$y$  ir vertikālais pārvietojums;

$A$  un  $B$  ir zināmas konstantes.

Izsakot no vienādojuma (1.1)  $\frac{d^2 y}{dx^2}$  un integrējot, iegūsim, ka sijas izliekums  $y$  virzienā

ir:

$$y = \frac{Ax^3}{6EI} + \frac{Bx^2}{EI} + C_1 x + C_2, \quad (1.2)$$

kur  $C_1$  un  $C_2$  ir nezināmās konstantes.

Pieņemsim, ka  $l$  ir sijas garums. Šajā gadījumā sija ir vienkārši atbalstīta, tāpēc  $y = 0$  pie  $x = 0$  un  $x = l$ . Ievietojot šos nosacījumus vienādojumā (1.2), iegūsim, ka  $C_2 = 0$  un

$$C_1 = -\frac{Al^2}{6EI} - \frac{Bl}{2EI}, \quad (1.3)$$

Ievietojot  $C_1$  un  $C_2$  izteiksmes vienādojumā (1.2), iegūsim, ka izliekums  $y$  ir sekojoša koordinātes  $x$  funkcija:

$$y = \frac{A(x^3 - l^2x)}{6EI} + \frac{B(x^2 - lx)}{2EI} \quad (1.4)$$

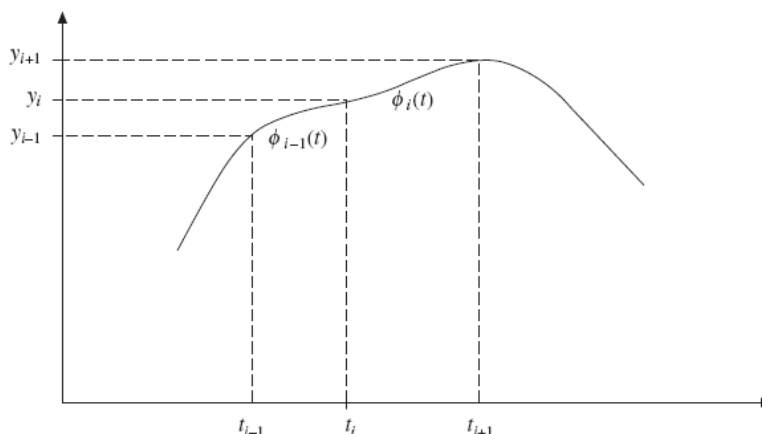
Vienādojums (1.4) ir kubiskais vienādojums robežās  $0 \leq x \leq l$ . Lai izpildītos otrās kārtas atvasinājuma nepārtrauktība punktos pie  $x = 0$  un  $l$ , nepieciešams no vienādojuma (1.1) aprēķināt lieces momentu  $Ax+B$ , kam jāsakrīt ar blakus segmentu lieces momentiem šajos punktos. Par kubisko splainu līkni ( $C^2$  nepārtrauktu līkni) uzskata līkņu līniju, kurai otrās kārtas atvasinājumi savienojuma punktos ir nepārtraukti visā definīcijas intervālā.

Splainu līkni var definēt arī izmantojot deformācijas enerģiju:

$$\text{Minimizēt: Deformācijas enerģija} = \frac{1}{2} \int EI \chi^2 dx; \quad (1.5)$$

Nemot vērā, ka  $y=0$  pie  $x=0$  un  $l$ , vienādojums (1.5) dod alternatīvu definīciju splainu līknei – proti, fiziskā splainu līkne ir gluda līkne, kurai deformācijas enerģija vai vidējais kvadrātiskais izliekums ir minimāls. Vispārīga matemātiska splainu līknes definīcija:  $n$  kārtas ( $n - 1$  pakāpes) splainu līkne ir līkne, kurai ir  $C^{n-2}$  nepārtrauktība tās definēšanas robežās, proti, eksistē  $n-2$  līknes atvasinājums visā tās definēšanas apgabalā.

### 1.1.2. Polinomiālās splainu līknes



1.4 att. Polinomiāla splainu līkne [Saxena, 2005]

Pieņemsim, ka funkcija  $\phi(t)$  (att. 1.4.) ir polinomiāla splainu līkne, kuras vērtības ir  $y_i$  pie parametra vērtībām  $t_i, i=0,1,\dots,n$ , un  $t_{i-1} < t_i < t_{i+1}$ . Pieņemsim arī, ka funkcija  $\phi(t)$  ir kubiska splainu līkne katrā  $[t_{i-1}, t_i]$  apakšintervālā, ar funkcijas  $\phi(t)$ , tās pirmās un otrās kārtas atvasinājumu nepārtrauktību visos savienojumu punktos  $(t_i, y_i)$ . Punkti  $t_i, i=0,1,\dots,n$  tiek saukti par mezgla punktiem, bet  $[t_{i-1}, t_i], i=1,\dots,n$  - par intervāliem starp šiem punktiem. Ja intervāli starp mezgla punktiem ir vienādi ( $t_{i+1} - t_i$  ir vienādi pie  $i=0,1,\dots,n-1$ ), tad mezglu vektors ir viendabīgs, pretējā gadījumā – neviendabīgs.

Lai izveidotu polinomiālo splainu līkni, jāpieņem, ka funkcija  $\phi(t)$  definē splainu līkni  $i$ -jā intervālā ( $t_i < t < t_{i+1}$ ). Pirmajā intervālā ( $t_0 < t < t_1$ ) funkcijas vērtības  $\phi_0(t_0)$  un  $\phi_0(t_1)$  ir zināmas, proti,  $y_0$  un  $y_1$ . Lai izveidotu kubisko splainu līkni, ir nepieciešams zināt divus papildus nosacījumus, proti, jāzina  $\phi'_0(t_0)$  un  $\phi''_0(t_0)$ . Otrajā intervālā ( $t_1 < t < t_2$ ), funkcijas vērtības  $\phi_1(t_1) = y_1$  un  $\phi_1(t_2) = y_2$  ir zināmas. Pārējie divi nosacījumi ir aprēķināmi, ievedot  $C^1$  un  $C^2$  nepārtrauktību pie  $t = t_1$ , proti,  $\phi'_1(t_1) = \phi'_0(t_1)$  un  $\phi''_1(t_1) = \phi''_0(t_1)$ .

Līdzīgi ir noteicamas kubisko segmentu  $\phi_i(t), i=0,\dots,n-1$  vērtības visos mezglu punktos. Tomēr praksē polinomiālo splainu līknes tiek noteiktas savādāk. Pirmkārt, netiek rekomendēts uzdot otrās vai augstākas kārtas atvasinājumus kā ievada vērtības, jo bieži tās nav pietiekami precīzi zināmas. Otrkārt, ja intervāli starp mezgliem ir samērā lieli, var parādīties un uzkrāties lielas kļūdas.

Citā veidā polinomiālo splainu līkni var ievadīt kā kubisku funkciju  $\phi_i(t)$  pie  $t_i \leq t \leq t_{i+1}$ :

$$\phi_i(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (1.6)$$

Pieņemsim, ka  $s_i$  un  $s_{i+1}$  ir nezināmie slīpumi pie  $t_i$  un  $t_{i+1}$ . Nezināmie  $a_i, i=0,\dots,3$  ir aprēķināmi, izmantojot sekojošus nosacījumus:

$$\begin{bmatrix} 1 & t_i & t_i^2 & t_i^3 \\ 1 & t_{i+1} & t_{i+1}^2 & t_{i+1}^3 \\ 0 & 1 & 2t_i & 3t_i^2 \\ 0 & 1 & 2t_{i+1} & 3t_{i+1}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_i \\ y_{i+1} \\ s_i \\ s_{i+1} \end{bmatrix} \quad \text{vai} \quad \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & t_i & t_i^2 & t_i^3 \\ 1 & t_{i+1} & t_{i+1}^2 & t_{i+1}^3 \\ 0 & 1 & 2t_i & 3t_i^2 \\ 0 & 1 & 2t_{i+1} & 3t_{i+1}^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} y_i \\ y_{i+1} \\ s_i \\ s_{i+1} \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

Vienādojumu (1.6) var uzrakstīt matricu formā:

$$\Phi_i(t) = \begin{bmatrix} 1 & t & t^2 & t^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & t_i & t_i^2 & t_i^3 \\ 1 & t_{i+1} & t_{i+1}^2 & t_{i+1}^3 \\ 0 & 1 & 2t_i & 3t_i^2 \\ 0 & 1 & 2t_{i+1} & 3t_{i+1}^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} y_i \\ y_{i+1} \\ s_i \\ s_{i+1} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & t & t^2 & t^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{(t_{i+1}-3t_i)t_{i+1}^2}{h_i^3} & \frac{(3t_{i+1}-t_i)t_i^2}{h_i^3} & \frac{-t_i t_{i+1}^2}{h_i^2} & \frac{-t^2 t_{i+1}}{h_i^2} \\ \frac{6t_i t_{i+1}}{h_i^3} & \frac{-6t_i t_{i+1}}{h_i^3} & \frac{(2t_i+t_{i+1})t_{i+1}}{h_i^2} & \frac{(t_i+2t_{i+1})t_i}{h_i^2} \\ \frac{-3(t_i+t_{i+1})}{h_i^3} & \frac{3(t_i+t_{i+1})}{h_i^3} & \frac{-(t_i+2t_{i+1})}{h_i^2} & \frac{-(2t_i+t_{i+1})}{h_i^2} \\ \frac{h_i^3}{2} & \frac{h_i^3}{-2} & \frac{h_i^2}{1} & \frac{h_i^2}{1} \\ \frac{h_i^3}{h_i^3} & \frac{h_i^3}{h_i^3} & \frac{h_i^2}{h_i^2} & \frac{h_i^2}{h_i^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_i \\ y_{i+1} \\ s_i \\ s_{i+1} \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

Vienādojums (1.8) nodrošina līknes  $\phi(t) = \{\phi_i(t), i = 0, \dots, n-1\}$  pozīcijas un slīpuma nepārtrauktību pie  $t_0 < t < t_n$ . Otrās kārtas nepārtrauktībai, jāizmanto sakarība  $\phi''_{i-1}(t_i) = \phi''_i(t_i)$ . Diferencējot (1.8) divas reizes, iegūstam:

$$\Phi_i''(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2 & 6t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{(t_{i+1}-3t_i)t_{i+1}^2}{h_i^3} & \frac{(3t_{i+1}-t_i)t_i^2}{h_i^3} & \frac{-t_i t_{i+1}^2}{h_i^2} & \frac{-t^2 t_{i+1}}{h_i^2} \\ \frac{6t_i t_{i+1}}{h_i^3} & \frac{-6t_i t_{i+1}}{h_i^3} & \frac{(2t_i+t_{i+1})t_{i+1}}{h_i^2} & \frac{(t_i+2t_{i+1})t_i}{h_i^2} \\ \frac{-3(t_i+t_{i+1})}{h_i^3} & \frac{3(t_i+t_{i+1})}{h_i^3} & \frac{-(t_i+2t_{i+1})}{h_i^2} & \frac{-(2t_i+t_{i+1})}{h_i^2} \\ \frac{h_i^3}{2} & \frac{h_i^3}{-2} & \frac{h_i^2}{1} & \frac{h_i^2}{1} \\ \frac{h_i^3}{h_i^3} & \frac{h_i^3}{h_i^3} & \frac{h_i^2}{h_i^2} & \frac{h_i^2}{h_i^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_i \\ y_{i+1} \\ s_i \\ s_{i+1} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{6(2t-t_i-t_{i+1})}{h_i^3} & \frac{-6(2t-t_i-t_{i+1})}{h_i^3} & \frac{2(3t-t_i-2t_{i+1})}{h_i^2} & \frac{2(3t-2t_i-t_{i+1})}{h_i^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_i \\ y_{i+1} \\ s_i \\ s_{i+1} \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

Līdzīgi iegūstam  $\phi''_{i-1}(t)$ :

$$\Phi_{i-1}''(t) = \begin{bmatrix} \frac{6(2t-t_{i-1}-t_i)}{h_{i-1}^3} & \frac{-6(2t-t_{i-1}-t_i)}{h_{i-1}^3} & \frac{2(3t-t_{i-1}-2t_i)}{h_{i-1}^2} & \frac{2(3t-2t_{i-1}-t_i)}{h_{i-1}^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{i-1} \\ y_{i+1} \\ s_{i-1} \\ s_{i+1} \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

Izmantosim, ka  $\phi''_{i-1}(t_i) = \phi''_i(t_i)$ :

$$\begin{bmatrix} \frac{6}{h_{i-1}^2} & \frac{-6}{h_{i-1}^2} & \frac{2}{h_{i-1}} & \frac{4}{h_{i-1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{i-1} \\ y_i \\ s_{i-1} \\ s_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-6}{h_i^2} & \frac{6}{h_i^2} & \frac{-4}{h_i} & \frac{-2}{h_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_i \\ y_{i+1} \\ s_i \\ s_{i+1} \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

vai

$$\frac{s_{i-1}}{h_{i-1}} + 2s_i \left( \frac{1}{h_{i-1}} + \frac{1}{h_i} \right) + \frac{s_{i+1}}{h_i} = \frac{3y_{i+1}}{h_i^2} + 3y_i \left( \frac{1}{h_{i-1}^2} - \frac{1}{h_i^2} \right) - \frac{3y_{i-1}}{h_{i-1}^2}, i = 1, \dots, n-1 \quad (1.12)$$

Vienādojumi (1.6) – (1.12) apraksta kubisku Fergusona kompozīto līkni intervālā  $t_0 < t < t_n$ . Vienādojumi (1.12) ir lineāri ar  $n+1$  nezināmajiem  $s_0, \dots, s_n$ , bet vienādojumu skaits ir  $(n-1)$ . Lai varētu definēt  $s_i$  otrās kārtas atvasinājumu katrā mezgla punktā  $t_i$ , vēl ir vajadzīgi divi nosacījumi. Tos var uzdot, izmantojot vienu no trim iespējām:

a) Brīvs gals. Gala mezgla punktos nav izliekuma, jo  $S_0$  vai  $s_n = 0$  pie  $t_i$  vai  $t_n$ . Tas dod naturālo splainu līkni.

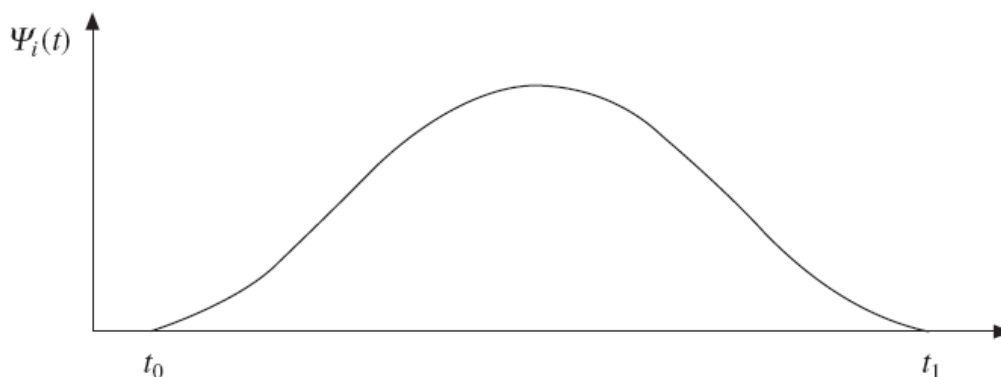
b) Iespīlēts gals. Pirmās kārtas atvasinājumus pie  $t_0$  un  $t_i$  tiek uzdoti kā  $\phi'_0(t_0) = g_0$  vai  $\phi'_{n-1}(t_n) = g_n$ :

$$\phi'_0(t_0) = -s_0 h_0 / 2 - (y_0 / h_0 - s_0 h_0 / 6) + (y_1 / h_0 - s_1 h_0 / 6) = g_0$$

$$\phi'_{n-1}(t_{n-1}) = -s_{n-1} h_{n-1} / 2 - (y_{n-1} / h_{n-1} - s_{n-1} h_{n-1} / 6) + (y_n / h_{n-1} - s_n h_{n-1} / 6) = g_n \quad (1.13)$$

c) Kvadrātiski galu intervāli. Galējie intervāli ir kvadrātiski, izliekumi galos ir konstanti  $s_0 = s_1$  un  $s_{n-1} = s_n$ .

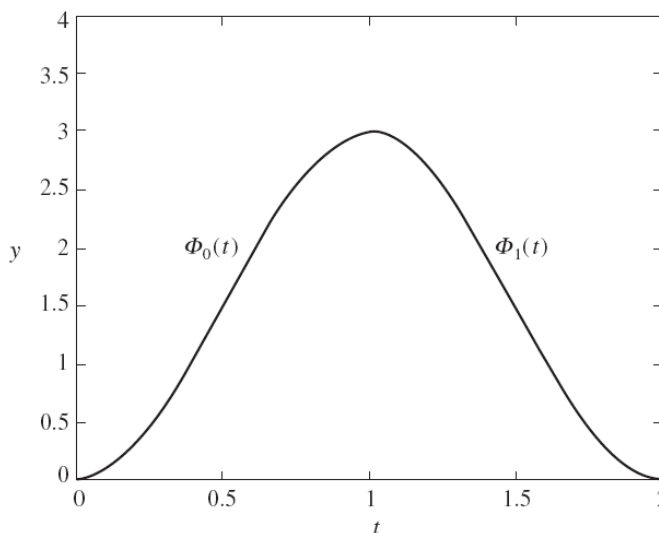
Var izmantot dažādas kombinācijas no iepriekš parādītajiem nosacījumiem galos. Vienādojumi (1.12) veido trīs diagonāļu formas vienādojumu sistēmu, kuras risināšanai pieejami efektīvi algoritmi, lai iegūtu pa segmentiem  $g$  kompozītu splainu līkni  $\phi(t) = \{\phi_i(t), i = 0, \dots, n-1\}$ . Ir iespējams iestādīt tādas  $y_i$  vērtības  $i = 0, \dots, n$ , lai polinomiālā splaina līknes forma sakristu ar bāzes funkcijas formu, kas parādīta attēlā 1.5. Polinomiālā splainu līkne ir divdimensionāla salikta līkne. Tās trūkums ir tāds, ka viena vai vairāku datu punktu pārvietošana jeb izmaiņa noved pie nepieciešamības pārrēķināt visu splainu līkni. Bez tam, kubiskai polinomiālai splainu līknei visur ir liekuma nepārtrauktība un nepieciešamības gadījumā nav iespējams izveidot līkni, kurai ir slīpuma lūzums.



1.5. att. Bāzes funkcija  $\psi_i(t)$  ar splaina līknes formu [Saxena, 2005]

### 1.1.3. NURBS līkne

Kubiskā polinomiālā splainu līkne  $\phi(t)$  tiek veidota ar  $\phi_i(t_i) = y_i$ ,  $\phi_i(t_{i+1}) = y_{i+1}$ ,  $i = 0, \dots, n-1$  un slīpuma un liekuma nepārtrauktību katrā mezglā  $t_i$ .  $n+1$  nezināmo  $s_0, \dots, s_n$ , noteikšanai ir  $n-1$  vienādojumi ar pielīdzinātiem splainu līknes izteiksmju pirmās kārtas atvasinājumiem mezgla punktos. Vēl divi nosacījumi ir nepieciešami, lai sakristu nezināmo un vienādojumu skaits. Kopā nepieciešami  $n+3$  nosacījumi, lai pilnīgi definētu splainu līkni ar  $n$  mezglu intervāliem. Kubiskās polinomiālās splainu līknes veidošana tiek veikta tā, ka tās forma ir zvanveida kā bāzes funkcijai (att. 1.6.).



1.6. att. Splainu līkne  $\phi_0(t) = 9t^2 - 6t^3$ ,  $0 \leq t \leq 1$  un  $\phi_1(t) = 6t^3 - 27t^2 + 36t - 12$ ,  $1 \leq t \leq 2$  [Saxena, 2005]

Apskatīsim tādu kubisko splainu līkni  $\phi(t)$ , kurai  $\phi(t)$ ,  $\phi'(t)$  un  $\phi''(t)$  vērtības ir vienādas ar nulli katrā mezgla punktā, kas tiek glabātas mezglu vektorā. Mūsu gadījumā ir 6 nosacījumi. Ir redzams, lai definētu unikālu kubisko splainu līkni, intervālu skaitam  $n$  ir jābūt

3 ( $n+3=6$ ). Pieņemsim, ka ir norādīti četri mezgli punktos  $t_{i-3}, t_{i-2}, t_{i-1}$  un  $t_i$ . Atrisinājums, kas ir iegūstams ar šiem mezgla punktiem, ir triviāls  $\phi(t) \equiv 0$ . Lai iegūtu netriviālu atrisinājumu, ir nepieciešams palielināt intervālu skaitu par  $1$  vai norādīt jaunu mezglu  $t_{i-4}$ . Pie  $n=4$  mezglu intervālā  $t_{i-4} \leq t \leq t_i$  ir nepieciešams papildus nosacījums. Tas ir tāpēc, ka nepieciešamo nosacījumu skaits ( $n+3=7$  un  $6$ ) jau ir zināms. Ir iespējams definēt vērtību, kura nav vienāda ar nulli intervāla iekšējos mezglos jeb veikt splaina standartizāciju - normalizāciju. To ir iespējams izdarīt ar Cox [Cox,1972] un de Boor [de Boor,1972] piedāvāto sakarību:

$$\int_{t_{i-4}}^{t_i} \phi(t) dt = \frac{1}{m}, \quad (1.14)$$

kur  $m$  ir splainu līknes kārtā (pakāpe  $+1$ ). Kubiskām splainu līknēm  $m = 4$ .

Konstruēsim parasto kubisko splainu mezgla intervālos  $t_i = i$ ,  $i = 0, \dots, 4$ . Šis splains ir simetrisks attiecībā pret  $t = 2$ , mezglu izvietojums ir vienveidīgs un robežnoteikumi ir simetriski. Tāpēc ir nepieciešams izrēķināt splainu tikai divos segmentos  $\phi_0(t)$  pie  $0 \leq t \leq 1$  un  $\phi_1(t)$  pie  $1 \leq t \leq 2$ . Splains ir kubisks:

$$\phi_0(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (1.15)$$

Ievērojot to, ka  $\phi_i(0) = \phi_i'(0) = \phi_i''(0) = 0$  un  $a_0 = a_1 = a_2 = 0$ , tad  $\phi_0(t) = a_3 t^3$ , kur  $a_3$  ir nezināmais. Tālāk  $\phi_1(t)$  kubiskais vienādojums ir:

$$\phi_1(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 \quad (1.16)$$

Tā kā splaina nepārtrauktība ir līdz otrās kārtas atvasinājumam pie  $t_1 = 1$ , tad  $\phi_0(1) = \phi_1(1)$ ,  $\phi_0'(1) = \phi_1'(1)$  un  $\phi_0''(1) = \phi_1''(1)$ . Šo noteikumu attiecība:

$$\begin{aligned} b_0 + b_1 + b_2 + b_3 &= a_3 \\ b_1 + 2b_2 + 3b_3 &= 3a_3 \\ 2b_2 + 6b_3 &= 6a_3 \end{aligned} \quad (1.17)$$

Risinot ar  $b_3$  noteikumiem:

$$\phi_1(t) = (a_3 - b_3) - 3(a_3 - b_3)t + 3(a_3 - b_3)t^2 + b_3 t^3 \quad (1.18)$$

Tā kā splains ir simetrisks attiecībā pret  $t = 2$ , tad pieņemts, ka  $\phi_1''(2) = 0$  un:

$$\begin{aligned} -3(a_3 - b_3) + 12(a_3 - b_3) + 12b_3 &= 0 \\ \text{vai} \quad b_3 &= -3a_3 \end{aligned} \quad (1.19)$$

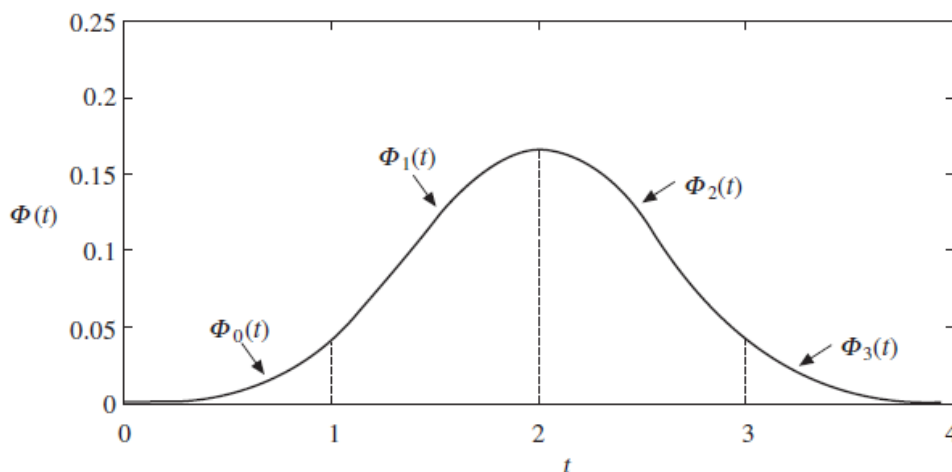
Tādā veidā iegūstam:

$$\phi_1(t) = 4a_3 - 12a_3 t + 12a_3 t^2 - 3a_3 t^3 \quad (1.20)$$

Nezināmā  $a_3$  konstante tiek definēta, izmantojot integrāli 1.4. Ievērojot simetriju un to, ka splaina kārtā ir 4:

$$\begin{aligned} \int_0^4 \phi(t) dt &= 2 \int_0^2 \phi(t) dt = 2 \int_0^1 \phi_0(t) dt + 2 \int_1^2 \phi_1(t) dt \\ &= \frac{a_3}{2} + \frac{11a_3}{2} = 6a_3 = \frac{1}{m} = \frac{1}{4} \Rightarrow a_3 = \frac{1}{24} \end{aligned} \quad (1.21)$$

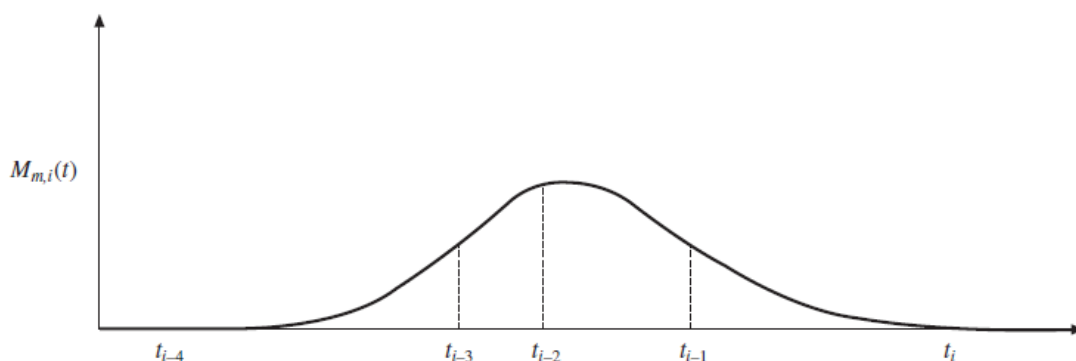
Tādā veidā,  $\phi_0(t) = \frac{1}{24}t^3$  un  $\phi_1(t) = \frac{1}{24}(4-12t+12t^2-3t^3)$ . Tā kā  $\phi(t)$  ir simetrisks ap  $t = 2$ ,  $\phi(2+\delta) = \phi(2-\delta)$ . Tādēļ  $2-\delta = t$ ,  $2+\delta = 4-t$ , un  $\phi(t) = \phi(4-t)$ . Splains starp mezgla intervāliem  $2 \leq t \leq 3$  un  $3 \leq t \leq 4$  ir  $\phi_2(t) = \frac{1}{24}(4-12(4-t)+12(4-t)^2-3(4-t)^3)$  un  $\phi_3(t) = \frac{1}{24}(4-t)^3$ . Iegūtā splaina galvenā daļa ir parādīta attēlā 1.7.



1.7. att. Izrēķinātais normalizētais kubiskais splains ar mezgliem  $t_i = i$ ,  $i = 0, \dots, 4$  [Saxena, 2005]

Standartizēta splaina forma starp mezgla intervāliem  $t_{i-4} \leq t \leq t_i$  ir parādīta attēlā 1.7. Splains stiepjas no punkta  $t_{i-4}$  pa kreisi līdz  $-\infty$  un no  $t_i$  pa labi līdz  $+\infty$  pa asi  $t$ . Tāpēc splainam ir bezgalīgs intervālu skaits un tas nav vienāds ar nulli tikai 4 intervālos. Šo splainu, kuram ir minimāls atbalsta intervālu skaits, sauc par fundamentālo splainu. Šim splainam ir  $C^2$  pakāpes nepārtrauktība. Šādam standartizētam splainam piemīt baricentriskās īpašības (līdzīgi kā Bernšteina polinomam [Saxena, 2005]), un to var izmantot kā svara vai bāzes funkciju. Tāpēc standartizētais splains arī tiek saukts par bāzes vai B-splainu. B-splains ar kārtu  $m$  (att. 1.8.) un ar pēdējo mezgla punktu  $t_i$ , var tikt apzīmēts, kā  $M_{m,i}(t)$ . Līdzīgi kubiskam splainam, B-splains  $M_{m,i}(t)$  var tikt izrēķināts ar galu noteikumiem:

$M_{m,i}(t) = dM_{m,i}(t)/dt = d^2M_{m,i}(t)/dt^2 = \dots = d^{m-2}M_{m,i}(t)/dt^{m-2} = 0$  abos galos un ar  $2(m-1)$  nepārtrauktības nosacījumiem  $M_{m,i}(t), dM_{m,i}(t)/dt, d^2M_{m,i}(t)/dt^2, \dots, d^{m-2}M_{m,i}(t)/dt^{m-2}$  iekšējos mezgla punktos. Šai B-splaina rēķināšanas metodei ir nepieciešamas daudzas algebriskas operācijas. Tāpēc par alternatīvu metodi tiek uzskatīta sadalīto diferencu metode.



1.8. att. Shematiskais B-splaina attēlojums ar 4. kārtas bāzes funkciju [Saxena, 2005]

Līdz ar to NURBS līknes vislabāk piemērotas parametrizēšanai un pielietojumam formas optimizācijai, jo tām ir vairākas labas īpašības, piemēram, lokāla modificēšanas iespēja, nepārtrauktība, gluda forma u.c. Jāņem vērā arī to, ka NURBS līknes visplašāk izmanto CAD vidē.

Tālāk īsi uzskaitīsim mūsdienu optimizācijas metodes un bieži sastopamās formas optimizācijas problēmas.

## 1.2. Optimizācijas metožu pārskats

Par optimizāciju uzskata labāko risinājumu (mūsu gadījumā - konstrukcijas elementu formas) meklēšanu. Parasti optimizācijas problēmas parādās matemātiski modelējot reālos procesus un objektus.

Optimizācija var tikt veikta ar dažādiem definētiem kritērijiem un ierobežojumiem. Ja kritērija funkcija ir lineāra un ierobežojumi ir lineāras vienādfības un nevienādfības attiecībā pret nezināmiem – optimizācijas parametriem, tad to sauc par lineārās programmēšanas uzdevumu. Lineārās programmēšanas (LP) uzdevumam ir viens minimums, kurš ir arī globālais minimums. Ja kritērija funkcija ir kvadrātiska funkcija un ierobežojumi ir lineāras funkcijas, tad tas ir kvadrātiskās programmēšanas uzdevums. Ja šīs funkcijas ir nelineāras, tad tas ir nelineārās programmēšanas (NP) uzdevums [Nocedal, 2006].

Atkarībā no optimizācijas parametru fizikālās būtības izšķir diskrētos un nepārtrauktos optimizācijas uzdevumus.

Diskrētas optimizācijas metodes sadala precīzajās un aptuvenajās metodēs. NP smagajai klasei pieskaitāmi tie uzdevumi, kuri nav atrisināmi polinomiālā laikā. Precīzās metodes garantē atrisinājuma kvalitāti, bet neprecīzās pieejas atgriež suboptimālus atrisinājumus bez optimalitātes garantijas.

Divas precīzo metožu pamatklases ir daļējās pārskatīšanas un griešanas plakņu metodes. Daļējās pārskatīšanas metodes sistemātiski sadala lielo telpu mazākās, labi apstrādājamās apakštelpās. Kad parametru pieļaujamais apgabals ir viegli atrast, katra meklēšanas apakštelpa sastāv tikai no pieļaujamajiem punktiem. Tad, kad pieļaujamie punkti nav acīmredzami, katra meklēšanas telpa bieži satur arī nepieļaujamus punktus. Šādos gadījumos nepieļaujamie punkti arī tiek secīgi pārskatīti, lai tuvotos pieļaujamajiem un minimālajiem atrisinājumiem.

Griešanas plakņu metodes turpina pārdefinēt doto uzdevumu arvien labāk un labāk, līdz tas kļūst labi apstrādājams. Tiek ieviests vairāk ierobežojumu, lai pārdefinētu pieļaujamais apgabals. Apgabali, kas satur optimālos risinājumus, tiek pārdefinēti un neperspektīvie apgabali tiek izslēgti no tālākās meklēšanas.

Gandrīz visi diskrētās optimizācijas uzdevumi var tikt izteikti ar veselo skaitļu lineārajām programmām (ILP). Vispārīgie diskrētie modeļi tiek transformēti ILP formātā, iegūstot lielo skaitu mainīgo un ierobežojumu ieviešanu. Tāpēc transformētā ILP formulējumā uzdevums var būt darbietilpīgāks nekā oriģinālais izejas uzdevums.

NP-smagie uzdevumi var sasniegt izmērus, kad precīzās metodes ir praktiski nepielietojamas un līdz ar to aptuvenās pieejas ir vienīgā risināšanas alternatīva. Aptuvenās pieejas atrod suboptimālos atrisinājumus. Pamatprasība aptuvenai metodei ir efektivitāte, kas nozīmē metodes konverģēšanu polinomiāli ierobežotā laikā. Aptuveno meklēšanas metožu piemēri ir lokālā uzlabojuma, stohastiskās metodes un tabu meklēšana. Lokālajā uzlabojumā meklēšana turpinās ar secīgiem uzdevuma atrisinājumu uzlabojumiem, aizvirzoties katrā solī no tekošā atrisinājuma uz labāku kaimiņatrisinājumu.

Optimizācijas metodes tiek dalītas lokālās un globālās metodēs [Vanderplaats, 1984]. Ja pieļaujamais apgabals (kā tas parasti ir praktiskos uzdevumos) nav izliekts, tad jāpārvar lokālais un jāmeklē globālais minimums. Lokālās optimizācijas metodēm pieskaita gradienta nolaišanās, Ņūtona metodi, kvazi Ņūtona metodi, saistīto gradientu metodi u.c. Tās no uzdotiem sākuma noteikumiem konverģē uz lokālo minimumu.

Globālās optimizācijas metodes var iedalīt determinētajās un stohastiskajās. Varētu arī metodes sadalīt drošajās un nedrošajās. Drošās metodes garantē atrisinājuma kvalitāti, bet nedrošās negarantē. Stohastiskās metodes, ieskaitot modelēto atslaidināšanu un klasteru jeb grupēšanas metodes, ir nedrošas. Taču šīs metodes ir ļoti efektīvas un ar labāku ātrdarbību, risinot liela izmēra problēmas. Determinētajās metodēs izmantota determinētā eiristika - tāda kā meklēšanas trajektoriju modificēšana trajektoriju metodēs, kā arī sodu ieviešana, lai izvairītos no apgabaliem, kur nav optimālā atrisinājuma. Citas metodes - kā sadalīt un ierobežot metodes un intervālu metodes, meklēšanas apgabalu rekursīvi sadala mazākās apakšstelpās un atdala apgabalus, kas nesatur optimālo atrisinājumu.

Pārklāšanas metodes izdala apgabalu, kas nesatur globālo optimumu un atmet to, tālāk tur nemeklējot. Pārklāšanas metodes garantē atrisinājuma kvalitāti iteratīvi sašaurinot robežas.

Vispārīnātās nolaišanās metodes turpina meklēšanas trajektoriju katru reizi, kad atrasts lokālais minimums. Pirmajā pieejā trajektoriju metodes modificē diferenciālvienādojumu, kas apraksta lokālās nolaišanās trajektoriju tā, ka tās var evakuēties no lokālā minimuma. Otrajā pieejā kritērija funkcija tiek modificēta, uzliekot sodu, lai algoritms atkārtoti neatgrieztos jau atrastajā lokālajā minimumā. Trūkums ir sekojošs - jo vairāk lokālo minimumu atrasts, jo grūtāk minimizēt modificēto kritērija funkciju.

Gadījuma meklēšanas metodēm pieskaita tīru gadījuma meklēšanu ar vienreizēju startu, ar daudzkārtēju startu, gadījuma meklēšanu pa taisni, adaptīvo gadījuma meklēšanu, sadalīšanu pa apakškopām, aizstāšanu ar vissliktāko punktu, evolucionāros algoritmus un modelēto atslaidināšanu.

Ja optimizācijas procesā jāievēro ierobežojumus, tad to var veikt divējādi, proti, lietojot vai nu transformēšanas vai netransformēšanas pieejas. Transformēšanas pieejā, kas tiek plaši lietota, optimizācijas uzdevumu ar ierobežojumiem transformē uz optimizācijas uzdevumu bez ierobežojumiem, lietojot soda vai barjeru funkcijas vai arī Lagranža reizinātāju metodi. Lagranža reizinātājus lieto, lai sasaistītu ierobežojumus ar kritērija funkciju un uzformētu Lagranža funkciju. Tādējādi oriģinālais optimizācijas uzdevums ar ierobežojumiem tiek transformēts optimizācijas uzdevumā bez ierobežojumiem, pamatojoties uz Lagranža funkciju. Lagranža metode nodrošina skaitlisko stabilitāti un sasniedz augstu precizitāti, maksājot par to ar uzdevuma izmēru pieaugumu.

Viena no jaudīgākajām ir mākslīgo neironu tīklu (MNT) pieeja, bet tās pielietojums ir saistīts ar sarežģītu modeļu izveidošanu un skaņošanu katram no specifiskajiem pētāmajiem uzdevumiem. Alternatīva ir atbildes virsmu metodika, kas ir globālās aproksimācijas metode,

kura piemērota uzdevumiem ar trokšņainām atbildēm, kad uz gradientu bāzētās metodes kā likums iestrēgst lokālajos minimumos.

RTU izstrādāta programmatūra EDAOPT [Auziņš, 2007] nodrošina atbildes virsmu metodes izmantošanu kompleksā ar globālās gadījuma meklēšanas algoritmu. Adekvāta metamodeļa izveidei ir svarīgi izvēlēties pareizo eksperimentu plānu. Tā izvēle, savukārt, atkarīga no tā, kādas kļūdas eksperimentos ir sagaidāmas. Ja pieņem, ka sistemātisko kļūdu var neievērot un ir tikai gadījuma kļūdas, tad bieži tiek lietoti D-optimālie plāni [McKay, 1979], kuriem informācijas matricas determinants ir ar maksimālu vērtību. Atkarībā no eksperimentu specifikas un iespējamām iepriekšējām zināšanām par sagaidāmo pētāmās sistēmas atbildi programmatūra EDAOPT atļauj izvēlēties to vai citu eksperimentu plānu.

### 1.2.1. Formas optimizācijas metodes (problēma)

Projektējot mašīnbūves konstrukcijas, vienmēr ir aktuāla problēma, kā izveidot drošas konstrukcijas, vienlaicīgi nodrošinot tā elementiem pēc iespējas zemāku cenu. Konstrukcijas mehānikā vispārīgā gadījumā tiek definēts, kā detaļu kopums, uz kuru iedarbojas ārējā slodze. [Himmelblau, 1972; Gordon, 1991]. Par strukturālo optimizāciju uzskata tādas konstrukcijas veidošanu, kura vislabāk uzņem slodzi. Par labāko konstrukciju optimizācijas uzdevumā parasti tiek uzskatīta konstrukcija ar minimālo masu. Protams, sākumā jāizvēlas mērķa funkciju [Christensen, 2009] un precīzi jādefinē ierobežojumus, kas sarežģītu konstrukciju gadījumā varētu būt papildus problēma.

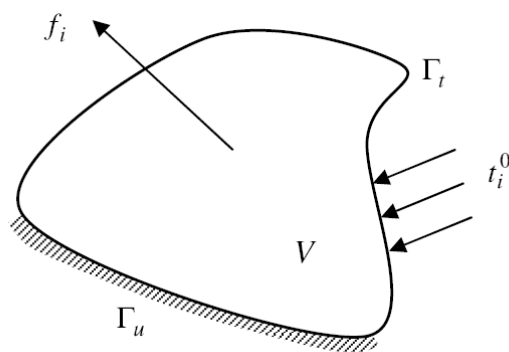
Veicot konstrukcijas optimizāciju, parasti ir nepieciešams ievērot ne tikai mehāniskās stiprības rādītājus, bet arī iespējas tās izgatavošanai ar attiecīgo ražošanas tehnoloģiju, ekonomiskie rādītāji, ekspluatācijas apstākļi un citi. Stingri jāzina, kurā projektēšanas posmā jāveic optimizāciju, lai būtu iespējams samazināt ražošanas izmaksas [Kirsch, 1993].

Strukturālas optimizācijas problēma varētu būt definēta ar deformējumu nepārtraukto ķermeni, kurš atrodas statiskā līdzsvara stāvoklī un uz kuru darbojas spēks  $f_i$  un izkliedēta slodze  $t_i^0$ :

$$\int_V f_i \delta u_i dV + \int_{\Gamma_t} t_i^0 \delta u_i d\Gamma_t = \int_V \sigma_{ij} \delta u_{i,j} dV \quad (1.22)$$

Pie  $u_i = u_i^0$  uz  $\Gamma_u$  un  $t_i = t_i^0$  uz  $\Gamma_t$  kinemātiski iespējamam pārvietojumam  $\delta u_i$ . Ar  $V$  apzīmēts zināmais apgabals,  $\Gamma_u$  un  $\Gamma_t$  ir definēti kinemātiskie ierobežojumi un pārvietojumi (att.1.9.).

Tad formas optimizācijas problēma vispārīgā gadījumā varētu būt definēta, kā: atrast  $V(\Gamma)$  robežu, minimizējot funkciju  $m(V, u_i)$  pie  $g_j(V, u_i) \leq g_j^0$  un  $h_k(V, u_i) \leq h_k^0$ , pie tam apmierinot  $u_i$  pamata vienādojumus. Bet  $g_j(V, u_i)$  un  $h_k(V, u_i)$  ir ierobežojumi vienādību un nevienādību veidā. Katrs ierobežojums apraksta projektēšanas prasības [Lee, 2007].



1.9. att. Deformējama ķermeņa definēšana un pieliktās slodzes

Atkarībā no ievadītajiem parametriem, konstrukciju optimizācijas problēmas var iedalīt 3 galvenās grupās: formas, izmēru un topoloģijas.

Formas optimizācija – optimizācijas parametri nosaka elementa kontūra formu ierobežotā projektēšanas apgabalā. Kontūrs tiek aprakstīts ar parciāliem diferenciāliem vienādojumiem. Šajā gadījumā jāizvēlas diferenciāliem vienādojumiem optimālo integrēšanas soli [Francavilla, 1975]. Konstrukcijas kinemātiskie ierobežojumi parasti paliek nemainīgi-jauni ierobežojumi netiek veidoti.

Izmēru optimizācija - optimizācijas parametri ir konstrukcijas izmēri, piemēram, šķērsriezuma laukums kopņu elementiem vai elementu galvenie izmēri.

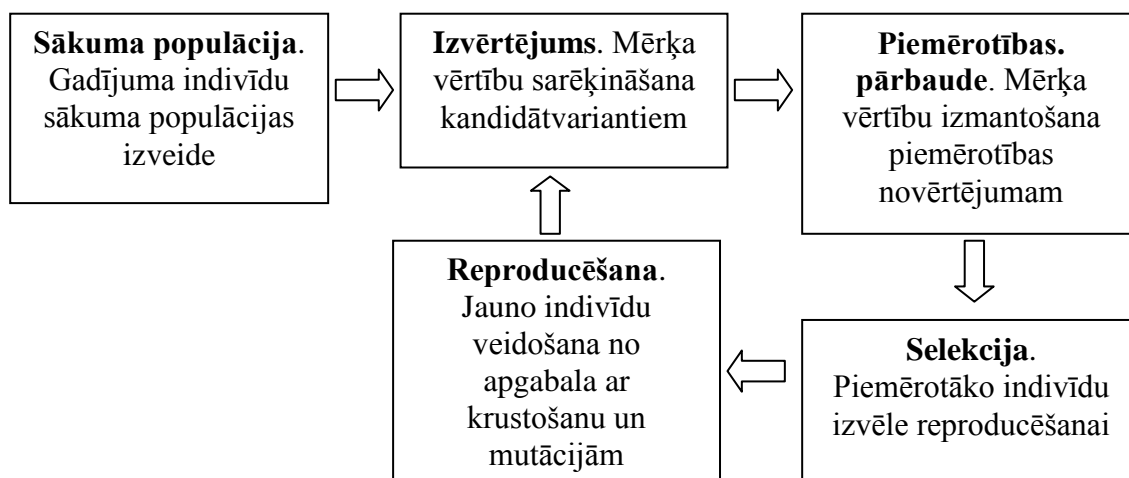
Topoloģijas optimizācija – vispārīgākais konstrukciju optimizācijas veids. Diskrētā gadījumā, piemēram, kopņu konstrukcijai tas tiek realizēts, pieņemot elementu šķērsriezuma laukumus kā optimizācijas parametrus, kuriem ļauj pieņemt nulles vērtības. Ja optimizācijas rezultātā kāds no parametriem iegūts ar nulles vērtību, tad attiecīgais elements tiek izslēgts no kopņu konstrukcijas.

## 1.2.2. Topoloģijas optimizācija

Topoloģijas datorizētas optimizācijas metodes sāka izmantot 1988. gadā, lai samazinātu konstrukcijas elementu masu [Bendsoe, 1988]. No tā laika metode strauji attīstās un rod plašu pielietojumu zinātniskā un industriālā vidē. Šodien to galvenokārt izmanto, lai samazinātu svaru un vienlaicīgi uzlabotu automobiļu, lidmašīnu, kosmisko kuģu un daudzu citu mašīnu svarīgus rādītājus.

Viens no šīm meklēšanas un optimizācijas metodēm ir ģenētiskais algoritms, kurš pamatojas uz dabisko izlasi un ir bieži pielietots strukturālas topoloģijas optimizācijas problēmai [Chapman, 1994]. Ģenētiskais algoritms pieder pie stohastiskajām optimizācijas metodēm [Chong, 2001; Han-Fu, 2002; Rao, 2012]. Šīs metodes priekšrocība ir tā, ka nevajag rēķināt mērķa funkcijas atvasinājumu [Coello 2002; Osyczka 2002].

Ģenētiskais algoritms lieto bioloģiskas evolūcijas analogijas, atļaujot mutācijas un krustošanos starp labu lokālo optimumu kandidātiem tajā cerībā, ka tiks iegūts arvien labāks optimums. Katrā meklēšanas stadijā tiek glabāta visu populāciju konfigurācija. Mutācijas tiek veiktas ar lokālo meklēšanu, kamēr krustošanās operatori nodrošina iespēju pamest lokālo minimumu pievilksanas apgabalus. Ar lielu varbūtību krustošanas likumi veido pēcnācējus ar tādu pašu vai labāku adekvātumu. Ģenētisko algoritmu efektivitāte atkarīga no pareizajiem selekcijas un krustošanas noteikumiem. Koordinātu savstarpējā maiņa ir pietiekoši laba, ja šīm koordinātēm ir gandrīz neatkarīga ietekme uz adekvātumu, bet ja to ietekmes spēcīgi korelētas, tā kā tas ir funkcijām ar dziļām šaurām gravām, kas nav paralēlas koordinātu asīm, tad ģenētiskiem algoritmiem ir lielas grūtības [Dzemyda, 2002].



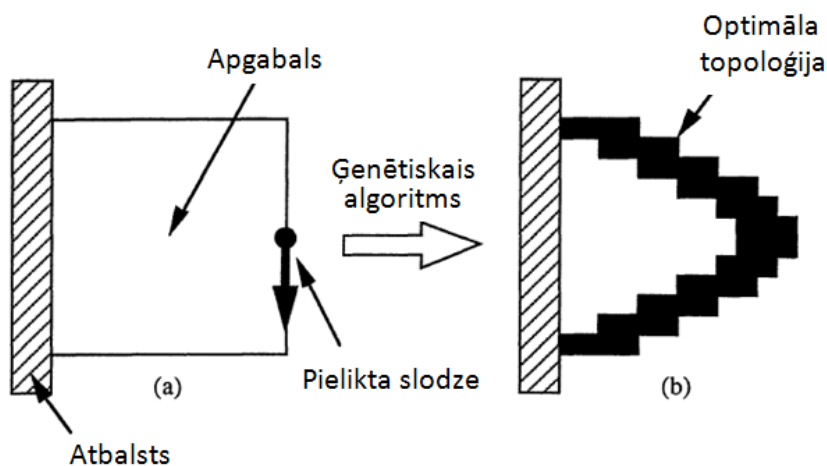
1.10. att. Ģenētiskā algoritma pamatshēma

Ar ģenētiskā algoritma palīdzību ir iespējams atrast optimālo konstrukcijas topoloģiju.

Pie gadījuma meklēšanas jauna topoloģija aizvieto iepriekšējo topoloģiju. Iterācijas atkārtojas, kamēr optimālā topoloģijas struktūra ir atrasta. Ģenētiskā algoritma principiālā pamatshēma ir dota att. 1.10. [Weise, 2009].

Vienkāršs piemērs ir parādīts att. 1.11. Tiek dots sākuma projektēšanas apgabals, kurš ir aizpildīts ar materiālu. Ir zināma pieliktā slodze un robežnoteikumi. Rezultātā tiek ģenerēta konstrukcijas topoloģija, izmantojot iepriekš apskatīto shēmu (att. 1.10.), kurai ir maksimālie rādītāji (piemēram, konstrukcijas stinguma attiecība pret svaru) pie uzdotajiem ierobežojumiem.

Ģenētiskais algoritms ir bieži izmantojams iekārtu elementu formas optimizācijai. Piemēram, darbā [Zhang 2011] ir uzlabota griezējinstrumenta forma, ar kuru tiek apstrādāta dimanta sagatave. Rezultātā tiek paaugstināta izstrādājumu kvalitāte.



1.11. att. Shematiskais attēlojums uz ģenētiskā algoritma bāzētai topoloģijas optimizācijai [Chapman,1994 ]

Darbos [Cagnol, 2001, Bendsoe 2004, Arora, 2004] homogenizācijas metode ieguva tālāko attīstību, tās dažādas realizācijas ir pielietotas formas un topoloģijas optimizācijai. No materiāla izlietojuma viedokļa optimālas konstrukcijas parasti ir pilnīgi noslogotas konstrukcijas, proti tādas, kurās viss materiāls ir noslogots ar lietderīgo slodzi. Konstrukcijas forma tiek modificēta, balstoties uz iegūtajām sprieguma vērtībām galīgajos elementos (GE). Konstrukcija tiek iteratīvi mainīta, atmetot mazāk noslogotos elementus. Tātad tiek pētīts optimālais izotropa materiāla izvietojums konstrukcijā. Ja GE stāvoklis ir 1, tad elements ir, ja - 0, tad elementa nav. Elementa stāvoklis ir atkarīgs no tā, kādā attiecībā tajā ir materiāls un tukšums, proti, jo mazāk materiāla, jo mazāks ir elementa stingums un jo mazāki spriegumi. Pēc noteiktas robežvērtības sasniegšanas elementa stāvoklis tiek pieņemts par 0. Lai iegūtu pēc iespējas gludākus risinājumus, atmetamo elementu skaitam jābūt stipri ierobežotam, jo

pretējā gadījumā, atmetot daudz elementu, var rasties pārrāvumi konstrukcijā un modelis kļūst singulārs [Rozvany, 1994]. Parasti vienā iterācijā atmet ~1% elementu. Kā kritērijs parasti kalpo bezizmēra lielums  $PI$  (Performance Index) - efektivitātes rādītājs, kas, piemēram, optimizējot materiāla izlietojumu, ir maksimālo spriegumu konstrukcijā un sākotnējā konstrukcijas tilpuma reizinājuma attiecība pret šo lielumu reizinājuma vērtību tekošajā iterācijā. Kā ierobežojumi var kalpot konstrukcijas stingums, deformācijas, pārvietojumi, spriegumi, pašsvārstību frekvences u.c. Bez tam var tikt uzlikts aizliegums mainīt noteiktu konstrukcijas apgabalu, kā arī simetrijas piespiedu realizēšana un elementu apvienošana grupās, lai pēc iespējas vienmērīgāk tiktu noņemts vai pievienots materiāls [Allaire, 2002].

Tātad homogenizācijas metodes pamatideja ir tā, ka vajag apskatīt katru mehāniskās sistēmas GEM modeļa elementu kā kompozītu, kurš sastāv no materiāla un tukšuma. Meklēta tiek tāda materiāla un tukšumu attiecība, lai maksimizētu definēto kritēriju, piemēram, sekojošu efektivitātes rādītāju:

$$PI = \frac{\sigma_{0,\max} \nu_0}{\sigma_{i,\max} \nu_i}, \quad (1.23)$$

kur  $\sigma_{0,\max}$  ir maksimālā ekvivalentā sprieguma vērtība sākotnējā konstrukcijā;  $\nu_0$  ir konstrukcijas sākuma tilpums;  $\sigma_{i,\max}$  un  $\nu_i$  - attiecīgo mainīgo lielumu vērtības, kas iegūtas  $i$  - tajā iterācijā.

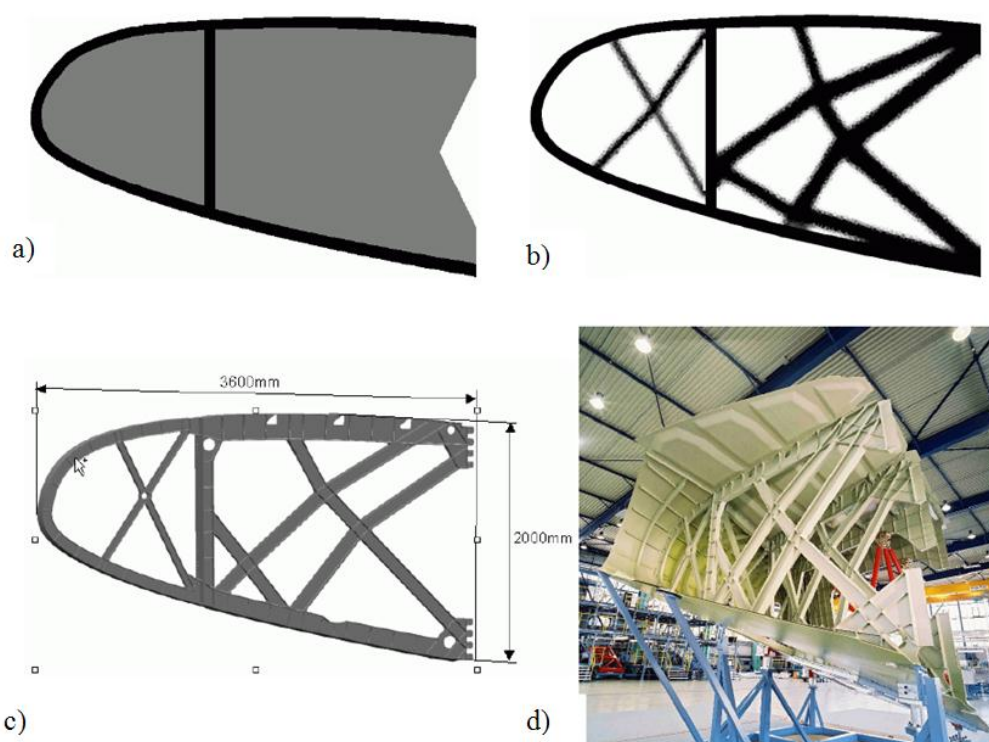
Šo metodi veiksmīgi pielieto no izotropā materiāla veidotu čaulveida konstrukciju formas optimizācijai [Vanderplaats, 2004]. Tomēr tai ir arī trūkumi, proti, optimizācijas parametru skaits nereti var sasniegt vairākus simtus tūkstošus un pat vairāk, un uzdevuma risināšanai ir nepieciešamas lielas skaitļošanas jaudas.

Tuva topoloģijas optimizācijas metodēm ir topometrijas optimizācija [Mozumder, 2011; Vanderplaats, 2001], kura atļauj atrast materiāla optimālo izmēru sadalījumu pētāmā konstrukcijā. Līdzīgi topoloģijas optimizācijai, ir iespējams atrast ne tikai vietas, kur ir iespējams noņemt materiālu, bet arī vietas, kur nepieciešams pielikt materiālu. Tāpēc topometrijas optimizācija bieži ir realizēta kopā ar topoloģijas optimizāciju. Tomēr tai ir trūkums, kas ir norādīts darbā [Mullerschön, 2010], hibrīdo šūnu automātu metode, kura ir pamatā topometrijas optimizācijai, un neatļauj veikt paralēlos aprēķinus datoru tīklā.

Komerציālā programmatūra Genesis [Genesis User's Manual, 2007], kurā homogenizācijas metode ir realizēta kopā ar topometrijas optimizāciju, atļauj izmantot līdz pat 2,5 miljoniem optimizācijas parametru. Tas dod iespēju atrast tādu sarežģītu objektu kā automobiļu virsbūvju, raķešu korpusu, utml. optimālo topoloģiju. Metode dod ļoti efektīvus



Par vienu no reprezentatīvākajiem topoloģijas optimizācijas pielietojšanas piemēriem var pieminēt stinguma ribas projektēšanu Airbus 380 lidmašīnas spārnā att.1.14. [Bendsoe, 2007]. Formas optimizācijas problēmai izmantotas divas programmatūras, kur pirmajā tiek realizēta topoloģijas optimizācijas metode, bet otrajā tiek ievērotas iespējamā kompozīta materiāla īpašības, kuras ir noderīgas spārna konstrukcijai. Pamatojoties uz iegūtiem rezultātiem, kā arī inženieriski interpretējot iegūto topoloģiju, tiek atrasta jauna spārna konstrukcija ar palielinātu stingumu. Rezultātā tā dod 40 % svara samazinājumu, salīdzinājumā ar tradicionālo medus šūnu kompozīta konstrukciju.



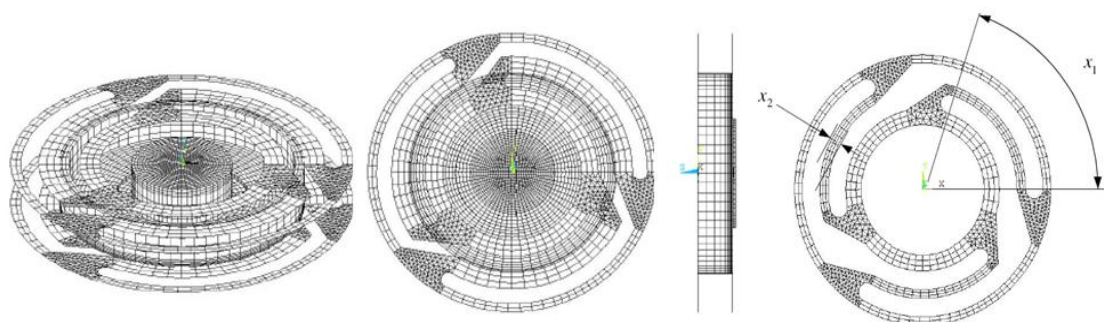
1.14. att. Airbus 380 spārna projektēšanas process: a) projektēšanas apgabals; b) optimizēta topoloģija; c) faktiskā struktūra un d) izgatavotā spārna konstrukcija [Bendsoe, 2007]

Jaunas ribas konstrukcijas radīšana lidmašīnas spārnā var tikt uzskatīta par tipisku topoloģijas optimizācijas problēmas risinājumu. Šajā gadījumā netiek obligāti iegūts galīgais konstrukcijas risinājums, tomēr iegūtā topoloģija var tikt izmantota par pamatkonceptiju jaunajai spārnu konstrukcijai.

Tomēr nevar uzskatīt, ka topoloģijas optimizācija vienmēr dod tikai iepriekšēju aptuvenu risinājumu: dažos gadījumos, topoloģijas optimizācijas rezultātus var uzreiz tiešā veidā izmantot, piemēram, projektējot un izgatavojot jauna veida fononu kristālus [Borel, 2004].

### 1.2.3. Izmēru optimizācija

Šī metode ir ļoti izplatīta, algoritmu skaits ir milzīgs. Šodien klasisko optimizācijas metožu [Bendsoe, 1995] izmantošana, kura pamatojas uz darbietilpīgu vienādojumu sistēmu tiešu integrēšanu, var būt neracionāla un nedodot vēlamos rezultātus. Viena no alternatīvām iespējām varētu būt metamodelēšanas pielietojums [Montgomery, 2001; Myers, 2009, Simpson, 1998].



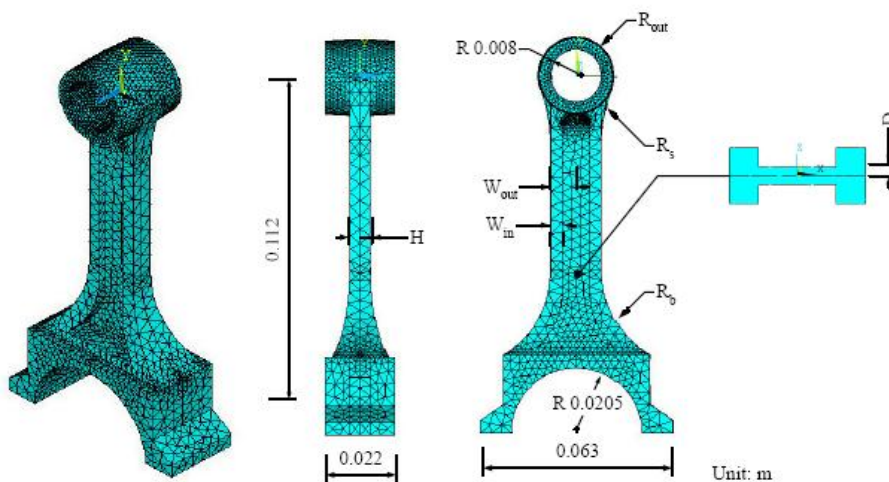
1.15. att. Ass virzienā vibrētas cilindriskas plāksnītes GE modelis [Lee, 2007]

Darbos [Lee, 2004;2007] ir parādīts, ka ar Kriginga aproksimāciju [Krige, 1951] izveidotie metamodeļi var tikt veiksmīgi pielietoti izmēru optimizācijai. Darba autori iegūst atbildes aproksimāciju ar augstu prognozēšanas precizitāti, un izpēta cilindriskā elementa formu (att. 1.15.) variējot 2 izmēra mainīgos:  $x_1$ - leņķi un  $x_2$  - biezumu. Šajā optimizācijas uzdevumā tiek minimizēta cilindriskas plāksnītes masa pie ierobežojumiem uz fundamentālo frekvenci un maksimālo spriegumu pie statistiska slogojuma.

Plāksņveida elements ir piestiprināts pa ārējo kontūru, bet centrā ir pielikts spēks. Tiek veikti 25 GE eksperimenti (aprēķini) un piefiksētas trīs atbildes: pirmā pašsvārstību frekvence, masa un maksimālie spriegumi. Tālāk atbildes aproksimētas ar lineāru funkciju (elementa masa) un Kriginga funkciju (spriegumi un frekvences). Aproksimācijas kvalitāte tiek novērtēta ar vidējo kvadrātisko kļūdu (mean square error). Vislabāko aproksimāciju autori iegūst masai, pēc tam frekvencēm un tad maksimālo spriegumu atbildēm.

Otrs piemērs ir izmēru optimizācija iekšdedzes dzinēja klanim [Jung, 2006], kurš pakļauts gan stiepes gan arī spiedes slodzei. Kļauņa stiprība tiek ievērtēta, ievērojot noguruma līkni. Att. 1.16. ir redzami izmantoti 7 izmēru parametri. Tiek definēti ierobežojumi uz spriegumiem un FOS - drošības koeficientu. 96 GE aprēķini tiek veikti ar ANSYS. Autori aproksimē iegūtās atbildes ar Kriginga funkciju un veic izmēru optimizāciju. Iegūtie rezultāti

pārbaudīti ar ANSYS programmatūru 18 dažādos punktos. Parādīts, ka ar metamodeļu izmantošanu atrastais optimizācijas rezultāts ir ar 1.23% relatīvo kļūdu, ko var uzskatīt par labu rezultātu.

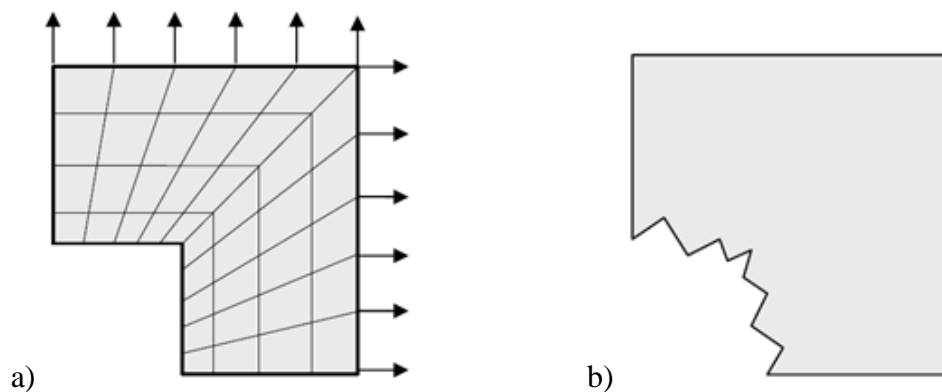


1.16. att. Klaņa izmēru optimizācija: GE modelis un parametri [Jung, 2006]

#### 1.2.4. Formas optimizācija

Formas optimizācijas problēma ir īpaši aktuāla un dziļi pētīta pēdējos 40 gadus pēc tam, kad Zienkiewicz un Cambell bija devuši tās pamatformulējumu [Zienkiewicz, 1973]. Konstrukciju formas optimizācijas metodika šodien aktīvi attīstās un ir iekļauta vairākās GEM programmatūrās. Tomēr formas optimizācija, izmantojot GEM programmatūru, nav tik vienkārša, jo nepieciešams manuāli uzdot optimizācijas mainīgos un ierobežojumus. Piemēram, tiek izmantota ģeometriskā robežu metode [Choi, 2004], lai uzdotu projektēšanas mainīgos ar CAD pieejamām līknēm [Lee, 2007]. Rezultāts bieži vien ir neapmierinošs, ja forma tiek uzdota ar sarežģītām līknēm un lielu mainīgo skaitu.

Elementu mezglu koordinātu metode [Francavilla, 1975] ir viena no pirmajām formas optimizācijas metodēm, kurā izmantotas GE mezglu koordinātes kā optimizācijas parametri. Par šīs metodes galveno trūkumu tiek uzskatīts tas, ka robežas GE mezgli bieži pasliktina GE tīklu kvalitāti, sliktākajā gadījumā pat izveido nepieņemamu formu, kā parādīts att. 1.17. Lai izvairītos no izkropļotām robežām, ir nepieciešams ieviest jaunus ierobežojumus, lai kontrolētu GE mezgla punktu izvietojumus. Robeža varētu būt kontrolēta ar plānoto tīklu ģeneratoru [Vanderplaats, 1991], ar noteiktiem pārvietojumiem vai ar fiktīvām slodzēm [Rajan, 1989].



Att. 1.17. Plāksnīte ar iegūtu nepieņemamu urbuma formu (Elementu mezglu koordinātu metode [Francavilla, 1975] a) sākuma un b) iegūtā forma

Ģeometrijas robežas metodē tiek izmantotas CAD pieejamās līknes, kuras nosaka robežas formu. Čaulas tipa konstrukcijām tiek vispirms definētas atbilstošās līknes, ar kurām tiek veidotas virsmas. Tālāk uz virsmas tiek automātiski ģenerēts tīkls. Tikko forma ir samainīta, mainās CAD līknes forma. Virsmas modificēšana un jauna tīkla ģenerēšana ir secīgas formas optimizācijas operācijas. Tomēr šī metode netiek rekomendēta izmantošanai 3D GE, piemēram, sešskaldņu elementiem dēļ automātiskās tīkla ģenerācijas ierobežojumiem.

Pēdējos gados ir parādījušies darbi, kuru autori [Song, 2007; Liao, 2008, Kang, 2007] cenšas samazināt optimizācijas parametru skaitu un vienkāršot aprēķinus formas optimizācijai. Šī alternatīvā pieeja tiek balstīta uz vienkāršotu modeļu veidošanu no sarežģītiem GE modeļiem izmantojot aproksimācijas. Autori veido šos aproksimējošos modeļus, izmantojot ar statistisko analīzi iegūtās atbildes. Par populāriem metamodeļiem [Koziel, 2011] tiek uzskatītas atbildes virsmas, kas iegūtas ar globālām polinomiālām aproksimācijām un Kriginga modeļi dēļ to vienkāršības un augstas precizitātes, kā norādīts darbā [Song, 2010]. Ar atbildes virsmas metodi tiek pētīta, piemēram, vieglā automobiļa konstrukcijas drošība [Liao, 2008]. Ar Kriginga metamodeļiem veikta automātiski atveramo durvju optimizācija [Kang, 2007]. Tomēr daži autori [Simpson 1998, Yang 2001, Viana 2008] konstatē, ka labāki metamodeļi automātiski nenožīmē, ka tiek iegūts labākais risinājums. Dažādu metamodeļu izmantošana kopā varētu dod daudz labāku risinājumu nekā viena tipa modeļu izmantošana mašīnbūves objektu optimizācijai.

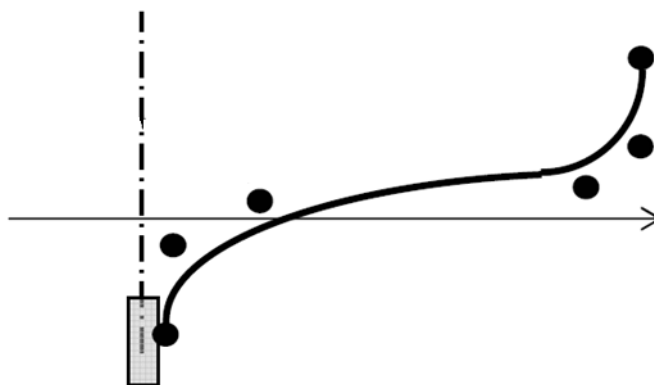
Apskatīsim ekrāna katodstaru lampas formas optimizācijas uzdevumu [Lee, 2007]. Autori cenšas samazināt ekrāna katodstaru lampas tilpumu. Lai to varētu izdarīt, ir nepieciešams pārveidot katodstaru lampas komponenti, kurai, savukārt, jānodrošina atbilstoša stiprība – jāiztur spiediena starpību starp ārējo vidi un tās iekšējo daļu. Šajā gadījumā, pētāmā

objekta formas robežas tiek uzdotas ar 5. pakāpes racionālu Bezjē līkni. Līknes forma, savukārt, uzdota ar 6 atbalsta punktiem att. 1.18. Ir redzams, ka to izvietojums izvēlēts tā, lai labāk aprakstītu sagaidāmo piltuvveida formu. Racionālā Bezjē  $n$ -pakāpes līkne tiek uzdota ar svērto summēšanu, kur kā svāra koeficienti tiek izmantoti Bernšteina polinomi [Saxena, 2005]  $B_{i,n}(t)$ :

$$C(t) = \frac{\sum_{i=0}^n B_{i,n}(t)w_i P_i}{\sum_{i=1}^n B_{i,n}(t)w_i} \quad (1.24)$$

$$B_{i,n}(t) = \frac{n!}{i!(n-i)!} t^i (1-t)^{n-i} \quad (1.25)$$

kur  $P_i$  ir atbalsta punktu koordinātes un  $w_i$  ir nenegatīvi baricentriski svāri.



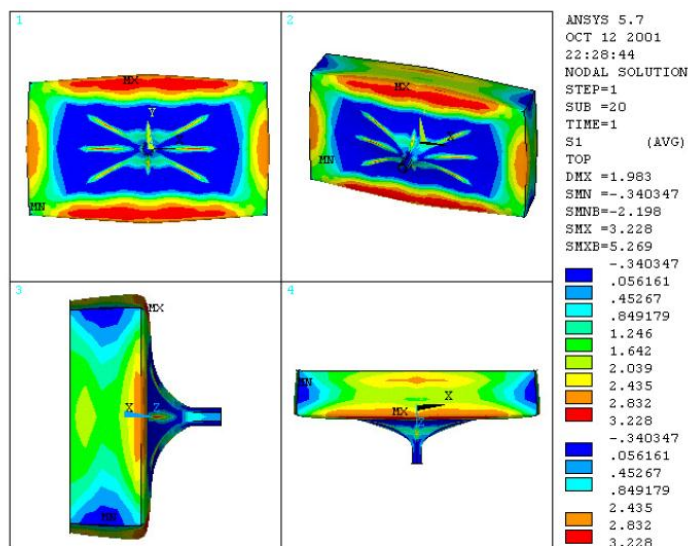
1.18. att. Ekrāna katodstaru lampas formas uzdošana ar 5. pakāpes Bezjē līkni un tās atbalsta punkti [Lee, 2007]

Tālāk risināta formas optimizācijas problēma. Par katodstaru lampas stiprības kritēriju un mērķa funkciju tiek pieņemts maksimālais galvenais spriegums  $\sigma_{\max}$ , kuram jābūt minimālam. Pieņemts ierobežojums uz katodstaru lampas tilpumu  $V$  – tas nedrīkst būt lielāks par sākotnējā varianta tilpumu.

Uzdevums tiek rēķināts ar ANSYS programmatūrā realizēto elementu mezglu koordināšu metodi. Tiek panākts galveno spriegumu  $\sigma$  koncentrācijas zonu samazinājums. Rezultātā atrastai lampas piltuvveida formai maksimālais galvenais spriegums  $\sigma$  ir par 12.4 % mazāks, salīdzinot ar sākotnējo konstrukcijas variantu pie vienāda tilpuma  $V$ . Lielāko

galveno spriegumu  $\sigma_{\max}$  vērtības pārkoncentrējas uz katodstaru lampas taisnstūra paralēlskaldņa sāniem, bet iegūtā piltuvveida gludā forma kļūst mazāk nospriegota (att. 1.19.).

Tomēr šajā piemērā metamodeļi netiek izmantoti, un līdz ar to tiek patērēts ievērojams laiks, lai veiktu optimizāciju.



1.19. Ekrāna katodstaru lampas piltuvveida formas optimizācijas rezultāts [Lee, 2007]

## NODAĻAS SECINĀJUMI

Veicot pēdējo gadu darbu analītisko apskatu pētāmajā jomā, ir konstatēti topoloģijas un formas optimizācijas klasisko metožu galvenie trūkumi:

- Konstrukciju formas optimizācijai parametru skaits nereti var sasniegt vairākus simtus tūkstošus un pat vairāk, un uzdevuma risināšanai ir nepieciešamas ļoti lielas skaitļošanas jaudas.
- Bieži objektam iegūst formas, kas tehnoloģiski ir grūti realizējamas.
- Jāizmanto dārgu specializētu programmatūru (piem., Genesis) [Genesis User's Manual, 2007 ].

Pamatojoties uz darbu analīzi apskatāmajā jomā, tiek formulēti sekojoši secinājumi:

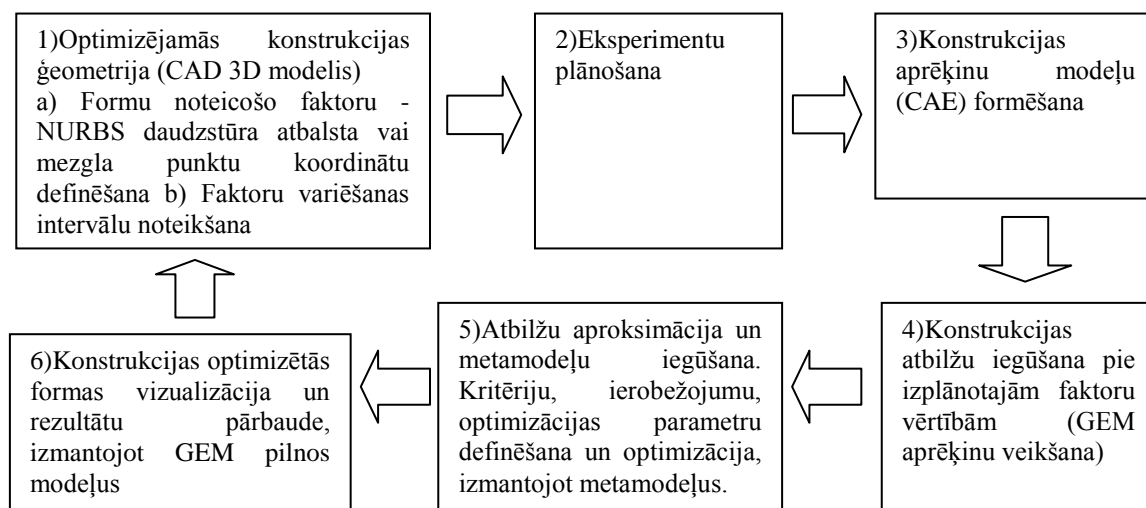
- Formas optimizācijas perspektīvie virzieni ir tie, kuri ir bāzēti uz pēc iespējas mazāku optimizācijas parametru skaita izmantošanu un plašu augstas kvalitātes aproksimāciju izmantošanu.
- NURBS līkņu izmantošana formas uzdošanai palīdz izvairīties no negludām virsmām un līdz ar to samazināt tehnoloģiski nerealizējamo konstrukciju variantu pārlūkošanu un salīdzinošo analīzi. NURBS var tikt efektīvi modificēts, lokāli mainot tā atbalsta punktu koordinātes.
- Nepieciešamajiem aprēķinu resursiem jābūt pēc iespējas mazākiem. Jaunajai formas optimizācijas metodikai jābūt realizējamai, izmantojot personālā datora resursus un tai jānodod rezultātus ar pietiekošu precizitāti.

Ievērojot visu iepriekš minēto, tiek izvirzīts darba mērķis un uzdevumi:

- Izstrādāt efektīvu formas optimizācijas metodiku, kura tiktu balstīta uz jaunu iepriekš neizmantotu pieeju: izmantot latīņu hiperkuba (LH) eksperimentu plānus, kas optimizēti pēc vidējās kvadrātiskās distances kritērija (MSD), lai iegūtu lokālās aproksimācijas ar Gausa kodolu (metamodeļus) pētāmo konstrukciju rādītājiem kā funkcijas no NURBS daudzstūra atbalsta punktu koordinātēm, kas tiek izmantotas formas uzdošanai.
- Izstrādājamai metodikai ir jābūt viegli adaptējamai ar mūsdienu 3D CAD/CAE programmatūru.
- Izveidot atbilstoši CAD/CAE programmatūrai makrosus, kas automatizētu eksperimentu plānu ievadīšanu un atbilžu nolasīšanu, lai samazinātu optimizācijas datu sagatavošanas laiku un izvairītos no mehāniskām kļūdām.

## 2. FORMAS OPTIMIZĀCIJAS METODIKA UN TESTI

Darbā tiek izstrādāta alternatīva resursus taupoša konstrukciju elementu formas optimizācijas metodika, kuras pamatā ir augstas kvalitātes metamodeļu izmantošana. Metodika balstās uz secīgu CAD/CAE un RTU izstrādāto EDASOpt programmatūru izmantošanu. Metodika iekļauj 6 etapus, kuri shematiski parādīti att. 2.1.



2.1. att. Formas optimizācijas metodikas pamatetapi

Pirmajā etapā tiek definēti konstrukcijas optimizācijas parametri, to skaits un diapazoni. Pētāmo objektu mainīgās formas uzdošanai paredzēts izmantot ar nevienmērīgiem racionālajiem B-splainiem (NURBS) iegūtas līknes. Par neatkarīgajiem variējamajiem parametriem tiek izmantotas NURBS daudzstūra atbalsta vai mezgla punktu koordinātas. Parametru diapazonus izvēlas, ievērojot tādus faktorus kā optimizējamā elementa vai mezgla izmēru ierobežojumus, masas ierobežojumu, tehnoloģiskos ierobežojumus vai kādus citus svarīgus ierobežojumus. Parametru diapazoniem jābūt tādiem, lai iespējamais optimālais risinājums atrastos to robežās, citādi optimizāciju vajadzēs atkārtot ciklā, koriģējot parametru diapazonus.

Otrajā etapā saskaņā ar parametru skaitu un diapazoniem ar programmatūru EDASOpt tiek ģenerēts eksperimentu plāns. Priekšroka tiek dota latīņu hiperkuba eksperimentu plāniem sarēķinātiem pēc vidējās kvadrātiskās distances kritērija (MSD).

Trešajā etapā tiek veikta objekta formas ģeometriskā modeļa būvēšana ar CAD līdzekļiem saskaņā ar eksperimenta plānu. Šajā etapā ir iespējams piefiksēt katra modeļa tilpumu, masu un citus inerciālos rādītājus, kuri optimizācijas 5. etapā varētu būt izmantoti.

Ceturtajā etapā tiek veikti objekta GEM pilnā modeļa atbilžu aprēķini ar CAE programmatūru. GE modelim jānodrošina pietiekoša meklējamo atbilžu precizitāte.

Piektajā etapā tiek veikta atbilžu aproksimācija ar lokālām polinomiālām funkcijām ar Gausa kodolu programmatūrā EDAOpt. Tiek novērtēta aproksimācijas precizitāte, sarēķinātas prognozēšanas kļūdas. Ja rezultāti ir apmierinoši, tad pie uzdotajiem zināmiem ierobežojumiem (masa, tilpums, spriegumi, pārvietojumi, deformācija un citi) tiek meklēti mērķa funkcijas ekstrēmumi ar globālajām stohastiskajām optimizācijas metodēm.

Sestajā etapā atrastie optimizācijas parametri tiek izmantoti, lai izveidotu objekta 3D modeļa optimālo formu CAD programmatūrā. Tālāk optimālā forma tiek pārbaudīta, izmantojot objekta pilno GEM modeli. Aprēķināto pilnā GEM 3D modeļa atbilžu salīdzināšana ar iepriekš ar metamodeļiem iegūtajiem rezultātiem, kļūdu novērtēšana.

Mūsdienās diezgan plaši tiek izmantoti CAD/CAE programmatūrās integrējami speciāli API moduļi-programmatūras, ar kuriem ir iespējams veikt optimizācijas automatizāciju. Piemēram, integrējama optimizācijas programmatūra VisualDOC [VisualDOC] atbalsta savietojamību ar plašu populāru programmatūru klāstu: Matlab, Excel, CAD/CAE, uc. Tomēr tāda veida programmas ir samērā dārgas. Tāpēc izmantots alternatīvs variants – veikt pieejamās CAD/CAE programmatūras API programmēšanu.

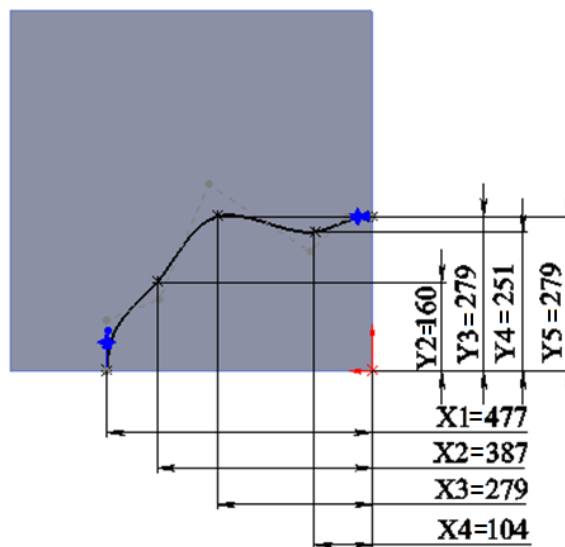
Lai automatizētu lietotāja darbības 3-5 etapos, proti, EDAOpt eksperimentu punktu ievadīšanu un atbildes nolasīšanu, tiek izveidots speciāls Visual Basic [Gaddis, 2010] makross (skat. pielik. 1) programmatūrai SolidWorks (SW) [SolidWorks, 2009]. Tas atļauj automatizēti ievadīt MS Excel tabulā (att. 2.2.) ar EDAOpt sagatavotos eksperimenta plānus ar nepieciešamo precizitāti.

Pielikumā 1. parādītais makross tika izveidots stieptās plāksnītes formas optimizācijai, kura būs apskatīta tālāk. Piemēram, šajā makrosā ir iespējams ievadīt parametru vērtības (parametru daļa att. 2.2.I.), kuras ir NURBS mezgla (att. 2.3.) vai daudzstūra atbalsta punktu koordinātes –  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3=Y_3$ ,  $X_4$  un  $Y_5$ , bet  $Y_2$  un  $Y_4$  šajā gadījumā ir ar formulu saistītie lielumi. Palaižot makrosu, tiek realizēta noteikta darbību secība – ģeometriskā modeļa veidošana, secīgi izmantojot SW iezīmes, saskaņā ar eksperimenta plāna punktiem. Piemēram, sākumā tiek ievadītas NURBS mezgla punktu koordinātes un tad veidota atbilstoša plāksnītes robežvirsmas forma (att. 2.3.). Ar makrosu arī ir iespējams uzreiz uzdot materiāla fizikālās īpašības, piemēram, materiāla blīvumu (skat. III att. 2.2.) un tad tas pārbaudē parādās logā att. 2.2. IV. Aprēķināto eksperimenta plāna punktu skaits tiek automātiski sasummēts un parādīts att. 2.2 V. Gadījumā, ja makross nevar nerealizēt eksperimenta plāna punktu

(izveidot ģeometrisko modeli), tad tiek parādīts šī punkta numurs. Makrosa izpildes gaitā rēķināmo eksperimenta plāna punktu skaitliskās vērtības parādītas logu sekcijā att. 2.2. VI. Atbilžu skaitliskās vērtības automātiski tiek ierakstītas MS Excel tabulas sekcijā II (skat. II att. 2.2. ).

Izveidotam makrosam ir viegli maināma SW izpildes operāciju koda daļa, līdz ar to ir iespējams ātri pāriet pie citas formas optimizācijas problēmas.

2.2. att. Stieptas plāksnītes datu ievadīšanai un atbildes piefiksēšanai izveidotais makross



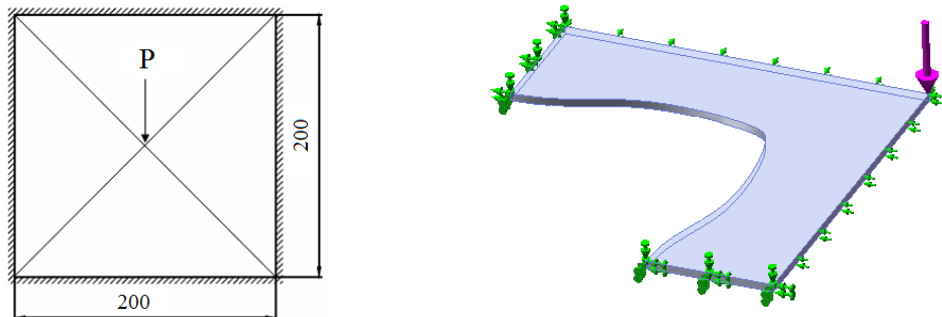
2.3. att. NURBS splaina parametru uzdošana ar makrosu

## 2.1. Metodika un tās pārbaude ar testa piemēriem

Čaulveida konstrukcijas elementi ar visdažādāko formu mūsdienās tiek plaši pielietoti būvniecībā u.c. industrijas jomās. Lai pārbaudītu metodikas darbaspēju un novērtētu efektivitāti, tā tiek salīdzināta ar klasisko homogenizācijas metodi vienkāršu plānsienu konstrukciju formas optimizācijai. Izmantosim iepriekš aprakstīto metodiku un sagatavoto makrosu.

### 2.1.1. Liektas plāksnītes izgriezuma formas optimizācija

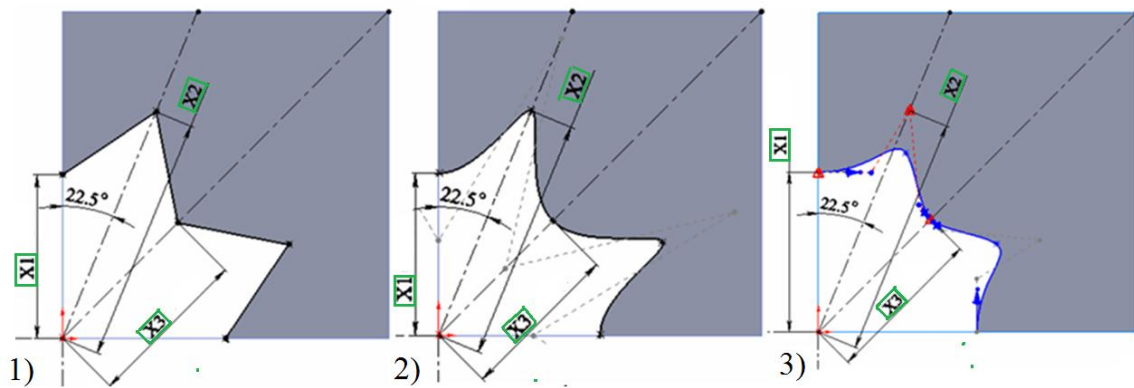
Tiek apskatīta 4 mm konstanta biezuma kvadrātiska plāksnīte, kuras visas četras malas ir nekustīgi nostiprinātas (att. 2.4.). Plāksnītes materiāls ir izotrops ar elastības moduli  $E = 1900$  MPa un Puasona koeficientu  $\mu = 0.39$ . Perpendikulāri plāksnītei tās centrā ir pielikts spēks  $P = 25$  N, kas izraisa lieci. Optimizācijas mērķis ir atrast konstanta biezuma plāksnītes formu ar minimālu tilpumu ar noteikumu, ka tās izliece nepārsniegtu  $\delta = 0.5$  mm. Darbā [Liang, 2001], izmantojot homogenizācijas metodi, ir atrasta optimālā izgriezuma forma ar tilpumu  $v = 68750$  mm<sup>3</sup>, kura ir parādīta att. 2.7a.



2.4. att. Plāksnīte un tās  $\frac{1}{4}$  aprēķinu modelis ar simetrijas robežnoteikumiem

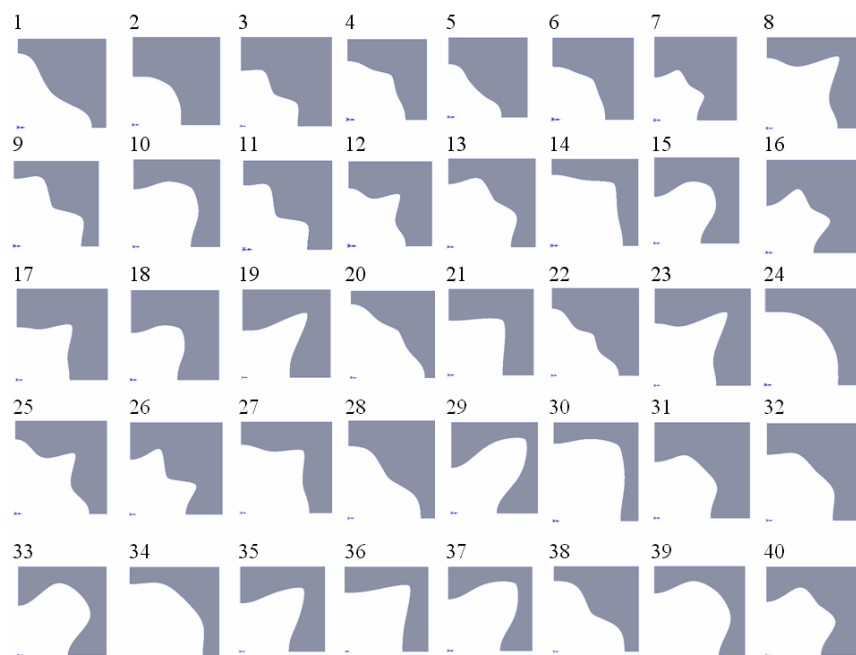
Izgriezuma forma tiek definēta ar trim paņēmieniem (att. 2.5.): 1) izmantojot atbalsta punktus, kuri ir savienoti ar taisnēm; 2) izmantojot NURBS mezgla punktus; 3) izmantojot NURBS daudzstūra atbalsta punktus. Risinot uzdevumu, tiek ņemts vērā tā simetriskais raksturs. Tāpēc tiek apskatīta plāksnītes  $\frac{1}{4}$  daļa, bet definējot atbalsta punktus, kuri nosaka izgriezumu, tiek izmantota plāksnītes  $\frac{1}{8}$  daļa, jo meklējamam izgriezumam jābūt ar simetrisku formu. Att. 2.5. redzams, ka izgriezumam ir definēti 3 atbalsta punkti, kuri izvietoti: 1) uz vertikālās šķautnes, 2) uz taisnes, kura ar vertikālo šķautni veido leņķi  $22.5^\circ$  un 3) uz plāksnītes  $\frac{1}{4}$  daļas diagonāles. Saskaņā ar metodiku vispirms ir nepieciešams izveidot eksperimenta plānu, kurš nosaka atbalsta punktu izvietojuma mainīgās koordinātes. Šie punkti

tiek uzdoti ar trim koordinātēm, kuras tiek variētas sekojošos diapazonos:  $50 < X_1 < 85$ ;  $50 < X_2 < 105$  un  $50 < X_3 < 115$  mm formas uzdošanas pirmajam un otrajam paņēmienam un  $50 < X_1 < 90$ ;  $50 < X_2 < 117.5$  un  $50 < X_3 < 115$  mm – trešajam paņēmienam. Pēdējā gadījumā malējos punktos papildus tiek uzdoti nepārtrauktības vektori, kuri definēti  $90^\circ$  leņķī attiecībā pret simetrijas asi un plāksnītes sānu malu (vektoru garumi punktos  $x_1$  un  $x_3$  tiek pieņemti attiecīgi 5 un 1.5 mm).



2.5. att. Izgriezuma uzdošanas paņēmienu

Ar programmatūru EDAOpt tiek ģenerēts latīņu hiperkuba eksperimentu plāns [Auziņš, 2007], kurš ir aprēķināts pēc vidējās kvadrātiskās distances kritērija (MSD kritērija vērtība 0.4262) 3 faktoriem un 40 mēģinājuma punktiem (plāns ir pieejams arī Internet vietnē <http://www.mmd.rtu.lv>). Tālāk ar programmatūras SW palīdzību tiek izveidoti 3D modeļi katram no trim apskatītajiem formas uzdošanas paņēmienu. Iegūtie ģeometriskie modeļi, izmantojot NURBS daudzstūra atbalsta punktus, ir parādīti att. 2.6.



2.6. att. Izgriezuma formas saskaņā ar eksperimenta plānu

Nākamajā solī ar SW Simulation tiek aprēķinātas ar GEM diskretizēto modeļu atbildes, izmantojot elementus ar vidējoto šķautnes garumu 4 mm un summāro brīvības pakāpju skaitu ~100000, kurš ir atkarīgs no plāksnītes izgriezuma lieluma. Iegūtās atbildes-maksimālie ekvivalentie spriegumi pēc Mizesa kritērija; maksimālie pārvietojumi plāksnītes centrālajā punktā; plāksnītes tilpums  $v$ ; deformācijas uc. tika ievadītas EDASOpt un izmantotas aproksimāciju iegūšanai, kuras tālāk ļauj realizēt globālās meklēšanas procedūru [Januševskis, 2004]. Piemēram, izmantojot otrās kārtas polinomu, atbildes aproksimācija tiek meklēta formā:

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^d \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{d-1} \sum_{j=i+1}^d \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^d \beta_{ii} x_i^2 + \varepsilon, \quad (2.1)$$

kur  $d$  mainīgajiem  $x_1, \dots, x_d$  ir  $L=(d+1)(d+2)/2$  nezināmi koeficienti  $\beta$  un pieņemts, ka gadījuma kļūdas  $\varepsilon$  ir neatkarīgas ar normālo sadalījumu, nulles vidējo vērtību un konstantu dispersiju  $\sigma^2$ . Lokālās aproksimācijas gadījumā koeficienti  $\beta=(\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_L)$  ir atkarīgi no punkta  $x_0$ , kurā tiek rēķinātas prognozēšanas vērtības, un to iegūšanai tiek izmantota svērtā mazāko kvadrātu metode:

$$\beta = \arg \min_{\beta} \sum_{j \in N_x} w(x_0 - x_j) \times (y_j - \hat{y}(x_j))^2 \quad (2.2)$$

kur  $N_x$  apkārtējo punktu nozīmīgums tiek ievērtēts ar Gausa kodolu:

$$w(u) = \exp(-\alpha u^2), \quad (2.3)$$

kur  $u$  ir Eiklīda distance no  $x_0$  līdz tekošajam tuvākam eksperimentu plāna punktam un  $\alpha$  ir koeficients, kurš nosaka tuvāko punkta svarīgumu.

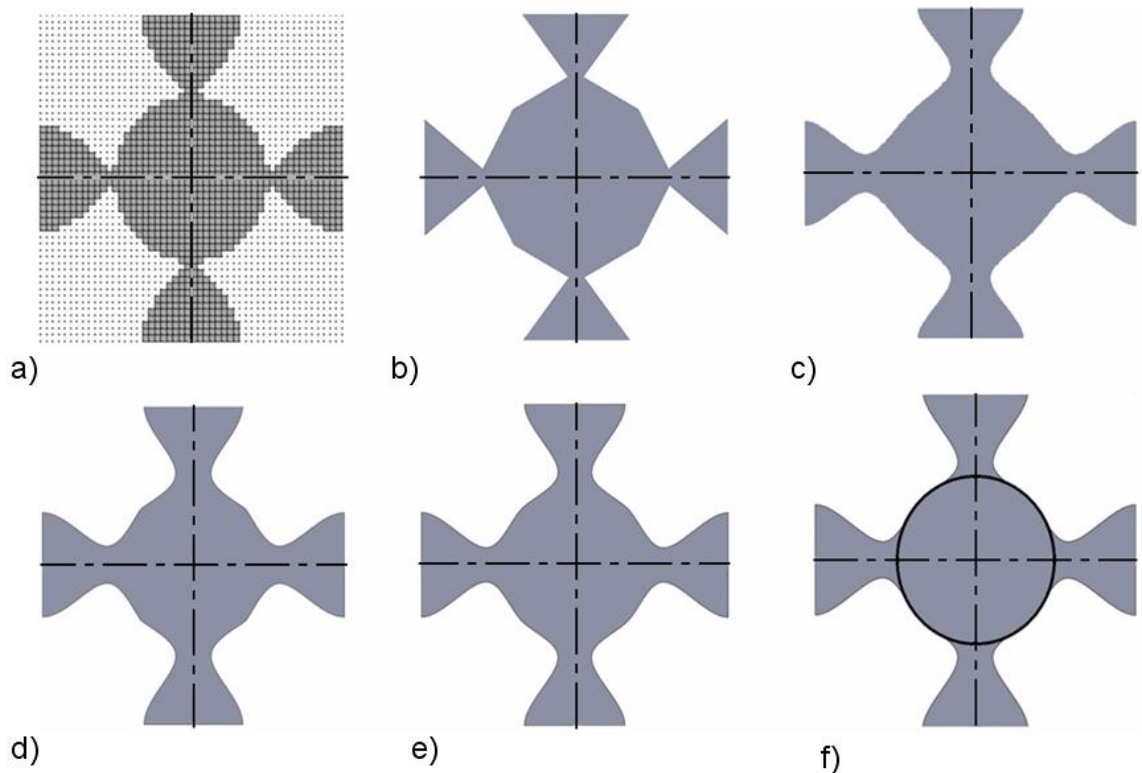
Aproksimācijas kvalitāte tiek novērtēta ar krosvalidācijas kļūdu:

$$\sigma_{xrel} = 100\% \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_-(x_i) - y_i)^2}}{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (2.4)$$

kur skaitītājā ir prognozes vidējā kvadrātiskā kļūda starp aproksimācijā iegūtajiem un ar GEM aprēķinātajiem rezultātiem, bet saucējā ir atbildes novirze no tās vidējās vērtības;  $n$  ir pārbaudes punktu skaits un  $\sum_{i=1}^n \hat{y}_{-j}(x_i)$  apzīmē atbilžu summēšanu, nelietojot atbildes vērtību  $j$ -tajā punktā.

Izmantojot EDAOpt iegūto lokāli svērtu polinomiālo aproksimāciju, ar globālo gadījuma restarta optimizācijas procedūru tiek iegūtas izgriezuma formas (sk. att. 2.7. b-e).

Rezultātu apkopojums ir redzams tabulā 2.1., kur tie tiek salīdzināti ar darba [Liang, 2001] rezultātiem un varianta burti atbilst att. 2.7. parādītajām formām. Šeit Gausa kodola (2.3) parametra  $\alpha$  vērtības izvēlētas tādas, lai minimizētu attiecīgās atbildes krosvalidācijas kļūdu (2.4), kas tabulā 2.1. apzīmēta ar SigmaCross. Prognozes vērtības ir iegūtas, izmantojot aproksimācijas – metamodeļus, bet faktiskās vērtības - risinot GEM modeli. Labākie rezultāti ir iegūti, izmantojot NURBS daudzstūra atbalsta un splaina mezgla punktus. Variantā „d” iegūtais tilpums ir mazāks nekā darbā [Liang, 2001] ar homogenizācijas metodi iegūtais. Lai tālāk uzlabotu varianta „d” rezultātus, tika realizēta punktu  $x1$  un  $x3$  nepārtrauktības vektoru garuma optimizācija, kas atļāva samazināt  $\frac{1}{4}$  plāksnītes tilpumu vēl par 1.38 % (att. 2.7e) salīdzinājumā ar homogenizācijas metodi (att. 2.7a).

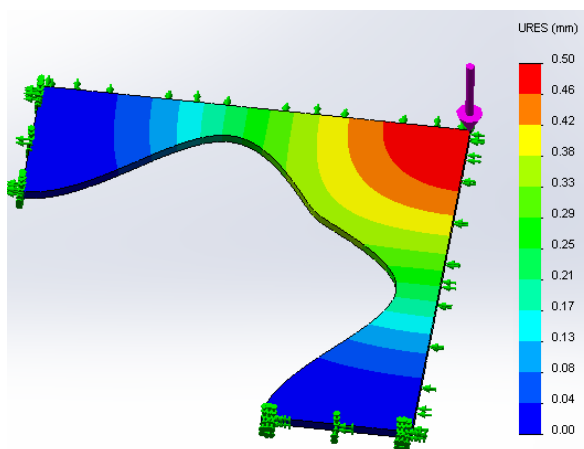


2.7. att. Iegūtās formas

Nepārtrauktības vektoru optimizācijai izmantota tāda pati metodika, bet pielietojot plānu, kurš sastāv no 10 mēģinājuma punktiem 2 faktoriem. Kā redzams attēlā 2.7 f, plāksnītes centrālās daļas forma praktiski ir pietuvojusies riņķa līnijai.

Jāatzīmē, ka variantam „e” ir laba prognozes sakritība ar faktisko rezultātu, kas iegūts risinot pilno modeli. Arī summārais nepieciešamais GEM pilnā uzdevuma aprēķinu skaits ir par 10 mazāks nekā homogenizācijas metodei.

Summāro pārvietojumu sadalījums optimālajai formai (variants „e”) ir parādīts att. 2.8.



2.8. att. Summārie pārvietojumi variantam „e”

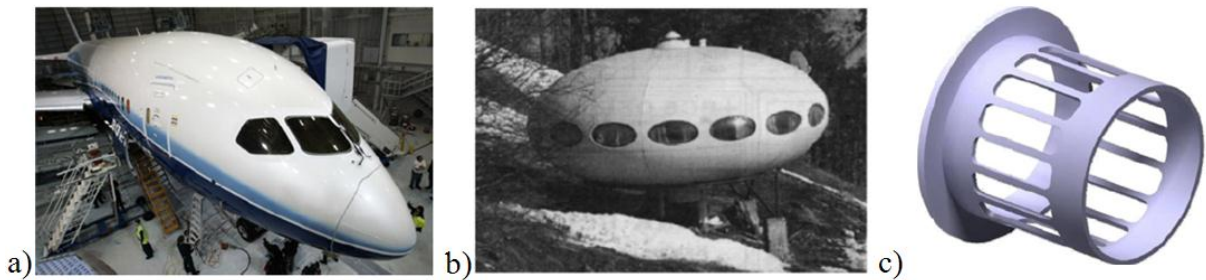
### 2.1. Tabula

Liekas plāksnītes izgriezuma formas kvantitatīvie rādītāji

Variants	$\alpha$	Aproximācijas SigmaCross [%]		Tilpums $V$ [ $\text{mm}^3$ ]		Tilpuma izmaiņas attiecībā pret variantu „a” [%]	
		$\delta$	$V$	Prognozējamais	Faktiskais	Prognozējamās	Faktiskās
a) Ar homogenizācijas metodi [Liang,2001]	-	-	-	-	68750.00	-	-
b) Punkti savienoti ar taisnēm	17	9.81	0.03	69414.78	69331.58	1	0.84
c) Ar NURBS mezgla punktiem	17	9.81	0.03	68988.67	68815.88	0.4	0.096
d) Ar NURBS daudzstūra atbalsta punktiem	15.6	9.81	0.03	68862.32	68721.98	0.16	-0.04
e) Optimizējot “d” variantam sākuma un beigu atbalsta punktu nepārtrauktības vektorus	3.2	0.79	0.16	67797.524	67800.975	-1.385	-1.38

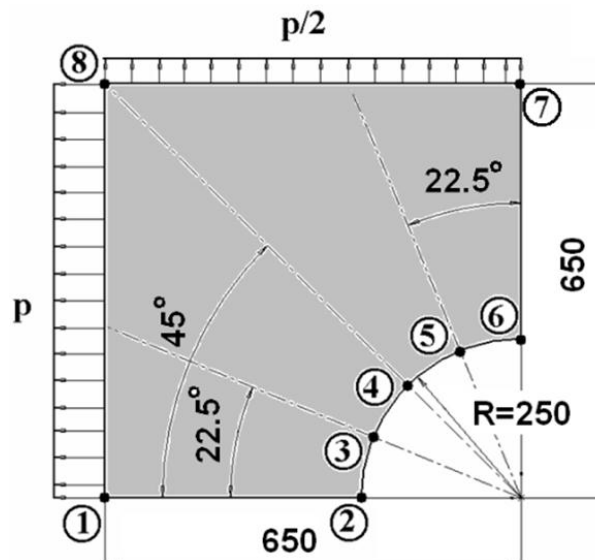
## 2.1.2. Stieptas plāksnītes izgriezuma formas optimizācija

Čaulveida konstrukcijas elementi, kuri pakļauti divasu stiepei tiek bieži izmantoti konstrukciju būvē (att. 2.9.). Parasti čaulveida paneļos veido izgriezumu, piemēram, lai samazinātu konstrukcijas svaru vai kādu citu apsvērumu dēļ. Izgriezuma forma ir svarīga, jo tajā var parādīties spriegumu koncentrāciju vietas. Darbā [Wang, 2012] tiek norādīts, ka kosmosa kuģu būvniecībā šī problēma ir īpaši aktuāla; iluminatoru forma, skaits, to izvietojums pie konstrukcijas uzdotās stiprības.



2.9. att. Čaulveida konstrukcijas elementu piemēri: a) B-787 lidmašīna [Wang, 2012]; b) Kafijas māja [Krivoshapko, 2007] un c) lidmašīnas dzinēja elements [Wang, 2012]

Stieptu dažādas konfigurācijas plāksnīšu formas optimizācijas uzdevumi parādās vairākos darbos [Peng, 2008, Wu, 2005; Hassani, 2011].

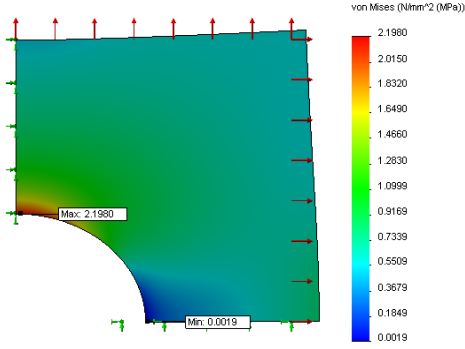
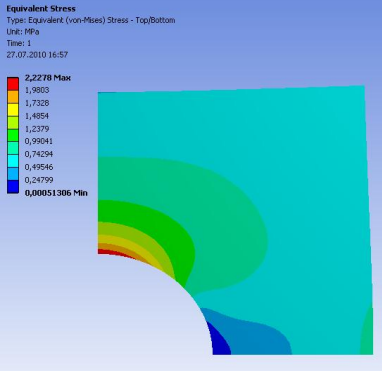
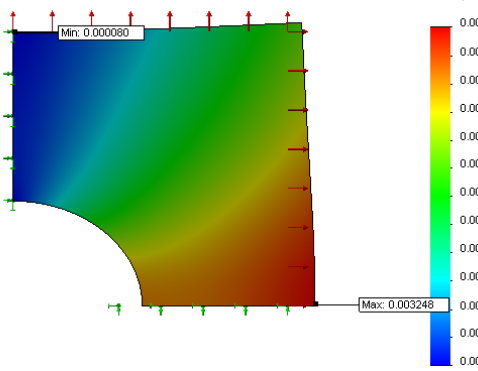
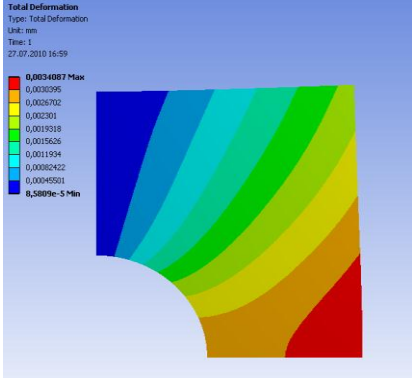


2.10. att. 1/4 plāksnītes aprēķinu shēma ar sākuma izgriezumu

Tāpēc par otru testa piemēru izvēlēta kvadrātiska plāksnīte – 1300x1300 mm ar biezumu  $b=0.001\text{mm}$  (att. 2.10.). Uz plāksnīti darbojas stiepes spēki divos virzienos. Vienā galā ir pielikta izkliedēta slodze  $p=0.65\text{ N/mm}^2$ , bet otrā - puse no tās  $p/2=0.325\text{ N/mm}^2$ . Tā kā plāksnīte un slogojums ir simetriski, tad tiek apskatīta tikai 1/4 no tās. Divām pārējām

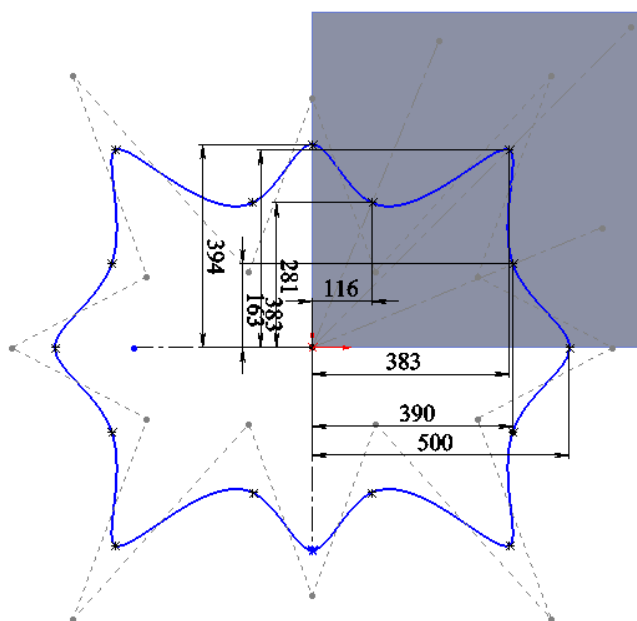
malām ir pielikti simetrijas robežnoteikumi. Plāksnītes materiāls ir izotrops ar elastības moduli  $E = 210 \text{ GPa}$  un Puasona koeficientu  $\mu = 0.3$ . Optimizācijas uzdevums ir minimizēt plāksnītes tilpumu pie ierobežojuma, ka maksimālie ekvivalentie spriegumi plāksnītes materiālā nedrīkst pārsniegt  $\sigma_{\max} = 4.38 \text{ N/mm}^2$ . Optimizācijas parametri ir koordinātes punktiem 2, 3, 4, 5 un 6, kuri nosaka izgriezuma formu. Tie ir izvietoti uz taisnēm, kuras veido attiecīgi 0; 22,5; 45; 67.5 un 90 grādu leņķi ar horizontālo asi. Par sākuma izgriezuma formu tiek pieņemta riņķa līnija ar rādiusu 250 mm, kas atbilst plāksnītes tilpumam  $v = 373,4 \text{ mm}^3$ .

2.2. Tabula  
Rezultātu salīdzinājums plāksnītei ar sākuma izgriezuma formu

SolidWorks	Ansys Workbench
a) Maksimālais ekvivalentais spriegums $\sigma_{\text{vonMises}}$ (Atšķirība no SW Simulation = 1.1 %), MPa	
2.198	2.2278
	
b) Summārais maksimālais pārvietojums - $URES$ (Atšķirība no SW Simulation = 5 %), mm	
0.003248	0.003409
	

Lai novērtētu SW Simulation GE programmatūras rezultātu precizitāti, tiek veikti analogiski GE papildus aprēķini ar Ansys Workbench plāksnītei ar sākuma izgriezuma rādiusu 250 mm. Tiek salīdzināti ekvivalentie Mizesa spriegumi  $\sigma_{\text{vonMises}}$  un summārie pārvietojumi  $URES$ , kā arī spriegumu un pārvietojumu sadalījuma raksturs plāksnītē ( tab. 2.2.

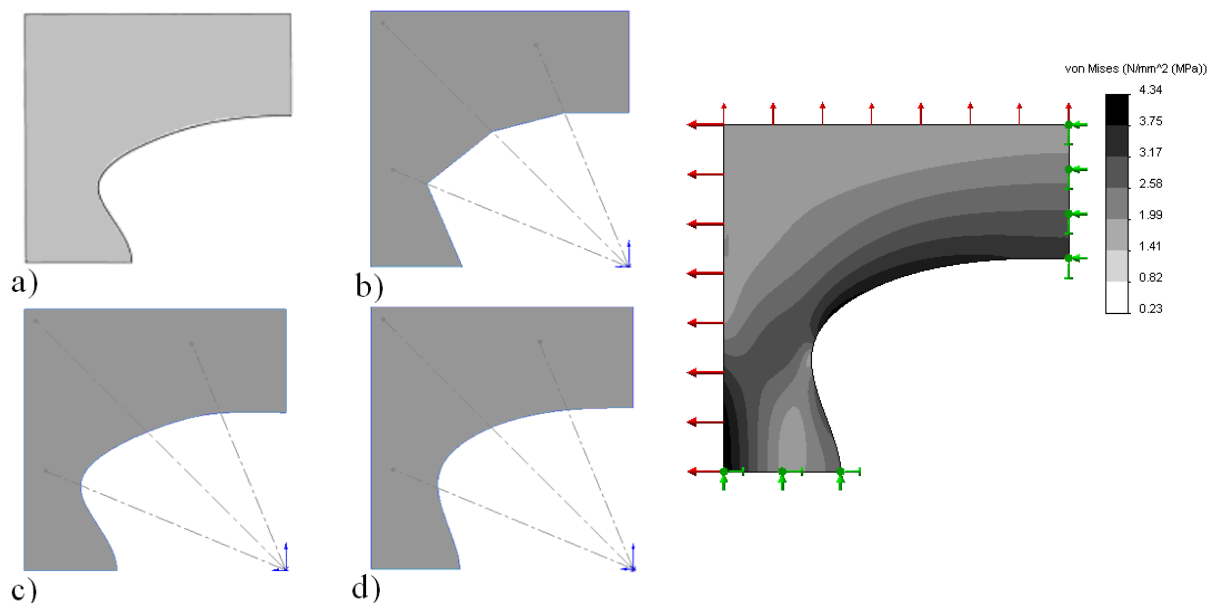
). Rezultāti parāda labu sakritību maksimālo un minimālo ekvivalento spriegumu punktu vietām ( tab. 2.2 a ) ), kā arī maksimāliem ekvivalentiem spriegumiem  $\sigma_{vonMises}$  - SW Simulation iegūts par 1.1% mazāka skaitliskā vērtība nekā ar Ansys Workbench. Ar abām programmām iegūtajiem pārvietojumiem *URES* ir līdzīgs raksturs ( tab. 2.2 b ) ). Maksimālajam rezultējošam pārvietojumam *URES* ir pietiekoši maza rezultātu atšķirība – 5 %. Tāpēc uzskatīsim, ka SW Simulation dod korektus rezultātus un var tikt izmantots tālākajiem GE aprēķiniem un optimizācijai.



2.11. att. Saslēgtais NURBS: tā simetrijas un nepārtrauktības īpašību izmantošana

Viens no iespējamiem variantiem, kā iegūt nepārtrauktu gludu NURBS līknes formu, ir izmantot saslēgtus NURBS. Piemēram, stieptas kvadrātiskas plāksnītes gadījumā (att. 2.11.) ir ņemts vērā simetriskais uzdevuma raksturs – pārvietojot vienu no 5 NURBS mezgla punktiem  $\frac{1}{4}$  plāksnītē, simetriski pārvietojas arī pārējie 3 punkti ārpus plāksnītes  $\frac{1}{4}$ , saglabājot saslēgta NURBS izgriezuma laukuma simetriju attiecībā pret abām simetrijas asīm. Par alternatīvu pieeju var uzskatīt nesaslēgta NURBS vektoru uzdošanu ar konstantēm, tā galējos punktus, nodrošinot  $\frac{1}{4}$  plāksnītes nepārtrauktību. Tomēr, jāņem vērā, ka mainot vektoru slīpumu var stipri mainīties NURBS līknes forma un līdz ar to ievērojami ierobežot pārējo NURBS mainīgo (mezgla un daudzstūra atbalsta punktu) nozīmīgumu NURBS līknes formas kontrolēšanai. Parasti NURBS līknes formas efektīvai kontrolēšanai jāmeklē kompromiss

starp mezgla vai daudzstūra atbalsta punktu un nepārtrauktības vektoru nozīmīgumu. Tāpēc simetriskām konstrukcijām formas uzdošanai labāk jāizmanto saslēgtus NURBS.



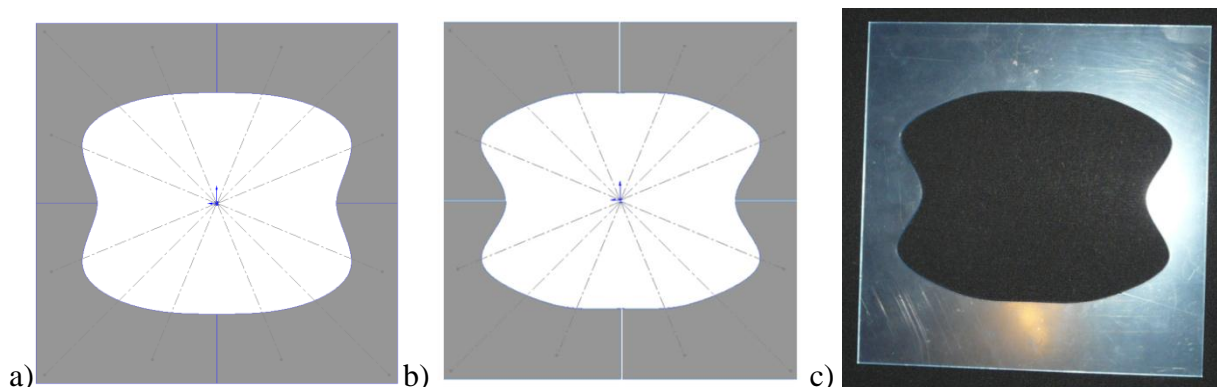
2.12. att. Iegūtās izgriezuma formas un ekvivalentā sprieguma sadalījums variantam „d”

Analoģiski, kā pirmajā testa uzdevumā, tiek ģenerēts latīņu hiperkuba eksperimenta plāns ar MSD kritērija vērtību 0.5394, tikai šajā gadījumā 5 mainīgajiem ar variēšanas diapazonu no 250 līdz 640 mm. Lai izveidotu atbilstošu metamodeļus, saskaņā ar šo plānu 112 dažādas formas plāksnītēm ir nepieciešams veikt pilnā GEM modeļa aprēķinus, kas tika realizēti ar SW Simulation programmatūru. Šajā gadījumā plāksnītes tīklošanai tika izmantoti trīsstūra čaulas elementi ar sešām brīvības pakāpēm katrā mezgla punktā. Sākotnēji tika veikti papildus aprēķini, lai noteiktu optimālo GE izmēru, ievērojot nepieciešamos laika resursu ierobežojumus un rezultātu precizitāti. Tālākajos aprēķinos tika izmantoti GE ar vidējoto šķautnes garumu 7.5 mm. Konstrukcijas atbilstošu metamodeļu būvēšana lokālo polinomiālo aproksimāciju veidā un optimizācijas uzdevumu risināšana tika veikta ar programmatūras EDAOpt palīdzību. Iegūtās izgriezuma formas, minimizējot plāksnītes tilpumu pie ierobežojuma uz maksimālo ekvivalento spriegumu  $\sigma_{\max} < 4.38 \text{ N/mm}^2$ , tiek salīdzinātas ar darbā [Papadrakakis, 1998] iegūto izgriezuma formu (att. 2.12.), un atbilstoši iegūtām formām kvantitatīvie aproksimācijas un optimizācijas rādītāji parādīti tabulā 2.3. Kā redzams no tabulas 2.3., vismazākais plāksnītes tilpums iegūts, pielietojot formas uzdošanas paņēmieni ar NURBS daudzstūra atbalsta punktiem. Salīdzinot ar darbā [Papadrakakis, 1998] iegūto rezultātu, plāksnītes tilpums ir samazināts par 10.5 %.

2.3. Tabula  
Stieptas plāksnītes izgriezuma formas kvantitatīvie rādītāji

Variants	$\alpha$	Aproximācijas SigmaCross [%]		Tilpums $V$ [mm <sup>3</sup> ]		Maksimālais $\sigma_{vonMises}$ [MPa]	
		$\sigma_{vonMises}$	$V$	Prognozējama	Faktiskais	Prognozējama	Faktiskais
a) Papadrakakis M., Lagaros N., Thierauf G., Cai J. [10]	-	-	-	-	280	-	4.38
b) Punkti savienoti ar taisnēm	8	48.73	0.00	255.93	255.84	4.38	5.22
c) Ar NURBS mezgla punktiem	12.6	47.48	2.27	251.76	251.38	4.38	4.35
d) Ar NURBS daudzstūra atbalsta punktiem	7.3	31.94	1.17	251.00	250.69	4.38	4.34

$\sigma_{vonMises}$  sadalījums optimālajai formai (variants „d”) ir parādīts att. 2.12., bet visas plāksnītes forma redzama att. 2.13a.



2.13. att. Ar NURBS izgrieztu formu salīdzinājums: a) optimālā forma stieptai plāksnītei un b) ar mezgla punktiem iegūtā un c) ar lāzera frēzēšanas CNC darbagaldu izgrieztais paraugs no organiskā stikla

Tālāk tiks veikta iegūto formas optimizācijas rezultātu validācija, veicot fizikālus eksperimentus. Lai izgatavotu eksperimentu paraugus, ir nepieciešams izgriezt NURB splaina kontūru no loksnes. To var izdarīt gan ar ūdens strūklu, gan ar lāzera vai plazmas griešanu. Galvenā problēma ir NURB splainu līknes izmantošana formas izgatavošanai no sagatavēm. Prakse parāda, ka dažādiem CNC darbagaldiem ir nepieciešami specifiski atšķirīgi 3D modeļu failu formāti. Kā viens no iespējamiem risinājumiem [Withrow, 2008] tiek piedāvāts eksportēt SW 3D modeļus vektoru grafikas \*.CDR formātā. Par šī formāta priekšrocību var minēt vieglu mērogošanu saglabājot modeļa formu un savienojamību ar vairums mūsdienu CNC darbagaldiem. Att. 2.13b parādīts iegūtais izgrieztais stieptas plāksnītes paraugs (variants „c”), kurš tiek realizēts ar CNC frēzēšanu. Paraugi raksturojas ar gludu formu un augstu precizitāti. Parādītā parauga materiāls ir organiskais stikls, bet ir iespējams izgriezt paraugus

arī no citām plastmasām un metāla biezumā līdz 20 mm. Tālāk izgatavošanai tika izmantota tieši šī izgriešanas tehnoloģija.

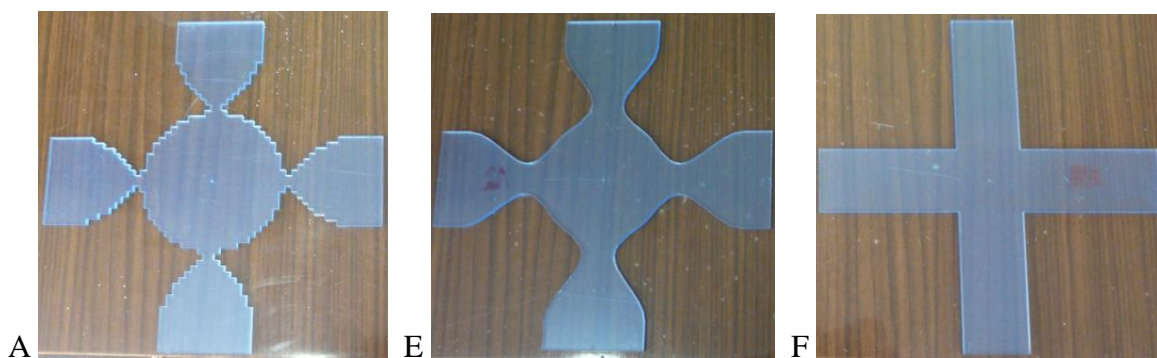
## 2.2. Liektas plāksnītes formas optimizācijas aprēķina rezultātu validācija ar fizikālajiem eksperimentiem

Lai pilnīgi pārliecinātos, ka uz datoraprēķiniem bāzētā metodika ir darbaspējīga un to var izmantot reālas konstrukcijas formas optimizācijai, veksim pirmā testa piemēra –liektas plāksnītes ar optimālo formu validāciju (att. 2.14.). Mēģināsim pierādīt, ka iegūtā forma ir optimāla arī reālajam fizikālajam paraugam.



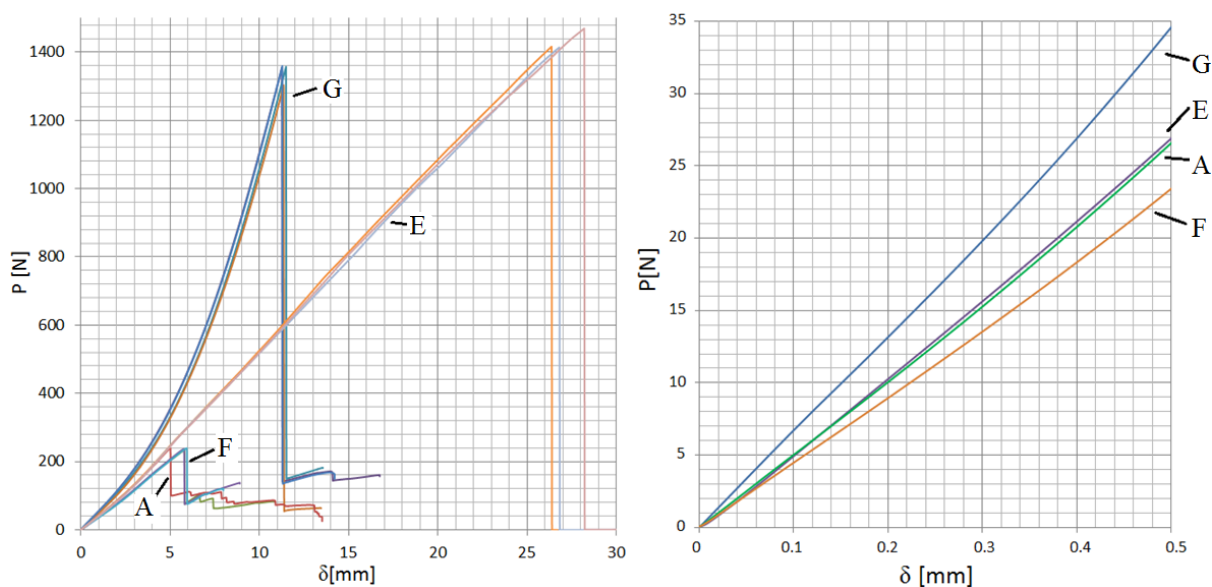
2.14. att. Fizikālie eksperimenti uz Zwick Roell Z 150 testēšanas mašīnas un plāksnītes piestiprinājuma konstrukcija

Eksperimentiem tika sagatavoti 13 paraugi (240x240x4 mm ar stiprinājumu galiem): A forma – 1 gab., E – 4 gab. , F – 4 gab. (att. 2.15.) un G – 4 gab. (kvadrātiska plāksnīte bez izgriezumiem). Paraugš A atbilst optimālai formai, kas iegūta ar homogenizācijas metodi [Liang, 2001] (att. 2.7a). Paraugš E atbilst ar darbā izstrādāto metodiku atrastā optimālās plāksnītes forma (att. 2.7e). Paraugš F ir ar vienkāršu krustveida formu, kura  $V$  tilpums ir vienāds ar parauga E tilpumu. Paraugš G ir kvadrātiska plāksnīte, kura izmantota papildus salīdzinājumam. Visu paraugu modeļi sagatavoti ar iepriekš minēto tehnoloģiju, proti, izgriezti no 4 mm bieza organiskā stikla Altuglas sertificētas loksnes [Altuglas], kuras mehānisko īpašību raksturojumi ir sekojoši:  $E= 1900 \text{ MPa}$  ( pie  $20^0 \text{ C}$ );  $\mu = 0.39$ ;  $\rho = 1190 \text{ kg/m}^3$ , kas izmantoti GE salīdzinošiem aprēķiniem.



2.15. att. Ar lāzera frēzēšanas CNC darba galdū izgriezti paraugi: ar homogenizācijas metodi atrastā liektās plāksnītes forma [Liang, 2001] (A), optimālā forma, kas iegūta ar izstrādāto metodiku (E) un grieķu krusts (F)

Visi paraugi tiek spiesti ar izvēlēto konstanto ātrumu 15 mm/min līdz sabrukšanai un tiek piefiksēts spēks  $P$  un pārvietojumi  $\delta$ . Uz Zwick Roell Z 150 mašīnas, atkarībā no parauga noslodzes laika, tiek piefiksēti 1000-6000 datu punktu. Tas ļauj izveidot precīzas paraugu spiešanas diagrammas (att. 2.16.). Mūsu gadījumā, galvenokārt, interesē maksimālie pārvietojumi paraugu elastīgo deformāciju robežās, lai tos varētu salīdzināt ar GEM iegūtajiem rezultātiem.

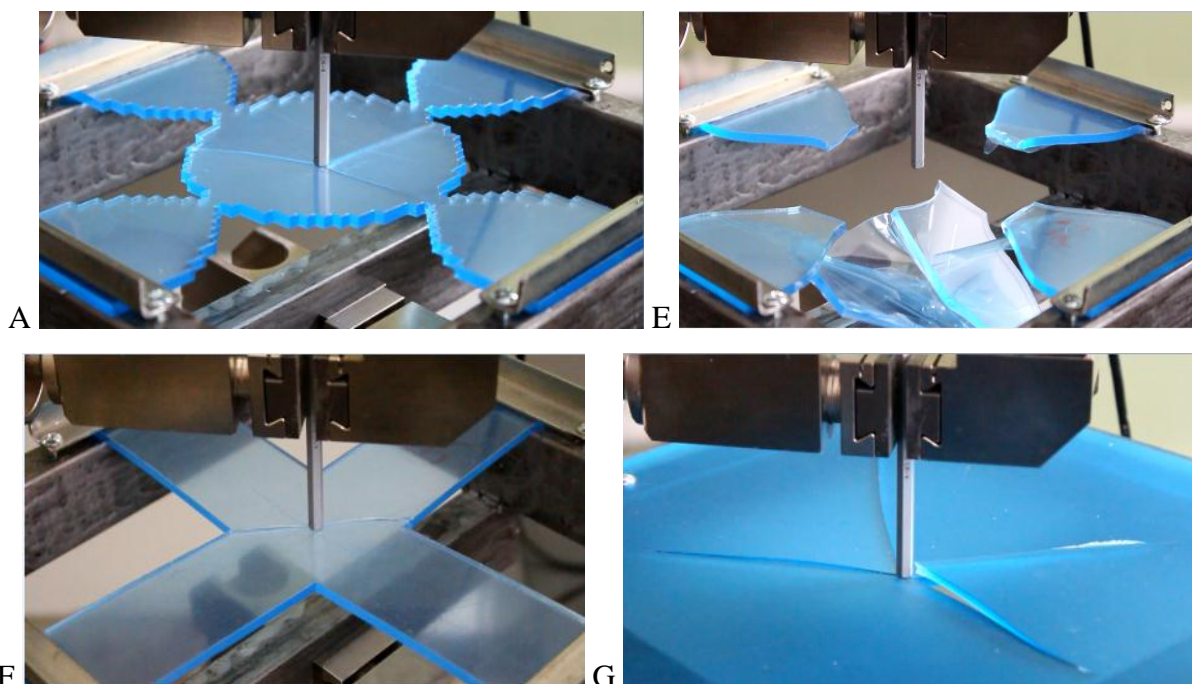


2.16. att. Paraugu sagraušanas līknes (pa kreisi) un aprēķinātās vidējo vērtību ( $V_{id}$ ) līknes katram paraugam (pa labi)

Eksperimenta laikā paraugi tika slogoti līdz sagraušanai. Varam novērot paraugu sagraušanas īpatnības att. 2.17. Atkārtotie eksperimenti parādīja, ka plaisas veidošanās īpatnības paraugos saglabājas. Tika iegūts, ka stiprākie paraugi ir E, kuri var izturēt  $P_{vid}=1433.46$  N, par 6.2% lielāku slodzi nekā pilnas kvadrātiskas plāksnītes G (att. 2.16. un

tab. 2.4.), jāņem vērā to, ka parauga E tilpums  $V$  ir 2.36 reizes mazāks. Paraugam G ir lielāks stingums un tā sagraušanas brīdī pārvietojums  $\delta$  ir par 58.1% mazāks. Tika novērots, ka visos četros G paraugos sabrūkot izveidojās 4 simetriskas plaisas, bet pie stiprinājumiem materiāls palika nebojāts. Raksturīgā krustveida plaisas forma ap plāksnītes centru ir redzama att. 2.17G. Paraugam E sabrukšanas raksturs ir pilnīgi cits, jo spriegumi vienmērīgi sadalās pa visu plāksnīti. Rezultātā sabrukšana notiek sprādziena veidā: plāksnītes centrālajai daļai sadaloties mazos gabaliņos. Visos atkārtotajos eksperimentos E paraugu malas palika nebojātas. F paraugi visos eksperimentos sabruka, veidojot plaisu pa diagonāli (att. 2.17F). Tas izskaidrojams ar to, ka F taisnstūra leņķu virsotnēs ir spriegumu koncentratori. Sākumā šķita, ka parauga A sabrukšanai jānotiek pa minimālo šķērsriezuma laukumu (att. 2.17A). Tomēr šajā gadījumā spriegumu koncentratoru un minimālo šķērsriezuma laukumu kopējā ietekme uz sabrukšanu netiek novērota. Parauga A sabrukšana noris ar citu raksturu: veidojot trīs apmēram simetriskas plaisas no centra. Paraugu A un F stiprība ir apmēram vienādā līmenī.

Izmantojot eksperimentos piefiksētos datus, tiek sarēķinātas vidējo vērtību līknes katram paraugam (att. 2.16. (pa labi)). Tā kā paraugiem E un F ir vienāds tilpums  $V$ , tad ir acīmredzams ieguvums no optimāla materiāla sadalījuma. Iegūts, ka optimālās plāksnītes E stingums ir lielāks par F  $\sim 11.3\%$  līdz paraugu izliecei  $\delta = 2.2$  mm. Parauga A stingums ir līdzīgs parauga E stingumam.

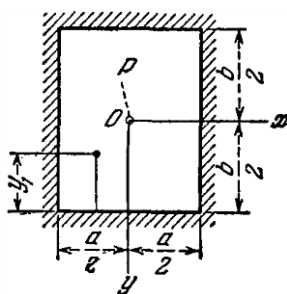


2.17. att. Paraugi pēc sabrukšanas

2.4. Tabula  
Eksperimentu rezultātu apkopojums

Paraugs	A	E	F	G
Tilpums, mm <sup>3</sup>	68750	67800	67800	160000
Vidējā stiprība, N	240.149	1433.46	235.39	1343.91
Relatīvā stiprība pret E, %	16.8	-	16.4	93.8
Maksimālā vidējā izliece $\delta$ , mm	5.02	27.12	5.81	11.35

Iepriekš atrasto optimālās formas plāksnīti (paraugs E) nevar aprēķināt analītiski. Tāpēc sākumā pārbaudīsim eksperimentu kvalitāti ar pilnās kvadrātiskās plāksnītes G aprēķiniem. Veiksim plāksnītes G analītisko un GEM aprēķinu, lai tālāk salīdzinātu rezultātus ar fizikālajiem eksperimentiem.



2.18. att. Liektas nekustīgi piestiprinātas plāksnītes shēma [Тимошенко, 1966]

Gadījumā, kad spēks  $P$  ir pielikts perpendikulāri plāksnītes centrā (att. 2.18.), plāksnītes izlieci var aprakstīt ar izteiksmi [Тимошенко, 1966], kad  $y > 0$ :

$$\delta = \frac{Pa^2}{D} \kappa, \quad (2.5)$$

kur  $a$  - vienas malas izmērs;  $D$  - plāksnītes stingums, kurš aprakstīts ar sekojošo sakarību:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \quad (2.6)$$

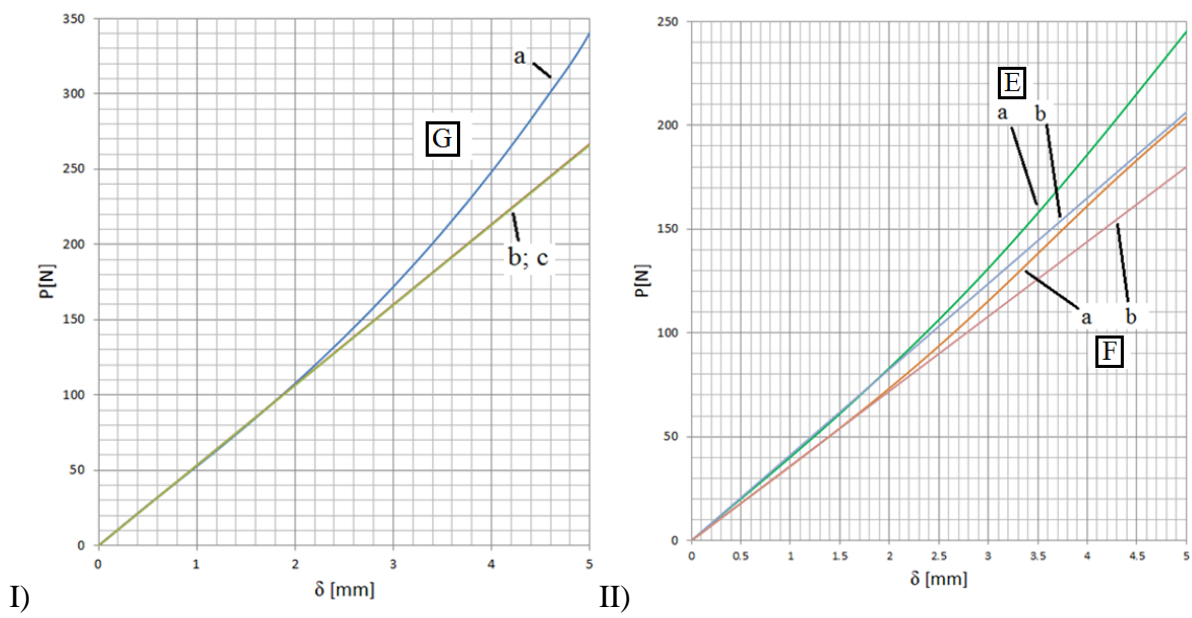
kur  $h$  - plāksnītes biezums un  $\delta$  izliektai virsmai apraksta ar  $k$ :

$$k = \frac{1}{2\pi^3} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^3} \cos \frac{n\pi x}{a} \left[ \left( tha_n - \frac{a_n}{ch^2 a_n} \right) ch \frac{n\pi y}{a} - sh \frac{n\pi y}{a} - tha_n sh \frac{n\pi y}{a} + \frac{n\pi y}{a} ch \frac{n\pi y}{a} \right], \quad (2.7)$$

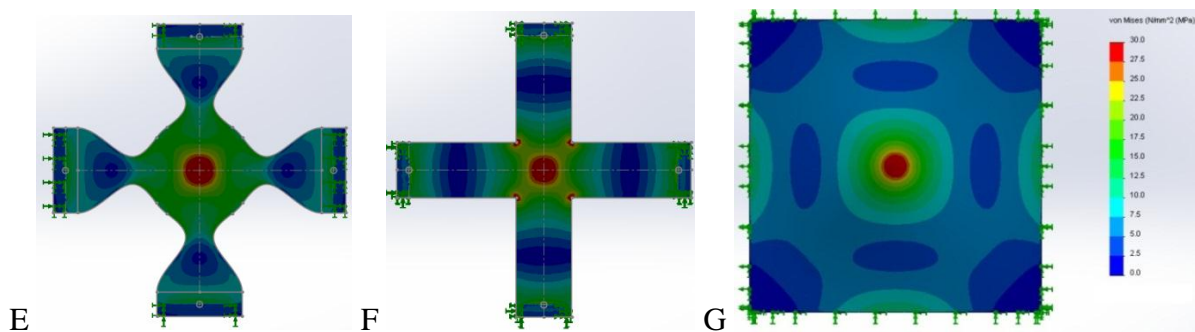
kur  $n$  - veseli nepāru skaitļi;  $y$  un  $x$  koordinātes (att. 2.18).

Fizikālo eksperimentu, GEM un analītisko rezultātu salīdzinājums paraugiem G tiek parādīts att. 2.19(I). Iegūta laba sakritība elastīgo deformāciju sākuma posmā (apmēram līdz 2.2 mm) visām 3 līknēm. GE modelis un analītiskais modelis sakrita 0.2 % kļūdas robežās. Šī nelielā kļūda visticamāk ir izskaidrojama ar GE tīkla diskretizācijas precizitāti.

Līdzīgi, paraugiem (E un F) izveidotie GEM modeli un rezultāti salīdzināti att. 2.19(II). Novērota līdzīga paraugam G sakritība sākumā noslodzes posmā līdz 2.2 mm. Tad starpība starp paraugu E un F līknēm uzskatīta par stinguma ieguvumu no optimālas formas. Līdz ar to tika apstiprināts, ka optimizācijas aprēķinu rezultātā iegūtajai plāksnītei (att. 2.7e) ir optimālais materiāla sadalījums.



2.19. att. Līknes, kas iegūtas, aprēķinot vidējo aritmētisko no eksperimentu datiem un ar izveidotiem lineāriem modeļiem: I) paraugam G: a- eksperiments; b – GE un c – analītiskais; II) paraugiem E un F: a- eksperiments; b- GE



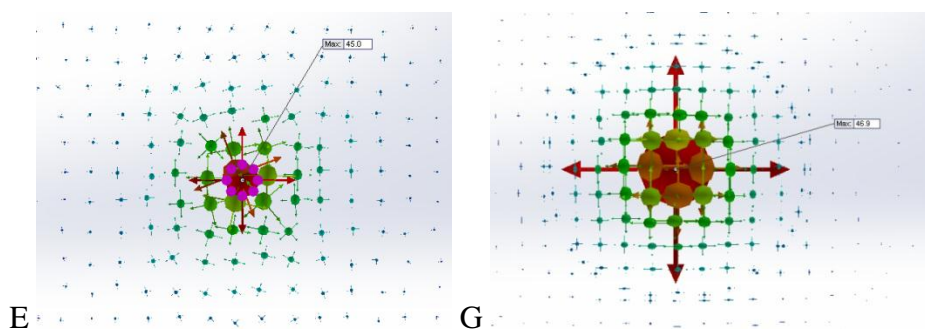
2.20. att. Ekvivalento spriegumu sadalījums paraugos

Ekvivalentie spriegumi paraugos E, F un G ir parādīti att. 2.20. Varam novērot, ka optimālā E paraugā vidējo ekvivalento spriegumu zonas (zaļa krāsa) ir vislielākās, līdz ar to, spriegumu sadalījums ir vienmērīgs, salīdzinājumā ar pārējiem paraugiem. Pie tam, paraugiem E vairāk noslogota ir centrāla daļa, kura sabruka pie eksperimentiem (att. 2.17E). Paraugam F novērojamas spriegumu koncentrācijas zonas pie taisnleņķa izgriezumu virsotnēm, kur eksperimentu laikā izveidojās plaisas (att. 2.17F). Visos paraugos ir redzama izteikta riņķveida spriegumu koncentrācija ap punktveida spēka pielikšanas vietu. Pie eksperimentiem paraugos G plaisas tiešām veidojas no nosprīgotā centra (att. 2.17G). Līdzīgi kā pie eksperimentiem, netiek novērota spriegumu koncentrācija pie stiprinājumu vietām.

Tālāk mēģināsim parādīt ar GEM, ka fizikālajos eksperimentos iegūtā vidējā stiprība paraugam E vidēji par 6.2 % ir lielāka par pilno plāksnīti G. GEM un eksperimentu rezultāti salīdzināti tabulā 2.5. Lai novērtētu GEM precizitāti, tika izmantoti 2 aprēķinu modeļi ar 1) 2. kārtas tetraedru GE un 2) čaulas GE. Tika iegūts, ka parauga E maksimālie ekvivalentie spriegumi ir mazāki par spriegumiem pilnai plāksnītei G, kuras tilpums ir 2.36 reizes lielāks (tab. 2.4.). Līdz ar to apstiprinās eksperimentu rezultāti, ka E paraugi var izturēt lielāku slodzi. Lai izskaidrotu šo rezultātu fiziku, izveidotas galveno spriegumu diagrammas (att. 2.22.). Varam redzēt, ka stiepes spriegumu virzieni paraugā G nemainās attālinātos no centra. Cits raksturs ir paraugam E: stiepes spriegumu virzieni mainās un nav taisnvirziena plaisu veidošanās tendences.

2.5. Tabula  
Plāksnīšu E un G stiprība

	GEM		Eksperimenti
	2. kārtas tetraedru elementu modelis	Čaulas elementu modelis	
Paraugs	Maksimālie ekvivalentie spriegumi [MPa]		
E	45	45	-
G	48.3	46.9	-
Parauga E stiprība lielāka par G	6.8%	4.1%	6.2% (vidēji)



2.22. att. Čaulas GEM. Galveno spriegumu virzieni paraugu E un G centrā

## NODAĻAS SECINĀJUMI

- Veiktie divu testa uzdevumu aprēķini parādīja, ka izstrādātā formas optimizācijas metodika ir darbaspējīga un tai ir tālākas attīstības perspektīvas.
- No apskatītajiem formas uzdošanas paņēmieniem vislabākos rezultātus dod NURBS daudzstūra atbalsta punktu izmantošana.
- Stieptas plāksnītes SW Simulation un Ansys programmatūras GE salīdzinošie aprēķini parādīja labu rezultātu sakritību.
- Salīdzinot ar klasisko homogenizācijas metodi, izstrādātā metodika ir ar mazāku darbietilpību un vienlaicīgi ļauj iegūt labākus rezultātus (1.38% liektai un 10.5 % stieptai plāksnītei).
- Ar fizikāliem eksperimentiem pierādīts, ka ar izstrādāto formas optimizācijas metodiku iegūtai liektai plāksnītei piemīt izteiktas optimālas īpašības. Fizikālo eksperimentu rezultāti parādīja labu sakritību gan ar GEM, gan ar analītisko modeļu rezultātiem apskatāmo formu konstrukcijām.
- Ņemot vērā augstāk minēto, tiek secināts, ka doto metodiku var pielietot reālu objektu elementu formas optimizācijai.

### 3. VAGONA MĒRĪŠANAS SISTĒMAS ELEMENTU KONSTRUKTĪVĀS FORMAS OPTIMIZĀCIJA

Šajā nodaļā tiek parādīts praktisks piemērs izstrādātās metodikas pielietojumam. Balstoties uz iepriekš testa piemēros atstrādāto metodiku, veiksīm reāla industriāla objekta formas optimizāciju. Dotā problēma ir saņemta no SIA “Baltijas Testēšanas centrs”.

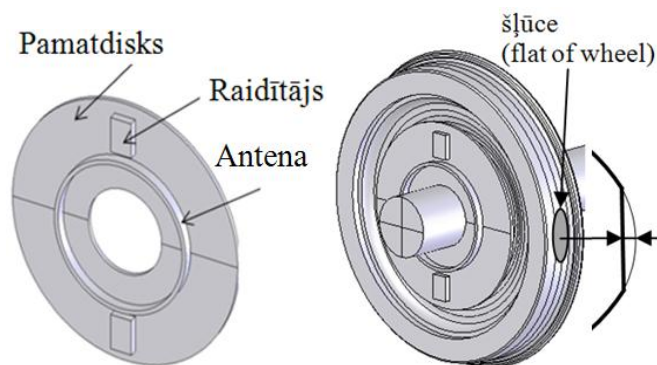
#### 3.1. Ievads

Mūsdienās sistēmas riteņpāris – sliede monitoringam izmanto speciālus tenzometriskos riteņpārus. Katram ritošā sastāva pārbaudāmās vienības tipam (elektrovilciens, dīzeļvilciena vagoni vai lokomotīve) jāizgatavo speciālu tenzometrisko riteņpāri, jo ir nepieciešama atbilstība pēc diametra (riteņa velšanās virsmas nodilums) un pēc nostiprināšanas veida (bukses mezgla konstrukcija). Speciālu tenzometrisko riteņpāru izmantošana un piegāde uz izmēģinājumu vietu prasa ievērojamus materiālos izdevumus, kā arī palielina gaitas dinamisko un stiprības izmēģinājumu sagatavošanas laiku.

Lai vienkāršotu izmēģinājumu sagatavošanu, SIA “Baltijas Testēšanas centrs” piedāvā tenzometriskā riteņpāra vietā izmantot uz ritošā sastāva jau esošo (štata) riteņpāri. Uz štata riteņpāra ass tiek piedāvāts nostiprināt maināmu (uzliekamu un noņemamu) aprīkojumu, uz kura savukārt uzmontēta bezvadu mērīšanas un datu pārraides sistēma ar antenu.

Par sākuma variantu ir pieņemts noņemamais disks ar mērīšanas aparatūru (att. 3.1.), kas paredzēts 80 tonnu vagona riteņpārim. Noņemamais disks ir ar taisnstūra šķērsriezumu un tas tiek nostiprināts uz riteņpāra ass riteņa diska ārpusē. Savukārt, uz noņemamā diska ārējās virsmas ir nostiprināti divi raidītāji ar paralēlskaldņa formu un izmēriem 20x55x80 mm un katrs ar masu 0.1 kg. Mērīšanas kompleksa raidītāju barošanai un datu pārraidei tiek izmantota magnētiskā rāmja antena. Magnētiskās antenas rāmis ir 10 mm plata folija plāksne, kas piestiprināta pie noņemamā diska uz tekstolīta pamatnes. Magnētiskās rāmja antenas apraksts un darbības princips dots darbā [Григоров, 2005].

Vagona kustības ātrums izmēģinājumu laikā var sasniegt 200 km/st. Slodzes no tādiem ceļa negludumiem kā sliekšņu salaidumi un sliekšņu pārmijas, kā arī no riteņpāru formas defektiem (šļūces) [Сладковский, 2008] tiek nodotas uz riteņpāri un noņemamo disku, kas cieši nostiprināts uz riteņpāra ass, var būt ievērojamas. Tāpēc, lai nodrošinātu mērīšanas sistēmas noņemamā aprīkojuma drošu ekspluatāciju, ir nepieciešams veikt noņemamā diska stiprības novērtējuma aprēķinus, kā arī veikt diska formas optimizāciju.



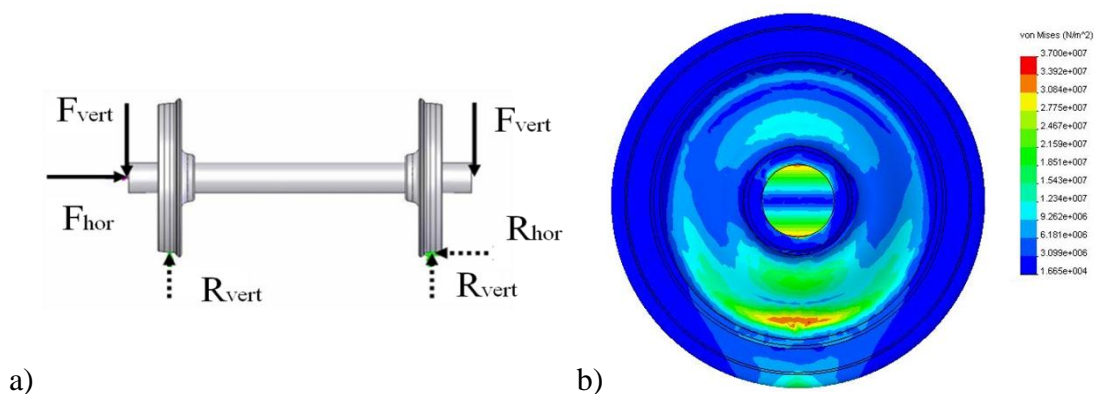
3.1. att. Noņemamais disks ar mērīšanas aparāturu un tā uzstādīšanas vieta

## 3.2. Riteņpāra slodzes

Vispirms jāatrod zonas riteņpāra ar lielākiem spriegumiem un jāpamato devēju uzlikšanas vietas. Tad jādefinē lielākās slodzes, kuras darbojas no riteņa pāra uz noņemamo aparāturu.

### 3.2.1. Spriegumu sadalījums

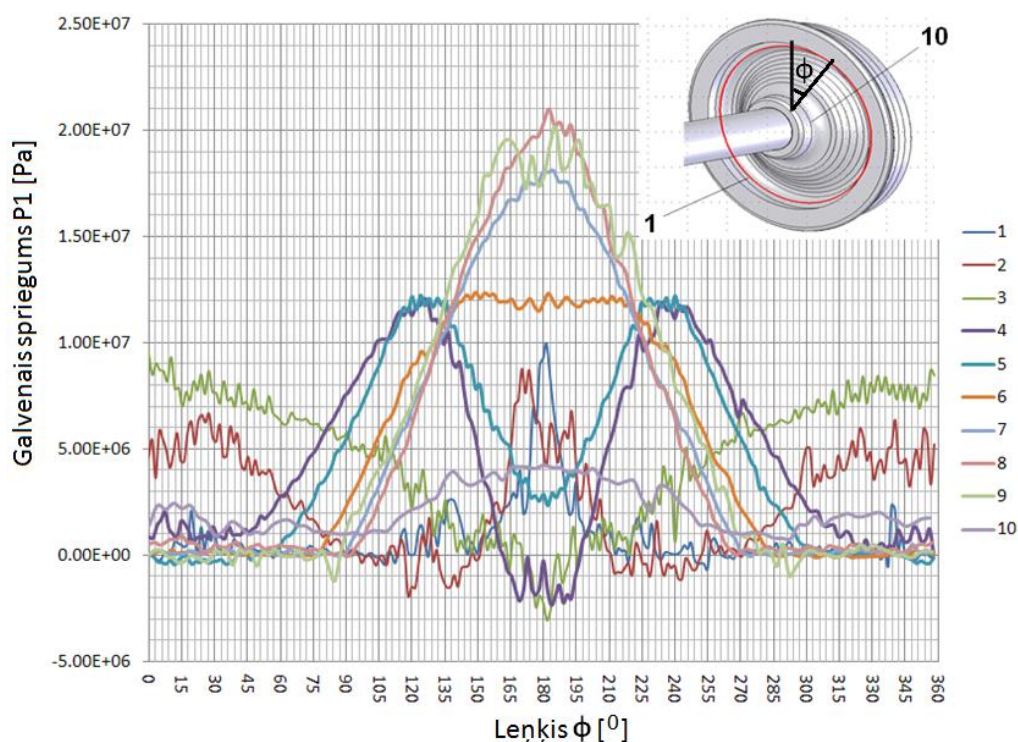
Visi stiprības aprēķini tiek realizēti ar SW Simulation. Sākumā tiek meklētas ar GEM nospriegotākās zonas riteņpārī. Atrasts spriegumu sadalījums riteņpārī, tiek definētas vietas, kur vajadzētu likt devējus. Tad tiek rēķināts statikas stiprības uzdevums (att. 3.2a). Kravas vagona riteņpāra ass pakļauta slodzei no 80 tonnu smaga vagona. Tiek pieņemts, ka uz vienu riteņpāri darbojas spēki 10 t vertikālā un 1 t horizontālā virzienā.



3.2. att. Vagona slodzes uz riteņpāri un aprēķinātie ekvivalentie  $\sigma_{vonMises}$  spriegumi riteņī

Ekvivalento spriegumu  $\sigma_{vonMises}$  sadalījums ir parādīts att. 3.1b. Ar sarkano krāsu iekrāsotā ir zona ar maksimālo nospiegumu. Jāņem vērā arī to, ka riteņa šķērsriezuma

laukums ir mainīgs, kā parādīts att. 3.8b. Lai iegūtu detalizētākus rezultātus, riteņa virsma tiek sadalīta ar 10 riņķa līnijām (att. 3.3.) - pirmais riņķa līnijas rādiuss ir vismazākais un aploce atrodas vistuvāk riteņpāra asij, bet desmitā atrodas attiecīgi uz riteņa kontaktpvirsmas ar sliedi. Katra rādiusa aplocē tiek atrasti galvenie spriegumi  $P1$ , rezultāti tiek piefiksēti pa parametrisko distanci-lenķi  $\phi$  att. 3.3. Ir redzams, ka lielākie spriegumi parādās uz otrā rādiusa aploces. To var izskaidrot ar to, ka šajā vietā riteņa šķērsriezuma laukums ir minimāls. Uzskatīsim šo rādiusu par būtisku – projektējamai mērīšanas sistēmai obligāti jānodrošina spriegumu kontrole šajā vietā.



3.3. att. Spriegumu vērtības riteņa pāri pie vagona vertikālas slodzes: 10 aploces uz riteņa un galveno spriegumu  $P1$  vērtības katra rādiusa aplocē pa parametrisko distanci -  $\phi$

### 3.2.2. Slodzes uz noņemamo aparatūru

Mērīšanas sistēmas noņemamā diska konstrukcijas aprēķini tiek veikti, ņemot vērā maksimālās iespējamās ekspluatācijas slodzes. Maksimālās slodzes darbojas vertikālā virzienā un veidojas sliedes un riteņa (šļūce) negludumu dēļ. Pie kam, noņemamais disks uzņem atbilstošās riteņpāra slodzes, jo ir cieši nostiprināts uz riteņpāra ass.

Maksimālo slodžu vertikālā virzienā veidošanās nosacījumi piekrauta vai tukša vagona gadījumā ir atšķirīgi. 3.1. tabulā parādīts ka maksimālās slodzes riteņpāros ar šļūci ap 2 mm dziļumā veidojas pie maziem kustības ātrumiem [Сладковский, 2008].

3.1. Tabula  
Slodzes atkarībā no vagona kustības ātruma

Vagona ātrums m/s	Maksimālā spēka lielums trieciena momentā, kN	
	Tukšs vagonš	Piekrauts vagonš
Statiskā slodze	22.8	104.5
1	136.1	251.3
2	170.2	316.4
5	297.8	367.2
10	271.3	620.6
20	276.6	604.9

Maksimālās slodzes uz riteņpāri tukša vagona gadījumā veidojas pie kustības ātruma 5 m/sek, bet piekrauta vagona gadījumā – pie ātruma 10 m/sek.

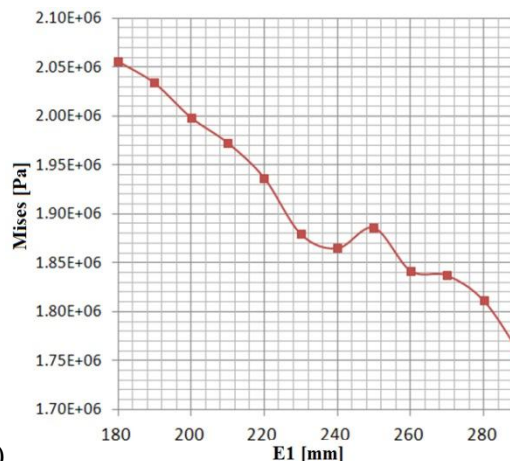
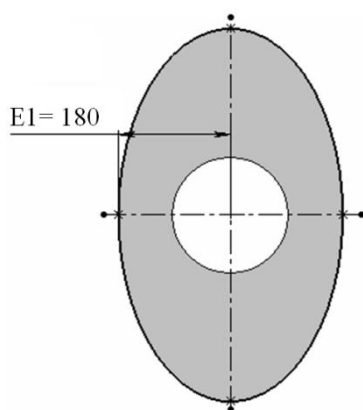
Variantu aprēķini tika veikti maksimālai vertikālai slodzei 620.6 kN piekrautam vagonam pie horizontālas un vertikālas noņemamā diska raidītāju orientācijām. Jāatzīmē, ka riteņpāra paātrinājums var sasniegt 12 g.

Rēķinot stiprību atkarībā no griešanās slodzēm ir pieņemts, ka riteņa disks ir jauns (nodilums pa rites apli ir minimāls), kravas vagona maksimālais kustības ātrums ir līdz 200 km/st, turklāt riteņpāra griešanās leņķiskais ātrums ir 116.98 rad/s.

Lai novērtētu frekvenču raksturojumus un atklātu iespējamo rezonanses mijiedarbību starp noņemamo disku un riteņpāri, ir veikti frekvenču aprēķini. Rezultāti parādīja, ka ierosmes frekvences pie ekspluatācijas apstākļiem ir daudzkārt zemākas par mērīšanas sistēmas fundamentālo pašsvārstības frekvenci.

### 3.3. Diska stiprības aprēķinu modelis

Diska ģeometriskais 3D modelis tika izveidots ar programmas SW palīdzību. Tiek ņemts vērā diska un raidītāju (izmēri 20x55x80 mm, masa  $m=0.1$  kg) forma, izmēri un to materiāli. Raidītāju antena ir noņemta no aprēķinu modeļa (att. 3.3.), jo tai ir nelieli izmēri un viegls materiāls. Aprēķinu modelis neievēro diska savienošanas elementus un urbumus tajā. Raidītāju antena strādā stabili, ja pārvietojums ekspluatācijas apstākļos aksiālā virzienā nepārsniedz 2 mm [Григоров, 2005]. Šis ierobežojums tiek ņemts vērā nākamajos aprēķinos.



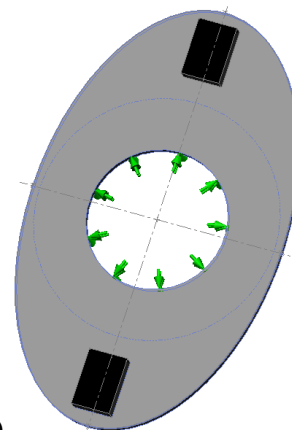
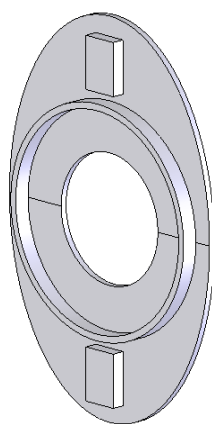
a)

b)

3.4. att. Diska izmēra optimizācija a) Eliptisks disks; b)  $\sigma_{vonMises}$  atkarībā no E1 izmēra

Lai izveidotu kvalitatīvu GE tīklojumu, tika izmantoti otrās kārtas telpiskie tetraedra elementi. Izmantotajiem galīgajiem elementiem katrā mezglā ir trīs brīvības pakāpes. Noņemamā diska GE modelim ir ap 51000 elementu un 258000 brīvības pakāpes ( att. 3.5b).

Sākumā noņemamais disks (rādiuss R= 300 mm, biezums = 10mm) tiek pārveidots par eliptisko disku ar lielo pusasi 300 mm un mazo pusasi E1 (att. 3.4a), izmantojot viena parametra - izmēra E1 optimizāciju pie ierobežojuma  $\sigma_{vonMises} < 2.05$  MPa (att. 3.4b). Šī forma tiek pieņemta par sākuma diska konstrukciju.



a)

b)

c)

3.5. att. a) Eliptisks disks; b) GE modelis; c) Diska stiprināšana

Noņemamais disks ir nekustīgi piestiprināts uz cilindriskas virsmas (att. 3.5c) - tā tiek uzskatīta par nedeformējamo riteņpāra asi. Diska materiāls ir alumīnija sakausējums (1060 H12) ar elastības moduli  $E= 69000$  MPa, Puasona koeficientu  $\mu= 0.33$ , blīvumu  $\rho = 2700$  kg/m<sup>3</sup> un tecēšanas robežu  $\sigma_y = 27.5742$  MPa.

Materiāla noguruma stiprība aprēķināta pēc rekomendācijām, kas dotas darbā [Нормы расчета, 1996]:

$$\sigma_{-1} = 0.4 \cdot \sigma_y \quad (3.1)$$

Spriegumiem diskā jābūt mazākiem par  $\sigma_{-1} = 11.0297 \text{ MPa}$ . Papildus tiek ievests drošības koeficients = 2.75, kas paredzēts atbilstošajos normatīvos [Нормы расчета, 1996]. Līdz ar to pieļaujamie spriegumi diska materiālā samazināti līdz  $\sigma_{\max} = 4 \text{ MPa}$ . Visos gadījumos izmantots Mizesa  $\sigma_{\text{vonMises}}$  stiprības kritērijs:

$$\sigma_{\text{vonMises}} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}}; \quad (3.2)$$

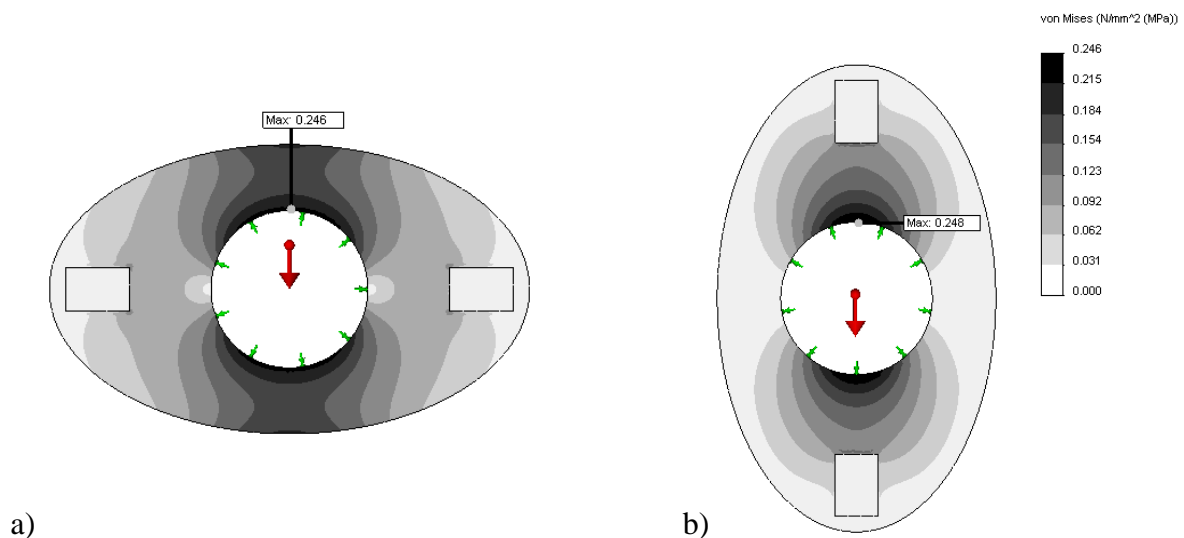
kur  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  ir galvenie spriegumi.

Līdz ar to  $\sigma_{\text{vonMises}}$  jebkurā diska punktā ir jābūt mazākiem par pieļaujamiem:

$$\sigma_{\text{vonMises}} < \sigma_{\max} \quad (3.3)$$

### 3.4. Spriegumi diska sākotnējā konstrukcijā

Tiek pētīti diska trīs noslodzes varianti: slodzes, kuras rodas no riteņa šļūces pie diska vertikālas un horizontālas galvenās elipses ass orientācijas, kā arī no centrālās spēkiem.



3.6. att.  $\sigma_{\text{vonMises}}$  sadalījums diska ar sākuma konstrukciju: a) pie horizontālas un b) vertikālas orientācijas

Apskatīts variants, kad piekrauts vagonš brauc trieciena brīdī ar ātrumu 10 m/s (tab. 3.1. ). Maksimālie spriegumi trieciena brīdī (no paātrinājuma  $a = 119.3 \text{ m/s}^2$ ) ir parādīti att. 3.6. Kā redzams, maksimālās ekvivalento spriegumu  $\sigma_{vonMises}$  vērtības pie abām diska orientācijām atšķiras pavisam nedaudz.

Iegūtie spriegumu līmeņi un pārvietojumi eliptiskā diska sākuma konstrukcijai no centrālās spēku slodzes parādīti att. 3.10. Šie rezultāti parāda, ka spriegumi diskā no centrālās spēkiem ir ~12 reizes lielāki nekā no riteņa šļūces.

### 3.5. Eliptiskā diska šķērsriezuma formas optimizācija

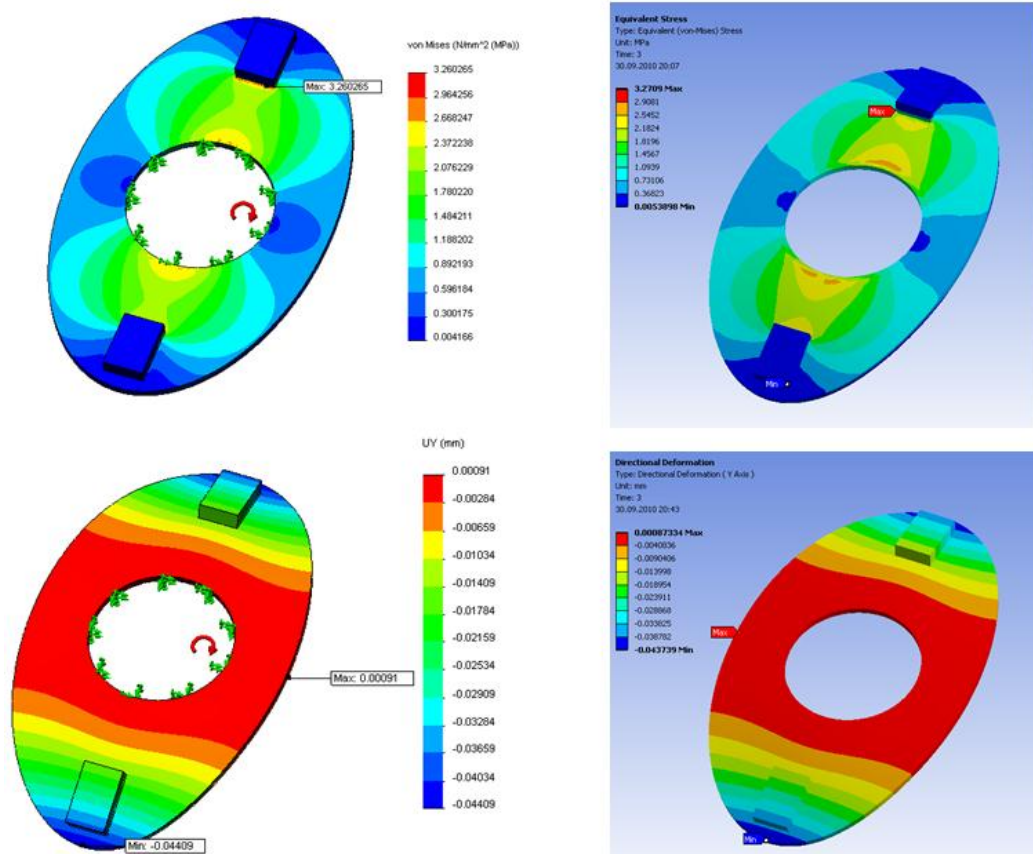
Tālāk izmantosim izstrādāto formas optimizācijas metodiku, lai nodrošinātu eliptiskajam diskam minimālu masu un līdz ar to vismazākos iespējamus mērījumu kropļojumus. Aprēķinos ievērosim tikai lielākās slodzes, ko rada centrālās spēki. Lai pārbaudītu, ka SW Simulation dod pietiekoši precīzus rezultātus un tos var izmantot optimizācijai, tas pats uzdevums eliptiskam diskam ar sākuma formu tiek rēķināts arī ar GE programmatūru ANSYS [Moaveni, 2007]. SW izveidotais 3D modelis tiek importēts ANSYS vidē, kur izveidots pēc iespējas tuvs tetraedru GE tīkls. Aprēķinātie ekvivalentie spriegumi  $\sigma_{vonMises}$  un pārvietojumi *URES* ir parādīti att. 3.7. ANSYS rezultāti dod labu sakritību: ar SW Simulation –  $\sigma_{vonMises}$  maksimālo vērtību atšķirība – 0.3 %, bet *URES* – 0.8 %. Tālākajiem optimizācijas aprēķiniem tiek izmantota SW Simulation programmatūra.

Projektējamā diska iespējamā izvietojuma vieta ir stingri ierobežota kā no riteņa puses, tā arī no otras - ārējās puses, īpaši lokomotīves riteņpāra gadījumā (att. 3.8.). Ierobežojumi atļauj mainīt diska šķērsriezumu tikai no riteņa puses, bet pie ārējās puses nepieciešams vēl izvietot raidīšanas antenu, turklāt diska rādiusa intervālā no 150 mm līdz 300 mm. Diska rādiusa intervālā 0-150 mm diska šķērsriezums ir ar konstantu 10 mm biezumu.

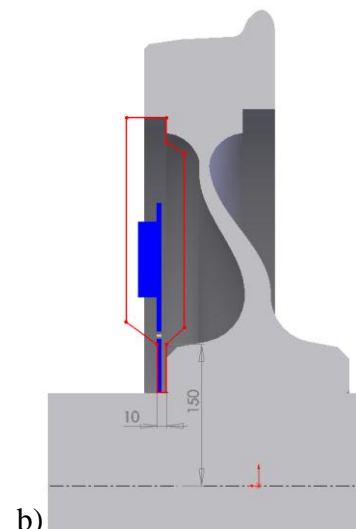
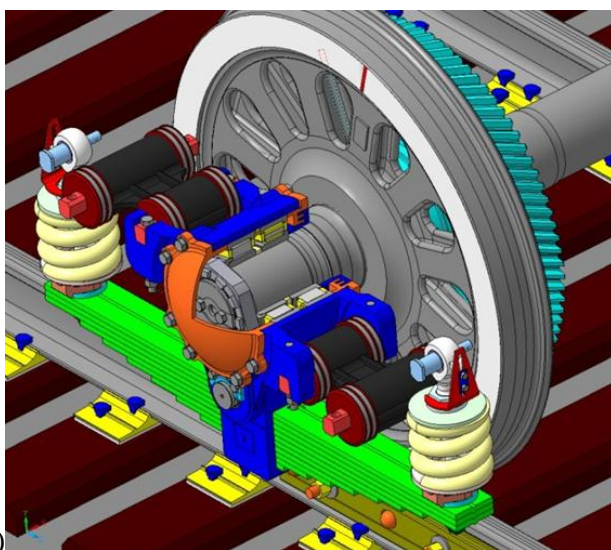
Lai būtu iespējams iegūt plašāku priekšstatu, tāpat kā testa plāksnīšu gadījumos, izmantosim 3 formas uzdošanas paņēmienus: a) ar NURBS mezgla punktiem; b) ar NURBS daudzstūra atbalsta punktiem un c) ar punktiem, kuri ir savienoti ar taisnēm. Diska mainīgā šķērsriezuma forma tiek uzdots ar 4 punktu vertikālajām koordinātēm (att. 3.9II). Horizontālie attālumi starp tiem ir konstanti un vienādi ar 50 mm.

Att. 3.9II. ir redzamas variantu „a”, kā arī „b” uzdošanas īpatnības - ar punktiem parādīti NURBS mezgla punkti, bet ar trīsstūriem - NURBS daudzstūra atbalsta punkti.

Parādītajā attēlā 3.9II. forma uzdota ar NURBS mezgla punktiem. Ņemts vērā tas, ka NURBS mezgla un daudzstūra atbalsta punkti sakrīt pirmajā un pēdējā punktā. Turklāt NURBS daudzstūra atbalsta punktu variēšanas izmaiņu diapazoniem jābūt lielākiem, lai iegūtu vienādu variējamo formu apgabalu.

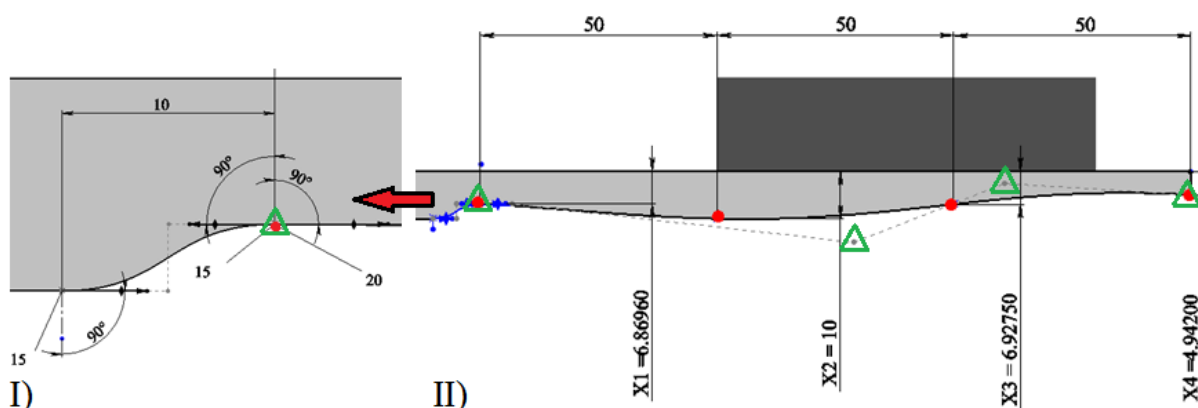


3.7. att. GE programmatūru rezultātu salīdzinājums uz sākuma eliptiskā diska bāzes: SW Simulation (pa kreisi) un ANSYS (pa labi)



3.8. att. Mērīšanas sistēmas konstruktīvie ierobežojumi: a) ārējie ierobežojumi diska un tā aparātūras izmēriem; b) šķērsgriezums pa centrālo riteņa asi un ierobežojumu līnija

Lai iegūtu diska šķērsgriezumam gludu formu un izvairītos no iespējamām spriegumu koncentrācijām šajās vietās, variantiem „a” un „b” tiek definēti NURBS 3 nepārtrauktības vektori (att. 3.9 I).



3.9. att. NURBS variantiem „a” un „b” I) nepārtrauktības definēšana un II) formas uzdošana ar mezgla punktiem

Tiek izvēlēti sekojoši parametru intervāli variantiem „a” un „c”:

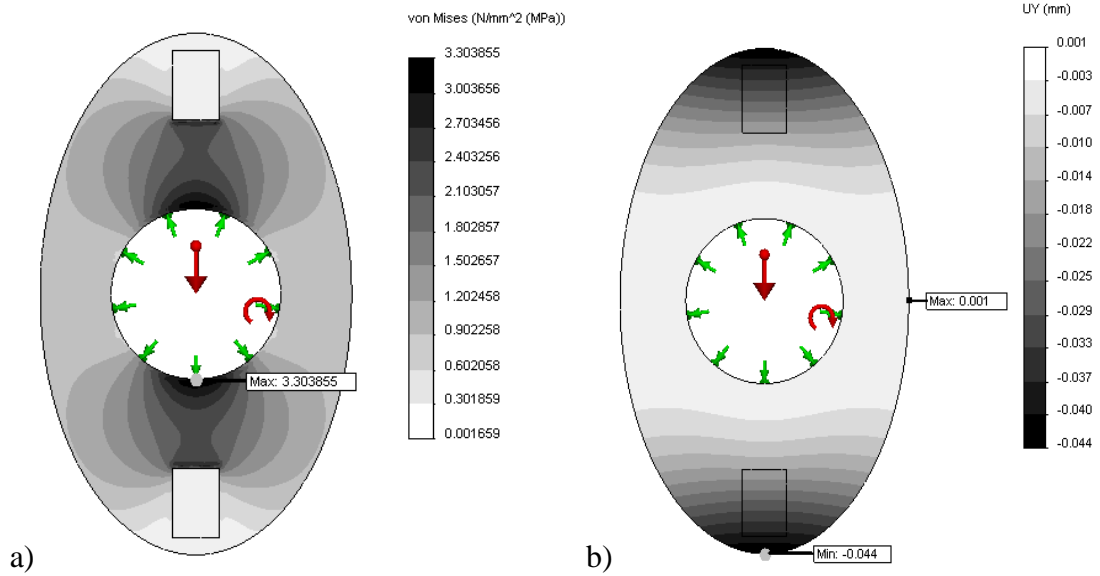
- 1)  $4 \leq X1 \leq 10$ ;
- 2)  $4 \leq X2 \leq 10$ ;
- 3)  $5 \leq X3 \leq 12$ ;
- 4)  $3 \leq X4 \leq 5$

Lai variantam b) formas mainīguma iespējas būtu līdzīgas, parametru variēšanas intervāli tiek ņemti plašāki, proti:

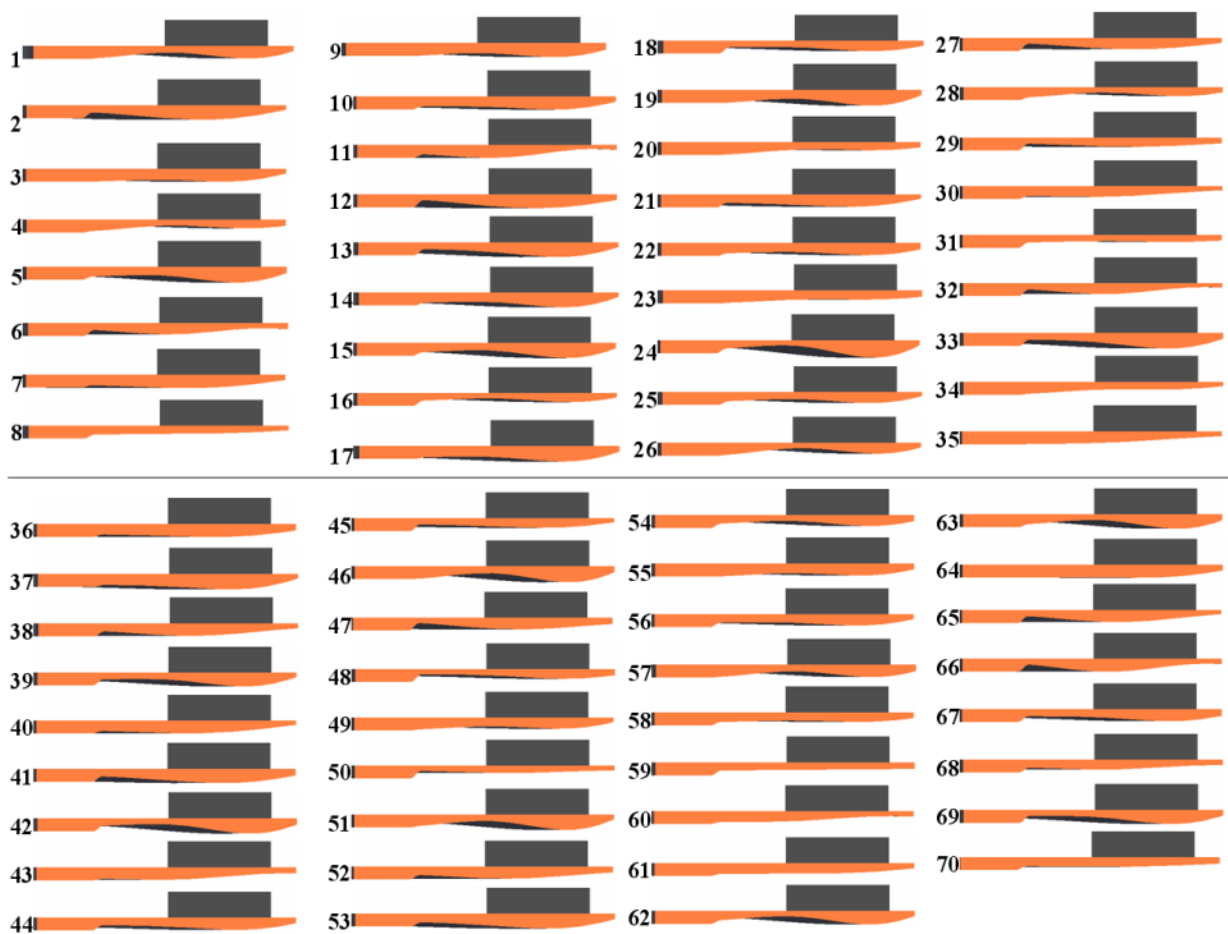
- 1)  $3 \leq X1 \leq 10$ ;
- 2)  $0.5 \leq X2 \leq 20$ ;
- 3)  $5 \leq X3 \leq 25$ ;
- 4)  $2 \leq X4 \leq 5$

Eksperimentu plāns sarēķināts pēc vidējās kvadrātiskās distances kritērija (MSD) 4 faktoriem un 70 eksperimentu punktiem ar EDAOpt. Tālāk ir nepieciešams sarēķināt atbildes katram no trim gadījumiem. Piemēram, diska formas, kuras jāreķina NURBS daudzstūra atbalsta punktu gadījumā, parādītas att. 3.11. Varam redzēt, ka visos eksperimentos diska meklējamā formas ir nogludināta un nepārtraukta.

Tāpat kā testa plāksnīšu gadījumā iegūtās atbildes - eliptiskā diska tilpums  $V$ , maksimālie ekvivalenti spriegumi  $\sigma_{vonMises}$  un aksiālie pārvietojumi  $U_z$  tika ievadīti EDAOpt un izmantotas aproksimāciju iegūšanai, kur tālāk ļauj realizēt globālas meklēšanas procedūru.



3.10. att. No centrēdzes slodzēm: a)  $\sigma_{vonMises}$  sadalījums eliptiskā diska sākuma konstrukcijā un b) pārvietojumi aksiālā virzienā ( $U_z$ )



3.11. att. Eliptiskā diska šķēsgriezuma formas saskaņā ar eksperimentu plānu

Daži no svarīgākajiem aproksimācijas un optimizācijas aprēķinātajiem rādītājiem apkopoti tabulā 3.2. Rezultātā formas uzdošanas varianti “a” un “b” aproksimēti ar otrās kārtas lokālo polinomiālo aproksimāciju. Trešās kārtas lokālā polinomiālā aproksimācija tiek izmantota variantam „c”. Gausa kodola parametrs  $\alpha$  tika mainīts, lai atrastu minimālo krosvalidācijas kļūdu. Labākās aproksimācijas vienmēr tika iegūtas tilpumam  $V$ , jo to noteic tikai uzdotie 4 parametri un neietekmē GE aprēķinu precizitāte.

3.2. Tabula  
Eliptiskā diska aproksimācijas un optimizācijas kvantitatīvie rādītāji

Variants	$\alpha$	Aproksimācijas $\sigma_{Xrel}$ [%]		Tilpums $V$ [mm <sup>3</sup> ]			Maksimālie $\sigma_{vonMises}$ [MPa]		
		$\sigma_{vonMises}$	$V$	Prognozēj amais	Faktiskais	Kļūda [%]	Prognozēj amais	Faktiskais	Kļūda [%]
a	6	20.56	0.06	1003944	1003891	0.005	3.9999	3.833816	4.33
b	3	40.28	2.03	923421	921740	0.018	3.9999	4.200354	4.77
c	4	10.93	0.00	946180	946173	0.001	3.9998	4.125750	3.05
d	-	-	-	-	1394900	-	-	3.3	-

Iegūtie 3 metamodeļi izmantoti, lai optimizētu diska šķērsriezuma formu. Diska optimizācijas problēma tiek definēta saskaņā ar iepriekš definētiem ierobežojumiem sekojoši:

Mērķa funkcija:

$V$ - diska minimālais tilpums

Ierobežojumi:

1) Uz eliptiskā diska maksimāliem ekvivalentiem spriegumiem:

$$\sigma_{vonMises} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} \leq 4MPa$$

2) Uz pārvietojumiem aksiālā virzienā:

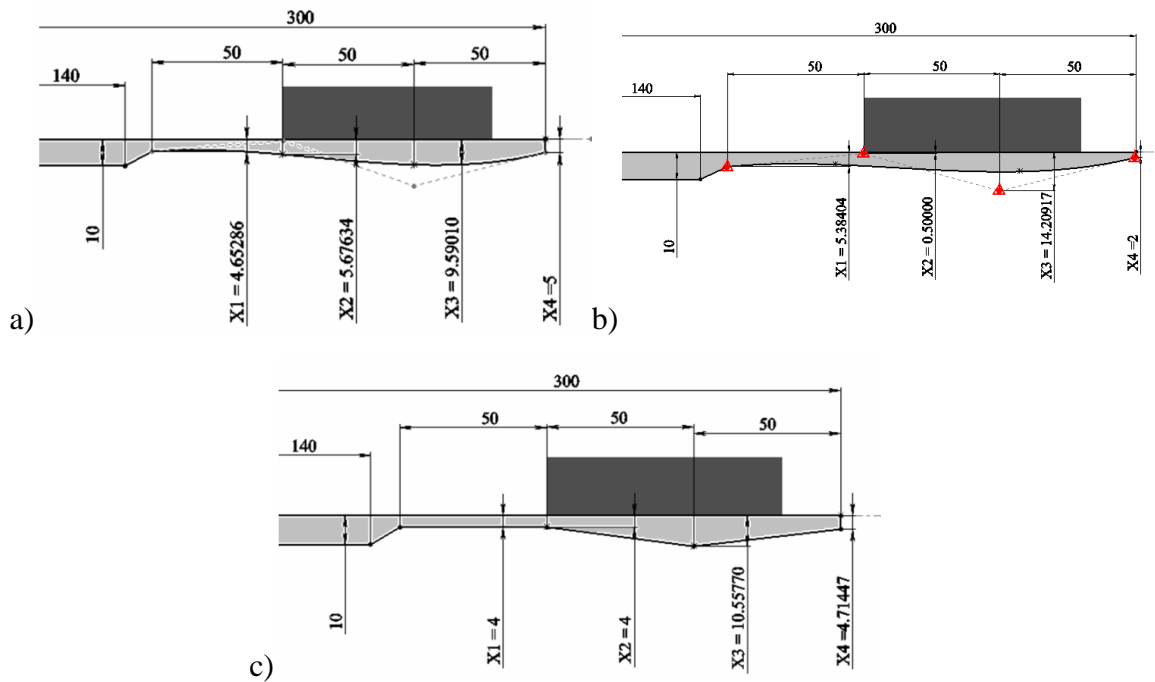
$$U_z < 2mm$$

3) Uz pirmo pašsvārstības frekvenci:

$$f > 25Hz$$

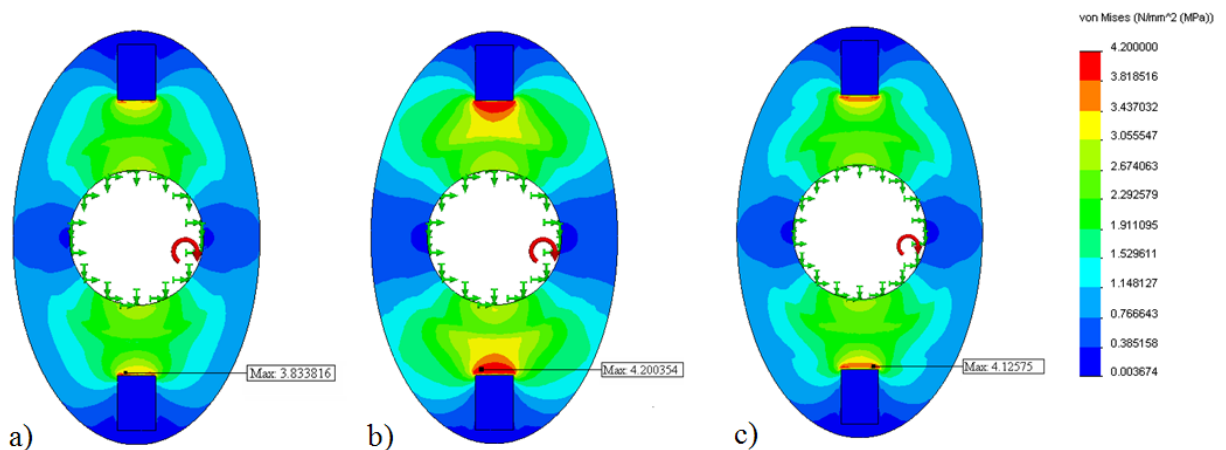
Trīs atrastās formas ir parādītas att. 3.12. Labākie rezultāti tika iegūti variantam „b” (att. 3.12b), kuram eliptiskā diska tilpums ir par 8.2% mazāks salīdzinājumā ar variantu „a” un par 2.6% salīdzinājumā ar variantu „c”. Visi trīs varianti dod būtisku tilpuma  $V$

samazinājumu salīdzinājumā ar sākuma eliptisko disku ar konstanto 10 mm biezumu: 28.1 – 33.9 %, variants „d”, un ~64 % ar parasto cilindriskās formas 10 mm disku.



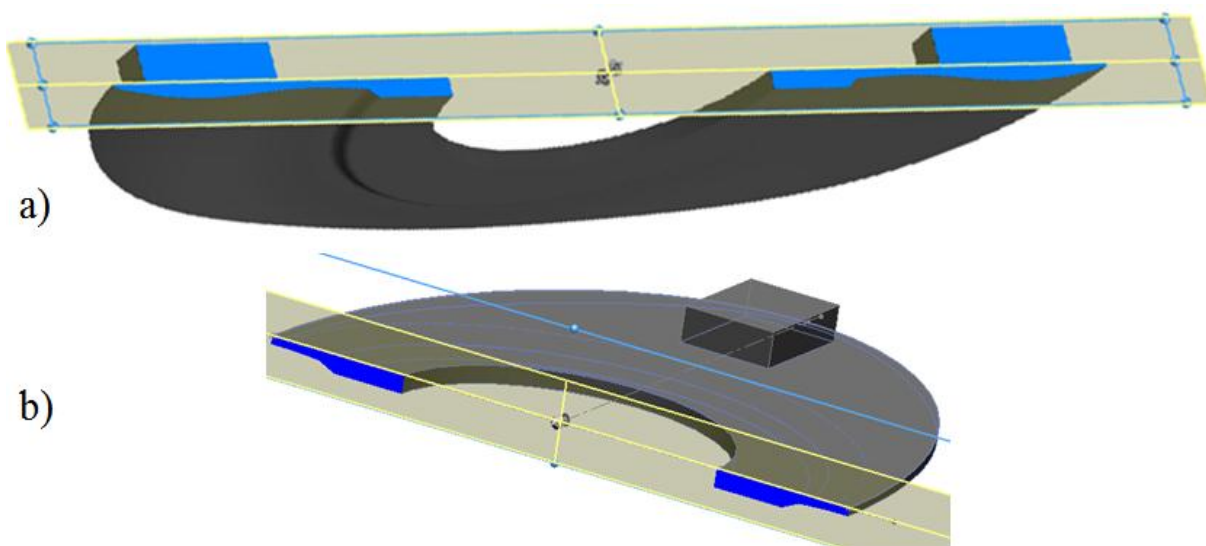
3.12. att. Iegūtās eliptiskā diska šķērsriezuma formas. Forma uzdota ar: a) ar NURBS mezgla punktiem; b) ar NURBS daudzstūra atbalsta punktiem un c) ar punktiem, kuri ir savienoti ar taisnām

Tālāk ar metamodeļu optimizāciju atrastās formas tiek pārbaudītas, izmantojot pilnos GEM modeļus. Tiek atrastas faktiskās vērtības maksimāliem  $\sigma_{vonMises}$  ( tab. 3.2.).  $\sigma_{vonMises}$  sadalījums diska atrastajās formās ir parādīts att. 3.13.



3.13. att. Optimizācijas rezultātu pārbaude:  $\sigma_{vonMises}$  sadalījums atrastajās diska formās: tabulas 3.2. varianti: „a”, „b” un „c”

Atrastā „b” varianta formas īpatnības tiek parādītas att. 3.14. Ir redzama vieta zem raidītāja, kur diska biezums ir lielāks, jo šai apgabalā tiek uzņemtas papildus slodzes. Optimālās formas disks ir viegli izgatavojams no 10 mm biezas alumīnija loksnes sagataves ar vienkāršām tehnoloģiskajām operācijām.



3.14. att. Eliptiskā diska atrastā optimālā forma (tabulas 3.2. variants “b”) - 3D modeļa puses attiecīgi šķeltas pa elipses a) lielo un b) mazo asi

## NODAĻAS SECINĀJUMI

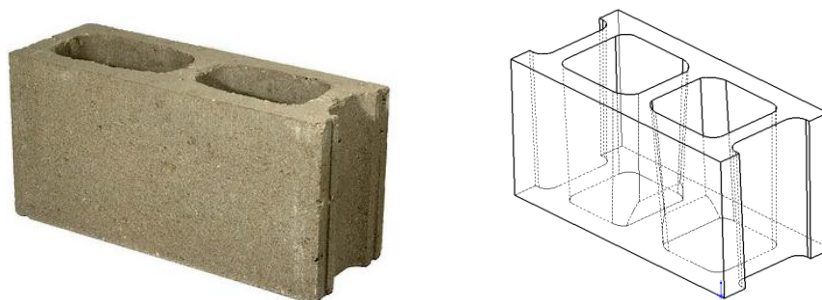
- Uz kravas vagona piemēra bāzes ir apstiprināta iespēja izmantot štata riteņpāri ar noņemamu mērīšanas aprīkojumu kā tenzometrisko riteņpāri sistēmas ritenis-sliede monitoringam.
- Atrasta mērīšanas sistēmas noņemamā diska optimālā forma, ievērojot konstruktīvos ierobežojumus, izgatavošanas un ekspluatācijas apstākļus.
- Izmantojot izstrādāto formas un izmēru optimizācijas metodiku, noņemamā diska svars ir samazināts par ~64% salīdzinot ar sākotnējo konstrukciju. Izveidots eliptiskas formas disks ar mainīgu biezumu, kuram ir nepieciešamā stiprība, pieļaujamie pārvietojumi un pašfrekvences.
- Formas uzdošanas paņēmieni, kas balstās uz NURBS daudzstūra atbalsta punktu izmantošanu, dod vismaz par 3% mazāku tilpumu, salīdzinot ar pārējām divām metodēm.
- Noņemamais mērīšanas sistēmas aprīkojums ievērojami samazina materiālos izdevumus un vilciena gaitas dinamisko un stiprības izmēģinājumu sagatavošanas laiku.

## 4. CELTNIECĪBAS BLOKA DOBUMA FORMAS OPTIMIZĀCIJA

Otrajā praktiskajā piemērā tiek parādīts, ka izstrādātai metodikai ir plašs pielietojums un tā nav ierobežota tikai ar plastisku materiālu objektu optimizāciju.

### 4.1. Ievads

Mūsdienās celtniecībā plaši izmanto dobus betona blokus (att. 4.1.). Tie tiek izgatavoti no portlandcementsa, ūdens un atbilstošiem pildmateriāliem ar vibropresēšanas metodi [Dvorkin, 2006]. Pētot dažādas betona receptūras un pilnveidojot tehnoloģisko procesu, ir iespēja uzlabot bloka nepieciešamās īpašības. Par vienu no alternatīviem doba betona bloka uzlabošanas risinājumiem var uzskatīt tā iekšējās izgriezuma formas optimizāciju. Prakse rāda, ka, projektējot dobo formu, ir nepieciešams ievērot ne tikai betona bloka stiprību, bet arī tā siltumizolējošās īpašības [Невилль, 1972]. Ņemot vērā pieejamos izejmateriālus un Latvijas meteoroloģiskos laika apstākļus, ir iespējams projektēt blokus, kuri ir vispiemērotākie vietējai celtniecībai.

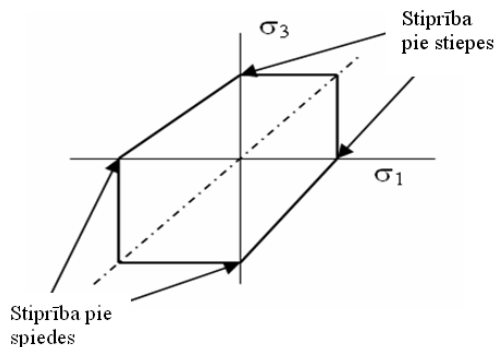


4.1. att. Columbia Kivi bloks un izveidots SW 3D modelis

No materiāla izlietojuma viedokļa optimāla bloka forma ir tāda, kurai materiāls ir pilnīgi noslogots ar lietderīgo slodzi. Sākumā apskatīsim bloka stiprību.

### 4.2. Izmantotais stiprības kritērijs

Lai analizētu betona bloku stiprību, ir nepieciešams izvēlēties atbilstošu stiprības kritēriju. Tā kā betona īpašības atbilst trauslam materiālam, kuram ir dažāda izturība spiedē un stiepē, tad tiek izmantots Mora-Kulona kritērijs. Trauslam materiālam nav izteiktas tecēšanas robežas, bet svarīga ir stiprības robeža pie stiepes. Drošības koeficients (FOS) pēc Mora-Kulona [Kreith, 1999] kritērija tiek definēts, kā parādīts att. 4.2. FOS koeficients būs lielāks par 1, ja stiepes un spiedes spriegumu vērtības neiziet no figūras iekšējā laukuma.



4.2. att. Mora-Kulona ekvivalentā sprieguma kritērijs

Saskaņā ar šo kritēriju drošības koeficienta atkarību no galvenajiem spriegumiem  $\sigma_1$  un  $\sigma_3$  var izteikt sekojošā veidā:

$$FOS = \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_{ST}} - \frac{\sigma_3}{\sigma_S} \right)^{-1}, \text{ ja } \sigma_1 \geq 0; \sigma_3 \leq 0;$$

$$FOS = \frac{\sigma_{ST}}{\sigma_1}, \text{ ja } \sigma_1 > 0; \sigma_3 > 0; \quad (4.1)$$

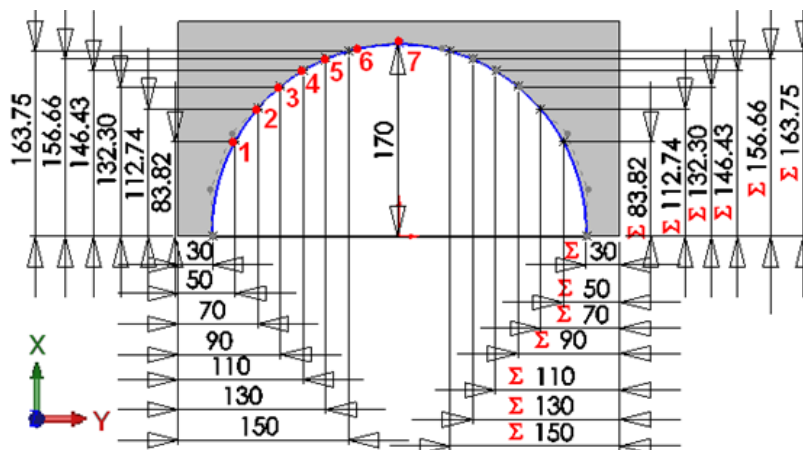
$$FOS = \frac{\sigma_S}{\sigma_1}, \text{ ja } \sigma_1 < 0; \sigma_3 < 0;$$

kur  $\sigma_{ST}$  - stiprība pie stiepes,  
 $\sigma_S$  - stiprība pie spiedes,  
 $\sigma_1, \sigma_3$  - galvenie spriegumi konstrukcijā.

### 4.3. Optimizācijas uzdevuma nostādne. Bloka izgriezuma formas definēšana

Bloka izgriezuma formas optimizācijas uzdevums tiek parametrizēts, izvēloties noteiktu skaitu NURBS atbalsta punktu. Optimizācija tiek veikta, ievērojot svarīgākos kritērijus. Mūsu gadījumā tika risināti sekojoši nelineārās programmēšanas uzdevumi: 1) maksimizēt bloka minimālo drošības koeficientu ar ierobežojuma: uz mūra iekšējās sienas minimālo vidējo temperatūru, 2) maksimizēt bloka iekšējās sienas vidējo temperatūru, 3) minimizēt bloka masu, 4) maksimizēt bloka minimālo drošības koeficientu. Par sienas vidējo temperatūru tika pieņemts vidējais aritmētiskais no temperatūras vērtībām visos mezgla punktos, kas izvietoti uz bloka iekšējās sienas.

Bloks ir veidots no betona čaulas, kurā iepildīta termoizolējoša masa, piemēram, ekovate. Tā telpiskais ģeometriskais modelis izveidots ar SW. Pieņemti standarta betona bloka gabarīti - 390x190x190 mm.



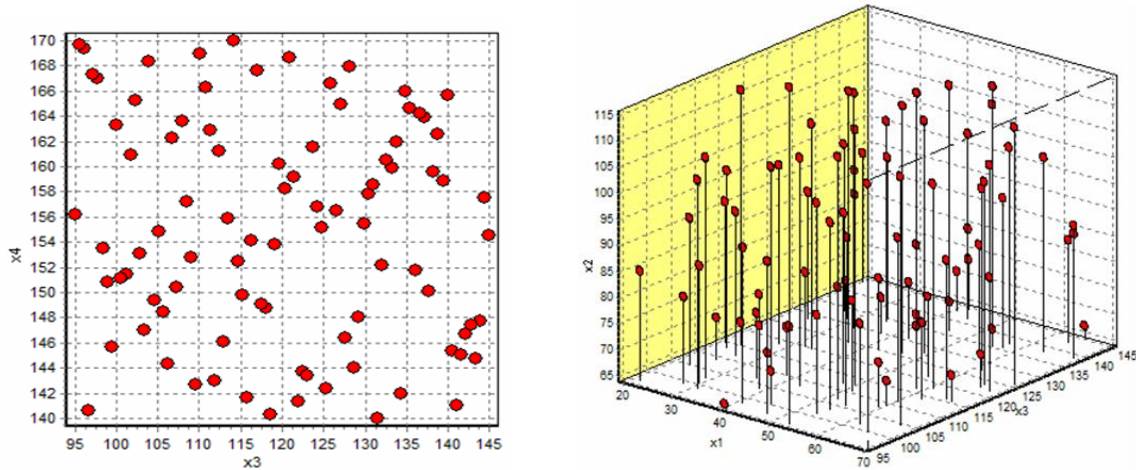
4.3. att. Izgriezuma bāzes formas izmēri

Sākumā ir pieņemts, ka izgriezumam ir nošķelta cilindra forma. Izgriezums izveidots ar „extrude cut” iezīmi no plakanas figūras, kuras izmēri ir parādīti att. 4.3. Forma ir uzdots ar 7 atbalsta punktu koordinātēm, kuras tiek izmantotas NURBS veidošanai. Atbalsta punktu koordinātes Y šim objektam ir pieņemtas konstantas un optimizācijas uzdevumā netiek mainītas, bet X koordinātes ir iespējams mainīt noteiktos intervālos, veidojot dažāda veida izgriezumus. Šīs septiņas mainīgās atbalsta punktu koordinātes ir optimizācijas parametri.

Izgriezuma labās puses izmēri (att. 4.3.) ir sasaistīti ar kreisās puses izmēriem tā, ka vienmēr tiek veidota simetriska figūra. Tiek definēti sekojoši 7 koordinātu variēšanas diapazoni milimetros:

$$\begin{aligned}
 64 &< X_1 < 125 \\
 94 &< X_2 < 150 \\
 115 &< X_3 < 160 \\
 133 &< X_4 < 166 \\
 147 &< X_5 < 170 \\
 156 &< X_6 < 170 \\
 162 &< X_7 < 175
 \end{aligned}$$

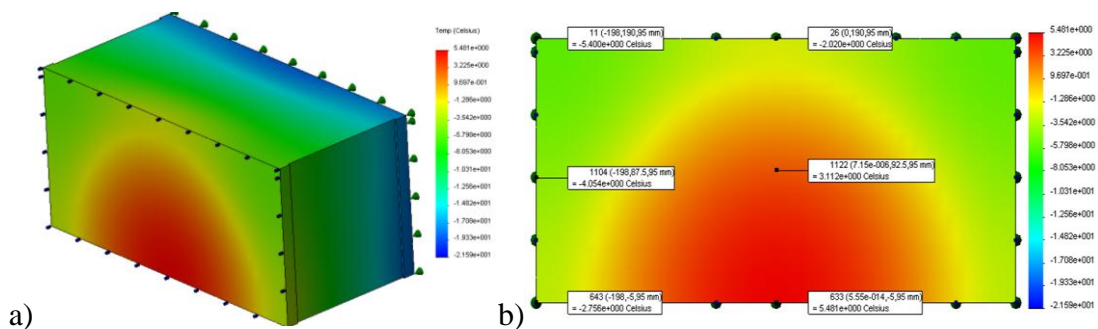
Tālāk ar programmatūru EDASOpt tika izveidots D-optimālais latīņu hiperkuba eksperimentu plāns 7 mainīgajiem 90 punktos. Ģenerētā plāna dažas projekcijas ir parādītas att. 4.4.



4.4. att. Eksperimentu plāna projekcijas x3-x4 un x1-x2- x3

#### 4.4. Stacionārais bloka termoaprēķins. Atbilžu aproksimācija un bloka izgriezuma formas optimizācija

Termoaprēķini tiek veikti ar SW Simulation programmatūru un tiek analizēts viens bloks. Tiek pētīti 90 iekšējā izgriezuma formas gadījumi, kuri izveidoti saskaņā ar iepriekš apskatīto eksperimentu plānu. Aprēķinos tiek ievērota siltumvadāmība objekta materiālos un konvekcija [Lienhard, 2008] uz bloka ārējās virsmas, bet netiek ņemta vērā siltuma pāreja radiācijas starojuma dēļ, kā arī konvekcija uz bloka iekšējās virsmas. Visos 90 gadījumos ir izpētīti bloka siltumizolācijas raksturojumi. Bloka 3D modelim uz iekšējās puses tiek pielikts 5 W siltuma avots (att. 4.5a), kurš darbojas pa visu iekšējās skaldnes virsmu. Ir pieņemts, ka bloka otra puse kontaktējas ar āra gaisu, kura temperatūra ir  $-20^{\circ}\text{C}$ , respektīvi, bloka ārējā siena zaudē siltumu gaisa konvekcijas dēļ (konvekcijas koeficients  $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Uzdotas sekojošas parametru vērtības ekovatei: blīvums  $\rho - 40\text{kg/m}^3$ , siltumvadītspēja  $- 0.038 \text{ W/mK}$  un betonam: blīvums  $\rho - 2.4 \text{ t/m}^3$ , siltumvadītspēja  $- 0.53 \text{ W/mK}$ .



4.5. att. a) Izveidotais bloka termomodelis un b) bloka iekšējās sānu virsmas temperatūra uzdotos mezglu punktos

Tiek rēķināts stacionārs termouzdevums un noteikta temperatūra visos mezgla punktos uz bloka iekšējās virsmas (att. 4.5b.) un aprēķināta tās vidējā vērtība. Tiek pieņemts, jo augstāka šī vērtība tiek iegūta, jo labākas siltumizolācijas īpašības ir blokam.

Lai izveidotu metamodeļus, saskaņā ar eksperimenta plānu tiek izmantoti ar SW Simulation veiktie termoaprēķini un bloka stiprības aprēķini.

Izvēlēsimies tādas aproksimācijas, kurām Sigma Cross kļūda būtu minimāla. Šajā gadījumā izvēlējamies globālo kvadrātisko aproksimāciju. Iegūto aproksimāciju precizitātes rādītāji parādīti att. 4.6., no kurienes ir redzams, ka vidējās temperatūras vērtība tiek aproksimēta ar 9.86% Sigma Cross.

Functions Yt:	Masa	VidTemp	Tmax
Sigma Cross	0.047593	0.174771	0.186473
Sigma Cross%	9.33%	9.86%	9.42%
Sigma	0.025723	0.094596	0.103230
Sigma%	5.044862	5.334694	5.214758
Sigma0	0.033879	0.125139	0.135962
Sigma0%	6.644476	7.057137	6.868242
MeanExpValue	16.296345	13.190206	25.468529
StDev of Exp	0.509880	1.773227	1.979576
Exp. Range	2.086020	7.531700	8.370000
MaxError	-0.065435	0.204460	0.235522
Bad Point No.	13	58	58
Max Rel Error	0.40%	1.68%	0.88%
BadRelPointNo.	13	40	58
No.ofActualExp	85	84	85

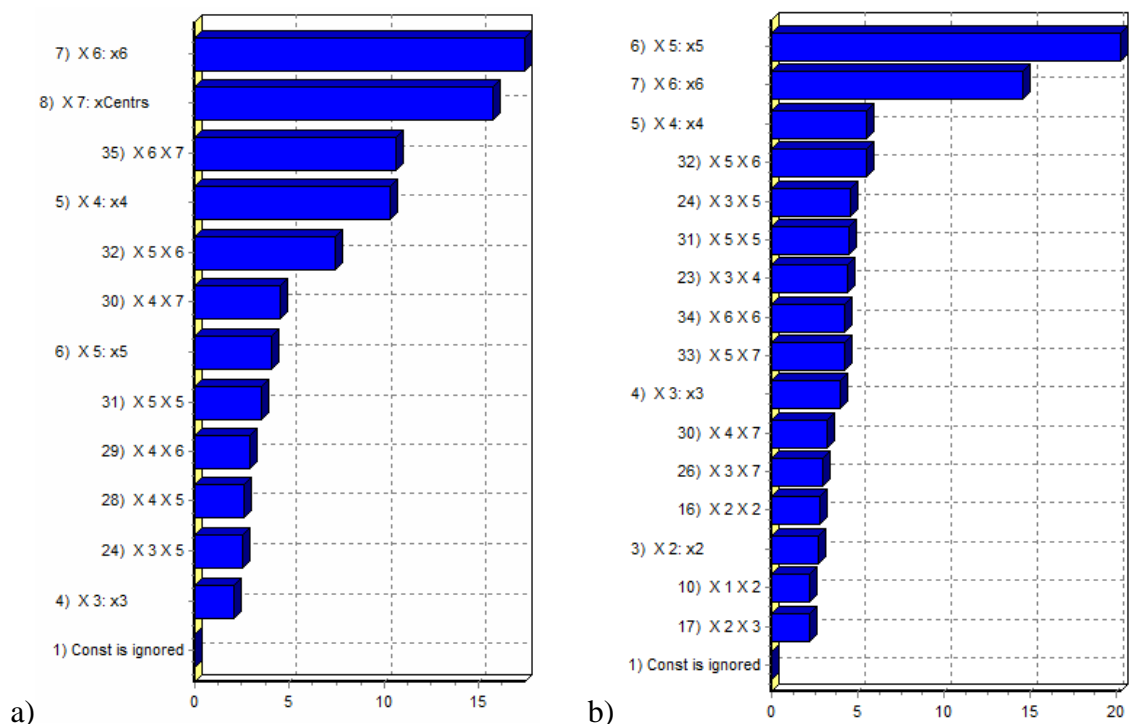
4.6. att. Aproksimēto funkciju precizitātes rādītāji

Globālās kvadrātiskās aproksimācijas koeficientu ietekmi uz vidējo temperatūru var redzēt attēlā 4.7a, kur parādītas faktoru koeficientu vērtības, kuru ietekme uz vidējo temperatūru ir lielāka par 2 %. Ir redzams, ka atbalsta punkti, kuri atrodas tuvāk dobā bloka centram (X7, X6), vairāk ietekmē bloka siltumizolējošās īpašības. Koordinātes nozīmīgums pakāpeniski samazinās tuvojoties bloka sāniem. X1 un X2 ietekme uz siltumvadāmību ir mazāka par 2%.

Tāpēc meklējot bloku ar labāku siltumizolāciju, ir nepieciešams labāk izpētīt bloka centrālo daļu – paplašināt šo koordinātu pieļaujamās robežas.

Analoģiski tiek atrasta atbalsta punktu koordinātu ietekme uz dobā bloka masu (att. 4.7b). Ir redzams, ka bloka masu galvenokārt ietekmē X5 un X6. Pārējo faktoru ietekme ir būtiski mazāka.

Atbalsta punktu koordinātu ietekme uz bloka minimālo drošības koeficientu parādīta att. 4.8a. Redzams, ka X5 faktora nozīmīgums ir lielāks gan Min FOS, gan iepriekš apskatītajā bloka masas aproksimācijās gadījumā.



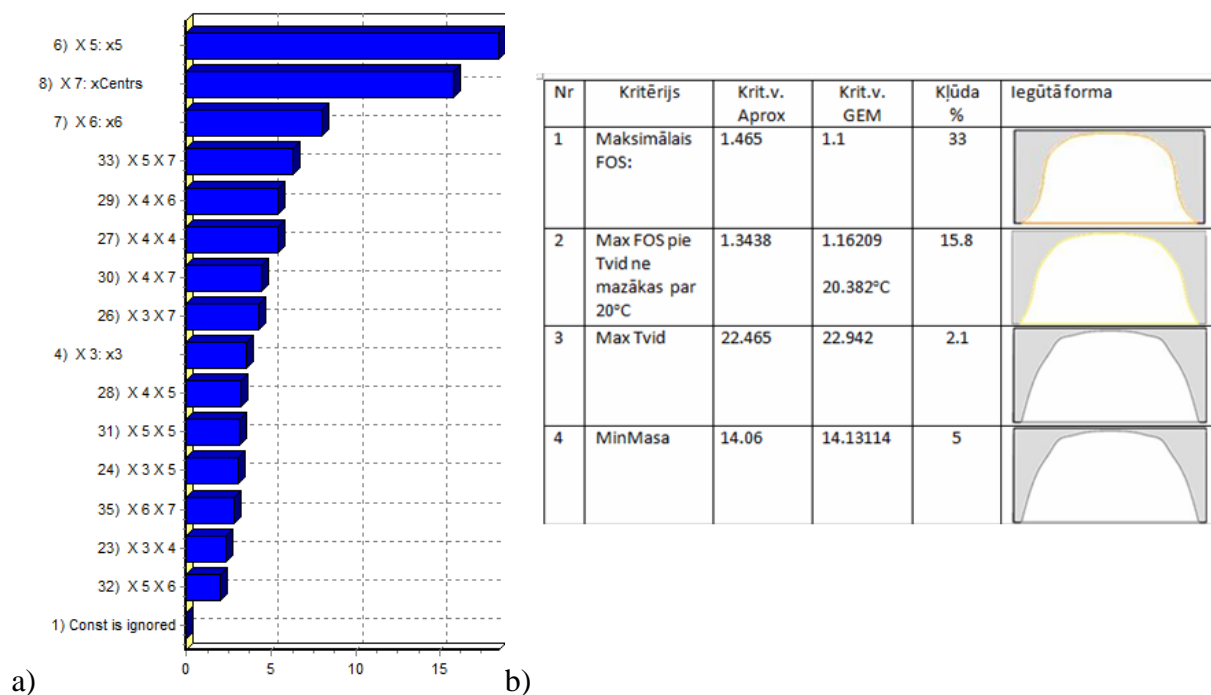
4.7. att. Atkarība no atbalsta punktu koordinātēm a) temperatūras aproksimācijas un b) bloka masas aproksimācijas

Izmantojot dažādus kritērijus, tika atrastas bloka izgriezuma formas (sk. att. 4.8b). Ar 1. numuru parādīta izgriezuma forma, kurai minimālais drošības koeficients ir maksimāls. Optimizējot metamodeli, iegūtā vērtība atšķiras no GEM modeļa iegūtās vērtības par 33%.

Otrajā variantā apskatīts analogisks kritērijs, tikai ir pielikts viens papildus ierobežojums, proti, ka vidējai temperatūrai uz bloka iekšējās sienas jābūt vismaz 20°C. Šajā gadījumā kļūda ir par 17% mazāka.

Trešajā variantā kritērijs ir maksimālā vidējā temperatūra. Te aprēķini parādīja labu sakritību ar GEM modeli. Minimālās masas kritērija variantā un maksimālās  $T_{vid}$  variantā tiek atrasta forma, kurai ir maksimāls izgriezums, kas neapšaubāmi ir pilnīgi loģisks rezultāts.

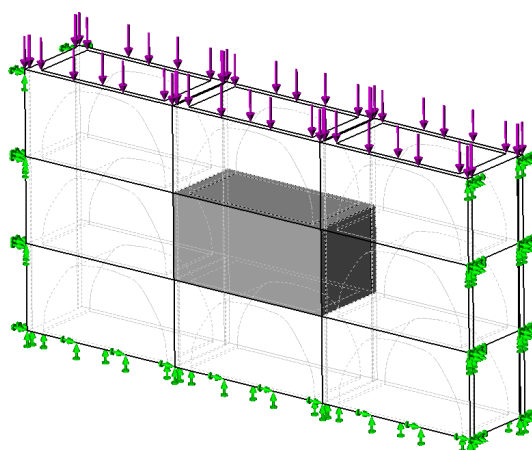
Diemžēl iegūtā 33% kļūda FOS gadījumā nav pieņemama. To var izskaidrot ar bloka stiprības aprēķina modeļa nepilnību, proti, ar idealizēto robežnoteikumu neatbilstību reālajam bloka slogojumam. Tāpēc bloka stiprības aprēķinu veikšanai modelis tiek pilnveidots, proti, viena bloka vietā tiek apskatīts mūris, kurā iemūrēti 9 bloki.



4.8. att. a) Min FOS aproksimācijas atkarība no atbalsta punktu koordinātēm un b) iegūtās izgriezumu formas pie dažādiem optimizācijas kritērijiem

#### 4.5. Aprēķinu modeļa izveide mūra stiprības pārbaudei

Kā parādīja iepriekšējie aprēķini, izveidotajam betona bloka modelim ir nepieciešams veikt uzlabojumus. Pirmkārt, ir nepieciešams samazināt idealizēto robežnoteikumu ietekmi uz iegūtajiem rezultātiem. Tāpēc aprēķiniem tiek izmantoti 9 vienādi bloki, kas veido mūri (att. 4.9.).



4.9. att. Bloku sienas aprēķinu modelis

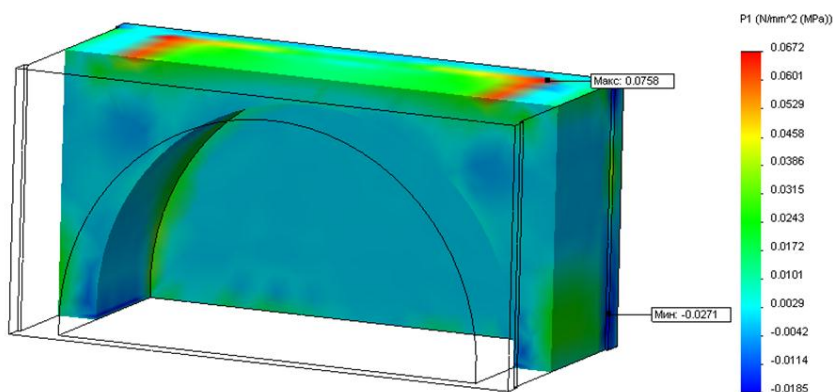
Modificējot viena bloka izgriezuma formu, izmaiņas atspoguļojas arī visos pārējos blokos. Pie liela saplānoto eksperimentu skaita tas ievērojumi saīsina jaunas formas modeļa sagatavošanas laiku. Pieņemts, ka mūrējot tiek veidota gaisa šķirkārta, līdz ar to bloku

mijiedarbība notiek pa attiecīgo skaldņu perimetru 20 mm platās joslās. Uz mūra apakšējās un sānu skaldnēm robežnoteikumi arī pielikti joslās pa 20 mm, proti, pārvietojumi uz šīm joslām pielīdzināti nullei. Lai izvairītos no lielu spriegumu parādīšanās efekta augšējo šķautņu tuvumā uz mūra sānu skaldnēm, tiek atstātas 15 mm brīvas joslas no mūra augšas. Vispirms tiek risināts stiprības uzdevums pie mūra statiska slogojuma. Konstantā slodze ir vienmērīgi pielikta uz mūra augšējās daļas pa 20 mm joslām, kuras atbilst bloku mūrējumam ar gaisa šķirkārtu. Stiprības rādītāji tika analizēti mūra centrā izvietotajam blokam, bet pārējie bloki aprēķinu shēmā kalpo, lai mazinātu idealizēto robežnoteikumu ietekmi uz rezultātiem.

Tika pieņemts, ka mūra bloku un šuvju materiāls ir ar vienādām īpašībām. Aprēķiniem izmantoti parastā betona pēc 28 diennakšu cietēšanas raksturojumi, kuru skaitliskās vērtības ņemtas no rokasgrāmatas [Kreith, 1999]. SW Simulation programmā tika definēti sekojoši parametri: elastības modulis  $E_X = 21000$  MPa, Puasona koeficients  $\mu = 0.2$ , bīdes modulis  $G = 90407$  MPa, materiāla blīvums  $\rho = 2400$  kg/m<sup>3</sup>, stiprības robeža pie stiepes  $\sigma_{st} = 2.1$  MPa, stiprības robeža pie spiedes  $\sigma_s = 21$  MPa.

Statisko aprēķinu precizitāti ietekmē tīkla kvalitāte, kuru var palielināt ar h un p adaptīvajam metodēm [Shih, 2012]. Tās veido tīkla GE mazākus par iestatīto globālo elementa izmēru ķermeņa apgabalos ar lielāku iespējamo kļūdu. H-adaptīvā tīklojuma gadījumā SW Simulation pati atrod apgabalus, kuros nepieciešams smalcināt tīklojumu. Ir iespēja uzdot no 2 līdz 5 rēķināšanas cikliem. Tas nozīmē, ka programma atbilstošo skaitu reizes pārrēķina uzdevumu, lai uzlabotu rezultātu precizitāti. Izmantojot p-adaptīvo metodi, ir iespēja definēt papildus parametru: GE minimālo un maksimālo aproksimācijas polinoma kārtu.

#### 4.5.1. Mūra centrālā bloka galveno spriegumu analīze



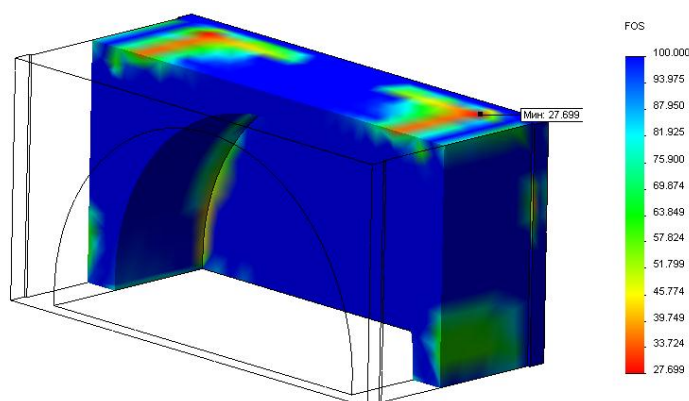
4.10. att. 1. galvenais spriegums

Izmantojot iepriekš izveidoto aprēķinu modeli (att. 4.9.) tiek izrēķināti 1. un 3. galvenie spriegumi. Att. 4.10. ir redzams, ka bloka materiālā 1. galvenais spriegums mainās robežās no -0.0271 līdz 0.0758 MPa.

Ar zilo krāsu norādītas zonas, kur materiāls tiek spiests. Ar sarkano krāsu parādītas zonas, kur veidojas stiepes spriegumi. Tās atrodas bloka augšējā virsmā un mūsu gadījumā tās ir potenciāli bīstamas zonas, jo analizējamais materiāls ir betons, kura robežizturība stiepē ir daudzkārt mazāka par robežizturību spiedē.

#### 4.5.2. Mūra centrālā bloka drošības koeficients FOS un tā optimizācijas rezultāti

Visos 90 eksperimenta plāna punktos tika atrasts drošības koeficients FOS, izmantojot Mora-Kulona kritēriju. Sākumā tika atrasts drošības koeficienta sadalījums bāzes izgriezuma formai. Att. 4.11. ir parādīta puse no mūra centrālā bloka. Ar zilo krāsu ir iekrāsotas zonas, kur koeficienta FOS vērtība ir lielāka par 80. Sarkanā krāsā iekrāsotas vietas, kur koeficientam FOS ir zemākas vērtības (27-39). Var redzēt, ka koeficienta FOS sadalījums blokā ir nevienmērīgs, turklāt zilo apgabalu ir vairāk par sarkano. Vidējās bloka daļas drošības koeficients ir lielāks par 90, kā arī ir citas mazāk noslogotas vietas. Tāpēc ir iespēja palielināt izgriezuma formu, samazinot betona masas patēriņu. Mazākā FOS vērtība ir 27.7 un tā atrodas apgabalā, kur izbeidzas kontakts ar augstāk izvietoto bloku.



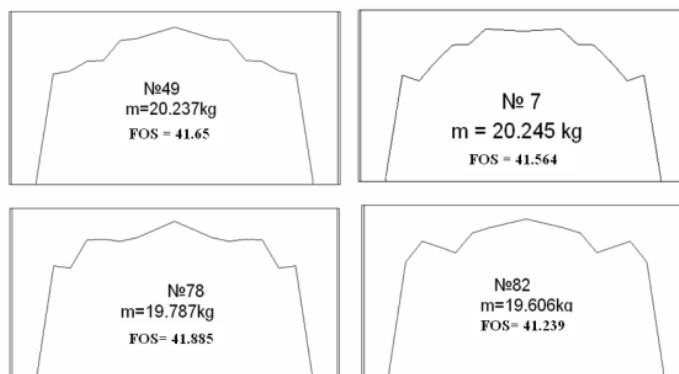
4.11. att. Drošības koeficienta FOS vērtību sadalījums centrālajam blokam ar bāzes formu

Aprēķināsim koeficienta FOS vērtības saskaņā ar eksperimenta plānu visiem 90 gadījumiem un rezultātus apkoposim att. 4.12a. Tika iegūtas minimālās koeficienta FOS vērtības diapazonā 34 – 42.

Četras formas ar vislielāko minimālo drošības koeficientu ir parādītas ar trekniem burtiem. Aprēķini parādīja, ka visos gadījumos bīstamākā vieta atrodas apmēram vienā un tai pašā apgabalā līdzīgi kā bāzes blokam.

Bloka izgriezuma atbalsta punktu izvietojumi ar lielākajām drošības koeficientu vērtībām parādītas att. 4.12b. Katram blokam ar SW ir precīzi noteikta masa. Analizējot iegūtos datus, ir atrasts, ka bloka masa atkarībā no izgriezuma formas, mainās diapazonā no 19.503 līdz 21.138 kg vai 1.635 kg robežās.

№	FOS	№	FOS	№	FOS
1	36.73	31	38.571	61	36.21
2	38.704	32	40.534	62	35.993
3	37.403	33	40.342	63	39.857
4	39.482	34	35.156	64	35.91
5	39.552	35	36.699	65	36.436
6	37.651	36	39.549	66	39.166
7	<b>41.564</b>	37	36.12	67	39.173
8	37.992	38	37.089	68	35.281
9	39.089	39	38.852	69	35.413
10	35.234	40	37.606	70	40.856
11	34.282	41	40.441	71	37.869
12	37.811	42	35.89	72	37.24
13	40.788	43	36.169	73	35.81
14	35.564	44	40.673	74	34.111
15	39.772	45	38.479	75	34.55
16	38.453	46	35.965	76	40.690
17	40.427	47	36.496	77	38.492
18	36.463	48	38.642	78	<b>41.885</b>
19	36.079	49	<b>41.65</b>	79	38.285
20	38.527	50	40.592	80	38.321
21	39.296	51	39.279	81	35.629
22	35.114	52	37.182	82	<b>41.239</b>
23	38.696	53	37.413	83	40.666
24	38.104	54	33.904	84	36.203
25	36.335	55	37.042	85	35.028
26	34.677	56	38.46	86	38.827
27	35.326	57	40.54	87	40.503
28	40.705	58	37.614	88	35.619
29	40.329	59	36.064	89	37.517
30	36.372	60	40.72	90	40.147



a) b)

4.12. att. a) Aprēķinātās koeficienta FOS vērtības un b) bloku iekšējā izgriezuma atbalsta punktu izvietojumi ar lielākajām minimālo FOS vērtībām

Iegūtie rezultāti tiek izmantoti, lai izveidotu bloka metamodeli programmatūrā EDAOpt. Izmantojot aproksimācijas, tika atrasts optimums kritērijam: maksimālais minimālais drošības koeficients FOS = 42.51. Att. 4.13. redzamas iegūtās izgriezuma formas atbalsta punktu koordinātes. Tās tika izmantotas, lai sarēķinātu bloka ar optimālo izgriezuma formu rādītājus ar GEM programmatūru SW Simulation, izmantojot uzlaboto mūra modeli. Šoreiz atšķirībā no viena bloka aprēķina rezultātiem GEM aprēķini parādīja negaidīti labu sakritību ar izveidoto metamodeli (FOS = 42.33). Iegūtā aprēķinu kļūda ir 0.43%.

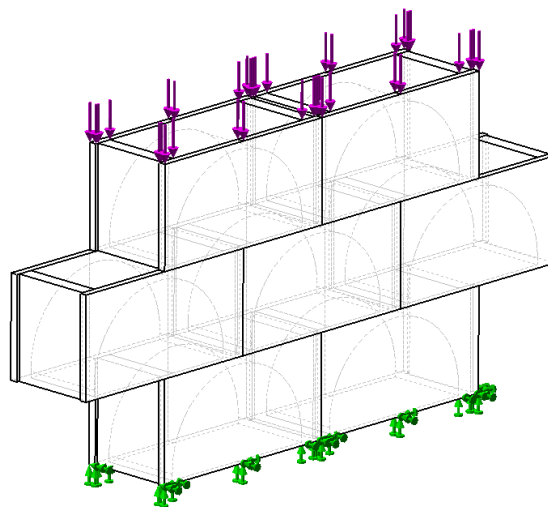
Indices No	Min	Type	Max	Criterion=	-42.511925
1)X1:	64	0	125	1)X1=	125
2)X2:	94	0	150	2)X2=	143.16381
3)X3:	115	0	160	3)X3=	160
4)X4:	133	0	166	4)X4=	166
5)X5:	147	0	170	5)X5=	170
6)X6:	156	0	173	6)X6=	159.72918
7)X7:	162	0	175	7)X7=	175
8)Y1: Mizes	0	0	0	8)Y1=	0.18494217
9)Y2: URES	0	0	0	9)Y2=	1.5468359
10)Y3: ESTR	0	0	0	10)Y3=	5.2100792
11)Y4: FOS	0	0	0	11)Y4=	41.511925
12)Y5: P1min	0	0	0	12)Y5=	-0.024066791
13)Y6: P1max	0	0	0	13)Y6=	0.049916471
14)Y7: P3Min	0	0	0	14)Y7=	-0.2087049
15)Y8: P3max	0	0	0	15)Y8=	0.014591639
16)Y9: Masa	0	2	19	16)Y9=	18.999998

4.13. att. Ar EDASOpt atrastais optimums pie kritērija maksimālais min FOS

#### 4.6. Mūrēšanas tehnoloģijai atbilstošais aprēķinu modelis



a)

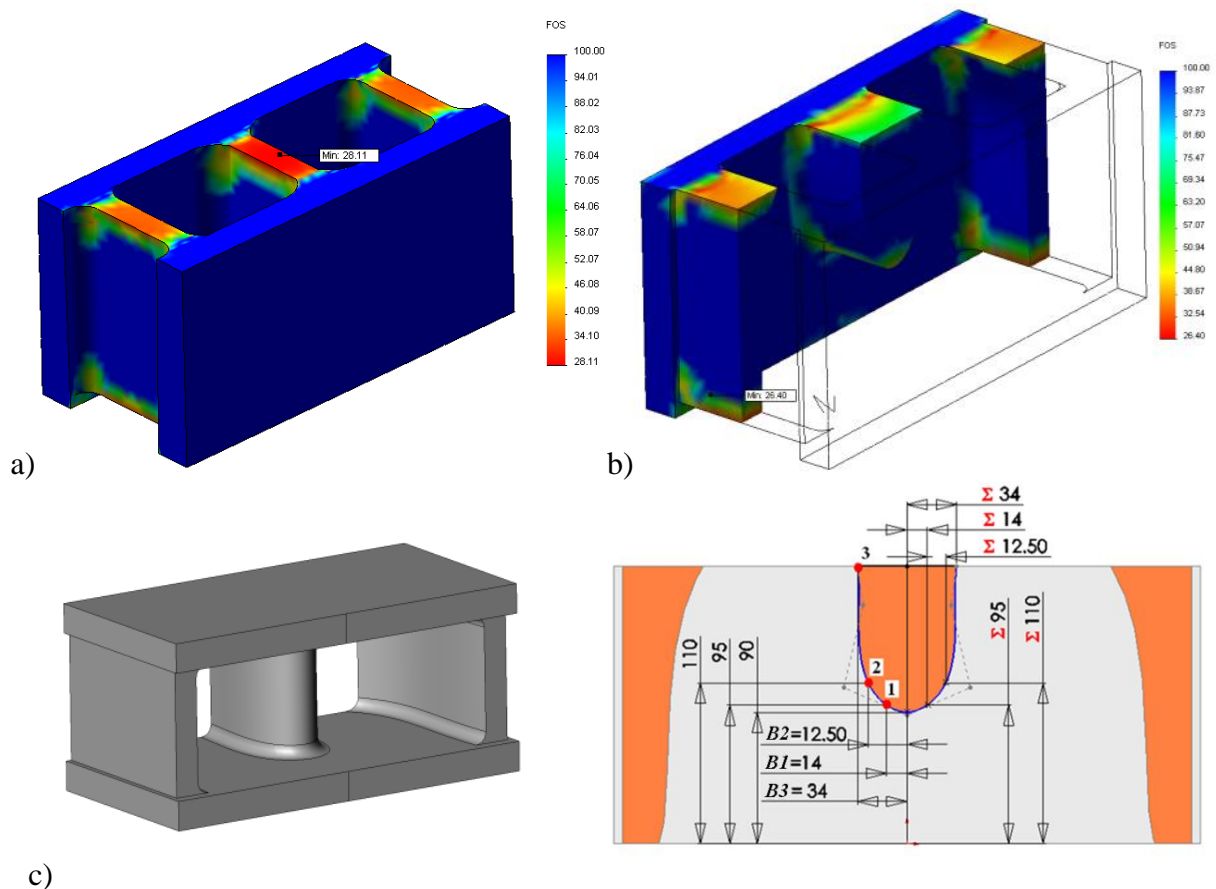


b)

4.14. att. a) Mūris no Columbia Kivi blokiem un b) aprēķinu modelis ar nobīdītiem blokiem

Tālāk precizēsīm bloka modeli stiprības aprēķinu veikšanai. Att. 4.14a parādīts sienas mūrējums, kas veikts ar Columbia Kivi blokiem. Redzams, ka bloki tiek sastiprināti ar mūrjavu joslās, pie tam starp bloku kārtām šķērsvirzienā mūrjava netiek lietota, lai nepasliktinātu sienas siltumizolējošās īpašības. Šādai mūrēšanas tehnoloģijai atbilstošais aprēķinu modelis parādīts att. 4.14b, kurā 7 bloki salikti kopā ar nobīdi un atbalstīti no apakšas pa 30 mm joslām, kuri imitē saķeri ar mūrjavas šuvi. Starp blokiem izveidotas 12 mm platas vertikālas šuves. No augšas uz nākamās kārtas atbalsta virsmu mūrim ir pielikts vienmērīgi izkliedēts 6000 N liels normālais spēks. Sākumā mūris tiek veidots no blokiem,

kuriem ir bāzes izgriezuma forma. Kā parādīja aprēķini, rezultāti šai gadījumā ir atšķirīgi no iepriekš apskatītās mūra shēmas ar precīzi viens virs otra saliktiem blokiem.



4.15. att. FOS koeficienta vērtību sadalījums: a) centrālajam blokam Columbia Kivi mūrī b) alternatīvajam blokam un c) bloks ar alternatīvo izgriezuma formu un tā parametrizācija ar 3 parametriem:  $B1$ ;  $B2$  un  $B3$

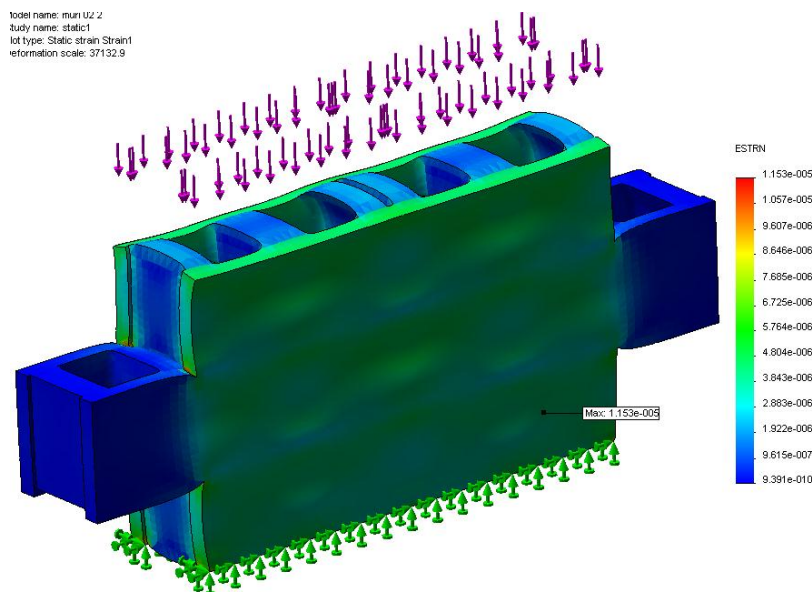
Izmantojot Columbia Kivi 190x190x390 B doba bloka rasējumus, tika izveidots tā precīzs 3D modelis ar bloka masu –19.6 kg. Att. 4.15a ir parādīts FOS koeficienta vērtību sadalījums centrālajam mūra blokam. Minimālais FOS = 28.11 atrodas bloka centrālajā daļā. Ir redzams, ka vairāk tiek noslogotas bloka starpsienas, kur vistīcāmāk parādās bīstamie stiepes spriegumi. Bloka malas, kas uzņem slodzi, ir aptuveni 2 reizes drošākas.

Tagad, izmantojot augstāk aprakstīto metodiku, atkārtojam bloka izgriezuma formas optimizāciju tikai bloka centrālajai daļai. Rezultātā iegūstam formu, kas parādīta att. 4.15c.

FOS koeficienta vērtību sadalījums centrālajam alternatīvajam blokam parādīts att. 4.15b. Iegūtais bloks varētu būt konkurētspējīgs ar analogiska izmēra Columbia Kivi bloku, jo tā masa ir par ~8% mazāka.

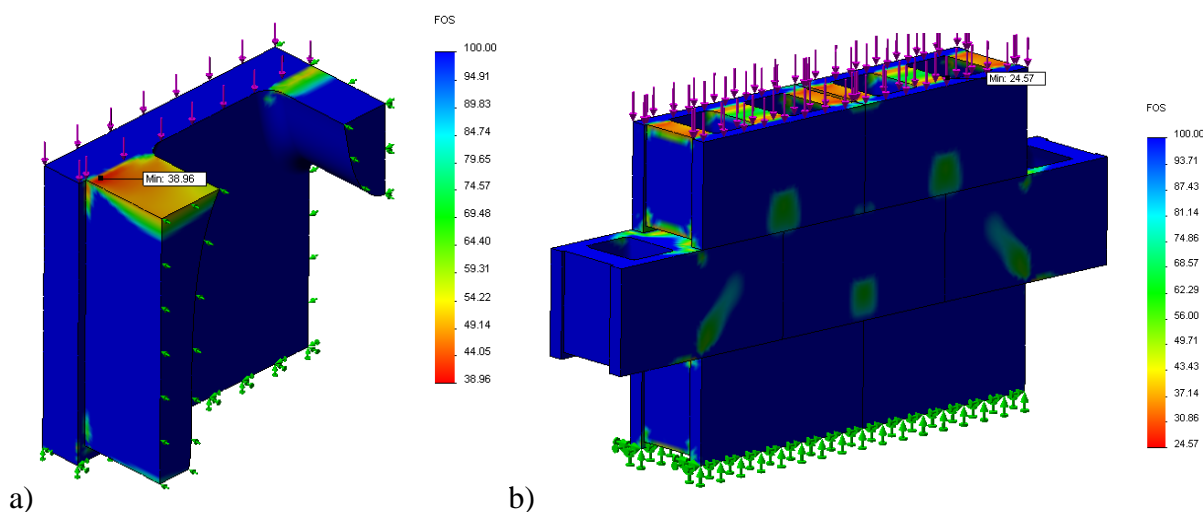
Metodikas pielietojums dod rezultātu, kas prasa komentāru. Bloks, uzņemot slodzi mūrī, deformējas veidojot mucveidīgu ārējo sienu formu (att. 4.16.). Vidējās bloka

šķērssienas uzdevums ir pretoties šādām deformācijām. Faktiski atrastā šķērssienas forma ir veiksmīgs kompromiss starp tās platumu un augstumu.



4.16. att. Alternatīvā bloka sienas deformācijas

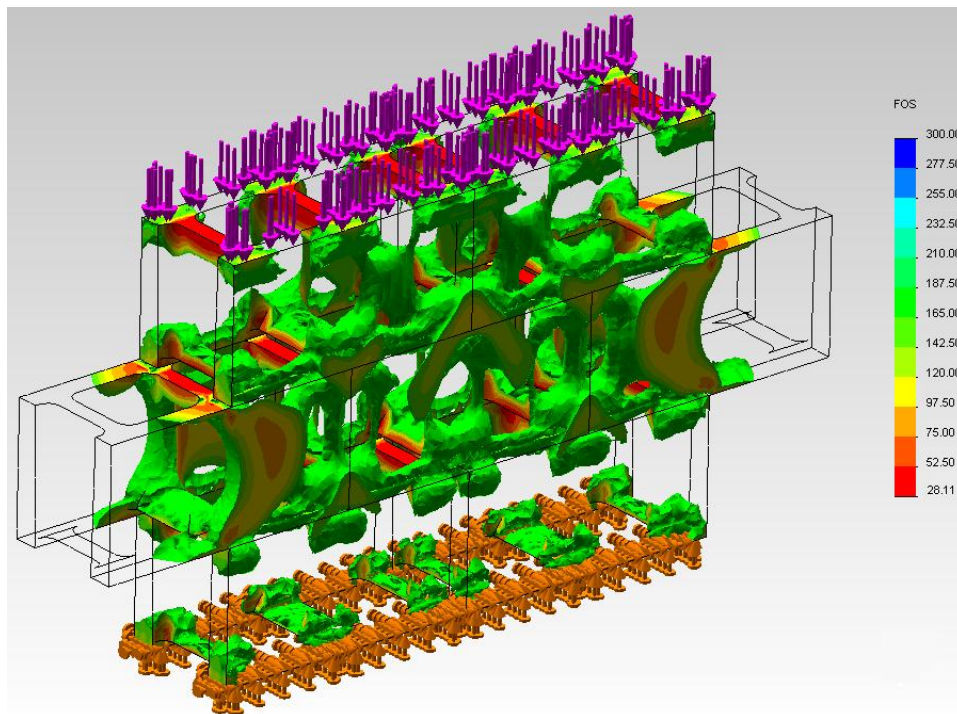
Visbeidzot dažas piebildes par modeļu adekvātumu. Modelējot ir dabiska vēlme maksimāli vienkāršot aprēķina objektu. Piemēram, šajā gadījumā, varētu būt vēlme izmantot objekta simetriju un aplūkot att. 4.17a parādīto bloka ceturtdaļu. Taču kā parāda iegūtie rezultāti, šāda pieeja ne vienmēr dod gaidīto.



4.17. att. FOS vērtību sadalījums: a) bloka 1/4 modelī un b) alternatīvo bloku sienā

Ja aplūkojam att. 4.17b parādīto FOS vērtību sadalījumu mūrī, tad redzam, ka vājā vieta bloka apakšdaļas vidū ir adekvāti novērojama tikai mūra centrālajam blokam, kamēr apakšējās rindas blokos tā vispār nav ieraugāma.

Apskatot Columbia Kivi blokus, FOS sadalījums mūrī ir vēl sarežģītāks. Att. 4.18. parādītas tikai vietas ar  $FOS < 200$ . Ir redzams, ka līdzīgi kā alternatīvā bloka mūrī, zemākā bloku rinda ir mazāk noslogota. Skaidri ir izteikts simetriskais FOS raksturs ap centru, perpendikulāri slodzes pielikšanas virzienam. Bloku starpsienās rodas mazākas FOS vērtības, kas var tikt izskaidrots ar to, ka tur darbojas, galvenokārt, stiepes spriegumi. Tāpēc bloku rindu, kurai ir pielikta izkliedētā slodze, nevar uzskatīt par adekvātu. Tomēr nospriegotais centrālais bloks dod noslodzes ainu, kura varētu būt reālajā mūrī.



4.18. att. FOS koeficienta sarežģītais sadalījuma raksturs Columbia Kivi mūrī

## NODAĻAS SECINĀJUMI

- Izstrādāto formas optimizācijas metodiku var veiksmīgi lietot objektiem veidotiem no trausliem materiāliem.
- Šajā nodaļā ir parādīts, ka formulējot formas optimizācijas uzdevumu, sākotnēji ir svarīgi izstrādāt pēc iespējas detalizētāku modeli, kas adekvāti apraksta objekta uzvedību.
- Tiek atrasta alternatīvā bloka dobuma forma, pie uzdotajiem ierobežojumiem, kuram ir par ~8% mazāka masa, un tikai ~6% mazāka stiprība par Columbia Kivi bloku.
- Lai pilnīgi pārliecinātos par iegūto alternatīvo bloku efektivitāti, ir nepieciešami tālāki papildus pētījumi, kas ņemtu vērā detalizētus reālos ekspluatācijas nosacījumus.

## 5. KONTROLES MĒRINSTRUMENTU PANEĻU ELEMENTU FORMAS OPTIMIZĀCIJA UN DINAMIKAS ANALĪZE

### 5.1. Ievads

Mūsdienās novērtējot jebkuru jaunu tehnisku produktu, tiek ņemta vērā ne tikai tā augsta funkcionalitāte un konkurētspējīga cena, bet arī tādi raksturojumi kā produkta ietekme uz apkārtējo vidi, pievilcīgs dizains un citi. Transportlīdzekļa kontroles mērinstrumentu panelim (KMP) jāizpilda vairākas prasības sākot ar atbilstošu dizainu, kurš ir saskaņots ar pārējo transportlīdzekļa dizainu, jānodrošina atbilstošu rādījumu precizitāti, jābūt ar noteiktu stingumu un masu, jāstrādā droši pie gadījuma ārējās slodzes, tam jābūt noteiktām pašsvārstību frekvencēm, produkta dzīves ciklam jāatbilst standarta ekoloģiskām prasībām un jāapmierina vairākus citus rādītājus.

Parasti KMP pārbaudei veic trīs galvenos testus, ar kuriem nosaka KMP vibronoturību, vibroizturību un trieciennoturību.

### 5.2. Viegļā automobiļa KMP

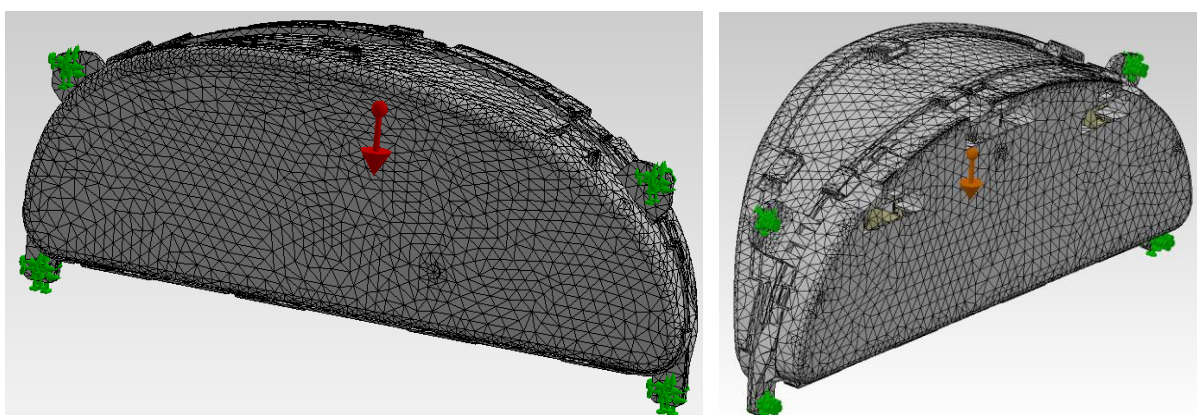
Att. 5.1. ir parādīta vieglā automobiļa projektējamā KMP sākotnējā konstrukcija. Korpusa komponenti izgatavoti ar iesmidzināšanas formēšanas tehnoloģiju, kā materiāls tiem izmantotas plaši izplatītas plastmasas tādas kā ABC un PMMA. Elektroniskai daļai izvēlēti standarta elementi, tomēr elektroniskai platei ir savs oriģinālais dizains.



Att. 5.1. Automobiļa KMP frontālais un aizmugures skats

Pirmajā solī KMP 3D modelis izveidots ar SW programmatūru. Tiek atrastas galvenās inerciālas īpašības, tādas kā masa, inerces momenti, masas centrs, kā arī tilpums, virsmas

laukums un citi. KMP sākotnējai konstrukcijai masa ir  $m_0 = 1.27$  kg, bet plastmasas komponentu tilpums ir  $v_0 = 168000$  mm<sup>3</sup>. KMP konstrukcija ir sarežģīta un satur lielu elementu skaitu (īpaši elektroniskā plate). Tādēļ nākamajā solī KMP konstrukcija tiek vienkāršota līdz 21 komponentam: 5 deformējamās korpusa detaļas un 16 absolūti cietu ķermeņu elementi, kuri apspoguļo iekšējās aparatūras inerciālas īpašības. Pavisam mazie elementi, piemēram, elektroniskie elementi, kuri maz ietekmē KMP dinamiku un stiprību netiek ņemti vērā.



5.2. att. Automobiļa KMP GE modeļa frontālais un aizmugures skats

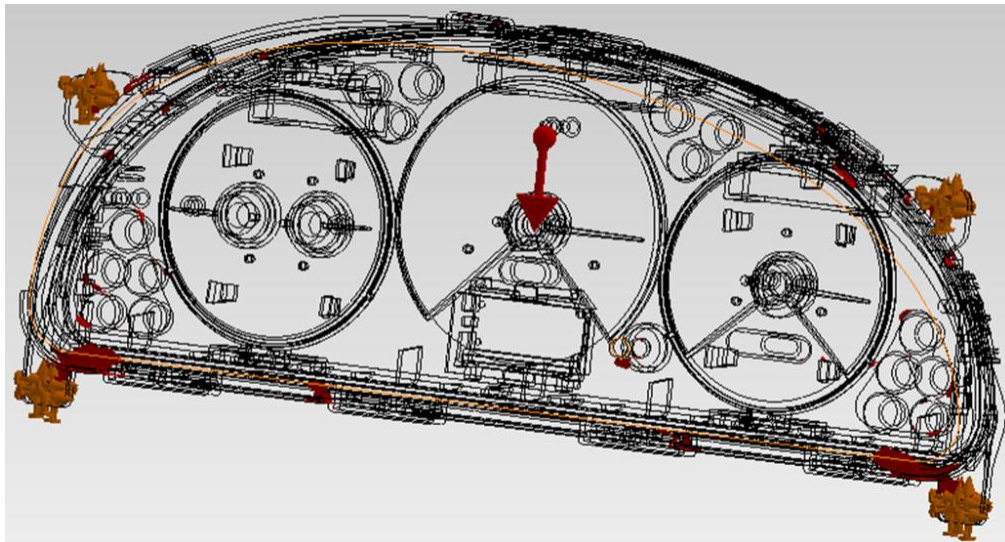
KMP GE modelis ģenerēts ar otrās kārtas elementiem – tetraedriem (~360000 DOF), iegūtais tīklojums parādīts att. 5.2. Lai nodrošinātu KMP sarežģīto formu precīzu diskretizāciju, GE tīkls izveidots ar aktīvu liekuma opciju (maksimālais elementa izmērs ir 7.5 mm, minimālais - 1.6 mm, elementu šķautņu izmēru maksimālā attiecība blakus joslās - 1.5 ). GE analīze tiek izmantota, lai atrastu KMP dažādas atbildes: pašsvārstību frekvences, maksimālos ekvivalentos spriegumus  $\sigma_{vonMises}$  pie trieciena slodzēm; maksimālo pārvietojumus un paātrinājumus raksturīgajos KMP punktos stacionārajos un pārejas vibrācijas procesos pie poliharmoniskām ierosmēm, kā arī attiecīgo raksturojumu dispersijas pie gadījuma svārstībām.

### 5.2.1. Vieglā automobiļa KMP stiprības aprēķini

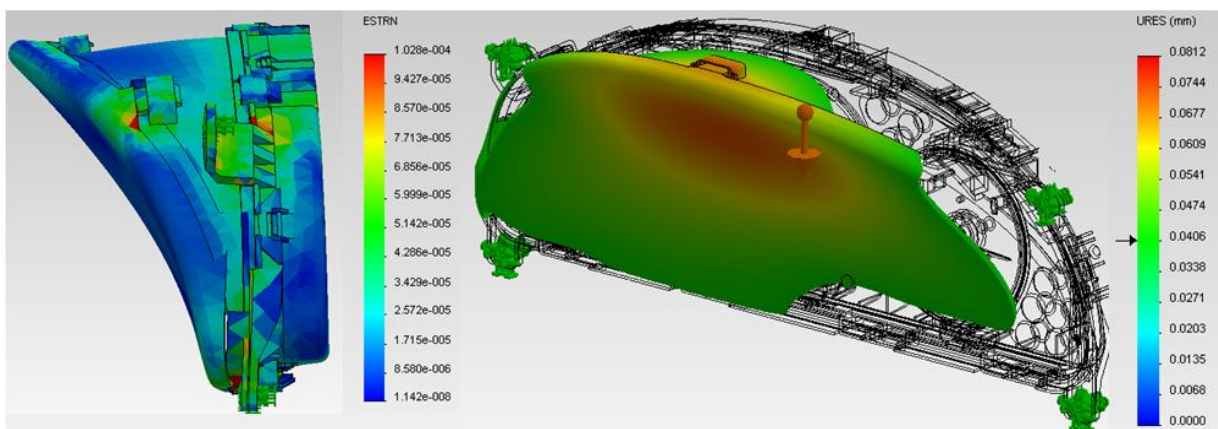
Reālais KMP prototips tiek pakļauts dažādiem dinamiskajiem testiem. KMP vibroizturība pārbaudīta testā pie paātrinājuma līmeņa  $a = 10g$ . Lai nodrošinātu precīzu reālo eksperimentu, parasti ir nepieciešami ievērojami materiālie un laika resursi, īpaši gadījumā,

kad rezultāti jāizmanto optimizācijas uzdevumam. Tāpēc tiek pielietota ekonomiska alternatīva pieeja, kura paredz izmantot GEM.

Att. 5.3. parādīts KMP 3D modelis, kurš ir piestiprināts ar 4 kronšteinu. Tas tiek pakļauts paātrinājumam, kurš darbojas vertikālā virzienā. Sākuma konstrukcijā iegūtie  $\sigma_{vonMises}$  parādīti att. 5.3. Ar sarkano krāsu ir parādītas tikai tās KMP vietas, kur  $\sigma_{vonMises}$  pārsniedz 3 MPa. Varam redzēt, ka maksimālie spriegumi koncentrēti uz zemākajiem kronšteinu un pie caurspīdīgā ekrāna stiprinājumiem: tur spriegumu līmenis sasniedz 4 MPa. Pārējā KMP daļa tiek nospriegota relatīvi mazāk. KMP deformācijas forma sānu skatā un summārie pārvietojumi URES parādīti att. 5.4. Varam redzēt, ka maksimālie URES parādās augšējā KMP daļā, bet lielākās deformācijas izveidojas pie caurspīdīgā stikla stiprinājuma, kur rodas stiepes spriegumi.



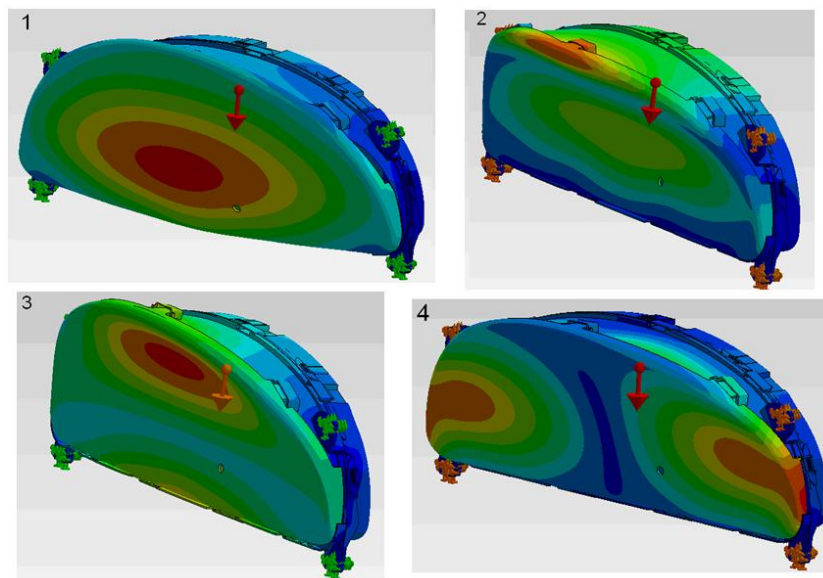
5.3. att. Noslogotākās KMP daļas pie trieciena slodzes eksperimenta



5.4. att. KMP deformācijas (pa kreisi) un rezultējošie pārvietojumi (pa labi) no trieciena slodzes

## 5.2.2. KMP frekvenču analīze

KMP frekvenču aprēķinam tiek izmantots tāds pats GE tīklojums, kā pie stiprības aprēķiniem. Kontakti starp KMP komponentiem tiek traktēti tā it kā tie būtu salīmēti. Lai noteiktu pirmās 10 KMP pašsvārstību frekvences, tiek izmantots SW Simulation skaitliskais risinātājs FFEPlus. Iegūtie rezultāti apkopoti tabulā 5.1, kur redzams, ka pirmā KMP pašsvārstību frekvence ir diezgan augsta  $f_1=140.14$  Hz. Atrastās pirmās 4 zemākas pašsvārstību formas parādītas att. 5.5. Varam novērot lielu frekvenču blīvumu - pirmās 10 frekvences atrodas diezgan nelielā intervālā un katra no šīm frekvencēm varētu būt nozīmīga pie KMP iespējamām vibrācijām.



5.5. att. KMP pirmās 4 zemākās pašsvārstību formas

5.1. Tabula  
KMP pašsvārstību frekvences

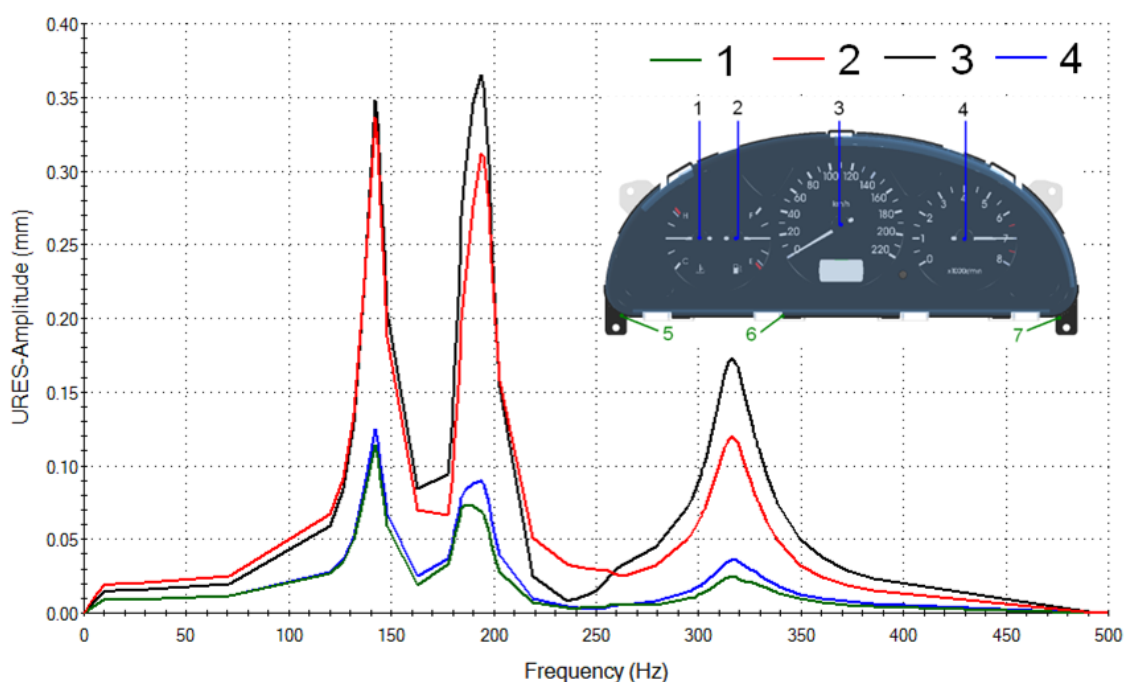
No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Frekvence [Hz]	140.14	182.09	194.28	241.69	248.28	296.52	308.43	314.49	328.31	332.43

## 5.2.3. KMP stacionāro svārstību analīze pie harmoniskas ierosmes

KMP vibrāciju amplitūdas tiek aprēķinātas pie harmoniskas ierosmes frekvenču intervālā: 1-500. Hz. Harmoniskā ierosme ar amplitūdu  $a = 10g$  darbojas uz KMP vertikālā

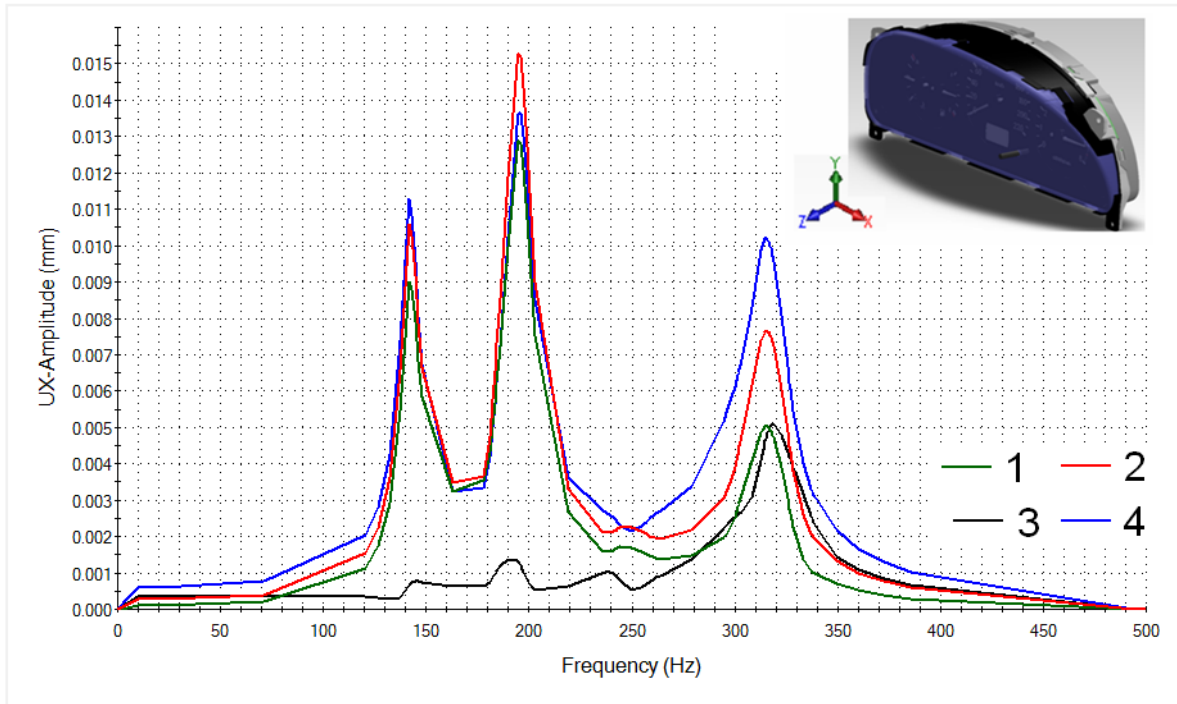
virzienā. Disipācijas koeficienti tiek ņemti, vadoties no iepriekšējiem rūpnīcas praktiskajiem eksperimentiem.

Lai samazinātu aprēķinu laiku, atbildes tiek rēķinātas tikai izvēlētos 4 punktos uz KMP mērīšanas ierīcēm (att. 5.6., punkti 1-4). Kā jau tika iepriekš konstatēts pie statistiskajiem aprēķiniem, maksimālie spriegumi parādās KMP apakšējos kronšteinos un pie caurspīdīgā ekrāna stiprinājuma vietas (att. 5.3.). Tāpēc spriegumu piefiksēšanai tiek definēti papildus 3 punkti (att. 5.6., punkti 5-7).

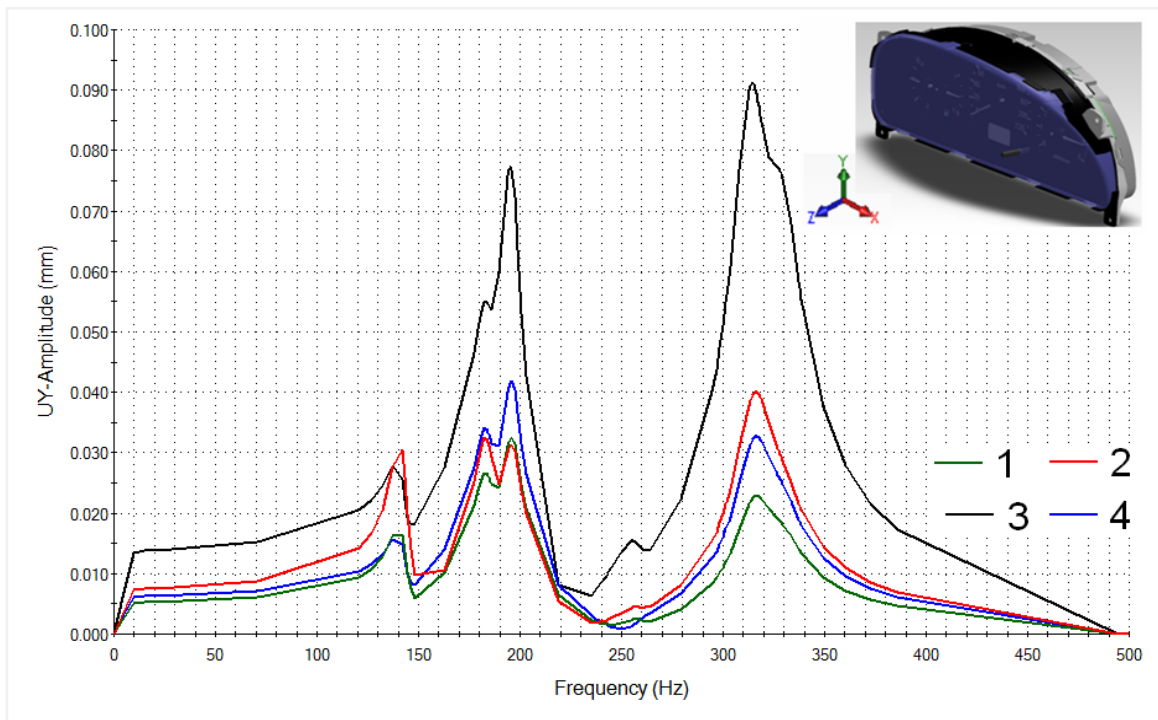


5.6. att. Summāro pārvietojumu amplitūdas 4 definētajos KMP punktos

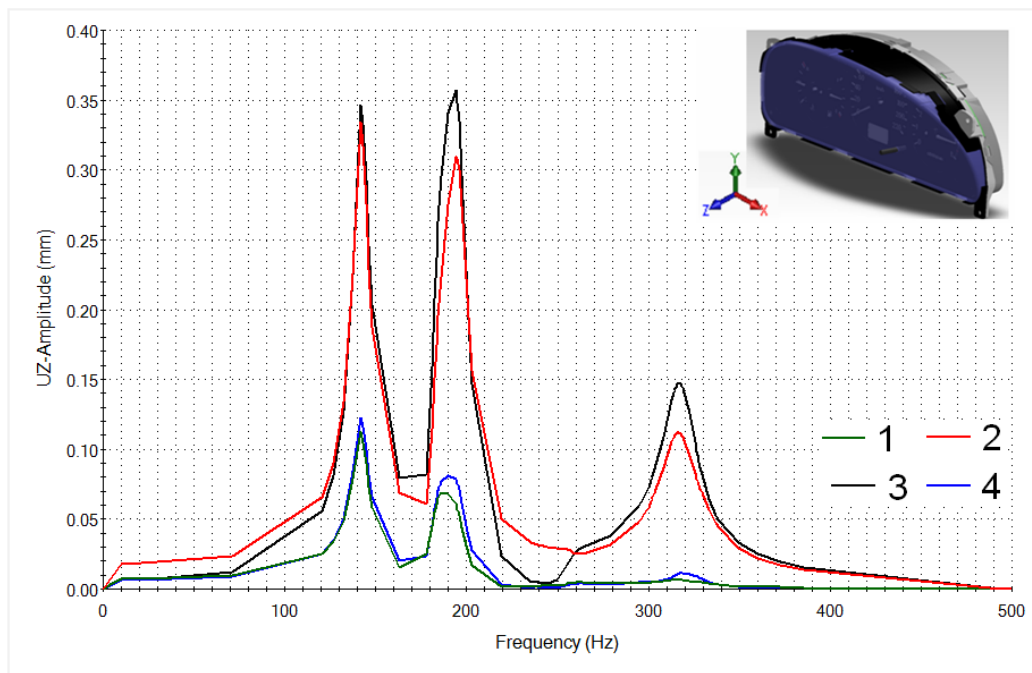
Summāro pārvietojumu amplitūdas parādītas att. 5.6. Varam novērot, ka būtiskas KMP vibrācijas parādās pie pirmās, trešās un devītās pašvārstību frekvences. Otrā frekvence nerada pīķi. Ir skaidrs, ka lielākās amplitūdas veidojas punktos 2 un 3, kas atrodas tālāk no KMP stiprināšanas kronšteiniem. Att. 5.7., 5.8. un 5.9. tiek parādīti pārvietojumu komponenti X, Y un Z virzienos. Lielākās vibrāciju amplitūdas darbojas Z virzienā pie pirmās un trešās pašvārstību frekvences un sasniedz maksimālo vērtību 0.355 mm. Salīdzinot kvazi – statisko aprēķinu (att. 5.4.) ar dinamisko (att. 5.6.), varam novērot, ka amplitūdas pie dinamiskās iedarbes ir ~4.5 reizes lielākas.



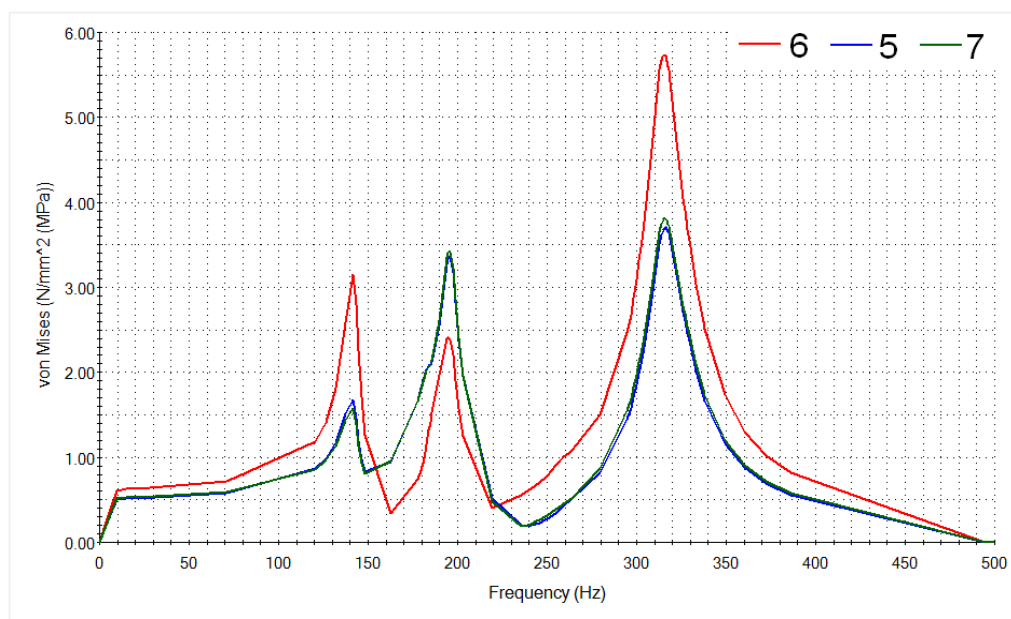
5.7. att. UX pārvietojumu amplitūdas 4 definētajos KMP punktos



5.8. att. UY pārvietojumu amplitūdas 4 definētajos KMP punktos



5.9. att. UZ pārvietojumu amplitūdas 4 definētajos KMP punktos



5.10. att. Ekvivalentie spriegumi  $\sigma_{vonMises}$  3 definētajos KMP punktos

Att. 5.10. ekvivalentie spriegumi  $\sigma_{vonMises}$  tiek parādīti 10-500 Hz frekvenču intervālā. Lielākie spriegumi rodas 6. punktā, kur caurspīdīgais ekrāns ir piestiprināts pie KMP korpusa. Tiek iegūts, ka pie 9 pašfrekvences ir ~1.45 reizes lielāki spriegumi nekā iepriekšējā kvazi – statistiskajā aprēķinā (att. 5.3.). Ievērojumi spriegumi parādās arī starp

kronšteinu un KMP korpusu. Atrasts, ka punktos 5. un 7. (att. 5.6. (parādīti punkti) un 5.10.) materiāls pakļauts stiepes spēkiem.

### 5.2.4. KMP pārejas procesu analīze

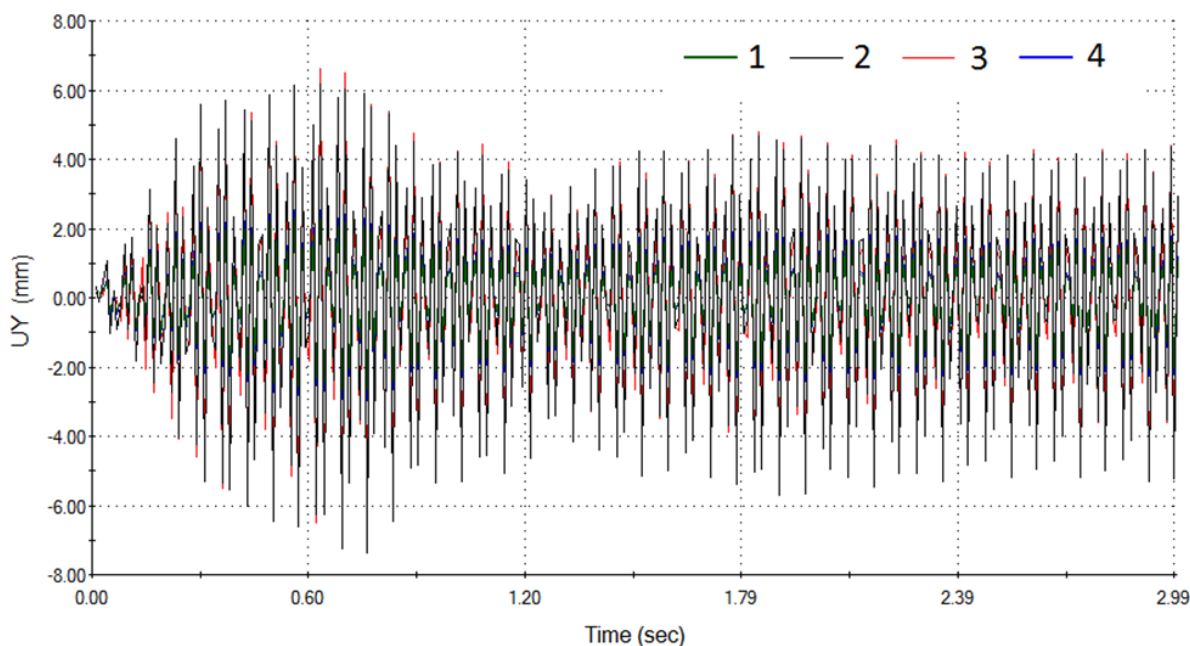
Tiek veikta KMP pārejas procesu analīze. Tiek pieņemts, ka KMP 4 kronšteini stiprinājumu vietās pakļauti vertikālām poliharmoniskām ierosmēm:

$$f(t) = A \sin(\omega t + \alpha) + B \cos(2\omega t + \beta), \quad (5.1)$$

kur  $\omega$  ir frekvence, bet  $A$  un  $B$  ir 50 un 40 un attiecīgi  $\alpha = \pi/2$ ;  $\beta = 0$ .

Kustības vienādojumu integrēšanai tiek izmantota Neimarka metode [Akin, 2010] ar soli 0.01 s no nulles sākuma noteikumiem.

Vertikālie pārvietojumi parādīti att. 5.11. Varam novērot, ka lielākās vertikālo pārvietojumu amplitūdas ir 3 punktā, kurš atrodas tālāk no kronšteiniem.

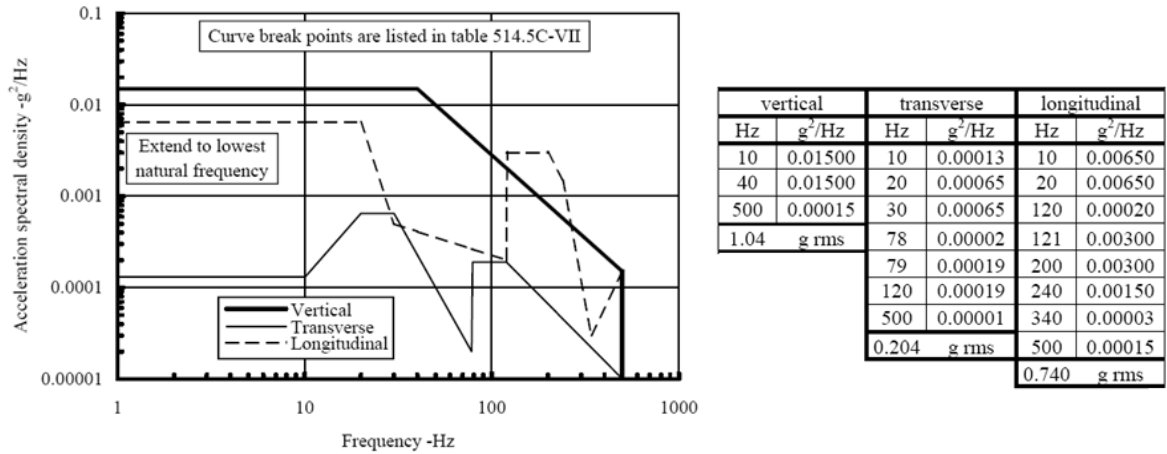


5.11. att.  $UY$  pārvietojumi 4 definētajos KMP punktos

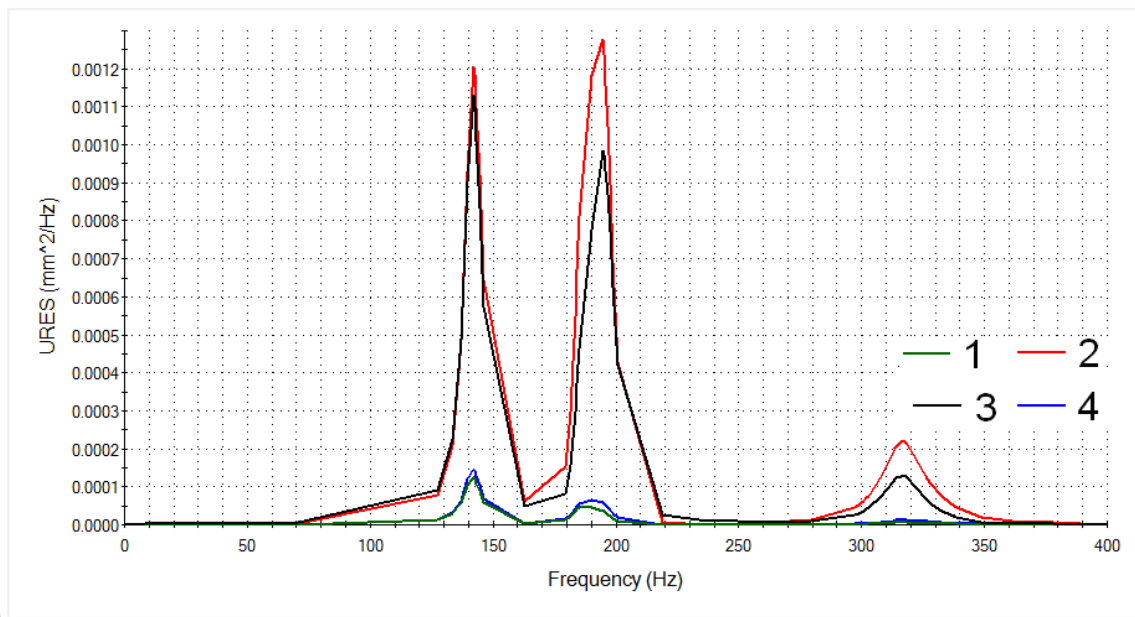
### 5.2.5. KMP stacionāro gadījuma svārstību analīze

Gadījuma svārstību analīze tiek izmantota, lai atrastu atbildes no gadījumu ierosmes, automobilim braucot pa negludu ceļu. Ierosmes tiek aprakstītas ar spektrālā blīvuma funkciju (SBF) (att. 5.12a), kura tiek paņemta no standarta Standard MIL-STD-810F(2000) un atbilst

šosejas ceļam. SBF tiek uzdots ar 3 raksturojošiem punktiem 10-500 Hz frekvenču diapazonā. Mūsu gadījumā ir apskatīta tikai ierosme, kura darbojas uz KMP kronšteinu stiprinājuma vietām vertikālā virzienā (att. 5.12a parādītas ierosmes arī šķērsvirzienā un garenvirzienā).



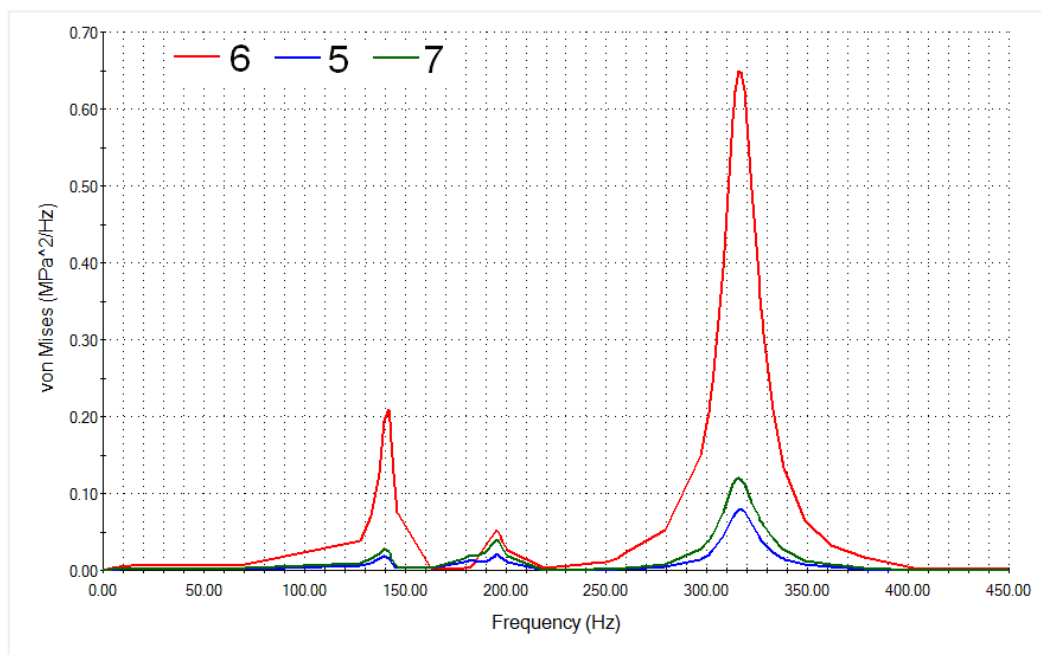
a)



b)

5.12. att. a) Šosejas SBF [Standard MIL-STD-810F(2000)] un b) summārā pārvietojuma SBF definētos KMP punktos

Att. 5.12b varam redzēt, ka pie 1, 3 un 9 pašsvārstību frekvenču vērtībām ir ievērojamas pārvietojumu SBF amplitūdas. Salīdzinot  $\sigma_{vonMises}$  SBF attiecību punktā 6 ar punktiem 5 un 7 (att. 5.10. un 5.13.), varam novērtēt, ka 9 pašsvārstību frekvences dominēšana palielinās pie gadījuma svārstību analīzes.



5.13. att. Ekvivalento spriegumu  $\sigma_{vonMises}$  SBF definētos KMP punktos

### 5.2.5. Vieglā automobiļa KMP analīzes rezultātu kopsavilkums

- Atrastas pirmās 10 vieglā automobiļa KMP pašsvārstību frekvences. Rezultāti parāda, diezgan augstu frekvenču blīvumu 140 – 332 Hz intervālā .
- Veikti KMP dinamiskie aprēķini un noteiktās dinamiskās atbildes svarīgākajos KMP punktos. Harmoniskas ierosmes analīzes gadījumā tiek parādīts 9. frekvences nozīmīgums KMP vertikālās un horizontālajās vibrācijās.
- Veikta pārejas procesu analīze un atrasti kustību likumi poliharmoniskas ierosmes gadījumā. Tiek atrastas pārvietojumu un spriegumu SBF svarīgākajos KMP punktos, veicot gadījuma svārstību aprēķinus.
- Rezultātus un iegūto pieredzi var izmantot, veicot autobusa KMP formas optimizāciju.

### 5.3. Autobusa KMP formas optimizācija

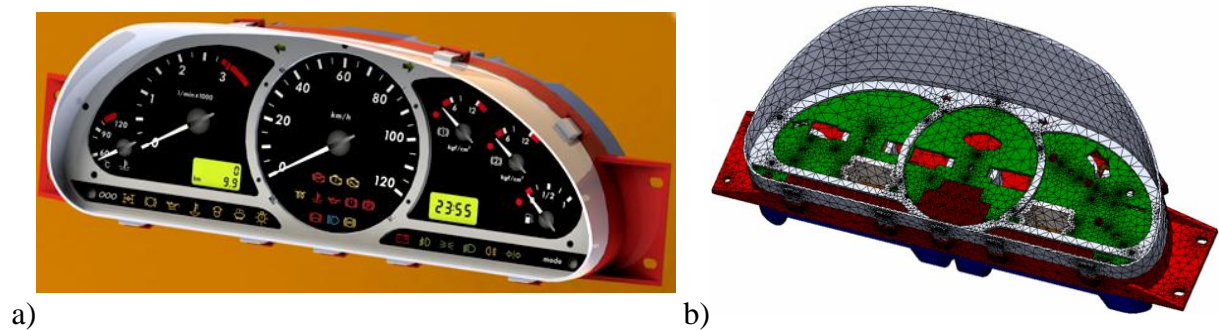
Att. 5.14a parādīta jaunā KMP konstrukcija AS Amo Plant autobusam.

Optimizācijas KMP problēmu varam definēt sekojošā veidā:

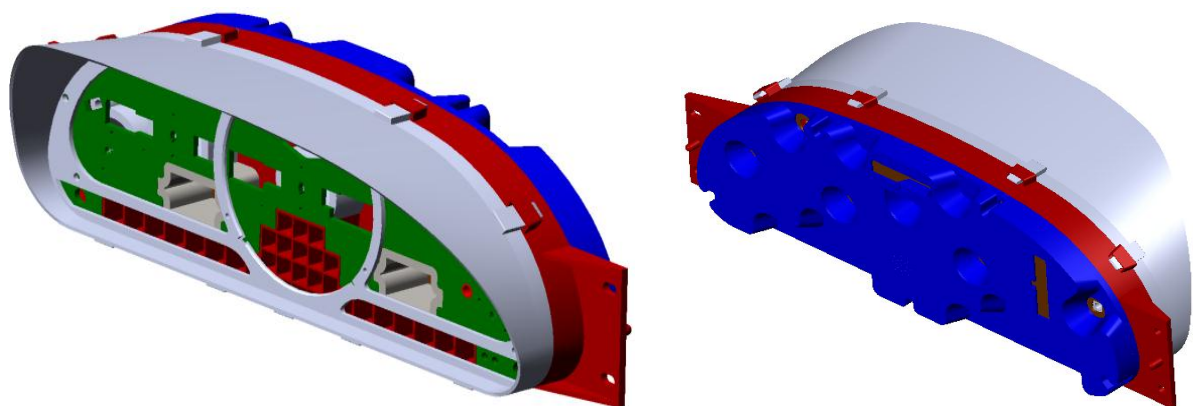
$$\min_x F(x) = [F_1(x), F_2(x), \dots, F_k(x)]^T \quad (5.2)$$

Pie ierobežojumiem  $g_j(x) \leq 0, j=1, 2, \dots, m$ , un  $h_l(x) = 0, l=1, 2, \dots, e$ ;

kur  $k$  ir mērķa funkciju  $F_i$  skaits;  
 $m$  ir ierobežojumu skaits nevienādību veidā;  
 $e$  ir ierobežojumu skaits vienādību veidā;  
 $x \in E^n$  ir  $n$  optimizācijas parametru vektors



5.14. att. Autobusa KMP a) sākuma konstrukcija b) GE modelis



5.15. att. Autobusa KMP vienkāršots 3D modelis

Izmantojot SIA „Merpro” Autocad rasējumus, izveidots KMP SW 3D-modelis. Lai vienkāršotu GE aprēķinu, tiek pieņemts, ka KMP 3D-modelis sastāv no 6 galvenajiem korpusa komponentiem un 12 absolūti cietiem ķermeņiem (att. 5.15.), ar kuriem tiek ievērotas komplektējošo aparātu masu inerciālās īpašības. Korpusa komponenti izgatavoti no ABC 2020 plastmasas, izmantojot iesmidzināšanas formēšanas tehnoloģiju. Pirms dinamikas modelēšanas tiek pārbaudīta modeļa sakritība ar reālo KMP (KMP inerciālie raksturojumi doti tabulā 5.2.).

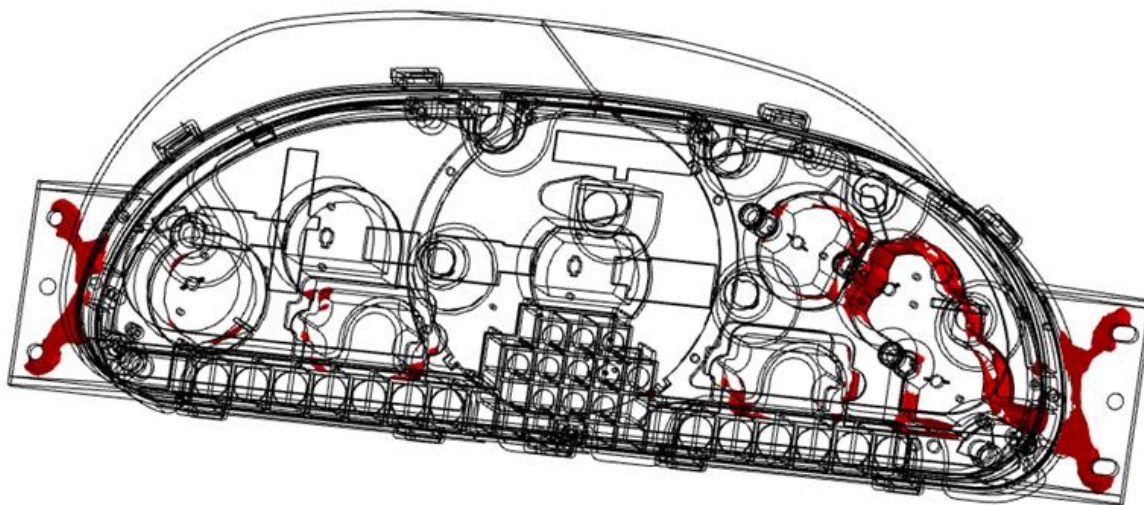
Tālāk autobusa KMP vienkāršotajam modelim tiek ģenerēts ar analogiskām opcijām kā vieglā automobiļa KMP tīklojums (~630000 DOF), kurš parādīts att. 5.14b.

5.2.Tabula  
Autobusa KMP raksturojumi

3D Modeļa masa = 1.024189 kg, Reāla masa ~ 1 kg
Tilpums $V = 0.000778 \text{ m}^3$
Virsmas laukums = $0.730695 \text{ m}^2$
Masas centra koordinātes [ m ]: $X = 0.053455$ $Y = 0.031768$ $Z = -0.036300$
Galvenie inerciālie momenti [ $\text{kg m}^2$ ] $P_x = 0.003885$ $P_y = 0.011049$ $P_z = 0.013953$

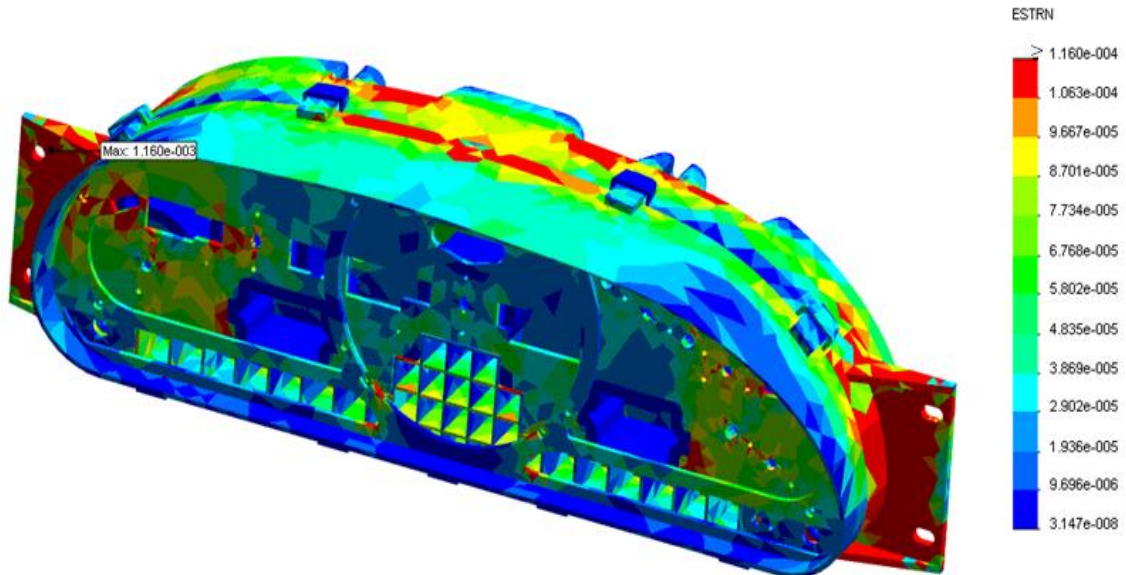
### 5.3.1. KMP stiprības aprēķini

Att. 5.15 pie parādīts KMP 3D modelis, kurš ir piestiprināts ar 2 kronšteinu. Tas tiek pakļauts paātrinājumam, kurš darbojas vertikālā virzienā. Sākuma konstrukcijai iegūtie  $\sigma_{vonMises}$  parādīti att. 5.16. Ar sarkano krāsu tiek parādītas tikai tās KMP zonas, kur  $\sigma_{vonMises}$  pārsniedz 1 MPa. Varam redzēt, ka maksimālie spriegumi koncentrēti uz kronšteinu, un tie sasniedz vērtību 3 MPa. Šī vērtība ir nepieļaujami liela, jo šeit jāņem vērā slodzes cikliskais raksturs (materiāla nogurums), kā arī plastmasas drošības koeficientu. Protams, pie dinamiskas slodzes šie spriegumi palielināsies.



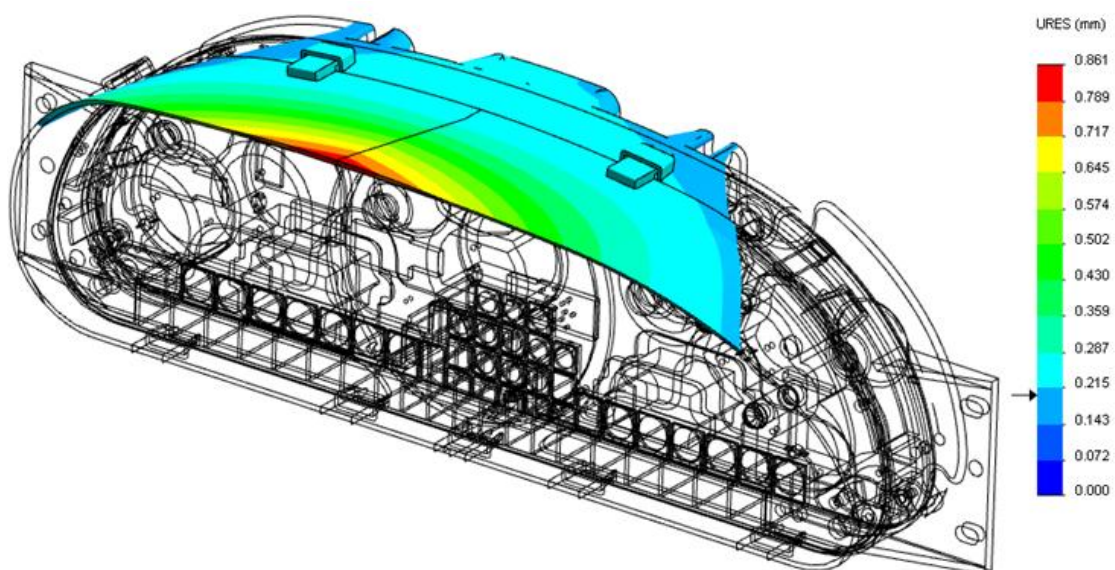
5.16. att. Noslogotākās KMP daļas trieciena slodzes gadījumā

Lielākie pārvietojumi *URES* parādījās KMP centrā (att. 5.18.), kur attālums no kronšteina ir maksimālais. Maksimālo *URES* vērtību (0.861 mm) var uzskatīt par apmierinošu.



5.17. att. KMP deformācijas no trieciena slodzes

KMP deformācijas no trieciena slodzes parādītas att. 5.17. Ir redzams, ka lielākās vērtības ir ap kronšteina stiprināšanas caurumiem. Protams, mainot kronšteina biezumu, var panākt lielāku tā stiprību. Tomēr, lai dabūtu racionālāko risinājumu, jāpievērš uzmanību arī kronšteina formai, ar kuru ir iespējams panākt materiāla efektīvāku noslodzi.



5.18. att. KMP summārie pārvietojumi *URES* no trieciena slodzes

### 5.3.2. Autobusa KMP frekvenču analīze

Autobusa KMP frekvenču aprēķinam tiek izmantots tāds pats GE tīklojums kā pie stiprības aprēķiniem. Analogiski kā pie automobiļa KMP analīzes atrastas pirmās 10 KMP pašsvārstību frekvences sākumā konstrukcijai (tab. 5.3. pa kreisi). Autobusa KMP formas optimizācijai izmantosim tikai fundamentālo pašsvārstību frekvenci, kuru pēc ražotāja prasībām nepieciešams paaugstināt līdz 120 Hz (salīdzinājumā ar automobiļa KMP tā ir par 29 % zemāka).

5.3. Tabula  
KMP pašsvārstību frekvences

№	KMP sākumā konstrukcijai	Jaunai KMP konstrukcijai
1	99,39	122,65
2	150,81	166,47
3	222,08	233,24
4	230,9	254,51
5	264,6	270,28
6	317,71	367,86
7	363,23	409,5
8	395,18	418,51
9	446,07	488,53
10	478,14	516,69

### 5.3.3. KMP ilgspējības analīze

Šodien jauna produkta ietekme uz apkārtējo vidi tā dzīves ciklā ir īpaši aktuāla. Tam tiek pievērsta liela uzmanība un līdz ar to produktam jānodrošina vairākas prasības. Tiek ievēroti vairāki rādītāji, kuri nosaka ne tikai produkta pārstrādājamību, bet arī citi, tādi kā transportēšanas izdevumi, enerģijas efektīva izmantošana gan ražošanai gan ekspluatācijai un vairāki citi.

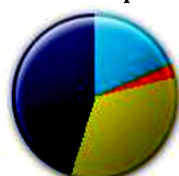
Pēdējā laikā ir parādījušās iespējas veikt jebkura jauna produkta ilgspējības analīzi [Russ, 2010] pirms to ražošanas sākšanas un prognozēt svarīgos faktorus ar datora izveidotiem modeļiem. Ar pieejamo SW Sustainability ir iespējams sarēķināt projektējamā KMP dzīves cikla novērtējumu, kurš iekļauj tādus faktorus, kā oglekļa oksīdu izmeši, ūdens eitrofikācija, gaisa paskābināšana, summārā patērētā enerģija un citus apkārtējo vidi

ietekmējošus faktoros, kuri parādās KMP dzīves ciklā, zinot produkta materiālu, ražošanas tehnoloģiju, transportēšanas, izmantošanas un utilizēšanas nosacījumus. KMP korpusa komponentiem tiek atrasti vairāku svarīgu raksturojumu lielumi (att. 5.19.), kurus var izmantot salīdzinājumam ar citu KMP konstrukciju raksturlielumiem.

<b>Model Name:</b>	<b>Panelis</b> SW2.SLDPRT	<b>Material:</b> PVC Rigid	<b>Volume:</b> 1.77E+5 mm <sup>3</sup>	<b>Manufacturing Type:</b> Injection Molded
			<b>Surface Area:</b> 1.95E+5 mm <sup>2</sup>	
			<b>Weight:</b> 230.47 g	

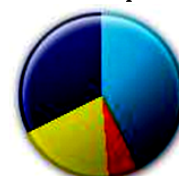
#### Environmental Impact

##### Carbon Footprint



0.84 kg CO<sub>2</sub>

##### Water Eutrophication



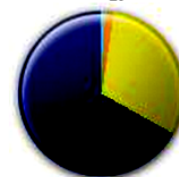
3.66E-4 kg PO<sub>4</sub>

##### Air Acidification



3.27E-3 kg SO<sub>2</sub>

##### Total Energy Consumed



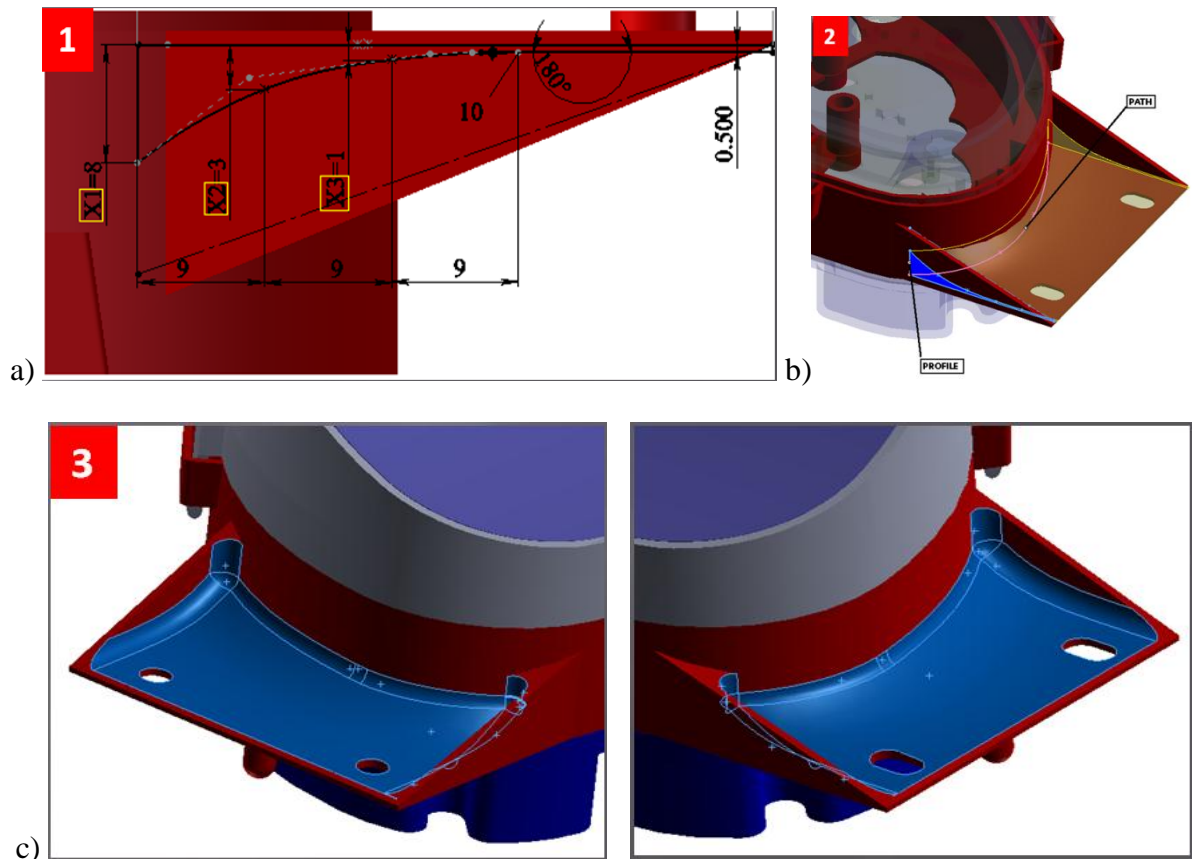
17.79 MJ

5.19. att. KMP ietekme uz apkārtējo vidi produkta dzīves cikla laikā

### 5.3.4. Autobusa KMP kronšteinu formas optimizācija

Viens no iespējamajiem variantiem kā var palielināt autobusa KMP stiprību, ir uzlabot tā kronšteinu formu. Ņemot vērā to, ka automobiļa KMP 4 kronšteinu ir daudz efektīvāka forma un izvietojums (att. 5.1. un att. 5.14.), un rezultāta slodzes tiek uzņemtas efektīvāk, tiek pieņemts, ka autobusa KMP kronšteinus ar konstanto biezumu var uzlabot, izmantojot izstrādāto metodiku. Tiek atļauts mainīt KMP kronšteina šķērsriezuma biezumu no vienas kronšteina puses. Tad ir iespējams mainīt šķērsriezuma biezumu, samazinot iepriekš atrastos (att. 5.16.) lielos spriegumus tajā. Kronšteina šķērsriezums tiek uzdots ar mainīgu biezumu: 3 NURBS atbalsta punktiem (att. 5.20a), kuri nosaka lielāku pielikto materiāla daudzumu 1.5 mm biežajai kronšteina pamatkonstrukcijai. Par optimizācijas parametriem tiek pieņemtas šo punktu vertikālās koordinātes, kurām atļauts mainīties sekojošos diapazonos:  $3 \leq X1 \leq 8$ ;  $2 \leq$

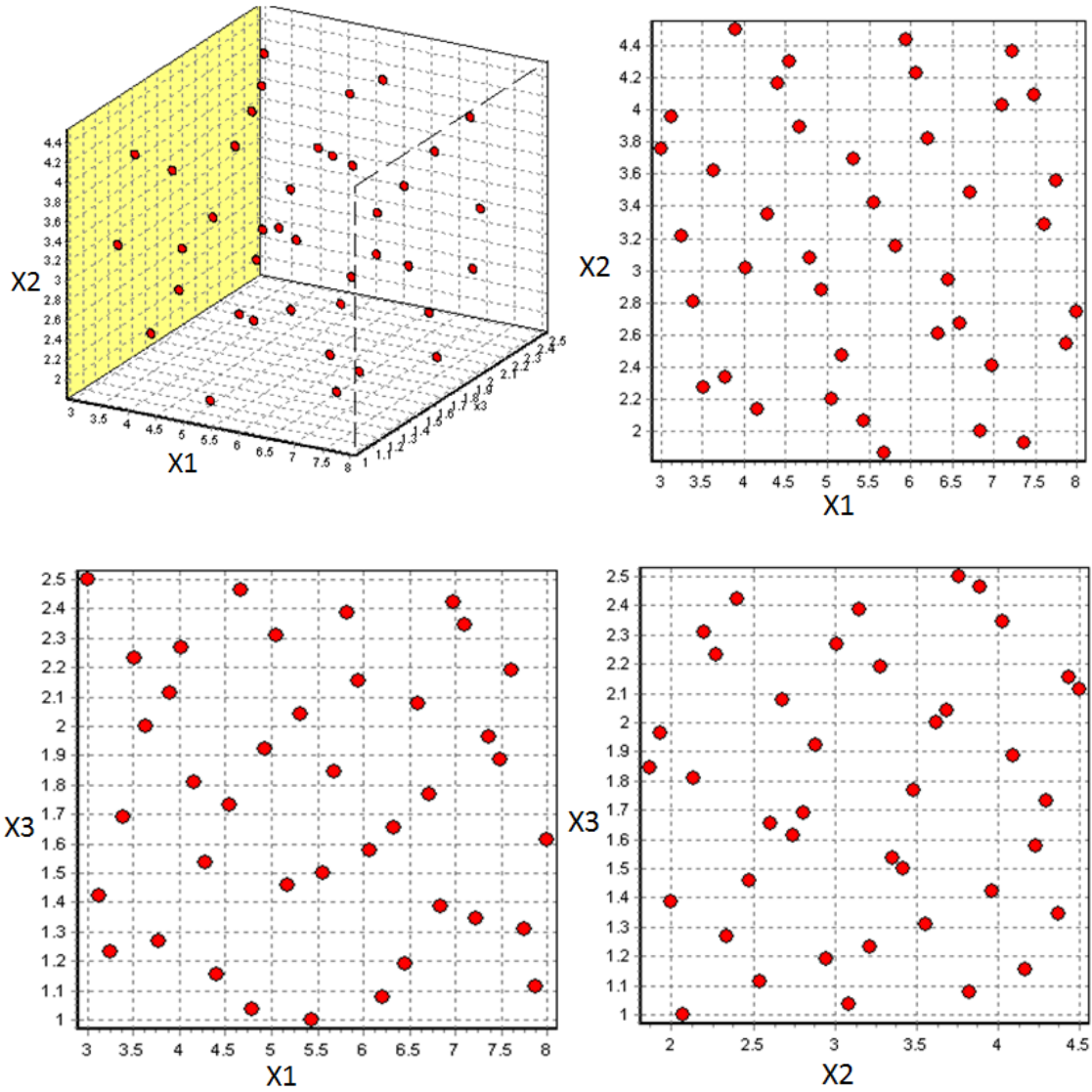
$X_2 \leq 4.5$ ;  $1 \leq X_3 \leq 2.5$  mm. Kad šķērsriezuma kontūrs ir uzdots, tiek veidota 3D forma, izmantojot uzdoto ceļa līkni gar kronšteinu (att. 5.20b). Tālāk tāda paša forma tiek izveidota arī otram kronšteinam pretējā KMP pusē.



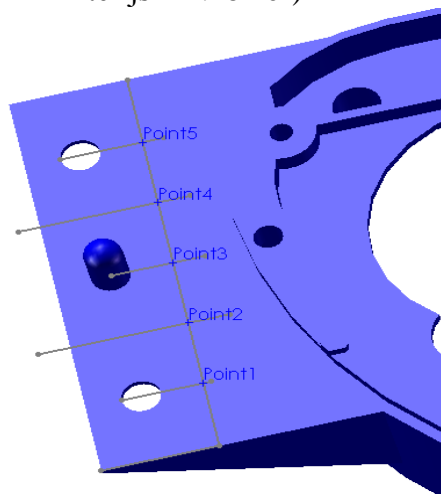
5.20. att. Kronšteina formas uzdošanas 3 etapi a) šķērsriezuma formas definēšana ar NURBS; b) 3D – formas izveidošana caur ceļa līkni; c) papildus noapaļojumi stūros un rezultāta formas

Tad tiek veidots LH eksperimentu plāns 3 faktoriem un 40 mēģinājuma punktiem vidējās kvadrātiskās distancēs (MSD) kritēriju (att. 5.21.). Katram eksperimentam tiek piešķirts numurs. Eksperimentu plāns ir parādīts 3 dimensiju telpā, gan arī katrā šķēluma plāknē. Ar  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  tiek apzīmētas NURBS atbalsta punktu vertikālas koordinātes, kuras nosaka kronšteina formu.

Šajā uzdevumā atbildes aproksimācijas kvalitātes rādītāji tiek parādīti att. 5.24: 1-5) maksimālie  $\sigma_{vonMises}$ , kuri piefiksēti 5 kronšteina punktiem att. 5.22. (no KMP stiprības uzdevuma), 6) maksimālie  $URES$  pārvietojumi (no KMP stiprības uzdevuma), 7) KMP plastmasas komponenta ar kronšteinu tilpums; un 8) pašsvārstību frekvences (no KMP frekvenču aprēķina).

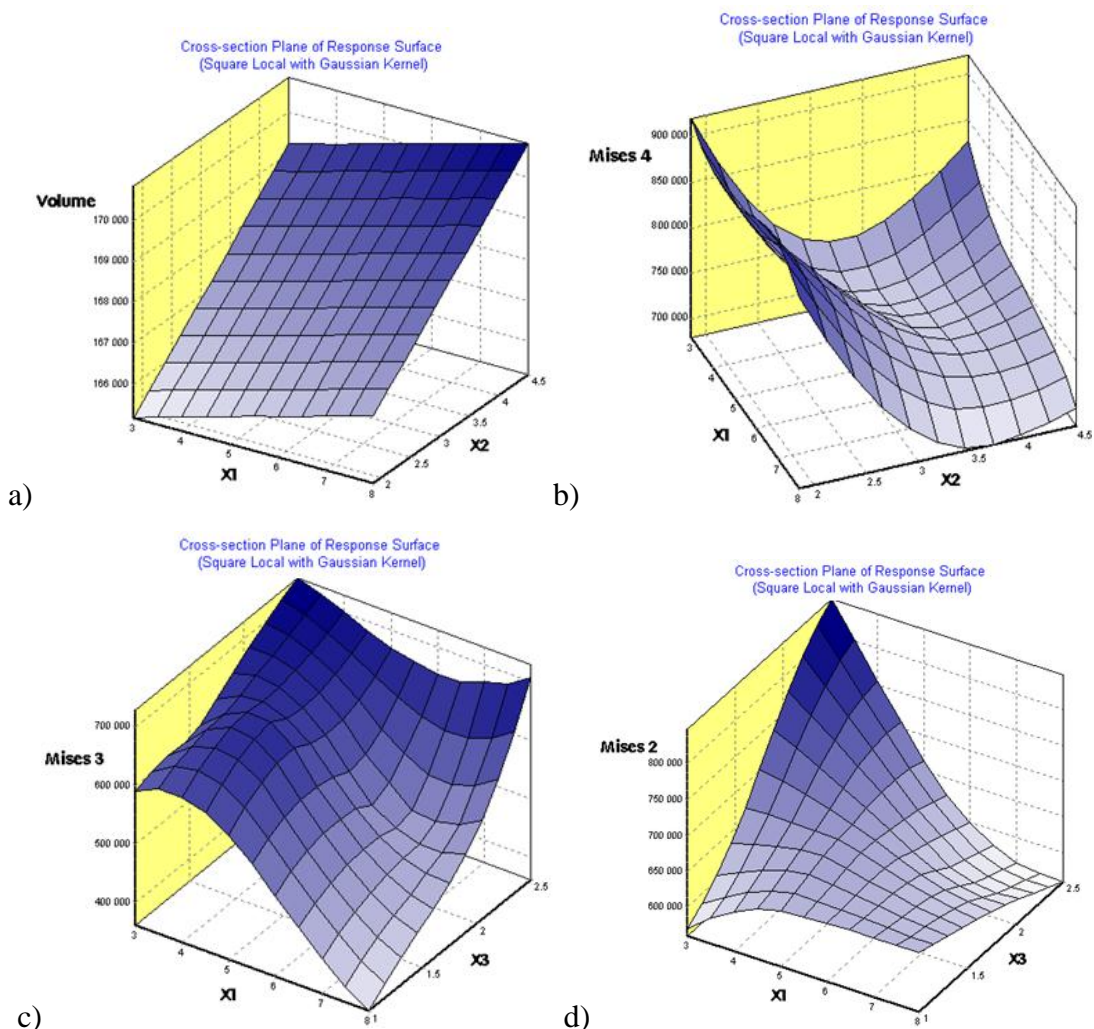


5.21. att. Latīņu hiperkuba eksperimentu plāns KMP formas optimizācijas problēmai (MSD kritērijs =  $1.18 \cdot 10^9$ )



5.22. att. Ekvivalento spriegumu  $\sigma_{vonMises}$  piefiksēšanas 5 vietas uz KMP kronšteina

Att. 5.23. ir redzams, ka  $\sigma_{vonMises}$  ir nepieciešamas augstākas kārtas aproksimācijas, nekā tilpumam, jo starp NURBS parametriem un tiem ir daudz sarežģītāka atkarība. Tilpuma atbildes aproksimācijai ir pietiekoša lineāra aproksimācija. Bet kā jau bija parādīts iepriekšējās nodaļās, lokālā polinomiālā aproksimācija var būt veiksmīgi izmantota sarežģītu funkciju atbilžu aproksimācijai. Labākā aproksimācija pēc krosvalidācijas kļūdas tiek iegūta KMP komponenta tilpumam, pēc tam maksimāliem pārvietojumiem *URES* un pašsvārstību frekvencēm (att. 5.24.).



5.23. att. Iegūtās atbilžu atkarības no parametriem: a) tilpums; b), c) un d) - maksimālie  $\sigma_{vonMises}$  punktos 4;3;2

Izmantojot iegūtās atbildes, KMP kronšteina formas optimizācijas problēmu definēsim sekojošā veidā:

Mērķa funkcija:

KMP korpasa elementa ar kronšteinim tilpums -  $V$

Ierobežojumi :

1) KMP stiprības uzdevumā maksimāliem pārvietojumiem *URES* jābūt mazākiem nekā sākuma KMP konstrukcijā:

$$URES < 1.5 \text{ mm}$$

2) Uz ekvivalentiem spriegumiem  $\sigma_{vonMises}$  5 kronšteina punktos:

$$\sigma_{vonMises} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} \leq 1.5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{vonMises} \text{ pie } Y1; Y2; Y3; Y4; Y5 < 1.5 \text{ MPa}$$

3) Uz KMP fundamentālo frekvenci - (ražotāja prasība, ka tai jābūt augstākai nekā sākuma konstrukcijā):

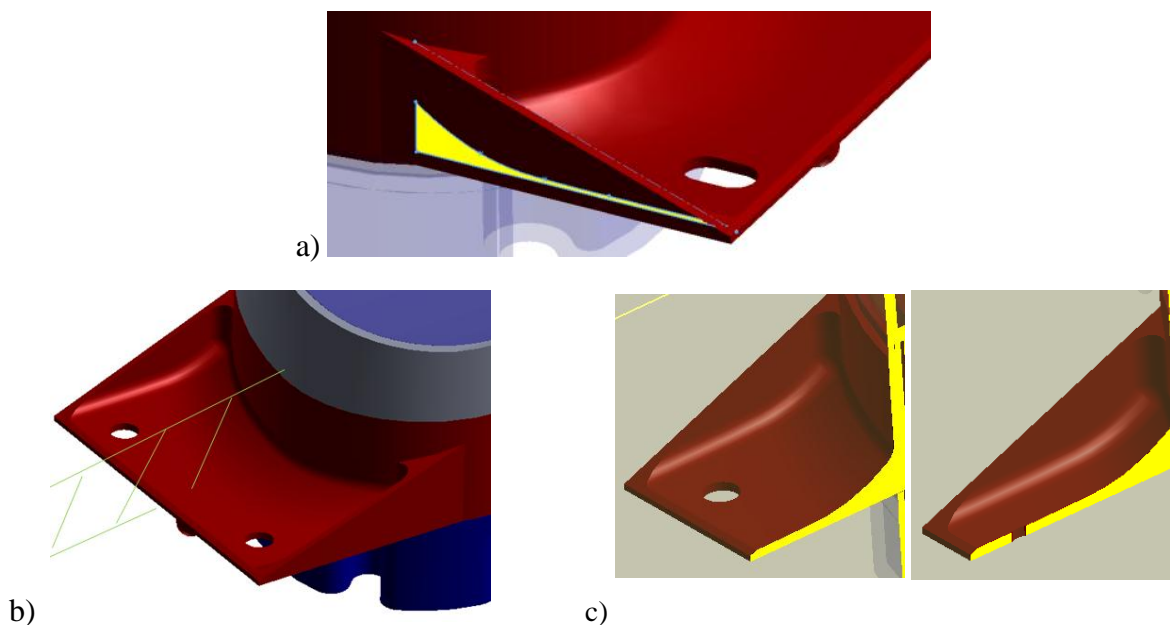
$$f > 120 \text{ Hz}$$

Functions Yr:	MISES1 1	MISES2 2	MISES3 3	MISES4 4	MISES5 5	URES 6	Volume 7	Frequency 8
Sigma Cross	161215.860757	58020.948438	64115.843153	56586.633090	74981.381526	0.000004	9.874085	0.087050
Sigma Cross%	69.51%	39.64%	63.44%	64.23%	55.41%	3.37%	0.69%	3.54%
Sigma	63477.457320	18979.912121	26788.443666	18252.960409	24791.255478	0.000001	2.668305	0.028257
Sigma%	27.368431	12.966346	26.506684	20.718825	18.319501	1.224116	0.185967	1.147957
Sigma0	74693.721588	22333.602062	31521.876229	21478.200301	29171.791257	0.000002	3.139786	0.033250
Sigma0%	32.204345	15.257458	31.190331	24.379775	21.556499	1.440413	0.218827	1.350798
MeanExpValue	1029019.166667	693319.166667	599654.444444	761177.500000	1124560.555556	0.001647	168059.510483	62.352056
StdDev of Exp	231936.782579	146378.260593	101062.975813	88098.435456	135327.131261	0.000120	1434.825935	2.461525
Exp. Range	1066260.000000	630230.000000	404810.000000	351980.000000	632930.000000	0.000481	5172.534300	9.647000
MaxError	201332.587785	53060.994863	-78647.746249	34487.289138	108809.431056	-0.000004	6.305461	-0.053774
Bad Point No.	13	6	27	11	15	4	28	10
Max Rel Error	18.38%	6.79%	16.35%	5.51%	7.96%	0.21%	0.00%	0.08%
BadRelPointNo.	13	9	27	36	15	4	28	10
No.ofActualExp	36	36	36	36	36	36	36	36

5.24. att. Atbilžu aproksimāciju rādītāji

Formas optimizācijas rezultāts parādīts att. 5.25. Var novērot izstrādātās metodikas kvalitāti– iegūta gluda forma un ir izmantoti tikai 3 parametri, pateicoties mērķtiecīgai SW 3D iezīmes pielietošanai tiek palielināta metodikas efektivitāte. Rezultātā šķeļot ar kronšteina atbalsta virsmām perpendikulāru plakni (att. 5.25 b-c), ir redzams, ka šķērsgriezuma forma ir mainīga un saglabājas tās optimālais raksturs. Izmantojot pieejamās vienkāršākās iezīmes ar citu programmatūru, piemēram ANSYS, šādam uzdevumam parametru skaits palielināsies vairākas reizes. Tāpēc ir pamats uzskatīt, ka izstrādātās metodikas acīmredzamā priekšrocība tiek novērota tikai CAD programmatūrās ar plašām 3D formas uzdošanas un modificēšanas iespējām. Ekvivalento spriegumu  $\sigma_{vonMises}$  ierobežojumu plaknes parametriem X2, X3 uz mērķa funkcijas *V* parādītas att. 5.26. Ir redzams, ka iegūtā forma ir stipri atkarīga no ekvivalento sprieguma  $\sigma_{vonMises}$  līmeņa ierobežojumiem. Varam novērot, ka parādītie

ierobežojumi ir aktīvi, jo atrastais optimums (sarkanais punkts) vienmēr atrodas pie ierobežojumu robežas. Sākuma variantam KMP komponents ar kronšteinu ir ar tilpumu  $V = 177284 \text{ mm}^3$ , bet atrastajām –  $V = 165813 \text{ mm}^3$ .

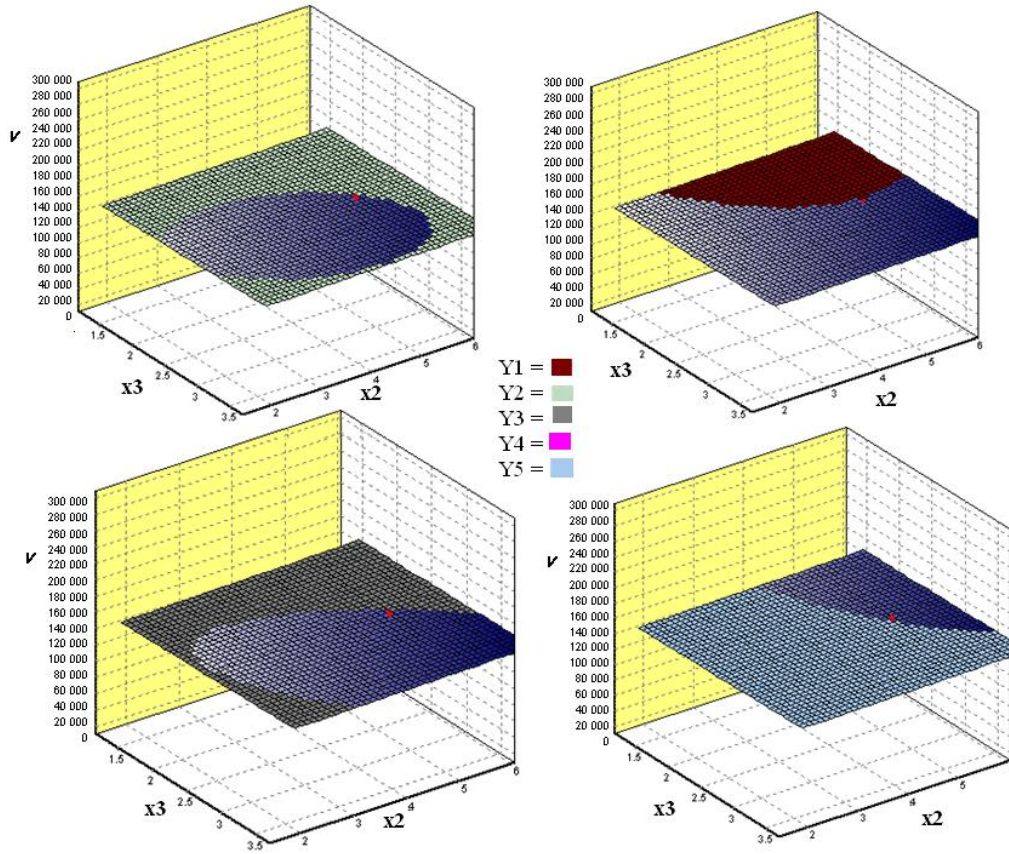


5.25. att. KMP kronšteinu formas optimizācijas rezultāts: a) iegūtā forma uzdotajā plaknē b) kronšteina forma un perpendikulārā plaknē un c) dažādi kronšteina šķērs griezumā, pārvietojot uzdoto šķēlšānās plakni

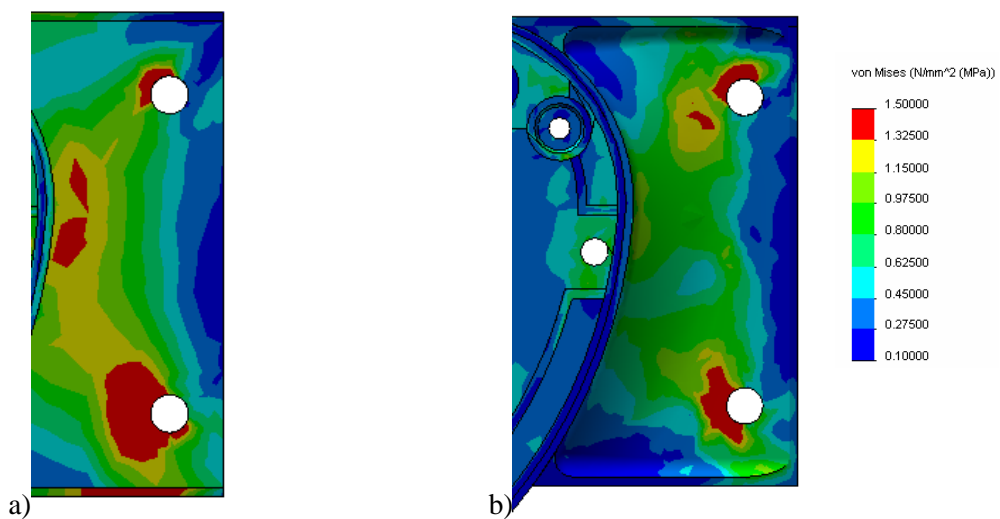
Salīdzināsim spriegumu līmeņus atrastās formas KMP kronšteinā un sākuma konstrukcijā (att. 5.27.) ar konstanto biezumu. Ir redzams, ka iegūtajā kronšteina formā ar mainīgo šķērsriezuma biezumu, kur spriegumi tiek kontrolēti 5 punktos (att. 5.22.), spriegumu līmenis ir ievērojami samazināts. Lielākie spriegumi – 1.32 - 1.5 MPa parādās tikai pie stiprinājumiem, kur ir pielikti idealizētie robežnoteikumi. Jāņem vērā, ka spriegumi pie šiem robežnoteikumiem pieņem vērtību proporcionāli GE izmēram un palielinās samazinot GE izmēru, tāpēc optimizācijas procesā tie netiek ņemti vērā.

Jaunās konstrukcijas KMP 10 zemākās pašsvārstību frekvences vērtības dotas tabulas 5.3. labajā kolonnā. Varam novērot to, ka pašsvārstības frekvenču diapazons ir pārbīdīts. Fundamentālā frekvence (122.65 Hz) tagad ir ar 22 Hz augstāku vērtību nekā sākuma konstrukcijā (tab. 5.3. pa kreisi) un tā apmierina pie optimizācijas izvirzīto ierobežojumu. Svarīgi ir apskatīt, kā izmainījās KMP atbildes pie dinamiskajām slodzēm. Tiek rēķināts harmoniskās ierosmes uzdevums sākuma un jaunai konstrukcijai. Iespējamais KMP vibrācijas līmenis tiek pārbaudīts pie harmoniskās ierosmes frekvenču diapazonā 10-500 Hz. Harmoniska ierosme ar amplitūdu  $a = 5g$  darbojas uz KMP vertikāla virziena. Iegūtās

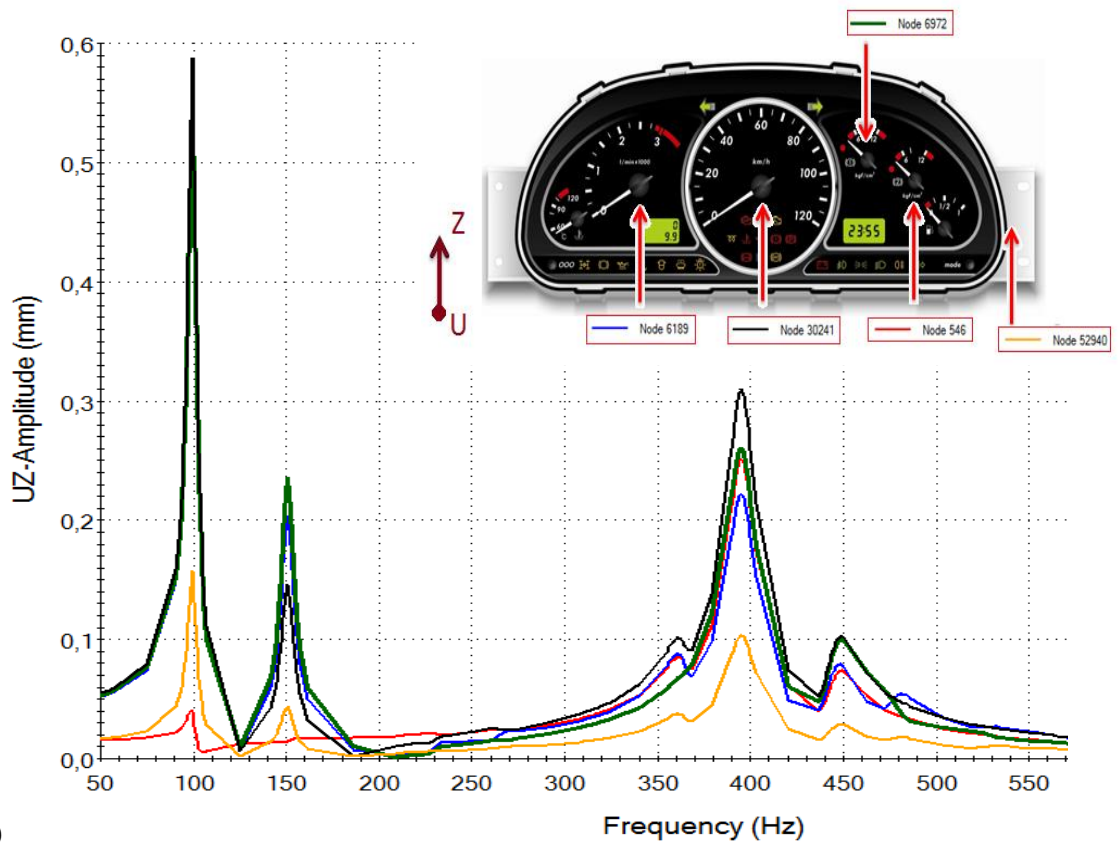
vertikālo pārvietojumu amplitūdu – frekvenču raksturlieknes 5 raksturīgajos KMP punktos tiek parādītas att. 5.28. Varam novērot maksimālā vibrācijas līmeņa samazinājumu par 42 % jaunai KMP kronšteina konstrukcijai pie fundamentālas frekvences.



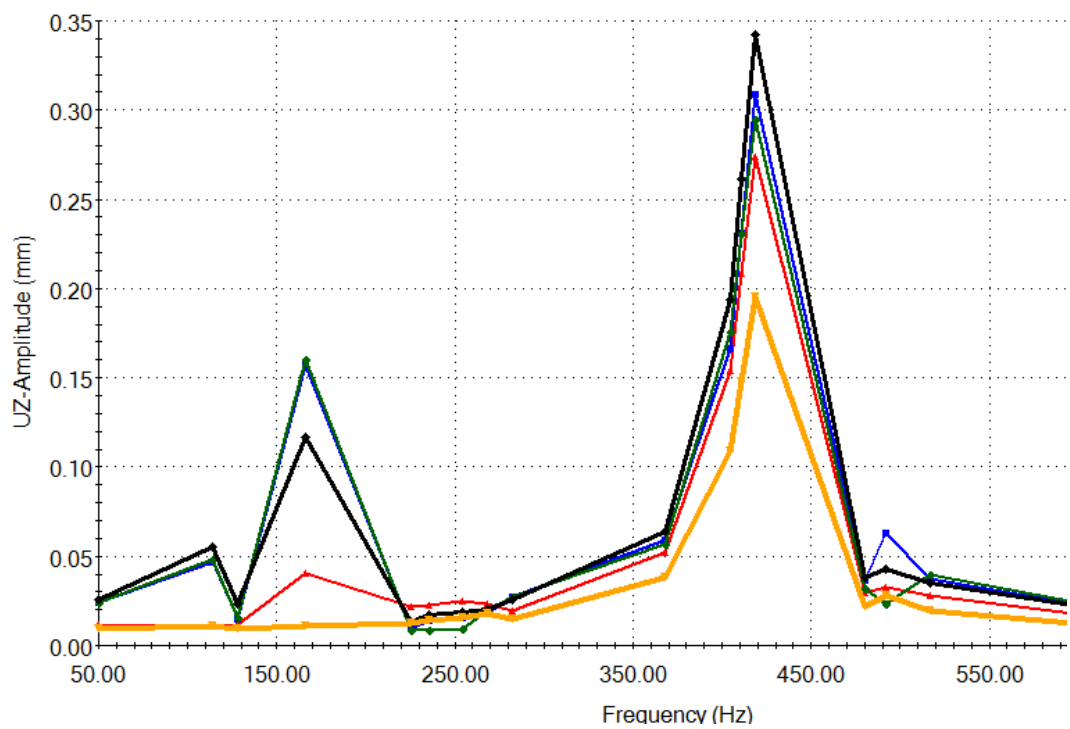
5.26. Kritērija šķēluma virsma ar aktīvajiem ierobežojumiem: ierobežojuma plaknes ekvivalentiem spriegumiem  $\sigma_{vonMises}$  un optimizācijas parametri



5.27. att. Ekvivalento spriegumu  $\sigma_{vonMises}$  līmeņa salīdzinājums KMP kronšteinā a) sākumā un b) atrastajā jaunajā konstrukcijā



a)



b)

5.28. att. KMP harmoniskās ierosmes analīze. Vertikālo pārvietojumu amplitūdu salīdzinājums raksturīgajos KMP punktos a) sākumā un b) jaunajā konstrukcijā

## NODAĻAS SECINĀJUMI

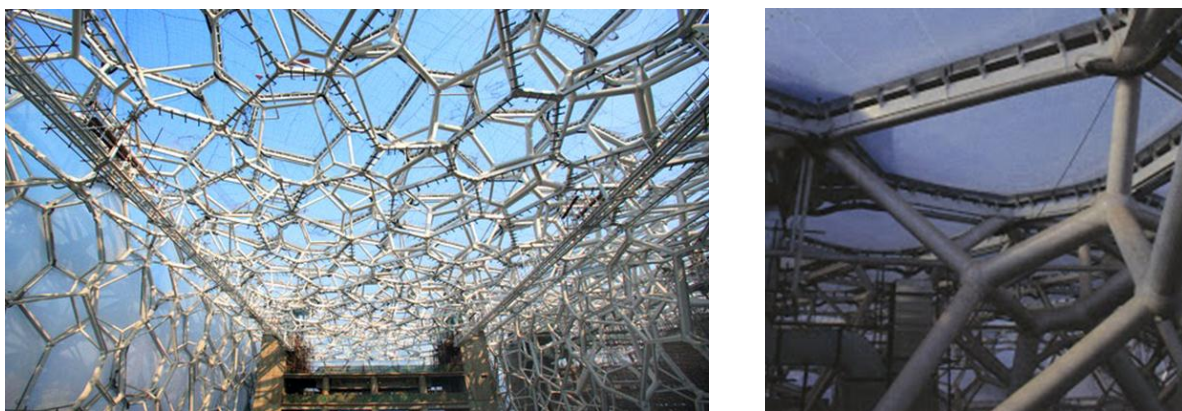
- Iegūtās autobusa KMP atbildes veiksmīgi izmantotas metamodeļu veidošanai ar lokālo polinomiālo aproksimāciju. Atrastā autobusa KMP kronšteina forma ar mainīgo šķērsriezuma laukumu, kura ir ar ~40 % mazākiem maksimālajiem ekvivalentiem spriegumiem, salīdzinot ar sākuma konstrukciju ar konstanto kronšteina biezumu.
- Efektīvāk pārdalot un noņemot materiālu uz autobusa KMP komponentes ar kronšteinu, šo elementu tilpums  $V$  tiek samazināts par 6.5 %.
- Rezultātā atrasta autobusa KMP jauna konstrukcija ar augstāku stingumu. Tā fundamentālā frekvence ir par 19% augstāka nekā sākuma konstrukcijai un atbilst ražotāja izvirzītām prasībām.
- Iegūtie rezultāti varētu būt izmantojami KMP elementu formas daudzkriteriālai optimizācijai, ievērojot citas papildus prasības (pievilcīgs dizains, izgatavošanas ekonomiskie faktori, u.c.), iegūstot vēl vairāk ekonomiski izdevīgu konkurētspējīgu produktu.

## 6. TETRAPODA FORMAS OPTIMIZĀCIJA

### 6.1. Ievads

Tetrapodu elementu simetrisks režģis [Hyde, 1989], kas izgatavots gan no tērauda, gan no jauniem viegliem kompozītu materiāliem, varētu būt efektīvi izmantojams jaunu atbalsta konstrukciju veidošanai ar paaugstinātām stinguma īpašībām [Yaghi, 2003; Bervalds, 2008]. Tādas konstruktīvās struktūras ir nepieciešamas nestandarta celtnēm (att. 6.1.) un īpaši gadījumos, kad ir nepieciešams ievērot specifisku dizaina koncepciju [Weaire, 1994; Carfrae, 2007].

Darbā [Bervalds, 2009] ir apskatīta tetrapoda formas aprakstīšana ar elementārām ģeometriskām formām: piedāvāta formas uzdošana ar 7 mainīgiem, kuri ir raksturīgie izmēri un leņķi. Tomēr šajā gadījumā, veicot formas optimizāciju, pie parametru kombinācijām, ir nepieciešams apskatīt daudzas nepraktiskas formas. Turpretī izmantojot izstrādāto formas optimizācijas metodiku, ir iespējams veikt tetrapoda formas parametrizēšanu, pielietojot NURBS un apskatot tikai interesējošu tetrapoda formas izmaiņu intervālus.



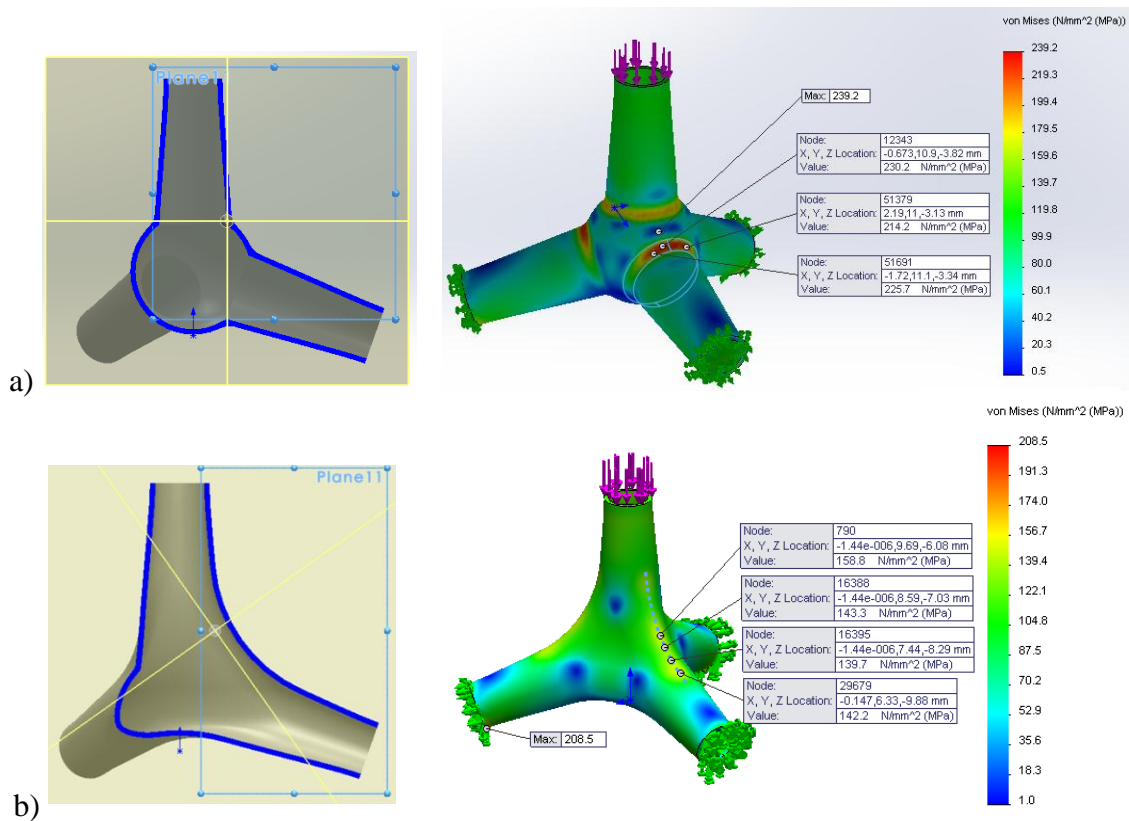
6.1. att. Ūdenssporta Centra būve Pekinā un raksturīgie 4 cauruļu sfēriskie savienojumi [Beijing National Aquatics Center]

Darbā [Dobelis, 2010] tiek veikta tetrapoda elementa topoloģijas optimizācija. Dotajā darbā, izmantojot programmatūru ANSYS, optimizēta viena tetrapoda elementa forma pie spiedes slodzes un pie vairākiem kritērijiem: minimāls tilpums, minimāli ekvivalentie spriegumi u.c. Katrs tetrapoda GE dotajā pieejā tiek uzskatīts par mainīgo, rezultātā uzdevums ir darbietilpīgs jau pie viena tetrapoda elementa. Līdz ar to autoriem nebija iespējas apskatīt tetrapoda režģa struktūras daļas vai kompleksas konstrukcijas.

Tāpēc sākumā apskatīsim iespējamās konstrukcijas un tad sagatavosim atbilstošo modeli tetrapoda formas optimizācijai.

## 6.2. Cauruļu savienojumu stiprība

Konstrukciju būvēšanai tiek izmantoti vairāki paņēmieni cauruļu savienojumiem. Piemēram, Pekinas Ūdenssporta Centra (att. 6.1.) unikālās sienas un griesti uzbūvēti, izmantojot speciālus cauruļu rāmjus, kuriem pamatā ir Weaire–Phelan struktūra [Weaire, 1994]. Rezultātā tiek izveidots burbuļa struktūras pamats. Šai gadījumā specifiskā struktūra ir nepieciešama, lai atrisinātu vairākas problēmas: telpas un baseina ūdens uzsildīšana no saules stariem, siltumizolācija un enerģijas patēriņa samazināšana. Šai metinātai atbalsta konstrukcijas veidošanai izmantoti sfēriskie 4 cauruļu savienojumi (att. 6.1. pa labi) - tetrapodi.



6.2. att. Centrālo šķērsriezumu salīdzinājums un spriegumu koncentrācijas vietas dobu elementu savienojumos a) sfēriskā un b) pludenā forma

Cauruļu savienojumu GEM analīze parādīja, ka sfērisko cauruļu savienojumu (att. 6.2a) nevar uzskatīt par optimālo pie spiedes slodzēm, jo labai struktūrai veidojas spriegumu koncentrācijas vietas pārejā starp sfērisko un cilindrisko formu. Šos spriegumu koncentrācijas efektus ir iespējams daļēji samazināt veidojot noapaļojumu (att. 6.2a ir redzams noapaļojums ar rādiusu 2 mm). Par alternatīvu risinājumu varētu uzskatīt pludenu tetrapoda savienojumu veidošanu ar tādu pašu tilpumu  $V$  (tab. 6.1.), kuram ir 1.5 reizes mazāki maksimālie

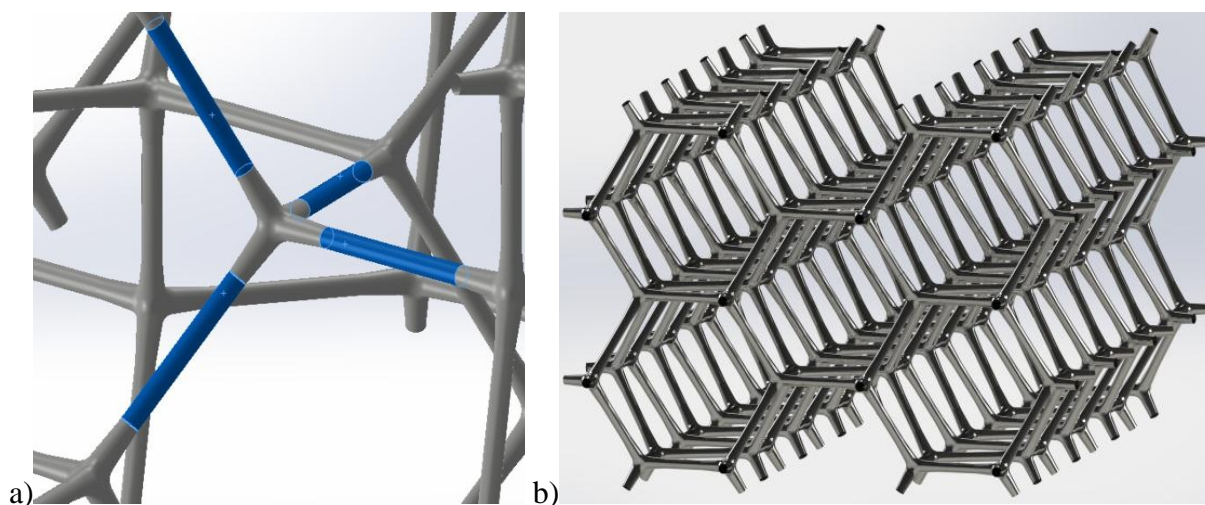
ekvivalentie spriegumi savienojuma centrālajā daļā (att. 6.2b). Tāpēc tiek piedāvāts izmantot 4 cauruļu savienojuma tetrapodus, kuriem jebkurā šķērsgriezumā ir pludena forma un rezultāta nerodas spriegumu koncentrācijas vietas.

6.1. Tabula  
4 cauruļu sfēriskā un pludenā savienojuma (elementa biezums 0.5 mm) raksturojumi

	Sfēriskais	Pludenā forma
Materiāls	Tērauds S235JRH	
Tilpums $V$ , mm <sup>3</sup>	646.933	
$\sigma_{\max}$ , MPa	239.5	208.5
$\sigma$ centrālā daļā, MPa	239.5	158.8
$\sigma$ pie robežnoteikumu definēšanas vietas, MPa	221.5	208.5

### 6.3. Tetrapoda konstrukciju stiprības aprēķinu modeļi

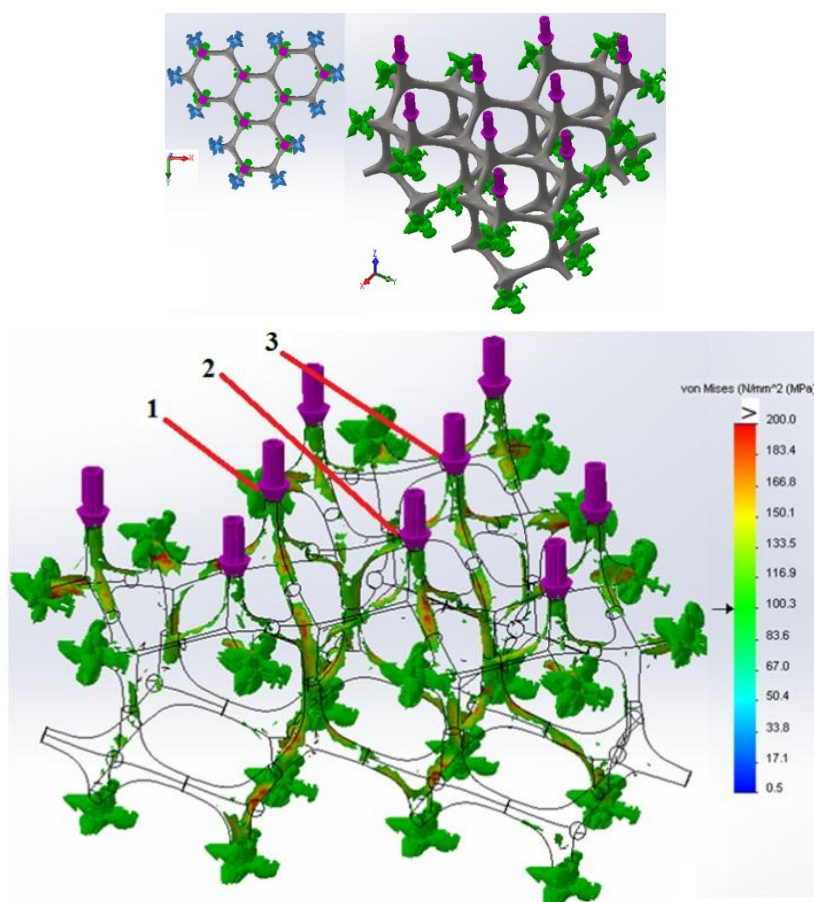
Tetrapoda sešskaldņu režģis ir diezgan sarežģīta struktūra (att. 6.3b), kas attiecīgā skatā atgādina labi pazīstamo bišu šūnas režģi [Allen, 1993; Paik, 1999;], kuru parasti izmanto vieglu sendviču konstrukcijām. Kā parādīts darbā [Bervalds, 2009], tetrapodu sešskaldņu režģis var efektīvi uzņemt spiedes slodzes.



6.3. att. Cauruļu savienojumi: a) ar tetrapoda elementu un b) sešskaldņu režģis

Lai nodrošinātu tetrapoda sešskaldņu režģa konstrukcijai vēl labākas mehāniskās īpašības nepieciešams atrast optimālu formu tetrapoda savienojumam. Rezultātā ir iespējams uzlabot kopējās atbalsta konstrukcijas rādītājus – palielinot stiprību un stingumu. Sākumā jāapskata vairākus vienkāršotus tetrapoda režģa 3D modeļus un jāizvēlas piemērotāko optimizācijas problēmai.

Pārējam no viena elementa GE modeļa apskates pie tetrapoda sešskaldņu režģa (att. 6.4.). Tā kā sākuma formas tetrapodam biezums pieņemts konstants (0.5 mm), tad diskretizācijai ir mērķtiecīgi izmantot čaulas elementus un līdz ar to ievērojami samazināt aprēķiniem nepieciešamo laika resursu, jo šajā gadījumā brīvības pakāpju skaits būs vairākkārt mazāks nekā lietotot otrās kārtas tetraedru elementus. Rezultātā ir iespējams precīzi modelēt lielākas tetrapoda sešskaldņu režģa konstrukcijas uzvedību pie dažādām slodzēm.

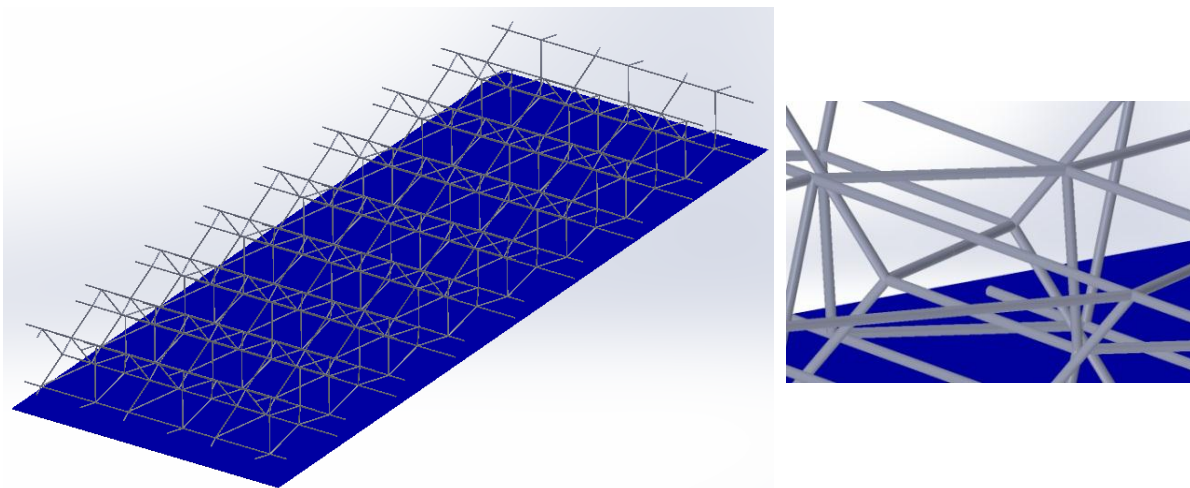


6.4. att. Tetrapoda sešskaldņu režģa čaulas GE aprēķina modelis pie spiedes slodzes un ekvivalento spriegumu sadalījums tajā

Att. 6.4. ir redzams izvēlētais tetrapoda sešskaldņu režģis ar sākuma formu. Konstrukcijai ir iespējams izdalīt 2 līmeņus. Augšējā konstrukcijas līmeņa tetrapodiem perpendikulāri pielikti 9 vienāda lieluma spēki. Apakšējā līmeņa perpendikulārie cauruļu gali

ir nekustīgi nostiprināti. Lai konstrukcija neizliektos uz malām, bet uzvestos kā lielāka režģa sastāvdaļa, augšējā līmeņa tetrapodu malējie gali ir atbalstīti. Lai izvairītos no acīmredzamās robežnoteikumu ietekmes uz konstrukcijas uzvedību, tiek apskatīti tikai 3 centrālie augšējā līmeņa elementi, kuri atrodas vistālāk no robežnoteikumu definēšanas vietām. Rezultātā atrasts, ka izvēlētais modelis vislabāk apraksta tetrapodu režģa elementu uzvedību pie spiedes slodzes un augšējā līmeņa 3 centrālie tetrapodi uzņem slodzi līdzīgi kā lielā režģa konstrukcijas elementi (att. 6.3.). Apskatot tos, ir iespējams prognozēt lielākā režģa modeļa uzvedību pie spiedes slodzēm. Varam novērot, ka centrāliem elementiem ir visvairāk noslogota cauruļu savienojuma zona. Līdz ar to ir nepieciešama tā formas uzlabošana, lai samazinātu spriegumu līmeni.

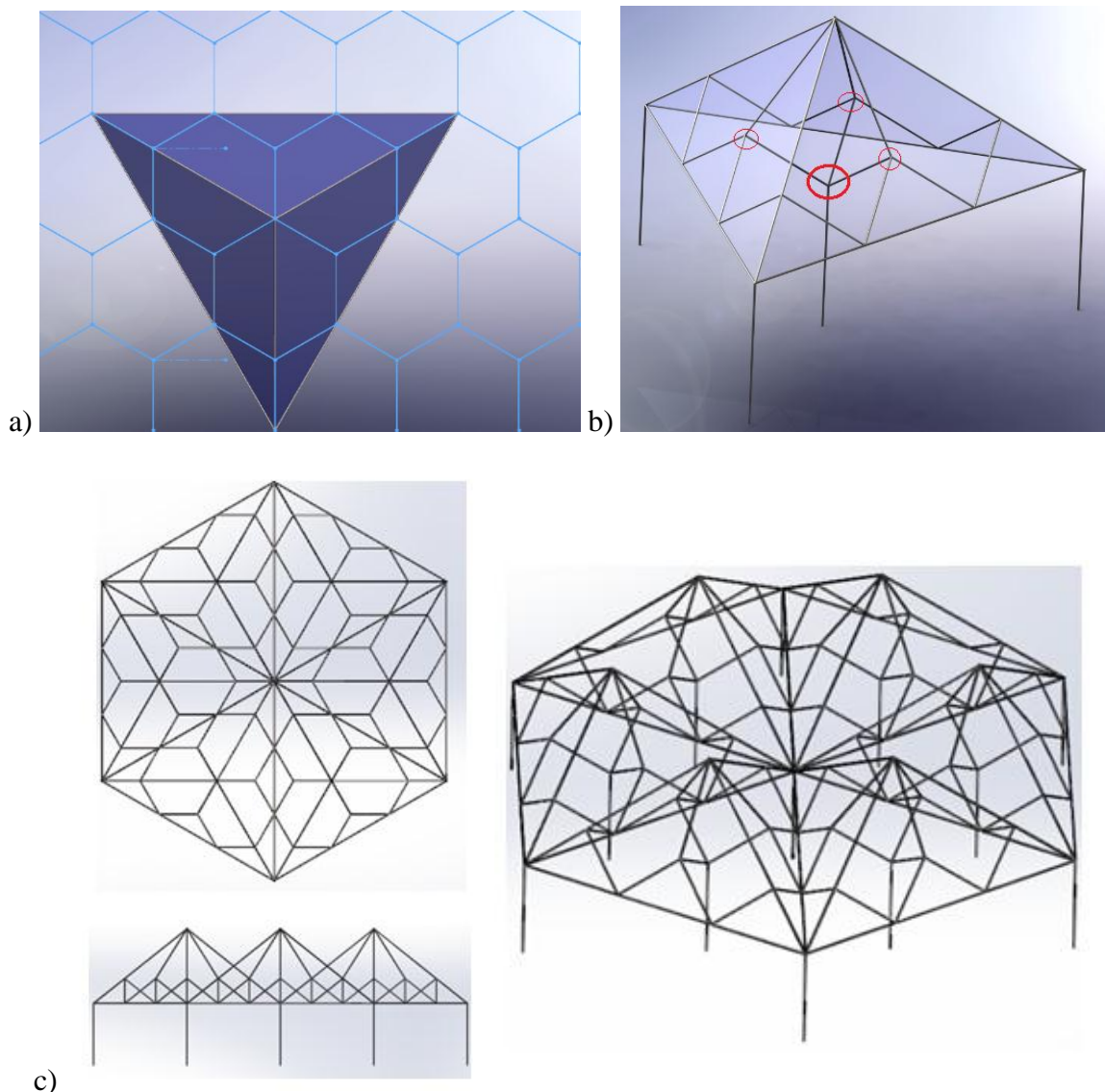
Tomēr tikai tetrapoda savienošā elementa izmantošana sešskaldņu režģa atbalsta konstrukcijās nav racionāla no tā kopējā tilpuma  $V$  viedokļa. Labākus rezultātus ir iespējams iegūt, izmantojot vairāku veidu cauruļu savienojumus kopā, kurus ir iespējams kombinēt ar tetrapodiem. Rezultātā jumta konstrukcijai (att. 6.5.) ir iespējams iegūt atbilstošus mehāniskās stiprības rādītājus. Tomēr tādai konstrukcijai, izmantojot pludenas formas sarežģītus savienojumus, ir ļoti darbietilpīgi aprēķināt spriegumus ar GE.



6.5. att. Atbalsta konstrukcija ar cauruļu savienojumiem plakanam jumtam (skats no apakšas)

Konstrukcijai ar tetrapodiem ir iespējams efektīvi izmantot bišu šūnas režģi. Att. 6.6a ir redzama saliekamā telts, kuras atbalstam izmantoti 4 tetrapoda veida savienojumi (att. 6.6b), bet 3D konstrukcijas elementi salikti, izmantojot bišu šūnas režģi. Šajā gadījumā arī parādīsies savienojumu stiprības problēma, īpaši centrālam tetrapodam konstrukcijā (att.

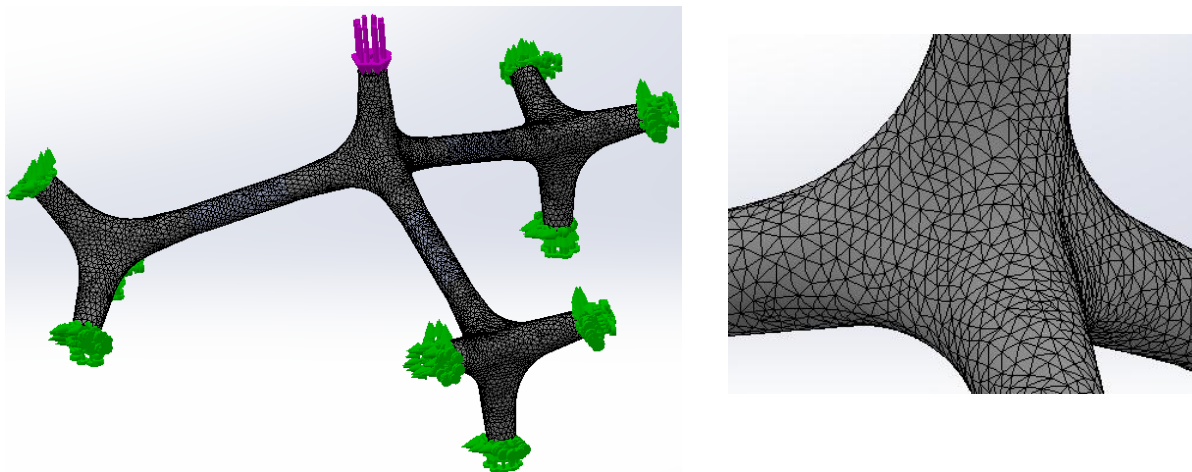
6.6b). Attīstot konstrukcijas tālāk, ir iespējams iegūt nestandarta risinājumus, piemēram att. 6.6c.



6.6. att. Bišu šūnas koncepcija un 4 cauruļu savienojumu realizācija telts konstrukcijai: a) skats no augšas b) tetrapodu atbalsts un c) rezultātā izveidotais paviljona jumts

Tāpēc ir nepieciešams izvēlēties alternatīvu aprēķinu modeli. Tā kā lielākā problēma ir tetrapoda savienojuma stiprība, tad ir nepieciešams atrast tā formu, kurai būs mazāki spriegumi. Lai izpētītu šo problēmu, izvēlēta spiesta konstrukcijas daļa sastāvoša no 7 elementiem, kas parādīta att. 6.7. Tagad varam izveidot kvalitatīvu GE tīklu, aprakstot sarežģītas pludenas formas, un atrast nepieciešamo formu. Kā redzams no att. 6.7., centrālajam tetrapoda savienojumam perpendikulāri pielikts spēks 1000 N, bet malas ir nekustīgi atbalstītas. Kā tetrapoda materiāls ir pieņemts tērauds. Šajā gadījumā ir iespējams

uzlabot centrālā tetrapoda rādītājus, un iegūt rezultātus, kurus ir iespējams izmantot iepriekš apskatītajās konstrukcijās.



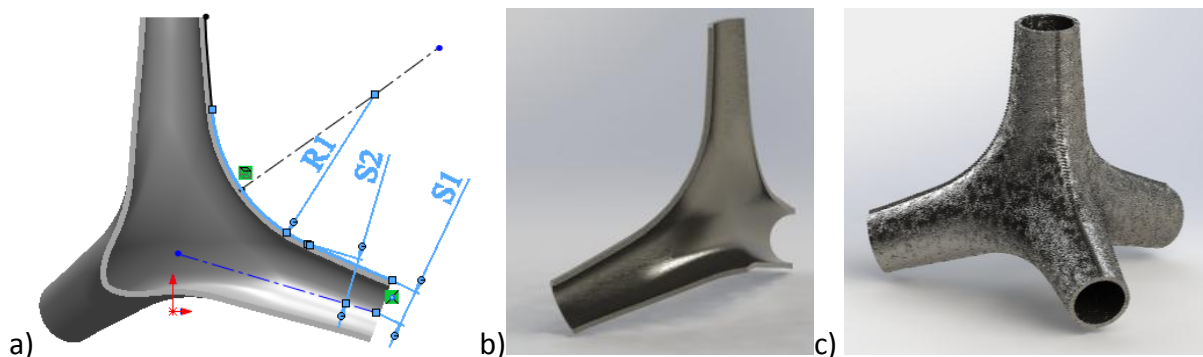
6.7. att. Paņemtais no att. 6.6. konstrukcijām 7 elementu čaulas GE modelis ar sākuma varianta tetrapoda formu

#### 6.4. Tetrapoda formas parametrizēšana

Tetrapoda savienojuma elements ir simetrisks elements un to ir iespējams izgatavot no 3 vienādām daļām. Vispirms no tērauda var tikt izlieta 1/3 daļa un tad daļas ir iespējams sametināt kopā. Tetrapodi varētu būt savienoti ar caurulēm, piemērinot ar vītņi, ja nepieciešams nodrošināt konstrukcijai demontēšanas iespējas.

Kā parādīts darbā [Bervalds, 2009], tetrapoda formas parametrizēšana, izmantojot vienkāršus ģeometriskos objektus (riņķa līnijas, konusus, sfēras u. c.), varētu būt sarežģīta un neefektīva, jo nepieciešamais parametru skaits ir 7 un ir jāapskata tādas parametru kombinācijas, kas dod daudzas neļūdas tetrapoda formas. Tāpēc mēģināsim nodefinēt minimālo nepieciešamo parametru skaitu tā, lai izmantotu NURB splaina nepārtrauktības īpašības un iegūtu tikai plūdenas tetrapoda elementa formas. Tetrapodu formu ir iespējams veidot līdzīgi, kā augstāk aprakstīto izgatavošanas procesu – vispirms definējam 1/3 tetrapoda formu (att. 6.8.). 3D tetrapodu formu ir iespējams aprakstīt ar 3 parametriem (att. 6.8a), kas nodrošina nepārtrauktu plūdeni formu pie jebkuras parametru vērtību kombinācijas. Tetrapoda centrālās daļas forma tiek kontrolēta ar rādiusu  $R1$ .  $R1$  nepārtraukti pa pieskari savienojas ar NURBS līkni, kas tiek uzdots ar 2 parametriem  $S1$  un  $S2$  – NURBS mezgla punktiem. Šajā gadījumā lielāks NURBS parametru skaits nav nepieciešams, jo tas tikai

apgrūtinātu pludeno formu uzdošanu. Parametriem tika izvēlēti sekojoši intervāli:  $1 \leq R1 \leq 15$ ,  $1.5 \leq S1 \leq 3$  un  $3 \leq S2 \leq 3.5$  mm.



6.8. att. Tetrapoda elementa parametrizēšana: a) formas definēšana ar NURBS mezgla punktiem S1; S2 un rādiusu R1, b) gluda 1/3 tetrapoda daļa un c) sametinātais sākuma formas modelis

### 6.5. Tetrapoda formas optimizācija

Optimizācijai izvēlētais tetrapoda GE modelis ir parādīts att. 6.7. Sākumā pieņemtā tetrapoda forma ir parādīta att. 6.9b1. GE analīze veikta visai konstrukcijai, bet atbildes (tilpums -  $V$  un maksimālais ekvivalentais spriegums  $\sigma_{vonMises}$ ) piefiksētas tikai centrālām tetrapodam. Līdz ar to tiek izslēgta idealizēto robežnoteikumu ietekme uz rezultātu.

Analoģiski, kā iepriekšējā nodaļā, izmantots latīņu hiperkuba eksperimentu plāns ar 3 faktoriem un 40 mēģinājuma punktiem, kas optimizēts pēc vidējās kvadrātiskās distances (MSD) kritērija.

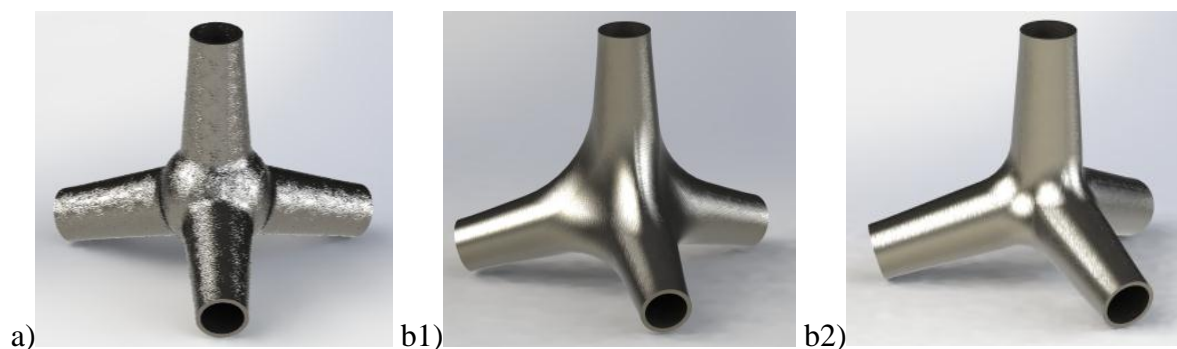
Iegūtām atbildēm izmantotas otrās kārtas lokālās polinomiālās aproksimācijas, ar kurām tika iegūti labāki rādītāji krosvalidācijām kļūdām tilpumam  $V$  - 2.48% un maksimālajiem ekvivalentajiem spriegumiem  $\sigma_{vonMises}$  - 23.52%

Optimizācijas problēma definēta sekojošā veidā: konstrukcijas centrālā tetrapoda stiprībai jābūt maksimālai, bet tetrapoda tilpumam  $V$  ir jābūt ne lielākam par sākuma formas tetrapoda tilpumu ar iepriekš apskatīto sfērisko savienojumu:

$$\text{Minimizējamā mērķa funkcija: } \max \sigma_{vonMises}$$

$$\text{Ierobežojums : } V < 646.933 \text{ mm}^3$$

Optimizācijas rezultāti apkopoti tabulā 6.2. un att. 6.9. Ievadot atrastos optimālos tetrapoda parametrus pilnajā GE modelī, tā tilpums  $V$  izrādījās par 0.2 % mazāks nekā prognozēts, bet maksimālais spriegums par 8.7 % lielāks. Rezultātus var uzskatīt par apmierinošiem, jo atrastai tetrapoda formai (att. 6.9b2) ir par 9.1 % mazāks max  $\sigma_{vonMises}$  salīdzinājumā ar sākuma variantu (att. 6.9b1) un par 27.3 % - salīdzinājumā ar sfērisko caurules savienojumu (att. 6.9a). Maksimālie  $\sigma_{vonMises}$  visiem 3 variantiem salīdzināti att. 6.10. Varam novērot, ka centrālajam elementam (att. 6.10b2)  $\sigma_{vonMises}$  sadalīti vienmērīgāk ap centru (sarkanā krāsa) nekā sākuma variantam, līdz ar to iegūti labāki stiprības rezultāti pie spiedes slodzes. Sfēriskajam savienojumam, līdzīgi kā pie viena elementa GE modeļa (att. 6.2a) redzamas izteiktas  $\sigma_{vonMises}$  koncentrācijas zonas starp sfēru un cauruli. Izmantotais nelielais 2 mm noapaļojums spriegumu koncentrācijas vietās būtiski neuzlabo rezultātu (att. 6.2a).

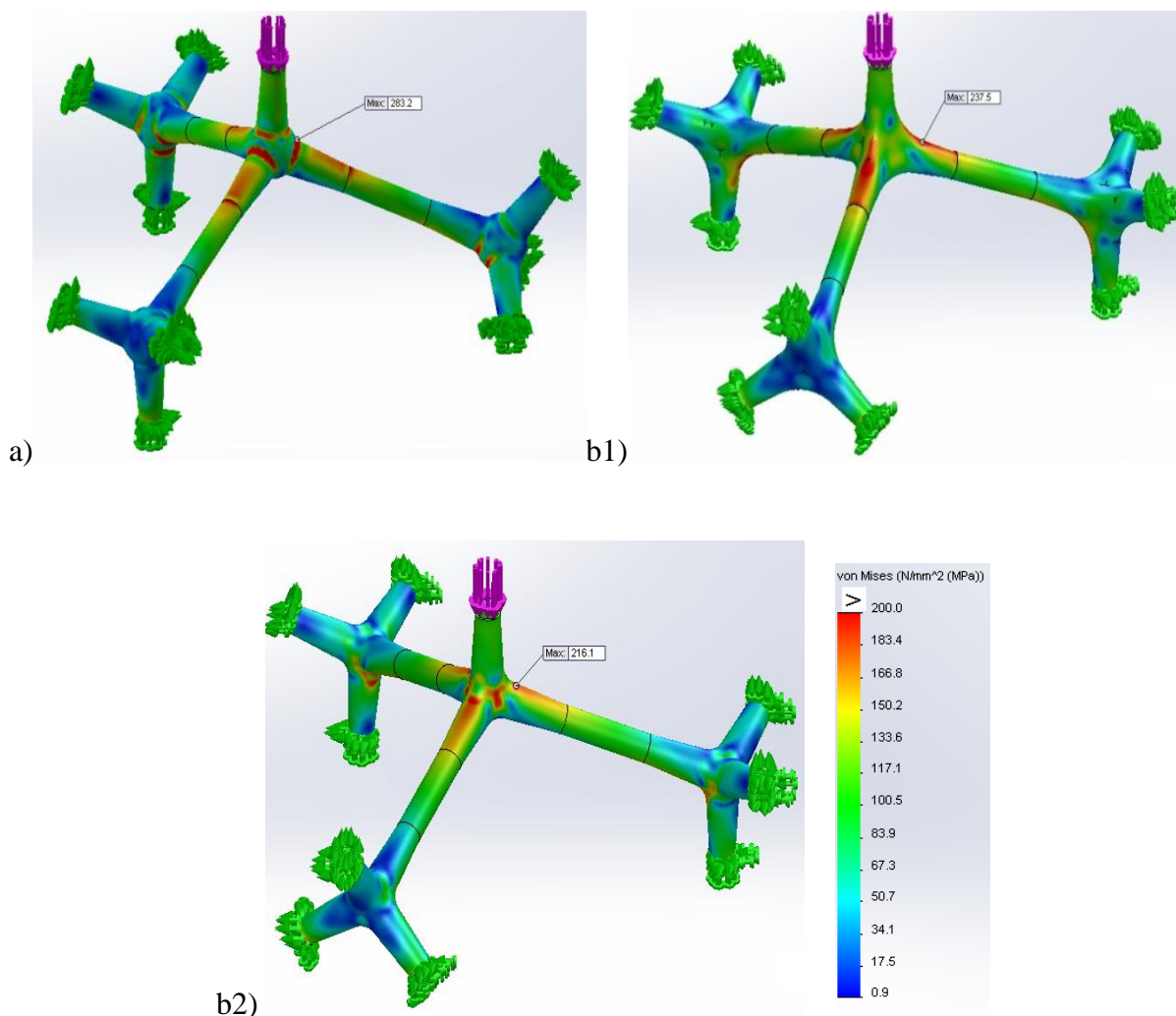


6.9. att. Konstruktiju ar vienādu tilpumu  $V$  salīdzinājums: a) sfēriskais, b(1-2)) tetrapods ar sākuma un optimālo formu

6.2. Tabula

Tetrapoda konstrukcijas ar konstantu sienas biezumu 0.5 mm formas optimizācijas rezultāti

Kvantitatīvie rādītāji	Sfēriskais savienojums	Sākuma variants	Optimālā forma	
			Metamodelis	Pilnais GE modelis
$V, \text{mm}^3$	646.933		645.583	
Max $\sigma_{vonMises}$ Centrālajā elementā, MPa	283.2	237.5	197.3	216.1

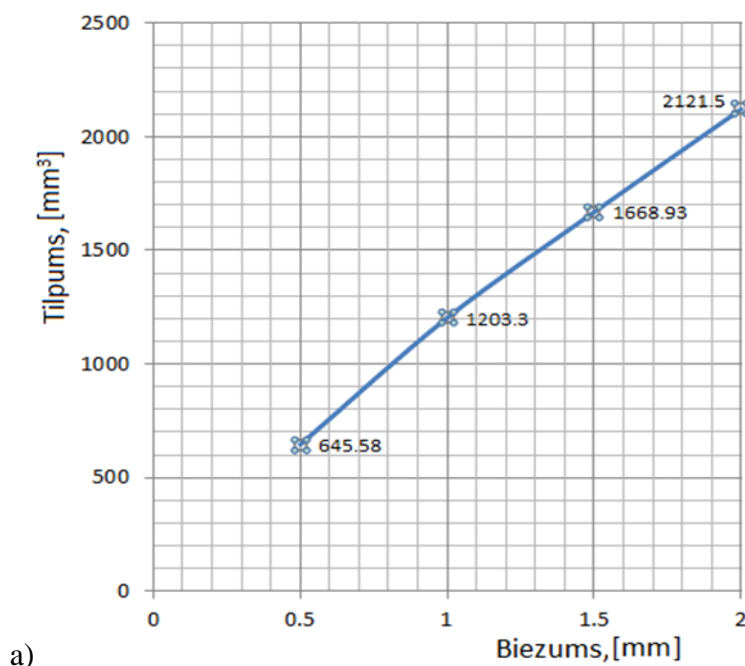


6.10. att. Ekvivalentie spriegumi no spiedes slodzes cauruļu konstrukcijās ar vienādu tilpumu  $V$ : a) ar sfēriskiem savienojumiem un b(1-2)) ar sākuma un optimālo tetrapoda formu

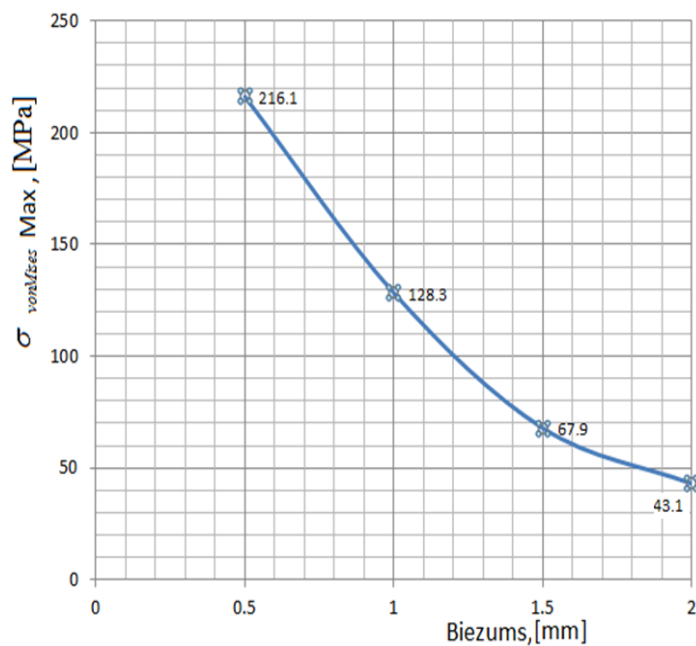
Tālāk optimālās formas tetrapodam (att. 6.9b2) veikti papildus aprēķini, lai atrastu tā tilpuma  $V$  un maksimālo ekvivalento spriegumu  $\sigma_{vonMises}$  atkarību no tā sienas biezuma (tab. 6.3.). Tetrapoda sienas biezums tiek palielināts no 0.5 līdz 2 mm virzienā uz tā iekšpusi. Tetrapoda tilpuma atkarība no tā sienas biezuma parādīta attēlā 6.11a, bet maksimālo ekvivalento spriegumu  $\sigma_{vonMises}$  - attēlā 6.11b. Ir redzams, ka šajā gadījumā pie tetrapoda sienas biezuma lielāka par ~1.3 mm izvēle paliek neizdevīga no minimālo tilpuma un maksimālo ekvivalento spriegumu  $\sigma_{vonMises}$  viedokļa. Izvēloties standartizēto cauruļu izmērus att. 6.5. un 6.6. piedāvātajām vai citām jaunām konstrukcijām ir iespējams ērti iegūt attiecīgos izmērus tetrapoda savienošajam elementam.

6.3. Tabula  
Tetrapoda konstrukcijas att. 6.10b2 sienīgas biezuma ietekme uz rezultātiem

Biezums, mm	0.5	1	1.5	2
Max $\sigma_{vonMises}$ centrālajā elementā, MPa	216.1	128.3	67.9	43.1
V, mm <sup>3</sup>	645.58	1203.30	1668.93	2121.50



a)



b)

6.11. att. Optimālās formas centrālā tetrapoda (att. 6.9b2) tilpuma V un maksimālo ekvivalento spriegumu  $\sigma_{vonMises}$  atkarība no tā sienīgas biezuma

## NODAĻAS SECINĀJUMI

- Izmantojot izstrādāto formas optimizācijas metodiku, realizēta tetrapoda 3D formas efektīva parametrizācija ar 3 mainīgajiem.
- Veikta tetrapoda 3D formas optimizācija konkrētai konstrukcijai, atrasta optimālā forma pie definētā kritērija un ierobežojumiem: iegūtās formas tetrapodam ir par 27.3 % lielāka stiprība salīdzinājumā ar sfērisko savienojuma elementu, vienlaikus tilpums  $V$  ir par 0.2 % mazāks.
- Parādīts, ka ar izstrādāto metodiku iegūtie rezultāti var tikt sekmīgi izmantoti jaunu konstrukciju veidošanai.

## KOPĒJIE SECINĀJUMI

- Izstrādāta konstrukciju elementu resursus taupoša formas optimizācijas metodika, kurā pēc atbilstošiem kritērijiem optimizēti LH eksperimentu plāni tiek izmantoti, lai iegūtu metamodeļus pētāmo konstrukciju rādītājiem kā funkcijas no nevienmērīgo racionālo B-splainu daudzstūra atbalsta punktu koordinātēm, kas tiek izmantotas formas uzdošanai un optimizācijai ar globālās stohastiskās meklēšanas metodēm.
- Veicot testa piemēru aprēķinus un to validāciju, eksperimentāli pierādīts ka ar izstrādāto metodiku, patērējot ievērojami mazākus resursus, ir iespējams iegūt labākus optimizācijas rezultātus kā ar klasisko homogenizācijas metodi.
- Dažāda veida sistēmām veiktā formas optimizācija parādīja, ka piedāvātais līkņu formas parametrizācijas paņēmiens ar NURBS daudzstūra atbalsta punktiem dod vislabākos rezultātus.
- Atrisināta vagona mērīšanas sistēmas elementu konstruktīvās formas optimizācijas problēma, izveidojot noņemamo eliptiskas formas disku ar mainīgu biezumu, kuram salīdzinot ar sākotnējo konstrukciju ir par ~64% samazināts svars, ir nepieciešamā stiprība, pieļaujamie pārvietojumi un pašfrekvences.
- Veikta celtniecības bloka dobuma formas optimizācija, ievērojot trausla materiāla stiprības un materiālu siltumizolējošās īpašības, kā rezultātā atrasts alternatīvais bloks, kas, salīdzinot ar eksistējošo, nodrošina ~8 % betona masas ekonomiju.
- Realizēta formas optimizācija autobusa kontroles mēraparātu paneļa (KMP) kronšteinam, samazinot maksimālo ekvivalento spriegumu līmeni tajā par ~40 %, salīdzinot ar sākotnējo konstrukciju, kā arī nodrošinot virkni dinamiskos u.c. rādītājus.
- Veikta cauruļu savienojošā elementa - tetrapoda 3D formas optimizācija konkrētai konstrukcijai, atrasta tā optimālā forma pie definētā kritērija un ierobežojumiem, kas nodrošina par 27.3 % lielāku stiprību salīdzinājumā ar sfērisko savienojuma elementu.
- Labākie rezultāti vairums gadījumos iegūti, lietojot LH eksperimentu plānus, kuri optimizēti pēc vidējās kvadrātiskās distances kritērija, un veidojot lokālās polinomiālās aproksimācijas ar Gausa kodolu.
- Atbilstoši CAD/CAE programmatūrai izveidoti makrosi, kas automatizē eksperimentu plānu ievadīšanu un atbilžu nolasīšanu, un būtiski samazina optimizācijas datu sagatavošanas laiku.

- Praktisko problēmu risinājumi apliecina izstrādātās formas optimizācijas metodikas efektivitāti, tā var tikt izmantota plaša spektra izstrādājumu projektēšanai ar CAD/CAE līdzekļiem

## LITERATŪRA

- Akin J. Ed. *Finite Element Analysis Concepts: Via SolidWorks*. World Scientific Publishing Company, 1 Ed., 2010. – 348 p.
- Allaire G. *Shape Optimization by the Homogenization Method*. Springer, 2002. – 480 p.
- Allen H. G. *Analysis and design of structural sandwich panels*. Pergamon Press, Technology & Engineering, 1993. - 283 p.
- Altuglas organiskais stikls. Internet - <http://www.altuglas.com/>
- Arora J. S. *Introduction to Optimum Design*. 2nd Ed., Elsevier. 2004. -700 p.
- Auziņš J., Januševskis A. Eksperimentu plānošana un analīze. Rīga. 2007.– 256. Lpp.
- Beijing National Aquatics Center, Internets - <http://en.beijing2008.cn/venues/nac/index.shtml>
- Belegundu A. D. and Chandrupatla T. R. *Optimization Concepts and Applications in Engineering*. Cambridge University Press, 2nd Ed. 2011. – 478 p.
- Bendsoe M. P. and N. Kikuchi. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 71(2): 1988. - pp. 197–224.
- Bendsoe M. P. *Optimization of Structural Topology, Shape, and Material*. Springer, 1995- 271 p.
- Bendsoe M. P. and Sigmund O. *Topology Optimization. Theory, Methods and Applications*. Springer. 2004. -370 p.
- Bendsoe M. P. and Sigmund O. Topology Optimization. Chapter 6 in „Optimization of Structural and Mechanical Systems”. Ed. Arora J. S. World Scientific, 2007. – pp. 161–194.
- Bervalds E., Dobelis M. and Verners O. Geometric Parameterization of A Tetrapod-Shaped Structural Element // *Proceedings of the 10th International Conference on Geometry and Graphics, Vilnius, Lithuania: June 4-5, 2009*. – pp. 24.-29.
- Bervalds E., Dobelis M. Geometric Properties of a Regular Hexagonal Lattice Caused by Phi Relationship. *Proceeding of the 13th International Conference on Geometry and Graphics, Dresden, 2008*. –8 p.
- Bervalds E., Verners O. and Dobelis M. Geometric Approximation Scheme for a Tetrapod-shaped macrostructural superelement. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, N6, 2009. – pp. 57 – 62.
- Borel P. I., Harpøth A., Frandsen L. H., Kristensen M., Jensen J. S., Shi P. and Sigmund O. Topology optimization and fabrication of photonic crystal structures. *Optics Express*, Vol. 12, 2004.– pp. 1996–2001.
- Cagnol J.M., Polis M. J. and Zolesio J. P. *Shape Optimization And Optimal Design*. CRC Press, 1 Ed., 2001. – 442 p.
- Carfrae Tr. *Box of Bubbles*. *Ingenia Online*, Issue 33, Dec. 2007, Internets - <http://www.ingenia.org.uk/ingenia/articles.aspx?Index=463>

- Chapman C. D. Structural Topology Optimization via the Genetic Algorithm. Massachusetts Institute of Technology, 1994. -189 p.
- Cheng R.K.C. Inside Rhinoceros 4. 3rd Ed., Thomson/Delmar Learning, 2007. – 736 p.
- Choi K. K. and Kim N. H. Structural Sensitivity Analysis and Optimization 1. Springer, 2004. –482 p.
- Chong Ed. K.P. and Zak St. H. An Introduction to Optimization. Wiley, 2001. – 495 p.
- Christensen P.W. and Klarbring A. Introduction to Structural Optimization. Springer, 2009.-214 p.
- Coello C.A., Van Veldhuizen D.A. and Lamont G.B.. Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems. Kluwer Academic Publishers, 2002. – 800 p.
- Cox M.G. Practical Spline Approximation. In: Turner, P.R. (Ed.) Topics in Numerical Analysis, Springer, USA, 1981, pp. 79-112.
- de Boor C. A Practical Guide to Splines. Springer, 1978. – 392 p.
- Deb K. Optimization for Engineering Design: Algorithms and Examples, 2nd Ed., 2013. – 440 p.
- Dempski K. Focus On Curves and Surfaces. Course Technology, 2003. -280 p.
- Derakhshani D. Inroducing Maya 2011. 1st. Ed., Sybex, 2010. – 664 p.
- Dobelis M. and Verners O. Shape optimization of a lightweight tetrapod-like superelement. Mechanika, 5(85), 2010. - pp. 48-55.
- Dvorkin L., Dvorkin O. Basics of Concrete Science. Stoi-Beton, 2006. -692p.
- Dzemyda G., Saltenis V. and Zilinskas A. Stochastic and Global Optimization. Kluwer Academic Publishers, 2002. – 248 p.
- Edwards C. H. and Penney E. D. Elementary Differential Equations. Pearson, 6th Ed. 2007. - 648 p.
- Ferguson J. Multi-variable curve interpolation. J. ACM, vol. 11, no. 2, pp. 221-228, Apr. 1964.
- Finkelstein El. AutoCAD 2012 and AutoCAD LT 2012 Bible. Wiley, 2011. – 1296 p.
- Francavilla A., Ramakrishnan C.V. and Zienkiewicz O.C. Optimization of shape to minimize stress concentration. Journal of Strain Analysis, Vol. 10, 1975 - pp.63-70.
- Francavilla A., Ramakrishnan C.V. and Zienkiewicz O.C. Optimization of shape to minimize stress concentration, Journal of Strain Analysis, Vol. 10, 1975. –pp. 63-70.
- Gaddis T. and Irvine K. R. Starting Out With Visual Basic 2010. Addison-Wesley, 5th Ed., 2010. – 896 p.
- Gano S.E., Renaud J.E., Martin J.D. and Simpson T.W. Update strategies for kriging models used in variable fidelity optimization. Structural and Multidisciplinary Optimization. Vol. 32 (4), 2006. - pp. 287-298.
- Genesis programatūra / Internets. - <http://vrand.com>
- Genesis User's Manual, Version 7.5. Vanderplaats Research & Development, Inc. Colorado Springs, CO, 2007.

- Gordon J. E. Structures: Or Why Things Don't Fall Down. Penguin, New Ed., 1991- 400 p.
- Han-Fu Ch. Stochastic Approximation and Its Applications. Kluwer Academic Publishers, 2002. – 377 p.
- Hassani B., Tavakkoli S.M. and Moghadam N. Z.. Application of isogeometric analysis in structural shape optimization. Scientia Iranica, Vol. 18, 2011.- pp. 846-852.
- Himmelblau D. M. Applied nonlinear programming. McGraw-Hill Book Company, 1972. – 534 p.
- Hyde B.G. and Andersson S. Inorganic crystal structures. – New York: Wiley, 1989. – pp. 10 - 56.
- Janushevskis A., Akinfiyev T., Auzins J. and Boyko A. A comparative analysis of global search procedures. Proc. Estonian Acad. Sci. Eng., Vol.10, No.4, 2004. –pp. 235-250.
- Jung J.J. and Lee. T.H. Metamodel-based Shape Optimization of Connecting Rod Considering Fatigue Life. Key Engineering Materials, VOL 306/308; Part 1, 2006. - pp. 211-216.
- Kalpakjian S. and Schmid St. Manufacturing Engineering and Technology. 5th Ed., Pearson Prentice Hall, 2006. – 1320 p.
- Kang D.H. and Lee K.H. Structural optimization of an automotive door using the Kriging interpolation method. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol. 221, 2007.- pp. 1524-1534.
- Kirsch U. Structural Optimization—Fundamentals and Applications. Springer, 1993. -302 p.
- Koziel Sl., Ciaurri D. E. and Leifsson L. Surrogate-Based Methods. Chapter 3 in “Computational Optimization, Methods and Algorithms”. Ed. S. Koziel, Springer, 2011. – 300 p.
- Kreith F. Mechanical Engineering Handbook. CRC Press LLC, 1999. – 2466 p.
- Krige D. G. “A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand” Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa, Vol. 52, 1951. –pp. 119 -139.
- Krivoshapko S.N. Research on General and Aximmetric Ellipsoidal Shells Used as Domes, Pressure, Vessels, and Tanks. Applied Mechanics Reviews, Vol. 60, 2007.- pp.336-355.
- Kutscherauer A. 3D Car Modeling with Rhinoceros. Andre Kutscherauer(AK3D), 2011.- 650 p.
- Lee H.T. and Jung J.J. Kriging metamodel based optimization. Chapter 16 in „Optimization of Structural and Mechanical Systems”. Ed. Arora J. S. World Scientific, 2007. – pp. 445-484.
- Lee H.T. Shape Optimization. Chapter 5 in „Optimization of Structural and Mechanical Systems”. Ed. Arora J. S. World Scientific, 2007. – pp. 149-159.
- Lee K.H. and Kang D.H. Structural optimization of an automotive door using the Kriging interpolation method. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. V221, 2007. - pp. 1524-1534.

- Lee T. H. and Jung J. J. Maximin Eigenvalue Sampling of Kriging mode. 10th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, New York, 2004. - Ref. AIAA 2004-4488.
- Leiva J.P. Topometry optimization: A new capability to perform element by element sizing optimization of structures. Collection of Technical Papers – 10th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference 5 , 2004.- pp. 3260-3274.
- Liang Q.Q., Xie Y.M. and Steven G.P. A Performance Index for Topology and Shape Optimization of Plate Bending Problems with Displacement Constraints. Structural and Multidisciplinary Optimization, Berlin, 2001. – pp. 393-399.
- Liao X.T., Li Q., Yang X.J., Zhang W.G. and Li W. Multiobjective optimization for crash safety design of vehicles using stepwise regression model. Structural and Multidisciplinary Optimization. V35, 2007. - pp. 561-569.
- Liao X.T., Li Q., Yang X.J., Zhang W.G., Li W. Multiobjective optimization for crash safety design of vehicles using stepwise regression model. Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 35, 2008.- pp. 561-569.
- Lienhard J. H. A Heat transfer Textbook. Phlogiston Press, 2008. – 762 p.
- Lombard M. SolidWorks® Surfacing and Complex Shape Modeling Bible. Wiley, 2008. – 460 p.
- Marsh D. Applied Geometry for Computer Graphics and CAD. Springer, 2nd Ed., 2004. – 368 p.
- McKay M.D., Beckman, R.J. and Conover, W.J. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from computer code. Technometrics, Vol. 21, 1979. - pp. 239-245.
- MIL-STD-810F(2000). United States Military Standard. Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, 2000, - 539 p.
- Miltiadis A.B. CAD/CAM & Rapid Prototyping Application Evaluation. Ventus Publishing ApS, 2010. - 174 p.
- Moaveni S. Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS. Pearson Prentice Hall, 3rd Ed., 2007. – 868 p.
- Montgomery D. C. Design and analysis of experiments. John Wiley & Sons, 5th Ed., 2001. – 684 p.
- Mozumder C. K. Topometry optimization of sheet metal structures for crashworthiness design using hybrid cellular automata. ProQuest, 2011. – 126 p.
- Mullerschön H., Lazarov N. and Witowski K. Application of Topology Optimization for Crash with LC-OPT/Topology. Proc. 11th Int LS-DYNA Users Conference, 2010. - pp. 17-46.
- Myers R.H., Montgomery D.C. and Anderson-Cook C. M. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments. Wiley, 3rd Ed. 2009. – 704 p.
- Nocedal J. and Wright S. Numerical Optimization. Springer, 2nd Ed., 2006. - 686 p.
- Osyczka A. Evolutionary algorithms for single and multicriteria design optimization. Physica- Verlag, 2002. – 218 p.

- Paik J. K., Thayamballi A.K. and Kim G. S. The strength characteristics of aluminum honeycomb sandwich panels. *Thin-Walled Structures*, Vol. 35, Issue 3, November, 1999. - pp. 205-231.
- Papadrakakis M., Lagaros N., Thierauf G. and Cai J. Advanced solution methods in structural optimisation using evolution strategies. *Engineering Computational Journal*, 15 (1), 1998. – pp.12-34.
- Peng. D. and Jones R. An approach based on biological algorithm for three-dimensional shape optimisation with fracture strength constrains. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, Vol. 197, Elsevier, 2008. – pp.4383-4398.
- Piegl L. and Tiller W. *The NURBS Book*, Springer, 1997. - 660 p.
- Pohl E. B. *Watercube: The Book*. Actar, 2008. – 320 p.
- Prautzsch H., Boehm W. and Paluszny M. *Bezier and B-Spline Techniques*. Springer, 2010. – 296 p.
- Radhakrishnan, P. Subramanyan and S. Raju. *CAD/CAM/CIM*. New Age International, V. 2008- 690 p.
- Rajan S.D. and Belegundu S.D. Shape optimal design using fictitious loads. *AIAA Journal*, Vol. 27, 1989. – pp. 102-107.
- Rao R.V. and Savsani V. J. *Mechanical Design Optimization Using Advanced Optimization Techniques*. Springer, 2012. – 332 p.
- Rogers D.F. *An Introduction to NURBS: With Historical Perspective*. Morgan Kaufmann, 2000. – 342 p.
- Rozvany G. I. N., Zhou M. and Sigmund O. Topology optimization in structural design. Chapter 10 in *Advances in Design Optimization*, Ed. Adeli I. H., Chapman and Hall, 1994. – pp. 340–399.
- Russ. T. *Sustainability and Design Ethics*. CRC Press, 2010. – 176 p.
- Salomon D. *Curves and Surfaces for Computer Graphics*. Springer, 2006 – 476 p.
- Saxena An. and Sahay B. *Computer Aided Engineering Design*. 2005. – 393 p.
- Schmidt S. R., Launsby R. G. and Kiemele M. J. *Understanding Industrial Designed Experiments*. Air Academy Press, 4th Ed., 1994. – 768 p.
- Shih R. *Introduction to Finite Element Analysis Using SolidWorks Simulation*. SDC Publication, 2012. – 448 p.
- Simpson T.W., Korte J.J., Mauery T.M. and Mistree F. Comparison of response surface and Kriging models for multidisciplinary design optimization. 7th AIAA/USAF/NASA /ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis & Optimization, AIAA-98-4755, 1998.
- SolidWorks. *ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ SolidWorks 2010*. Dassault System SolidWorks Corporation, 2009, - 550 p.
- Song X. G., Jung J. H., Son J. H., Park J. H., Lee K. H. and Park Y. C. Metamodel-based optimization of a control arm considering strength and durability performance. *An International Compures & Mathematics with Applications*. Elsevier, Vol. 60, N. 4, August 2010. – 976 -980 p.

- Tran P. SolidWorks 2010 Part II - Advanced Techniques. Schroff Development, 2010. - 545 p.
- T-Spline programatūra, 2012 / Internets. –<http://www.tsplines.com/>
- Vanderplaats G. N. Numerical Optimization Techniques for Engineering Design with Applications. 4th Ed., Vanderplaats Research and Development, Inc. 2004. -377 p.
- Vanderplaats G.N. Numerical optimization techniques for engineering design. Vanderplaats Research and Development, Inc, 3rd Ed., 2001. - 449 p.
- Vanderplaats, G.N. Kodiyalam, S., and Miura, H. Structural shape optimization with MSC/Nastran. Computers & Structures, Vol. 40, 1991. – pp. 821-829.
- Vanderplats G.N. Numerical Optimization Techniques for Engineering Design. McGraw-Hill, 1984. -377 p.
- Viana F.A.C. and Haftka R.T. Using multiple surrogates for metamodeling. 7th ASMO-UK/ISSMO International Conference on Engineering Design Optimization, Bath, UK, 2008.
- VisualDOC programatūra / Internets. - <http://vrand.com> Software for Process Integration and Multidisciplinary Design Optimization
- Wang D., Zhang W., Yang J. and Wang Zh. A virtual punching method for shape optimization of openings on curved panels using CAD-based Boolean operations. Computer Aided Design, Vol 44, 2012.- pp. 388-399.
- Weaire D. and Phelan R. A counter-example to Kelvin's conjecture on minimal surfaces, Phil. Mag. Lett. 69, 1994, pp. 107–110.
- Weise Th. Global Optimization Algorithms – Theory and Application. 2nd Ed., University of Science and Technology of China, 2009.-820p.
- Withrow St. and Harris J. Vector Graphics and Illustration: A Master Class in Digital Image-making. RotoVision, 2008, -176 p.
- Wu Zh. An efficient approach for shape optimization of components. International Journal of Mechanics Sciences, Vol. 47, 2005. – pp. 1595-1610.
- Yaghi O.M., O’Keeffe M., Ockwing N.W., Chae H.K., Eddaouidi M. and Kim J. Reticular synthesis and the design of new materials. Nature (423), 12, 2003. - pp. 705-713.
- Yang R.J., Wang N., Tho C.H., Bobineau J.P. and Wang B.P. Metamodeling development for vehicle frontal impact simulation. ASME 2001 DesignEngineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. ASME, Pittsburgh, PA, USA, 2001.
- Zhang B. X., Lin B. and Han L. Zh. Zhang L. Genetic Algorithm-Based Optimization of the Thin-Walled Tube of High Strength Aluminum Alloy in Diamond Turning Process. SolidState Phenomena, Vol. 175, 2011, pp. 347- 351.
- Zienkiewicz O.C. and Campbell J.S. Shape Optimization and Sequential Linear Programming. Chapter 7 in “Optimum Structural Design”: Ed. Gallagher and Zienkiewicz, John Wiley and Son, 1973.– pp. 109- 216.
- Zienkiewicz O.C. and Taylor.R.L. The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics. Butterworth-Heinemann, 6 Ed., 2005. – 752 p.

Zillober C., Schittkowski K. and Moritzen K. Very large scale optimization by sequential convex programming. Optimization Methods and Software, Vol. 19(1) 2004. – pp. 103–120.

Григоров И. Н. Практические конструкции антенн. ДМК, 2005. – 350 с.

Невилль А. М. Свойства бетона. Стройиздат, 1972- 345 с.

Нормы расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – Москва: ГосНИИВ– ВНИИЖТ, 1996.

Сладковский А., Погорелов Д.Ю. Исследование динамического взаимодействия в контакте колесо-рельс при наличии ползунов на колесной паре. // журнал Вісник Східноукраїнського національного університету. – № 5 (2008), с. 88-95.

Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластины и оболочки. Наука, 1966. – 636 с.

## **PIELIKUMI**

## Pielikums 1. Izstrādātā makrosa kods

```
Option Explicit
Dim swApp As SldWorks.SldWorks
Dim swModel As SldWorks.ModelDoc2
Dim retval() As String
Dim i As Integer

Sub main()
FormasOPT.Show

End Sub

Private Sub Add1_Click()

T1 = Spreadsheet1.ActiveCell.Offset(0, 3)
T2 = Spreadsheet1.ActiveCell.Offset(0, 4)
T3 = Spreadsheet1.ActiveCell.Offset(0, 5)
T4 = Spreadsheet1.ActiveCell.Offset(0, 6)

Box2.Text = T1 * 100
Box3.Text = T2 * 100
Box4.Text = T3 * 100
Box5.Text = T4 * 100

End Sub

Private Sub Mass1_Click()

Set swApp = Application.SldWorks
Set swModel = swApp.ActiveDoc

XX1 = Val(Box2.Text) / 100000
XX2 = Val(Box3.Text) / 100000
XX3 = Val(Box4.Text) / 100000
XX4 = Val(Box5.Text) / 100000
XX5 = Val(Box6.Text) / 100000

Set swApp = Application.SldWorks

Set Part = swApp.ActiveDoc

Set Part = swApp.ActiveDoc
boolstatus = Part.Extension.SelectByID2("Sketch1@disk S10-1@Disk 2 +kastities+ antenna", "SKETCH",
0, 0, 0, False, 0, Nothing, 0)
Part.EditSketch
Part.ClearSelection2 True
boolstatus = Part.Extension.SelectByID2("D6@Sketch1@disk S10-1@Disk 2 +kastities+ antenna",
"DIMENSION", -0.06549937062302, -0.00206133248898, -0.1807326436636, False, 0, Nothing, 0)
Dim myDimension As Object
Set myDimension = Part.Parameter("D6@Sketch1@disk S10.Part")
```

```

myDimension.SystemValue = XX1
boolstatus = Part.Extension.SelectByID2("D3@Sketch1@disk S10-1@Disk 2 +kastities+ antenna",
"DIMENSION", -0.05407109416781, 0.009944324099723, -0.2367049411463, False, 0, Nothing, 0)
Set myDimension = Part.Parameter("D3@Sketch1@disk S10.Part")
myDimension.SystemValue = XX2
boolstatus = Part.Extension.SelectByID2("D2@Sketch1@disk S10-1@Disk 2 +kastities+ antenna",
"DIMENSION", -0.06301403626924, -0.007419568964037, -0.2868267809833, False, 0, Nothing, 0)
Set myDimension = Part.Parameter("D2@Sketch1@disk S10.Part")
myDimension.SystemValue = XX3
boolstatus = Part.Extension.SelectByID2("D1@Sketch1@disk S10-1@Disk 2 +kastities+ antenna",
"DIMENSION", -0.06490434941339, -0.01322011813436, -0.3225278340837, False, 0, Nothing, 0)
Set myDimension = Part.Parameter("D1@Sketch1@disk S10.Part")
myDimension.SystemValue = XX4
Part.ClearSelection2 True
Part.SketchManager.InsertSketch True

retval = swModel.GetConfigurationNames()
For i = 0 To UBound(retval)
    swModel.ShowConfiguration2 retval(i)
    swModel.SetUserPreferenceIntegerValue _
        SwConst.swUnitsLinear, SwConst.swCM

    Dim density As Double
    density = Val(Box1.Text) * 1000

    swModel.SetUserPreferenceDoubleValue _
        SwConst.swMaterialPropertyDensity, density
    swModel.SetUserPreferenceStringValue _
        SwConst.swMaterialPropertyCrosshatchPattern, _
            "ISO (Aluminum)"

    Dim massprops As Variant
    Dim status As Long
    massprops = swModel.Extension.GetMassProperties(1, status)

    swModel.AddCustomInfo3 retval(i), _
        "Mass - " & retval(i), _
        SwConst.swCustomInfoText, _
        Format(massprops(5) * 1000, "###0.000000")

    swModel.AddCustomInfo3 retval(i), _
        "Density - " & retval(i), _
        SwConst.swCustomInfoText, _
        Format(density / 1000, "###0.000000")

    swModel.AddCustomInfo3 retval(i), _
        "Volume - " & retval(i), _
        SwConst.swCustomInfoText, _
        Format(massprops(3) * 1000 * 1000, "###0.000000")

```

```
BoxNomer.Text = Val(BoxNomer.Text) + 1
ListBox1.AddItem BoxNomer.Text + " " + "Dens=" + Box1.Text

    Next

    Mas1 = massprops(5) * 1000

    Spreadsheet1.ActiveCell.Formula = Mas1 'mass
    Spreadsheet1.ActiveCell.Offset(0, 1).range("A1").Select
    Spreadsheet1.ActiveCell.Formula = massprops(3) * 1000000000 'volume cm3
    Spreadsheet1.ActiveCell.Offset(0, 1).range("A1").Select
    Spreadsheet1.ActiveCell.Formula = massprops(4) * 10000 'area cm2
    Spreadsheet1.ActiveCell.Offset(0, -2).range("A2").Select

End Sub
```

Pielikums 2. Liekta plāksnīte. Latīņu hiperkuba (LH) eksperimentu plāns un atbildes plāksnītes formas optimizācijai. Forma definēta ar:

I) Punktiem kas savienoti ar taisnēm (att. 2.7b)

Input Parameters	X1	X2	X3	von Mises Stress	URES	ESTRN	Volume	Stress Intensity
Units	mm	mm	mm	N/m <sup>2</sup>	m		mm <sup>3</sup>	N/m <sup>2</sup>
Set1	168,21	128,21	110	90437000	0,00043	0,00034	111007,1	91644000
Set2	110,77	119,74	123,33	92185000	0,000358	0,000343	123321,1	92903000
Set3	125,13	150,77	103,33	93588000	0,000383	0,000342	112981	94799000
Set4	146,67	131,03	156,67	94012000	0,000405	0,000336	104433,7	95027000
Set5	134,1	108,46	100	87557000	0,000366	0,000328	127578,3	95235000
Set6	130,51	125,38	140	93312000	0,000376	0,000333	113832,8	94447000
Set7	103,59	156,41	120	91628000	0,000377	0,000334	112131,7	92887000
Set8	155,64	122,56	223,33	91253000	0,000524	0,000346	93632,3	92658000
Set9	159,23	204,36	130	89312000	0,000522	0,000349	73221,47	94928000
Set10	132,31	176,15	190	89865000	0,00047	0,000353	76981,27	93827000
Set11	144,87	181,79	106,67	90555000	0,00043	0,000361	94791,62	96042000
Set12	137,69	100	173,33	93557000	0,000387	0,000334	118370,3	94579000
Set13	143,08	198,72	150	88895000	0,00048	0,000332	74617,91	94305000
Set14	164,62	159,23	203,33	88126000	0,000549	0,000336	74057,16	96602000
Set15	108,97	173,33	186,67	92459000	0,000436	0,000348	85899,18	93627000
Set16	101,79	187,44	136,67	91781000	0,000406	0,000359	96452,99	93921000
Set17	116,15	111,28	170	91876000	0,00037	0,000333	117176,1	93026000
Set18	105,38	139,49	160	91163000	0,000378	0,000333	108833	92476000
Set19	107,18	116,92	206,67	92319000	0,000403	0,000337	109352,9	93322000
Set20	170	136,67	153,33	92408000	0,000459	0,000371	97271,05	97528000
Set21	126,92	142,31	180	91551000	0,000408	0,000333	98096,04	92425000
Set22	153,85	105,64	133,33	93501000	0,000395	0,000334	119602,5	94579000
Set23	128,72	114,1	213,33	92741000	0,000431	0,00034	105592,4	93812000
Set24	152,05	167,69	166,67	88673000	0,000459	0,000327	82347,78	94480000
Set25	161,03	102,82	183,33	89687000	0,000442	0,000337	111429,8	90832000
Set26	119,74	195,9	113,33	90899000	0,000421	0,000337	94902,93	91837000
Set27	150,26	133,85	193,33	91412000	0,00045	0,000349	94369,13	92508000
Set28	148,46	145,13	116,67	92683000	0,000404	0,000366	106478,5	96062000
Set29	100	178,97	230	89057000	0,000566	0,000349	73297,15	97066000
Set30	157,44	190,26	216,67	95627000	0,000662	0,00036	53760,78	107270000
Set31	117,95	162,05	146,67	92198000	0,000396	0,000337	99379,51	93313000
Set32	135,9	164,87	143,33	91465000	0,000413	0,000362	94293,15	95648000
Set33	112,56	210	196,67	96223000	0,000549	0,000379	63820,5	101760000
Set34	162,82	193,08	176,67	97557000	0,000558	0,000381	62836,39	103140000
Set35	114,36	147,95	210	92043000	0,000447	0,000342	91145,53	93071000
Set36	139,49	153,59	220	88845000	0,000517	0,000318	79497,6	95249000
Set37	123,33	184,62	226,67	94252000	0,000597	0,000374	64338,49	99792000
Set38	166,41	170,51	126,67	91068000	0,000469	0,000341	87946,98	92200000
Set39	141,28	207,18	200	93596000	0,000607	0,000352	54521,37	105200000
Set40	121,54	201,54	163,33	87111000	0,000467	0,000307	75953,04	94668000

## II) Ar NURBS mezgla punktiem (att. 2.7c)

Input Parameters	X1	X2	X3	von Mises Stress	Total Strain Energy	URES	Equivalent Strain	Volume
Units	mm	mm	mm	N/m <sup>2</sup>	N·m*10 <sup>-5</sup>	m		mm <sup>3</sup>
Set1	168,21	128,21	110	92435000	6,68629	0,000444	0,00034	108634,6
Set2	110,77	119,74	123,33	84002000	8,12372	0,000359	0,000324	122103,6
Set3	125,13	150,77	103,33	92678000	5,8737	0,000383	0,000334	113540,9
Set4	146,67	131,03	156,67	93399000	7,81309	0,00041	0,000336	103460,1
Set5	134,1	108,46	100	87667000	5,43212	0,00037	0,000329	126288,2
Set6	130,51	125,38	140	93168000	6,58561	0,000379	0,000333	112543,7
Set7	103,59	156,41	120	93181000	6,8781	0,000375	0,00034	113851,4
Set8	155,64	122,56	223,33	90510000	7,86267	0,000527	0,000517	102377,5
Set9	159,23	204,36	130	85722000	5,57951	0,000508	0,000334	76237,86
Set10	132,31	176,15	190	89136000	5,45041	0,000478	0,00034	73893,38
Set11	144,87	181,79	106,67	91453000	5,58837	0,000426	0,000333	97290,52
Set12	137,69	100	173,33	85276000	8,00927	0,000388	0,00033	123241
Set13	143,08	198,72	150	86632000	4,93737	0,00047	0,00033	76701,31
Set14	164,62	159,23	203,33	88190000	5,19028	0,000566	0,000341	72368,55
Set15	108,97	173,33	186,67	87100000	5,20053	0,000445	0,000312	82675,29
Set16	101,79	187,44	136,67	92650000	8,07747	0,000397	0,000337	101633,4
Set17	116,15	111,28	170	94049000	7,70114	0,000371	0,000331	117655,2
Set18	105,38	139,49	160	92573000	6,41041	0,000379	0,000354	106397
Set19	107,18	116,92	206,67	90540000	6,16467	0,000405	0,000335	109330,5
Set20	170	136,67	153,33	90600000	6,15487	0,00047	0,000342	96438,77
Set21	126,92	142,31	180	91614000	5,294119	0,000411	0,000337	95595,33
Set22	153,85	105,64	133,33	91885000	9,6544	0,000397	0,000341	120917
Set23	128,72	114,1	213,33	152580000	6,89139	0,000431	0,000373	112566,1
Set24	152,05	167,69	166,67	89353000	6,52528	0,000465	0,000346	80146,89
Set25	161,03	102,82	183,33	99141000	9,3938	0,000444	0,000345	118508,5
Set26	119,74	195,9	113,33	91818000	6,46414	0,000403	0,000364	103535,4
Set27	150,26	133,85	193,33	91512000	5,25335	0,000457	0,000339	95109,44
Set28	148,46	145,13	116,67	93380000	8,33728	0,00041	0,000337	104795,6
Set29	100	178,97	230	88655000	5,19604	0,000632	0,000349	65690,3
Set30	157,44	190,26	216,67	96548000	5,19042	0,000696	0,000342	49653,71
Set31	117,95	162,05	146,67	91109000	5,62978	0,000397	0,000336	98708,5
Set32	135,9	164,87	143,33	92053000	7,6938	0,000414	0,000357	93394,35
Set33	112,56	210	196,67	90148000	6,52967	0,000575	0,000356	62564,02
Set34	162,82	193,08	176,67	92121000	5,28363	0,000566	0,000367	60924,53
Set35	114,36	147,95	210	93124000	5,08234	0,000459	0,000368	86352,37
Set36	139,49	153,59	220	85691000	5,44335	0,000532	0,000332	76708,61
Set37	123,33	184,62	226,67	95182000	4,84809	0,000649	0,00034	58346,94
Set38	166,41	170,51	126,67	90900000	5,22564	0,00048	0,000352	86245,06
Set39	141,28	207,18	200	93250000	4,28961	0,000628	0,000349	52424,4
Set40	121,54	201,54	163,33	87088000	5,32143	0,00046	0,000326	78409,9

### III) Ar NURBS daudzstūra atbalsta punktiem (att. 2.7d)

Input Parameters	X1	X2	X3	von Mises Stress	Strain	URES	Strain total energy	Volume
Units	mm	mm	mm	Mpa	10 <sup>-5</sup>	mm	10 <sup>-5</sup>	mm <sup>3</sup>
Set1	168,21	128,21	110	9,19933	35,212	0,452378	5,73033	105378,6533
Set2	110,77	119,74	123,33	8,87343	31,6279	0,357844	4,29518	123252,1661
Set3	125,13	150,77	103,33	9,03124	31,726	0,374065	5,40355	118277,6432
Set4	146,67	131,03	156,67	9,14439	31,1337	0,419038	5,20466	98596,85687
Set5	134,1	108,46	100	8,9796	33,807	0,376108	4,11356	123270,3282
Set6	130,51	125,38	140	9,1291	33,4896	0,382431	4,48977	110774,2309
Set7	103,59	156,41	120	8,98273	32,3787	0,360674	5,32238	120680,1945
Set8	155,64	122,56	223,33	9,52401	34,1374	0,583494	5,71899	77646,75236
Set9	159,23	204,36	130	9,22063	31,8734	0,465069	6,09798	85008,58751
Set10	132,31	176,15	190	9,11884	32,5553	0,44757	5,74752	83163,17938
Set11	144,87	181,79	106,67	8,91456	32,5343	0,409912	4,75097	104247,2781
Set12	137,69	100	173,33	9,07827	34,2312	0,407444	4,76177	105239,4734
Set13	143,08	198,72	150	9,28675	32,0183	0,434028	4,55552	86199,55383
Set14	164,62	159,23	203,33	9,29966	33,6693	0,580621	5,3512	68172,07694
Set15	108,97	173,33	186,67	9,0689	29,656	0,406251	5,43435	95982,77453
Set16	101,79	187,44	136,67	8,99268	32,0486	0,371284	4,76746	111384,6995
Set17	116,15	111,28	170	9,10198	32,6751	0,378006	5,37246	111663,4828
Set18	105,38	139,49	160	9,02934	33,7334	0,370019	4,70751	112402,3611
Set19	107,18	116,92	206,67	9,12072	35,4545	0,410937	4,93155	105258,0152
Set20	170	136,67	153,33	8,72369	31,9047	0,489266	5,48489	88920,74447
Set21	126,92	142,31	180	9,04902	34,32	0,408433	4,91445	97292,67056
Set22	153,85	105,64	133,33	9,22103	33,7734	0,415844	4,13509	108505,8423
Set23	128,72	114,1	213,33	9,72567	37,18	0,456599	4,844427	94999,06109
Set24	152,05	167,69	166,67	9,14738	33,5805	0,455791	5,35144	83973,61152
Set25	161,03	102,82	183,33	9,35064	32,0639	0,482168	5,232	92782,46175
Set26	119,74	195,9	113,33	9,12226	32,2749	0,382166	5,09499	109704,8606
Set27	150,26	133,85	193,33	9,30359	33,1784	0,475602	5,5715	85503,55618
Set28	148,46	145,13	116,67	9,10814	34,2554	0,408367	4,34495	106798,7744
Set29	100	178,97	230	9,24702	34,646	0,510046	6,04829	86195,70157
Set30	157,44	190,26	216,67	9,92626	40,3159	0,638311	5,0067	57302,3807
Set31	117,95	162,05	146,67	9,243221	37,9858	0,380707	4,28633	106304,2562
Set32	135,9	164,87	143,33	9,0961	33,6584	0,402327	5,43064	99236,45513
Set33	112,56	210	196,67	8,82884	36,8416	0,450408	5,30383	82125,92109
Set34	162,82	193,08	176,67	9,41254	32,5186	0,529692	6,67638	68565,38689
Set35	114,36	147,95	210	9,40131	33,5032	0,441027	6,24806	93103,35039
Set36	139,49	153,59	220	9,65204	35,3821	0,530397	4,923	76559,64111
Set37	123,33	184,62	226,67	8,78079	32,7756	0,547694	5,77532	73412,08021
Set38	166,41	170,51	126,67	9,32098	33,1433	0,46937	5,83066	90991,02465
Set39	141,28	207,18	200	9,20193	33,1749	0,522003	5,55823	66743,06091
Set40	121,54	201,54	163,33	9,24169	31,2318	0,409949	5,55437	90979,16188

Pielikums 3. Liektas plāksnītes fizikālo eksperimentu rezultāti

Eksperiments №	Paraugs	Sabrukšanas spēks $P$ [N]	Stiprība salīdzinājumā ar paraugu <b>E</b>	$\delta$ pie sabrukšanas [mm]
	<b>E</b>			
1	1	1416.48		26.3713
2	2	1414.16		26.8082
3	3	1469.74		28.2063
	<i>Vid</i>	<b>1433.46</b>	<b>(100%)</b>	<b>27.1286</b>
	<b>F</b>			
4	1	233.013		5.7982
5	2	232.367		5.7631
6	3	237.093		5.7815
7	4	239.094		5.9312
	<i>Vid</i>	<b>235.39175</b>	<b>16.40%</b>	<b>5.8185</b>
	<b>G</b>			
8	1	1355.2		11.2665
9	2	1357.47		11.4962
10	3	1303.45		11.3663
11	4	1359.52		11.2885
	<i>Vid</i>	<b>1343.91</b>	<b>93.80%</b>	<b>11.3544</b>
12	<b>A</b>	<b>240.149</b>	<b>16.80%</b>	5.0212